

doi: 10.12029/gc20210420

田冲, 张文高, 何虎军, 杨兴科, 韩珂, 王晓虎, 吴玉. 2021. 黔西南架底金矿床载金黄铁矿的矿物学特征及金的赋存规律研究[J]. 中国地质, 48(4): 1255–1266.

Tian Chong, Zhang Wengao, He Hujun, Yang Xingke, Han Ke, Wang Xiaohu, Wu Yu. 2021. Mineralogical characteristics of gold-bearing pyrite and gold occurrence regularity of the Jiadi gold deposit in southwestern Guizhou Province[J]. *Geology in China*, 48(4): 1255–1266(in Chinese with English abstract).

黔西南架底金矿床载金黄铁矿的矿物学特征 及金的赋存规律研究

田冲¹, 张文高², 何虎军¹, 杨兴科¹, 韩珂¹, 王晓虎², 吴玉³

(1. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 2. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;
3. 核工业北京地质研究院, 北京 100029)

摘要: 黔西南地区是中国卡林型金矿的主要产地之一, 架底金矿作为黔西南地区近年来在玄武岩中新发现的卡林型金矿床, 其金的赋存状态一直备受关注。前人研究表明, 含砷黄铁矿是架底金矿的主要载金矿物, 然而对架底金矿载金黄铁矿以及金的赋存规律一直缺乏深入的研究。文章结合野外实际调研以及室内显微岩相观察研究, 首先对矿区黄铁矿进行了期次的划分; 然后利用电子探针微区成分分析方法对不同期次的黄铁矿进行研究, 结果显示: 架底金矿的黄铁矿中, S、As 具有明显的负相关性, Au、As 存在一定的相关关系, 成矿前黄铁矿与成矿期、成矿后的黄铁矿核部具有高 S、Fe, 低 As、Au 等相似的特征, 成矿期黄铁矿的环带具有高 As、Au 的特征, 与成矿后的环带(高 As 不含 Au)相比较具明显差异, 两者属于不同的热液事件。据此判断矿区载金黄铁矿的结晶顺序为: 草莓状低砷无环带黄铁矿→含砷环带黄铁矿(含金)以及均质无环带的细粒黄铁矿→高砷环带黄铁矿(不含金)。这一结论对架底金矿找矿勘查工作具有一定的指示意义。

关键词: 架底金矿; 电子探针; 含砷黄铁矿; 环带结构; 微量元素; 矿产勘查工程; 贵州省
中图分类号: P575.1 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2021)04-1255-12

Mineralogical characteristics of gold-bearing pyrite and gold occurrence regularity of the Jiadi gold deposit in southwestern Guizhou Province

TIAN Chong¹, ZHANG Wengao², HE Hujun¹, YANG Xingke¹, HAN Ke¹, WANG Xiaohu², WU Yu³

(1. School of Earth Sciences and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

2. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China; 3. Beijing Institute of Geology of Nuclear Industry, Beijing 100029, China)

Abstract: Southwestern Guizhou is one of the main producing areas of Carlin-type gold deposits in China. The Jiadi gold deposit is

收稿日期: 2020-07-15; 改回日期: 2021-05-25

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20190161)、中国地质科学院基本科研业务费项目(DZLXJK201904)、国家自然科学基金项目(41902214)和中国核工业地质局铀矿地质科研项目(201922-2)联合资助。

作者简介: 田冲, 男, 1996年生, 硕士生, 从事矿田构造与矿产勘查研究工作; E-mail: 727477887@qq.com。

通讯作者: 张文高, 男, 1988年生, 助理研究员, 从事矿田构造与找矿预测工作; E-mail: zhangwengao@geomech.ac.cn。

a newly discovered Carlin-type one hosted in basalt in southwestern Guizhou in recent years, and the occurrence state of gold has long been the focus of attention. Previous studies have shown that arsenic-bearing pyrite is the main gold-bearing mineral in the Jiadi gold deposit. However, there has been a lack of in-depth research on the gold-bearing pyrite and the gold occurrence law in the Jiadi gold deposit. Based on the field investigation and indoor microlithographic observation, the pyrites in the mine were divided into different phases first; then, the electronic probe analysis method was used to study the pyrites of different phases. The results show that S and As of pyrite have an obvious negative correlation, and Au and As have a certain positive correlation. Ore-predating pyrite, ore-forming pyrite and post-ore pyrite share similarity of high contents of S, Fe and low contents of As, Au. The ring of the ore-forming pyrite has the characteristics of high As and Au, different that of the post-ore pyrite (high As without Au), indicating that two types of pyrites belong to different hydrothermal events. The crystallization sequence of the gold-bearing pyrite in the mine is summarized as follows: Strawberry-like acyclic pyrite of low-arsenic→arsenic, ringing pyrite (containing gold) and homogeneous apyrite fine-grained pyrite→high-arsenic ring pyrite (without gold). This conclusion has certain directive significance for the prospecting and exploration in the Jiadi gold deposit.

Key words: Jiadi gold deposit; electronic probe; arsenic-containing pyrite; ring structure; trace elements; mineral exploration engineering; Guizhou Province

About the first author: TIAN Chong, male, born in 1996, master candidate, engaged in ore field structure and mineral exploration research; E-mail: 727477887@qq.com.

About the corresponding author: ZHANG Wengao, male, born in 1988, assistant researcher, engaged in ore field structure and prospecting prediction.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey (No.DD20190161), Foundation of China Academy of Geological Science(No.DZLXJK201904), National Natural Science Foundation of China (No.41902214) and China Nuclear Industry Geology Bureau Uranium Mine Geological Research Project (No.201922-2).

1 引 言

卡林型金矿通常以碳酸盐岩为主的沉积岩为赋矿围岩,金以不可见金的形式存在于硫化物之中;围岩蚀变以硅化、去碳酸盐岩化、黏土化等为主;发育大量中低温蚀变热液矿物组合为主要特征(Hofstra et al., 2000)。架底金矿是处于黔西南峨眉山玄武岩分布区的原生型卡林型金矿,因其容矿岩石主要为玄武岩,具有不同于赋矿围岩为碳酸盐岩的特殊性,故称为赋存在玄武岩中的卡林型金矿。其大地构造位置处于右江褶皱带与扬子板块结合部位的扬子板块一侧,至今探明金资源储量达大型金矿规模,是滇黔桂“金三角”地区较典型的原生卡林型金矿床之一。前人对架底金矿的矿床地质特征(杨天才等, 2016; 马健等, 2019)、地球化学特征(王大福, 2015; 何金坪等, 2018; 赵富远等, 2018)、成矿作用及成矿模式(曾昭红等, 2014; 马健等, 2019)等方面已经开展了大量工作,对理解矿区地质特征、成矿作用过程、成矿物质来源等提供了重要依据。在金矿控矿构造研究方面,架底金矿受NE向莲花山背斜控制,

近EW向背斜和莲花山背斜的叠加位置是金矿床(点)产出的有利部位(曾国平, 2018)。黔西南卡林型金矿的主要载金矿物为含砷黄铁矿,通常发育有富砷环带结构,金赋存于环带结构当中(刘建中等, 2007; 陈懋弘等, 2009; Large et al., 2009; Su et al., 2012);黄铁矿的不同环带记录了不同时期的流体信息,是成矿过程和成矿事件的“黑匣子”(赵静等, 2019);As与黄铁矿中Au的含量密切相关,还原环境下,As通常以-1价替代S⁻进入黄铁矿(Stromberg et al., 2019),氧化环境下,As³⁺则以替换Fe²⁺的形式存在(Deditius et al., 2008)。当Au/As > 0.2时,金以Au⁰形式存在,当Au/As < 0.2时,金以Au⁺形式赋存于黄铁矿晶格当中(Reich et al., 2005)。然而,由于对架底金矿载金矿物的矿物学以及金的赋存规律的研究相对缺乏,影响了对矿区成矿过程的精确刻画。因此,本次研究对矿区中不同期次的黄铁矿的形貌、矿物组合进行对比,分析不同期次黄铁矿的矿物学特征,并通过电子探针微区分析不同期次黄铁矿微量元素含量特征,探讨金的富集规律,还原矿区可能的成矿过程。

