西 北 地 质

第 57 卷 第 5 期 2024 年 (总 237 期)

NORTHWESTERN GEOLOGY

Vol. 57 No. 5 2024(Sum237)



引文格式: 王立峰, 薛志强, 王振强, 等. 小秦岭金矿田杨砦峪-樊岔矿段黄铁矿 LA-ICP-MS 微量元素特征及其指示意义[J]. 西北地质, 2024, 57(5): 74-87. DOI: 10.12401/j.nwg.2024060

Citation: WANG Lifeng, XUE Zhiqiang, WANG Zhenqiang, et al. LA-ICP-MS In-situ Trace Element Characteristic of Pyrite from Yangzaiyu-Fancha Ore Block in Xiaoqinling Gold Field and Its Indication[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(5): 74–87. DOI: 10.12401/j.nwg.2024060

小秦岭金矿田杨砦峪-樊岔矿段黄铁矿 LA-ICP-MS 微量元素特征及其指示意义

王立峰^{1,2}, 薛志强^{1,2,*}, 王振强^{1,2}, 王鹏飞^{1,2}, 张苏坤^{1,2}, 孙保花^{1,2}, 王社全^{1,2}, 杨智超^{1,2}, 张鹏³

(1. 河南省第一地质矿产调查院有限公司,河南洛阳 471000; 2. 河南省金银多金属成矿系列与深部预测重点实验室,河南洛阳 471000; 3. 陕西省矿产地质调查中心,陕西西安 710068)

摘 要:小秦岭金矿田位于华北克拉通南缘,目前探明金储量611 t。前人对该区金矿床做了大量科研工作,但区内金矿的成矿地质背景与成矿物质来源仍存在较大的争议。笔者以小秦岭金矿田南中矿带杨砦峪、樊盆金矿床 S60 矿脉中黄铁矿为研究对象,通过细致的野外观察与镜下鉴定,将黄铁矿从早到晚分为3个世代,并对不同世代的黄铁矿进行 LA-ICP-MS 微量元素分析,取得认识如下:不同世代黄铁矿中 Au、Ag、Te、As、Co、Ni等微量元素的含量及其分布特征具有较显著的差异性,各个世代黄铁矿中 As 的含量均很低,暗示该区金矿床的形成与 As 无关;第2世代黄铁矿中 Au 与 Te 尤为富集且两者存在显著和稳定的线性正相关关系,指示该世代为金矿床形成重要阶段,并且 Te 元素在成矿过程中对 Au 的搬运、富集、沉淀等过程具有重要作用; S60 矿脉中普遍发育 Te-Au-Ag 矿物,并且黄铁矿中呈现低 As、高 Te 特征,暗示小秦岭金矿床的成矿流体、成矿物质可能来自深部岩浆的脱挥发分或地幔脱气作用,小秦岭地区成矿地质背景与早白垩世华北克拉通破坏有关。

关键词: 黄铁矿; LA-ICP-MS; 微量元素; S60 矿脉; 南中矿带; 小秦岭

中图分类号: P618.51

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2024)05-0074-14

LA-ICP-MS In-situ Trace Element Characteristic of Pyrite from Yangzaiyu-Fancha Ore Block in Xiaoqinling Gold Field and Its Indication

WANG Lifeng^{1,2}, XUE Zhiqiang^{1,2,*}, WANG Zhenqiang^{1,2}, WANG Pengfei^{1,2}, ZHANG Sukun^{1,2}, SUN Baohua^{1,2}, WANG Shequan^{1,2}, YANG Zhichao^{1,2}, ZHANG Peng³

(1. Henan First Geology and Mineral Survey Institute Co., Ltd, Luoyang 471000, Henan, China; 2. Key Laboratory of Gold and Silver

收稿日期: 2023-01-20; 修回日期: 2023-12-18; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目:河南省自然资源科研项目"小秦岭金矿田南中矿带超深部流体蚀变特征与金成矿机理研究"(豫自然资函 2022-7),河南省财政项目"河南省灵宝市小秦岭金矿田南中矿带深部探测"(豫自然资发[2020]18号)、"小秦岭 3 500 m深钻岩心红外光谱特征及蚀变分带研究"(豫地矿青科创 [2021]1号)联合资助。

作者简介: 王立峰(1978-), 男, 高级工程师, 主要从事地质探矿、资源环境调查工作。E-mail: 15093295380@163.com。

^{*}通讯作者: 薛志强(1988-), 男, 工程师, 从事地质矿产勘查及科研工作。E-mail: 649159022@qq.com。

Polymetallic Mineralization Series and Deep Prediction in Henan Provvince, Luoyang 471000, Henan, China; 3. Shaanxi Mineral Resources and Geological Survey Center, Xi'an 710068, Shaanxi, China)

Abstract: Located in the southern margin of the North China Craton, the Xiaoqinling gold field has a proven gold reserve of over 611t. Although most gold deposits have been extensively studied, issues related to the metallogenic geological background and the source of the ore materials remain debated. This paper conduct further studies on the Yangzhaiyu-Fancha S60 vein of sothern-medium ore belt from Xiaoqinling gold field. Three generations of (Py I, Py II, Py III) were identified according to detailed field investigation and microscopic identification. We presents a study of the distribution characteristics of trace elements in gold-bearing pyrite from different generation, The results show that the contents and trace element distribution characteristics of Au, Ag, Te, As, Co, Ni from different generation assum significant difference, the content of pyrite from different generation is lightly lower, and plays an insignificant role in gold mineralization; There is prominently positive correlation relationship between Au and Te in the second generation and the contents of Au, Te are relatively higher, it shows that the second generation is important for gold mineralization and the Te play an important role in transfer enrichment and precipitation of gold. An intimate Te-Au-Ag association has been widely noticed in widespread gold mineralization in Xiaoqinling gold district, and low-As, high-Te in pyrite, suggesting that the ore-forming materials and ore-forming fluids of the gold deposits may have come from the deep magma devolatilization or mantle degassing, the geogical background of the gold deposit mainly due to the destruction of the North China Craton.

Keywords: pyrite; LA-ICP-MS; trace element; S60 vein; southern-medium ore belt; Xiaoqinling

小秦岭金矿田地处河南省西部与陕西交界处,是中国八大金矿集区之一,也是国内仅次于胶东地区的第二大金矿产地。国内外学者在小秦岭地区开展大量科研工作,尽管如此,对本区金成矿作用的认识仍存在较大的分歧,目前主要存在两种观点:①金矿床的形成与华北克拉通的伸展、破坏有关,为克拉通破坏型金矿床(Bi et al., 2011; Li et al., 2012a, 2012b; 朱日祥, 2015)。②金矿床的形成与晚中生代华北板块与杨子板块碰撞造山过程有关,认为属造山型金矿床(陈衍景, 2006; 蒋少涌等, 2009; Chen et al., 2014; Li et al., 2018)。克拉通破坏型金矿与造山型金矿成矿物质来源、成矿流体问题进行性质及演化、矿质沉淀机理和成矿作用过程明显不同,有必要对小秦岭地区成矿机理深入的探讨。

南中矿带是小秦岭地区重要的成矿带,以石英脉型金矿床为主, S60 矿脉为其主要矿脉,沿走向延伸较远。其中杨砦峪、樊岔金矿 S60 矿脉规模较大,矿化情况好。在系统总结前人资料基础上,笔者对杨砦峪、樊岔金矿床 S60 脉进行系统采样研究,分析成矿物质来源和成矿流体演化特征,以揭示矿质沉淀机理和成矿过程,加深对该区金成矿机制的认识,为深部成矿

