



移动阅读

张文林, 文怀忠, 林鑫, 等, 2023. 四川木里梭罗沟金矿床载金黄铁矿原位微量元素特征[J]. 沉积与特提斯地质, 43(1): 77–86. doi: [10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.08004](https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.08004)

ZHANG W L, WEN H Z, LIN X, et al., 2023. The in-situ trace elements of gold-bearing pyrites from Suoluogou gold deposit, Muli, Sichuan[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 43(1): 77–86. doi: [10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.08004](https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.08004)

四川木里梭罗沟金矿床载金黄铁矿原位微量元素特征

张文林¹, 文怀忠¹, 林鑫¹, 袁兆平¹, 曹华文²

(1. 四川省地质矿产勘查开发局区域地质调查队, 四川 成都 610213; 2. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081)

摘要: 甘孜–理塘缝合带是四川重要的金矿带之一。梭罗沟大型金矿床是该带上的典型矿床, 但其矿床成因仍存在争议。为了准确厘定其矿床成因, 本文对梭罗沟金矿床中的它形和自形(五角十二面体)的载金黄铁矿进行了 LA-ICP-MS 原位微量元素分析。结果显示梭罗沟它形黄铁矿元素含量变化较小, 较为集中, 而自形黄铁矿具有明显的核–幔–边结构, 元素含量变化范围较大。总体上, 两种黄铁矿中 Au 与 As 均具有明显的正相关性, 但 Au 与 FeS₂ 和 Co/Ni 值具有负相关性。它形黄铁矿和自形黄铁矿的 Co/Ni 值分别为 0.2 和 57.1, 两者都具有较高的 Au 和较低的 Ag 含量; 这表明它形黄铁矿主体来源于沉积作用, 受后期成矿热液改造, 而自形黄铁矿属于热液成因。梭罗沟金矿床成矿过程为火山–沉积岩中的 Au 在变质热液作用下再活化富集的结果, 属于典型的造山型金矿床。

关键词: 造山型金矿床; 黄铁矿; 原位微量元素; 甘孜–理塘缝合带; 木里; 梭罗沟

中图分类号: P618.51

文献标识码: A

The in-situ trace elements of gold-bearing pyrites from Suoluogou gold deposit, Muli, Sichuan

ZHANG Wenlin¹, WEN Huaizhong¹, LIN Xin¹, YUAN Zhaoping¹, CAO Huawen²

(1. Regional Geological survey party, Sichuan Bureau of Geological Exploration and Exploration of Mineral Resources, Chengdu 610213, China; 2. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, China)

Abstract: The Soluogou is a large-scale gold deposit in Garze-Litang Suture, but its genesis is still controversial. In order to probe into the genesis of the Soluogou deposit, LA-ICP-MS in-situ trace element analyses of anhedral and euhedral pyritohedron gold-bearing pyrites from the Soluogou gold deposit have been carried out. The results show that the variation range of elements' contents of anhedral pyrite in Soluogou is narrow, while euhedral pyrite has obvious core-mantle-edge structure and its variation range of elements' contents is large. On the whole, Au in pyrite is positively correlated with As and negatively correlated with FeS₂ and Co/Ni values, existing in the form of lattice gold. The Co/Ni values of anhedral and euhedral pyrite are 0.2 and 57.1, respectively. Both anhedral and euhedral pyrites have a high Au content and a low Ag content. It is concluded that anhedral pyrite is derived from sedimentation while euhedral pyrite is formed in hydrothermal process. The Soluogou gold deposit is a typical orogenic gold deposit, which is characterized by the reactivation and enrichment of Au in volcanic-sedimentary rocks under the action of metamorphic hydrothermal.

收稿日期: 2021-05-07; 改回日期: 2021-08-15; 责任编辑: 黄春梅

作者简介: 张文林(1986—), 男, 工程师, 主要从事地质矿产勘查工作。E-mail: 86875276@qq.com

资助项目: 四川省地质局区调队科研项目(四川省木里县梭罗沟金矿构造期次研究)

Key words: orogenic gold deposits; pyrite; In-situ trace element; Garze-Litang suture zone; Muli; Suoluogou deposit

0 引言

梭罗沟金矿床位于四川西部的甘孜-理塘缝合带,是甘孜-理塘金成矿带上最重要的金矿床之一,其推断资源量达超大型规模(张文林等, 2020)。但是其矿床成因尚未定论,一部分学者认为其属于与变质作用相关的造山型金矿床(Sun et al., 2020),另一部分学者更强调隐伏的花岗岩浆期后热液的作用(刘书生等, 2015)。在造山型金矿床中,黄铁矿是主要的载金矿物之一(Groves et al., 2020)。黄铁矿具有复杂而稳定的结构特征,能够记录成矿流体的物理化学性质和成矿演化过程(Tang et al., 2019)。近年来,随着原位元素成分分析测试技术的发展,黄铁矿原位元素成分分析已经被越来越多地应用到各类矿床成因研究中(Saravanan Chinnasamy et al., 2021)。在造山型金矿床中,金的成矿过程与黄铁矿和毒砂(含砷黄铁矿)的关系非常密切。因此,可以通过黄铁矿的精细研究,反演金矿床的成矿流体变化过程(Hu et al., 2019)。本文在梭罗沟采集金成矿热液阶段的它形黄铁矿和自形(五角十二面体)黄铁矿样品,利用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱法(LA-ICP-MS)原位分析技术,分析黄铁矿的微量元素特征,以期获得黄铁矿的精细地球化学特征,进而推断梭罗沟金矿床成矿流体演化过程和矿床成因。

1 区域地质背景

研究区位于甘孜-理塘缝合带(蛇绿混杂岩带)南段(图 1),属于特提斯构造域东段(次琼等, 2020, 解超明等, 2020)。甘孜-理塘缝合带是西南三江特提斯造山带与松潘-甘孜造山带的重要组成部分,形成有大量的金矿床(点),是中咱-义敦古岛弧与扬子地块碰撞的缝合线,代表着在晚二叠世—早三叠世打开并在晚三叠世末期闭合的甘孜-理塘洋盆。该地区先后经历了早古生代被动大陆边缘活动、晚古生代—三叠纪古特提斯大洋扩张、侏罗纪早期的弧-陆碰撞造山、新生代陆内汇聚—转换—走滑造山的隆升剥蚀等多个演化阶段(张文林等, 2015)。

研究区地层属玉树-中甸地层分区之甘孜-理

塘构造-地层小区,缝合带内岩性主要为二叠纪—三叠纪的蛇绿岩套、灰岩等岩块与砂板岩基质组成的(蛇绿)构造混杂岩,主要包括洋盆系统的远洋硅灰泥沉积,洋底-洋脊拉斑玄武岩、辉绿岩岩墙群、块状辉长岩和变质橄榄岩+堆晶橄榄岩,洋内弧环境形成的岛弧型玄武岩及碎屑岩,洋岛海山环境形成的块状玄武岩和块状灰岩组成的曲嘎寺蛇绿岩组;二叠系—三叠系浊流沉积的碎屑岩组成的理塘岩群;此外,还包括外来构造岩片和基底残片的混杂堆积。

