引用格式：司建涛，白德胜，赵志强，等，2025. 豫西九仗沟金矿床黄铁矿地球化学特征及其找矿意义[J]. 地质力学学报，31（1）：61−79. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2023140

Citation: SI J T，BAI D S，ZHAO Z Q，et al.，2025. Geochemistry of pyrite and its implications for exploration of the Jiuzhanggou gold deposit in western Henan[J]. Journal of Geomechanics，31（1）：61−79. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2023140

豫西九仗沟金矿床黄铁矿地球化学特征及其找矿意义

司建涛[1]，白德胜[1]，赵志强[1]，梁　贞[1]，阳静楠[2]，刘建平[2]，丁　涛[2]，Osama Ahmad[2]

SI Jiantao[1]，BAI Desheng[1]，ZHAO Zhiqiang[1]，LIANG Zhen[1]，YANG Jingnan[2]，LIU Jianping[2]，DING Tao[2]，Ahmad Osama[2]

1. 河南省第二地质矿产调查院有限公司，河南 郑州 450001；
2. 有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室（中南大学），湖南 长沙 410083

1. *Henan No.*2 *Institute of Geology and Mineral Resources Survey Co.*, *Ltd.*, *Zhengzhou* 450001, *Henan*, *China*;
2. *Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring* (*Central South University*), *Ministry of Education*, *Changsha* 410083, *Hunan*, *China*

Geochemistry of pyrite and its implications for exploration of the Jiuzhanggou gold deposit in western Henan

Abstract: ［**Objective**］Pyrite is a common auriferous mineral in gold deposits. Its mineral geochemistry not only plays a significant role in elucidating ore genesis, but also provides important information for the exploration of deposits. The Jiuzhanggou gold deposit in western Henan Province is a gold deposit typical of tectonically altered rocks in the Xiong'ershan gold ore cluster, and it is an ideal deposit to study the genetic indications and prospecting signs of pyrite in gold deposits.［**Methods**］In this study, the tectonically altered zones of the Jiuzhanggou gold deposit were investigated, and 8 samples of tectonically altered rocks were collected over a vertical depth of 280 m, from +260 m to −20 m. Electron microprobe and laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS) analyses of pyrite from the altered rocks were carried out, and the characteristics and variations of the element contents in pyrite of differently altered zones were obtained, revealing the indications of pyrite for ore genesis and prospection at greater depth.［**Results**］The interval between the +260 m and −20 m levels of the Jiuzhanggou gold deposit can be divided into four altered zones. Microscopic observation of the altered rocks shows that pyrite was formed during the metallogenic period. Given its Fe and S contents, most of the pyrite is sulfur-depleted. Cluster analysis shows that Au, Cu, As, Sb, Zn, Ag, Te, Se and Pb in pyrite belong to a group of hypothermal-mesothermal elements.［**Conclusion**］The Co/Ni ratio (1～10) and the Co-Ni-As diagram indicate a magmatic hydrothermal origin of pyrite. The Au in pyrite is positively correlated with Cu, As, Sb, Zn, Ag, Te, and Pb. The contents of these elements gradually decrease in the 1st～3rd altered zones, but increase in the 4th zone. It is speculated that the 1st～3rd altered zones are the product of the same hydrothermal mineralization activity, while the 4th altered zone is the product of another hydrothermal mineralization activity. According to the vertical extent of the 1st～3rd altered zones, it is speculated that the 4th altered zone may reach −60 meters. At least one level (40 m) can be explored at depth, which has a good prospecting potential.［**Significance**］The contents of Au, Cu, As, Sb, Zn, Ag, Te, Se, and Pb and the ratios of Au/As, Au/Ag, and Co/Ni in pyrite reflect the vertical mineralization zoning. These trace elements in pyrite are

基金项目：国家自然科学基金项目（41872091）

This research is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41872091).

第一作者：司建涛（1981—），男，正高级工程师，从事固体矿产勘查工作。Email：sijiantao@163.com

通信作者：白德胜（1968—），男，正高级工程师，从事矿产勘查工作。Email：365574619@qq.com

收稿日期：2024−06−16；**修回日期**：2024−10−07；**录用日期**：2024−11−15；**网络出版日期**：2024−12−13；**责任编辑**：范二平

essential markers for prospecting targets in the deeper parts of gold deposits.

Keywords: pyrite; trace elements; metallogenetic prediction; Jiuzhanggou gold deposit; western Henan

摘　要：黄铁矿是金矿床中重要的载金矿物，其地球化学特征不仅在矿床成因中具有重要的指示作用，也是重要的找矿信息。豫西九仗沟金矿床作为熊耳山金矿集区典型的构造蚀变岩型金矿床，是探讨黄铁矿对金矿床成因指示及找矿标志的理想矿床。通过开展九仗沟金矿床构造蚀变带调查，采集+260 m至−20 m垂深280 m的构造蚀变岩样品8件，对蚀变岩中黄铁矿进行矿物电子探针及激光剥蚀等离子体质谱分析，探讨不同蚀变带黄铁矿的元素含量特征及变化规律，以期获得黄铁矿对矿床成因及深部找矿的指示意义。研究结果表明，九仗沟金矿床+260 m中段至−20 m中段区间可划分为4个蚀变带，蚀变岩中黄铁矿均为成矿期黄铁矿，黄铁矿Fe、S元素含量显示其主要为硫亏型；微量元素聚类分析显示；Au与Cu、As、Sb、Zn、Ag、Te、Se、Pb为一组，属于中—低温元素组合；Co/Ni比值为1～10，Co-Ni-As图解显示黄铁矿为岩浆热液成因；黄铁矿中Au与Cu、As、Sb、Zn、Ag、Te、Pb呈正相关性，在第1—3蚀变带其含量同步逐渐降低，而在第4蚀变带则出现跳跃上升，第4蚀变带与第1—3蚀变带为不同期次热液成矿活动的产物。根据第1—3蚀变带的垂向延伸情况，推测第4蚀变带延深可达−60 m标高，深部至少还可以勘探一个中段（40 m），具有良好的找矿前景。黄铁矿中Au、Cu、As、Sb、Zn、Ag、Te、Se和Pb等元素含量及Au/As、Au/Ag、Co/Ni比值对垂向蚀变分带具有重要的指示作用，黄铁矿的微量元素标志是金矿床深部找矿靶区的重要信息。

关键词：黄铁矿；微量元素；找矿预测；九仗沟金矿床；豫西

中图分类号：P612　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1006−6616(2025)01−0061−19

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2023140

0　引言

位于华北克拉通南缘的小秦岭−熊耳山金成矿带是中国探明金储量超过500 t的6个金成矿带之一(王岩等, 2024)。该成矿带内2000 m以浅金资源量达3523 t, 深部资源潜力巨大, 是中国重要的金矿勘查区(李俊建等, 2016)。其中熊耳山矿集区以产出构造蚀变岩型和爆破角砾岩型金矿为特色(刘文毅等, 2018; 燕长海等, 2021; 刘松岩等, 2024), 发育金矿床或矿点50余处, 其中大—中型矿床16处(燕长海等, 2021), 发育三叠纪、侏罗纪和白垩纪多期金成矿事件(Chen and Santosh, 2014; Cao et al., 2017; Tian et al., 2017; 贺昕宇等, 2019; Tian et al., 2019), 是豫西地区重要的金矿集区及勘查目标区。

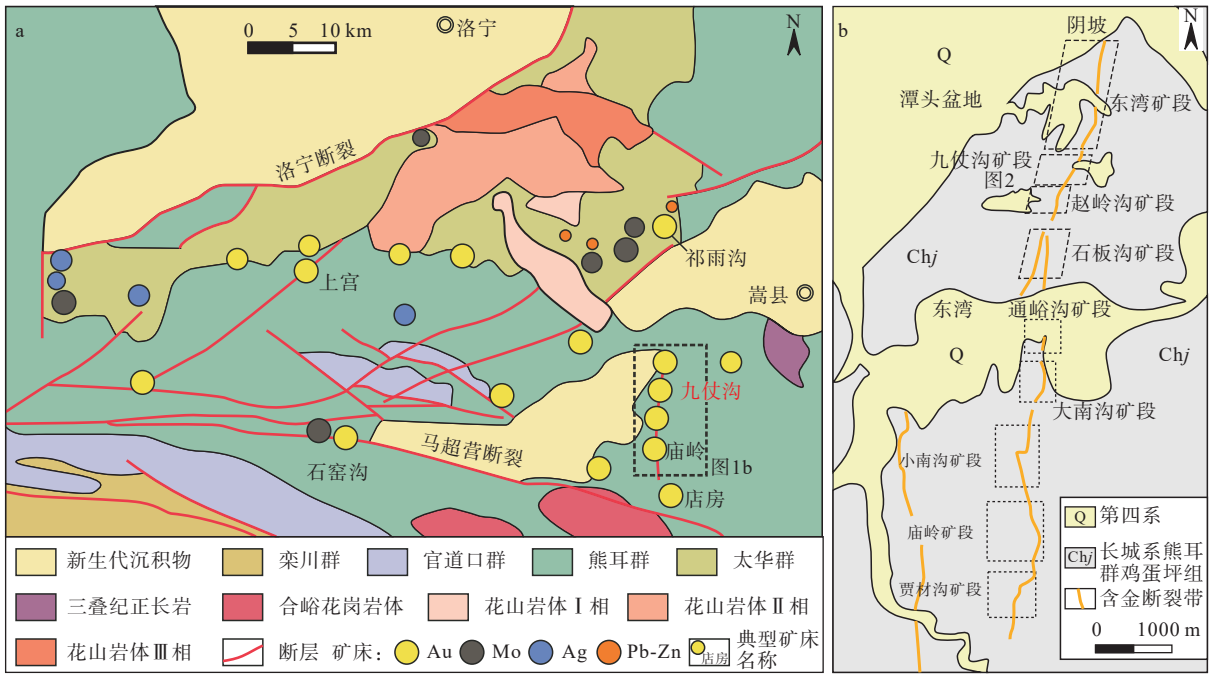
黄铁矿(FeS_2)是金矿床中广泛发育的硫化物, 为重要的载金矿物(曹根深等, 2023; Cao et al., 2023; 邓依等, 2024)。由于黄铁矿在不同条件下可通过类质同象或包裹体形式赋存多种微量元素, 这些微量元素的含量成为反映成矿条件的关键信息(朱昊磊等, 2023; 邓依等, 2024)。因此, 通过黄铁矿化学成分研究, 尤其是微量元素的含量和比值(Li et al., 2022; 第鹏飞等, 2023), 来揭示金矿床的成矿物质来源、成矿流体来源、形成环境、成矿过程、成因类型、矿床分带特征及埋藏情况(申俊峰等, 2021; Naglik et al., 2022; 王晓虎等, 2022; 王蓓琪等, 2023; 王美云等, 2023; 杨德平等, 2023; Zhou et al., 2023), 是矿床成因与找矿矿物学研究的重要内容和对象, 在矿产勘查中具有重要的应用价值。近年来激光剥蚀电感耦合等离子质谱(LA-ICP-MS)测试技术逐渐成熟(田广等, 2014; 张红雨等, 2022), 为获得精确的黄铁矿微区微量元素含量提供了可靠的技术保障, 极大地促进了黄铁矿化学成分在矿床成因指示及找矿勘查中的应用。

豫西九仗沟金矿床是熊耳山矿集区东南部庙岭−九仗沟构造带规模较大的矿床之一(刘玉刚等, 2022), 其为探获金资源量13 t的中型规模矿床(张勇等, 2024), 也是区内延深较大的矿床(丁培超等, 2020)。该矿床产于南北向断裂带中, 相关学者曾对该矿床矿体的地质特征及控矿构造进行了深入研究(李红兵, 2005; 张伟和伍刚, 2007; 秦军强等, 2019; 秦军强等, 2022)。该矿床是熊耳山地区构造蚀变岩型金矿床的代表(李红兵, 2005; 张伟和伍刚, 2007; 秦军强等, 2019, 2022), 矿石及围岩普遍发育黄铁矿(朱随洲等, 2022; 王颖辉等, 2022), 是研究黄铁矿矿物成分在成因认识及深部勘查的良好实例。通过对九仗沟金矿床+260 m至−20 m标高范围