预测提供更多证据与信息。

1 区域地质背景

小秦岭金矿田地理位置位于豫陕交界处的东秦岭北缘,西边以陕西省华山为界,东至河南省灵宝市西涧河,南到灵宝市朱阳镇,北边为潼关-灵宝之南的山脉。大地构造位置位于华北克拉通南缘的华熊台隆小秦岭台穹,东西边界分别是河南省灵宝-朱阳盆地与陕西省华山,南北界线分别为小河断裂和太要断裂,整体呈近EW向展布(图1),隶属于秦岭造山带的北缘(王洁明等,2023;姜寒冰等,2023)。

小秦岭地区岩石组成复杂,主要为新太古界太华群深变质基性、中酸性火山-沉积岩系。下部以斜长角闪岩、角闪斜长片麻岩等变基性火山熔岩和时代相近的变花岗质岩组成,一般称为下基底;上部主要为变沉积碎屑岩-泥质岩、变中酸性火山熔岩-碎屑岩及变中酸性侵入岩与碳酸盐岩,一般称为上基底。另外,也有零散的白垩系南朝组与大面积的新生界地层出露。

该区经历多期地质构造活动,变形变质作用较强,

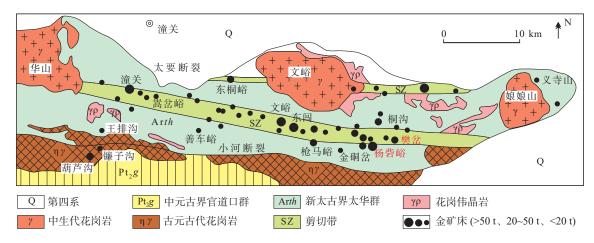


图1 小秦岭金矿带地质图(王雷, 2018)

Fig. 1 Geological map of the Xiaoqinling gold belt

褶皱、断裂等构造较为发育(杨合群等, 2022)。区内断裂以近 EW 走向为主,部分为 NW 向、NE 向和 SN 向。近 EW 向的断裂带规模相对较大,是区内金矿的主要储矿构造。小秦岭地区褶皱的整体形态为一套近 EW 向展布的复背形,从北到南发育五里村背形、七树坪向形、老鸦岔背形、庙沟向形与上杨砦背形等。其中,3个重要的褶皱控制了区内的矿化作用,形成中、北中与北矿带这 3 个主要矿化带。

区内岩浆岩较为发育,具有多旋回、多期次活动的特点,自太古宙至中生代皆有表现。阜平期岩浆岩以 TTG 岩系、镁铁质-长英质火山岩和花岗岩为主;五台期岩浆岩以花岗伟晶岩脉为主;古元古代花岗岩以桂家峪岩体和小河岩体为代表(Deng et al., 2016),区内辉绿岩脉大多也形成于古元古代(Li et al., 2012b, 2020);加里东期表现为杨砦峪二长花岗岩及闪长岩脉侵入;印支期以发育正长斑岩为特征(李厚民,

2012); 燕山期岩浆活动频繁, 形成一系列花岗岩, 最具代表性为文峪岩体、娘娘山岩体, 并导致一系列辉绿岩脉、花岗斑岩脉及含金石英脉的侵人(Mao et al., 2010; Li et al., 2012a)。其中, 燕山晚期花岗岩浆活动与本区金矿具有密切的成生关系(Wang et al., 2020)。

2 矿区地质概况

2.1 矿脉特征

杨砦峪、樊岔金矿床矿体主要为含金石英脉,局部为矿化的蚀变构造岩。区域内近EW向石英脉成矿可能性较大。其中,S60石英脉规模最大,是最主要的含金矿脉(图 2)。S60矿脉严格受NWW-SEE向的压扭性断裂控制;矿脉全长为6600m,总体走向近EW,倾向为175°~215°,倾角为40°~56°。厚度一般为2~7m,局部超过10m。石英脉呈透镜状、脉状和

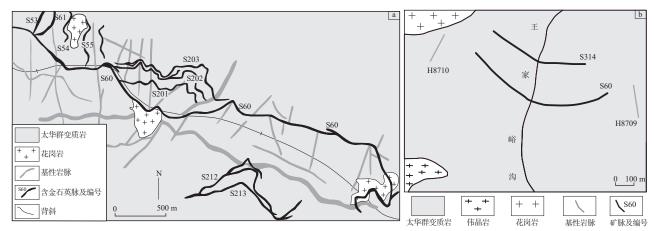


图2 杨砦峪矿区地质图(a)(据 Jian et al., 2014)与樊岔矿区地质图(b)(据展恩鹏等, 2019)

Fig. 2 (a) Geological map of the Yangzhaiyu gold deposit, (b) geological map of the Fancha gold deposit

不规则状断续分布,在走向和倾向上都有膨缩、分支复合,尖灭再现的现象。金矿主要赋存在石英脉中,但并不是所有石英脉都能形成金矿。有些地段的厚大石英脉 Au 含量却很低,因为 Au 与石英脉中硫化物的含量成正比,只有第二、三阶段硫化物的形成才能导致 Au 的沉淀。

2.2 矿体特征

石英脉中的金矿体多呈细脉状、透镜状、长条状产出。总体产状: 走向约为 110°, 倾向为 175°~215°, 倾角为 40°~52°。矿体主要由含金石英脉和部分矿化构造岩组成, 两者关系密切, 后者多为位于含金石英脉的两侧或其延长部分, 形成断续出现的包围圈。

矿体的厚度与产状有一定关系,矿体走向为80°~100°地段,矿体厚度相对增大。矿体走向为105°~135°地段,矿体厚度相对变薄。

在倾向上,在矿体倾角由大变小的块段,石英脉厚度变大,矿体较富。反之,石英脉厚度变薄,甚至尖灭,被糜棱岩替代,构造带倾角逐渐变缓,石英脉重新出现。

2.3 矿石特征

矿石类型较为简单,主要以石英脉型矿石,仅局部厚度较大的含金石英脉可见蚀变岩型矿石。石英脉型矿石又可细分为黄铁矿型、多金属硫化物型矿石。

黄铁矿型矿石以发育两种类型黄铁矿为特征,一种自形程度高,颗粒较大,Au品位较低;另一种黄铁矿晶形较差,常以粒状集合体、团块状、条带状沿石英脉裂隙发育,Au品位较高。脉石矿物主要为烟灰

色石英。

多金属硫化物型矿石矿物类型较多,以黄铜矿、黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、辉锑矿等金属硫化物为主。硫化物颗粒较小,矿物晶形较差,往往以集合体形式发育,常呈细脉浸染状、团块状、簇状产于石英脉边缘部位,金矿化较强。

2.4 围岩蚀变特征

小秦岭金矿田脉型金矿体空间展布主要受控于构造行迹,产于变质岩地层糜棱岩带内。岩石变质变形作用强烈,并伴有多期矿化蚀变。区内常见蚀变类型有黄铁矿化、绢云母化、硅化、绿泥石化、碳酸盐岩化等。这些蚀变常重复叠加,并遵循一定分布规律。硅化、黄铁矿化、绢云母化常发育含矿石英脉附近,是重要的找矿标志(图 3)。

2.5 成矿期次与成矿阶段

小秦岭金矿田构造运动及热液活动具有多期叠加特征,造成了成矿作用的多期次、多阶段性(葛战林等,2023; 范东旭等,2023)。在野外实地观察基础上,结合岩相学等手段,笔者对矿物共生组合、矿石结构构造及围岩蚀变特征进行分析总结(图 4),并将成矿作用从早到晚划分为 4 个阶段:①黄铁矿-石英阶段:早期热液沿断裂充填形成石英脉,脉体较宽但金矿化较弱,主要矿物为石英+黄铁矿。石英呈乳白色,致密块状,其间零星分布有粗粒自形、立方体状的黄铁矿(图 5a)。②石英-黄铁矿阶段:该阶段以黄铁矿等硫化物大量增加为特征,硫化物颗粒较细而导致石英