常见的火山岩石构造组合类型有二叠纪—三叠纪的洋中脊和洋岛火山岩组合、古岛弧火山岩组合和陆缘裂谷火山岩组合等。研究区位于松潘-甘孜变质区之义敦变质带,该带北东以甘孜-理塘深大断裂为界,西以玉树-中甸断裂为界,呈近南北向带状展布(图 1a)。受变质的地层为三叠系义敦群及上二叠统的火山岩-碎屑岩建造等,岩石构造组合为凝灰质砂岩、砾岩、板岩、变火山岩和结晶灰岩等,整体上变质程度较浅,属低绿片岩相的绢云母-绿泥石带。

2 矿床地质特征

梭罗沟矿区位于四川西部的木里县境内,具有成为大型—超大型金矿床的潜力,现累计探明金资源量超 60 吨,平均品位约 3.7 克/吨,是甘孜-理塘金矿带上查明资源储量最大的岩金矿床。大地构造位于甘孜-理塘缝合带南段。地质特征十分复杂,矿区内包含外来岩块、三叠纪的洋岛-海山组合、洋盆系统等物质组成;其中,基质主体由理塘岩群组成、岩块主要为曲嘎寺岩组及外来岩块。构造上,受弧-陆碰撞引起的东西向挤压-松弛和北部唐央穹隆隆升造成南北向挤压共同作用。

矿区地层具有“整体无序、局部有序”的特点。出露有三叠系理塘岩群和曲嘎寺组,其中根据不同的岩石组合特征将理塘岩群进一步划分为四个岩性段,曲嘎寺组划分为三个岩性段(图 2)。理塘岩群分布于矿区中北部,整体呈北东向展布。理塘岩群划分为四个岩性段,由下至上依次为砂岩、凝灰质砂岩夹板岩段、片岩段、砂岩夹板岩段和板岩夹砂岩段。曲嘎寺组分布于矿区南部,整体近东

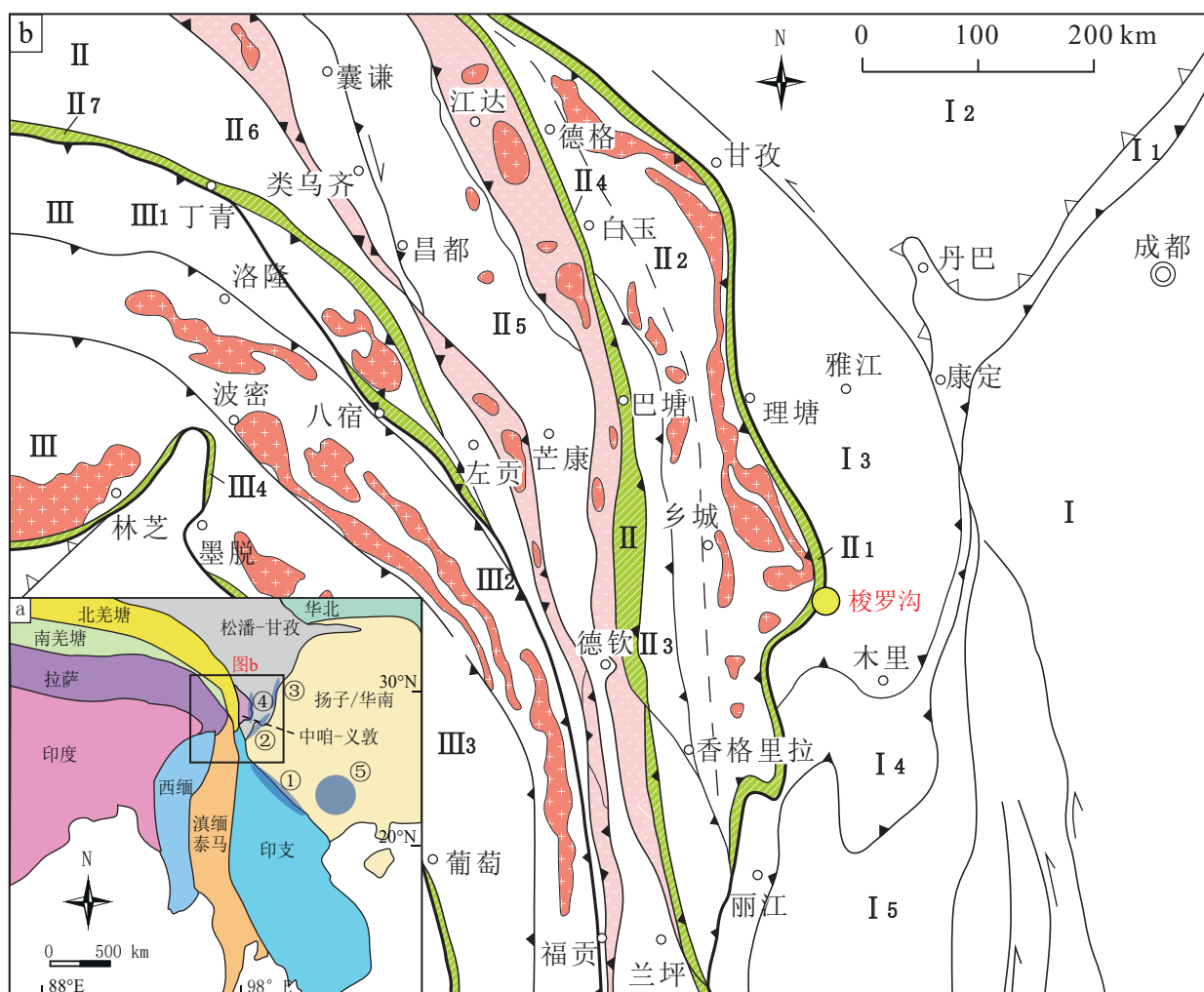


图 a 中的金成矿带：①—哀牢山金矿带，②—大渡河—石棉金矿带，③—丹巴—燕子沟金矿带，④—甘孜—理塘—木里金矿带，⑤—滇黔桂（右江）金矿带；图 b 中的大地构造单元：I—扬子陆块：I 1—龙门山逆冲带，I 2—巴颜喀拉前陆盆地，I 3—雅江残余盆地，I 4—盐源—丽江陆缘坳陷带，I 5—楚雄前陆盆地；II—“三江”多岛弧盆系：II 1—甘孜—理塘结合带，II 2—德格—乡城岛弧（义敦岛弧），II 3—中咱—香格里拉地块，II 4—金沙江—哀牢山结合带，II 5—昌都—普洱地块，II 6—左贡地块，II 7—班公湖—怒江—昌宁—孟连结合带；III—冈底斯—高黎贡山—腾冲湖盆系：III 1—沙丁—洛隆弧前盆地，III 2—波密—腾冲岩浆弧，III 3—下察隅岩浆弧，III 4—雅鲁藏布江结合带。

