

# 山东省汶上县石头墩金矿黄铁矿微区元素组成 及对矿床成因的指示

江书龙<sup>1</sup>, 张 侠<sup>2</sup>, 李敬波<sup>1</sup>, 牛 晓<sup>3</sup>, 孙建文<sup>1</sup>, 姜炳田<sup>4</sup>, 姜文鹏<sup>1</sup>

(1. 山东省核工业二四八地质大队, 山东 青岛 266100; 2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室, 山东 青岛 266234;  
3. 青岛德测仪器设备有限公司, 山东 青岛 266100; 4. 山东省核工业二七三地质大队, 山东 青岛 266100)

**摘 要:**为揭示汶上县石头墩金矿成矿作用条件,明确矿床成因及成矿流体性质,利用电子探针及 LA-ICP-MS 对石头墩金矿中黄铁矿的主、微量元素组成进行系统分析测试。结果表明,石头墩金矿的成矿作用经历了多期的热液叠加成矿过程,具体包括三个阶段:低温黄铁矿(PyI)化阶段(I)、高温黄铁矿(PyII)化阶段(II)和硅化阶段(III),相对于第一世代黄铁矿,第二世代黄铁矿具有更高的 Co 含量及 S/Fe 原子数比值,表明其形成于更高的流体温度条件下。综合多种元素判别图可知,该区矿床类型为浅成低温热液型金矿,成矿流体主要为燕山后期岩浆活动形成的浅成低温热液流体。石头墩段复杂的地质构造背景及成矿作用过程为金的活化及迁移提供了理想条件,是该区矿床中金富集的重要原因。研究结果为明确该区金矿床成因机制提供了重要的矿物学支撑。

**关键词:**黄铁矿;矿物学;微区元素组成;石头墩金矿;矿床成因

中图分类号:P61

文献标志码:A

## Ore genesis of Shitoudun gold deposit in Wenshang County, Shandong Province, indicated by in-situ element contents in pyrites

JIANG Shulong<sup>1</sup>, ZHANG Xia<sup>2</sup>, LI Jingbo<sup>1</sup>, NIU Xiao<sup>3</sup>,  
SUN Jianwen<sup>1</sup>, JIANG Bingtian<sup>4</sup>, JIANG Wenpeng<sup>1</sup>

(1. Shandong Province Nuclear Industry Geological Group 248, Qingdao, Shandong 266100, China;  
2. Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology(Qingdao), Qingdao, Shandong 266234, China;  
3. Qingdao Dece Instrument and Equipment Company Limited, Qingdao, Shandong 266100, China;  
4. Shandong Province Nuclear Industry Geological Group 273, Qingdao, Shandong 266100, China)

**Abstract:** To reveal the mineralization conditions and determine the ore genesis and the nature of ore-forming fluid of Shitoudun gold deposit in Wenshang county, Shandong province, this paper made a systematic analysis and test of the major and trace element contents in pyrites of Shitoudun gold ore. The results show that multi-stage mineralization process occurred during the ore formation, including low-temperature pyritization (PyI) stage (I), high-temperature pyritization (PyII) stage (II), and silicification stage (III). Compared with PyI, the PyII possesses higher Co contents and S/Fe atomicity ratios, indicating that PyII was formed under higher temperature conditions. Based on multiple element discrimination diagrams, the deposit is recognized as low-temperature epithermal type and

收稿日期:2021-10-22

基金项目:国家自然科学基金项目(42102126);山东省自然科学基金项目(ZR2019BD010);青岛海洋科学与技术试点国家实验室科研启动项目(JCZX202014)

作者简介:江书龙(1988—),男,山东青岛人,工程师,硕士,主要从事地质矿产勘查和矿石学、矿物学、矿床学研究。

E-mail:827973679@qq.com

姜文鹏(1984—),男,山东德州人,工程师,主要从事金矿地质勘查和成矿规律方面的研究,本文通信作者。

E-mail:1364141125@qq.com

the mineralization fluid is mainly the epithermal fluid formed in the magmatic activities during the late Yanshanian. The complicated tectonic background and the mineralization process provide perfect conditions for gold remobilization and ore formation, resulting in the gold concentration in the ore of Shitoudun deposit. This research provides important mineralogical evidence for determining the gold mineralization mechanism in Shitoudun deposit.

**Key words:** pyrite; mineralogy; in-situ element contents; Shitoudun gold deposit

金作为一种贵金属,不仅为储备和投资的重要通货,在电子产业、通讯及航空航天等方面也具有重要应用。自然界金矿床中,除砂金和岩浆熔离型硫化物伴生金矿床外,其余均为热液型金矿。而以黄铁矿为载金矿物的矿床比率超过 98%,黄铁矿成为热液金矿研究的首选对象<sup>[1]</sup>。近年来,随着测试技术的发展,黄铁矿中微区微量元素组成的精确分析成为可能。相较于传统测试手段,电子探针和激光烧蚀-电感耦合等离子体质谱(laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry, LA-ICP-MS)微区成分分析具有时效快、检出限低、准确度高等优点。前人已利用微区分析技术对不同成因热液金矿床中黄铁矿的微区元素组成、矿床成矿物质来源、成矿流体物理化学条件等进行了一些探讨。如李洪梁等<sup>[1]</sup>总结了不同成因金矿中黄铁矿的成分标型特征,提出黄铁矿标型特征的差异可作为判断金矿成因的重要依据,并初步建立了金矿床成因与黄铁矿标型特征之间的耦合联系;Large 等<sup>[2]</sup>对具有代表性的卡林型金矿和造山型金矿中黄铁矿的微量元素组成进行了分析,认为黄铁矿特征元素组成可作为区别两类成因金矿的重要依据;毛光周等<sup>[3]</sup>通过黄铁矿微区元素组成及 S 同位素研究,对沂沭断裂带中段南小尧金矿的成因进行了探讨,认为中生代岩浆活动与该区金矿床的形成密不可分,岩浆热液流体是金矿成矿物质的主要来源。

