



引文格式: 辛明宇, 刘丽, 盛渊明, 等. 东秦岭北岭金矿床黄铁矿标型特征及成矿指示意义[J]. 西北地质, 2025, 58(5): 75–86. DOI: 10.12401/j.nwg.2025059

Citation: XIN Mingyu, LIU Li, SHENG Yuanming, et al. Typomorphic Characteristics and Metallogenic Indicative Significance of Pyrite in Beiling Gold Deposit, East Qinling[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(5): 75–86. DOI: 10.12401/j.nwg.2025059

东秦岭北岭金矿床黄铁矿标型特征及成矿指示意义

辛明宇¹, 刘丽^{1,*}, 盛渊明², 曾涛¹, 王汉辉¹, 陈龙龙¹, 唐利¹

(1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 中国石油集团测井有限公司
测井技术研究院, 陕西 西安 710077)

摘要: 北岭金矿床地处东秦岭熊耳山多金属矿集区, 作为典型的受构造控制的蚀变岩型金矿床, 其深部成矿潜力亟待深入探究。本研究聚焦于北岭金矿床 530 m 与 620 m 标高矿体中的载金矿物黄铁矿, 借助野外地质调查、矿相学分析, 以及对载金矿物黄铁矿的产出特征、成分标型特征和热电性特征的系统研究, 深入探讨不同标高黄铁矿的成矿温度、形成深度及剥蚀率, 获得如下成果与认识: ①针对 530 m 与 620 m 两段标高的黄铁矿样本开展分析, $Fe/(As + S)$ 值未呈现显著差异, 这一结果表明两段标高处的黄铁矿均处于矿体中深部位置, Au/Ag 值显示该矿体为岩浆热液成因。②经测定, 530 m 标高的黄铁矿平均形成温度为 202~291 °C, 620 m 标高的黄铁矿平均形成温度则为 219~275 °C, 两段标高的黄铁矿形成温度基本相近, 指示其形成于中温环境。③530 m 标高的矿体剥蚀率为 53.0%~54.0%, 620 m 标高的矿体剥蚀率为 53.5%~56.8%, 整体呈现出较低的剥蚀率。研究结果表明, 北岭金矿床两段标高的黄铁矿样品均处于矿体中深部位置, 这代表着矿体向深部存在延展空间, 具备较大的深部勘查潜力。

关键词: 秦岭造山带; 北岭金矿; 黄铁矿; 标型特征

中图分类号: P579; P617.9

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2025)05-0075-12

Typomorphic Characteristics and Metallogenic Indicative Significance of Pyrite in Beiling Gold Deposit, East Qinling

XIN Mingyu¹, LIU Li^{1,*}, SHENG Yuanming², ZENG Tao¹, WANG Hanhui¹, CHEN Longlong¹, TANG Li¹

(1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Logging Technology Research
Institute, China National Logging Corporation, Xi'an 710077, Shaanxi, China)

Abstract: Beiling gold deposit is located in the Xiong'er-shan polymetallic ore cluster in Eastern Qinling, as a typical tectonically controlled alteration rock gold deposit, its deep metallogenic potential needs to be explored urgently. This study focused on the gold-bearing mineral pyrite in the 530 m and 620 m elevation orebodies of the F881 ore body at the Beiling Gold Deposit. With the help of field geological investigation, mineralogical analysis, and systematic study of the production characteristics, composition standard characteristics and thermo-electric characteristics of gold-bearing mineral pyrite, the metallogenic temperature, formation depth and de-

收稿日期: 2024-11-15; 修回日期: 2025-04-16; 责任编辑: 吕鹏瑞

作者简介: 辛明宇(2000-), 男, 硕士研究生, 地质资源与地质工程专业。E-mail: 624597951@qq.com。

* 通讯作者: 刘丽(1982-), 女, 实验师, 主要从事矿床地球化学专业与实验室管理工作。E-mail: liuli1102102@163.com。

denudation rate of pyrite at different elevations are deeply discussed, and the following results and understandings are obtained: ① Analysis of pyrite samples at 530 m and 620 m elevations shows no significant difference in $\omega(\text{Fe})/\omega(\text{As}+\text{S})$ values, which indicates that the pyrite at the elevations of the two elevations is in the middle and deep positions of the ore body. At the same time, the $\omega(\text{Au})/\omega(\text{Ag})$ ratio indicates that the ore body is of magmatic hydrothermal origin. ② The average formation temperature of pyrite at 530 m elevation is 202~291 °C, and the average formation temperature of pyrite at 620 m elevation is 219~275 °C, The formation temperature of pyrite in the two elevations is basically the same, indicating that it was formed in a mesothermal environment. ③ In terms of ore body denudation rates over two elevations, the ones at the 530 m elevation is from 53.0% to 54.0% and the ones at the 620 m elevation is from 53.5% to 56.8%, showing a lower denudation rate overall. Based on the above research results, the pyrite samples of the two elevations of the Beiling gold deposit are in the middle and deep positions of the ore body, which indicates that there is room for extension of the ore body to the deep part and has great potential for deep exploration.

Keywords: Qinling orogenic belt; Beiling gold deposit; pyrite; typomorphic characteristics

秦岭造山带作为中央造山带中部的关键枢纽,是扬子板块与华北板块在新元古代—中生代历经多期碰撞造山作用的产物(Dong et al., 2016; Tang et al., 2025)。在造山运动的驱动下,该区域构造—岩浆—流体活动极为强烈,进而孕育出数量可观、规模及大小各异的金属矿床。其中,钼矿与金矿的发育态势尤为显著,成矿地质条件十分优越(段湘益等, 2024; 孟五一等, 2024; 焦阳等, 2024; 王立峰等, 2024; 刘诚等, 2025)。秦岭造山带内分布着多个典型矿集区,自东向西依次涵盖熊耳山矿集区、栾川矿集区、崤山矿集区、小秦岭矿集区等(图 1),该造山带内金资源储量逾 1 000 t,展现出巨大的开采价值(曾涛等, 2022)。熊耳山矿集区地处华北板块南缘,是秦岭造山带东段重要的金—多金属矿集区之一(Tang et al., 2022),矿集区内出露的矿种类型以金、钼、银、铅、锌、铜为主。区内岩浆活动在太古宙、古元古代、三叠纪、晚侏罗世和早白垩世均有发生,其中以晚侏罗世—早白垩世岩浆活动最为强烈,该期岩浆活动为多金属矿床提供了重要的物质来源(Hu et al., 2022; 赵江林等, 2024)。

北岭金矿床作为熊耳山矿集区典型的构造蚀变型矿床,其矿体和蚀变带严格受断裂构造控制。前人基于成岩成矿年龄、同位素和流体包裹体等方面的研究成果,对北岭金矿的成矿机制,成矿流体来源已有成熟的认识,认为北岭金矿床的形成机制为古太平洋板块的俯冲促使熔流体与古老岩石圈地幔发生交代作用,致使岩石圈减薄,大量成矿元素从地幔中挥发,并迁移至前部地壳形成了北岭金矿(抄尉尉, 2019)。但由于热液金矿床的形成深度和深部延伸可能达到

数百米到数千米,而北岭金矿的矿体的实际控制深度仅 460 余 m,故北岭金矿向深部可能仍有较大的延伸空间,其深部成矿规律与找矿潜力仍亟待深入探究。

笔者选取北岭金矿床 F881 矿体 530 m 和 620 m 两个标高的载金矿物黄铁矿作为研究对象,在查明黄铁矿产出特征和类型划分的基础上,系统地研究不同标高、不同类型黄铁矿的成分标型特征和热电型标型特征,探讨北岭金矿床的深部成矿潜力,从而为下一步找矿勘查提供借鉴。