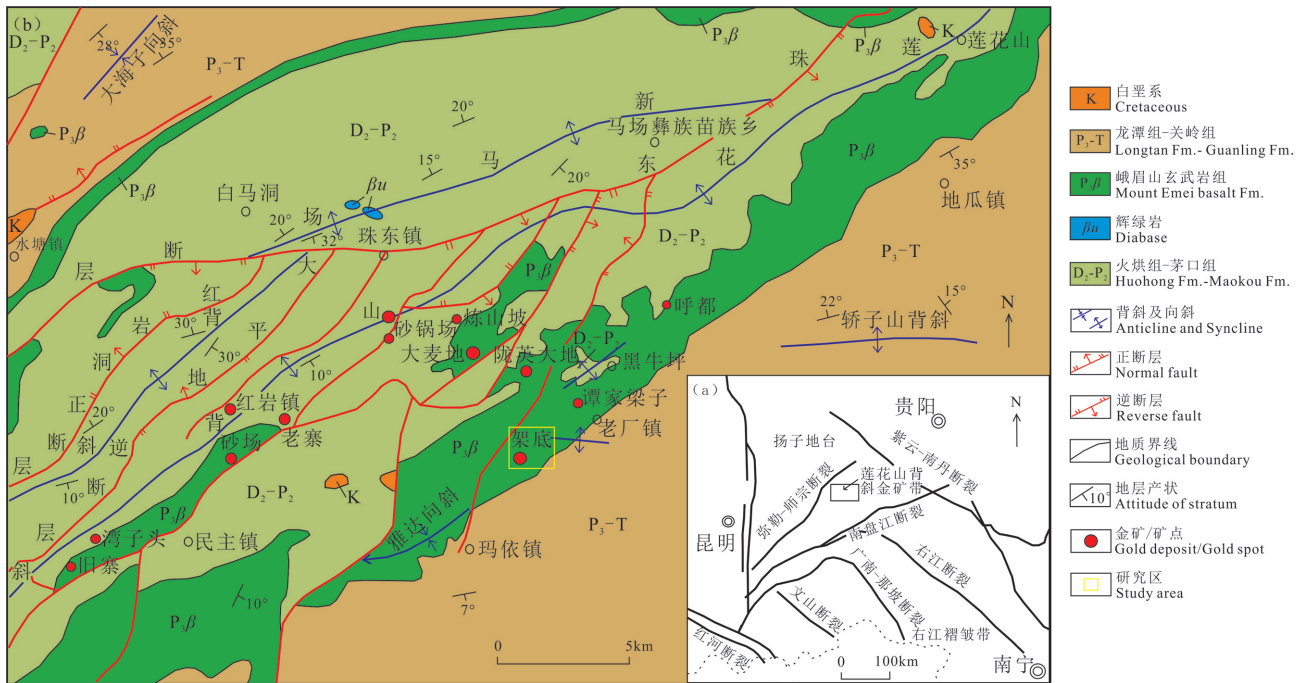


图1 莲花山背斜金矿带地质简图(据赵富远等,2018)

Fig.1 Geological map of gold belt in the Lianhua mountain anticline(after Zhao Fuyuan et al., 2018)

2 成矿地质背景及矿区地质特征

滇黔桂“金三角”地区的卡林型金矿均产于右江盆地之中,大地构造位置处于华南板块西南缘(图1a),区内深大断裂发育,深源流体沿断裂活动强烈,构造活动强烈(吴玉等,2019),三叠纪碰撞造山结束后,在燕山期板内伸展过程中,右江褶皱带发生岩石圈松弛和伸展垮塌,从而导致古老基底发生部分熔融,形成大规模岩浆作用(肖昌浩等,2018a,2018b,2018c),为矿产的形成提供了必要条件。黔西南矿集区的形成与区域构造演化关系密切,自晚古生代以来先后经历了被动大陆边缘裂谷阶段(海西期, D_1-P_2)→弧后裂谷盆地发展到弧后前陆盆地阶段(印支期, T)→陆内挤压收缩变形阶段(燕山早期, J_1-K_1)→地幔上涌-地壳伸展阶段(燕山晚期, K_2-E) (姚书振等,2013)。其中印支造山晚期与燕山造山晚期,区域构造应力由挤压向伸展转换,为黔西南众多卡林型金矿的主要形成时期(陈懋弘等,2007)。

架底金矿位于黔西南矿集区莲花山背斜的南东翼(图1b),与大麦地、砂锅厂、砂厂、旧寨、干沟、湾子头、炼山坡、红岩洞、陇英大地、老寨、谭家梁子等金矿(点)一起组成北东向分布的莲花山背斜金成矿带(吴小红等,2013)。

矿区出露的地层由老到新依次为:中二叠统茅口组(P_2m),岩性主要为白云质灰岩;上二叠统峨眉山玄武岩组($P_3\beta$),根据岩性差异可分为3段:一段主要岩性为墨绿色块状玄武岩与浅灰至深灰色凝灰岩不等厚互层;二段主要岩性为蚀变火山角砾岩,是矿区的主要含金岩性层之一。三段主要岩性为玄武质火山角砾岩。上二叠统龙潭组(P_3l),岩性以粉砂岩、黏土岩为主;第四系(Q)主要为坡积物。构造蚀变体(SBT)是发育在中二叠统茅口组与上二叠统峨眉山玄武岩组的不整合面上,一套由区域构造作用形成的并经热液蚀变的构造蚀变岩石,为一套灰褐色强硅化灰岩、灰色强硅化角砾岩、角砾状凝灰岩及沉凝灰岩组合,也是矿区的主要含金岩性层之一。莲花山背斜是区内出露的主要背斜构造,矿体受背斜控制作用明显(图2),通过构造形迹分析认为其至少经历过两期构造运动(曾国平,2018):第一期为晚印支期NNW-SSE向的挤压应力,该挤压作用形成倾向南东的NE向莲花山背斜;第二期为NW-SE向的伸展,使背斜中段存在一部分EW向的走向。莲花山背斜总体呈反“S”状,叠加褶皱作用使莲花山背斜各部位应力分布不均,影响了背斜的形变程度,特别是不协调褶皱的转换部位,使得矿体分布于NE向与EW向弯转过渡部分的张性空

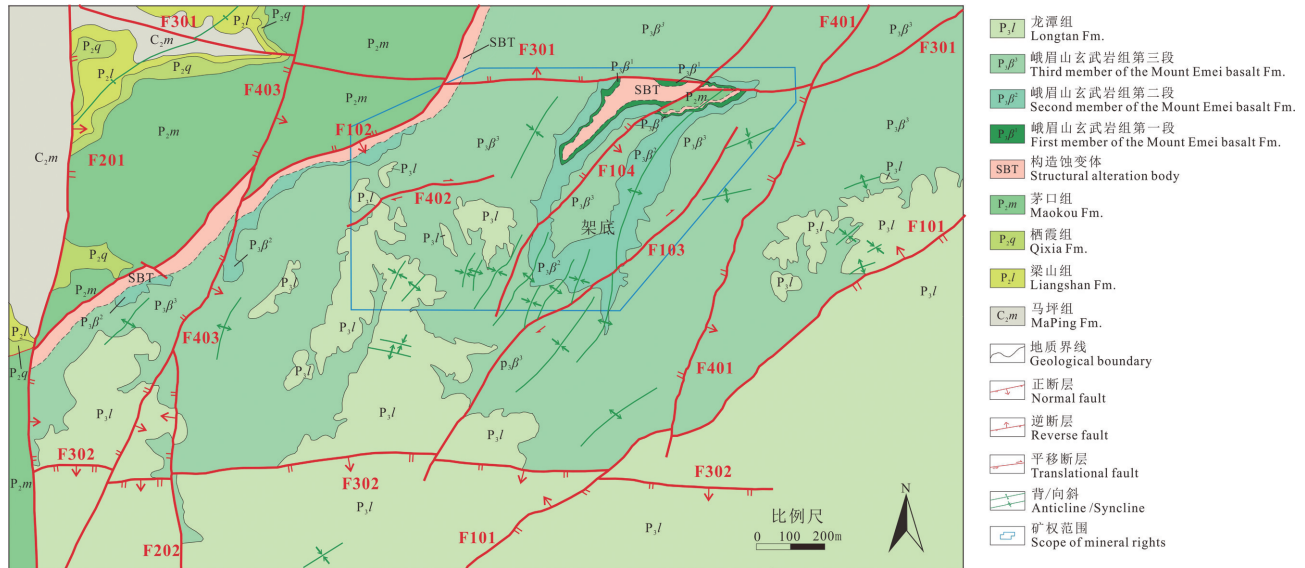


图2 架底金矿区构造图(据贵州省盘县架底金矿详查工作报告,2018^①)

Fig.2 Structural map of the Jiadi gold mine (after the detailed exploration report of Jiadi Gold deposit, 2018^①)

间,背斜和逆断层形成了良好的控矿、导矿构造,为成矿热液的运移和沉淀提供了有利的通道及储存空间。

根据钻探揭露区内金矿体的分布空间位置(图3),将赋存于茅口组与峨眉山玄武岩的不整合界面之间的构造蚀变体中的金矿体编号为Ⅰ号矿体,矿体产状似层状、透镜体状,赋矿岩石主要为凝灰岩,其次为蚀变火山角砾岩;赋于玄武岩二段火山角砾岩中的金矿体编号为Ⅱ号矿体,矿体产状与岩层产状基本一致,呈似层状、透镜状产出,赋矿岩石岩性简单,主要为蚀变火山角砾岩。矿石中金属矿物种类简单,以黄铁矿为主,次为毒砂、雄雌黄,少见黄铜矿、辉锑矿等;非金属矿物主要有白云石、石英、绢云母,次要成分为方解石、高岭石、钾长石等,其中黄铁矿是最主要的载金矿物。矿石结构主要有自形一半自形—他形粒状结构,草莓状结构、环带结构。矿石构造主要有块状、浸染状、细脉状、角砾状构造等。架底金矿区内的热液蚀变类型以硅化、黄铁矿化为主,次为毒砂化、白云石化、黏土化、雄雌黄化、绿泥石化等。其中与成矿关系密切的有硅化、黄铁矿化、毒砂化、黏土化、白云石化。