石头墩金矿位于山东省汶上县兴化寺村南约 1 500 m,是兴化寺金矿区的主要矿段之一。石头墩矿段的矿石主要为原生矿,属黄铁矿蚀变岩型金矿<sup>[4]</sup>,平均品位 3.38 g/t。初步勘察表明,石头墩金矿段保有金矿石量约 270 000 t,金储量 900 kg,开采前景较好。前人对该区矿床成因及成矿物质来源进行了探讨,认为新太古代泰山岩群雁翎关组是金的矿源层,受到中生代燕山晚期岩浆活动及区域韧性剪切作用的影响,并促进了基底岩石中金的活化和迁移<sup>[4]</sup>。然而,已有的研究对成矿流体性质(岩浆热液流体或变质热液流体)、流体来源及成矿流体物理化学条件等关键科学问题仍缺乏足够的关注。本研究首次利用电子探针及 LA-ICP-MS 微区分析测试技术,对石头墩金矿中黄铁矿的主、微量元素微区组成进行系统分析,探讨该区金矿的成矿作用条件及成矿物质来源,并结合前人研究资料提出石头墩金矿的成矿作用模式,为该区金矿床的成因研究提供重要的矿物学支撑。

## 1 地质背景

兴化寺金矿位于鲁中低山丘陵与鲁西南平原区的过渡地带,构造上位于汶泗断陷北侧,孙氏店断裂东侧,区内断裂构造、韧性剪切带发育。见 NW 向和 NEE 向两组断裂带,NW 向断裂被 NEE 向断裂错切(图 1),金矿体赋存于 NEE 向兴化寺断裂带中<sup>[4]</sup>。兴化寺金矿主要由孔辛庄、快活岭、石头墩三个矿段组成。石头墩矿段位于兴化寺金矿中段,区内出露地层主要为太古代泰山岩群和新生界第四系,断裂构造及