内各中段进行构造蚀变岩调查和样品采集，开展黄铁矿地球化学分析研究，并探讨黄铁矿成分对矿床成因及矿化垂向延伸的指示意义，以期为矿区深部成矿预测提供信息约束。

1　矿床地质特征

豫西九仗沟金矿床位于熊耳山−外方山矿集区庙岭−九仗沟金矿带内的区域性 F1 断裂带上（图 1；丁培超等，2020；刘玉刚等，2022）。矿区出露围岩为长城系熊耳山群鸡蛋坪组英安岩、安山岩、英安质火山角砾岩及第四系河流沉积物和残坡积物。矿区内含矿断裂带出露长度约 500 m（图 2a），宽 80～100 m，走向 20°～30°，倾向 290°～300°，倾角 50°～75°，含矿断裂带呈舒缓波状延伸至深部，主要由碎裂岩、角砾岩和蚀变岩组成（朱随洲等，2022）。角砾岩砾径以 2～10 mm 为主，角砾成分为火山岩、火山碎屑岩，部分角砾硅化强烈，原岩成分不易识别，蚀变为石英岩。胶结物为硅质、铁质及钙质胶结（朱随洲等，2022）。矿区内围岩蚀变发育，主要有硅化、绢云母化和钾化等。矿区内矿体产于 M1 构造破碎带内，整体呈脉状产出，工程控制矿体有 M1-Ⅰ、M1-Ⅱ、M1-Ⅲ（图 2b），矿体彼此间呈平行或近于展布。其中 M1-Ⅰ为区内主矿体，长为 350 m，控制斜深达 1150 m，厚度范围为 0.57～32.3 m，金品位为 1.09～21.28 g/t、平均为 4 g/t（朱随洲等，2022）。九仗沟金矿床主矿体膨大缩小现象明显，在深部+260 m 中段、+100 m 中段为 2 个缩小部位，+220～+140 m 中段、+60 m 中段以深为矿体膨大部分。九仗沟金矿床发育 4 个蚀变带（图 3）：第 1 蚀变带（+300～+240 m）、第 2 蚀变带（+240～+120 m）、第 3 蚀变带（+120～+80 m）和第 4 蚀变带（+80～−20 m）。



a—豫西熊耳山−外方山地区地质矿产简图（Sheng et al., 2022a）；b—庙岭−九仗沟金矿带地质简图（刘玉刚等，2022）

图 1　豫西九仗沟金矿床区域地质简图

Fig. 1　Simplified regional geological maps of the Jiuzhanggou gold deposit in western Henan

(a) Simplified geological and mineral resource map of the Xiong'ershan-Waifangshan area in western Henan (after Sheng et al., 2022a); (b) Simplified geological map of the Miaoling-Jiuzhanggou gold belt (after Liu et al., 2022)

2　样品采集及测试方法

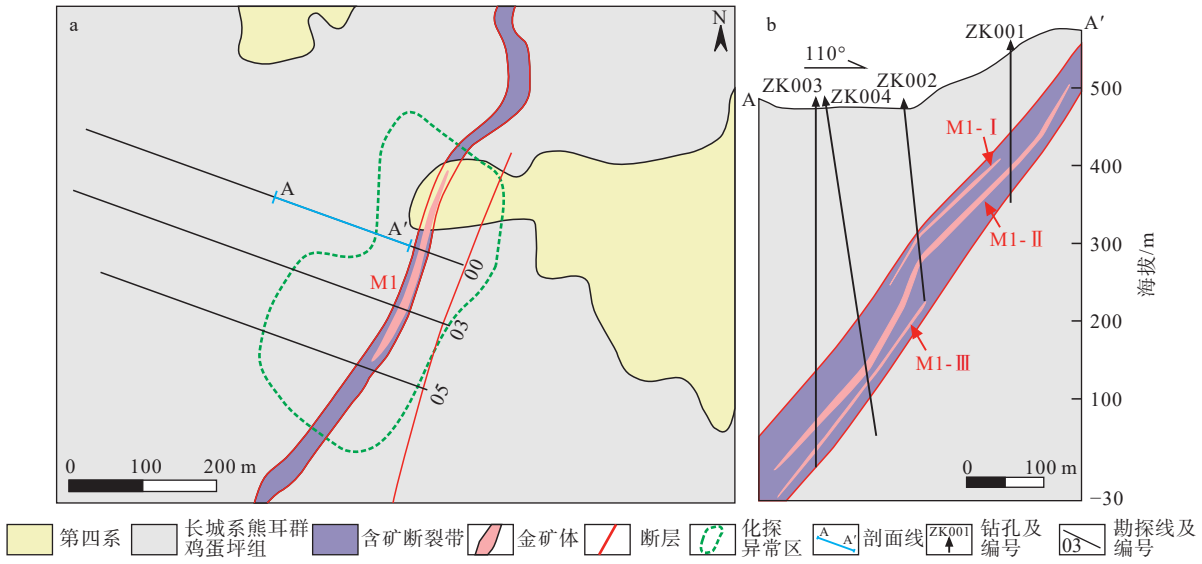
2.1　样品采集

在野外调查基础上，对 4 个蚀变带系统采集了 8 件样品（图 3，表 1），并对其开展了详细的矿相学及矿物地球化学研究。

2.2　测试方法

2.2.1　矿物主量元素分析

黄铁矿主量元素分析在有色金属成矿预测与

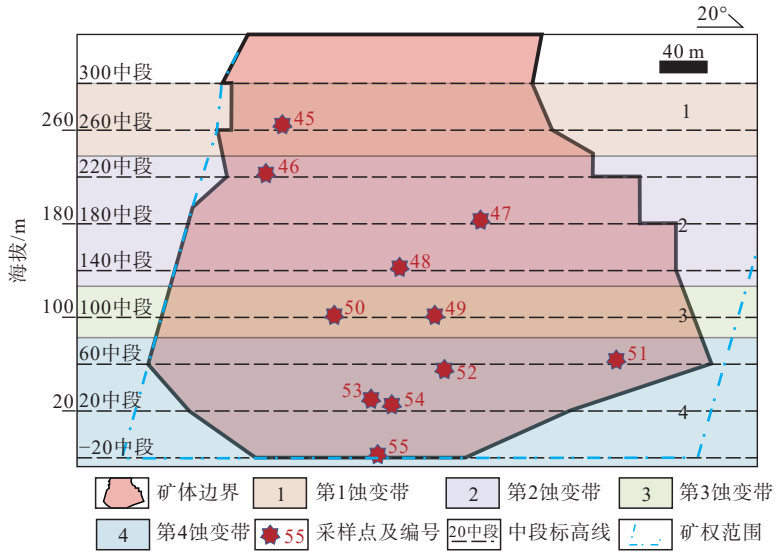


a—矿床平面地质图(据朱随洲等, 2022); b—00线剖面地质图(剖面位置见图2a; 据丁培超等, 2020)

图 2 九仗沟金矿床地质图

Fig. 2 Geological map of the Jiuzhanggou gold deposit

(a) Geological plan map of the deposit (after Zhu et al., 2022); (b) The section No. 00 of the deposit (after Ding et al., 2020)



1—第1蚀变带(+300～+240 m); 2—第2蚀变带(+240～+120 m); 3—第3蚀变带(+120～+80 m); 4—第4蚀变带(+80～−20 m)

图 3 九仗沟金矿床纵剖面图及蚀变分带

Fig. 3 Longitudinal section of the Jiuzhanggou gold deposit, indicating alteration zones and sampling locations

1—1st altered zone (+300～+240 m); 2—2nd altered zone (+240～+120 m); 3—3rd altered zone (+120～+80 m); 4—4th altered zone (+80～−20 m)

地质环境监测教育部重点实验室采用Shimadzu EPMA-1720H型电子探针分析仪完成。点定量分析条件如下: 加速电压为15 kV, 电流为20 nA, 束斑为1 μm。元素特征X射线选择如下: S(Kα)、Fe(Kα)、Cu(Kα)、Zn(Kα)、Pb(Mα)、Au(Mα)、Ag(Lα)、Te(Lα)和As(Lα); 标样为黄铁矿(S和Fe)、黄铜矿(Cu)、闪锌矿(Zn)、方铅矿(Pb)、硫化金(Au)、硫化银(Ag)、二硫化碲(Te)、毒砂(As)。数据处理采用仪器自带处理软件, 校正方法采用ZAF法。

2.2.2 矿物微量元素分析

黄铁矿原位微量元素分析在广州市拓岩检测技术有限公司完成。仪器为NWR 193 nm ArF准分子激光烧蚀系统与iCAP RQ型电感耦合等离子体质谱仪(Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer,

表 1　蚀变岩样品特征

Table 1　Characteristics of samples of altered rocks

样号	采样位置	样品特征	所在蚀变带
45	260 m中段穿脉7	矿化蚀变火山角砾岩, 含有张性的热液脉	1
47	220 m中段穿脉7	矿化蚀变角砾凝灰岩, 局部含有团包状硫化物, 含有张性的热液脉, 可见黄铜矿、方铅矿	2
48	130 m中段穿脉1-3	矿化蚀变角砾凝灰岩, 张性细网脉比较发育, 脉宽小于0.5 mm, 见少量黄铁矿、方铅矿	2
49	100 m中段穿脉1	矿化蚀变角砾凝灰岩, 张性细网脉比较发育, 脉宽小于0.5 mm, 硫化物较为发育	3
50	100 m中段穿脉5	黄铁绢云岩, 硫化物网脉较发育, 脉宽1～2 mm, 脉石矿物较少, 发育深、浅两组脉, 略具压性特征	3
52	50 m中段穿脉01	矿化蚀变火山角砾凝灰岩, 发育多期张性网脉, 第二期网脉中角砾明显	4
54	20 m中段穿脉1-3	矿化蚀变角砾岩, 角砾有压性特征	4
55	−20 m中段穿脉3	矿化蚀变岩屑凝灰岩, 发育浸染状−网脉状矿化	4

ICPMS)联用。测试过程中使用 NIST 610 标准玻璃进行调谐, 以降低氧化物产率。激光剥蚀过程中采用 0.7 L/min 氦气作为载气、0.89 L/min 的氩气为补偿气以调节信号灵敏度。测试时的激光通量为 3.5 J/cm^2, 重复率为 6 Hz, 光斑尺寸为 30 μm, 分析时间为 40 s, 随后进行 40 s 空白背景测量。测试中每间隔 5～8 个未知样品分析后, 对 2 个玻璃标样(NIST 610 和 GSE-2G)和 1 个硫化物标样(MASS-1)进行分析。原始数据的离线处理(包括信号背景值选择、样品有效区间选择、仪器灵敏度校正、元素含量的计算)利用 IOLITE 软件包完成(Paton et al., 2011)。测定的 15 种元素包括 ^{34}S、^{59}Co、^{60}Ni、^{65}Cu、^{66}Zn、^{75}As、^{77}Se、^{95}Mo、^{107}Ag、^{118}Sn、^{121}Sb、^{125}Te、^{197}Au、^{208}Pb 和 ^{209}Bi。MASS-1 硫化物标样用于校正元素(Wilson et al., 2002; w_{Fe}=15.6%)^{34}S、^{59}Co、^{60}Ni、^{65}Cu、^{66}Zn、^{75}As、^{77}Se、^{95}Mo、^{107}Ag、^{118}Sn、^{121}Sb、^{125}Te、^{197}Au、^{208}Pb 和 ^{209}Bi。^{60}Ni 通过 GSE-2G(7.55%Fe)合成玄武岩玻璃标准品进行校正, 黄铁矿用 ^{57}Fe (w_{Fe}=46%)的内标元素校正。

3　研究结果

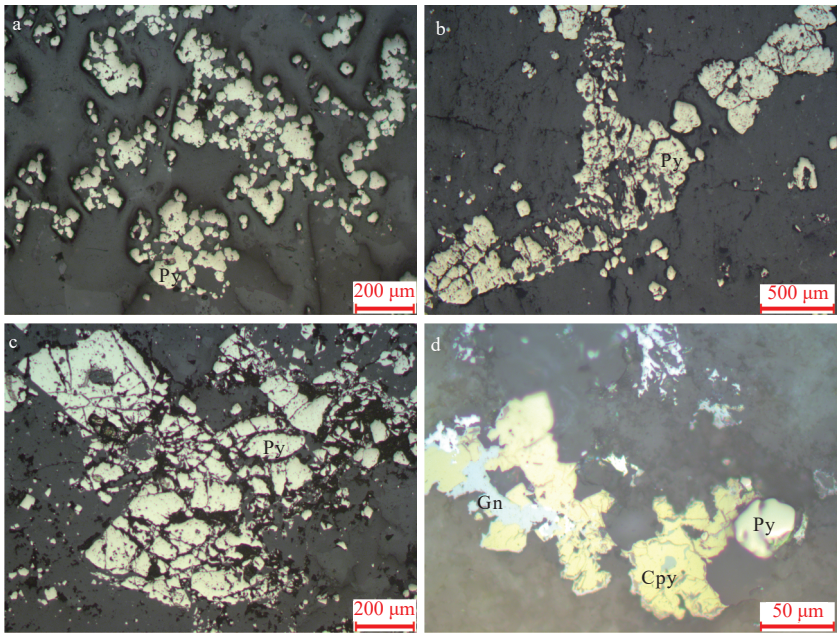
3.1　黄铁矿矿相结构特征

九仗沟矿床矿石的矿物种属有 20 余种, 以黄铁矿、褐铁矿、方铅矿、闪锌矿及自然金为主; 脉石矿物以石英、钾长石、绢云母和白云石为主, 含少量或微量其他矿物(李红兵, 2005; 王兴民等, 2013)。其中, 黄铁矿可划分为 3 个世代: 第 1 世代为与石英共生的粗粒黄铁矿, 第 2 世代为中—细粒呈脉状或浸染状的黄铁矿, 第 3 世代为被溶蚀为多孔的黄铁矿。金成矿与后 2 个世代的黄铁矿关系密切(Sheng et al., 2022b)。文中所采集的蚀变岩样品中的黄铁矿为第 2、3 世代与金成矿关系密切的黄铁矿(图 4)。