图 1 西南“三江”地区大地构造单元划分示意图（据 Xu et al., 2021 修改）

Fig. 1 Tectonic units of the Sanjiang area in southwest China (modified after Xu et al., 2021)

西向延展。区域上,该岩组是由“五位一体”构成的蛇绿岩组合,包括有蛇纹石化超镁铁岩、堆晶辉长岩、镁铁质岩墙、镁铁质熔岩、长英质侵入岩和深海沉积物等,在矿区以镁铁质熔岩单元出露最为广泛,缺失堆晶辉长岩单元。矿区镁铁质熔岩单元根据岩性、岩性组合特点,可将区内曲嘎寺组划分为三个岩性段,依次为蚀变中基性凝灰岩段、玄武岩段、玄武岩与凝灰岩韵律互层段。其他单元规模小,呈透镜体状出露,有构造岩片产出的超基性岩、辉长岩、辉绿岩、硅质岩岩块。

矿区属于甘孜—理塘缝合带南段,岩浆活动强烈且频繁,二叠—三叠纪最为强烈,为区内主要的岩浆活动时期,岩石类型有以镁铁质岩类、超镁铁质岩类为代表的基性—超基性岩。此外,矿区发育有渐新世幔源煌斑岩、云辉斜煌岩,呈脉状出露于理塘岩群与曲嘎寺组接触带,并切割金矿体,属于成矿期后幔源岩浆活动。

矿区褶皱不发育,理塘岩群地层总体为向南或南南东倾斜的单斜构造;断层构造较为复杂,以近东西向、近南北向、北西向、北东向四组断裂组成

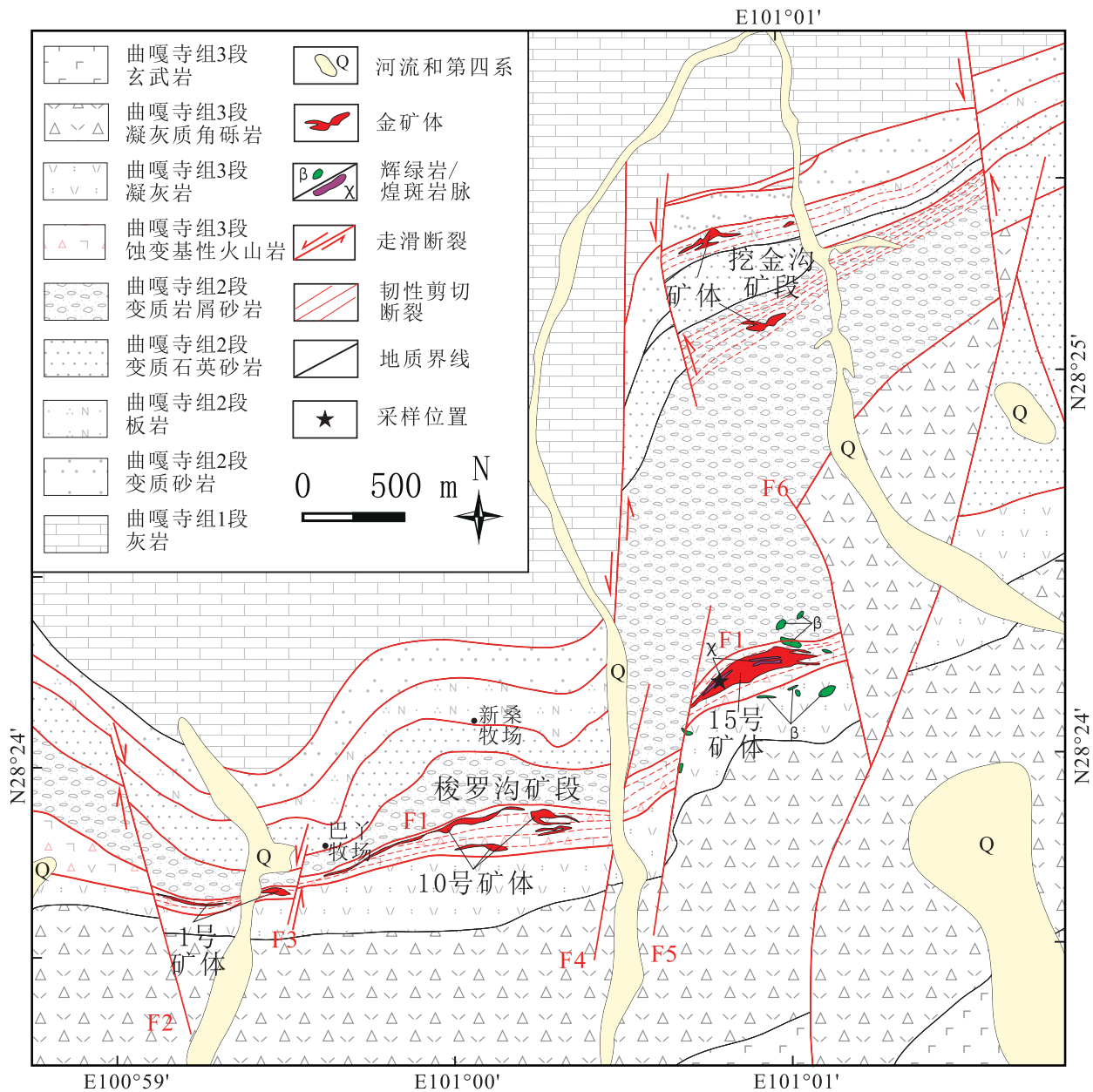


图2 梭罗沟金矿床地质简图 (据张文林等, 2020 修改)

Fig. 2 Geological sketch of Suoluogou gold deposit (modified after Zhang et al., 2020)

基本构造格架。其中近东西向断裂(F1)系矿区内主干断裂,具有多期活动和继承性复合特点(图2)。F1断裂发育于理塘岩群与曲嘎寺组一段中基性火山岩转换面,由西向东横贯整个矿区,是矿区内的主要控矿断裂,长度近10 km,宽200~600 m。断面产状以倾向北为主,倾角50°~70°。总体呈向南弯凸的近东西向展布,由于受后期断裂构造破坏,在矿区内被切割错位成数段。

梭罗沟金矿矿化带沿F1断裂带分布,矿化主要发生于F1断裂南盘及断层破碎带内。F1断裂

带总体走向近东西向,矿化带范围包括断裂南盘的部分基性火山岩和断层破碎带内的断层角砾岩及局部断裂带北盘的砂板岩。15号矿体是矿区规模最大的矿体,矿体地表出露最高海拔4 040 m,最低海拔3 750 m,相对高差290 m(图3)。