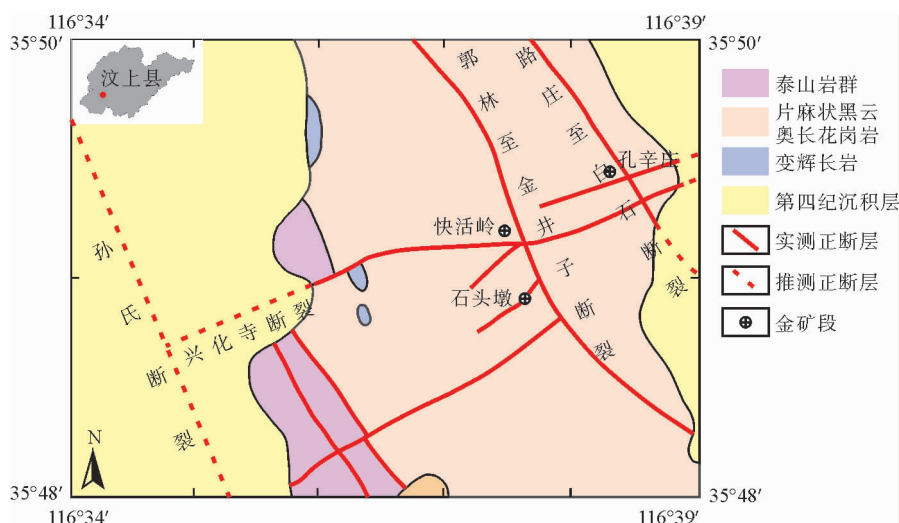


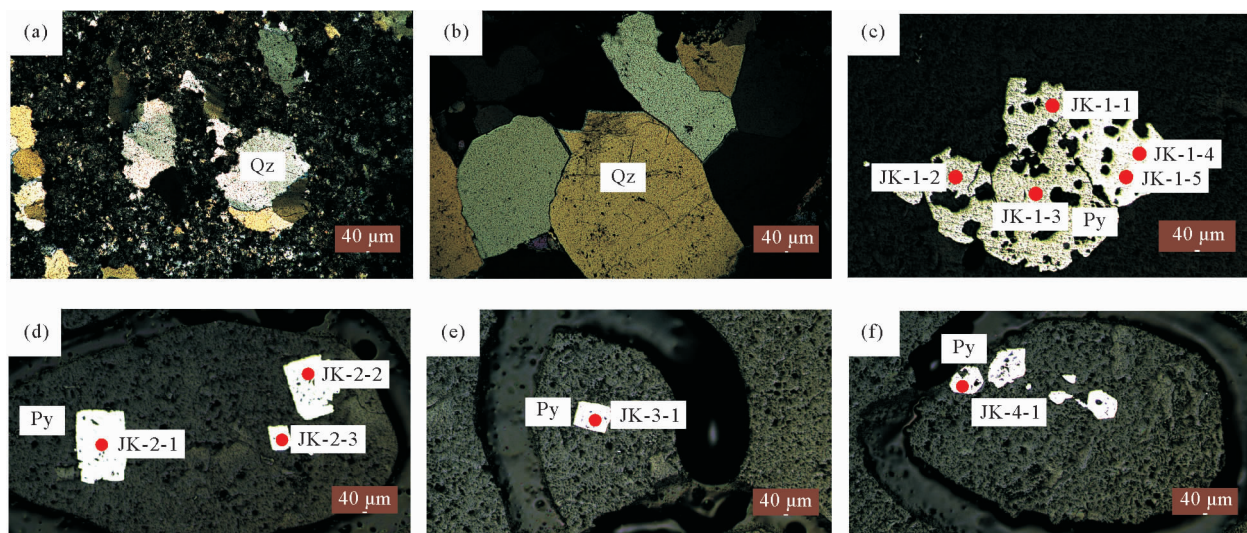
图 1 兴化寺金矿区域地质图

Fig. 1 Geological map of Xinghuasi gold deposit

韧性剪切带发育。本矿段断裂构造主要为金矿化蚀变带。受 NW 向韧性剪切和 NE 向断裂构造作用强烈。韧性剪切带由糜棱岩、初糜棱岩组成,局部金矿化蚀变较强;断裂构造以张性为主,加之后期岩浆热液作用,断裂带内岩石局部金矿化明显。矿区主要产出四种金矿石类型:黄铁绢英岩化碎裂岩、褐铁矿化绢英岩化碎裂岩、黄铁矿化硅化花岗质碎裂岩及绢云母化碎裂状斜长花岗岩。

## 2 岩石学特征

本研究样品为黄铁矿化硅化花岗质碎裂岩,手标本呈灰白色,肉眼可见少量黄铁矿零星分布于矿石之中。镜下鉴定表明,样品为斑状结构,斑晶矿物主要为石英和角闪石(图 2(a)、2(b)),呈半自形-它形结构,基质为隐晶质。正交偏光镜下,石英斑晶呈波状消光,表现为受挤压变质作用改造的特征。黄铁矿呈浸染状产出,零星分布于矿石之中(图 2(c)~2(f)),根据晶型特征,可明显识别出两个世代的黄铁矿:第一世代黄铁矿(PyI)呈它形结构,颗粒较大,多发生强烈溶蚀呈多孔状结构(图 2(c));第二世代黄铁矿(PyII)呈自形立方体状,粒径较小(图 2(d)~2(f))。另外,电子探针分析发现少量辉钼矿与第二世代黄铁矿共生(图 3),其中,辉钼矿呈它形结构产出,粒径 $<50\text{ }\mu\text{m}$ ,部分交代先期结晶的黄铁矿。矿石后期受硅化作用影响显著,见石英脉切穿原生矿石(图 2(b))。



(a)~(b)透射光;(c)~(e)反射光;(c)第一世代黄铁矿;(d)~(f)第二世代黄铁矿;Qz—石英;Py—黄铁矿

图2 石头墩金矿样品镜下照片及黄铁矿微区测试点

Fig. 2 Microphotograph of Shitoudun gold deposit sample and analytical points of pyrite

## 3 分析方法

### 3.1 电子探针分析

黄铁矿微区主量元素在中国海洋大学海底科学与探测技术教育部重点实验室完成,测试仪器为 JXA-8230 电子探针。仪器测试条件及方法参考文献[5],包括:加速电压 15 kV,探针电子束流 20 nA,束斑直径  $5\text{ }\mu\text{m}$ ;图像分析采用二次电子和背散射(成分)电子图像;标准样品采用美国 SPI 公司提供的标准样品,标准方法采用 GB/T 4930—93 电子探针分析标准样品通用技术条件、GB/T 15074—94 电子探针定量分析方法通则、GB/T 15075—94 电子探针分析仪检测方法、GB/T 17359—98 电子探针和扫描电镜 X 射线能谱定量分析通则,修正方法采用 ZAF 法。

### 3.2 LA-ICP-MS 分析

黄铁矿微区原位微量元素含量在武汉上谱分析科技有限责任公司利用 LA-ICP-MS 完成,详细的仪器参数和分析流程见 Zong 等[6]。GeolasPro 激光剥蚀系统由 COMPexPro 102 ArF 193 nm 准分子激光器和

MicroLas 光学系统组成, ICP-MS 型号为 Agilent 7700e。激光剥蚀过程中采用氦气作为载气、氩气为补偿气以调节灵敏度,二者在进入 ICP 之前通过一个 T 型接头混合,激光剥蚀系统配置有信号平滑装置。本次分析的激光束斑和频率分别为  $44\ \mu\text{m}$  和  $2\ \text{Hz}$ 。单矿物微量元素含量处理采用玻璃标准物质 NIST 610, NIST 612 进行多外标无内标校正, USGS 的硫化物标准物质 MASS-1 作为监控标样验证校正方法的可靠性。每个时间分辨分析数据包括约  $20\sim 30\ \text{s}$  空白信号和  $50\ \text{s}$  样品信号。对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正以及元素含量计算)采用软件 ICPMSDataCal 完成。

## 4 结果

本研究对两个世代黄铁矿主、微量元素组成进行了系统的分析测试(测试点位见图 2),结果表明,两个世代黄铁矿微区主、微量元素组成存在显著差异。相对于第一世代黄铁矿(PyI),第二世代黄铁矿(PyII)具有更高的 Co、Ni 含量及 S/Fe 原子数比值,但 As 的含量相对较低。此外,两个世代黄铁矿中 Cu、Se 的含量都较低,一般不高于  $10\times 10^{-6}$ (表 1)。黄铁矿中 S、Fe 元素含量偏离理论值( $w(\text{S}) = 53.45\%$ ;  $w(\text{Fe}) = 46.55\%$ )的程度可用  $\delta\text{S}$  和  $\delta\text{Fe}$  表示<sup>[5]</sup>,其计算公式如下:

$$\delta\text{S} = (w(\text{S}) \times 100 - 53.45) / 53.45 \times 100,$$

$$\delta\text{Fe} = (w(\text{Fe}) \times 100 - 46.55) / 46.55 \times 100.$$

其中  $w(\text{S})$  和  $w(\text{Fe})$  分别为黄铁矿中 S 和 Fe 的质量百分含量。计算结果表明,该区黄铁矿  $\delta\text{S}$  值为  $0.13\sim 1.65$ ,  $\delta\text{Fe}$  值为  $-0.43\sim 2.10$ ,两个世代黄铁矿的  $\delta\text{S}$  和  $\delta\text{Fe}$  值之间无明显差异。大量研究表明,黄铁矿中的主、微量元素组成对其结晶条件具有良好的指示意义。研究区两个世代黄铁矿微区化学组成的差异表明其形成于不同的流体条件,说明该区金矿成矿作用过程中成矿流体的物理化学条件发生了显著变化。而  $\delta\text{S}$  和  $\delta\text{Fe}$  值主要受成矿物质来源的控制,两个世代黄铁矿相似的  $\delta\text{S}$  和  $\delta\text{Fe}$  值表明其结晶过程中成矿物质来源并未发生明显改变。

表 1 石头墩金矿石中黄铁矿微区主(%)、微量( $10^{-6}$ )元素组成

Tab. 1 In-situ major(%) and trace( $10^{-6}$ ) element compositions of pyrite in Shitoudun gold deposit

点号	Fe	S	Co	Ni	As	Cu	Se	S/Fe	$\delta\text{Fe}$	$\delta\text{S}$
JK-1-1	46.98	53.63	6.30	11.30	12.10	—	7.20	1.98	0.92	0.33
JK-1-2	47.54	54.05	1.82	1.17	38.80	0.01	22.50	1.98	2.10	1.12
JK-1-3	PyI	47.43	54.10	8.38	5.74	7.00	0.20	9.84	1.99	1.89
JK-1-4	46.50	53.55	1.85	2.01	19.30	0.06	17.50	1.98	-0.10	0.19
JK-1-5	46.87	53.90	4.23	2.83	29.90	0.05	0.51	1.99	0.69	0.84
JK-2-1	46.86	53.73	706.00	307.00	29.40	—	17.40	1.99	0.67	0.52
JK-2-2	46.54	54.24	466.00	136.00	12.70	0.05	7.11	2.03	-0.02	1.48
JK-2-3	PyII	46.35	53.52	987.00	71.00	0.79	0.10	9.64	-0.43	0.13
JK-3-1	47.33	53.84	41.90	228.00	1.12	0.53	8.67	2.00	1.68	0.73
JK-4-1	47.09	54.33	7.70	26.90	27.50	0.06	58.60	2.01	1.16	1.65

注:黄铁矿中的 S、Fe 元素含量采用电子探针分析完成,微量元素数据利用 LA-ICP-MS 完成。

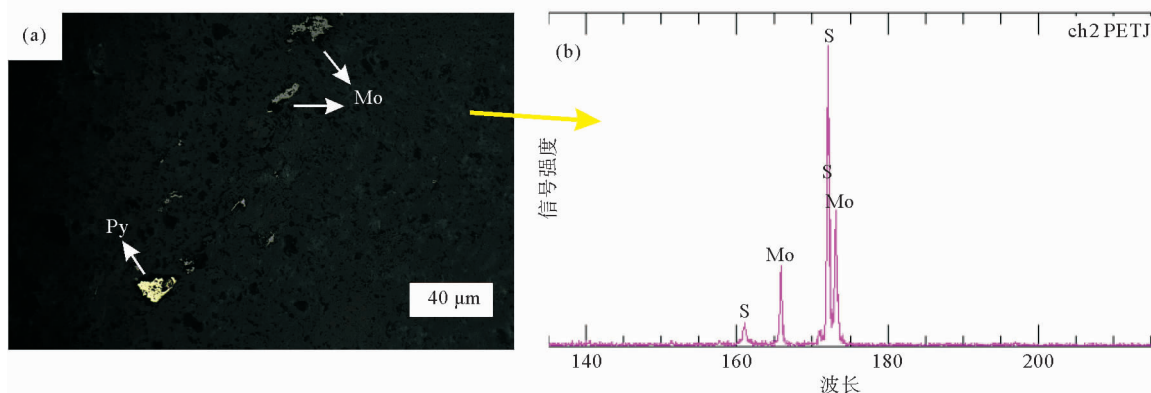
## 5 讨论

### 5.1 石头墩金矿的多期叠加成矿

根据野外手标本观察、镜下鉴定结果及黄铁矿微区主、微量元素分析,可将石头墩段金矿床成矿流体划分为三个阶段:低温黄铁矿化阶段(I)、高温黄铁矿化阶段(II)和硅化阶段(III)。



黄铁矿的晶型特征对其结晶条件具有良好的指示意义,草莓状及它形黄铁矿一般形成于低温成矿条件,而自形立方体状黄铁矿则是高温流体作用结晶的产物<sup>[6-8]</sup>。第一世代黄铁矿形成于成矿阶段 I,该阶段黄铁矿主要呈它形结构产出(图 2(c)),形成于相对低温的成矿流体条件下<sup>[7]</sup>,这一结论被黄铁矿微区主、微量元素组成所证实(见 5.2 节),黄铁矿晶体表面有大量溶蚀孔洞(图 2(c)),指示后期高温成矿流体对该阶段黄铁矿的溶蚀改造作用。第二世代黄铁矿形成于成矿阶段 II,呈自形立方体结构产出(图 2(d)、2(f)),表明其结晶温度较高( $>200\text{ }^{\circ}\text{C}$ )。该阶段黄铁矿多与辉钼矿(中、高温流体条件下结晶的矿物)共生(图 3),进一步说明成矿阶段 II 热液流体温度比阶段 I 明显升高。成矿作用晚期,矿石经历了显著的硅化作用,手标本及镜下鉴定均发现石英脉切穿原生矿石,石英脉中未见黄铁矿结晶。因此,石头墩段金矿成矿作用相对复杂,成矿过程经历了多期次矿化作用:第 I 阶段成矿作用以低温流体交代为特征,该阶段成矿流体温度不超过  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,黄铁矿以它形结构产出;第 II 阶段成矿流体温度显著提高,高温流体使得第 I 阶段结晶的低温黄铁矿产生了部分溶蚀作用;第 III 阶段为成矿晚期阶段,这一时期流体中金属元素含量显著降低, Si 含量升高,以石英的大量结晶为主要特征;成矿作用过程中流体温度经历了低温—高温—低温的演化过程,流体成分也随之改变,复杂的成矿作用过程为该区金的富集提供了有利条件。