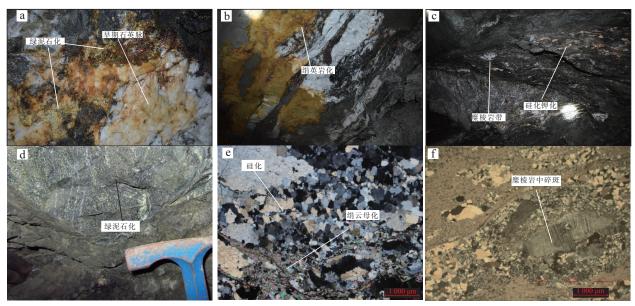
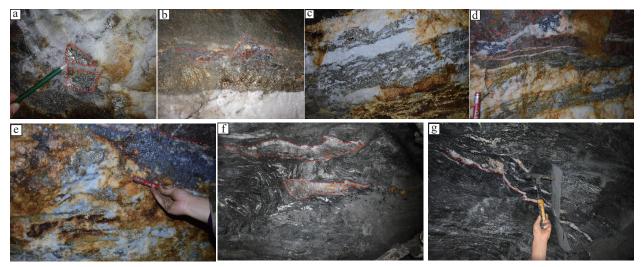


图3 杨砦峪、樊岔矿床 S60 矿脉蚀变特征

Fig. 3 The alteration of S60 vein in Yangzhaiyu and Fancha deposit

呈烟灰色, 黄铁矿等硫化物常常以粒状结合体形式沿早期石英脉及构造岩裂隙充填, 形成复合石英脉体(图 5b、图 5c)。该阶段矿物以石英、黄铁矿为主, 次为黄铜矿、磁黄铁矿等。矿物颗粒较小, 晶形较差, 常常以团块状、条带状、细脉状发育(图 5d)。该阶段中黄铁矿是最主要含金矿物, 是成矿期中最重要的阶段。③石英-多金属硫化物阶段: 该阶段金属矿物较为发

育,可见黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、辉锑矿、辉碲矿等(图 5e),多金属硫化物常以集合体形式沿裂隙充填,形成细脉状、网格状、团块状及条带状构造。④石英-碳酸盐阶段:该阶段中碳酸盐岩的出现标志着成矿活动的结束。该阶段以形成脉状或细脉状石英及碳酸盐矿物-方解石、白云石、铁白云石等为标志,金矿化微弱(图 5f、图 5g)。



a.第1阶段石英脉中粗粒自形黄铁矿; b.第3阶段方铅矿-黄铁矿-石英-黄铜矿网脉穿插第2阶段黄铁矿-石英脉; c.第3阶段方铅矿-石英-方解石呈网脉状分布于第1阶段石英-黄铁矿脉; d.第2阶段细脉状黄铁矿穿插第1阶段粗大石英脉; e.第3阶段方铅矿-石英脉呈透镜状产于早阶段石英-黄铁矿脉中; f.第4阶段石英-碳酸盐岩-长石脉被后期构造运动剪切成透镜状; g.第4阶段石英-碳酸盐-长石脉随后期构造运动弯曲变形

图4 S60 矿脉不同矿化阶段矿物穿插关系

Fig. 4 The mineral interspersed relationship of S60 vein in different mineralization stage

基于黄铁矿的形态、产出特征及镜下特征,可将小秦岭金矿床的黄铁矿划分为3个世代,即PyI、PyII和PyII(图 5)。第1世代黄铁矿(PyI)自形程度高,以立方体和五角十二面体晶形为主,颗粒粗大,常呈斑状、星点状分布于乳白色石英脉中,该世代黄铁矿主要形成于早期黄铁矿-石英阶段(第I阶段)。第2世代黄铁矿(PyII)颗粒较小,晶形较差,常常以粒状集合体形成发育,呈细脉状、网脉状沿早期石英脉的裂隙充填,该世代黄铁矿内部的裂隙尤为发育,主要形成于石英一黄铁矿阶段。第3世代黄铁矿(PyIII)多为半自形—他形、中细粒结构,与黄铁矿、方铅矿及闪锌矿等硫化物密切共生。该阶段黄铁矿颗粒中常发育其他硫化物包裹体,该世代黄铁矿主要形成于多金属硫化物阶段。

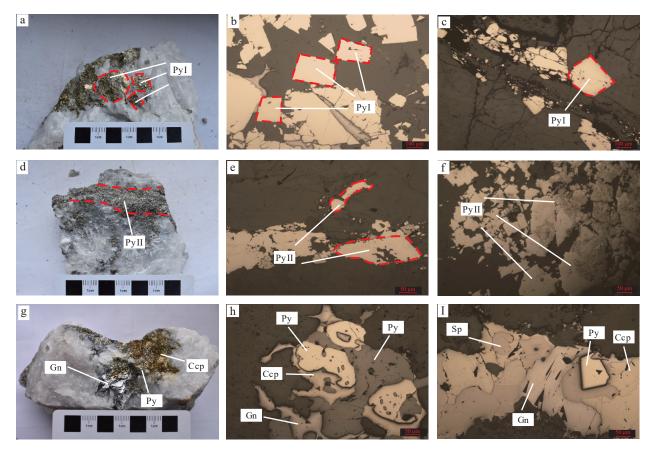
3 样品描述及分析方法

将野外采集样品磨制成光片,利用偏光显微镜对

样品进行详细的矿相学观察;根据样品的矿物组成、结构构造及共生关系对硫化物进行阶段、世代划分,并做标记;将光片送至南京聚谱检测科技有限公司开展硫化物 LA-ICP-MS 微量元素测试工作。

采用激光剥蚀瞬态信号强度(counts per second, 简称 cps) 随剥蚀时间变化及不同元素的 cps 相关关系来分析不同硫化物样品中的 Au、Ag、Te、As等元素的相对含量及分布特征,采用美国国家标准技术研究院 NIST SRM 610 玻璃与美国地质调查局熔融玻璃USGS BHVO-2G、BCR-2G 作为多重外标和美国地质调查局多金属硫化物压饼 USGS MASS-1 共同标定硫化物元素含量。激光剥蚀系统由 Teledyne Cetac Technologies 制造,型号为 Analyte Excite。

在正式测试之前,所有待测点位经大束斑预剥蚀,消除矿物表面的潜在污染。先收集 15 s 气体本底,然后以 40 um 束斑,5 Hz 频率剥蚀 40 s,气溶胶由氦气送出剥蚀池,与 Ar 混合后进入 ICP-MS 完成测试。



a~c. 第 1 世代粗粒黄铁矿(Py I),呈立方体晶形分布于乳白色石英中;d~f. 第 2 世代中细粒黄铁矿(Py II),呈脉状分布于烟灰色的石英脉中,黄铁矿较为破碎,形成众多裂隙被长英质物质充填;g~i. 第 3 世代黄铁矿(Py III),常常与黄铜矿、闪锌矿、方铅矿等硫化物密切共生;Py. 黄铁矿;Py II. 第 1 世代黄铁矿;Py II. 第 2 世代黄铁矿;Py III. 第 3 世代黄铁矿;Gn. 方铅矿;Sp. 闪锌矿;Ccp. 黄铜矿

图5 S60 矿脉不同世代黄铁矿的结构、形态及分布特征

Fig. 5 The structure and distribution about different generation pyrites of S60 vein

原始的测试数据经 ICP-MS Data Cal 软件离线处理,采用"无内标-基体归一法"对元素含量进行定量计算。

4 分析结果

黄铁矿等微量元素分析结果列于表 1 中(样品编号中带 FC 的为樊岔矿床样品,其余为杨砦峪矿床样品),在所分析的微量元素中,除成矿元素(Cu、Pb、Zn、Au、Ag)和部分亲铜、亲铁元素(As、Te、Co、Ni、)的含量普遍高于检测限以外,其他元素如 Rb、Sr、Mo、W、Hg、T1、Mn、Ge、In、Sn、Bi 均大多数或部分低于检测限。