3 样品特征及测试方法

3.1 样品特征

本次测试的样品取自钻孔及构造蚀变体的矿体当中,基于野外认识和室内镜下的观察,将不同

形态的黄铁矿划分为3个期次:成矿前、成矿期、成矿后。

黔西南地区金矿成矿作用被认为是成岩后事件,并非同沉积形成(陈懋弘等,2007;赵静等,2019),草莓状黄铁矿是沉积期黄铁矿的典型代表,因此划分为成矿前的黄铁矿,其结构主要为草莓状,单体颗粒较小,几微米到几十微米之间,通常呈集合体块状产出,没有环带发育(图4a),草莓状黄铁矿的形成与细菌还原海水硫酸盐的过程有关(赵静等,2016)。成矿期的黄铁矿,一种呈自形一半自形(图4b、e),粒径较大,几十微米到100 μm之间不等,核部有较多的裂隙发育,在背散射下可以明显地看到在核部周围发育有环带(图4c),通常呈脉状产出;另一种为均质结构的五角十二面体的黄铁矿(图4d),粒径在50 μm左右,无环带结构。自形一半自形的含砷环带黄铁矿和细粒五角十二面体的黄铁矿也是黔西南地区的主要载金矿物(刘建中等,2007;陈懋弘等,2009)。成矿后的黄铁矿颗粒较大,粒径多在200 μm及以上,自形程度高,多为立方体和不规则状产出,同样发育有环带结构。成矿期和成矿后的黄铁矿都属于热液成因的黄铁矿,通常宏观表现为成矿后的黄铁矿脉切断或切穿成矿期黄铁矿脉(图4f),成矿后的黄铁矿粒度、自形程度明显高于成矿期的黄铁矿,微观尺度从矿物伴生关系来看,呈自形一半自形—他形粒状的毒砂常与成矿后的黄铁矿连

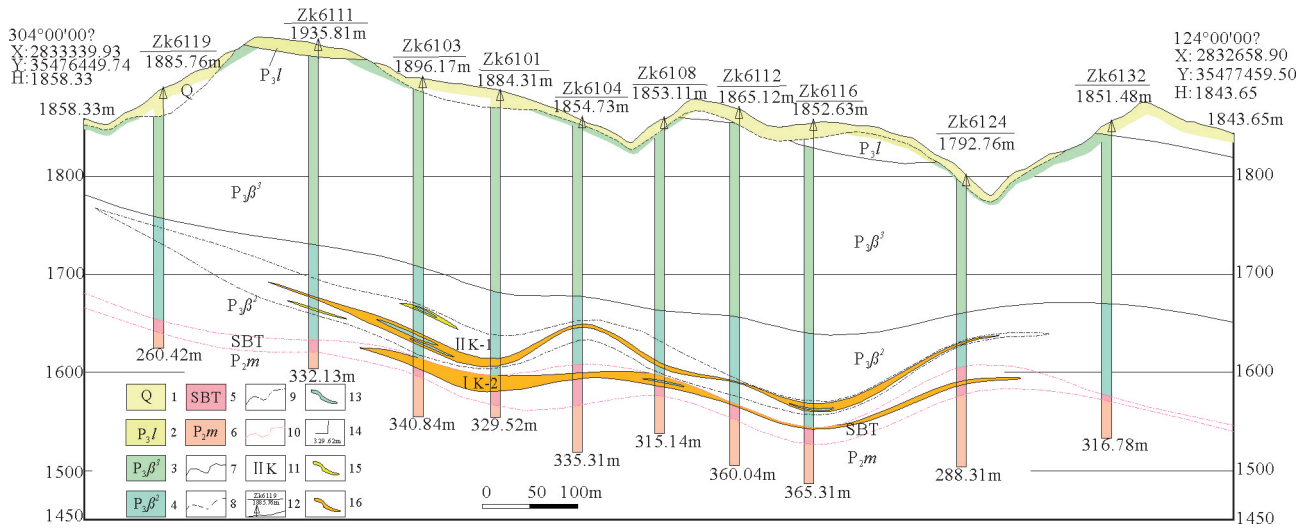


图3 架底金矿区61钻孔勘探线剖面图(据贵州省盘县架底金矿详查报告,2018^①)

1—第四系;2—上二叠统龙潭组;3—上二叠统峨眉山玄武岩三段;4—上二叠统峨眉山玄武岩二段;5—构造蚀变体;6—中二叠统茅口组;7—整合地层界限;8—不整合地层界限;9—层间破碎蚀变带界限;10—构造蚀变体界限;11—矿体编号;12—钻孔;13—夹石;14—终孔孔深;15—低品位金矿体;16—工业金矿体

Fig.3 61 Profile of exploration line with 61 boreholes (after the detailed exploration report of Jiadi Gold deposit, 2018^①)

1—Quaternary;2—Upper Permian Longtan Formation;3—Third member of the Upper Permian Mount Emei Basalt Formation;4—Second member of the Upper Permian Mount Emei Basalt Formation;5—Structural alteration body;6—Middle Permian Maokou Formation;7—Integrated stratigraphic boundaries;8—Unconformity stratigraphic boundaries;9—Interlayer fracture and alteration zone boundaries;10—Structural alteration body boundaries;11—Orebody number;12—Drilling;13—Bastard;14—Hole depth;15—Low-grade gold ore body;16—High-grade gold ore body

生, 偶见局部交代黄铁矿, 少数沿裂隙充填或大致呈细纹状产出(图4g)。样品中除黄铁矿化外, 还存在其他热液蚀变, 沉积成因的方解石往往受到热液蚀变而表现出不同的特征(图4h), 以及自形程度较好的脉状石英颗粒, 呈梳状结构(图4i), 这也是卡林型金矿中典型的热液蚀变类型。

3.2 测试方法

样品的前期处理在中国地质科学院动力成岩成矿实验室完成, 在长安大学地球科学与资源学院显微镜实验室进行黄铁矿镜下的矿物学观察与挑选靶区, 显微镜型号为徕卡DM750P。在长安大学西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室对不同期次的黄铁矿进行了电子探针成分分析(EPMA)以及背散射电子图像(BSE), 使用仪器为JXA8100型电子探针, 测试条件电压为20 kV, 电流10 nA, 束斑1 μm, 检出限低于0.01%。下列金属矿物和硫化物用作分析的标样: FeS₂(Fe、S)、FeAsS(As)、(Fe、Ni)₉S₈(Ni)、PbS(Pb)、ZnS(Zn)、CuFeS₂(Cu)、Sb₂S₃(Sb)、ZnSe(Se)、Te⁰(Te)、Ag⁰(Ag)、Au⁰(Au)。

4 实验结果与讨论

本次研究的黄铁矿根据成矿的时期共划分为3

组, 即成矿前、成矿期、成矿后, 其中除成矿前的黄铁矿之外, 成矿期和成矿后的黄铁矿都发育有环带结构, 核部和环带元素的含量明显不同(表1), 特别是S、Fe、As、Au元素显示出不同期次黄铁矿的元素含量特征变化。如表1所示, Zn、Cu、Pb、Ni等亲铁、亲铜元素以及Au、Ag、As等中低温成矿元素都高出检测限, 其中Pb元素在成矿前、成矿期、成矿后的黄铁矿中含量低且稳定, Au、Ag、As等中低温成矿元素显示出较好的协同性, 其他元素如Se、Co、Ti、Sb等大部分低于检测限。

4.1 不同期次黄铁矿元素含量特征

黄铁矿中S/Fe的理论原子比值接近于2, 沉积成因的黄铁矿S/Fe比值接近理论值或硫含量略高, 热液成因的黄铁矿S/Fe比值小于2, 称为硫亏型(周学武等, 1994)。黄铁矿亏硫是S²⁻被As³⁺、Sb³⁺等离子类质同象置换的结果(Springer et al., 1964; Riley, 1968; 卿敏等, 2001), 从而结构失稳, 增加了构造缺陷程度, 有利于金的富集。本次研究成矿前的黄铁矿样品相对高S、Fe(理论值W_S=53.45%、W_{Fe}=46.55%), W_S、W_{Fe}的平均值分别为53.48%、46.34%, 低As, W_{As}的平均值为0.36%, 换算成原子数后, S/Fe平均比值为2.01, 与理论值几乎接近, 说明成矿前的