1 区域地质背景

熊耳山矿集区位于华北板块南缘(图 1b),北以洛宁断裂为界,南以马超营断裂为界。矿集区内大多数矿床赋存在太华群及熊耳群,汝阳群及白垩系地层仅在东部边缘少量出露。熊耳山地区岩石基底为新太古代—古元古代太华群,是一套中深成变质岩系,主要岩性为 TTG 片麻岩和角闪岩等,自下而上可分为草沟组、石板沟组和段沟组。草沟组和石板沟组的主要岩性为黑云斜长片麻岩和角闪岩;段沟组主要发育黑云角闪片麻岩和麻粒岩。区域内出露地层还有中元古界长城系熊耳群大古石组、许山组、鸡蛋坪组、马家河组,新元古界蓟县系官道口群高山河组、龙家园组、巡检司组、杜关组、冯家湾组以及第四系沉积物。中元古界主要发育一套火山喷出岩和火山碎屑岩,其中大古石组自下而上岩性由砾岩渐变为角砾岩和泥岩,许山组和鸡蛋坪组主要岩性为安山岩、流纹岩和英安岩互层,马家河组发育一套富钾的火山熔岩夹粉

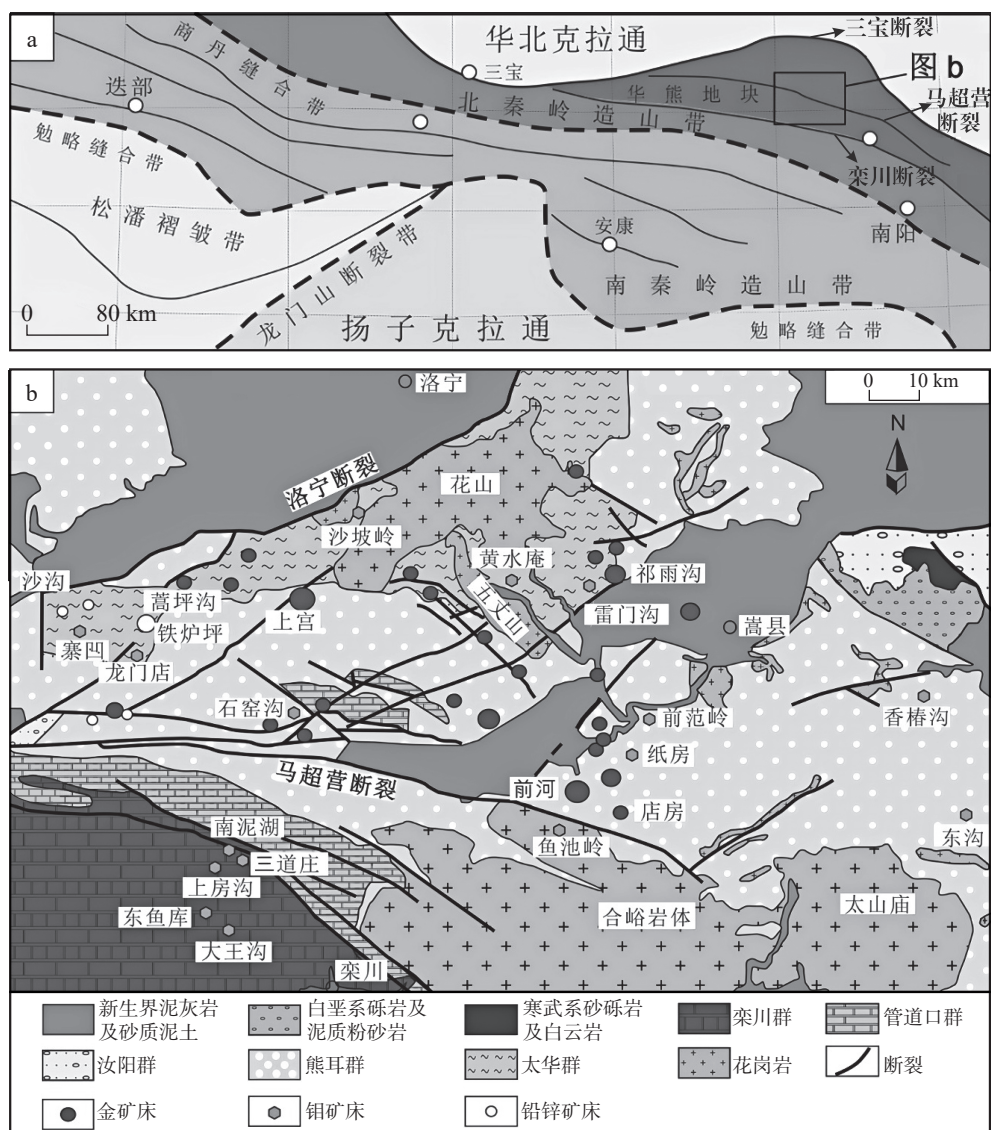


图1 秦岭造山带地质简图(a)和熊耳山矿集区地质简图(b)(据曾涛等, 2022 修改)

Fig. 1 (a) Simplified geological map of the Qinling Orogenic Belt and (b) geological map of the Xiong'ershan region

砂质泥岩; 新元古界蓟县系官道口群发育一套陆源碎屑岩-含叠层石碳酸盐岩沉积构造, 以石英砂岩和白云岩为主。高山河组分为上、中、下三段, 上段岩性为石英砂岩和黏土岩互层, 中段岩性为辉石粗面岩、粗面斑岩及蚀变安山岩, 下段岩性主要为石英砂岩夹黏土岩。龙家园组发育白云岩夹厚层状结晶白云岩, 多见硅质燧石条带; 巡检司组和杜关组岩性均为浅灰色白云岩, 杜关组内发育叠层石构造; 冯家湾组发育白云岩夹板岩。熊耳群与下伏地层太华群呈角度不整合或断层接触(抄尉尉, 2019; 李肖龙等, 2019)。

受秦岭造山带大规模区域性碰撞造山作用的影响, 熊耳山地区经历了多期构造运动, 构造产物以东西向的断裂构造和北东向的断层为主(孟栋材, 2020)。

熊耳山矿集区内构造断裂极为发育, 分布错综复杂, 走向总体可分为NE向、N-NE向、N-NW向和EW向(陈雷等, 2011)。其中, 断面倾向NNE向的马超营断裂是区内最大的主导断裂, 为矿体形成提空了空间和形成物质富集的通道(陈雷等, 2011)。这些断裂控制了熊耳山多金属矿集区内的矿床分布与产出, 起到了控岩控矿作用(曾涛等, 2022)。

熊耳山地区岩浆岩发育, 包括新太古代-古元古代TTG岩系、中元古代熊耳期的中基性-中酸性火山岩、三叠纪正长花岗岩、晚侏罗世和早白垩世酸性侵入岩等。区内岩浆活动具有长期性、多期性的特点, 其中以燕山期岩浆活动最为强烈。燕山期岩浆活动也与区内金、银、钼、铅锌等金属矿产有着十分密切