不同世代黄铁矿中代表性元素的 LA-ICP-MS 剥蚀信号曲线(图 6)显示,不同世代黄铁矿颗粒中 Au、Ag、As、Te 等微量元素特征差异性明显。第1世代

黄铁矿(Py I)的 Au、Ag、As、Te信号强度均很低,显示早期黄铁矿-石英阶段 Au 元素含量较低,不是主要成矿阶段。第2世代黄铁矿(Py II)的 Au、Ag、Te信号与第1世代黄铁矿(Py I)明显不同,该世代黄铁矿中 Au、Ag、Te 的剥蚀信号强度较高且近于平行,表明第2世代黄铁矿(Py II)中 Au、Ag和Te具有密切的正相关关系。此外,As的信号强度一直很低,表明此阶段黄铁矿中 As的含量较低,其与 Au 元素富集无密切关系。第3世代黄铁矿(Py III)的 Au、Ag、Te信号强度与第1世代相比,略有升高,暗示有微量或少量的 Au、Ag和Te。但 As的信号强度较低且一直在底部变化,与 Au、Ag及 Te的信号曲线无关联。值得一提的是,3个世代黄铁矿中 As的含量都很低,表明区内金矿体中 Au 品位的高低与 As 无关。

笔者对部分第2世代黄铁矿微量元素 Au、Ag、Te、As信号强度相关性进行图解分析(图7)。结果表

表 1 小秦岭南中矿带 S60 矿脉不同世代黄铁矿 LA-ICP-MS 微量元素 (10^{-6}) 分析结果

Tab. 1 Trace elements analysis(10⁻⁶) for different generation pyrites of S60 vein from southern-medium ore belt of Xiaoqinling

样品编号	黄铁矿世代	微量元素含量						
	男 仄り 世代	Au	Ag	As	Те	Со	Ni	
B3/YM810-16-5	Py I	0.289	0.261	0.000	3.008	51.065	10.156	
B4/ym860-3	Py I	0.125	0.898	0.375	0.589	172.563	102.110	
B1-2/ym980-60-1	Py I	0.064	1.352	0.000	6.772	0.165	5.593	
B1/YM1100-60-1-4	Py I	0.027	0.000	1.290	0.174	0.000	1.170	
B1/YM1340-706(2)-1	Py I	0.026	0.023	10.510	2.143	1 617.610	139.482	
B3/YM810-16-1	Py I	0.020	0.641	0.088	0.362	0.783	0.857	
B1/YM1250-S60-2	Py I	0.012	0.579	0.448	3.937	1.266	3 988.74	
B1/YM1250-S60-1	Py I	0.009	3.165	0.000	12.774	103.671	57.349	
B1/YM860-60-3	Ру I	0.008	2.919	0.000	0.038	46.078	161.800	
B2/YM1100-60-1-1	Py I	0.003	0.005	4.032	0.311	2 773.345	39.256	
B3/YM810-16-3	Ру I	0.002	1.148	0.644	22.432	10.573	2.247	
B1/YM1100-60-1-5	Py I	0.001	0.003	0.722	0.368	0.026	0.923	
B3/YM1220-6'-2	Py I	0.000	0.005	12.879	0.185	30.398	559.956	
B1/YM860-60-4	Py I	0.000	0.014	8.301	0.000	1 215.701	17.754	
B1/YM860-60-8	Py I	0.000	0.003	2.407	0.152	370.177	28.096	
B1/YM1100-60-1-1	Py I	0.000	0.190	0.223	0.246	5.428	13.462	
B1/YM1100-60-1-2	Py I	0.000	0.802	0.010	0.455	1.076	35.580	
B1/YM1100-60-1-3	Py I	0.000	0.030	0.328	0.028	1.535	89.319	
B1/YM1340-706(2)-2	Py I	0.000	0.120	8.599	0.676	1 361.614	56.775	
B2/YM1100-60-1-4	Ру I	0.000	0.000	2.408	0.052	116.124	38.612	
B2/YM1100-60-1-5	Py I	0.000	0.047	2.206	0.120	183.658	15.761	
J1/YM1140(1)-2	Ру I	0.000	4.355	9.233	0.001	0.017	3.220	
J1/YM1140(1)-3	Ру I	0.000	4.045	10.151	0.000	0.018	3.984	
B1/ym730-2	Py II	36.922	153.509	0.265	44.136	156.506	158.765	
B1/YM1100-60-1-6	Py II	22.339	189.304	1.050	1 949.083	21.412	94.730	
B2/YM1100-60-1-2	Py II	0.031	0.000	6.444	0.314	10.712	367.962	
B1/ym860-1	Py II	0.114	0.076	0.218	0.824	211.179	248.814	
B4/YM540-FC-5	Py II	284.940	218.853	0.258	477.787	56.877	628.359	
J2/YM540-FC(2)-1	Py II	129.061	316.858	0.157	21 182.135	5.084	11.049	
J2/YM540-FC(2)-5	Py II	56.407	164.167	1.608	867.542	155.490	286.144	
B4/YM540-FC-6	Py II	12.492	22.570	0.219	87.628	8.755	199.259	
B4/YM540-FC-1	Py II	4.139	3.626	0.029	20.804	109.985	169.994	
B1/YM1250-S60-5	Py∭	0.143	7.555	0.081	25.553	103.771	387.159	
J1/YM1140(1)-1	Py III	0.072	19.842	351.868	1.610	0.180	13.184	
B1/YM1340-706-6	PyⅢ	0.052	0.119	0.357	9.325	7.543	181.415	
B2-1/YM800-60-6	Py Ⅲ	0.047	0.263	0.000	0.436	0.560	175.172	
B3/YM1220-6'-4	Py∭	0.040	0.161	5.777	0.526	21.375	215.513	
B2-1/YM800-60-4	Py∭	0.031	0.071	4.224	0.850	968.843	323.802	
B3-2/YM980-60-2	Py∭	0.023	4.536	16.324	2.621	3 047.222	49.869	
B3-2/YM980-60-5	Py∭	0.023	3.515	2.500	0.889	726.130	43.289	
J2/YM380(2)-2	Py∭	0.021	0.019	0.693	28.829	1 718.654	220.770	
B1-2/ym980-60-4	Py∭		0.019				28.962	
ř	ry⊪ Py∭	0.013		0.126	0.983	0.507 457 775		
B3-2/YM980-60-1	Py III Py III	0.008	0.133	6.087	1.022	457.775	27.651	
B2-1/YM800-60-2	ry m Py ∭	0.006	0.013	0.603	0.127	521.782	119.516	
B1/YM860-60-1	-	0.000	9.886	1.501	1.127	53.225	163.838	
B1/YM860-60-5	Py∭ py∭	0.000	3.874	0.000	23.452	55.775	243.199	
B1/YM860-60-6	Py∭ pШ	0.000	0.458	2.063	0.489	249.658	15.994	
B1/YM860-60-7 B1/YM1250-S60-8	Py∭ Py∭	0.000	0.874 0.002	1.411 0.094	0.083 0.000	28.961 49.423	150.559 374.494	

续表1

样品编号	黄铁矿世代	微量元素含量						
		Au	Ag	As	Те	Со	Ni	
B1/YM1340-706-4	Py Ⅲ	0.000	0.006	0.172	0.235	222.915	94.672	
B2-1/YM800-60-3	Py Ⅲ	0.000	0.656	1.244	0.464	3.368	215.149	
J2/YM540-FC(2)-7	Py Ⅲ	0.657	2.018	0.000	274.815	40.359	163.165	
J2/YM540-FC(2)-2	Py∭	0.485	45.818	0.013	176.692	0.025	0.000	
J2/YM380(2)-3	Py Ⅲ	0.034	1.573	0.542	38.064	420.350	128.781	