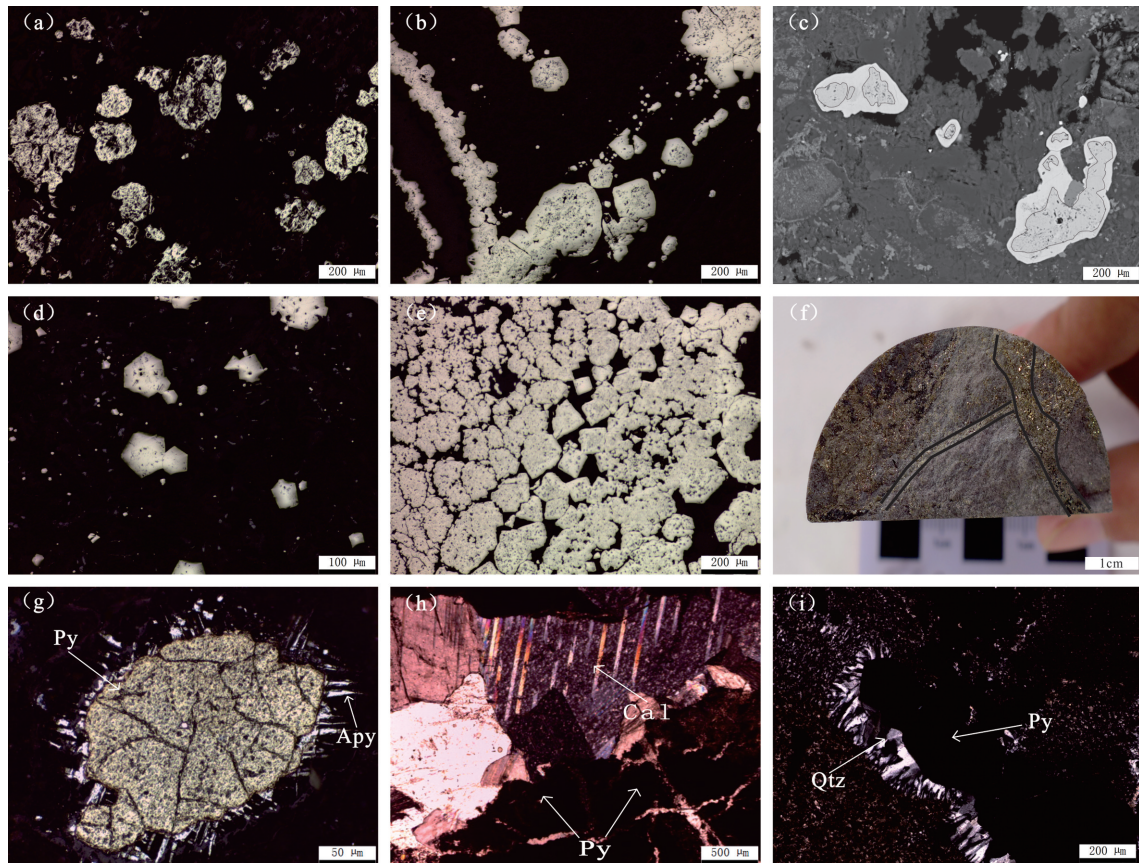


图4 架底金矿黄铁矿显微组构特征

a—草莓状黄铁矿(反射光);b—自形一半自形结构黄铁矿(反射光);c—环带状含砷黄铁矿(背散射);d—五角十二面体黄铁矿(反射光);e—自形粗粒黄铁矿(反射光);f—不同期次的黄铁矿;g—针状毒砂沿裂隙在黄铁矿周围发育(反射光);h—热液粗粒方解石晶体(正交偏光);i—黄铁矿周围发育石英颗粒(正交偏光)

Fig.4 Microstructure characteristics of pyrite in the Jiadi gold deposit

a—Strawberry-like pyrite (reflected light); b—Self-shape-semi-shape structure pyrite (reflected light); c—Ring-band arsenic-containing pyrite (BSE); d—Pentagonal dodecahedron pyrite (reflected light); e—Self-forming coarse-grained pyrite (reflected light); f—Pyrite of different periods; g—Needle-like poisonous sand develops around the pyrite along the fissures (reflected light); h—Hydrothermal coarse-grained calcite crystal (orthogonal polarized light); i—Quartz particles are developed around pyrite (orthogonal polarized light)

黄铁矿为普通矿物,此类黄铁矿不是主要的载金矿物,与前人研究认为低砷无环带黄铁矿为沉积成因的黄铁矿一致。

成矿期的黄铁矿核部和环带上的元素含量变化很大,成矿期黄铁矿核部的元素含量与成矿前的黄铁矿元素含量相似,也是具有高S、Fe的特征, W_s 、 W_{Fe} 的平均值分别为52.57%、46.06%,但是As、Au的含量明显偏高(12个测点中有4个测点的Au含量达到检出限),与沉积成因的黄铁矿不同。考虑到黄铁矿核部裂隙发育,认为其应该是受到了热液蚀变交代的沉积黄铁矿。与核部黄铁矿相比,成矿期黄铁矿环带低S、Fe, W_s 、 W_{Fe} 的平均值分别为50.29%、45.18%,高As、Au,S/Fe换算成原子数后,平均比值

为1.96,S的原子百分比下降2%,属于硫亏型黄铁矿。As的含量发生了数量级的变化(核部 W_{As} 平均值为0.72%,环带平均值为4.25%),说明S和As存在明显的负相关关系,As取代了S的位置,发生了类质同象置换,导致结构失稳,有利于Au的富集(12个测点中有7个测点的Au含量达到检出限,且Au的平均含量明显高于核部, W_{Au} 核部和边部的平均值分别为0.027%、0.07%),表明环带为Au富集的主要部位。同时也注意到,部分不含环带的细粒黄铁矿,元素含量特征不同于沉积成因的黄铁矿,与成矿期黄铁矿环带元素含量相似,具有低S、Fe,高As、Au的特征,推测其与成矿期黄铁矿环带属于同期热液作用,属于热液成因的黄铁矿。

表1 架底金矿黄铁矿电子探针成分分析(%)
Table 1 EPMA results of Au-bearing pyrites from the Jiadi gold deposit (%)