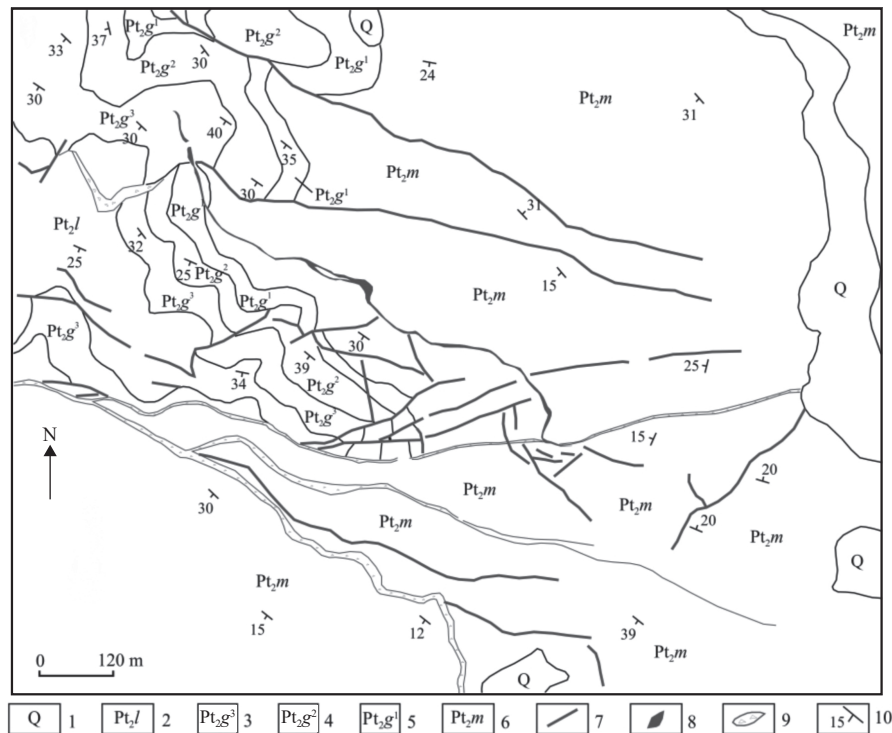
的关系(李肖龙等, 2020; Tang et al., 2021)。在太古宙岩浆作用下, 华北板块结晶基底太华群形成, 构成熊耳山 NNE 向拆离-变质核杂岩构造变质核(付鑫宁等, 2021), 同时还形成一套以片麻岩为主的中深变质岩系地层基底(Xu et al., 2009); 中元古代岩浆活动以熊耳群火山大面积裂谷式喷发为主, 形成一套中基性-中酸性火山岩(Wang et al., 2019); 在三叠纪则发生一些小规模的碱性岩、碱性花岗岩和碳酸岩脉的侵入活动, 并形成正长花岗岩和正长岩岩体(王汉辉等, 2023); 晚侏罗世岩浆活动仍以岩浆侵入为主, 于该时期形成的岩浆岩主要岩性为花岗岩(陈龙龙等, 2024); 早白垩世发育第五期岩浆活动, 也是规模最大的岩浆活动, 为矿床形成提供了重要的物质来源。该期岩浆活动以形成酸性岩浆侵入岩为特征, 形成了祁雨沟、花山、合峪、雷门沟等花岗岩体, 主要岩性为花岗斑岩、钾长花岗斑岩(抄尉尉, 2019; 曾涛等, 2022)。

2 矿床地质特征

北岭金矿床出露的地层包括熊耳群马家河组、官道口群高山河组和龙家园组下段以及第四系沉积物。

马家河组岩性主要为一套安山岩和粗安岩, 由中元古代火山喷发形成(抄尉尉, 2019); 高山河组和龙家园组下段岩性为硅质条带状结晶白云岩夹厚层状结晶白云岩(李肖龙等, 2019)。

矿区内断裂构造十分发育, 按走向可分为 NW、近 EW、NE、近 SN 向 4 组(图 2), 共有 70 余条断裂(李肖龙等, 2019)。区内金矿床的展布、矿体形态、矿化连续性等主要受 NW 向断裂控制(赵嘉农等, 1997)。目前已发现 10 余条含金断裂构造蚀变带, 其中 F881 蚀变带规模最大, 长度达 1 020 m, 宽度为 0.15~14.64 m, 主断面倾向为 SW 向, 工程控制最大斜深达 630 m, 矿体形态复杂, 沿 NW-SE 方向贯穿全区(图 3)。断裂带内发育构造角砾岩、碎裂岩及糜棱岩等, 并伴随黄铁矿化、金多金属矿化及硅化、绢云母化、碳酸盐化等多种蚀变叠加现象(孟宪锋, 2011; 抄尉尉, 2019; 李肖龙等, 2019)。F881 矿体深部大部分未封闭, 全区未施工深孔控制金矿体的深部延伸。矿体倾向为 195°~235°, 倾角为 20°~60°, 矿体深部的倾角较缓。矿体整体厚度变化较大, 最大厚度可达 14.64 m, 最小处厚度仅为 0.15 m, 平均厚度为 1.20 m(李肖龙等, 2019)。矿体品位为 3.05~20.34 g/t, 总体



1.第四系; 2.官道口群龙家园组; 3.官道口群高山河组上段; 4.官道口群高山河组中段; 5.官道口群高山河组下段; 6.熊耳群马家河组; 7.断层; 8.含金构造蚀变带; 9.断裂带; 10.产状

图2 北岭金矿区地质特征(据李肖龙, 2019 修改)

Fig. 2 Geological characteristics of Beiling gold deposit

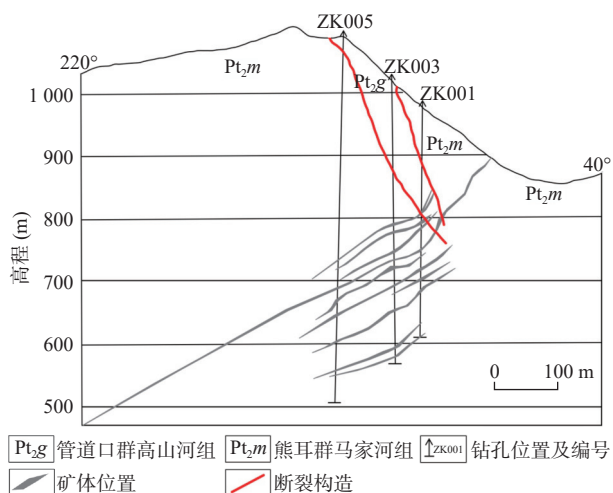


图3 北岭金矿 F881 矿体地质剖面(修改自李肖龙, 2020)

Fig. 3 Geological profile of F881 ore body of Beiling gold deposit

品位呈现从浅到深、自西向北逐渐变低的变化特征(抄尉尉, 2019)。

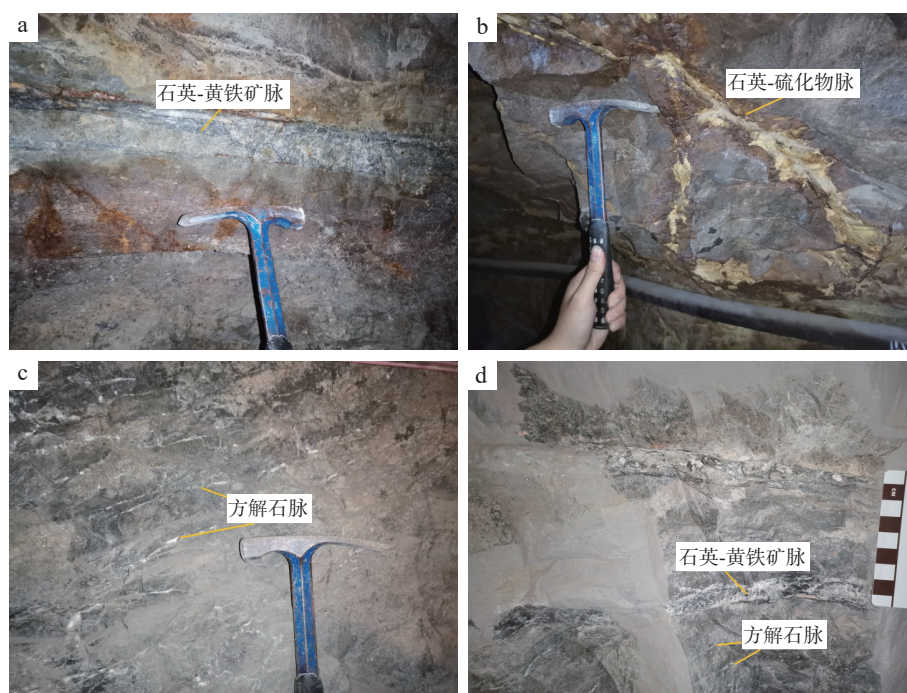
根据野外地质特征及不同矿脉间的穿插关系和矿物共生组合(图 4), 可将北岭金矿床形成过程划分为 3 个阶段。第一阶段: 石英-黄铁矿阶段, 可见含自形程度较好的细粒浸染状黄铁矿的烟灰色石英脉, 该阶段是不可见金形成的主要阶段, 标志性矿物组合为