3.2　黄铁矿主量元素特征

九仗沟金矿床不同蚀变带中黄铁矿的电子探针分析结果显示(表 2), 黄铁矿除含有 Fe 和 S 元素外, 还含有少量的 Zn、Cu、Pb、Au 和 Ag 等元素。其中第 1 蚀变带中黄铁矿的 Pb 含量(平均含量为 0.08%)略高于其他蚀变带, 第 3 蚀变带中黄铁矿的 Zn 含量(平均含量为 0.06%)略高。针对黄铁矿主成分标型特征, 严育通等(2012)提出利用 δFe[δFe=(w_{Fe}−46.55)/46.55×100]和δS[δS=(w_S−53.45)/53.45×100]2 个参数来表示 Fe 和 S 元素偏移理论值的程度。九仗沟金矿床各蚀变带的黄铁矿 δFe-δS 特征图解显示其主要集中分布在第 II、III 象限(图 5), 呈贫 Fe 的特点。其中第 1、4 蚀变带的黄铁矿集中于第 III 象限(δS 范围分别为−5.762～0.842 和−4.733～1.422), 比第 2、3 蚀变带的黄铁矿更贫 S(δS 范围分别为−5.351～1.254 和−2.283～2.376), 第 4 蚀变带黄铁矿 Fe 含量最低(δFe 中位数为−1.719, 其他 3 个蚀变带的 δFe 中位数分别为−1.300、−1.225 和−0.935)。

不同成因的黄铁矿 S/Fe 原子比存在一定差异。沉积成因的黄铁矿 S/Fe 原子比接近理论值 2 或者 S 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 S^{2-}被 As^{3-}、Sb^{3-}等离子类质同象置换的结果(Springer et al., 1964; Riley, 1968), 导致其结构失稳, 增加了构造缺陷程度, 有利于 Au 的富集(李红兵和曾凡治, 2005)。九仗沟金矿床中的黄铁矿 S/Fe 原子比显示第 1 蚀变带中黄铁矿的 S/Fe 原子比中位数为 2.004, 相对其他蚀变带的黄铁矿更接近理论值 2(表 2)。



Py—黄铁矿；Gn—方铅矿；Cpy—黄铜矿

a—浸染状细粒黄铁矿；b—脉状黄铁矿；c—碎裂状黄铁矿；d—与方铅矿和黄铜矿共生的黄铁矿

图 4 蚀变岩中硫化物结构显微照片

Fig. 4 Micrographs of textures of sulfide in altered rocks

(a) Disseminated fine-grained pyrite; (b) Vein texture pyrite; (c) Cataclastic pyrite; (d) Pyrite intergrown with chalcopyrite and galena

Py—pyrite; Gn—galena; Cpy—chalcopyrite

表 2 九仗沟金矿床蚀变岩黄铁矿电子探针测试结果（$\times10^{-2}$）

Table 2 Electron microprobe data of pyrite from tectonically altered rocks of the Jiuzhanggou gold deposit（$\times10^{-2}$）

测点	Fe	Cu	Pb	Zn	Au	Ag	Te	As	S	合计	S/Fe	δFe	δS
第1带													
45.1	45.45	0.05		0.02					53.90	99.41	2.065	−2.363	0.842
45.2	46.81	0.02	0.05						52.21	99.09	1.942	0.559	−2.320
45.3	46.08	0.04	0.08				0.03		52.87	99.10	1.998	−1.010	−1.085
45.4	46.56	0.03	0.08	0.03		0.02	/	/	53.73	100.46	2.009	0.021	0.524
45.5	45.71		0.37	0.02	0.03	0.01	/	/	50.37	96.51	1.919	−1.805	−5.762
45.6	46.33			0.00		0.02	/	/	52.85	99.21	1.986	−0.473	−1.123
45.7	45.73			0.05		0.01	/	/	53.21	99.00	2.026	−1.762	−0.449
45.8	45.81	0.07	0.04	0.06			/	/	53.53	99.52	2.035	−1.590	0.150
平均值	46.06	/	/	/	/	/	/	/	52.83	99.04	1.998	−1.053	−1.153
中位数	45.95	/	/	/	/	/	/	/	53.04	99.16	2.004	−1.300	−0.767
第2带													
47.1	49.02	0.02				0.02			50.59	99.65	1.998	5.306	−5.351
47.3	46.20		0.02						53.77	99.99	1.797	−0.752	0.599
47.4	46.07	0.04		0.06			0.04		53.48	99.68	2.029	−1.031	0.056
47.5	46.00	0.02							53.28	99.31	2.027	−1.182	−0.318
47.8	46.69	0.05	0.05			0.03			53.49	100.32	2.022	0.301	0.075
47.1	46.45	0.04				0.04			54.12	100.65	2.017	−0.215	1.254

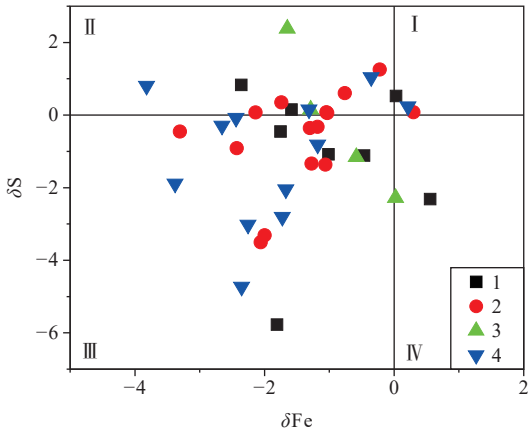
续表 2

测点	Fe	Cu	Pb	Zn	Au	Ag	Te	As	S	合计	S/Fe	δFe	δS
48.1	46.06		0.04	0.03	0.02		/	/	52.72	98.87	1.995	−1.053	−1.366
48.2	45.55	0.04	0.03	0.05			/	/	53.49	99.16	1.993	−2.148	0.075
48.3	45.62	0.09	0.04	0.00			/	/	51.68	97.44	2.031	−1.998	−3.312
48.4	45.59		0.05	0.02			/	/	51.58	97.25	2.045	−2.062	−3.499
48.5	45.94	0.04					/	/	53.26	99.25	1.973	−1.310	−0.355
48.6	45.96			0.10			/	/	52.74	98.79	1.970	−1.267	−1.328
48.7	46.06	0.16	0.08	0.02			/	/	53.49	99.82	2.019	−1.053	0.075
48.8	45.74		0.02				/	/	53.64	99.39	1.998	−1.740	0.335
48.9	45.01		0.03	0.10		0.03	/	/	53.21	98.37	2.022	−3.308	−0.449
48.1	45.42	0.02		0.07	0.04		/	/	52.96	98.50	2.042	−2.427	−0.917
平均值	46.09	/	/	/	/	/	/	/	52.97	99.15	1.999	−0.996	−0.900
中位数	45.98	/	/	/	/	/	/	/	53.27	99.28	2.018	−1.225	−0.337
第3带													
50.3	45.95	0.04		0.02			/	/	53.53	99.55	2.058	−1.289	0.150
50.6	45.78			0.04			/	/	54.72	100.55	2.002	−1.654	2.376
50.7	46.28	0.07		0.05			/	/	52.83	99.24	2.029	−0.580	−1.160
50.8	46.56	0.05		0.12			/	/	52.23	98.96	2.081	0.021	−2.283
平均值	46.14	/	/	0.06	/	/	/	/	53.33	99.58	2.043	−0.875	−0.229
中位数	46.12	/	/	0.05	/	/	/	/	53.18	99.40	2.044	−0.935	−0.505
第4带													
52.1	45.50		0.06	0.05		0.04	/		51.83	97.48	1.988	−2.256	−3.031
52.4	45.75		0.04		0.03	0.02	/		51.95	97.78	1.953	−1.719	−2.806
52.5	45.77				0.04		/		52.36	98.17	2.013	−1.676	−2.039
52.6	45.45	0.02	0.05	0.06	0.10		/		50.92	96.60	1.984	−2.363	−4.733
52.8	44.98	0.03		0.04	0.09		/		52.44	97.57	1.977	−3.373	−1.890
54.1	48.95	0.08			0.02	0.02	/		54.21	103.28	1.992	5.156	1.422
54.2	46.39	0.02					/		54.01	100.43	1.951	−0.344	1.048
54.3	46.65	0.03	0.05	0.05		0.02	/		53.58	100.38	2.030	0.215	0.243
54.7	45.94	0.04		0.09			/		53.53	99.59	1.929	−1.310	0.150
54.8	46.00	0.02		0.03		0.03	/		53.02	99.10	2.027	−1.182	−0.804
55.6	45.41						/	0.01	53.41	98.83	2.000	−2.449	−0.075
55.7	45.31	0.04		0.03			/	0.02	53.29	98.70	2.029	−2.664	−0.299
55.8	44.77	0.03	0.03	0.06	0.03		/		53.88	98.80	2.007	−3.824	0.804
平均值	45.91	/	/	/	/	/	/	/	52.96	98.98	1.991	−1.368	−0.924
中位数	45.75	/	/	/	/	/	/	/	53.29	98.7	1.992	−1.719	−0.299

注：“/”表示未测；空白表示低于检测限；S/Fe为原子比

3.3　黄铁矿微量元素特征

黄铁矿 LA-ICP-MS 元素分析结果显示（表 3），As（2.69×10^{-6}～26086×10^{-6}）、Te（0.37×10^{-6}～7352×10^{-6}）、Ag（0.10×10^{-6}～4682×10^{-6}）、Pb（0.11×10^{-6}～5214×10^{-6}）和 Zn（1.25×10^{-6}～17306×10^{-6}）元素较其他元素含量高 1～2 个数量级，Au（0.03×10^{-6}～865.84×10^{-6}）、Cu（0.98×10^{-6}～1567.97×10^{-6}）、Sb（0.43×10^{-6}～958.55×10^{-6}）、Co（0.26×10^{-6}～143.44×10^{-6}）和 Ni（0.79×10^{-6}～



1—第 1 蚀变带；2—第 2 蚀变带；3—第 3 蚀变带；4—第 4 蚀变带；I—第 I 象限富 Fe、S 区；II—第 II 象限贫 Fe 富 S 区；III—第 III 象限贫 Fe、S 区；VI—第 VI 象限富 Fe 贫 S 区

图 5 九仗沟金矿床各蚀变带黄铁矿 δFe-δS 图解

Fig. 5 δFe-δS diagram of pyrite from different altered zones in the Jiuzhanggou gold deposit

1—1st altered zone; 2—2nd altered zone; 3—3rd altered zone; 4—4th altered zone; I—Quadrant I Fe-, S-rich area; II—Quadrant II Fe-poor, S-rich area; III—Quadrant III Fe-, S-poor area; VI—Quadrant VI Fe-rich, S-poor area

77.23×10⁻⁶)等元素含量也相对较高。此外，黄铁矿中还含有微量的 Sn(<5×10⁻⁶)和 Bi(<1×10⁻⁶)；Se、Mo 含量极低，绝大多数测点数据低于仪器的检测限。各蚀变带中黄铁矿的微量元素统计分析显示，相比其他元素，Co 和 Ni 方差较小，表明其含量较为均匀。各蚀变带中黄铁矿的 Au、Cu 和 Sb 元素方差较大，表明其含量变化较大。

不同蚀变带中黄铁矿的微量元素箱形图能直观地反映元素的空间变化规律(图 6)。①黄铁矿中 Zn、Pb、As、Sb、Au、Ag、Cu、Ni 和 Te 元素含量在空间上呈现规律性变化(图 6a—6i)，从第 1 蚀变带到第 3 蚀变带，随着深度的增加，上述元素含量均呈现出不同程度的降低，至第 4 蚀变带其含量又呈现升高的趋势，尤其是 Zn、As、Au、Ag、Ni 和 Te 表现最为明显；第 1 蚀变带黄铁矿中 Te(中位数为 3998.57×10⁻⁶)、Au(中位数为 708.30×10⁻⁶)、Ag(中位数为 1162.95×10⁻⁶)和 Se(中位数为 27.39×10⁻⁶)较其他蚀变带黄铁矿元素含量中位数高出 1～2 个数量级；第 3 蚀变带黄铁矿的 Au(中位数为 0.06×10⁻⁶)、Ag(中位数为 1.00×10⁻⁶)、Te(中位数为 0.59×10⁻⁶)元

表 3 九仗沟金矿床矿化蚀变岩黄铁矿 LA-ICP-MS 测试结果（×10⁻⁶）

Table 3 LA—ICP—MS data of pyrite from the tectonically altered rocks of the Jiuzhanggou gold deposit (×10⁻⁶)