样号	Se	S	Fe	As	Pb	Ni	Zn	Ag	Te	Cu	Au	S/Fe	Total
成矿前													
y1969-18-1	0.040	53.313	45.949	0.095	0.165	-	0.002	0.009	-	-	-	2.021	99.573
y1969-18-2	-	54.840	46.521	-	0.078	-	-	-	-	-	-	2.054	101.439
y1969-18-3	-	54.695	46.869	0.088	0.193	-	-	-	-	-	-	2.033	101.845
y1969-18-4	-	52.678	46.342	-	0.139	-	-	-	-	0.049	-	1.980	99.208
y1968-19-1	0.035	54.439	46.567	0.027	0.187	-	-	-	-	-	0.043	2.037	101.298
y1968-19-2	-	52.587	45.321	2.834	0.222	0.037	-	-	-	-	-	2.021	101.001
y1968-20-1	-	52.402	46.885	0.217	0.259	-	-	-	-	0.042	-	1.947	99.805
y1968-21-1	0.067	54.509	46.064	-	0.188	-	0.031	-	-	-	0.096	2.061	100.955
y1968-21-2	-	51.932	46.500	-	0.148	-	0.029	-	-	-	-	1.946	98.609
成矿期													
zk3109-2-1-1	0.046	51.892	46.344	0.022	0.117	-	-	-	-	0.031	-	1.838	98.452
zk3109-2-1-2	-	55.210	46.349	-	0.099	0.015	-	-	-	-	-	2.075	101.673
zk3109-2-1-3-核	-	51.583	46.512	-	0.025	-	0.017	0.017	-	0.012	0.023	1.932	98.189
zk3109-2-1-3-环	-	52.448	45.905	1.983	0.182	-	0.006	-	0.037	0.002	0.140	1.990	100.703
zk3109-2-1-4	0.017	52.308	46.335	-	0.181	-	-	-	-	0.045	-	1.854	98.886
zk3109-2-1-5-核	-	53.439	45.885	0.077	0.207	0.029	0.015	-	-	-	-	2.029	99.652
zk3109-2-1-5-环	-	54.771	45.921	-	0.067	-	-	-	-	-	0.057	2.078	100.816
zk3109-2-1-6	-	51.476	46.791	-	0.082	-	0.015	-	-	0.049	0.028	1.916	98.441
zk3109-2-1-7	-	53.230	46.866	-	0.203	0.048	0.058	0.052	-	-	-	1.979	100.457
zk3109-2-2-1	-	52.996	46.228	0.022	0.150	-	0.043	-	-	-	0.106	1.997	99.545
zk3109-2-2-2-核	0.004	52.206	46.422	0.161	0.174	-	-	-	0.011	-	0.066	1.959	99.044
zk3109-2-2-2-环	-	51.738	45.312	4.601	0.080	-	-	-	-	0.019	0.141	1.989	101.891
zk3109-2-3-1	-	53.197	47.052	-	0.172	-	0.016	-	-	0.016	0.013	1.970	100.466
zk3109-2-3-2	-	53.109	46.710	-	0.157	-	-	0.050	-	-	0.009	1.981	100.035
zk2725-8-1	-	53.795	46.530	-	0.113	-	-	0.032	-	0.010	0.189	1.909	99.627
zk2725-8-2-核	-	52.633	45.821	3.008	0.169	-	-	-	-	0.004	-	2.014	101.938
zk2725-8-2-环	-	49.216	45.079	5.203	0.082	-	-	0.015	-	0.002	-	1.902	100.345
zk2725-8-3-核	-	50.792	46.286	1.824	0.116	-	0.010	-	0.014	0.088	-	1.912	99.244
zk2725-8-3-环	-	48.139	44.322	7.777	0.081	-	-	-	-	0.142	0.149	1.892	100.148
zk2725-8-4-核	-	50.863	45.975	2.440	0.119	-	0.113	-	-	-	0.088	1.927	98.817
zk2725-8-4-环	-	46.019	45.093	6.718	0.116	-	0.012	0.008	-	0.085	0.087	1.778	99.917
zk2725-15-1-核	-	52.149	45.762	0.315	0.226	0.009	-	-	-	0.023	-	1.985	98.790
zk2725-15-1-环	-	49.151	45.518	3.317	0.145	-	0.026	0.032	0.043	-	-	1.881	98.961
zk2725-15-2-核	-	52.616	45.653	0.656	0.078	0.011	-	-	-	0.015	0.147	2.008	100.185
zk2725-15-2-环	-	51.249	45.119	4.303	0.131	-	0.057	0.032	-	0.030	0.277	1.979	101.736
zk2725-15-3-核	-	52.824	46.33	0.207	0.183	-	-	-	-	-	-	1.986	98.086
zk2725-15-3-环	-	51.496	45.822	4.210	0.186	-	0.073	0.010	-	0.047	-	1.958	101.844
zk2725-15-4-核	0.033	54.264	45.321	-	0.074	-	0.057	0.017	-	-	-	2.086	100.321
zk2725-15-4-环	-	49.797	44.958	3.666	0.266	0.029	-	0.016	-	0.058	-	1.930	98.210
zk2725-15-5-核	-	52.500	46.231	-	0.181	-	0.049	-	-	-	-	1.978	101.475
zk2725-15-5-环	-	52.067	44.235	3.678	0.126	0.002	0.034	0.014	-	-	0.029	2.050	99.117
zk2725-15-6-核	-	55.015	46.550	-	0.083	0.025	0.026	0.016	-	0.021	-	2.059	100.669
zk2725-15-6-环	-	47.341	44.931	5.554	0.116	-	0.010	-	-	0.034	-	1.835	101.635
zk3125-1-1	-	50.493	46.087	1.875	0.244	0.114	-	-	-	0.002	0.302	1.909	98.138
成矿后													
zk2725-4-1-核	0.019	53.475	45.960	-	0.115	0.023	-	-	-	0.035	-	2.122	101.284
zk2725-4-1-环	-	50.012	45.101	6.515	0.296	-	-	0.014	-	-	-	2.094	98.067
zk2725-4-2-核	-	54.276	45.681	0.256	0.129	-	-	0.003	-	-	-	2.049	98.916
zk2725-4-2-环	-	44.596	43.366	10.99	0.194	-	0.070	-	0.012	0.015	-	2.027	98.483
zk2725-4-3-核	-	53.010	46.740	0.184	0.175	0.029	-	-	-	0.010	-	1.932	98.232
zk2725-4-3-环	-	46.179	43.800	8.618	0.127	0.036	-	0.003	-	0.054	-	2.070	99.176
zk2725-4-4-核	0.016	53.118	46.511	0.036	0.170	0.021	-	0.045	-	-	-	1.791	101.198
zk2725-4-4-环	-	48.886	45.014	7.281	0.045	-	0.024	-	-	0.034	-	1.976	99.444
zk2725-4-5-核	-	51.986	45.956	0.011	0.098	-	-	-	0.008	0.008	-	1.837	101.844
zk2725-4-5-环	-	48.151	45.413	5.153	0.112	-	0.018	-	-	0.069	-	1.990	99.766
zk3109-1-核	-	54.077	45.981	-	0.199	0.015	0.049	-	-	-	-	1.892	99.130
zk3109-1-环	-	53.498	44.503	0.016	0.176	0.015	0.002	-	-	-	-	1.971	100.610
zk3109-1-环	-	55.623	45.654	0.019	0.160	-	-	0.019	-	-	-	1.847	99.598

注:本次Sb、Co均没有达到检出限;-表示元素含量未达到检出限。

成矿后的黄铁矿也发育有环带结构,成矿后的黄铁矿核部元素含量具有高S、Fe, W_s 、 W_{Fe} 的平均含量分别为53.32%、46.14%,低As, W_{As} 的平均含量为0.08%;环带元素含量具有低S、Fe, W_s 、 W_{Fe} 的平均含量分别为48.91%、44.72%,高As, W_{As} 的平均含量为6.43%(其中最高值达到10.99%),在成矿后的黄铁矿核部和环带Au都没有达到检出限。

架底金矿的载金矿物为成矿期发育环带的含砷黄铁矿和细粒黄铁矿,成矿期和成矿后环带的不同含量特征,暗示着热液流体的成分是不不断变换的,以及核部和环带元素含量的明显差异,表明核部和环带是不同时期的产物,环带结构形成于Au的主成矿期,属于热液成因,这是造成成矿期黄铁矿核部和环带Au含量变化很大的主要原因。根据本次测试的结果,不同期次的黄铁矿存在着较为明显的继承关系,成矿前沉积成因的黄铁矿可作为成矿期和成矿后环带黄铁矿的核部,但是还存在有成矿前期热液成因的黄铁矿核部,据此推测架底金矿可能存在有成矿后热液在成矿期黄铁矿上继续发育热液增生环带的黄铁矿,受限于采样的局限性,并未发现其存在,但并不影响本次的测试结果与讨论。

4.2 微量元素赋存规律

首先,从两个典型的黄铁矿单颗粒尺度来剖析微量元素的赋存规律(图5),成矿期的黄铁矿颗粒核部和环带的As含量有着明显的差异(图5a),与之相对应Au的含量也发生变化(核部 W_{Au} 为0.023%,环

带 W_{Au} 为0.14%),很好地说明了Au赋存于含砷黄铁矿的环带位置;同时,成矿后的黄铁矿也发育有环带(图5b),核部和环带As的含量变化更为明显,但是Au却都未达到检出限,暗示着含砷矿化学热液流体的成分是不不断变换的。为此,利用As、Au的原子百分比数据进行投图(图6),来进一步说明As、Au的含量关系,在As-Au的关系图上,表明As与Au含量并不总是呈正相关,As含量过大或过小都不利于Au的富集,当 W_{As} 含量处于0.1%~5%时,才有利于Au的富集。前人对黔西南地区卡林型金矿的大量研究,证实Au主要赋存于黄铁矿的增生环带当中,以亚微米至纳米级的颗粒呈不均匀浸染状分布(付绍洪等,2004;陈懋弘等,2009;张立中等,2010;张锦让等,2016);以及在水银洞金矿发现金的自然颗粒(0.1~6 μm)(Su et al.,2008),但这一现象在架底金矿并未发现;赵静等(2018,2019)利用As-Au关系曲线图表明,水银洞金矿、太平洞金矿金主要以晶格金(Au^+)的形式存在。本研究中As-Au关系显示(图6),大多数投点位于溶解曲线附近,Au/As的比值也普遍大于0.02,表明架底金矿金的赋存状态可能以亚微米至纳米级的颗粒呈不均匀浸染状分布。

As和S之间的相关系数为0.7872,(42组数据),呈明显的负相关(图7),As以类质同象的形式置换S,从而进入黄铁矿的晶格当中,这也是含砷黄铁矿普遍低S的原因(Riley,1968)。Au与Fe、Ag、Cu、Zn、Pb等元素不具有明显的相关性(图7c~f),进