(a) 反光镜下照片; (b) 电子探针能谱曲线; Py—黄铁矿; Mo—辉钼矿

图 3 辉钼矿与第二世代黄铁矿共生

Fig. 3 Intergrowth of molybdenite and PyII

## 5.2 黄铁矿微区元素组成对成矿流体性质的指示

黄铁矿中的主、微量元素组成对成矿流体的物理化学条件具有良好的指示意义<sup>[9-11]</sup>,是成矿作用研究的常用示踪手段。前人<sup>[12-14]</sup>研究表明,黄铁矿中微量元素主要以固溶体或显微包裹体形式存在,明确黄铁矿中微量元素的赋存状态对揭示黄铁矿的结晶条件具有重要意义<sup>[11]</sup>。在激光剥蚀信号图中,如果矿物中存在包裹体,则该包裹体对应的某几个元素含量会显著提高而使剥蚀曲线出现“鼓凸”现象;反之,若微量元素主要为固溶体形式存在(类质同象替代),则信号图中会呈平滑的剥蚀曲线,本研究样品中黄铁矿激光剥蚀信号曲线均十分平滑(图 4),表明微量元素主要以类质同象替代的形式进入黄铁矿晶格,因此,黄铁矿中微量元素的含量主要受热液成矿流体物理化学条件的控制,其变化趋势可能对成矿作用过程中流体性质演化具有良好的指示意义。

黄铁矿中 Co 和 Ni 主要以类质同象替代的形式进入黄铁矿晶格之中,在不同温度条件下,Co、Ni 对黄铁矿中 Fe 的类质同象替代行为差异显著。高温成矿流体中,Co 更容易进入黄铁矿晶格,而 Ni 在高温条件下对黄铁矿的类质同象替代会受限。因此,黄铁矿中 Co、Ni 含量及 Co/Ni 比值对矿床成因及成矿流体条件通常具有良好的指示意义<sup>[15-17]</sup>。前人<sup>[7,17]</sup>研究表明,黄铁矿中 Co 的含量与其结晶温度成正相关关系。一般来说,低温黄铁矿中 Co 的含量基本低于  $100 \times 10^{-6}$ ,中温黄铁矿中 Co 含量介于  $100 \sim 1\,000 \times 10^{-6}$  之间,高温黄铁矿 Co 含量在  $1\,000 \times 10^{-6}$  以上<sup>[18]</sup>。石头墩金矿石样品中黄铁矿 Co 含量均低于  $1\,000 \times 10^{-6}$ ,表明该

区黄铁矿为中低温成矿作用的产物。Cu、Se、Sn等微量元素主要在高温流体中富集,因此,高温流体中结晶的黄铁矿均明显富集这些元素<sup>[7,15-17]</sup>。石头墩金矿段黄铁矿具有极低的Cu、Se含量( $<10 \times 10^{-6}$ ),也进一步表明其结晶温度较低。值得注意的是,相对于第一世代黄铁矿(Co含量 $<10 \times 10^{-6}$ ),第二世代黄铁矿具有更高的Co含量( $7 \times 10^{-6} \sim 1\,000 \times 10^{-6}$ )(图5、表1),表明第二世代黄铁矿的结晶温度要高于第一世代黄铁矿,这与镜下鉴定结果一致(见5.1节)。黄铁矿S/Fe原子数比值也是流体成矿作用研究中常用的示踪性指标,黄铁矿S/Fe原子数比值越高,表明其结晶温度越高<sup>[7,17]</sup>。石头墩金矿石中第二世代黄铁矿S/Fe原子数比值略高于第一世代黄铁矿(表1),也进一步证明了第二世代黄铁矿形成于更高的成矿流体温度条件下,即该区成矿作用过程中,经历了显著的升温事件。