石英+黄铁矿+黄铜矿+绢云母。第二阶段: 石英-硫化物阶段, 以石英硫化物网状脉体为特征, 是自然金形成的主要阶段, 矿物组合为石英+黄铁矿+方铅矿+碲银矿。第三阶段: 石英-碳酸盐阶段, 以白色方解石沿着后期裂隙和围岩斑晶充填为特征, 标志着热液形成活动的结束(抄尉尉, 2019)。

北岭金矿的主要蚀变类型有高岭土化、绢云母化、硅化以及碳酸盐岩化。高岭土化蚀变岩主要分布在断裂带顶部以及顶部围岩中, 呈不连续松散状。绢云母化蚀变岩石分布在断裂带顶部及底部, 部分呈对称状产出。硅化主要发生在断裂带内及顶、底板围岩中, 并最终形成朝水平方向延伸, 呈透镜状或断陷分布的石英脉。早期形成的石英与含矿热液发生交代、穿插后, 与成矿期的石英构成石英-黄铁矿脉。部分矿脉边缘有褐铁矿化。碳酸盐岩化蚀变岩主要由白色和绿色的方解石组成, 多以碳酸盐岩脉的形式胶结前期含金石英脉或充填后期裂隙(抄尉尉, 2019)。

3 样品采集及分析方法

本次研究的 6 件样本分别来自北岭金矿床 F881 矿体 530 m 标高 (BL530-2、BL-530-4 和 BL530-5) 和



a. I 阶段石英-黄铁矿脉; b. II 阶段石英-硫化物脉; c. III 阶段方解石脉; d. 与方解石共生的石英-黄铁矿脉

图4 北岭金矿床野外地质特征

Fig. 4 Field geological characteristics of Beiling gold deposit

620 m 标高(BL、BL620-1 和 BL620-2),取自石英-黄铁矿阶段的矿脉。探针片制备和矿相学观察在中国地质大学(北京)科学研究院实验室完成。黄铁矿单矿物挑选在廊坊宇能岩石矿物分选实验室完成。黄铁矿热电性分析在中国地质大学(北京)地球科学与资源学院矿物标型实验室完成,测试设备为BHTE-06 热电仪,分别在4件黄铁矿单矿物样品中随机选取50粒黄铁矿进行热电性分析。黄铁矿电子探针(EMPA)成分分析在中国科学院地质与地球物理研究所电子探针及扫描电镜实验室完成,实验仪器为日本JXA-8100型探针仪。电子探针分析的实验参数包括电子加速电压为20 kV,传感器电流为 1×10^{-8} A,束斑直径10 μm ,检出限0.001%,ZAF法校正。

4 黄铁矿标型特征

4.1 黄铁矿产出特征

根据黄铁矿形态、产状及特征,将镜下观察的黄铁矿分为Py1和Py2两种类型。

黄铁矿(Py1):一般赋存于石英-黄铁矿脉中,呈立方体或五角十二面体,多为单体产出,部分为集合体,以星散状分布,但偶尔可见小型条带状分布。自形程度较好,一般为自形-半自形结构(图5a、图5c);

半自形颗粒一般为中粗粒颗粒,有较为明显的交代作用痕迹,边缘破碎(图5d)。

黄铁矿(Py2)存在于石英-黄铁矿脉中,自形程度较差(图5a),一般为侵蚀结构,与围岩发生交代作用。黄铁矿颗粒半径较大,多以团块状集合体、脉状集合体产出(图5b),颗粒表面裂痕发育明显。

4.2 黄铁矿成分标型特征

根据电子探针分析结果(表1),530 m 标高黄铁矿Fe含量为43.53%~46.07%,平均值为45.14%,低于标准黄铁矿Fe含量(45.86%~47.07%);S含量为48.07%~54.66%,平均值为51.95%;S/Fe值为1.92~2.11,平均值为2.005,与理想黄铁矿化学成分比值相比相对富S,为Fe亏损。Ag、Cu含量相对于620标高略高、Py1与Py2类型黄铁矿并无明显差异。620 m 标高黄铁矿Fe含量为44.05%~45.74%,平均值为45.15%;S含量为48.07%~53.40%,平均值为51.70%,S/Fe值为1.89~2.04,平均值为1.99,与标准黄铁矿化学成分比值基本相同,Py1与Py2类型黄铁矿并无明显差异。

4.3 黄铁矿热电性标型特征

4.3.1 原理及应用

黄铁矿的热电性是黄铁矿单矿物颗粒在两端出现温度差的情况下,矿物两端产生的电动势差,矿物内部表现为热电系数 α ,外部表现为热电动势E(高永

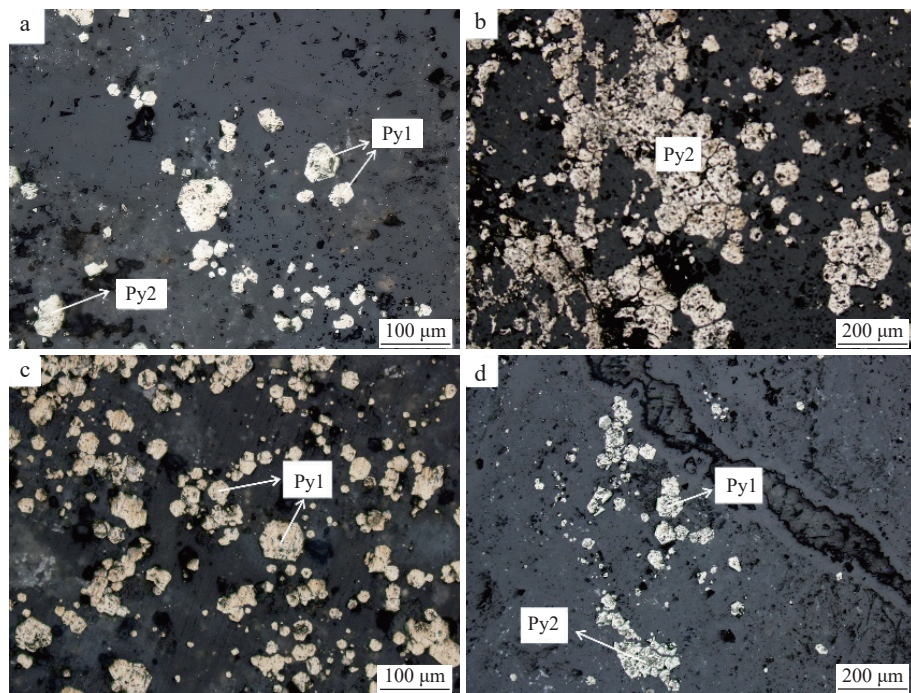


图5 北岭金矿床黄铁矿显微照片

Fig. 5 Photomicrographs of pyrite in Beiling gold deposit

表 1 北岭金矿 F881 号矿体不同标高黄铁矿电子探针(EMPA)分析结果(%)

Tab. 1 EMPA results of pyrite in different elevations of Beiling gold deposit F881 ore body (%)