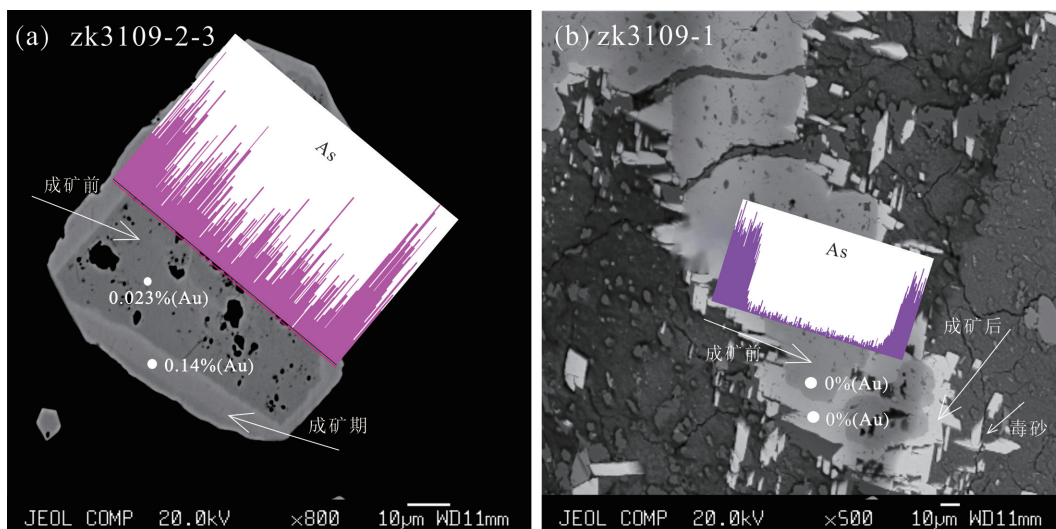


图5 黄铁矿背散射照片及Au的分布
Fig.5 Backscatter photo and Au distribution of pyrite

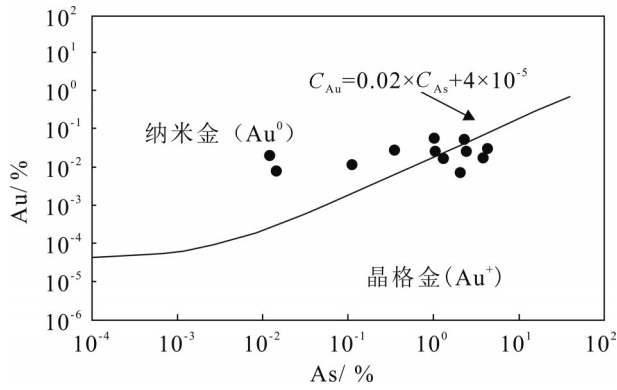


图6 黄铁矿中 As、Au 含量关系图(原子百分比,拟合方程据 Reich et al., 2005)

Fig.6 Relationship of As and Au content in pyrite (atomic percentage, fitting equation according to Reich et al., 2005)

一步表明 As 和 Au 是置换 S, 而非 Fe 元素, 根据电子探针图像下观测到方铅矿的存在, 推测成矿元素

中的 Cu、Zn、Pb 等元素可能会以黄铜矿、方铅矿和闪锌矿等流体包裹体的形式存在于黄铁矿当中。

4.3 黄铁矿的生长顺序及其成因探讨

卡林型金矿也有人称为热水淋滤型金矿, 是由地热异常或深部岩浆提供热源, 由于成矿温度低, 所以很难发生 Co、Ni 的类质同象置换, 而 As 大量富集于此类型金矿成矿热液中(严育通等, 2012)。这可能是本次实验结果中 Co 没有达到检出限, Ni 很少达到检出限的主要原因。因此, 在缺少 Co/Ni 比值的情况, 依据前人对黄铁矿主要元素含量的研究, S/Fe 比值大于或接近于 2 的属于沉积成因, S/Fe 比值小于 2 的属于热液成因(周学武等, 1994), 以及对黔西南地区同类金矿床的研究, 黄铁矿有沉积成因和热液成因两种(刘建中等, 2007; 陈懋弘等, 2009), 结合本次划分的期次, 对比分析本矿区黄铁矿的生长顺序、成因。通过综合分析认为, 草莓状

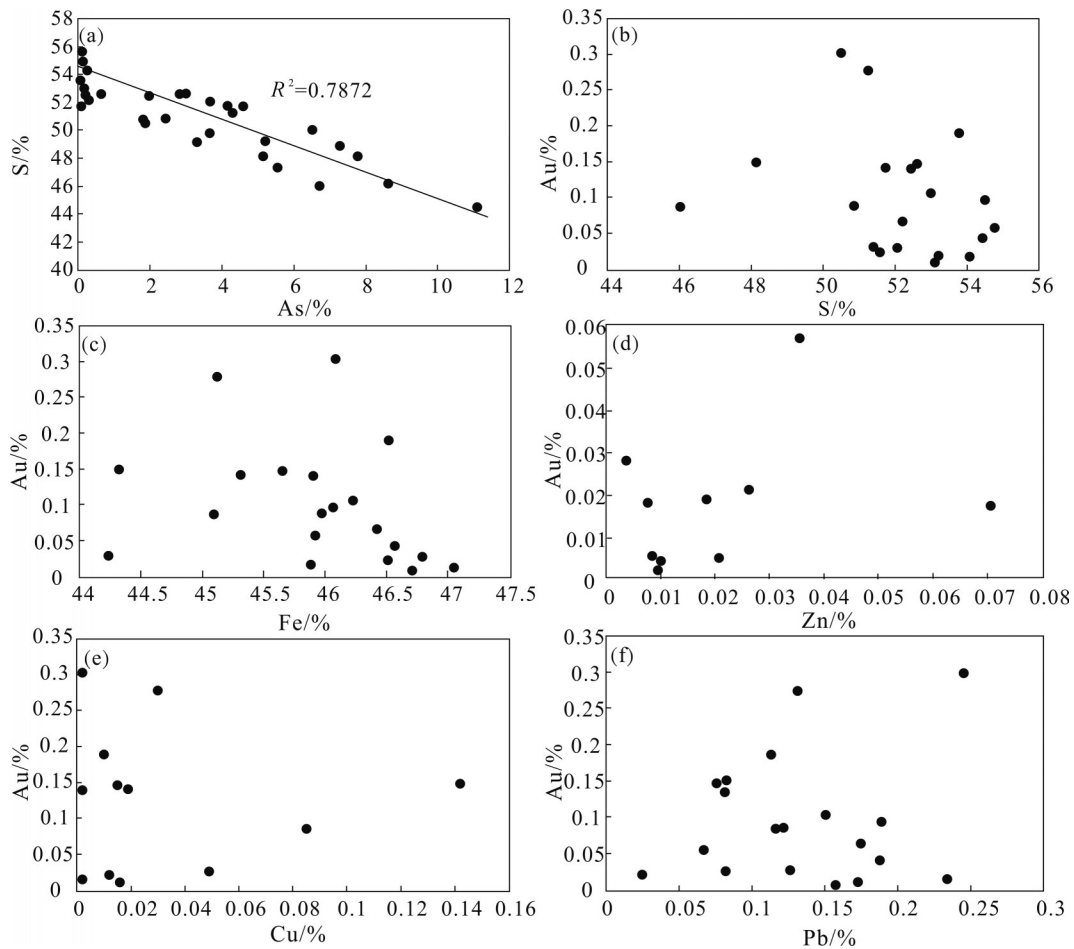


图7 架底金矿黄铁矿中 As-S、Au 与 S、Fe、Zn、Cu、Pb 等元素相互关系图

Fig.7 Correlation of elements in pyrite in the Jiadi gold deposit

低砷无环带的黄铁矿属于沉积成因(S/Fe比值大于2),形成于成矿前,此类黄铁矿中很少有金的富集。成矿期发育有环带的黄铁矿,环带具有低S、Fe,高As、Au的特点,环带发育是热液流体增生的结果,同时,均质无环带的细粒黄铁矿,同样具有低S、Fe,高As、Au的特点,两者是同期热液流体作用的结果,其成因都属于热液成因,形成于金的主成矿期。此外,发育有一种不同于成矿期的含砷环带黄铁矿,环带具有很高的As含量,但Au的含量却没有达到检出限,以及周边有毒砂的大量发育,结合矿物共生关系,暗示其为成矿后的产物,晚于成矿期的环带。架底金矿载金黄铁矿的结晶顺序为:草莓状低砷无环带黄铁矿→含砷环带黄铁矿(含金)以及均质无环带的细粒黄铁矿→高砷环带黄铁矿(不含金),与划分的不同期次黄铁矿的特征相吻合。对比与架底金矿相邻的泥堡金矿,两者经历了同样的构造演化,具有相似的成矿背景,通过前人对泥堡金矿进行构造解析以及含金石英脉Rb-Sr等时线法获取的年龄(141 Ma左右),认为泥堡金矿的主成矿期发生在燕山期伸展阶段(戢兴忠,2018;郑禄林,2019)。据此推测架底金矿在印支造山期,形成了北东向的总体构造格架,燕山期(白垩纪)的伸展构造环境有利于成矿流体的垂向运移和金的沉淀,主成矿期应为燕山期(白垩纪)伸展阶段。

5 结 论

(1)环带含砷黄铁矿以及同期发育的均质细粒黄铁矿为架底金矿的主要载金矿物,载金黄铁矿中环带是Au的富集场所,As与S呈明显的负相关。

(2)不同期次的黄铁矿具有不同的微量元素特征,成矿前的黄铁矿具有高S、Fe,低As的特征,属于沉积成因;成矿期具有环带结构的黄铁矿,核部具有高S、Fe,低As、Au的特征,环带具低S、Fe,高As、Au的特征,核部是热液交代的沉积成因,环带是热液成因,同时均质结构的细粒黄铁矿与环带成分、成因相似,两者属于同期热液作用的产物;成矿后的黄铁矿,核部具有高S、Fe,低As,环带具有低S、Fe,高As的特征,Au含量均未达到检出限,说明热液流体的成分是变换的,黄铁矿中As含量过低或过高,均不利于Au的富集。

(3)架底金矿载金黄铁矿的结晶顺序为:草莓

状低砷无环带黄铁矿→含砷环带黄铁矿(含金)以及均质无环带的细粒黄铁矿→高砷环带黄铁矿(不含金)。

致谢: 本文前期的野外工作得到了贵州省地质矿产勘查开发局105地质大队的大力帮助,电子探针测试工作得到了长安大学地球科学与资源学院刘民武副教授的细心指导,文稿修改过程中得益于两位匿名审稿人给出的宝贵意见,在此一并表示感谢。

注释:

①贵州省地质矿产勘查开发局105地质大队. 2018. 贵州省盘县架底金矿详查报告[R].