测点	S	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Mo	Ag	Sn	Sb	Te	Au	Pb	Bi
第1带															
45-1	314534.91	30.77	41.16	467.86	47.08	22373.42			4682.16	0.51	219.99	7352.59	865.84	4059.30	0.01
45-2	331241.10	58.02	77.23	191.82	2682.09	12403.78			770.80		119.21	4040.89	516.84	5214.27	
45-3	313316.89	52.70	46.62	148.97	3044.75	12729.02			621.41	0.33	320.24	2462.06	571.50	1031.78	0.01
45-4	307157.24	19.75	25.86	357.42	24.14	22497.85	22.40		3154.18	0.25	408.59	5432.86	780.42	1973.63	0.01
45-5	331751.25	27.43	25.36	1567.97	591.32	26085.62	27.49		1292.62	0.56	381.66	3663.10	714.50	1799.68	0.01
45-6	342514.13	37.99	44.59	95.90	637.06	10316.97			751.65		167.70	3956.25	753.55	1128.58	
45-7	330354.27	13.06	28.96	120.37	16.53	14768.53	27.29		1033.28	0.32	133.65	2867.33	608.21	831.34	
45-8	335784.77	35.10	37.85	102.41	17306.38	14710.66	27.59		1575.52	1.05	173.53	4151.51	702.09	1659.99	
平均(n=8)	325831.82	34.35	40.95	381.59	3043.67	16985.73	26.19		1735.20	0.50	240.57	4240.82	689.12	2212.32	0.01
中位数	330797.69	32.94	39.51	170.40	614.19	14739.60	27.39		1162.95	0.42	196.76	3998.57	708.30	1729.84	0.01
方差	136887097.86	204.74	248.23	216680.63	30327764.96	29487099.19	173.91		1818763.76	0.10	11359.06	2077152.82	11823.82	2178828.11	
极差	35356.89	44.96	51.87	1472.07	17289.85	15768.65	5.19		4060.75	0.80	289.38	4890.53	349.00	4382.93	0.01
第2带															
47-1	299144.45	31.24	13.17	187.48	279.45	545.78		1.59	268.08	1.43	81.65	319.05	17.02	345.47	0.25
47-2	372280.64	0.29		1.58					1.02		1.69	3.33	0.43	1.05	
47-3	359972.18	97.63	32.03	1404.50	13.85	12501.72	22.00		68.03	3.94	154.99	559.35	136.28	411.33	0.64
47-4	338727.58	53.74	44.99	302.48	2695.30	17510.70	19.85	270.46	1399.58	3.42	147.59	1973.67	599.59	383.25	0.07
47-5	329348.76	122.64	54.49	721.46	14.96	12242.35	29.37	0.44	481.16		345.12	1072.16	158.44	1401.17	0.36

续表 3

测点	S	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Mo	Ag	Sn	Sb	Te	Au	Pb	Bi
47-6	362872.12	82.88	18.57	27.53	6.83	96.67		826.15	7.78		8.36	37.48	0.92	124.81	0.09
47-7	381262.54	59.00	15.05	103.36		17.17			1.18		2.25	9.36	0.07	21.70	0.07
47-8	349997.96	34.11	37.63	112.92	738.80	2830.19			1072.48	2.13	33.28	1123.44	6.65	171.09	0.28
47-9	383906.10	23.41	2.15	260.00	3.20	203.11		75.16	2.20		27.09	11.97	0.30	99.13	0.58
47-10	389696.13	9.78	1.47	26.13	3.89	32.14		11.90	10.76		4.27	48.51	0.70	8536.35	0.23
48-1	289603.21	3.64	9.92	1592.57	62.75	27675.40		0.18	50.59	1.67	780.86	37.29	19.65	876.45	0.03
48-2	343709.34	19.24	17.10	126.92	1.25	3691.67			7.85	0.96	152.17	2.49	1.01	393.86	0.03
48-3	332238.60	17.76	20.85	174.00	29.27	8782.83			12.93	2.72	197.94	5.21	2.00	469.29	0.06
48-4	336590.76	8.91	14.55	698.68	540.96	29186.49		2.45	42.18	4.19	958.55	34.52	14.19	1448.35	0.08
48-5	346017.61	143.44	55.32	153.38	70.39	749.01			2.41	2.20	25.57	2.25	0.19	166.53	0.08
48-6	356325.56	65.74	75.47	2969.04	98.03	749.89		9.72	12.42	1.07	23.73	5.05	0.80	103.07	0.27
48-7	338718.30	41.11	53.74	262.41	1105.22	10447.92			22.56	4.66	528.55	12.44	4.26	1090.63	0.02
48-8	335901.74	19.20	19.80	174.65	4.69	14242.35		0.30	16.36	2.67	418.45	13.79	3.66	684.68	0.03
48-9	334513.61	20.57	23.15	351.81	9.30	15006.54		0.28	26.31	2.85	425.44	14.76	6.68	818.78	0.02
48-10	314452.46	7.63	10.31	947.57	6.33	22334.96		0.67	57.62	2.76	754.25	40.98	19.54	1165.17	0.02
平均(n=20)	344763.98	43.10	27.36	529.92	315.80	9413.00	23.74	99.94	178.18	2.62	253.59	266.35	49.62	935.61	0.17
中位数	341218.46	27.33	19.80	223.74	22.12	8782.83	22.00	2.02	19.46	2.70	149.88	24.64	3.96	402.60	0.08
方差	656190573.80	1582.99	419.74	506321.46	390352.28	88378055.87	74.35	34482.54	139591.03	2.29	84191.50	265583.58	17766.47	3239087.59	0.03
极差	100092.92	143.15	74.00	2967.46	2694.05	29169.32	9.52	825.97	1398.56	3.70	956.86	1971.42	599.52	8535.30	0.62
第3带															
50-1	263769.51	2.11		11.65	1.60	6.91			0.26	0.24				7.84	
50-2	279260.40	23.24	6.09	9.80	1.50	35.45			0.52	0.29	0.80			20.73	
50-3	249046.29	13.23	3.64	361.41	10.94	5641.10			18.88	0.97	346.66	19.58	3.96	619.66	
50-4	252044.79	9.38	1.08	11.98	1.25	93.13			0.75	0.38	2.76	0.59	0.06	26.23	
50-5	261174.22	4.66		9.85	1.52	10.66			0.66	0.24	0.82	0.48		10.09	
50-6	270194.99	48.15	11.07	34.04	4.26	114.92			1.65	1.18	7.28	1.18	0.05	123.89	
50-7	250984.14	53.22	16.25	53.91	6.54	171.79			2.22	3.25	21.41		0.09	152.51	
50-8	270926.49	37.87	8.11	30.70	36.63	205.25			1.24	1.10	5.35	0.48	0.03	92.82	
平均(n=8)	262175.10	23.98	7.71	65.42	8.03	784.90			3.27	0.95	55.01	4.46	0.84	131.72	
中位数	262471.87	18.24	7.10	21.34	2.93	104.03			1.00	0.68	5.35	0.59	0.06	59.53	
方差	104572907.64	351.62	29.58	12732.67	126.90	3373548.34			35.16	0.89	12773.28	40.42	1.69	36709.90	
极差	30214.11	51.11	15.17	351.61	35.38	5634.19			18.62	3.01	345.86	19.10	3.93	611.82	
第4带															
52-1	285433.79	6.02	1.40	45.04	195.93	3308.10			2.26	1.60	54.14	9.76	0.65	188.20	
52-2	325089.23	12.35	2.15	22.78	1.87	105.48			0.43	1.27	0.45		0.03	28.52	
52-3	359354.34	5.46	0.79	4.50		758.55			0.10		2.74	1.19	0.46	5.98	
52-4	311181.57	2.58	1.03	7210.62	125.35	26898.70			54.44	0.58	246.61	22.90	7.13	248.73	
52-5	320269.21	40.83	16.13	17.81	13.72	4856.86			0.70	1.09	31.00	1.99	0.70	129.36	
52-6	306594.66	64.04	13.24	68.36	3.66	3595.30			4.23		7.48	20.49	17.68	17.90	
52-7	364431.97	84.52	32.77	0.98	6.19	38.62			0.06		0.43	3.20		9.23	

续表 3

测点	S	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Mo	Ag	Sn	Sb	Te	Au	Pb	Bi
52-8	343056.87	30.78	5.16	414.40	15.35	24231.17			8.99	0.64	291.16	136.11	81.01	341.03	
54-1	282402.97	4.48	1.71	23.00	26.60	338.97			24.08		5.99	215.31	9.93	178.91	
54-2	230330.00	101.56	50.69	48.02	6.29	306.33			2.09	0.26	50.93	24.72	0.10	720.22	
54-3	261971.00	20.19	7.70	29.24	156.90	130.69			1.24		32.44	5.79	0.06	313.61	
54-4	306347.34	0.26				2.69						0.37		0.11	
54-5	275576.83	0.27		1.03		18.53			4.58			11.50	1.37	1.95	
54-6	299755.91	1.89	1.87	3.67		79.86			0.53			4.82	1.11	2.17	
54-7	300998.85	29.33	12.57	3.75		273.76			9.07		2.05	39.28	4.49	9.64	
54-8	254737.91	878.74	274.64	109.33	1.69	4171.40			14.08	0.69	33.72	1792.95	22.14	1105.27	
55-1	248768.14	34.97	11.34	324.58	174.99	929.20		0.39	11.15	0.26	87.58	44.12	8.57	246.38	
55-2	292527.61	58.02	25.07	415.48	87.88	637.51		880.46	97.33	0.40	90.07	145.58	43.68	3083.01	
55-3	267990.03	2.52		69.74	13.51	396.91		0.44	0.91	0.23	7.21	3.65	0.25	60.76	
55-4	222558.70	0.81		18.82	437.81	87.64			1.26	0.35	1.35	1.17		27.18	
55-5	214405.02	2.37		10.39	17.25	18.23			1.16	0.17	3.40	5.93	0.31	53.20	
55-6	283070.03	14.08	5.35	138.41	711.77	160.09			3.38	0.33	31.33	7.39	1.39	102.63	
55-7	235163.78	6.05	2.91	47.59	306.04	209.18			2.87		10.63	4.94	1.00	530.94	
55-8	282488.50	10.86	3.90	77.24	3300.52	791.36			3.88		61.03	40.15	8.52	124.00	
平均(n=24)	286437.68	58.87	24.76	395.86	294.91	3014.38		293.76	10.82	0.61	50.08	110.58	10.03	313.71	
中位数	284251.91	11.61	5.35	45.04	26.60	322.65		0.44	2.87	0.40	31.00	9.76	1.37	113.32	
方差	1569039297.62	29985.05	2973.06	2043526.92	437330.95	48354159.08		30952.03	458.83	0.19	5372.81	126596.48	322.86	400884.62	
极差	150026.95	878.48	273.85	7209.64	3298.83	26896.01		880.07	97.27	1.43	290.73	1792.58	80.98	3082.90	