注:0代表检测限以下,样品采自杨砦峪、樊岔金矿床;测试单位为南京聚谱检测科技有限公司。

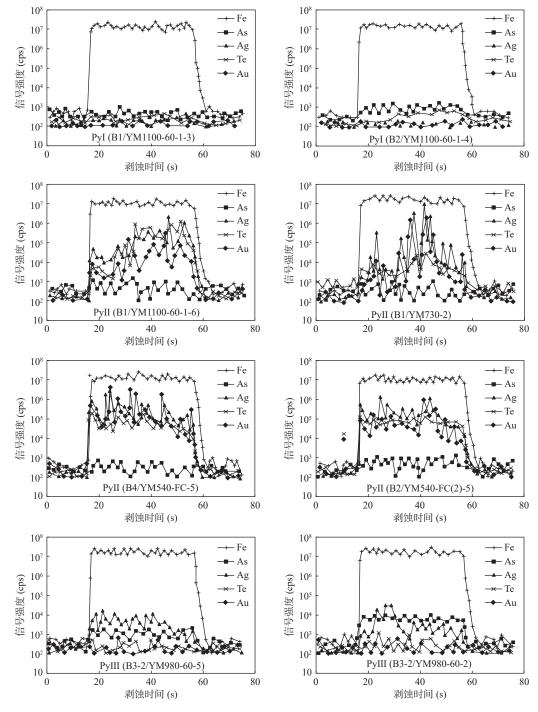


图6 S60 矿脉不同世代黄铁矿中微量元素的 LA-ICP-MS 剥蚀曲线

Fig. 6 Time-resolved laser ablation depth-profiles of representative grains of different stage pyrites from S60 mineral vein

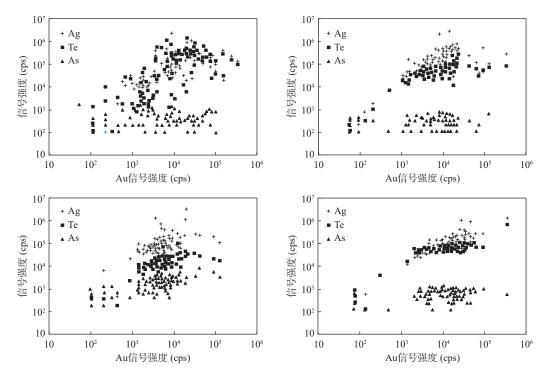


图7 S60 矿脉 Pv II 中 Au 与 Ag-Te-As 的相关关系

Fig. 7 Au, Ag, Te, and As absolute cps values for the second generation

明,杨砦峪-樊岔金矿中第2世代(PyII)黄铁矿中Au、Ag和Te相对较为富集,并且Au与Te、Ag之间存在显著且稳定的线性正相关关系,而该世代黄铁矿中微量元素As的信号强度较弱,由此可知,小秦岭地区Au的富集与As不存在正相关关系。

4.1 黄铁矿中微量元素组成特征

杨砦峪、樊岔金矿中不同世代黄铁矿(Py I、Py II、Py II、Py II) 中 Au、Ag、Co、Ni、Te、As含量及其分布特征有显著差异。不同世代黄铁矿 Co、Ni 信号较为平坦,而且与 Fe 的谱线近于平行(图 8),表明亲铁元素 Co、Ni 主要以类质同象的形式赋存于黄铁矿中。不同世代黄铁矿的 Co、Ni 含量及 Co/Ni 值也具有规律性变化, Py II 黄铁矿中 Co/Ni 值基本上都大于 1, Py II 黄铁矿 Co/Ni 值基本上为 1, Py III 黄铁矿中 Co/Ni 值都大于 1, Py II 黄铁矿中 Co/Ni 值明显高于Py II。笔者认为 Py II 阶段黄铁矿形成的温度较低,从而导致 Co、Ni 在黄铁矿中的类质同象能力降低。

前人认为,在温度<350 °C、pH值接近中性的富硫成矿热液中 Au主要以络合物 Au(HS) $^{\circ}$ 、Au(HS) $_{\circ}$ " Nu(HS) $_{\circ}$ " 的形式存在,由于富砷黄铁矿对 Au离子的吸附及 As以类质同象的形式替代黄铁矿中的 ST离子,因此含砷黄铁矿中 Au与 As常存在显著的线性关系(Reich et al, 2005)。杨砦峪、樊岔金矿床不同世代黄铁矿的 LA-

ICP-MS 分析信号曲线显示 As 的信号强度整体都比较低, Py I、PyⅢ中 As 部分含量相对较高的但 Au 含量较低, Py Ⅱ的 Au 含量最高却几乎不含 As, 表明该地区金矿床中黄铁矿中 Au 的富集与 As 无关。

Py II 中的 Au 微量元素的信号强度在随剥蚀时间的增加而达到峰值(图 6),指示该元素的微米级的包裹体存在(范宏瑞, 2018),这也与前人得到的 S60 黄铁矿中存在大量微米,亚微米的矿物自然金、含金碲化物包体一致(Jian et al., 2014; Liu et al., 2020)。

黄铁矿中 Au 和 Ag、Te 之间存在较强的正相关关系(图 6),其中尤以 Py II 最为明显(图 8)。 Py I 中 Au、Ag、Te 的含量普遍较低, Py II 的 Au、Ag 和 Te 含量显著增加,且 Au 和 Te 之间存在明显的线性正相关关系, Py III 的 Au、Ag 和 Te 含量均比 Py I 含量高但少于 Py II。在杨砦峪、樊岔矿床中可以见到碲金矿、碲银矿、辉碲铋矿等矿物(Jian et al., 2014; Jian et al., 2020; Liu et al., 2020),据此可以认为 Te 对杨砦峪、樊岔金矿床形成过程中金的搬运和富集具有重要作用。

4.2 碲化物的形成机理

研究表明,在 $100\sim300^\circ$ 的温度下, Te 在 pH 值为 8 的流体中溶解度是 pH 值为 5 的 2 倍,高价态的 Te 在流体中的溶解度远大于低价态的 Te(Grundler et al., 2013)。Au 在中偏碱性流体中主要以 Au(HS)₂形式

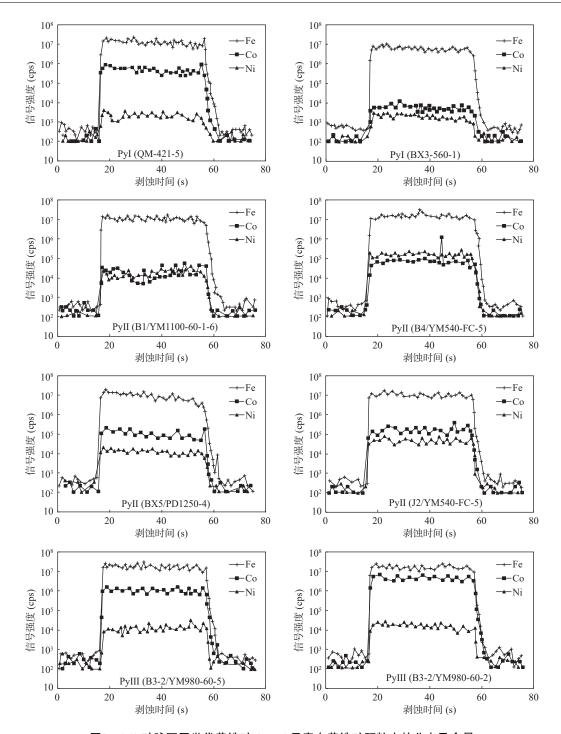


图8 S60 矿脉不同世代黄铁矿 Co、Ni 元素在黄铁矿颗粒中的分布及含量

Fig. 8 The distribution and absolute contents of Co and Ni from the different generation of pyrites in S60 mineral vein