Reference

- Chen Maohong, Mao Jingwen, Chen Zhenyu, Zhang Wei. 2009. Mineralogy of arsenian pyrites and arsenopyrites of Carlin-type gold deposits in Yunnan-Guizhou-Guangxi "golden triangle" area, southwestern China[J]. *Mineral Deposits*, 28(5): 539-557 (in Chinese with English abstract).
- Chen Maohong, Mao Jingwen, Qu Wenjun, Wu Liuling, Phillip J U, Tony N, Zhen Jianming, Qin Yunzhong. 2007. Re-Os dating of arsenian pyrites from the Lannigou Gold Deposit, Zhenfeng, Guizhou Province, and its geological significances[J]. *Geological Review*, (3):371-382 (in Chinese with English abstract).
- Deditius A P, Utsunomiya S, Renock D, Ewing R C, Ramana C V, Becker U, Kesler S E. 2008. A proposed new type of arsenian pyrite: composition, nanostructure and geological significance[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(12): 2919-2933.
- Fu Shaohong, Gu Xuexiang, Wan Qian, Xia Yong, Zhang Xingchun, Tao Yan. 2004. The typomorphic characteristics of gold-bearing iron deposits in the Shuiyindong gold deposit in southwest Guizhou[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, (1): 75-80 (in Chinese with English abstract).
- He Jinping, Yuan Shunfa, Wang Xiaoyong, Pian Hongye. 2018. Geochemical characteristics of the Lianhuashan Anticline in the Southwest Guizhou dense area of mineral deposits[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 38(3): 384-387, 397 (in Chinese with English abstract).
- Hofstra A H, Cline J S. 2000. Characteristics and models for Carlin-type gold deposits[J]. *Reviews in Economic Geology*, 13: 163-220.
- Ji Xingzhong, Chen Maohong, Liu Xu, Li Qiang, Xie Xianyang, Zhu Yonghong, Han Zhonghua. 2018. Structure analysis and structural ore-controlling role of Nibao gold deposit in southwestern Guizhou Province[J]. *Mineral Deposits*, 7(6): 1296-1318(in Chinese with English abstract).
- Large R R, Danyushevsky L, Hollit C, Maslennikov V, Meffre S, Gilbert S, Bull S, Scott R, Emsbo P, Thomas H, Singh B, Foster J. 2009. Gold and trace element zonation in pyrite using a laser

- imaging technique: Implications for the timing of gold in orogenic and Carlin-style sediment-hosted deposits[J]. *Economic Geology*, 104(5): 635–668.
- Liu Jianzhong, Deng Yiming, Liu Chuanqin, Zhang Xingchun, Xia Yong. 2006. Metallogenic conditions and model of the superlarge Shuiyindong stratabound gold deposit in Zhenfeng County, Guizhou Province[J]. *Geology in China*, 33(1): 169–177 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jianzhong, Xia Yong, Deng Yiming, Zhang Xingchun, Qiu Ling. 2007. Re-study on modes of gold occurrence in the Shuiyindong super-large-sized gold deposit[J]. *Guizhou Geology*, (3): 165–169 (in Chinese with English abstract).
- Ma Jian, Zhao Fuyuan, Xiong Wei, Liu Wanlong. 2019. Geological characteristics and metallogenesis of the Lianhuashan anticline gold deposit, Pan County, Guizhou[J]. *World Nonferrous Metals*, (7): 86–87 (in Chinese with English abstract).
- Qin min, Wei Wanshun, Niu Cuiyi, Luo Ping. 2001. Alialine-rock type gold deposits: A review[J]. *Gold Science and Technology*, (5): 1–8 (in Chinese with English abstract).
- Reich M, Kesler S E, Utsunomiya S, Palenik C S, Chryssoulis S L, Ewing R C. 2005. Solubility of gold in arsenian pyrite[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(11): 2781–2796.
- Riley J F. 1968. The cobaltiferous pyrite series[J]. *American Mineralogist*, 53(1/2): 293–295.
- Springer G, Schachner-Korn D, Long J V P. 1964. Metastable solid solution relations in the system $\text{FeS}_2 - \text{CoS}_2 - \text{NiS}_2$ [J]. *Econ. Geol.*, 59: 475–491.
- Stromberg J M, Barr E, Van Loon L L, Gordon R A, Banerjee N R. 2019. Fingerprinting multiple gold mineralization events at the Dome mine in Timmins, Ontario, Canada: Trace element and gold content of pyrite[J]. *Ore Geology Reviews*, 104: 603–619.
- Su W C, Xia B, Zhang H T, Zhang X C and Hu R Z. 2008. Visible gold in arsenian pyrite at the Shuiyindong Carlin-type gold deposit, Guizhou, China: Implications for the environment and processes of ore formation[J]. *Ore Geology Reviews*, 33(3): 667–679.
- Su W C, Zhang H T, Hu R Z, Ge X, Xia B, Chen Y Y, Zhu C. 2012. Mineralogy and geochemistry of gold-bearing arsenian pyrite from the Shuiyindong Carlin-type gold deposit, Guizhou, China: Implications for gold depositional processes[J]. *Mineralium Deposita*, 47(6): 653–662.
- Wang Dafu. 2015. A Preliminary Study on the Geological and Geochemical Characteristics of the Jiadi Gold Deposit in Panxian, Guizhou[D]. Guiyang: Guizhou University (in Chinese with English abstract).
- Wu Xiaohong, Cheng Penglin, Xiao Chenggang, Ma Jian. 2013. Geological characteristics of the Damaidi gold deposit in the basalt distribution area in western Guizhou[J]. *Guizhou Geology*, 30(4): 283–288 (in Chinese).
- Wu Yu, Zhang Song, Huang Zheng, Wang Fenggang, Li Jingxian, Xiao Changhao, Ye Jinlin, Zhang Cong. 2019. Meso-Cenozoic tectonic evolution of the Nandan-Libo Area, Northwestern Guangxi, China: Evidence from Palaeo-tectonic stress fields analyses[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 43(5): 872–893 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Changhao, Shen Yuke, Wei Changshan, Su Xiaokai, Le Xingwen, Zhang Liang. 2018a. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating, Hf isotopic composition and $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$ characteristics of the Yanshanian acid magma in the Xidamingshan Cluster, southeastern margin of the Youjiang Fold Belt, Guangxi[J]. *Geoscience*, 32(2): 289–304 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Changhao, Shen Yuke, Liu Huan, Wei Changshan, Le Xingwen, Fu Bin. 2018b. Oxygen isotopic compositions and geological significance of zircons from the Yanshanian felsic intrusions in the Xidamingshan cluster, southeastern margin of the Youjiang fold belt, South China: In situ SHRIMP analysis[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(5): 1441–1452 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Changhao, Liu Huan, Shen Yuke, Wei Changshan, Le Xingwen, Ou Degong, Zhang Liang. 2018c. Lead isotope geochemical characteristics of Xidamingshan ore concentration area on the southeastern margin of Youjiang fold belt, and their significance[J]. *Mineral Deposits*, 37(5): 1037–1051 (in Chinese with English abstract).
- Yao Shuzhen, Wang Chengxiang, Luo Diwei. 2013. Metallogenic Regularity and Metallogenic Prediction of Facies Micro-Disseminated Gold Deposits in southwestern Guizhou[R]. Wuhan: China University of Geosciences (in Chinese).
- Yan Yutong, Li Shengrong, Jia Baojian, Zhang Na, Yan Linan. 2012. Composition typomorphic characteristics and statistic analysis of pyrite in gold deposits of different genetic types[J]. *Earth Science Frontiers*, 19(4): 214–226 (in Chinese with English abstract).
- Yang Tiancai. 2016. Analysis of geological features and prospecting potential of Panxian-Puan Lianhuashan Anticline gold deposit in Guizhou[J]. *Nonferrous Metal Abstracts*, 31(1): 31–33 (in Chinese).
- Yang Chengfu, Deng Yamei. 2018. Report of Detailed Investigation of Jiadi Gold Mine in Panxian, Guizhou[R]. Guiyang: No.105 Geological Brigade, Guizhou Geological and Mineral Exploration Bureau (in Chinese).
- Zhou Xuewu, Shao Jieliang, Bian Qiujuan. 1994. Study on the type characteristics of pyrite in Dongbeizhai gold deposit, Songpan, Sichuan[J]. *Earth Science*, (1): 52–59 (in Chinese).
- Zhang Lizhong, Cao Xinzhi. 2010. Typomorphic characteristics of pyrite from Shuiyindong gold deposit in Guizhou Province[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 25(2): 101–106, 123 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Zhaoguang, Wang Shihua, Wu Xiaohong. 2014. Metallogenic mode discussion of microscopic disseminated type gold deposit in Lianhuashan Area—A case study of Jiadi gold deposit[J]. *Guizhou Geology*, 31(3): 161–169 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jinrang, Hou Lin, Zou Zhichao, Zhu Sibao, Wu Songyang. 2016. LA-ICP-MS in situ trace element analysis of auriferous arsenic pyrites from the Nibao gold deposit and its constraints on the ore genesis[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 35(3): 493–505 (in Chinese with English abstract).