注: 空白表示低于检测限

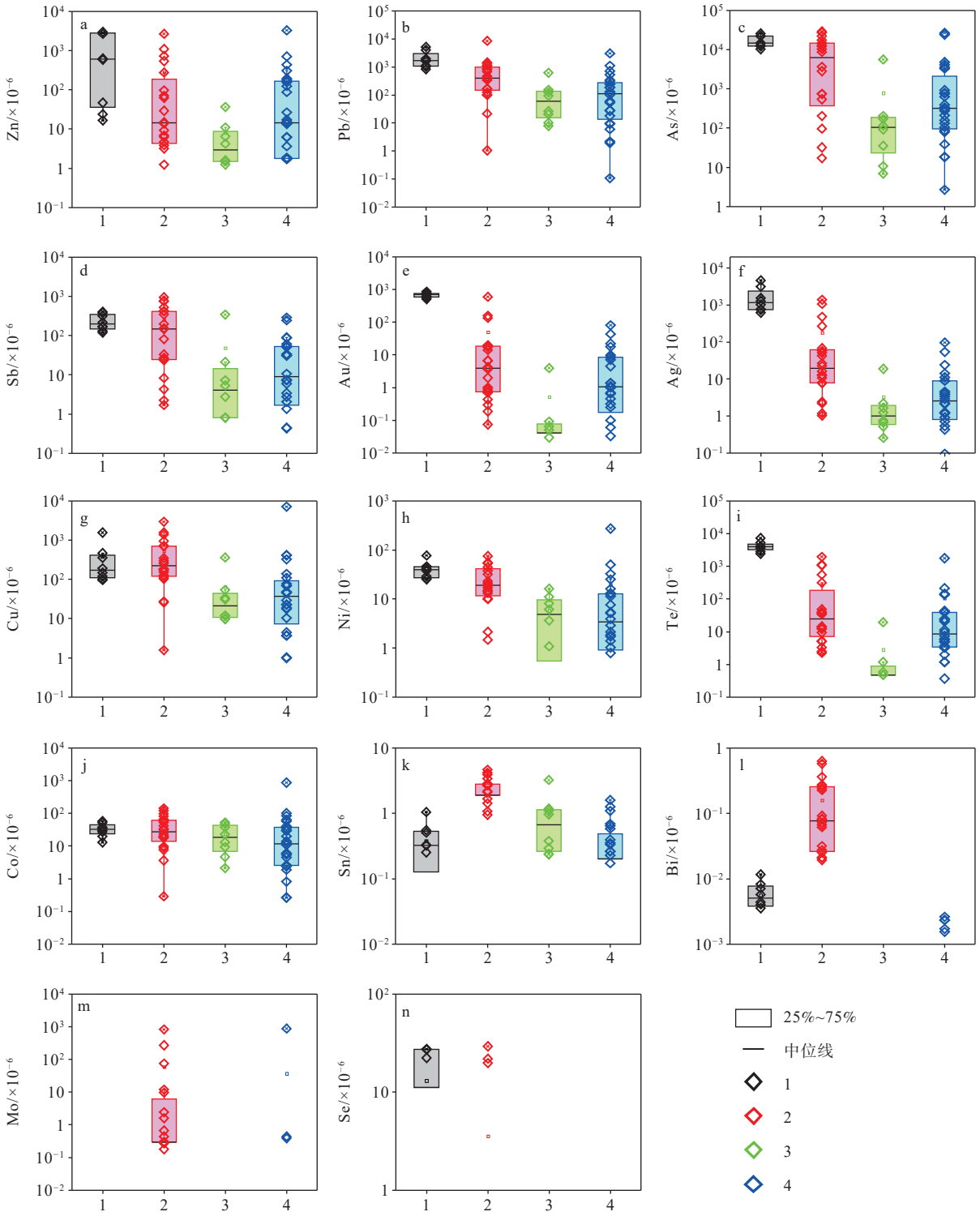
素含量中位数极低。4 个蚀变带黄铁矿为 Ni 含量表现为: 第 1、2 蚀变带黄铁矿中 Ni 含量中位数分别为 39.51×10^{-6}、19.80×10^{-6}, 含量变化不大且较为富集, 第 3、4 蚀变带的 Ni 含量中位数分别为 7.10×10^{-6}、5.35×10^{-6} 明显低于第 1、2 蚀变带。②Co 在 4 个蚀变带黄铁矿中的含量(含量中位数为 32.94×10^{-6}、27.33×10^{-6}、18.24×10^{-6}、11.61×10^{-6})较为均匀, 随深度增加呈略微降低趋势(图 6j); ③相比上述元素, 黄铁矿中 Sn、Se、Bi、Mo 元素含量的空间变化极大(图 6k—6n), 其中 Sn 和 Bi 在第 1 蚀变带黄铁矿中含量较低, 含量中位数分别为 0.42×10^{-6} 和 0.01×10^{-6}; Sn、Mo、Bi 元素在第 2 蚀变带黄铁矿中相对富集, 含量中位数分别为 2.70×10^{-6}、2.02×10^{-6}、0.08×10^{-6}; Mo 元素只集中分布在第 2 蚀变带黄铁矿中(图 6m), Se 仅在第 1 蚀变带黄铁矿中含量略高, 在其他蚀变带黄铁矿中均低于检测限(图 6n)。

黄铁矿微量元素主成分分析显示(图 7), Au、Ag、Te 和 Ni 元素之间向量夹角极小, 呈现正相关关系; Cu、Sb、As 呈正相关关系。这 2 组向量呈近垂直关系, 表明其彼此之间关系不明显。对黄铁矿微量元素聚类分析(图 8)显示 Au 与 Te/Ag、Co 与 Ni 相似度系数很高。这些微量元素可以分为 3 组: 第 1 组为 Cu、As、Sb、Zn、Ag、Te、Au、Se 和 Pb 元素, 为中—低温元素组合, 第 2 组为 Co、Ni、Mo 元素, 第 3 组为 S、Sn、Bi 元素。黄铁矿微量元素之间相关性图解(图 9)显示, Au 与 Cu、As、Zn、Ag、Te 和 Pb, Cu 与 Ag、Sb, Ag 与 Pb、Te 和 Sb 均呈现出良好的正相关关系, 表明其具有同步富集的特点。

4 分析与讨论

4.1 黄铁矿微量元素对矿床成因的指示

黄铁矿中 Au 含量的变化较大, 第 1 蚀变带其含量中位数在 708.30×10^{-6}, 其余蚀变带黄铁矿中 Au 含量中位数均低于 4.00×10^{-6}。有研究表明 Au 在黄铁矿中的溶解度很大程度上取决于 As 的含量(Cook and Chryssoulis, 1990; Reich et al., 2005; Deditius



1—第 1 蚀变带；2—第 2 蚀变带；3—第 3 蚀变带；4—第 4 蚀变带

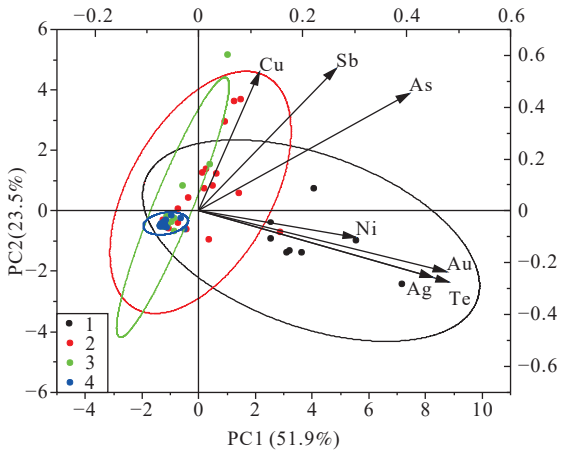
a—Zn；b—Pb；c—As；d—Sb；e—Au；f—Ag；g—Cu；h—Ni；i—Te；j—Co；k—Sn；l—Bi；m—Mo；n—Se

图 6　蚀变岩黄铁矿微量元素含量箱形图

Fig. 6　Box plots of trace elements in pyrite from altered rocks

(a) Zn; (b) Pb; (c) As; (d) Sb; (e) Au; (f) Ag; (g) Cu; (h) Ni; (i) Te; (j) Co; (k) Sn; (l) Bi; (m) Mo; (n) Se

1—1st altered zone; 2—2nd altered zone; 3—3rd altered zone; 4—4th altered zone



1—第 1 蚀变带；2—第 2 蚀变带；3—第 3 蚀变带；4—第 4 蚀变带

图 7 黄铁矿的主成分分析得分及载荷图

Fig. 7 Scores and loadings graph of the principal component analysis of pyrite

1—1st altered zone; 2—2nd altered zone; 3—3rd altered zone; 4—4th altered zone

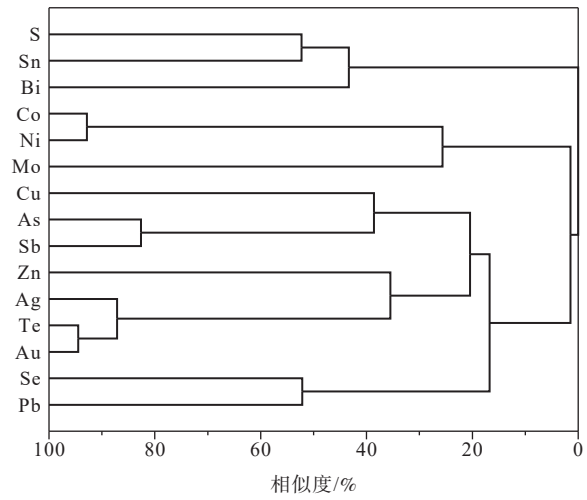


图 8 黄铁矿 R 型聚类分析谱系图

Fig. 8 Tree diagram of R-type cluster analysis

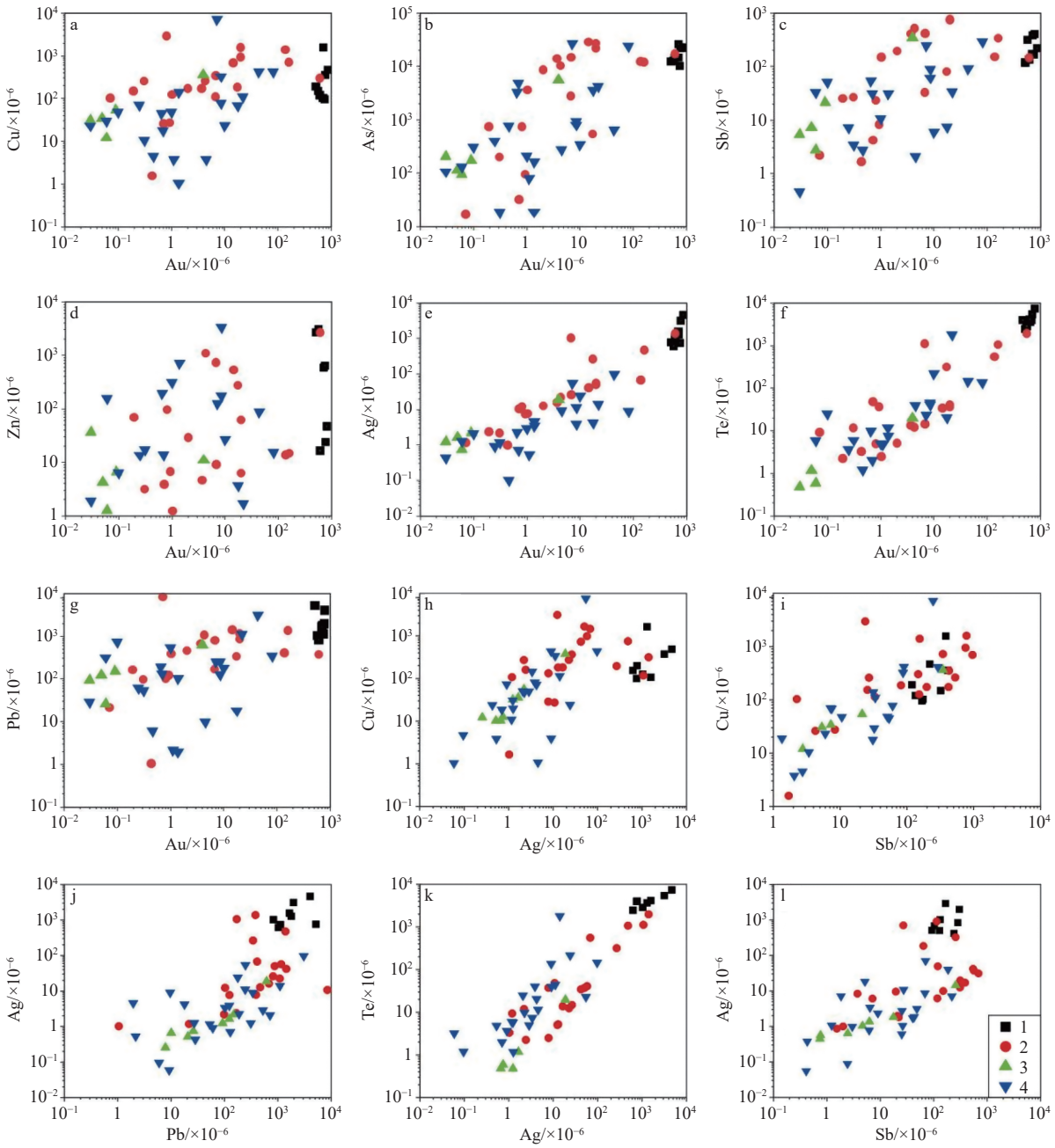
et al., 2014)。在 Au-As 图上，位于溶解度饱和线以下的黄铁矿中的 Au 以固溶体形式出现在晶格内，而在该线以上，Au 主要以原生 Au 纳米颗粒形式出现(Reich et al., 2005; Li et al., 2019)。九仗沟金矿床的黄铁矿中 Au 含量低于 As 含量控制的溶解度极限，除第 1 蚀变带及第 2、4 蚀变带黄铁矿少量点在饱和曲线上，主体位于饱和线下方，表明第 1 蚀变带黄铁矿中的 Au 以原生 Au 纳米形式产出，而深部的第 2、3、4 蚀变带黄铁矿中的 Au 以固溶体占主导优势(图 10a)。九仗沟矿床黄铁矿的 Au-As 范围整体与浅成低温热液型矿床一致。