梭罗沟金矿区矿化类型包括原生矿石和氧化矿石两种。原生矿石主要有绢云母化白云石化蚀变岩、蚀变碎裂岩、黄铁矿(毒砂)矿化中基性火山岩、高岭石化白云石化蚀变岩、斜黝帘石化白云石化蚀变岩和硅化白云石化蚀变岩等。原生矿矿石

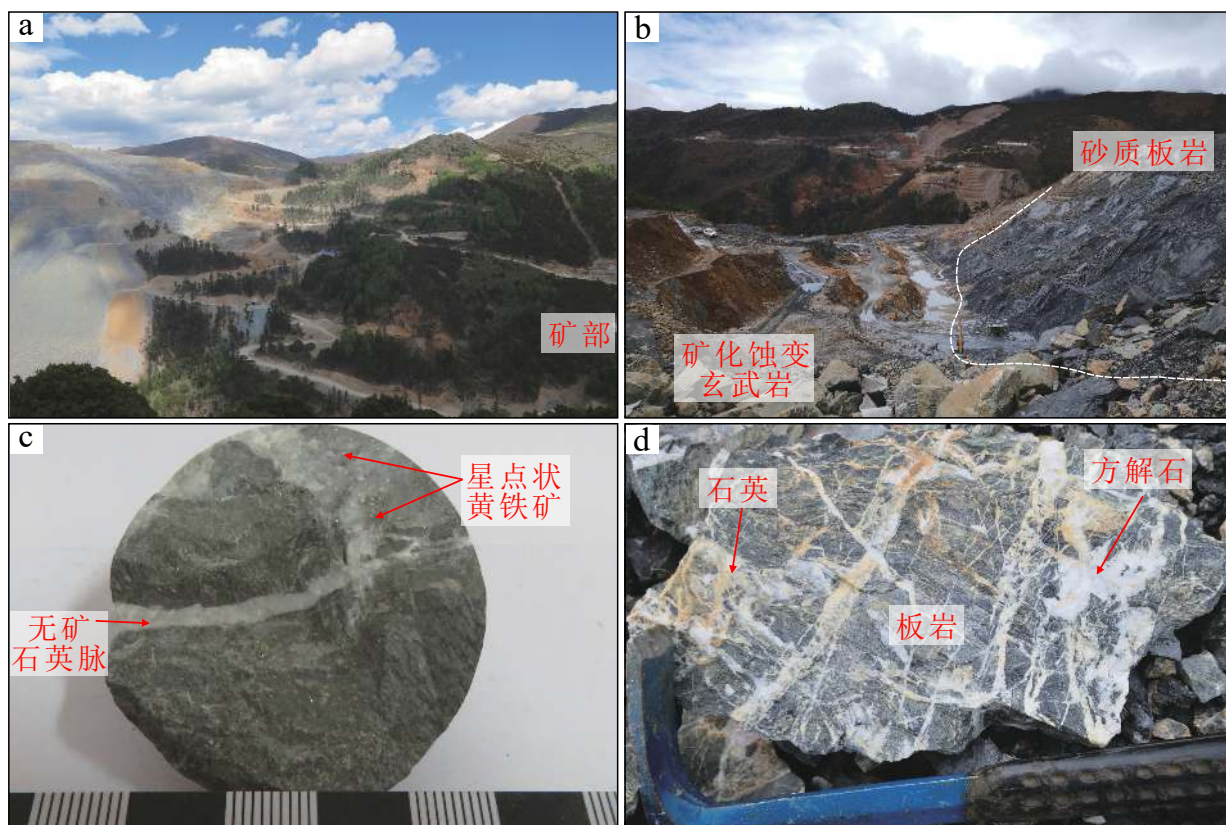


图3 梭罗沟金矿床矿区和样品野外地质特征

Fig. 3 Outcrop Photos and samples from Soluogou gold deposit

结构主要为残余火山结构、残余斑状结构、纤维粒状变晶结构, 矿石构造主要为脉状、浸染状构造, 次有块状构造、片状构造、角砾状构造。梭罗沟矿床矿化阶段可以分为三个期次: 早期为石英-绢云母组合, 成分为硅质、隐晶质石英、绢云母和少量的它形黄铁矿, 金矿化较弱; 中期为石英-硫化物组合, 成分以石英-硫化物的细网脉为主, 黄铁矿和毒砂为自形—半自形, 是梭罗沟金的主要成矿期, 也是本次研究的主要对象; 晚期为石英-碳酸盐组合, 表现为方解石-白云石-石英的细网脉。

主成矿期的原生矿金矿石中矿物组成有十余种, 主要金属矿物为黄铁矿, 毒砂, 次为铜矿物, 自然金极为少见, 粒度小于 0.1 mm。主要非金属矿物为绢云母、白云石(方解石)和石英, 次为钠长石、次闪石、绿泥石等。黄铁矿、毒砂在矿石中含量为 1%~21%, 其中黄铁矿占金属矿物的 50%~70%, 毒砂占 30%~40%。黄铁矿呈它形粒状, 立方体, 五角十二面体, 粒度一般 0.05~0.2 mm。它形粒状黄铁矿在矿石中多呈团块状或草莓状集合体及细脉状产出。立方体、五角十二面体黄铁矿多呈星点状、浸染状

或细脉状产出。毒砂呈自形的菱形, 延长状菱形或针状, 局部可见放射状晶簇, 粒度一般在 0.05~0.3 mm。

3 测试方法

本次采集了主成矿期的载金它形黄铁矿和自形(五角十二面体)黄铁矿样品各一个, 采集于受 F1 断裂控制的 15 号矿体采坑(图 3b), 分别测试两颗黄铁矿。它形黄铁矿(样品编号 SLG-12)测试分析 12 点, 自形黄铁矿(SLG-T2)测试分析 16 点。

利用 LA-ICP-MS 分析技术, 梭罗沟黄铁矿原位微区微量元素的含量分析测试在武汉上谱分析科技有限责任公司完成。GeolasPro 激光剥蚀系统由 COMPexPro 102 ArF 193 nm 准分子激光器和 MicroLas 光学系统组成, ICP-MS 型号为 Agilent 7700e。激光剥蚀过程中采用氦气作载气、氩气为补偿气以调节灵敏度, 二者在进入 ICP 之前通过一个 T 型接头混合, 激光剥蚀系统配置有信号平滑装置。本次分析的激光束斑和频率分别为 32 μm 和 5 Hz。单矿物微量元素含量处理中采用玻璃标准物质 NIST 610, NIST 612 进行多外标无内标校正, USGS 的硫

化物标准物质 MASS-1 作为监控标样验证校正方法的可靠性。每个时间分辨分析数据包括大约 20~30 s 空白信号和 50 s 样品信号。对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正以及元素含量计算)采用软件 ICPMSDataCal 完成。微量元素的检测限一般为 $0.1 \times 10^{-6} \sim 0.001 \times 10^{-6}$ 。详细的仪器参数和测试过程见 Cao et al.(2021)和曹华文等(2020)。