样品编号	类型	标高(m)	测点个数	检测值	Mn	S	Fe	Pb	Co	Bi	Ni	Ag	Cu	Au	Zn	As
530-2	Py1	530	10	最高	0.02	53.58	46.05	1.94	0.13	0.35	0.04	0.27	0.09	0.18	0.04	1.33
				最低	—	51.30	44.70	0.09	0.05	0.03	—	—	—	—	—	
				平均	0.01	52.27	45.42	0.51	0.08	0.12	0.02	0.05	0.01	0.05	0.01	0.33
	Py2		10	最高	0.04	52.45	45.66	0.52	0.14	0.31	0.07	0.11	0.26	0.26	0.05	3.43
				最低	—	50.08	44.46	0.22	0.07	0.03	—	—	—	—	—	—
				平均	0.01	51.47	45.11	0.34	0.09	0.18	0.02	0.02	0.04	0.06	0.02	1.41
530-4	Py1	5	最高	0.01	53.43	45.41	0.49	0.12	0.21	0.04	0.10	0.20	0.16	0.03	5.55	
			最低	—	48.65	43.74	0.18	0.10	0.04	—	—	0.01	—	—	—	
			平均	—	51.73	44.47	0.36	0.11	0.14	0.02	0.04	0.08	0.10	0.01	1.87	
	Py2	15	最高	0.03	54.12	45.81	0.67	0.16	0.41	0.05	0.18	0.06	0.20	0.07	3.41	
			最低	—	49.54	44.24	0.17	0.05	0.02	—	—	—	—	—	—	
			平均	0.01	51.75	45.06	0.35	0.09	0.15	0.01	0.04	0.02	0.07	0.02	1.06	
530-5	Py1	5	最高	0.02	54.66	45.39	0.61	0.12	0.19	0.04	0.05	0.04	0.10	0.04	3.59	
			最低	—	48.61	43.53	0.30	0.06	0.05	—	—	—	—	—	—	
			平均	0.01	51.81	44.69	0.46	0.08	0.14	0.02	0.02	0.01	0.06	0.01	1.60	
	Py2	15	最高	0.05	54.39	46.07	0.54	0.13	0.37	0.06	0.09	0.05	0.30	0.03	3.37	
			最低	—	50.07	44.47	0.14	0.07	0.00	—	—	—	—	—	—	
			平均	0.01	52.38	45.41	0.33	0.09	0.17	0.02	0.02	0.01	0.10	0.01	0.66	
620-1	Py1	10	最高	0.04	53.12	45.78	0.49	0.12	0.35	0.03	0.05	0.05	0.16	0.05	4.63	
			最低	—	49.19	44.50	0.17	0.07	0.05	—	—	—	—	—	—	
			平均	0.01	51.87	45.24	0.36	0.09	0.19	0.01	0.02	0.02	0.06	0.02	1.14	
	Py2	10	最高	0.03	53.52	45.74	0.52	0.14	0.34	0.06	0.12	0.08	0.16	0.04	5.69	
			最低	—	48.07	44.05	0.20	0.06	0.03	—	—	—	—	—	—	
			平均	0.01	51.53	45.06	0.36	0.10	0.16	0.01	0.02	0.01	0.03	0.01	1.69	

伟等, 2019; 寸小妮, 2020)。热电性能反映出矿物在形成过程中环境的变化, 对矿床的形成过程有一定指示意义, 对深部成矿潜力的评估有重要参考价值(张文媛等, 2014; 吴晋超等, 2021)。分析热电性不同时空尺度上的变化规律, 将有助于确定形成温度、形成环境、矿化富集规律和矿体延展规模, 为进行深部找矿提供重要依据。

热电系数是指在单位温度差下黄铁矿冷热两端的电动势, 计算公式如下。

$$\pm\alpha = (\pm E/\Delta t) \times 106 \quad (1)$$

式中: α 为热电系数, 单位为 $\mu V/^{\circ}C$; E 为热电动势, 单位为 μV ; Δt 为活化温度, 单位为 $^{\circ}C$ 。

根据黄铁矿内部晶格中包含杂质的种类和数量, 将黄铁矿分为电子型(N 型), 空穴型(P 型)以及混合

性(N-P 型或 P-N 型)。其中, N 型黄铁矿是指在黄铁矿晶格内部含有能够提供电子的杂质, 热电性系数小于 0, 一般形成于矿体的下部层位, 形成温度较高; P 型黄铁矿的晶格中则含有能够夺取电子的杂质, 热电系数大于 0, 形成于矿体的上部层位, 形成温度相对较低。一般的, 含金石英脉中的黄铁矿多具有空穴导电性, 而无石英脉中的黄铁矿则具备电子导电性, 混合型导电的黄铁矿中更容易产出特大型金矿床(初文华, 1989)。

4.3.2 热电性标型特征

本次研究共选取 4 件样品(BL530-2、BL530-5、BL620-1、BL620-2)进行热电性测试, 其中 BL530-5 样品在 60 目和 80 目下各取黄铁矿颗粒 50 粒, 其余样品各取 50 粒黄铁矿颗粒, 共计对 250 粒黄铁矿单矿物进

行热电性分析,统计每件样品中的黄铁矿单矿物热电系数的最大值、最小值、平均值以及占比(图6)。其中,BL530-5样品在60目有两粒黄铁矿颗粒热电势异常,实际可用数据为48个,80目有一粒黄铁矿颗粒热电势异常,实际可用数据为49个。

北岭金矿530 m标高和620 m标高样品中,N型黄铁矿出现概率为35.6%,P型出现概率为64.4%,整

体上表现为N-P混合型。其中,530 m标高N型黄铁矿数量和P型黄铁矿数量的比值为48.48%;N型黄铁矿热电系数 α 值为 $-116.1\sim-3.5\text{ }\mu\text{V}/^\circ\text{C}$,P型黄铁矿的热电性系数 α 值为 $1.8\sim357.9\text{ }\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 。620 m标高N型黄铁矿数量与P型黄铁矿数量的比值为66.67%。N型黄铁矿热电系数 α 值为 $-314.3\sim-1.9\text{ }\mu\text{V}/^\circ\text{C}$,P型黄铁矿的热电性系数 α 值为 $3.7\sim219.3\text{ }\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ (表2)。

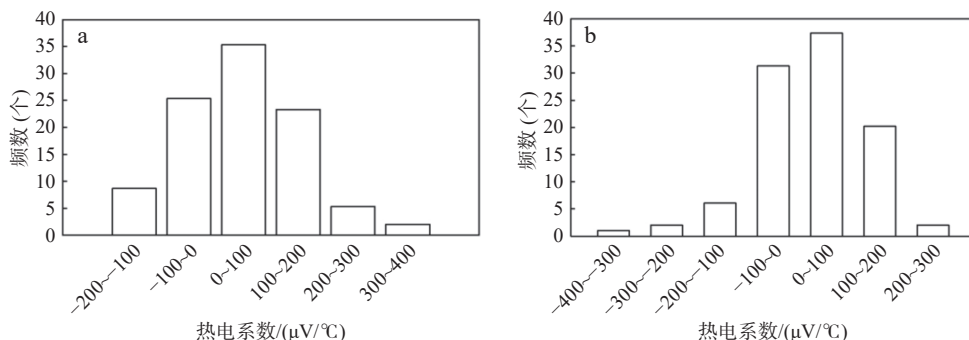


图6 530 m标高(a)和620 m标高(b)黄铁矿热电系数分布直方图

Fig. 6 Histogram of thermoelectric coefficient distribution of pyrite in (a) 530 m elevations and (b) 620 m elevations

表2 北岭金矿F881矿体黄铁矿的热电系数与导型特征

Tab. 2 Thermoelectric coefficient and conductivity characteristics of pyrite in Beiling gold Deposit F881 ore body

样号	标高(m)	N型热电系数范围($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$)	出现频率(%)	P型热电系数($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$)	出现频率(%)
BL530-2	530	$-166.1\sim-16.5$	46.0	$3.7\sim357.9$	54.0
BL530-5(60目)		$-136.4\sim-7.1$	25.0	$1.8\sim237.7$	75.0
BL530-5(80目)		$-85.4\sim-3.5$	26.5	$15.4\sim268.7$	73.5
BL620-1	620	$-314.3\sim-1.9$	48.0	$12.7\sim194.9$	52.0
BL620-2		$-132.4\sim-9$	32.0	$3.7\sim219.3$	68.0