黄铁矿中的 Co/Ni 比值对赋存地质体的形成环境较为敏感，广泛应用于黄铁矿成因和成矿流体来源的分类(Bajwah et al., 1987; Large et al., 2009)。一般来说，沉积成因型黄铁矿的特征是高 Ni 浓度和低 Co/Ni 比值(<1)，而岩浆热液型黄铁矿的特征是 Co/Ni 比值介于 1～10(Bajwah et al., 1987; Reich et al., 2016)。九仗沟金矿床黄铁矿 Co/Ni 比值主体落在 1～10，属于岩浆热液成因(图 10b)。Co-Ni-As 三角图解显示，九仗沟金矿床黄铁矿主体落在卡林型与岩浆热液或浅成热液的重叠区，部分落在岩浆热液与浅成热液区(图 10c)。Babedi et al.(2023)通过典型的造山型、高硫浅成低温热液型、低硫浅成低温热液型、斑岩型、卡林型黄铁矿中 As 与温度的拟合显示，As 与温度呈中度正相关，R^2=0.5(图 11)。九仗沟矿床各蚀变带黄铁矿中 As 含量中位数与温度的拟合关系显示，第 1 蚀变带黄铁矿形成于 230.0 ℃，第 2 蚀变带黄铁矿形成温度为 247.2 ℃，第 3 蚀变带形成温度为 395.4 ℃，第 4 蚀变带形成温度为 377.1 ℃(图 11)，黄铁矿主体形成温度在高—中温范围内。相关学者曾根据九仗沟金矿床的黄铁矿硫同位素(δ^{34}S 为−16.0‰～−7.4‰)和重晶石硫同位素(δ^{34}S 为−16.0‰～−7.4‰)结果，计算获得流体中 δ^{34}S 为 1.2‰(Sheng et al., 2022b)，显示硫来自于岩浆岩。因此，综合各类判别及矿床深部存在的隐伏岩体推断(刘玉刚等, 2022)，九仗沟金矿床为岩浆热液有关的金矿床。

黄铁矿中 Te 元素含量在各类金矿床变化较大(严育通等, 2012)，Te 含量可以很好反映流体的氧逸度(fO_2)，二者呈负相关性(张哲铭等, 2023)。九仗沟金矿床的黄铁矿 Te 含量除少数低于检测限外，从 $n\times10^{-6}$～$n\times10^{-3}$，最高达 7352.59×10^{-6}，明显高于熊耳山−外方山矿集区的康山金矿床的黄铁矿(最大值 21.9×10^{-6}; 张哲铭等, 2023)，显示九仗沟金矿床氧逸度总体低。4 个蚀变带黄铁矿 Te 含量由浅(第 1 蚀变带其含量中位数为 3998.57×10^{-6})至中—深部(第 3 蚀变带其含量中位数为 0.59×10^{-6})逐渐降低，最深部其含量(第 4 蚀变带其含量中位数为 9.76×10^{-6})又有升高(表 3)，反映了深部氧逸度有升高的趋势。

4.2 黄铁矿元素空间变化规律及成矿预测

在 4 个蚀变带中，第 3 蚀变带黄铁矿的 Co/Ni 比值最高(3.3 ～ 8.7)，其次为第 4 蚀变带(Co/Ni 比



图例中 1、2、3、4 分别代表了第 1、2、3、4 蚀变带的黄铁矿

a—Au 与 Cu 图解；b—Au 与 As 图解；c—Au 与 Sb 图解；d—Au 与 Zn 图解；e—Au 与 Ag 图解；f—Au 与 Te 图解；g—Au 与 Pb 图解；h—Ag 与 Cu 图解；i—Sb 与 Cu 图解；j—Pb 与 Ag 图解；k—Ag 与 Te 图解；l—Sb 与 Ag 图解

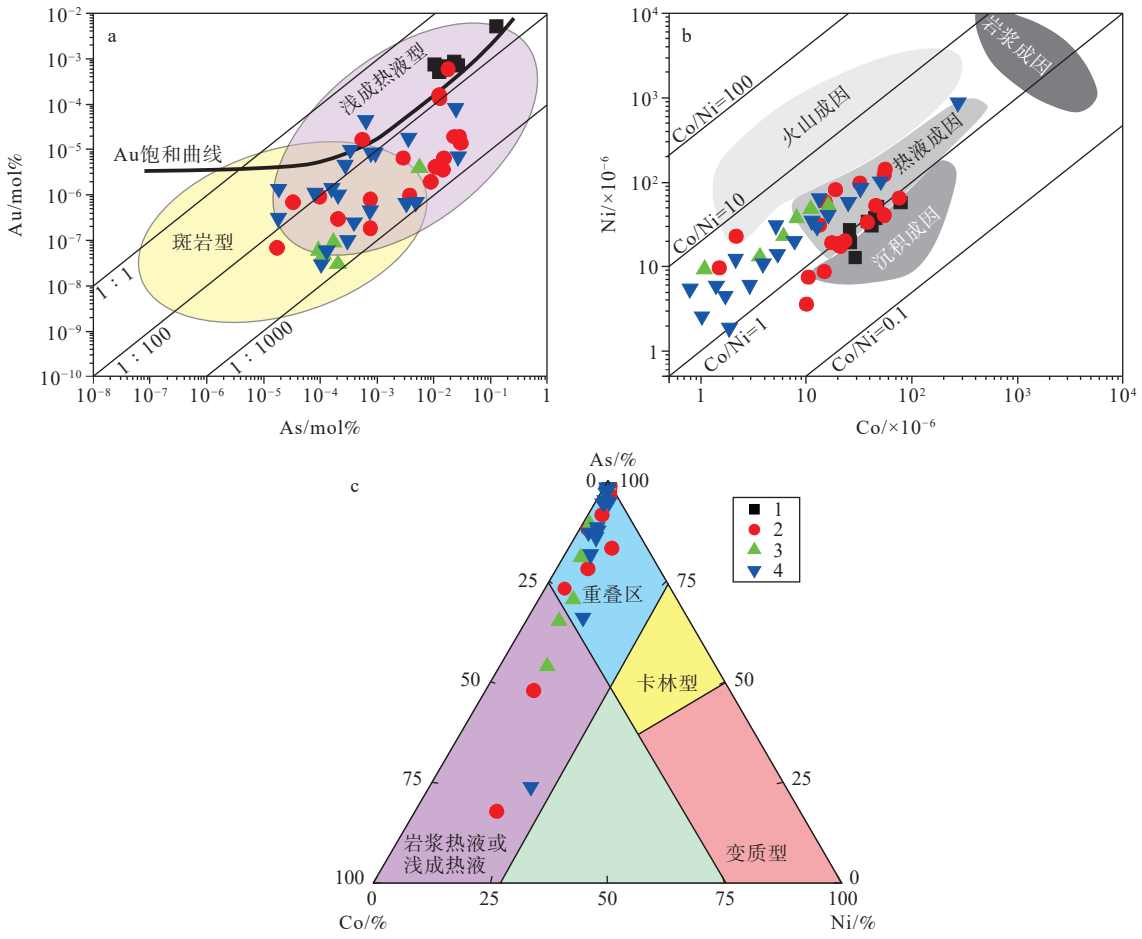
图 9　蚀变岩黄铁矿微量元素相关性图解

Fig. 9　Correlation of trace elements in pyrite from altered rocks

(a) Au vs Cu; (b) Au vs As; (c) Au vs Sb; (d) Au vs Zn; (e) Au vs Ag; (f) Au vs Te; (g)Au vs Pb; (h) Ag vs Cu; (i) Sb vs Cu; (j) Pb vs Ag; (k) Ag vs Te; (l) Sb vs Ag

1, 2, 3, and 4 are pyrite from the 1st, 2nd, 3rd, and 4th altered zones, respectively.

值为 1.0 ～ 6.9)，而浅部第 1、2 蚀变带的黄铁矿 Co/Ni 比值较低，约为 1.0(图 10b)。由第 1 蚀变带到第 3 蚀变带黄铁矿中 Co/Ni 比值逐渐降低。而第 4 蚀变带黄铁矿的 Co/Ni 比值高于第 3 蚀变带，但低于第 1、2 蚀变带(图 10b)，说明第 4 蚀变带与上部蚀变带不是连续变化的地质体。As 含量与温度拟合关系显示，第 1—3 蚀变带黄铁矿形成温度逐渐降低，到第 4 蚀变带其形成温度反而增高(图 11)，暗



图例中 1、2、3、4 分别代表了第 1、2、3、4 蚀变带的黄铁矿

a—As-Au 相对摩尔含量图解(Reich et al., 2005 提出的 Au 溶解度线);b—Ni-Co 元素相对含量图解;c—Co-As-Ni 质量占比三角图(严育通等, 2012)

图 10 黄铁矿成因判别图解

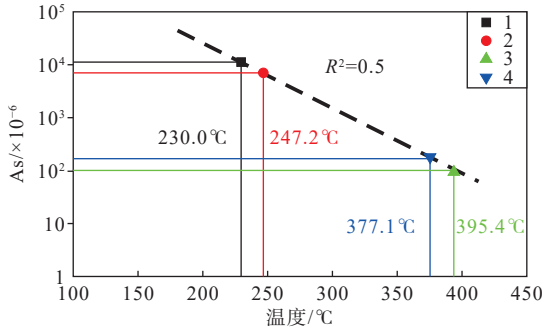
Fig. 10 Genetic discrimination of pyrite

(a) As *vs* Au molar proportion diagram (Au saturation line after Reich et al., 2005); (b) Ni *vs* Co relative abundance diagram; (c) Co-As-Ni relative abundance percent triangle diagram (Yan et al., 2012)

1, 2, 3, and 4 are pyrite from the 1st, 2nd, 3rd, and 4th altered zones, respectively.

示九仗沟金矿床矿化蚀变经历了不止一次热液活动,第 3 蚀变带为矿化作用的尾端,第 4 蚀变带为另一次热液活动的头端。这与金矿床的构造叠加晕表现特征具有类似之处(李惠等, 2021)。

黄铁矿其他微量元素及参数空间变化与 Co/Ni 比值的变化类似,第 1—3 蚀变带与第 4 蚀变带差异明显。例如,第 1 蚀变带至第 3 蚀变带 Au 含量逐渐递减,而第 4 蚀变带略有递增(图 12a)。As 含量总体在上部富集,但各中段的变化较为复杂(图 12b);Au/As 变化与 Au 的变化类似(图 12c),但更具有指示性。Ni 与 Co 在上部含量较高(图 12d、12e),两元素变化类似,未呈现深部富集的特点(周立宏和冯瑞, 1994)。不同标高黄铁矿的 Au/Ag

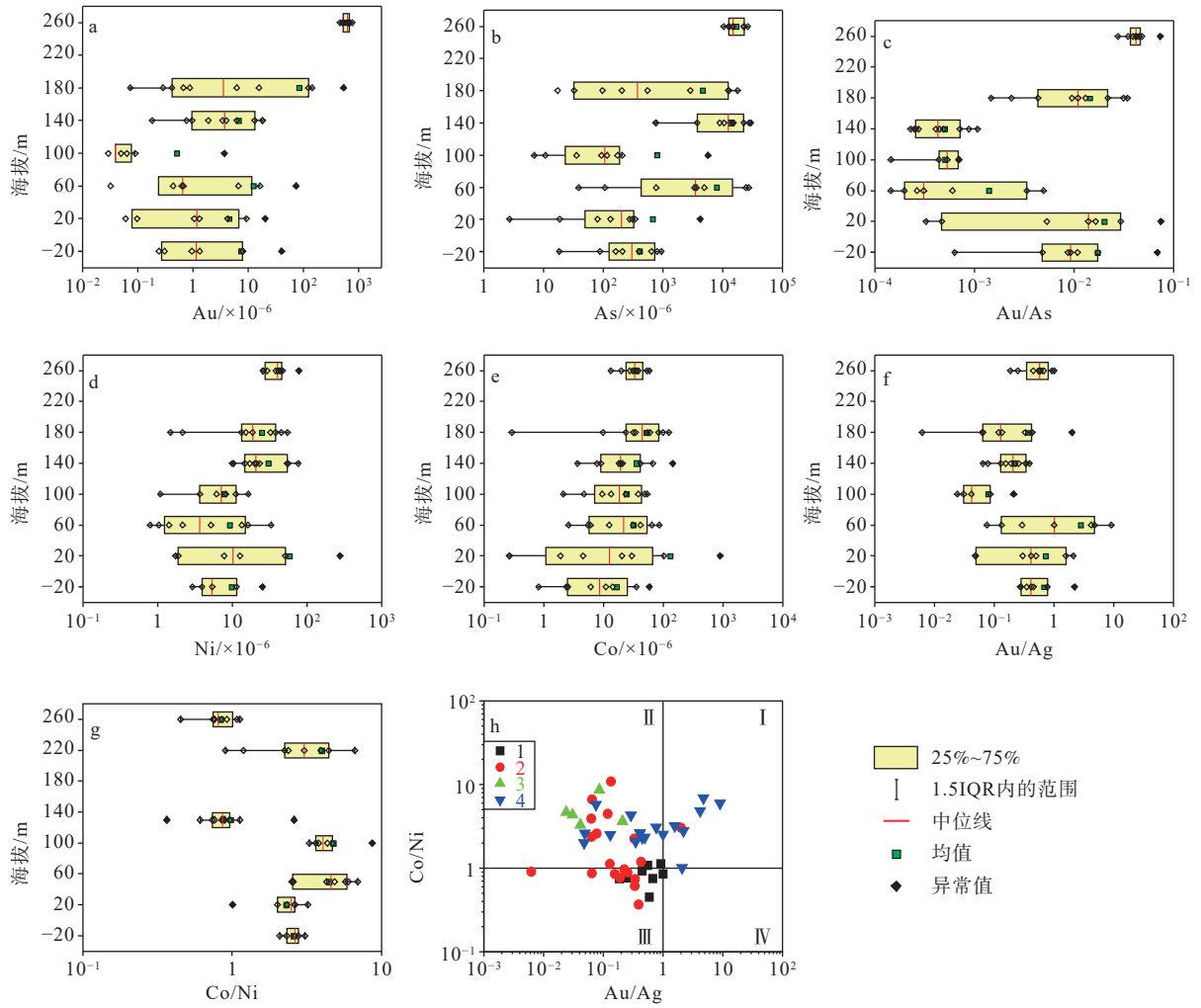


图例中 1、2、3、4 分别代表了第 1、2、3、4 蚀变带的黄铁矿

图 11 黄铁矿 As 与温度的关系(Babedi et al., 2023)

Fig. 11 Correlation between the As content and the temperature of pyrite (after Babedi et al., 2023)

1, 2, 3, and 4 are pyrite from the 1st, 2nd, 3rd, and 4th altered zones, respectively.