4 测试结果

梭罗沟黄铁矿原位 LA-ICP-MS 打点位置示意图见图 4。它形黄铁矿的元素含量变化范围较小,比如 Au 和 As 的变化范围分别为 $12.7 \times 10^{-6} \sim 50.4 \times 10^{-6}$ 和 $1.1 \times 10^{-2} \sim 2.5 \times 10^{-2}$, 平均值分别为 31.47×10^{-6} ($n=12$) 和 1.9×10^{-2} ($n=12$)。但是自形黄铁矿的元素含量变化范围较大,其 Au 和 As 的变化范围分别为 $0.1 \times 10^{-6} \sim 92.0 \times 10^{-6}$ 和 $0.01 \times 10^{-2} \sim 2.7 \times 10^{-2}$, 平均值分别为 30.3×10^{-6} ($n=16$) 和 1.3×10^{-2} ($n=16$)。同样的,其 FeS_2 含量,也具有相似的特征;它形黄铁矿和自形黄铁矿的变化范围分别为 $94.2 \times 10^{-2} \sim 97.9 \times 10^{-2}$ 和 $95.9 \times 10^{-2} \sim 99.0 \times 10^{-2}$, 平均值分别为 95.6×10^{-2} 和 97.6×10^{-2} 。值得注意的是它形黄铁矿具有较低的 Co 和高的 Ni 含量,及较低的 Co/Ni 比值,其 Co 和 Ni 平均值分别为 18.0×10^{-6} 和 117.6×10^{-6} 。自形黄铁矿的 Co 和 Ni 含量平均值分别为 89.0×10^{-6} 和 1.8×10^{-6} 。因此,自形黄铁矿的 Co/Ni 值远远大于它形黄铁矿的值,两者分别为

57.1 和 0.2。它形和自形黄铁矿的 Ag 含量均较低,但是它形黄铁矿中的含量高于自形黄铁矿一个数量级,平均值分别为 2.5×10^{-6} 和 0.29×10^{-6} 。其他元素含量也具有相似的特征,详细的含量见附表 1*和图 5。

5 讨论

5.1 梭罗沟载金黄铁矿成因

梭罗沟黄铁矿中的 Au 元素含量与 As 具有明显的正相关性,Au 与 FeS_2 和 Co/Ni 值则具有明显的负相关性(图 5),而与其他元素的含量相关性不明显。梭罗沟它形和自形黄铁矿中的 As 含量均较高,平均值分别为 1.9×10^{-2} 和 1.3×10^{-2} ;而金含量较低(低于 100×10^{-6}),因此梭罗沟金矿床黄铁矿中的 Au 不饱和,以晶格金(Au^{+1})形式存在(韩亮等, 2021)。黄铁矿中砷以 As^{-} 形式替代 S^{-} ,导致黄铁矿晶格发生变形,因此较大的 Au^{+} 可进入黄铁矿晶格(赵晓燕等, 2019)。这表明,As 元素替换黄铁矿中的 S 元素,从而导致 Au 元素替代 Fe 元素混入黄铁矿中(Reich et al., 2005)。因此,黄铁矿中 As 元素的增加(大于 1×10^{-2})和毒砂化蚀变,是梭罗沟矿床中 Au 元素富集的关键条件和找矿标志。

相对于自形黄铁矿,它形黄铁矿除 Fe 含量较低外,却具有较高的 As、Ni、Cu、Zn、Ag、Sb、W、Ti、Cr 等元素(图 5)。表明随着热液活动的演化,从它形黄铁矿到自形黄铁矿形成的过程中,随着 Fe 含量的增加,大部分微量元素均有所降低,比如

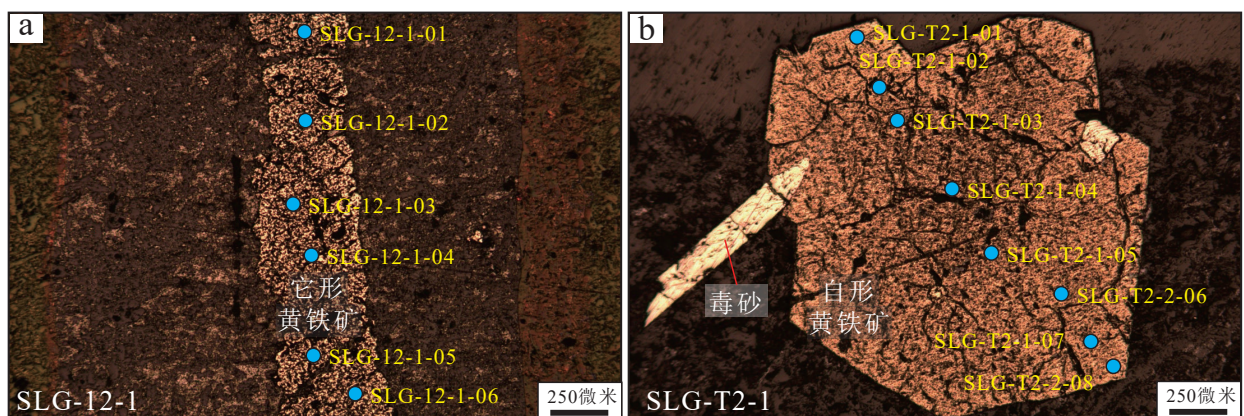


图 4 梭罗沟金矿床它形 (SLG-12) 和自形 (SLG-T2) 黄铁矿 LA-ICP-MS 打点位置示意图和镜下特征

Fig. 4 Microphotographs showing LA-ICP-MS locations and characteristics of anhedral (SLG-12) and euhedral (SLG-T2) pyrites from Suoluogou gold deposit