5 讨论

5.1 黄铁矿成分特征及成矿指示意义

530 m标高黄铁矿Fe含量为43.53%~46.07%,平均值为45.14%,S含量为48.07%~54.66%,平均值为51.95%,S/Fe值为1.92~2.11,平均值为2.005;620 m标高黄铁矿Fe含量为44.05%~45.74%,平均值为45.15%;S含量为48.07%~53.40%,平均值为51.70%,S/Fe值为1.89~2.04,平均值为1.99。相比于标准黄铁矿成分,530 m标高黄铁矿Fe含量比标准值低1.41%,S含量比标准值低1.5%;620 m标高黄铁矿Fe含量平均为45.15%,S含量平均为51.70%,分别比标准值低1.4%和1.75%,认为F881矿体的黄铁矿可能存在大量类质同象现象,主要为热液成因。一般矿体

上部S相对富集,随着矿体深度的加深,S逐渐亏损,S/Fe值会逐渐减小(宋焕斌等,1989)。530 m标高和620 m标高S/Fe值与标准值基本相同,两段标高S/Fe值无明显差异,但520标高黄铁矿存在轻微Fe亏损(-1.41%),同时Ag、Cu含量相较于620标高黄铁矿较高。可以认为,两标高基本处于同一矿体位置,530 m标高相较于620 m标高,黄铁矿发生更为强烈的类质同象作用,Ag、Cu元素替代黄铁矿晶格中的Fe。因此,可认为以530 m标高为基准点,从该处向深部存在更符合类质同象替换的物质基础及成矿环境,指示以两标高向下延伸,F881矿体具有较大的延伸空间和潜力。 $\omega(\text{Fe})/\omega(\text{As}+\text{S})$ 值则与深度呈负相关,同时也可以作为推测黄铁矿形成深度的依据(表3)(宋焕斌等,1989)。530 m标高 $\text{Fe}/(\text{As}+\text{S})$ 值为85.22%,620 m标高 $\text{Fe}/(\text{As}+\text{S})$ 值为85.01%。两处标高黄铁矿的

表 3 北岭金矿 F881 矿体黄铁矿 Fe/(S+As)值与其形成深度的关系(据周学武等, 2005 修改)

Tab. 3 Relationship between the value of Fe/(S+As) of pyrite and its output elevation of Beiling gold deposit F881 ore body

产地	产出部位/标高	平均Fe含量(%)	平均As含量(%)	平均S含量(%)	Fe/(S+As)
前苏联	深	45.62	1.55	52.35	0.85
	中	45.72	1.28	51.68	0.86
	浅	46.34	0.25	49.78	0.93
北岭	530	45.15	1.07	51.95	0.85
	620	45.15	1.41	51.70	0.85

Fe/(As + S)值也基本相同,推断两处标高的黄铁矿都形成于中-深成环境。

Co 和 Ni 与 Fe 同族,因此与 Fe 具有相似的化学性质,易代替 Fe 进入矿物晶格,产生类质同象现象。成矿温度是影响类质同象的重要因素之一,Co 元素含量能够对黄铁矿的形成温度有一定指示意义(宋焕斌等, 1989)。因此,Co 和 Ni 值对形成温度具有一定的指示意义。若黄铁矿中 $Co < 0.01\%$, 在低温环境中形成;若 $0.01\% < Co < 0.1\%$, 则在中温环境下形成;若 $Co > 0.1\%$, 则在高温环境下形成(郇伟静等, 2010)。前人研究表明,与岩浆作用相关的金矿床中的黄铁矿 $Co > Ni$, 且若 $Co/Ni > 5$, 则黄铁矿生成与火山岩或次火山岩以及交代作用有关(宋焕斌, 1989; 周学武等, 2005);若 $Co < Ni$, 该黄铁矿则产出于与岩浆作用相关的铜镍矿床、矽卡岩型矿床伴生的金矿床或沉积-变质金矿床。电子探针数据显示,530 m 标高黄铁矿 Co 值大多为 $0.05\% \sim 0.1\%$, 基本接近 0.1% , 平均值约为 0.09% , Ni 均值约为 0.018% , Co/Ni 值为 $1.68 \sim 82$, 大部分比值大于 5; 620 标高 Co 值大多为 $0.06\% \sim 0.1\%$, 部分为 $0.1\% \sim 0.15\%$, 平均值约为 0.093% ; Ni 均值约为 0.010% , Co/Ni 值大多大于 5, 说明矿体中黄铁矿的形成主要受到了与岩浆岩相关交代作用的影响。530 m 标高样本和 620 m 标高黄铁矿的 Co 元素含量分布大致相同,Co 和 Ni 元素平均含量也基本一致,说明两处

标高黄铁矿受影响程度基本相同。

Au/Ag 值对矿床成因具有指示意义,中低温岩浆热液型矿床的黄铁矿 Au/Ag 值大于 0.5, 火山岩型、沉积变质热液型等金矿床中黄铁矿 Au/Ag 值小于 0.5 (周学武等, 2005)。530 m 标高样本 Au/Ag 值为 $0.42 \sim 47.66$, 大多为 $0.5 \sim 4.5$, 平均值为 2.3; 620 标高 Au/Ag 值为 $1.39 \sim 7.45$, 平均值为 2.0, 指示北岭金矿床为中低温热液型矿床。

5.2 成矿温度

黄铁矿结晶温度与热电性具有线性关系,因此,热电性标型可以用于计算黄铁矿形成温度。根据前人研究,N 型黄铁矿和 P 型黄铁矿的热电性-方程分别如下(要梅娟等, 2008)。

N型: $T = (704.51 - \alpha)/1.818$ (2)

P型: $T = 3(122.22 + \alpha)/5.0$ (3)

基于上述计算方法,530 m 标高 N 型黄铁矿形成温度为 $389 \sim 479\text{ }^{\circ}\text{C}$, 主要集中于 $410 \sim 440\text{ }^{\circ}\text{C}$; P 型黄铁矿形成温度为 $74 \sim 288\text{ }^{\circ}\text{C}$, 主要集中于 $129 \sim 164\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。620 m 标高 N 型黄铁矿形成温度范围为 $389 \sim 560\text{ }^{\circ}\text{C}$, 主要集中于 $418 \sim 432\text{ }^{\circ}\text{C}$; P 型黄铁矿形成温度为 $76 \sim 205\text{ }^{\circ}\text{C}$, 主要集中于 $123 \sim 130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。530 m 标高黄铁矿平均形成温度为 $202 \sim 291\text{ }^{\circ}\text{C}$ 与 620 m 标高黄铁矿平均形成温度为 $219 \sim 275\text{ }^{\circ}\text{C}$, 两标高成矿温度相近,指示北岭金矿床形成于中温成矿环境(表 4)。

表 4 北岭金矿床黄铁矿的形成温度

Tab. 4 Formation temperature of pyrite in Beiling gold Deposit

样号	标高(m)	N型黄铁矿形成温度(℃)		P型黄铁矿形成温度(℃)	
		范围	平均值	范围	平均值
BL530-2	530	397~479	440	76~288	164
BL530-5(60目)		391~462	420	74~216	130
BL530-5(80目)		389~434	411	83~235	129
BL620-1	620	389~560	432	81~190	130
BL620-2		392~460	418	76~205	123

5.3 矿体剥蚀率和找矿指示意义

矿体剥蚀深度占整个矿体的百分比称为矿体剥蚀指数(γ), 可以通过矿体的热电性系数进行计算(要梅娟等, 2008)。

$$\gamma = 50 - X_{np}/4 \quad (4)$$

$$X_{np} = (2f_I + f_{II}) - (f_{IV} + 2f_V) \quad (5)$$

式中: X_{np} 为矿体的热电性参数; 以 $-200 \mu V/^{\circ}C$, $0 \mu V/^{\circ}C$, $200 \mu V/^{\circ}C$, $400 \mu V/^{\circ}C$ 为界, f_I 、 f_{II} 、 f_{IV} 、 f_V 分别代表矿体热电系数 α 大于 $400 \mu V/^{\circ}C$ 、处于 $200 \sim 400 \mu V/^{\circ}C$ 区间、处于 $0 \sim -200 \mu V/^{\circ}C$ 区间及低于 $-200 \mu V/^{\circ}C$ 的黄铁矿单矿物数量占参与测试的黄铁矿样本总数的比值。根据计算结果(表 5), 530 m 标高样品的剥蚀率为 $53.0\% \sim 54.0\%$, 620 m 标高样品的剥蚀率为 $53.5\% \sim 56.75\%$, 两段标高矿体的剥蚀率中等且无明显差别。