图例中 1、2、3、4 分别代表了第 1、2、3、4 蚀变带的黄铁矿

a、b、c、d、e、f、g—为矿床垂向上 Au、As、Au/As、Ni、Co、Au/Ag、Co/Ni 图解；h—Ag/Au 与 Co/Ni 图解（I—第 I 象限富 Au、Co 区；II—第 II 象限贫 Au 富 Co 区；III—第 III 象限贫 Co 贫 Au 区；VI—第 VI 象限贫 Co 富 Au 区）

图 12　蚀变岩黄铁矿微量元素及相关系数的空间变化图解

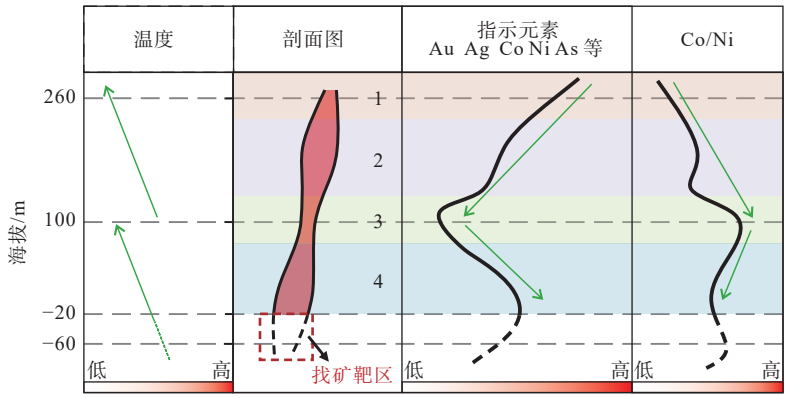
Fig. 12　Spatial variation of trace elements and associated coefficients of pyrite in altered rocks

a, b, c, d, e, f, g—are Au, As, Au/As, Ni, Co, Au/Ag, Co/Ni vertical variation diagram; h—Ag/Au *vs* Co/Ni (in Figure 12h I—Quadrant I Au-, Co-rich area; II—Quadrant II Au-poor, Co-rich area; III—Quadrant III Co-, Au-poor area; VI—Quadrant VI Co-rich, Au-poor area)

1, 2, 3, and 4 are pyrite from the 1st, 2nd, 3rd, and 4th altered zones, respectively.

比值特征显示，上部富集 Ag、下部富集 Au（图 12f）。因此，黄铁矿的 Au/As、Co/Ni 对不同蚀变带具有重要的指示（图 12f、12g）。在黄铁矿 Co/Ni-Au/Ag 图上，第 1、2、3 蚀变带的黄铁矿的 Co/Ni 与 Au/Ag 呈反比，由原点向第 II 象限分布（图 12h），而第 4 蚀变带分布范围较广，与其他 3 个蚀变带的黄铁矿有明显的差异（图 12h），这也显示第 4 蚀变带可能是另外一次热液活动的产物。矿床勘查及开采资料显示，+80 m 中段以下矿块品位主体大于 6 g/t，而+80 m 中段以上矿块主体品位小于 4 g/t，这些特征与黄铁矿微量元素反映的热液活动具有一致性。

综合黄铁矿微量元素的空间变化规律，在第 1—3 蚀变带中第 3 蚀变带黄铁矿的 Co/Ni 比值最高，暗示其为该次热液活动的尾部，而第 1 蚀变带为热液活动的头部（上部情况不清楚），整个蚀变带垂深至少 160 m（图 13）。第 4 蚀变带为另一次热液活动的头部，参照上部矿体空间变化，推测延伸可达 160 m，保守估计在−60 m 可能见到蚀变带的尾部。目前该矿床最深已控制至−20 m，因此，深部至少还可以勘探一个中段（约 40 m）。由于上部采矿区无法获得相关样品，实际深部延伸可能更大，表明其具有良好的勘查前景。



1—第 1 蚀变带；2—第 2 蚀变带；3—第 3 蚀变带；4—第 4 蚀变带

图 13 基于蚀变岩中黄铁矿微量元素的金矿勘查模型

Fig. 13 Gold exploration model based on trace elements of pyrite in altered rocks

1—1st altered zone; 2—2nd altered zone; 3—3rd altered zone; 4—4th altered zone

5 结论

（1）九仗沟金矿床+260 m 至−20 m 中段可分为 4 个蚀变带，第 1 蚀变带黄铁矿中的 Au 以纳米颗粒形式，第 2—4 蚀变带其以固溶体形式为主。黄铁矿中 Co/Ni 比值（1～10）及 Co-Ni-As 图解显示其为岩浆热液成因。

（2）由第 1 蚀变带至第 3 蚀变带（由浅至深）黄铁矿中 Au 含量中位数分别为 708.30×10^{-6}、3.96×10^{-6}、0.06×10^{-6}，呈逐渐降低的趋势。黄铁矿中 Au 与 Ag、Te、Zn、Sb、As、Se 和 Pb 元素呈正相关，Au/As、Au/Ag 比值与 Au 含量呈正相关变化，而 Co/Ni 比值与 Au 含量呈负相关变化。因此，黄铁矿中 Au、Ag、Te、Zn、Sb、As、Se、Pb 元素含量及 Au/As、Au/Ag、Co/Ni 对蚀变带垂深变化具重要的指示意义。

（3）黄铁矿中微量元素在垂向上存在系统性的变化规律，在第 1—3 蚀变带黄铁矿中微量元素含量呈连续性渐变规律，为同一期次成矿活动的产物；而在第 4 蚀变带其含量出现跳跃，推测其为另一次成矿活动的产物。根据第 1—3 蚀变带的垂向深度，推测第 4 蚀变带垂向延深可达−60 m，目前至少还可勘探一个中段（40 m），九仗沟金矿床深部具有良好的勘查前景。

References

BABEDI L, VON DER HEYDEN B P, TADIE M, et al. , 2023. Trace elements in pyrite from five different gold ore deposit classes: a review and meta-analysis[M]//TORVELA T, LAMBERT-SMITH J S, CHAPMAN R J. Recent advances in understanding gold deposits: from orogeny to alluvium. London: Geological Society of London: 47-83.

BAJWAH Z U, SECCOMBE P K, OFFLER R, 1987. Trace element distribution, Co: Ni ratios and genesis of the Big Cadia iron-copper deposit, New South Wales, Australia[J]. Mineralium Deposita, 22(4): 292-300.

CAO G S, ZHANG Y, CHEN H Y, 2023. Trace elements in pyrite from orogenic gold deposits: Implications for metallogenic mechanism[J]. Acta Petrologica Sinica, 39(8): 2330-2346. (in Chinese with English abstract)

CAO G S, ZHANG Y, ZHAO H T, et al., 2023. Trace element variations of pyrite in orogenic gold deposits: Constraints from big data and machine learning[J]. Ore Geology Reviews, 157: 105447.

CAO M P, YAO J M, DENG X H, et al., 2017. Diverse and multistage Mo, Au, Ag-Pb-Zn and Cu deposits in the Xiong'er Terrane, East Qinling: from Triassic Cu mineralization[J]. Ore Geology Reviews, 81: 565-574.

CHEN Y J, SANTOSH M, 2014. Triassic tectonics and mineral systems in the Qinling Orogen, central China[J]. Geological Journal, 49(4-5): 338-358.

COOK N J, CHRYSSOULIS S L, 1990. Concentrations of invisible gold in the common sulfides[J]. The Canadian Mineralogist, 28(1): 1-16.

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

DENG Y, ZHANG J, ZHONG R C, et al., 2024. Application of principal component analysis method based on machine learning to gold deposit type discrimination: a case study of the geochemical characteristics of pyrite[J]. Acta Petrologica Sinica, 40(6): 1801-1816. (in Chinese with English abstract)

DI P F, TANG Q Y, LIU D X, et al., 2023. Trace element geochemistry of pyrite and its significance in the Gannan district, West Qinling: A case study from the Jiagantan and Zaozigou gold deposits[J]. Chinese Rare Earths, 44: 140-154. (in Chinese with English abstract)

DING P C, WANG Z Q, GUO Q Q et al. , 2020. Mineralization and enrichment characteristics and deep prospecting prospect evaluation of the Miaoling-Jiuzhanggou gold metallogenic belt in Henan Province[J].

Gold, 41(10): 7-12, 18. (in Chinese with English abstract)

HE X Y, WANG C M, YUAN J M, et al., 2019. Mesozoic Au-Mo metallogenic system in the Xiong'ershan-Waifangshan ore field[J]. Earth Science Frontiers, 26(5): 33-52. (in Chinese with English abstract)

LARGE R R, DANYUSHEVSKY L, HOLLIT C, et al., 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.

LI H, YU B, WEI J, et al., 2021. Research on prediction of hidden ore bodies at depth in exploration (new) areas using structural superimposed halos and a reference practical ideal model[J]. Geology and Exploration, 57(2): 351-359. (in Chinese with English abstract)

LI H B, ZENG F Z, 2005. The pyrite's typomorphic characteristics in gold deposit[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 20(3): 199-203. (in Chinese with English abstract)

LI H B, 2005. The discussion about genesis of Jiuzhanggou gold deposit of Henan[J]. Resources Environment & Engineering, 19(1): 16-22, 58. (in Chinese with English abstract)

LI J J, HE Y L, FU C, et al., 2016. Metallogenic characteristics and potential analysis of the Yuxi Au-Mo-W-Pb-Zn-Ag-Fe-bauxite-graphite metallogenic belt in Western Henan[J]. Acta Geologica Sinica, 90(7): 1504-1524. (in Chinese with English abstract)

LI W, COOK N J, XIE G Q, et al., 2019. Textures and trace element signatures of pyrite and arsenopyrite from the Gutaishan Au-Sb deposit, South China[J]. Mineralium Deposita, 54(4): 591-610.

LI X H, FAN H R, XIE H L, et al., 2022. Geochronology, ore-forming processes and fluid sources of the Qinglonggou gold deposit, North Qaidam (NW China): Constraints from in-situ U-Pb dating of monazite and geochemistry of pyrite[J]. Ore Geology Reviews, 149: 105093.

LIU S Y, ZHANG D, YANG M J, et al., 2024. Characteristics of chlorites from the Haopinggou Ag-Au polymetallic deposit in the Xiong'ershan ore concentration area and its exploration implications[J]. Journal of Geomechanics, 30(1): 129-146. (in Chinese with English abstract)

LIU W Y, LIU J S, HE M X, et al., 2018. Geochemical features of Au-Ag polymetallic deposits in Xiong'ershan ore district of western Henan and their geological significances[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 28(7): 1401-1417. (in Chinese with English abstract)

LIU Y G, DING P C, XU J W et al., 2022. Discussion on genesis of F_8 ore-bearing structure in Miaoling-Jiuzhanggou gold belt in Songxian, Henan Province[J]. Gold, 43(8): 5-9. (in Chinese with English abstract)

NAGLIK B, TOBOŁA T, DUMAŃSKA-SŁOWIK M, et al., 2022. Multistage ore forming history of the Variscan porphyry Mo-Cu-W Myszków deposit (Poland): Evidence from trace elements of pyrite[J]. Ore Geology Reviews, 150: 105185.

PATON C, HELLSTROM J, PAUL B, et al., 2011. Iolite: Freeware for the visualisation and processing of mass spectrometric data[J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 26(12): 2508-2518.

QIN J Q J, QU W X, ZHOU Y L, et al., 2022. Vertical zoning characteristics and deep prediction of primary halo in Jiuzhanggou gold deposit, Western Henan Province[J]. Mining Technology, 22(6): 202-206. (in Chinese with English abstract)

QIN J Q, QU W X, ZHOU Y L, et al., 2019. Geological characteristics of Jiuzhanggou gold deposit in Song County, Henan Province and prospects for deep prospecting[J]. Advances in Geosciences, 9(6): 429-436. (in Chinese with English abstract)

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.