*数据资料联系编辑部或者登录本刊网站获取。

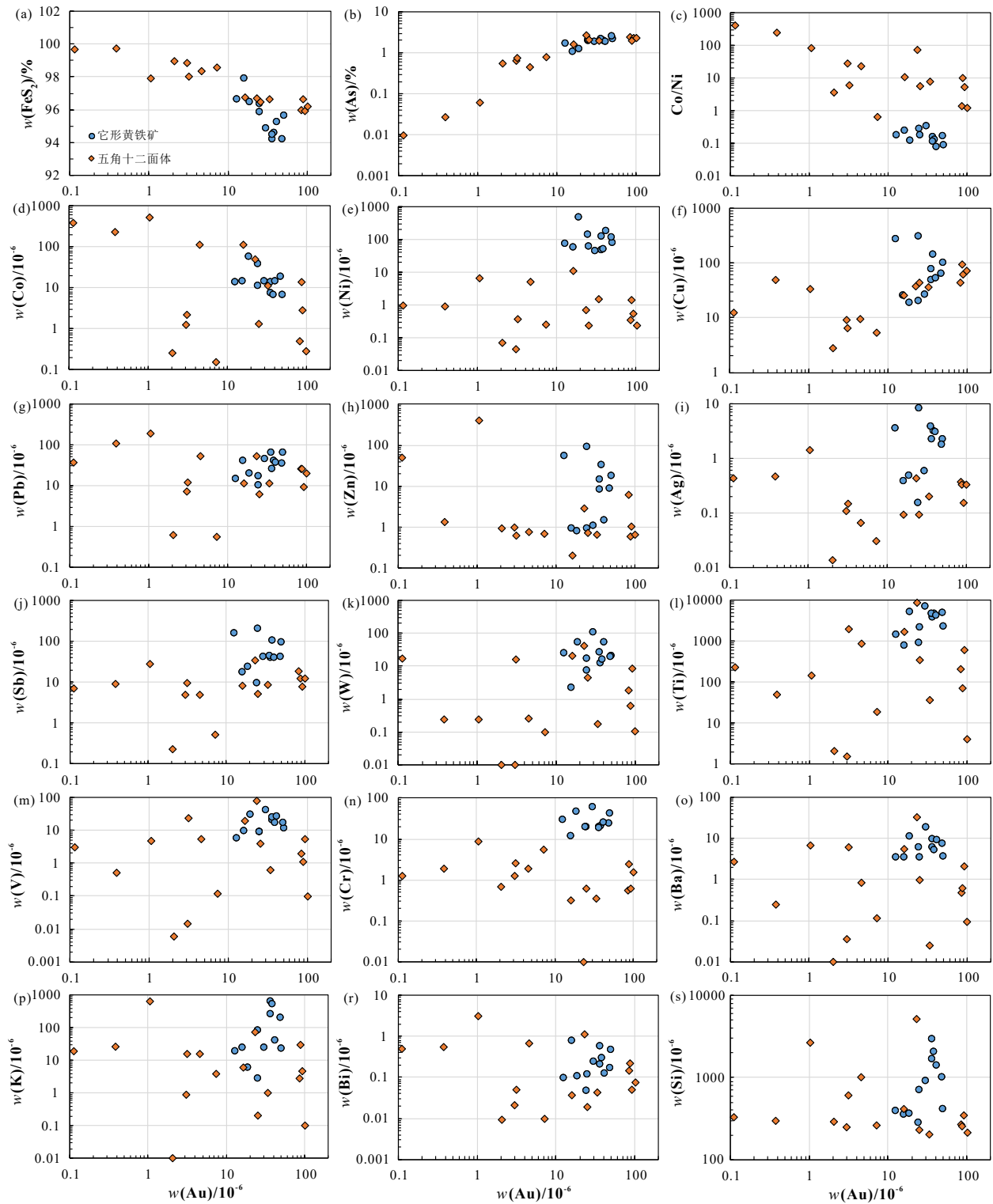


图5 梭罗沟金矿床黄铁矿微量元素散点图

Fig. 5 Scatter diagrams of trace elements of pyrites from Suoluogou gold deposit

Au 和 Ag 元素含量平均值变化分别为 $31.47 \times 10^{-6} \rightarrow 30.3 \times 10^{-6}$ 和 $2.5 \times 10^{-6} \rightarrow 0.29 \times 10^{-6}$; Cu 和 Sb 的元素含量平均值变化分别为 $95.6 \times 10^{-6} \rightarrow 33.6 \times 10^{-6}$ 和 $70.0 \times 10^{-6} \rightarrow 10.9 \times 10^{-6}$; Ti 和 W 的元素含量平均值

变化分别为 $3493 \times 10^{-6} \rightarrow 923 \times 10^{-6}$ 和 $30.3 \times 10^{-6} \rightarrow 7.0 \times 10^{-6}$ 。由于自形黄铁矿的元素含量变化范围较大, 虽然其 Pb、Zn 和 Bi 的元素含量大部分较低, 但是个别分析点的高值导致其平均值高于它形黄

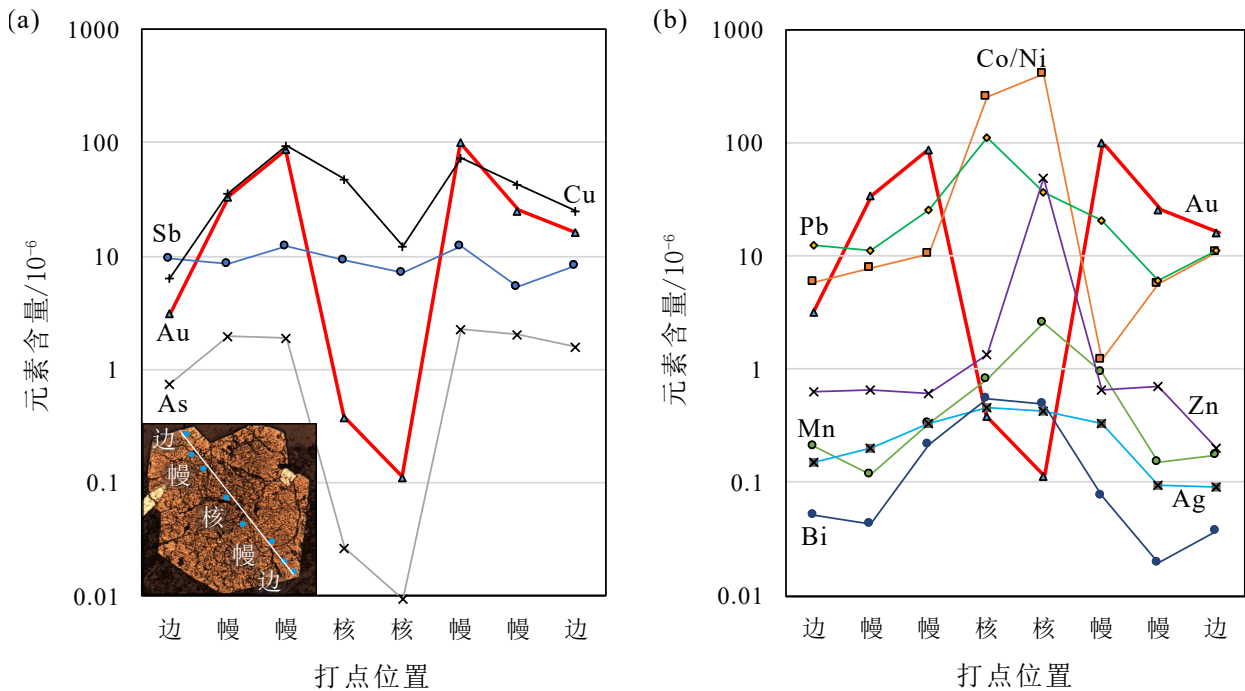


图 6 梭罗沟金矿床自形黄铁矿 (SLG-T2-2) 核-幔-边元素含量变化图

Fig. 6 Diagrams showing elements' changes of euhedral pyrite (SLG-T2-2) from the core to the edge in Suoluogou gold deposit