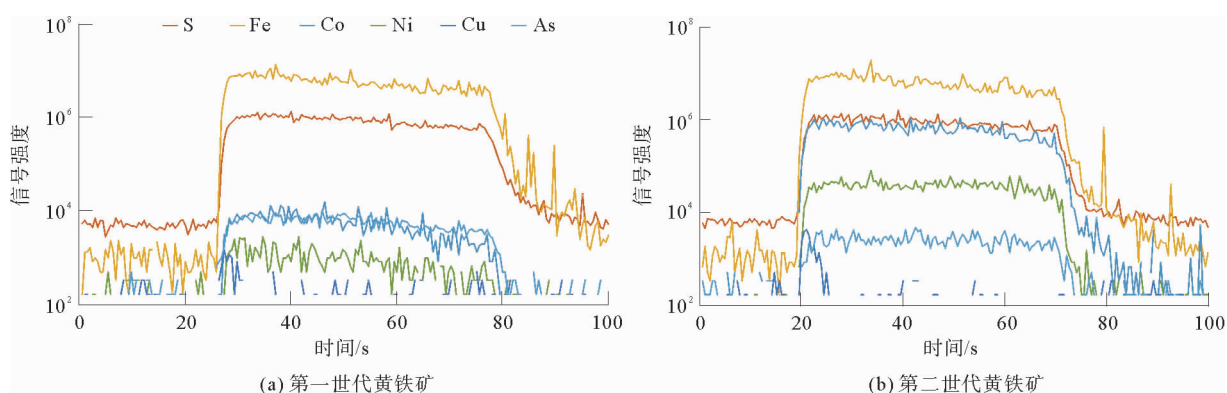


图4 黄铁矿 LA-ICP-MS 分析信号图

Fig. 4 Signal intensity analysis of LA-ICP-MS

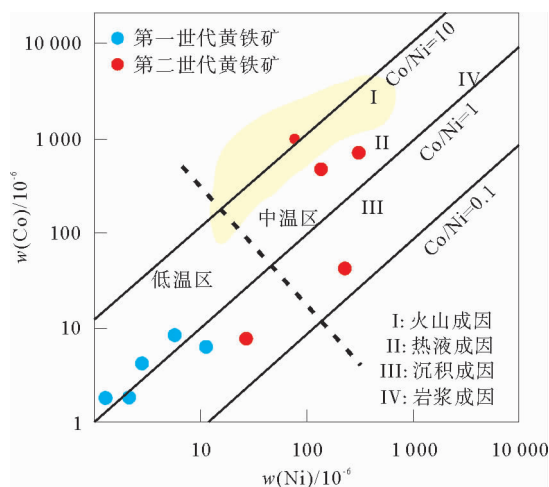


图5 石头墩金矿床黄铁矿 Co-Ni 分布图  
(据文献[18]修改)

Fig. 5 Co-Ni distribution diagram for pyrite in Shitoudun gold deposit (after [18])

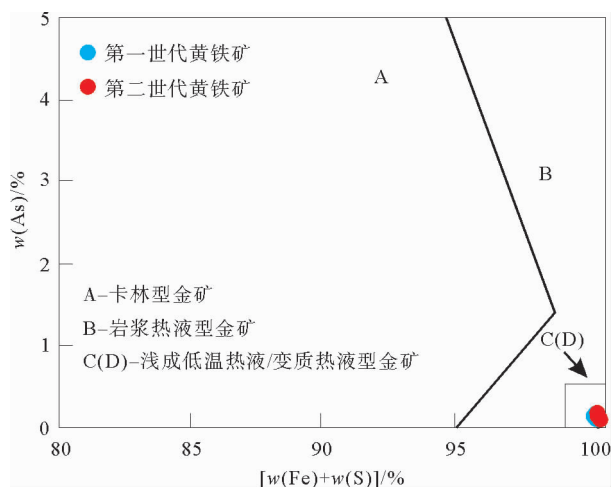


图6 石头墩金矿床黄铁矿 (Fe+S)-As 判别图  
(据文献[1]修改)

Fig. 6 (Fe+S)-As discrimination diagram for pyrite in Shitoudun gold deposit (after [1])

前人研究表明,新太古代泰山岩群雁翎关组是石头墩金矿床中金的主要矿源层,并受到了中生代燕山晚期岩浆活动及区域韧性剪切作用的影响,促进了基底岩石中金的活化和迁移<sup>[4]</sup>,但是矿床的类型及具体成因尚不明确。大量典型矿床中黄铁矿的Co/Ni比值研究表明,不同成因矿床中黄铁矿Co/Ni比值具有显著差异,可作为矿床成因的有效示踪性指标<sup>[19-20]</sup>。在Co-Ni判别图中(图5),石头墩金矿黄铁矿样品主要投点在

热液成因矿床范围内,表明该矿床属于热液成因型金矿,具体成矿流体性质为浅成低温热液流体或变质热液流体。

为了明确热液流体的性质,将该区黄铁矿进行了(Fe+S)-As 和 Co-Ni-As 投图判别。在黄铁矿(Fe+S)-As 判别图中(图 6),石头墩金矿床样品全部投点在浅成低温热液/变质热液型金矿床范围内,表明其成矿流体为浅成低温热液流体或变质热液流体。而在黄铁矿 Co-Ni-As 判别图中(图 7),大部分研究数据落在浅成低温热液和岩浆热液型金矿床区域,仅有一个数据点落在变质热液型金矿床范围内。因此,通过黄铁矿(Fe+S)-As 和 Co-Ni-As 判别图投点分析,认为石头墩金矿符合浅成低温热液型金矿床的特征。前人研究表明,不同成因矿床中黄铁矿的  $\delta S$  和  $\delta Fe$  值存在显著差异,是判断矿床成因及成矿流体来源的有效示踪性指标。在黄铁矿  $\delta S$ - $\delta Fe$  判别图中(图 8),石头墩金矿床黄铁矿主要投点在浅成低温热液型金矿床范围内,进一步证明了石头墩金矿成矿流体为浅成低温热液流体。

因此,石头墩金矿床为浅成低温热液型金矿床,在成矿作用过程中,发生了显著的升温事件,成矿流体为与次火山紧密相关的浅成低温热液流体,结合研究区区域地质背景,认为中生代燕山晚期的岩浆活动可能是该区金矿床成矿流体的主要来源之一。