REICH M, SIMON A C, DEDITIUS A, et al., 2016. Trace element signature of pyrite from the Los Colorados iron oxide-apatite (IOA) deposit, Chile: a missing link between Andean IOA and iron oxide copper-gold systems?[J]. Economic Geology, 111(3): 743-761.

RILEY J F, 1968. The cobaltiferous pyrite series[J]. American Mineralogist, 53(1-2): 293-295.

SHEN J F, LI S R, HUANG S F, et al., 2021. The decennary new advances on the genetic mineralogy and prospecting mineralogy(2010-2020)[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 40(3): 610-623. (in Chinese with English abstract)

SHENG Y M, TANG L, ZHANG S T, et al., 2022a. Distal gold mineralization associated with porphyry system: the case of Hongzhuang and Yuanling deposits, East Qinling, China[J]. Ore Geology Reviews, 142: 104701.

SHENG Y M, TANG L, ZHANG S T, et al., 2022b. Influence of fluid-rock interaction on gold mineralization in the Dongwan deposit, East Qinling, China: constraints from systematic sulfur isotope and trace element geochemistry[J]. Ore Geology Reviews, 142: 104718.

SPRINGER G, SCHACHNER-KORN D, LONG J V P, 1964. Metastable solid solution relations in the system FeS_2-CoS_2-NiS_2[J]. Economic Geology, 59(3): 475-491.

TIAN G, ZHANG C Q, PENG H J, et al., 2014. Petrogenesis and geodynamic setting of the Chang'an gold deposit in southern Ailaoshan metallogenic belt[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(1): 125-138. (in Chinese with English abstract)

TIAN Y F, SUN J, YE H S, et al., 2017. Genesis of the Dianfang breccia-hosted gold deposit, western Henan Province, China: constraints from geology, geochronology and geochemistry[J]. Ore Geology Reviews, 91: 963-980.

TIAN Y F, YE H S, MAO J W, et al., 2019. Geochronology and geochemistry of the Dianfang gold deposit, western Henan Province, central China: Implications for mineral exploration[J]. Ore Geology Reviews, 111: 102967.

WANG B Q, SONG Y, LI F Q, et al. , 2023. Study on element content and thermoelectrie properties of pyrite in porphyry copper-gold metallogenic system. Geological Review, 69(S1): 193-194. (in Chinese with English abstract)

WANG M Y, LI J, SONG M C, et al., 2023. The metallogenic mechanism of the Dadengge gold polymetallic deposit in the Jiaodong Peninsula: Constraints from pyrite Rb-Sr dating, in situ S isotope and trace elements[J]. Acta Petrologica Sinica, 39(5): 1501-1515. (in Chinese with English abstract)

WANG X H, GUO T, LI X Z, et al., 2022. A study on the geochemical characteristics and metallogenesis of the Lanmugou gold deposit in the South Qinling Belt, Shaanxi, China[J]. Journal of Geomechanics, 28(3): 464-479. (in Chinese with English abstract)

WANG X M, SU K F, SUN H S, et al. , 2013. Study on the metallogenic settings and gold metallogenic regularity of Dongwan-Huaishuping ore deposit in Songxian County, Henan Province[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press. (in Chinese)

WANG Y, WANG D H, WANG C H, 2024. Quantitative research on metallogenic regularity of gold deposits in China based on geological big data[J]. Earth Science Frontiers, 31(4): 438-455. (in Chinese with English abstract)

WANG Y H, HAN D, PAN B D, et al., 2022. Characteristics and ore-forming material source of gold minerals in Jiuzhanggou gold deposit, Henan Province[J]. Gold, 43(7): 3-8. (in Chinese with English abstract)

WILSON S A, RIDLEY W I, KOENIG A E, 2002. Development of sulfide calibration standards for the laser ablation inductively-coupled plasma mass spectrometry technique[J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 17(4): 406-409.

YAN C H, LI X L, HAN J W, 2021. New understanding of gold polymetallic mineralization in Xiong'er mountain ore concentration area[J]. Metal Mine(5): 1-12. (in Chinese with English abstract)

YAN Y T, LI S R, JIA B J, et al., 2012. Composition typomorphic characteristics and statistic analysis of pyrite in gold deposits of different genetic types[J]. Earth Science Frontiers, 19(4): 214-226. (in Chinese with English abstract)

YANG D P, LIU P R, SONG Y X, et al., 2023. Trace element characteristics of pyrite in Qujia gold deposit, Laizhou, Shandong Province, and its implication on metallogenic process[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 42(6): 788-808. (in Chinese with English abstract)

ZHANG H Y, ZHAO Q Q, ZHAO G, et al., 2022. In situ LA-ICP-MS trace element analysis of pyrite and its application in study of Au deposit[J]. Mineral Deposits, 41(6): 1182-1199. (in Chinese with English abstract)

ZHANG W, WU G, 2007. Structure analysis for ore body controlling of Jiuzanggou gold deposit in Henan[J]. Nonferrous Metals, 59(2): 70-74. (in Chinese with English abstract)

ZHANG Y, LI S P, JING P, et al., 2024. Geochemical characteristics and exploration model of the Jiuzhanggou gold deposit, Songxian County, Henan province[J]. Gold Science and Technology, 32(2): 258-269. (in Chinese with English abstract)

ZHANG Z M, ZENG Q D, WANG Y B, et al., 2023. Metallogenic age and fluid evolution of the Kangshan Au-polymetallic deposit in the southern margin of the North China Craton: Constraints from monazite U-Pb age, and in-situ trace elements and S isotopes of pyrite[J]. Acta Petrologica Sinica, 39(3): 865-885. (in Chinese with English abstract)

ZHOU L H, FENG R, 1994. The application of pyrite prospecting-mineralogy to prospective value in Bainaimiao gold deposites[J]. Journal of Changchun University of Earth Sciences, 24(3): 265-270. (in Chinese with English abstract)

ZHOU X W, SHAO J L, BIAN Q J, 1994. Study on typomorphic characteristics of pyrite from Dongbeizhai gold deposit, Sichuan Province[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 19(1): 52-59. (in Chinese with English abstract)

ZHOU Z J, CHEN Z L, WEYER S, et al., 2023. Metal source and ore precipitation mechanism of the Ashawayi orogenic gold deposit, southwestern Tianshan Orogen, western China: Constraints from textures and trace elements in pyrite[J]. Ore Geology Reviews, 157: 105452.

ZHU H L, YANG X K, HE H J, et al., 2023. Discrimination of gold deposit types based on convolutional neural network and pyrite big data[J]. Acta Geologica Sinica, 97(10): 3396-3409. (in Chinese with English abstract)

ZHU S Z, CHU Z B, JIN G, et al., 2022. Geological characteristics and genetic mechanism of Jiuzhanggou gold deposit in southwest Henan Province[J]. China Manganese Industry, 40(2): 72-78. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

曹根深, 张宇, 陈华勇, 2023. 造山型金矿床黄铁矿微量元素对成矿机制的指示[J]. 岩石学报, 39(8): 2330-2346.

邓依, 张静, 钟日晨, 等, 2024. 基于机器学习的主成分分析方法在金矿类型判别中的应用: 以黄铁矿元素地球化学特征为例[J]. 岩石学报, 40(6): 1801-1816.

第鹏飞, 汤庆艳, 刘东晓, 等, 2023. 西秦岭甘南地区金矿床黄铁矿微量元素地球化学特征及意义: 以加甘滩和早子沟金矿为例[J]. 稀土, 44(4): 140-154.

丁培超, 王振强, 郭勤强, 等, 2020. 河南省庙岭—九仗沟金矿带矿化富集特征及深部找矿远景评价[J]. 黄金, 41(10): 7-12, 18.

贺昕宇, 王长明, 袁继明, 等, 2019. 熊耳山—外方山矿集区中生代Au-Mo成矿系统[J]. 地学前缘, 26(5): 33-52.

李红兵, 2005. 河南嵩县九仗沟金矿床成因探讨[J]. 资源环境与工程, 19(1): 16-22, 58.

李红兵, 曾凡治, 2005. 金矿中的黄铁矿标型特征[J]. 地质找矿论丛, 20(3): 199-203.

李惠, 禹斌, 魏江, 等, 2021. 勘查(新)区构造叠加晕研究方法及预测参照实用理想模型[J]. 地质与勘探, 57(2): 351-359.

李俊建, 何玉良, 付超, 等, 2016. 豫西Au-Mo-W-Pb-Zn-Ag-Fe-铝土矿-石墨成矿带主要地质成矿特征及潜力分析[J]. 地质学报, 90(7): 1504-1524.

刘松岩, 张达, 杨明建, 等, 2024. 熊耳山矿集区蒿坪沟Ag-Au多金属矿床绿泥石特征及其找矿意义[J]. 地质力学学报, 30(1): 129-146.

刘文毅, 刘继顺, 何美香, 等, 2018. 豫西熊耳山矿集区金银多金属矿床地球化学特征及地质意义[J]. 中国有色金属学报, 28(7): 1401-1417.

刘玉刚, 丁培超, 徐金武, 等, 2022. 河南省嵩县庙岭—九仗沟金矿带F_8含矿构造成因探讨[J]. 黄金, 43(8): 5-9.

秦军强, 曲伟勋, 周宇乐, 等, 2019. 河南省嵩县九仗沟金矿地质特征及深部找矿前景[J]. 地球科学前沿, 9(6): 429-436.

秦军强, 曲伟勋, 周宇乐, 等, 2022. 豫西九仗沟金矿床原生晕垂向分带特征及深部预测[J]. 采矿技术, 22(6): 202-206.

申俊峰，李胜荣，黄绍锋，等，2021. 成因矿物学与找矿矿物学研究进展（2010—2020）[J]. 矿物岩石地球化学通报，40(3)：610-623.

田广，张长青，彭惠娟，等，2014. 哀牢山长安金矿成因机制及动力学背景初探：来自 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年和黄铁矿原位微量元素测定的证据[J]. 岩石学报，30(1)：125-138.

王蓓琪，宋扬，李发桥，等，2023. 斑岩铜金成矿系统中黄铁矿的元素含量与热电性特征研究[J]. 地质论评，69(S1)：193-194.

王美云，李杰，宋明春，等，2023. 胶东大邓格金多金属矿床成矿机制：来自黄铁矿 Rb-Sr 定年、原位硫同位素及微量元素的制约[J]. 岩石学报，39(5)：1501-1515.

王晓虎，郭涛，李效壮，等，2022. 南秦岭烂木沟金矿床地球化学特征与矿床成因研究[J]. 地质力学学报，28(3)：464-479.

王兴民，苏凯峰，孙华山，等，2013. 河南省嵩县东湾-槐树坪矿区成矿环境及金矿规律研究[M]. 武汉：中国地质大学出版社.

王岩，王登红，王成辉，等，2024. 基于地质大数据的中国金矿时空分布规律定量研究[J]. 地学前缘，31(4)：438-455.

王颖辉，韩东，潘柏东，等，2022. 河南省九仗沟金矿床金矿物特征及成矿物质来源[J]. 黄金，43(7)：3-8.

燕长海，李肖龙，韩江伟，等，2021. 熊耳山矿集区金多金属矿成矿的几点新认识[J]. 金属矿山(5)：1-12.

严育通，李胜荣，贾宝剑，等，2012. 中国不同成因类型金矿床的黄铁矿成分标型特征及统计分析[J]. 地学前缘，19(4)：214-226.

杨德平，刘鹏瑞，宋英昕，等，2023. 山东莱州曲家金矿黄铁矿微量元素对成矿过程的指示[J]. 岩石矿物学杂志，42(6)：788-808.

张红雨，赵青青，赵刚，等，2022. 黄铁矿微量元素 LA-ICP-MS 原位微区分析方法及其在金矿床研究中的应用[J]. 矿床地质，41(6)：1182-1199.

张伟，伍刚，2007. 河南省九丈沟金矿控矿构造分析[J]. 有色金属，59(2)：70-74.

张勇，李水平，荆鹏，等，2024. 河南嵩县九仗沟金矿床地球化学特征与勘查模式[J]. 黄金科学技术，32(2)：258-269.

张哲铭，曾庆栋，王永彬，等，2023. 华北克拉通南缘康山金多金属矿床成矿时代及流体演化：来自独居石 U-Pb 年龄、黄铁矿微量元素和原位 S 同位素制约[J]. 岩石学报，39(3)：865-885.

周立宏，冯瑞，1994. 黄铁矿找矿矿物学在白乃庙金矿床远景评价中的应用[J]. 长春地质学院学报，24(3)：265-270.

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-中国地质大学学报，19(1)：52-59.

朱昊磊，杨兴科，何虎军，等，2023. 基于卷积神经网络和黄铁矿大数据判别金矿类型[J]. 地质学报，97(10)：3396-3409.

朱随洲，储照波，金刚，等，2022. 河南九仗沟金矿地质特征及成因机制探讨[J]. 中国锰业，40(2)：72-78.