存在,高pH值的流体可以有效的从源岩中萃取 Te并在溶液中进行长距离的迁移(Keith et al., 2018)。 Te 在pH值为中性至碱性、低盐度、高温度和高氧逸度 (fO₂)下易溶于热液中,而 Te 的溶解度在更还原条件下明显降低, Te^{4+} 的还原导致 Te 的沉淀(Gao et al., 2017; Grundler et al., 2013)。 因此,Te 和 Au 在中偏碱性、高氧逸度流体中可大量溶解,而在低氧逸度溶液

中会发生快速沉淀。

碲化物通常形成于硫逸度较低而碲逸度较高的流体体系,不同成矿阶段成矿流体中硫逸度和碲逸度的相对变化会导致碲化物含量和赋存形式的差异(Barton et al., 1979)。杨砦峪、樊岔金矿中成矿早期Py I 中 Au、Te 含量较低,表明成矿早期流体的硫逸度很高而碲逸度很低,因而形成的黄铁矿贫碲贫金。

PyⅡ中Au、Ag、Te等微量元素相对富集,且Te与Au、Ag存在明显正相关性,表明Te与Au、Ag可能以熔融态的微细粒固溶体共同迁移、富集和沉淀(McPhail,1995;刘俊辰,2020),PyⅢ中Au、Ag和Te含量比PyⅠ含量高但少于PyⅡ,表明随着碲化物沉淀成矿流体的碲逸度降低。

4.3 成矿物质来源

前人对小秦岭金矿田成矿流体和成矿物质的来源开展较多研究,主要观点可以概括为4类:①成矿物来自地层(冯建之,2009)。②成矿物质来自地幔。 ③成矿物质来自地层和燕山期花岗岩(毛景文等,2005)。④成矿物质来自燕山期花岗岩。

黄铁矿微量元素测试结果表明, Au 的含量与碲关系密切, 因此综合分析碲的来源对杨砦峪、樊岔金矿成矿流体的来源和成矿机制研究具有重要意义。前人研究表明大多数富含碲化物的矿床与岩浆作用关系较为密切。邵克忠等(1989)在河南省祁雨沟金矿中发现大量 Au-Ag-Te 系列矿物, 大量流体包裹体和稳定同位素特征资料表明祁雨沟金矿床的成矿物质(包括碲)主要来自岩浆或地幔(Chen et al., 2009; Fan et al., 2011)。毕诗健等(2016)对东桐峪金矿床中不同阶段的黄铁矿进行原位分析, 同样认为碲主要来源于岩浆或地幔的脱气作用。据此笔者认为杨砦峪、樊岔金矿中碲元素可能来源于岩浆或地幔的脱气作用,这与 Jian 等(2014)、Liu 等(2020)的认识一致。

杨砦峪金矿与樊岔金矿成矿时代均为130 Ma 左右(Li et al., 2012a, 2012b; Liu J et al., 2020),与燕山期花岗岩形成时间接近。前人对杨砦峪矿床做过流体包裹体研究,结果表明杨砦峪金矿床的成矿流体属低盐度的 CO₂-H₂O-Nacl 体系,均一温度为216~346℃,盐度属低盐度(6%~8.7%NaCleq),而且成矿温度、盐度与压力随着成矿作用的进行逐渐降低(吴桐, 2019)。这与高盐度、富含子晶的变质流体截然不同,而与燕山期花岗岩岩浆期后低盐富 CO₂、H₂O 的流体十分相似,这些特征和规律反映本区金矿在成因上与燕山期花岗岩浆活动有关,而与变质作用、混合岩化没有直接关系。

杨砦峪金矿床的碳、氢、氧、硫、铅、氦、氩同位 素的组成特征表明矿床的成矿流体主要来源于地幔 深部,同时混有地壳深部流体。而随着成矿过程的推 进,逐渐有着与大气降水等浅源流体相混合的趋势, 这些特征与小秦岭地区在中生代的伸展构造环境下 变质核杂岩伸展隆升的构造演化特征相一致(Li et al., 2020)。

4.4 矿床成因类型

小秦岭金矿田成因争议很大,主流观点为造山 型金矿与岩浆热液型金矿。造山型金矿床实际是指 赋存在造山带的热液金矿床,其成矿过程未必与克 拉通化过程中的增生/碰撞造山作用有关,成矿流体 一般主要来自区域变质作用过程中的脱挥发分,以 壳幔源变质流体为主,成矿构造主要为挤压或压扭 性变形。小秦岭金矿田蚀变矿化特征与造山型金矿 有一定的相似性,但二者在以下方面存在显著区别: 小秦岭金矿田中热液碳酸盐的含量远低于典型造山 型金矿床,缺少成矿早期和主成矿阶段的石英-碳酸 盐岩型金矿化;小秦岭金矿田矿石中As的含量普遍 较低而 Te 的含量较高, 相反造山型金矿普遍富 As 和毒砂;流体包裹体、微量元素的研究表明成矿流 体来源以岩浆为主,而非变质流体;小秦岭金矿田 成矿具短期爆发性特点(卢欣祥, 2004), 造山型金矿 成矿作用时间通常持续50~70 Ma或更长时间 (Goldfarb et al., 2001; Robert et al., 2005); 造山型金矿 主要形成于长期挤压构造环境,而小秦岭金矿田总 体形成于强烈伸展构造背景下(Li et al., 2020)。小 秦岭金矿田既不同于前寒武纪克拉通脉状造山型金 矿,也不同于世界其他地区典型造山型金矿,笔者 更倾向于认为是由于西太平洋板块俯冲、回撤、滞 留板块脱水导致导致克拉通属性改变的克拉通破坏 型金矿(朱日祥, 2015)。

4.5 成矿作用模式

小秦岭金矿田在 110~130 Ma 发生大规模金成矿作用(陈衍景等, 1998),同时与小秦岭变质核杂岩的伸展隆升时间(116~135 Ma)及小秦岭地区的很多燕山期花岗岩形成年龄(毛景文, 2005; Mao et al., 2010; Li et al., 2012a)总体一致。

中生代晚期古太平洋板块俯冲、后撤,增厚的下地壳和下伏岩石圈地幔发生了拆沉作用(Mao et al., 2008;高山等,2009),促使华北克拉通岩石圈不断减薄,导致在强烈的伸展条件下,大量软流圈物质上涌,与下地壳发生大面积的壳幔作用形成,形成了金矿床的爆发成矿(图9),构成了小秦岭金矿田以及中国东部中生代成矿作用大爆发的完整旋回(卢欣祥,2004;朱日祥等,2021)。

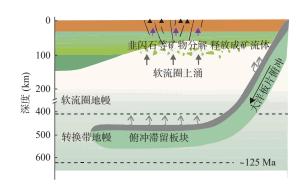


图9 克拉通破坏型金矿成矿模式图(朱日祥, 2021)

Fig. 9 The metallogenic model of decratonic gold deposits

5 结论

- (1)杨砦峪-樊岔金矿中的黄铁矿可依次划分成 3个世代(Py I、Py II、Py III),不同世代的黄铁矿具 有不同的矿物结构及矿物共生组合特征,并且 Py II 形成于主成矿阶段。
- (2)杨砦峪-樊岔金矿中的 Te 元素对 Au 元素沉淀和富集具有重要作用。不同世代黄铁矿中 Au、Ag、Te、Co、Ni、As等微量元素的含量及其分布特征具有较显著的差异性,主要表现为第 2 世代黄铁矿中 Au 与 Te 尤为富集且两者存在明显正相关关系, 3 个世代黄铁矿中 As 的含量均较低, Au 元素贫富与 As 没有相关性。
- (3)杨砦峪-樊岔金矿中富含碲化物,其成因与岩浆作用存在密不可分的成因联系。杨砦峪-樊岔金矿成矿流体、成矿物质可能来自深部岩浆的脱挥发分或地幔脱气,矿床的成矿地质背景主要与华北克拉通破坏有关。

致谢:野外工作得到灵宝市自然资源局和杨砦 峪金矿、樊岔金矿相关技术人员的大力支持,审稿 专家对本文提出了宝贵的修改意见,在此一并感谢。

参考文献(References):

- 毕诗健,李占轲,唐克非,等.小秦岭东桐峪金矿床黄铁矿 LA-ICP-MS 微量元素特征及其成矿意义[J]. 地球科学, 2016, 41(7): 1121-1140.
- BI Shijian, LI Zhanke, TANG Kefei, et al. LA-ICP-MS In Situ Trace
 Element Analysis of Pyrite from Dongtongyu Gold Deposit and
 Its Metallogenic Significance, Xiaoqinling Gold District[J].
 Earth Science, 2016, 41(7): 1121–1140.