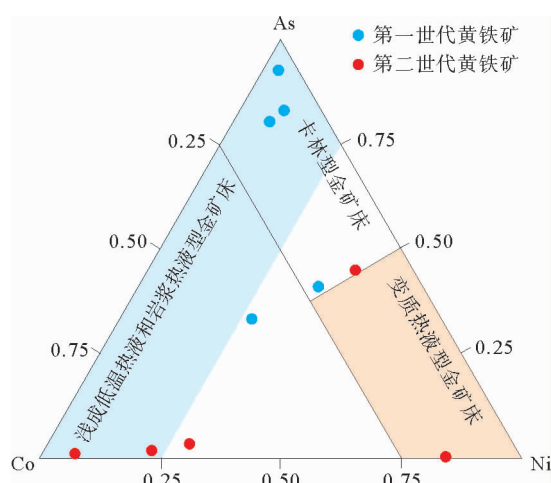


图 7 石头墩金矿床黄铁矿 Co-Ni-As 判别图<sup>[1]</sup>

Fig. 7 Co-Ni-As discrimination diagram for pyrite in Shitoudun gold deposit

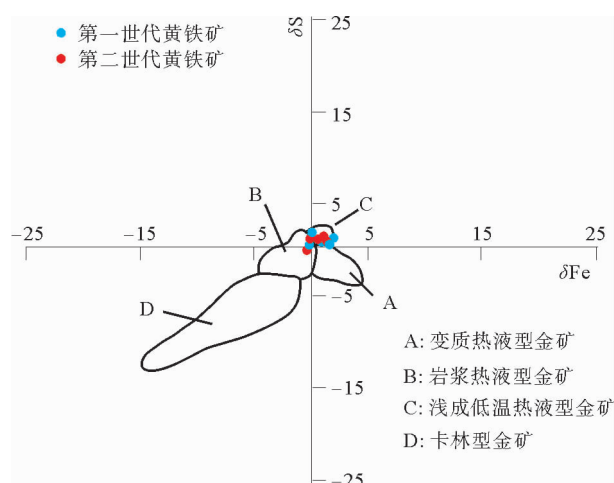


图 8 石头墩金矿床黄铁矿  $\delta S$ - $\delta Fe$  判别图<sup>[1]</sup>

Fig. 8  $\delta S$ - $\delta Fe$  discrimination diagram for pyrite in Shitoudun gold deposit

### 5.3 石头墩金矿床成矿作用模式

本研究通过矿物学观察及黄铁矿微区元素组成分析,综合前人研究成果,提出石头墩金矿成矿作用模式。石头墩金矿为浅成低温热液型金矿床,成矿流体为中生代燕山晚期岩浆活动形成的浅成低温热液流体。成矿流体形成之后,与泰山群基底岩石发生一系列反应,从中萃取部分成矿物质。区域韧性剪切作用形成的正断层及走滑断层为成矿流体运移提供了良好的通道及成矿条件,使得该区金矿主要沿区内 NE 向断层分布(图 9)。石头墩金矿成矿作用过程中经历了多期的热液叠加成矿:第一期次成矿期热液流体温度较低,以粗粒它形低温黄铁矿的结晶为主要特征;第二期次成矿流体温度明显升高,该阶段形成的黄铁矿主要以自形立方体结构产出,并有少量辉钼矿共生,高温流体部分交代了先期结晶的黄铁矿,导致第一世代黄铁矿出现显著的溶蚀现象。热液成矿作用晚期,该区发生明显的硅化作用,石英大量结晶,并形成石英脉穿切于矿石之中。石头墩金矿区复杂的地质构造背景及成矿作用过程促进了基底岩石中金的活化及迁移,是该区金矿发育的重要原因。

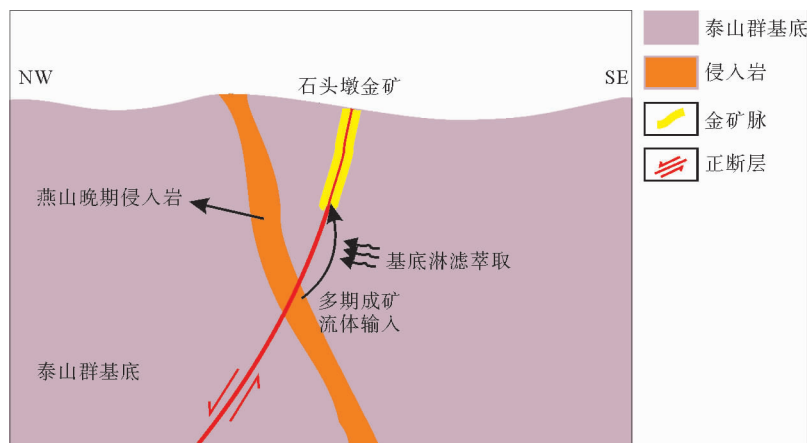


图9 石头墩金矿成矿模式图

Fig. 9 Mineralization model of the Shitoudun gold deposit

## 6 结论

1) 石头墩金矿黄铁矿微区元素主要由 S、Fe 组成, Cu、Se 等元素含量较低, 而 Co、Ni 含量相对较高。与第一世代黄铁矿相比, 第二世代黄铁矿具有更高的 Co 含量及 S/Fe 原子数比值, 表明其结晶于较高的流体温度条件。

2) 样品中矿物共生组合关系表明, 石头墩金矿成矿作用过程发生了多期的热液叠加成矿, 各阶段热液流体物理化学条件存在显著差异, 流体温度经历了低温—高温—低温的演化。

3) 综合黄铁矿(Fe+S)-As、Co-Ni-As 及  $\delta S-\delta Fe$  判别图可知, 石头墩金矿为浅成低温热液型金矿, 其成矿流体主要来源于燕山后期岩浆作用形成的浅成低温热液流体, 部分成矿物质来源于变质岩基底。