铁矿。它形和自形黄铁矿的 Pb、Zn 和 Bi 元素平均值变化分别为 $35.2 \times 10^{-6} \rightarrow 36.3 \times 10^{-6}$ 、 $19.9 \times 10^{-6} \rightarrow 30.2 \times 10^{-6}$ 和 $0.3 \times 10^{-6} \rightarrow 0.4 \times 10^{-6}$ 。

梭罗沟它形黄铁矿的微量元素含量变化范围较小,且不存在环带特征,但是自形(五角十二面体)黄铁矿的元素含量变化范围广,且存在明显的环带特征(图 6),可以划分为核-幔-边结构。以 SLG-T2-2 样品的自形黄铁矿为例(图 6),核部的 Au、As、Cu 和 Sb 含量较低,最低值分别为 0.1×10^{-6} 、 0.01×10^{-2} 、 12.4×10^{-6} 和 7.1×10^{-6} ,幔部最高值分别为 100.7×10^{-6} 、 2.26×10^{-2} 、 94.0×10^{-6} 和 12.5×10^{-6} ,边部的含量再次降低 3.2×10^{-6} 、 0.7×10^{-2} 、 6.5×10^{-6} 和 8.2×10^{-6} 。Au、As、Cu 和 Sb 这四种元素从核部到边部,整体表现为从最低值增大到最高值,然后再降低。而 Co、Pb、Zn、Mn、Ag、Bi 和 Fe 等元素和 Co/Ni 在核部含量最高,到幔部和边部依次降低。但是边部的 Si、Ti、V、Sr 和 Nb 等元素含量最高。

整体上,它形黄铁矿的元素变化范围均小于自形黄铁矿,这可能与自形黄铁矿具有明显的核幔边结构有关。核幔边结构的存在表明自形黄铁矿具有多期次、多阶段和多种成因形成的特征(Xu et al., 2020)。对此解释可能为,自形黄铁矿核部为第

一期热液活动,Co、Pb、Zn、Mn、Ag、Bi 和 Fe 等元素含量较高,而 Au、As、Cu 和 Sb 含量较低;幔部为第二期热液活动,富含 Au、As、Cu 和 Sb 含量,是矿区内主要的金成矿期;边部为第三期热液活动,富含 Si、Ti、V、Sr 和 Nb 等元素。而它形黄铁矿主要与沉积作用有关,可能受热液活动改造(Grant et al., 2018)。

5.2 梭罗沟金矿床成因

它形黄铁矿和自形黄铁矿的 Co/Ni 分别为 0.2 和 57.1。热液流体中通常较高温度下形成的黄铁矿的 Co 含量也相对较高,而 Ni 含量受温度影响变化不大,因此其 Co/Ni 值较高(李杰等, 2020)。所以可以根据黄铁矿的 Co/Ni 值判断黄铁矿形成的环境(Hu et al., 2019)。一般情况下,沉积黄铁矿的形成温度最低,热液黄铁矿温度较高,而海底喷流沉积黄铁矿的形成温度最高。梭罗沟它形黄铁矿和自形黄铁矿的 Co/Ni 分别小于 1 和大于 1,表明它形黄铁矿成因主要与沉积环境相关,可能受后期热液活动改造,而自形黄铁矿与热液作用相关(肖凡等, 2020)。同时,自形黄铁矿的核部的 Co/Ni 值最高(图 6b),高达 252~402,因此自形黄铁矿的核部不可能是早阶段它形黄铁矿的残留。

梭罗沟它形和自形黄铁矿的 As 含量高,而 Ag 含量低,因此其 As/Ag 值较高,分别为 22 327 和 112 907; Sb 含量较高,而 Bi 含量较低, Sb/Bi 值分别为 457 和 111。梭罗沟 As/Ag 和 Sb/Bi 值与变质成因的黄铁矿最为接近(韩亮等, 2021),尤其是自形黄铁矿具有异常高的 As/Ag 值,表明其是一个与变质流体相关的造山型金矿床(韩亮等, 2021)。这与前人根据流体包裹体研究的结果一致(杨永飞等, 2019)。梭罗沟黄铁矿 Re-Os 同位素结果为 238 ± 52 Ma(Nie et al., 2018),表明金矿床形成于二叠纪—三叠纪时期。甘孜—理塘缝合带发育大量的早二叠世—晚三叠世洋岛型岩石组合(严松涛等, 2020),此时属于成熟的大洋地壳和洋盆环境。印支期(三叠纪)的甘孜—理塘古特提斯洋洋俯冲和洋盆闭合,甘孜—理塘缝合带形成。因此,梭罗沟金矿床黄铁矿形成时代与甘孜—理塘缝合带造山运动时间完全一致,进一步支持梭罗沟矿床成因属于造山型金矿。

6 结论

(1)梭罗沟它形黄铁矿元素含量变化范围小,而自形(五角十二面体)黄铁矿具有明显的核—幔—边结构,元素含量变化范围较大。自形黄铁矿具有三期热液活动,其幔部代表的第二期热液活动富含 Au,是主要的金成矿期。