- 陈衍景,郭光军,李欣. 华北克拉通花岗绿岩地体中中生代金矿 床的成矿地球动力学背景 [J]. 中国科学 D辑: 地球科学, 1998, 28(1): 35-40.
- CHEN Yan jing, GUO Guangjun, LI Xin. Metallogenic Geodynamic Setting of Mesozoic gold deposits in granite greenstone terrane of North China Craton[J]. Science in China Series D-Earth Sciences, 1998, 28(1): 35–40.
- 陈衍景. 造山型矿床、成矿模式及找矿潜力[J]. 中国地质, 2006, 33(6): 1181-1196.
- CHEN Yanjing. Orogenic-type deposits and their metallogenic model and exploration potential [J]. Geological in China, 2006, 33(6); 1181–1196.
- 范东旭,夏元鹏.小秦岭西峪-桐峪金矿矿床物质组分及金赋存状态研究[J].西北地质,2023,56(1):254-265.
- FAN Dongxu, XIA Yuanpeng. Material Components and Occurrence States of Gold and Silver in the Xiyu–Tongyu Gold Deposit, Xiaoqinling, Shaanxi Province [J]. Northwestern Geology, 2023, 56(1): 254–265.
- 范宏瑞,李兴辉,左亚彬,等. LA-(MC)-ICPMS 和 (Nano)SIMS 硫 化物微量元素和硫同位素原位分析与矿床形成的精细过程[J]. 岩石学报, 2018, 34(12): 3479-3496.
- FAN Hongrui, LI Xinghui, ZUO Yabin, et al. In situ LA-MC-ICP-MS and (Nano) SIMS trace elements and sulfur isotope analyses on sulfides and application to confine metallogenic process of ore deposit[J]. Acta Petrologica Sinica, 2018, 34(12): 3479–3496
- 冯建之. 河南小秦岭金矿构造控矿规律及控矿模式[J]. 矿产与地质, 2009, 23(4): 302-307.
- FENG Jianzhi. Ore-controlling structure and model in Xiaoqinling gold deposit, Henan[J]. Mineral Resources and Geology, 2009, 23(4): 302–307.
- 高山,章军锋,许文良,等. 拆沉作用与华北克拉通破坏[J]. 科学通报,2009,54:1962-1973.
- GAO Shan, ZHANG Junfeng, XU Wenliang, et al. Delamination and destruction of the North China Craton [J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54: 1962–1973.
- 葛战林,顾雪祥,章永梅,等.南秦岭柞水-山阳矿集区金盆梁金矿床载金硫化物矿物学特征及成矿指示[J].西北地质,2023,56(5);278-293.
- GE Zhanlin, GU Xuexiang, ZHANG Yongmei, et al. Mineralogical Characteristics and Metallogenic Indication of Gold–Bearing Sulfides in the Jinpenliang Gold Deposit, Zhashui–Shanyang Ore Cluster Area, South Qinling[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(5): 278–293.
- 姜寒冰, 杨合群, 赵国斌, 等. 西秦岭成矿带区域成矿规律概论 [J]. 西北地质, 2023, 56(2): 187-202.
- JIANG Hanbing, YANG Hequn, ZHAO Guobin, et al. Discussion on the Metallogenic Regularity in West Qinling Metallogenic Belt,

86

- China[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(2): 187-202.
- 蒋少涌,戴宝章,姜耀辉,等.胶东和小秦岭:两类不同构造环境 中的造山型金矿省[J]. 岩石学报, 2009, 25(11): 2727-2738.
- JIANG Shaoyong, DAI Baozhang, JIANG Yaohui, et al. Jiaodong and Xiaoqinling: two orogenic gold province formed in different tectonic settings [J]. Acta Petrological Sinica, 2009, 25(11): 2727-2738.
- 李厚民,王登红,王晓霞,等.华北地块南缘熊耳山早中生代正 长花岗岩——SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄、地球化学及意义 [J]. 岩石矿物学杂志, 2012, 31(6): 771-782.
- LI Houmin, WANG Denghong, WANG Xiaoxia, et al. The Early Mesozoic syenogranite in Xionger Mountain area, Southern margin of North China Craton: SHRIMP zircon U-Pb dating, geochemistry and its significance[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2012, 31(6): 771-782.
- 刘俊辰. 小秦岭金矿集区成矿物质来源与富集机制-以樊岔金 矿床为例[D].北京:中国地质大学(北京), 2020, 1-90.
- LIU Junchen. Origins of the ore-forming materials and enrichment mechanism in the Xiaoqinling goldfield, southern margin of the North China Craton: A case study of the Fancha gold deposit [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2020, 1-90.
- 卢欣祥, 尉向东, 董有, 等. 小秦岭—熊耳山地区金矿特征与地 幔流体 [M]. 北京: 地质出版社: 2004, 82-101.
- LU Xinxiang, YU Xiangdong, DONG You, et al. Characteristics of Gold Deposits of Xiaoqinling-Xiongershan region and mantle fluid[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004, 82–101.
- 毛景文,谢桂青,张作衡,等.中国北方中生代大规模成矿作用 的期次及其地球动力背景[J]. 岩石学报, 2005, 21(1): 169-188.
- MAO Jingwen, XIE Guiqing, ZHANG Zuoheng, et al. Mesozoic Large-scale metallogenic pules in North China and corresponding geodynamic settings[J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21(1): 169-188.
- 邵克忠, 栾文楼. Bi-硫盐、Bi-碲化物-祁雨沟爆发-坍塌角砾岩 型金矿床成因及找矿标志[J]. 河北地质学院学报, 1989, 12(3): 299-305.
- SHAO Kezhong, LUAN Wenlou. Bi- Sulfosalts and Bi-Tellurides-Genetic and Exploration Criteria for the Explosive-Collapsed Breecia Gold Ore Deposits, Qiyugou Area[J]. Journal of Hebei College of Geology, 1989, 12(3): 299-305.
- 王洁明, 董苏庆, 雷群英. 陕西金矿成矿规律与找矿靶区圈定 [J]. 西北地质, 2023, 56(5): 308-321.
- WANG Jieming, DONG Suqing, LEI Qunying. Metallogenic Regularity and Prospecting Target Delineation of Shaanxi Gold Deposit[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(5): 308-321.
- 王雷, 刘家军, 翟德高, 等. 小秦岭镰子沟金矿床成矿物质来源 与成矿过程[J]. 地质学报, 2018, 92(2): 341-358.

WANG Lei, LIU Jiajun, ZHAI Degao, et al. Material Sources and Ore-Forming Process of the Lianzigou Gold Deposit in Xiaoqinling[J]. Acta Geological Sinica, 2018, 92(2): 341-358.