4) 石头墩矿段复杂的地质构造背景及成矿作用过程为金的活化、迁移、富集成矿提供了有利条件。

## 参考文献:

- [1] 李洪梁, 李光明. 不同类型热液金矿床主成矿期黄铁矿成分标型特征[J]. 地学前缘, 2019, 26(3): 202-210.  
LI Hongliang, LI Guangming. Compositional characteristics of pyrite ore formed in the main metallogenic period of various types of hydrothermal gold deposits[J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(3): 202-210.
- [2] LARGE R, DANYUSHEVSKY L V, HOLLIT C, et al. 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, 2009, 104(5): 635-668.
- [3] 毛光周, 孟令强, 刘晓通, 等. 沂沭断裂带中段南小尧金矿地球化学特征及矿床成因探讨[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2019, 38(3): 1-13.  
MAO Guangzhou, MENG Lingqiang, LIU Xiaotong, et al. Geochemical characteristics and ore genesis of Nanxiaoyao gold deposit in central Yishu fault zone, Shandong province[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Sciences), 2019, 38(3): 1-13.
- [4] 李振峰, 王自具. 汶上县兴化寺金矿地质特征[J]. 山东地质, 2001, 17(3/4): 65-68.  
LI Zhenfeng, WANG Ziju. Geological characteristics and origin study on Xinghuasi gold deposit in Wenshang County[J]. Shandong Geology, 2001, 17(3/4): 65-68.
- [5] LAI Z Q, ZHAO G T, HAN Z Z, et al. The magma plumbing system in the Mariana trough back-arc basin at 18°N[J]. Journal of Marine Systems, 2018, 180: 132-139.
- [6] ZONG K Q, KLEMD R, YUAN Y, et al. The assembly of Rodinia: The correlation of early Neoproterozoic (ca. 900 Ma) high-grade metamorphism and continental arc formation in the southern Beishan Orogen, southern Central Asian Orogenic Belt (CAOB)[J]. Precambrian Research, 2017, 290: 32-48.
- [7] ZHANG X, ZHAI S K, YU Z H, et al. Mineralogy and geological significance of hydrothermal deposits from the Okinawa Trough[J]. Journal of Marine Systems, 2018, 180: 124-131.



- [8]CAI Y J,ZHOU M.Crystalomorphological characteristics of pyrite in hydrothermal gold deposit;An experimental study[J]. Science in China(Series B),1994,37(1):117-129.
- [9]KEITH M,HÄCKEL F,HAASE K M,et al.Trace element systematics of pyrite from submarine hydrothermal vents[J]. Ore Geology Reviews,2016,72:728-745.
- [10]MENG X W,LI X H,CHU F Y,et al.Trace element and sulfur isotope compositions for pyrite across the mineralization zones of a sulfide chimney from the East Pacific Rise (1-2°S)[J/OL].Ore Geology Reviews,2020,116.DOI:10.1016/j.ore-georev.2019.103209.
- [11]MASLENNIKOV V V,MASLENNIKOVA S P,LARGE R R,et al.Study of trace element zonation in vent chimneys from the Silurian Yaman-Kasy volcanic-hosted massive sulfide deposit(Southern Urals,Russia) using laser ablation-inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICPMS)[J].Economic Geology,2009,104(8):1111-1141.
- [12]CIOBANU C L,COOK N J,UTSUNOMIYA S,et al.Gold-telluride nanoparticles revealed in arsenic-free pyrite[J].American Mineralogist,2012,97(8/9):1515-1518.
- [13]REICH M,DEDITIUS A,CHRYSSOULIS S,et al.Pyrite as a record of hydrothermal fluid evolution in a porphyry copper system;A SIMS/EMPA trace element study[J].Geochimica et Cosmochimica Acta,2013,104(1):42-62.
- [14]HU X K,TANG L,ZHANG S T,et al.In situ trace element and sulfur isotope of pyrite constrain ore genesis in the Shapoling molybdenum deposit,East Qinling Orogen,China[J].Ore Geology Reviews,2019,105:123-136.
- [15]FEININGER T.An introduction to the rock forming minerals(3rd edition)[J].The Canadian Mineralogist,2013,51(4): 663-664.
- [16]CRAIG J R,VOKES F M,SOLBERG T N.Pyrite:Physical and chemical textures[J].Mineralium Deposita,1998,34(1): 82-101.
- [17]王叶剑,韩喜球,金翔龙,等.中印度洋脊 Edmond 热液区黄铁矿的标型特征及其对海底成矿作用环境的指示[J].矿物学报,2011,31(2):173-179.  
WANG Yejian,HAN Xiqiu,JIN Xianglong,et al.Typomorphic characteristics of pyrite and its metallogenic environment of Edmond hydrothermal field,Central Indian Ridge[J].Acta Mineralogica Sinica,2011,31(2):173-179.
- [18]梅建明.浙江遂昌冶岭头金矿床黄铁矿的化学成分标型研究[J].现代地质,2000,14(1):51-55.  
MEI Jianming.Chemical typomorphic characteristics of pyrites from Zhilington gold deposit,Suichang,Zhejiang[J].Geoscience,2000,14(1):51-55.
- [19]BRILL B A.Trace-element contents and partitioning of elements in ore minerals from the CSA Cu-Pb-Zn deposit,Australia, and implications for ore genesis[J].The Canadian Mineralogist,1989,27(2):263-274.
- [20]孟庆强,金之钧,孙冬胜,等.高含量氢气赋存的地质背景及勘探前景[J].石油实验地质,2020,43(2):208-216.  
MENG Qingqiang,JIN Zhijun,SUN Dongsheng,et al.Geological background and exploration prospects for the occurrence of high-content hydrogen[J].Petroleum Geology & Experiment,2020,43(2):208-216.

(责任编辑:高丽华)