(2)梭罗沟黄铁矿中 Au 与 As 具有明显的正相关性,但是 Au 与 FeS_2 和 Co/Ni 值具有负相关性,表明可能梭罗沟金矿以晶格金形式存在。

(3)它形黄铁矿和自形黄铁矿的 Co/Ni 值分别为 0.2 和 57.1,它形黄铁矿来源于沉积作用,受后期热液活动改造,而自形黄铁矿是热液成因。

(4)梭罗沟金矿床成矿过程为火山—沉积岩中的 Au 在变质热液作用下再活化富集的结果,属于典型的造山型金矿床。

References

- Cao H W, Li G M, Zhang L K, et al., 2020. Monazite U-Th-Pb age of Liemai Eocene granites in the southern Tibet and its geological implications[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 40 (2) : 31 – 42 (in Chinese with English abstract).
- Cao H W, Li G M, Zhang R Q, et al., 2021. Genesis of the Cuonadong tin polymetallic deposit in the Tethyan Himalaya: Evidence from geology, geochronology, fluid inclusions and multiple isotopes[J]. *Gondwana Research*, 92: 72 – 101.
- Ci Q, Yongzhong L D, AWang D Z, et al., 2020. Zircon U-Pb dating for the Quxu granitic complex in the Gangdise belt, Tibet, and its geological significance[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 40 (2) : 116 – 128 (in Chinese with English abstract).
- Grant H L J, Hannington M D, Petersen S, et al., 2018. Constraints on the behavior of trace elements in the actively-forming TAG deposit, Mid-Atlantic Ridge, based on LA-ICP-MS analyses of pyrite[J]. *Chemical Geology*, 498: 45 – 71.
- Groves D I, Santosh M, Deng J, et al., 2020. A holistic model for the origin of orogenic gold deposits and its implications for exploration[J]. *Mineralium Deposita*, 55: 275 – 292.
- Han L, Ding J Y, Fan M S, et al., 2021. Genesis of the Zhengchong Gold Deposit in the Central Part of the Jiangnan Orogenic Belt: Evidences from Fluid Inclusions and Trace Elements of Pyrite[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 40 (2) : 382 – 399 (in Chinese with English abstract).
- Hu X K, Tang L, Zhang S T, et al., 2019. In situ trace element and sulfur isotope of pyrite constrain ore genesis in the Shapoling molybdenum deposit, East Qinling Orogen, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 105: 123 – 136.
- Li J, Song M C, Liang J L, et al., 2020. Source of ore forming fluids of the Jiaojia deeply-seated gold deposit: Evidences from trace elements and sulfur helium argon isotopes of pyrite[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 36 (1) : 297-31. (in Chinese with English abstract).
- Liu S S, Fan W Y, Nie F, et al., 2015. Geological characteristics and ore-controlling factors analysis of Suoluogou gold deposit, muli County, Sichuan Province[J]. *Gold*, 36 (6) : 8 – 13 (in Chinese with English abstract).
- Nie F, Liu S, Shi M, et al., 2018. New Re-Os Dating of Auriferous Pyrite from the Suoluogou Large Gold Deposit in Muli County, West Sichuan Province[J]. *Acta Geologica Sinica (English edition)*, 92 (3) : 1270 – 1271.
- 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.
- Saravanan Chinnasamy S, Hazarika P, Pal D, et al., 2021. Pyrite Textures and Trace Element Compositions from the Granodiorite-Hosted Gold Deposit at Jonnagiri, Eastern Dharwar Craton, India: Implications for Gold Mineralization Processes[J]. *Economic Geology*, 116 (3) : 559 – 579.
- Sun P, Wang Q, Li H, et al., 2020. Geology and pyrite sulfur isotopes of the Suoluogou gold deposit: implication for crustal continuum model of orogenic gold deposit in northwestern margin of Yangtze Craton, SW China[J]. *Ore Geology Reviews*, 122: 103487.
- Tang L, Hu X K, Santosh M, et al., 2019. Multistage processes linked to tectonic transition in the genesis of orogenic gold deposit: A case study from the Shangong lode deposit, East Qinling, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 111: 102998.
- Xiao F, Ban Y Z, Fan F P, et al., 2020. Research on zircon U-Pb, S-

- Pb isotopes and trace elements of pyrite from the Dongji Au (Ag) deposit in Zhenghe County, Fujian Province[J]. *Geology in China*, 47 (2) : 375-393. (in Chinese with English abstract) .
- Xie C M, Li C, Li G M, et al., 2020. The research progress and problem of the Sumdo Paleo-Tethys Ocean, Tibet[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 40 (2) : 1-13 (in Chinese with English abstract).
- Xu B, Hou Z Q, Griffin W L, et al., 2021. Cenozoic lithospheric architecture and metallogenesis in Southeastern Tibet[J]. *Earth-Science Reviews*, 214: 103472.
- Xu L G, Kong Z G, Qu J F, et al., 2020. Metallogenic model of the Jinchang Au-Ni deposit in the Ailaoshan belt, SW China, determined on the basis of pyrite trace element contents, in-situ sulfur isotope composition and PGE geochemistry[J]. *Ore Geology Reviews*, 120: 103415.
- Yan S T, Tan C H, Duan Y H, et al., 2020. The discovery of the ocean island rock association in the middle part of the Ganzi-Litang Ophiolite Mélange Belt and its implication for tectonic evolution[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94 (2) : 439-444. (in Chinese with English abstract) .
- Yang Y F, Liu S S, Nie F, et al., 2019. Fluid inclusion constraint on origin of Suoluogou Au deposit, Muli County, Sichuan Province[J]. *Mineral Deposits*, 38 (2) : 261-276 (in Chinese with English abstract).
- Zhang W L, Cao H W, Yang Z M, et al., 2015. Geochemical Characteristics and Genesis of Lamprophyres of the Cenozoic from the Suoluogou Gold Deposit, Sichuan Province, China[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 34 (1) : 110-119 (in Chinese with English abstract).
- Zhang W L, Xi X Y, Yu X H, et al., 2020. Characteristics of ore-forming fluid in Suoluogou gold deposit, Muli, Sichuan Province: Evidence of fluid inclusions and C-H-O isotopes[J]. *Mineralogy and Petrology*, 40 (3) : 80-91 (in Chinese with English abstract).
- Zhao X Y, Yang Z S, Zhang X, et al., 2019. In Situ Trace Element Analysis of Pyrite from Bangbu Orogenic Gold Deposit and Its Metallogenic Significance[J]. *Earth Science*, 44 (6) : 2052-2062 (in Chinese with English abstract).
- ## 附中文参考文献
- 曹华文, 李光明, 张林奎, 等, 2020. 西藏山南列麦始新世花岗岩独居石 U-Th-Pb 年龄及地质意义[J]. *沉积与特提斯地质*, 40 (2) : 31-42.
- 次琼, 永忠拉达, 阿旺旦增, 等, 2020. 西藏冈底斯岩带曲水杂岩体锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *沉积与特提斯地质*, 40 (2) : 116-128.
- 韩亮, 丁俊英, 范明森, 等, 2021. 江南造山带中段正冲金矿床成因: 来自流体包裹体和黄铁矿微量元素的证据[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 40 (2) : 382-399.
- 李杰, 宋明春, 梁金龙, 等, 2020. 焦家深部金矿床成矿流体来源: 来自黄铁矿微量元素及 S-He-Ar 同位素的约束[J]. *岩石学报*, 36 (1) : 297-313.
- 刘书生, 范文玉, 聂飞, 等, 2015. 四川木里梭罗沟金矿床地质特征及控矿因素分析[J]. *黄金*, 36 (6) : 8-13.
- 肖凡, 班宜忠, 范飞鹏, 等, 2020. 福建政和县东际金(银)矿床黄铁矿微量元素和硫-铅同位素及锆石年龄研究[J]. *中国地质*, 47 (2) : 375-393.
- 解超明, 李才, 李光明, 等, 2020. 西藏松多古特提斯洋研究进展与存在问题[J]. *沉积与特提斯地质*, 40 (2) : 1-13.
- 严松涛, 谭昌海, 段阳海, 等, 2020. 甘孜-理塘蛇绿混杂岩带中段洋岛型岩石组合的发现及其对构造演化的指示意义[J]. *地质学报*, 94 (2) : 439-449.
- 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.
- 张文林, 曹华文, 杨志民, 等, 2015. 四川梭罗沟大型金矿区新生代碱性煌斑岩脉地球化学特征及其地质意义[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 34 (1) : 110-119.
- 张文林, 席孝义, 余旭辉, 等, 2020. 四川木里梭罗沟金矿床成矿流体特征: 流体包裹体及 C-H-O 同位素的证据[J]. *矿物岩石*, 40 (3) : 80-91.
- 赵晓燕, 杨竹森, 张雄, 等, 2019. 邦布造山型金矿床黄铁矿原位微量元素特征及其成矿意义[J]. *地球科学*, 44 (6) : 2052-2062.