- Zeng Guoping. 2018. Study on the Structurally Controlling on the Micro-disseminated Gold Deposits in the Western of the Southwest Guizhou Gold Ore Concentration Area[D]. Wuhan: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Zhao Fuyuan, Xiao Chenggang, Zhang Bingqiang, Wang Shihua, Li Junhai, Ma Jian. 2018. REE and isotopic features of the Jiadi Gold Deposit in Panxian County of Guizhou Province and its ore-forming material source[J]. *Geology and Exploration*, 54(3): 465–478 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Jing, Liang Jinlong, Ni Shijun, Xiang Qirong. 2016. In situ sulfur isotopic composition analysis of Au-bearing pyrites by using Nano-SIMS in Yangshan gold deposit, Gansu Province[J]. *Mineral Deposits*, 35(4): 653–662.
- Zhao Jing, Liang Jinlong, Li Jun, Ni Shijun, Xiang Qirong. 2018. Genesis and metallogenic model of the Shuiyindong gold deposit, Guizhou Province: Evidences from high-resolution multi-element mapping and in situ sulfur isotopes of Au-carrying pyrites by NanoSIMS[J]. *Earth Science Frontiers*, 25(1): 157–167 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Jing, Liang Jinlong, Li Jun, Ni Shijun, Xiang Qirong, Nan Zhenglu. 2019. Mineralogical characteristics and in situ sulfur isotopic compositions of Au-bearing pyrites in the Taipingdong gold deposit, Guizhou Province[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 43(2): 258–270 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Lulin, Yang Ruidong, Liu Jianzhong, Gao Junbo, Chen Jun, Cheng Wei. 2019. Geological-geochemical characteristics and genesis of the large Nibao gold deposit in southwestern Guizhou[J]. *Geological Review*, 65(6): 1363–1382 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈懋弘, 毛景文, 陈振宇, 章伟. 2009. 滇黔桂“金三角”卡林型金矿含砷黄铁矿和毒砂的矿物学研究[J]. *矿床地质*, 28(5): 539–557.
- 陈懋弘, 毛景文, 屈文俊, 吴六灵, Phillip J U, Tony N, 郑建民, 秦运忠. 2007. 贵州贞丰烂泥沟卡林型金矿床含砷黄铁矿 Re-Os 同位素测年及地质意义[J]. *地质论评*, (3): 371–382.
- 付绍洪, 顾雪祥, 王乾, 夏勇, 张兴春, 陶琰. 2004. 黔西南水银洞金矿床载金黄铁矿标型特征[J]. *矿物学报*, 2004(1): 75–80.
- 何金坪, 苑顺发, 汪小勇, 骈红野. 2018. 黔西南矿集区莲花山背斜区地球化学特征[J]. *四川地质学报*, 38(3): 384–387+397.
- 戢兴忠, 陈懋弘, 刘旭, 李强, 谢贤洋, 朱永红, 韩忠华. 2018. 黔西南泥堡金矿床构造解析及构造控矿作用[J]. *矿床地质*, 7(6): 1296–1318.
- 刘建中, 邓一明, 刘川勤, 张兴春, 夏勇. 2006. 贵州省贞丰县水银洞层控特大型金矿成矿条件与成矿模式[J]. *中国地质*, 33(1): 169–177.
- 刘建中, 夏勇, 邓一明, 张兴春, 邱林. 2007. 贵州水银洞超大型金矿床金的赋存状态再研究[J]. *贵州地质*, (3): 165–169.
- 马健, 赵富远, 熊伟, 刘万龙. 2019. 贵州盘县莲花山背斜金矿床地质特征及成矿作用探讨[J]. *世界有色金属*, (7): 86–87.
- 卿敏, 卫万顺, 牛翠祎, 罗平. 2001. 碱性岩型金矿床研究述评[J]. *黄金科学技术*, 2001(5): 1–8.
- 王大福. 2015. 贵州盘县架底金矿地质地球化学特征初步研究[D]. 贵州大学.
- 吴小红, 程鹏林, 肖成刚, 马健. 2013. 贵州西部玄武岩分布区大麦地金矿成矿地质特征[J]. *贵州地质*, 30(4): 283–288.
- 吴玉, 张松, 黄铮, 王凤岗, 李静贤, 肖昌浩, 叶锦林, 张聪. 2019. 桂西北南丹—荔波地区中、新生代构造演化: 来自古构造应力场的证据[J]. *大地构造与成矿学*, 43(5): 872–893.
- 肖昌浩, 申玉科, 韦昌山, 苏晓凯, 乐兴文, 张亮. 2018a. 广西右江褶皱带东南缘西大明山矿集区燕山期酸性岩浆锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素和 Ce(IV)/Ce(III) 特征[J]. *现代地质*, 32(2): 289–304.
- 肖昌浩, 申玉科, 刘欢, 韦昌山, 乐兴文, 傅斌. 2018b. 右江褶皱带东南缘西大明山矿集区燕山期长英质岩浆锆石 SHRIMP 原位氧同位素组成与地质意义[J]. *岩石学报*, 34(5): 1441–1452.
- 肖昌浩, 刘欢, 申玉科, 韦昌山, 乐兴文, 欧德功, 张亮. 2018c. 右江褶皱带东南缘西大明山矿集区铅同位素地球化学特征及其地质意义[J]. *矿床地质*, 37(5): 1037–1051.
- 姚书振, 王成相, 骆地伟. 2013. 黔西南盆地相微细浸染型金矿成矿规律与成矿预测[R]. 武汉: 中国地质大学资源学院.
- 严育通, 李胜荣, 贾宝剑, 张娜, 闫丽娜. 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.
- 杨天才. 2016. 浅析贵州盘县—普安莲花山背斜金矿地质特征及找矿前景[J]. *有色金属文摘*, 31(1): 31–33.
- 杨成富, 邓亚梅. 2018. 贵州省盘县架底金矿详查工作报告[R]. 贵阳: 贵州省地质矿产勘查局 105 地质大队.
- 周学武, 邵洁涟, 边秋娟. 1994. 四川松潘东北寨金矿黄铁矿标型特征研究[J]. *地球科学*, (1): 52–59.
- 张立中, 曹新志. 2010. 贵州水银洞金矿床黄铁矿标型特征[J]. *地质找矿论丛*, 25(2): 101–106, 123.
- 曾昭光, 王石华, 吴小红. 2014. 莲花山地区微细粒浸染型金矿成矿模式探讨——以架底金矿为例[J]. *贵州地质*, 31(3): 161–169.
- 张锦让, 侯林, 邹志超, 朱斯豹, 吴松洋. 2016. 泥堡金矿床载金含砷黄铁矿的微量元素 LA-ICP-MS 原位测定及其对矿床成因的指示意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 35(3): 493–505.
- 曾国平. 2018. 黔西南矿集区西段微细浸染型金矿构造控矿作用研究[D]. 武汉: 中国地质大学.
- 赵富远, 肖成刚, 张兵强, 王石华, 李俊海, 马健. 2018. 贵州盘县架底金矿稀土元素和同位素特征及成矿物质来源探讨[J]. *地质与勘探*, 54(3): 465–478.
- 赵静, 梁金龙, 倪师军, 向启荣. 2016. 甘肃阳山金矿载金黄铁矿同位素 Nano-SIMS 原位分析[J]. *矿床地质*, 35(4): 653–662.
- 赵静, 梁金龙, 李军, 倪师军, 向启荣. 2018. 贵州贞丰水银洞金矿床成因与成矿模式: 来自载金黄铁矿 NanoSIMS 多元素 Mapping 及原位微区硫同位素的证据[J]. *地学前缘*, 25(1): 157–167.
- 赵静, 梁金龙, 李军, 倪师军, 向启荣, 南争路. 2019. 贵州太平洞金矿床载金黄铁矿的矿物学特征及原位微区硫同位素分析[J]. *大地构造与成矿学*, 43(2): 258–270.
- 郑禄林, 杨瑞东, 刘建中, 高军波, 陈军, 程伟. 2019. 黔西南普安县泥堡大型金矿床地质地球化学特征与矿床成因探讨[J]. *地质论评*, 65(6): 1363–1382.