N 型黄铁矿和 P 型黄铁矿占比及变化趋势对于深部成矿潜力有一定指示意义。在脉状产出的矿体中, 黄铁矿热电性在空间上具有正向分带, 自上而下由 P 型转变为混合型(N-P、P-N), 再由混合型向下转变为 N 型。基于黄铁矿热电性实验数据, 两标高黄铁矿均属混合型, 可推测两标高处于矿体的中部。黄铁矿热电性变化幅度较小代表矿体沿倾向延伸较大; 变化幅度较大代表该处指向矿体边缘。黄铁矿热电型随着深度的增加, 变化趋势变小(图 5), 说明矿体向下仍有较大的延伸潜力(董娟等, 2021)。

结合前文分析结果, 说明两段标高的黄铁矿处于整个矿体中部, 表示 F881 矿体有极大向深处延伸的可能, 具有较高的深部成矿和找矿潜力。

表 5 北岭金矿床黄铁矿热电性参数(X_{np})及矿体剥蚀率取值(γ)

Tab. 5 Thermoelectricity parameters and ore erosion rate of Beiling gold deposit

样号	f_I	f_{II}	f_{IV}	f_V	X_{np}	矿体剥蚀率
BL530-2	0	7	23	0	-16	54.00
BL530-5(60目)	0	2	14	0	-12	53.00
BL530-5(80目)	0	2	14	0	-12	53.00
BL620-1	0	0	21	3	-27	56.75
BL620-2(60目)	0	2	16	0	-14	53.50

6 结论

(1)北岭金矿 530 m、620 m 两段标高样本黄铁矿,

$\omega(Fe)/\omega(As + S)$ 值并无明显差异, 指示两段标高处的黄铁矿都处于矿体中深部位置, 且位置相近。 $\omega(Au)/\omega(Ag)$ 比值指示矿体属岩浆热液成因, 受到热液活动影响。

(2)530 标高黄铁矿平均形成温度为 $202 \sim 291^{\circ}C$; 620 标高黄铁矿平均形成温度为 $219 \sim 275^{\circ}C$, 两标高成矿温度相近, 指示北岭金矿床形成环境属于中温成矿环境。

(3)根据剥蚀率的计算结果, 530 m 标高样品的剥蚀率为 $53.0\% \sim 54.0\%$, 620 m 标高样品的剥蚀率为 $53.5\% \sim 56.75\%$, 两段标高矿体的剥蚀率中等且无明显差别, 矿体整体剥蚀率较低, 有较大的形成潜力和深部找矿潜力。

参考文献(References):

- 抄尉尉. 豫西潭头地区两期金形成作用研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.
- CHAO Weiwei. Study on the formation of gold in two phases in Tantou area of western Henan[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2019.
- 陈雷, 王文娟, 张云政, 等. 栾川县北岭金矿床地质特征及深部找矿远景分析 [A]. 河南省地质学会 2011 年学术年会论文集 [C], 2011: 45-48.
- 陈龙龙, 唐利, 沈彦谋, 等. 秦岭造山带栾川 Mo-W 矿集区和柞水-山阳 Cu-Mo 矿集区斑岩型矿床成矿差异性对比 [J]. 西北地质, 2024, 57(2): 67-89.
- CHEN Longlong, TANG Li, SHEN Yanmou, et al. Comparison on Metallogenic Differences of Porphyry Deposits between Luan-chuan Mo-W and Zhashui-Shanyang Cu-Mo Ore-clusters in Qinling Orogenic Belt: Constraints of Magmatic Source and Metallogenic Conditions[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(2): 67-89.
- 初文华. 某些矿物的导电类型与找矿 [J]. 地质与勘探, 1989, (4): 69.
- CHU Wenhua. The conductive type of certain minerals is related to prospecting[J]. Geology and Exploration, 1989, (4): 69.
- 寸小妮, 张洪深. 黄铁矿热电性在深部找矿中的应用 [J]. 化工矿产地质, 2020, 42(3): 250-256.
- CUN Xiaoni, ZHANG Hongshen. Application of pyrite thermoelectricity in deep prospecting[J]. Geology of Chemical Minerals, 2020, 42(3): 250-256.
- 董娟, 李成禄. 大兴安岭永新金矿床黄铁矿热电性特征及其指示意义 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(1): 95-106.
- DONG Juan, LI Chenglu. Thermoelectric characteristics of pyrite