NORTHWESTERN GEOLOGY

- 吴桐. 小秦岭杨砦峪金矿床地球化学特征及矿床成因探讨 [D]. 北京:中国地质大学(北京), 2019, 1-85.
- WU Tong. Geochemical characteristics and ore genesis of the Yangzhaiyu gold deposit in Xiaoqinling district[D]. Beijing:China University of Geosciences: 2019, 1-85.
- 杨合群,赵国斌,姜寒冰,等.西秦岭成矿带矿床成矿系列概论 [J]. 西北地质, 2022, 55(1): 114-128.
- YANG Hequn, ZHAO Guobin, JIANG Hanbing, et al. Discussion on the Metallogenic Series of Mineral Deposits in the Metallogenic Belt of West Qinling, China[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(1): 114-128.
- 展恩鹏, 王玭, 齐楠, 等. 河南灵宝樊岔金矿床成矿流体和同位 素地球化学研究[J]. 矿床地质, 2019, 38(3): 459-478.
- ZHAN EnPeng, WANG Pin, QI Nan, et al. Ore-forming fluid and isotope geochemical study of Fancha gold deposit in Lingbao County Henan Province[J]. Mineral Deposits, 2019, 38(3): 459-478.
- 朱日祥, 范宏瑞, 李建威, 等. 克拉通破坏型金矿床[J]. 中国科 学: 地球科学, 2015, 45(8): 1153-1168.
- ZHU Rixiang, FAN Hongrui, LI Jianwei, et al. Decratonic gold deposits[J]. Science China: Earth Sciences, 2015, 45(8): 1153-1168.
- 朱日祥, 孙卫东. 大地幔楔与克拉通破坏型金矿[J]. 中国科学: 地球科学, 2021, 51: 1-8.
- ZHU Rixiang, SUN Weidong. The big mantle wedge and decratonic gold deposits [J]. Science China Earth Sciences, 2021, 51: 1-8.
- Barton P B, Skinner B J. Sulfide Mineral Stabilities. In: Barnes, H. L., ed., Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits[J]. Wiley Interscience, New York, 1979, 278-403.
- Bi S J, Li J W, Zhou M F, et al. Gold distribution in As-deficient pyrite and Telluride minerallogy of the Yangzhaiyu gold deposit, Xiaoqinling district, southern Northern China Craton[J]. Mineralium Deposita, 2011, 46(8): 925-941.
- Chen L, Cheng C, Wei Z G. Seismic Evidence for Significant Lateral Variations in Lithospheric Thickness beneath the Central and Western North China Craton[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2009, 286(1-2): 171-183.
- Chen Y J, Santosh M. Triassic tectonics and mineral systems in the Qinling Orogen, central China[J]. Geological Journal, 2014, 49(4-5): 338-358.
- Deng X, Peng T, Zhao T. Geochronology and geochemistry of the late Paleoproterozoic aluminous A-type granite in the Xiaoqinling area along the southern margin of the North China Craton: Petrogenesis and tectonic implications[J]. Precambrian Research, 2016, 285: 127-146.

- Fan H R, Hu F F, Wilde S A, et al. The Qiyugou Gold-Bearing Breccia Pipes, Xiong ershan Region, Central China: Fluid-Inclusion and Stable-Isotope Evidence for an Origin from Magmatic Fluids[J]. International Geology Review, 2011, 53(1): 25–45.
- Gao S, Xu H, LI S R, et al. Hydrothermal alteration and ore-forming fluids associated with gold-tellurium mineralization in the Dongping gold deposit, China[J]. Ore Geology Reviews, 2017, 80: 166–184.
- Goldfarb R, Groves D I, Gardoll S. Orogenic gold and geologic time: A global synthesis [J]. Ore Geol Rev, 2001, 18: 1–75.
- Grundler P V, Brugger J, Etschmann B E, et al. Speciation of aqueous tellurium(IV) in hydrothermal solutions and vapors, and the role of oxidized tellurium species in Te transport and gold deposition[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2013, 120: 298–32.
- Jian W, Lehmann B, Mao J W, et al. Telluride and Bi-sulfosalt mineralogy of the Yangzhaiyu gold deposit, Xiaoqinling region, Central China. Canad [J]. Mineralogist, 2014, 52: 883–898.
- Jian W, Mao J, Lehmann B, et al. Lingbaoite, AgTe3, a new silver telluride from the Xiaoqinling gold district, central China[J]. American Mineralogist, 2020, 105: 745-755.
- Keith M, Smith D J, Jenkin G R T, et al. A review of Te and Se systematics in hydrothermal pyrite from precious metal deposits: insights into ore-forming processes [J]. Ore Geology Reviews, 2018, 96: 269–282.
- Li C, Li L, Li S R, et al. Late Paleoproterozoic mafic-intermediate dykes from the southern margin of the North China Craton: Implication for magma source and Columbia reconstruction[J]. Precambrian Research, 2020, 347: 105837.
- Li J W, Bi S J, Selby David, et al. Giant Mesozoic gold provinces related to the destruction of the North China Craton[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2012a, 349–350: 26–37.
- Li J W, Li Z K, Zhou M F, et al. The Early Cretaceous Yangzhaiyu lode gold deposit, North China Craton: A link between craton reactivation and gold veining[J]. Economic Geology, 2012b, 107(1):43–79.
- Li N, Chen Y J, Santosh M, et al. Late Mesozoic granitoids in the

- Qinling Orogen, Central China, and tectonic significance [J]. Earth-Science Reviews, 2018, 182: 141–173.
- Li Y, Zhu G, Su N, et al. The Xiaoqinling metamorphic core complex: A record of Early Cretaceous backarc extension along the southern part of the North China Craton [J]. GSA Bulletin, 2020, 132: 617–637.
- Liu J, Wang Y, Huang S, et al. The gold occurrence in pyrite and Te–Bi mineralogy of the Fancha gold deposit, Xiaoqinling gold field, southern margin of the North China Craton: Implication for ore genesis [J]. Geological Journal, 2020, 55: 5791–5811.
- Liu J C, Wang Y T, Hu Q Q, et al. Ore genesis of the Fancha gold deposit, Xiaoqinling goldfield, southern margin of the North China Craton: Constraints from pyrite Re-Os geochronology and He-Ar, in-situ S-Pb isotopes[J]. Ore Geology Reviews, 2020, 119: 1–17.
- Mao J W, Wang Y T, Li H M, et al. The relationship of mantle-derived fluids to gold metallogenesis in the Jiaodong Peninsula: Evidence from D-O-C-S isotope systematics[J]. Ore Geology Reviews, 2008, 33: 361–381.
- Mao J W, Xie G Q, Pirajno F, et al. Late Jurassic-Early Cretaceous granitoid magmatism in Eastern Qinling, central-eastern China: SHRIMP zircon U-Pb ages and tectonic implications [J]. Australian Journal of Earth Sciences, 2010, 57: 51–78.
- McPhail, D. C. Thermodynamic Properties of Aqueous Tellurium Species between 25 °C and 350 °C [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59(5): 851–866.
- Reich M, Kesler S E, Utsunomiya S, et al. Solubility of Gold in Arsenian Pyrite[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2005, 69(11): 2781–2796.
- Robert F, Poulsen K H, Cassidy K F, et al. Gold metallogeny of the Superior and Yilgarn cratons. Bull Soc Econom Geol[J]. One Hundredth Anniversary, 1905–2005: 1001–1033.
- Wang P, Mao J W, Ye H S, et al. The Qiyugou Au orefield An intrusion-related gold system in the Eastern Qinling ore belt, China: Constraints from SIMS zircon U-Pb, molybdenite Re-Os, sericite ⁴⁰Ar-³⁹Ar geochronology, in-situ S-Pb isotopes, and mineralogy [J]. Ore Geology Reviews, 2020, 124: 103636.