- form Yongxin gold deposit, Xing'an great range and its indicative significance[J]. *Journal of Jinlin University (Earth Science Edition)*, 2021, 51(1): 95–106.
- 段湘益, 李维成, 王海元, 等. 东秦岭黄龙铺矿田碳酸岩脉型铼钼矿床成矿特征及找矿预测[J]. *西北地质*, 2024, 57(5): 53–73.
- DUAN Xiangyi, LI Weicheng, WANG Haiyuan, et al. Metallogenic Characteristics and Prospecting Prediction of Carbonatite Vein-Type Re-Mo Deposits in Huanglongpu Ore Field, East Qinling [J]. *Northwestern Geology*, 2024, 57(5): 53–73.
- 付鑫宁, 唐利, 姚梅青, 等. 东秦岭黄水庵钼矿床的碳酸岩成因与地质意义: 来自痕量元素和 Sr-Nd-Pb 同位素的约束[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2021, 48(5): 525–538.
- FU Xinning, TANG Li, YAO Meiqing, et al. Genesis and geological significance of the carbonatite in the Huangshui an Mo deposit in Eastern Qinling area of China: Constraints from trace elements and Sr-Nd-Pb isotopes[J]. *Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition)*, 2021, 48(5): 525–538.
- 高永伟, 王志华, 黎卫亮, 等. 热液型金矿床中的黄铁矿矿物学研究综述[J]. *西北地质*, 2019, 52(3): 58–69.
- GAO Yongwei, WANG Zhihua, LI Weiliang, et al. A Review of Pyrite Mineralogy Research in Hydrothermal Gold Deposits[J]. *Northwestern Geology*, 2019, 52(3): 58–69.
- 焦阳, 冯俊环. 西秦岭地区猪婆沟金矿成矿物质来源及矿床成因分析[J]. *西北地质*, 2024, 57(1): 219–229.
- JIAO Yang, FENG Junhuan. Source of ore Forming Materials and Genesis of Zhupogou Gold Deposit in West Qinling Mountains[J]. *Northwestern Geology*, 2024, 57(1): 219–229.
- 李肖龙, 申硕果, 黄丹峰, 等. 豫西熊耳山北岭金矿区马家河组安山岩地球化学特征及其地质意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 2019, 38(3): 287–302.
- LI Xiaolong, SHEN Shuoguo, HUANG Danfeng, et al. Geochemical characteristics of andesites from the Majiahe Formation in the Beiling gold deposit and their geological significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2019, 38(3): 287–302.
- 李肖龙, 申硕果, 黄丹峰, 等. 豫西熊耳山地区北岭金矿 Pb、S 同位素特征及其地质意义[J]. *地质与勘探*, 2020, 56(2): 253–264.
- LI Xiaolong, SHEN Shuoguo, HUANG Danfeng, et al. Geochemical characteristics of sulfur and lead isotope composition in the Beiling gold deposit, Xiong'ershan area, western Henan Province and their geological significance[J]. *Geology and Exploration*, 2020, 56(2): 253–264.
- 孟栋材. 河南熊耳山地区构造变形及演化历史分析[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
- MENG Dongcai. Analysis of Structural Deformation and Evolution History in Xiong'ershan Area, Henan Province[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020.
- 孟五一, 张振, 高永宝, 等. 南秦岭新发现王庄金矿床矿物成分及其地质意义[J]. *西北地质*, 2024, 57(4): 157–169.
- MENG Wuyi, ZHANG Zhen, GAO Yongbao, et al. Material Composition and Geological Significance of the Newly Discovered Wangzhuang Gold Deposit in South Qinling[J]. *Northwestern Geology*, 2024, 57(4): 157–169.
- 刘诚, 李含, 郑艳荣, 等. 综合物探方法在秦岭高植被覆盖深切割区矿产预测中的应用[J]. *西北地质*, 2025, 58(3): 108–119.
- LIU Cheng, LI Han, ZHENG Yanrong, et al. Application of Comprehensive Geophysical Prospecting Method in the Prediction of Mineral Resources in Qinling with High Vegetation Coverage and Deep Cut Area[J]. *Northwestern Geology*, 2025, 58(3): 108–119.
- 孟宪锋. 河南省栾川县北岭金矿区地球化学特征[J]. *黄金*, 2011, 32(6): 9–12.
- MENG Xianfeng. Geochemical characteristics of Beiling gold deposit, Henan Luanchuan[J]. *Gold*, 2011, 32(6): 9–12.
- 宋焕斌. 黄铁矿标型特征在金矿地质中的应用[J]. *地质与勘探*, 1989, 25(7): 31–37.
- SONG Huanbin. Applications of Typomorphic Characteristics of Pyrite in Gold Geology[J]. *Geology and Exploration*, 1989, 25(7): 31–37.
- 王汉辉, 唐利, 杨勃畅, 等. 东秦岭黄水庵碳酸岩型 Mo-REE 矿床方解石地球化学特征和氟碳铈矿 U-Th-Pb 年龄及其意义[J]. *西北地质*, 2023, 56(1): 48–62.
- WANG Hanghai, TANG Li, YINAG Bochang, et al. Geochemical Characteristics of Calcite and Bastnäsite U-Th-Pb Age of the Huangshui'an Carbonatite-hosted Mo-REE Deposit, Eastern Qinling[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(1): 48–62.
- 王立峰, 薛志强, 王振强, 等. 小秦岭金矿田杨岔峪—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.
- 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.
- 吴晋超, 申俊峰, 申玉科, 等. 胶东黑岗沟金矿田黄铁矿热电性研究及深部成矿预测[J]. *西北地质*, 2021, 54(2): 111–125.
- WU Jinchao, SHEN Junfeng, SHEN Yuke, et al. The Rmoelectricity Property and Deep Metallogenic Forecast of Pyrite in Heilangou Gold Field of Jiaodong, Shandong Province[J]. *Northwestern Geology*, 2021, 54(2): 111–125.
- 郇伟静, 袁万明, 李娜. 川西甘孜—理塘金矿带形成条件的矿物电子探针与裂变径迹研究[J]. *现代地质*, 2010, 25(2): 261–270.
- XUN Weijing, YUAN Wanming, LI Na. Study on the Mineral Elec-

- tron Microprobe Evidence of the Formation Conditions and Fission Track of Gold Deposits in Ganzi-Litang Gold Belt, Western Sichuan Province[J]. *Geoscience*, 2010, 25(2): 261–270.
- 要梅娟, 申俊峰, 李胜荣. 河南嵩县前河金矿黄铁矿的热电性、热爆特征及其与金矿化的关系[J]. *地质通报*, 2008, 27(5): 649–656.
- YAO Meijuan, SHEN Junfeng, LI Shengrong. Thermoelectric and thermal decrepitation characteristics of pyrite in the Qianhe gold deposit, Songxian County, Henan, China, and their relationships with gold mineralization[J]. *Geological Bulletin Of China*, 2008, 27(5): 649–656.
- 曾涛, 唐利, 孙宇辰, 等. 东秦岭祁雨沟金矿床 189 号矿体黄铁矿标型特征及其地质意义[J]. *金属矿山*, 2022, (1): 185–194.
- ZENG Tao, TANG Li, SUN Yuchen, et al. Typomorphic Characteristics and Geological Significance of Pyrite in No. 189 Orebody of Qiyugou Gold Deposit, East Qinling[J]. *Metal Mine*, 2022, (1): 185–194.
- 张文媛, 王翠芝. 紫金山铜金矿黄铁矿热电性特征及其地质意义[J]. *地质学报*, 2014, 88(7): 1288–1298.
- ZHANG Wenyuan, WANG Cuizhi. Thermoelectric Characteristics of Pyrite in the Zijinshan Copper-Gold Deposit and Its Geological Significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 88(7): 1288–1298.
- 赵江林, 唐利, 田浩浩, 等. 南秦岭双元沟矿床斑岩的黑云母和角闪石成分特征及成矿意义[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2024, 51(5): 867–879.
- ZHAO Jianglin, TANG Li, TIAN Haohao, et al. The compositions and implications of biotite and amphibole from porphyry in Shuangyugou deposit, South Qinling[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2024, 51(5): 867–879.
- 赵嘉农, 任富根, 李增慧, 等. 北岭金矿中的针碲银金矿的研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 1997, 16(1): 76–81.
- ZHAO Jianong, REN Fugen, LI Zenghui, et al. A Study of Sylvanite from the Beiling Gold Deposit, Henan Province[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 1997, 16(1): 76–81.
- 周学武, 李胜荣, 鲁力, 等. 辽宁丹东五龙矿区石英脉型金矿床的黄铁矿标型特征研究[J]. *现代地质*, 2005, 19(2): 231–238.
- ZHOU Xuewu, LI Shengrong, LU Li, et al. Study of pyrite typomorphic characteristics of wulong quartz-vein-type gold deposit in Dandong, Liaoning province, China[J]. *Geoscience*, 2005, 19(2): 231–238.
- Dong Yunpeng, Santosh M. Tectonic architecture and multiple orogeny of the Qinling Orogenic Belt, Central China[J]. *Gondwana Research*, 2016, 29(1): 1–40.
- Tang Li, Wang Rui, Santosh M, et al. Key factors controlling the late Mesozoic diverse porphyry Mo, Cu, and Au mineralization in the Qinling Orogenic Belt, Central China[J]. *Bulletin of the Geological Society of America*, 2025: 1–17. doi: <https://doi.org/10.1130/B37779.1>.
- Tang Li, Wagner Thomas, Fusswinkel Tobias, et al. Fluid inclusion evidence for the magmatic-hydrothermal evolution of closely linked porphyry Au, porphyry Mo, and barren systems, East Qinling, China[J]. *Bulletin of the Geological Society of America*, 2022, 134: 1529–1548.
- Hu Xinkai, Tang Li, Zhang Shouting, et al. Formation of the Qiyugou porphyry gold system in East Qinling, China: insights from timing and source characteristics of Late Mesozoic magmatism[J]. *Journal of the Geological Society*, 2022, 179(4): jgs2020–253.
- Tang Li, Zhao Yu, Zhang Shouting, et al. Origin and evolution of a porphyry-breccia system: Evidence from zircon U-Pb, molybdenite Re-Os geochronology, in situ sulfur isotope and trace elements of the Qiyugou deposit, China[J]. *Gondwana Research*, 2021, 89: 88–104.
- Xu Xisheng, Griffin William L, Ma Xi, et al. The Taihua group on the southern margin of the North China craton: further insights from U-Pb ages and Hf isotope compositions of zircons[J]. *Mineralogy and Petrology*, 2009, 97(1–2): 43–59.
- Wang Changming, He Xinyu, Emmanuel John M, et al. CarranzaPaleoproterozoic volcanic rocks in the southern margin of the North China Craton, central China: Implications for the Columbia supercontinent[J]. *Geoscience Frontiers*, 2019, 10(4): 1543–1560.