

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.06.010

# 胶东蓬莱黑岚沟金矿床黄铁矿微区地球化学特征及对成矿流体的启示

李秀章<sup>1</sup>, 王勇军<sup>2,3\*</sup>, 李衣鑫<sup>4</sup>, 付乐兵<sup>2</sup>, 张铭<sup>2</sup>, 吴兴宇<sup>5</sup>, 赵岩岩<sup>2</sup>, 黄鑫<sup>2,3</sup>, 徐昌<sup>3</sup>, 孔凡顺<sup>3</sup>  
LI Xiuzhang<sup>1</sup>, WANG Yongjun<sup>2,3\*</sup>, LI Yixin<sup>4</sup>, FU Lebing<sup>2</sup>, ZHANG Ming<sup>2</sup>, WU Xingyu<sup>5</sup>,  
ZHAO Yanyan<sup>2</sup>, HUANG Xin<sup>2,3</sup>, XU Chang<sup>3</sup>, KONG Fanshun<sup>3</sup>

1. 山东省地质调查院, 山东 济南 250013;

2. 中国地质大学资源学院, 湖北 武汉 430074;

3. 山东省煤田地质规划勘察研究院, 山东 济南 250104;

4. 桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林 541004;

5. 山东省煤田地质局物探测量队, 山东 济南 250104

1. Shandong Institute of Geological Survey, Ji'nan 250013, Shandong, China;

2. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China;

3. Shandong Coalfield Geological Planning Investigation Institute, Ji'nan 250104, Shandong, China;

4. College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China;

5. Geophysical Prospecting and Surveying Team of Shandong Bureau of Coal Geology, Ji'nan 250104, Shandong, China

**摘要:**胶东地区是中国最大的金矿集区, 金矿成因类型一直存在较大争议。黑岚沟金矿床是胶东蓬莱地区最大的金矿床, 曾以产出“明金”而闻名胶东。采用 LA-ICP-MS 方法分析黑岚沟金矿各成矿阶段黄铁矿中微量元素的组成、变化趋势及相关性, 探讨了 Au 的富集沉淀过程。通过野外地质调查, 结合矿相学和背散射图像观察, 将主成矿阶段(S1~S3)的黄铁矿(Py1~Py3)进一步划分为 6 个亚类; 通过微量元素分析发现, 研究区黄铁矿 As 含量高, 为富砷黄铁矿, 从早到晚, 黄铁矿中 Cu、As、Ag、Au、Zn、Co、Ni、Pb、Sb、Bi 等微量元素变化趋势不一致, As 与 Au 在各阶段均呈现极强的正相关性, Cu-Zn、Ag-Sb 等多对元素具有高的正相关性, Pb 与 Bi 在 Py1-1、Py2-1 和 Py2-2 三个黄铁矿亚类中也具有较高的正相关性, 大部分黄铁矿亚类中 Co 与 Ni 存在正相关关系, Co/Ni 元素含量比值为 1.1~3.3, 说明黄铁矿主要为岩浆热液成因。黑岚沟金矿成矿流体是富 Au-As 流体, S1 阶段与 S3 阶段微量元素相对富集, 说明成矿流体活动时间较长, 具有脉动式活动的特点, 金由多次活动的富 Au-As 流体多次沉淀成矿。

**关键词:**富砷黄铁矿; LA-ICP-MS; 微量元素; 地球化学; 黑岚沟金矿床; 胶东

**中图分类号:** P618.51; P578.2<sup>+</sup>92 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2022)06-1023-16

Li X Z, Wang Y J, Li Y X, Fu L B, Zhang M, Wu X Y, Zhao Y Y, Huang X, Xu C, Kong F S. Micro-geochemical characteristic of pyrites in the Heilangou gold deposit of penglai area and its implications for ore-forming fluid, Jiaodong gold province. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(6): 1023-1038

**Abstract:** In China, the largest gold concentration area is Jiaodong, in which the genetic type of gold deposits has always been

收稿日期: 2021-02-08; 修订日期: 2021-06-11

资助项目: 山东省地勘基金项目《莱州—招远地区构造岩相体系演化与成矿规律研究》(编号: 鲁勘字(2012)04号)、山东省自然科学基金项目《胶东栖霞-蓬莱成矿带典型金矿床成矿机制: 矿物微区地球化学制约》(编号: ZR2020MD031)、山东省地勘基金项目《山东省栖霞-蓬莱成矿带黑岚沟-大柳行金矿田深部成矿预测》(编号: 鲁勘字(2018)15号)、中国地质调查局项目《山东 1:5 万大辛店幅、岗嵛幅、臧家庄幅、高疃幅矿产地质调查》(编号: DD20160044-1)和山东省自然科学基金项目《沂沭断裂带全新世断层活动特征及其构造意义》(编号: ZR2020MD039)

作者简介: 李秀章(1969-), 男, 研究员, 从事地质调查与矿产勘查研究工作。E-mail: Lixiuzhang4117@126.com

\* 通信作者: 王勇军(1981-), 男, 正高级工程师, 从事地质调查与矿产勘查研究工作。E-mail: 53557878@qq.com

controversial. Heilangou gold deposit is the largest one in Penglai area of Jiaodong and was well-known for producing gold nugget. In this paper, LA-ICP-MS was used to analyze the composition, variation trend and correlation of trace elements in pyrite of Heilangou gold deposit, and to discuss the formation of Au. Through field investigation, combined with mineralogy and backscatter electron image (BSE), the pyrite (Py1~Py3) in the main metallogenic stage (S1~S3) is divided into six subtypes. Through trace element analysis, it is found that the change trends of Cu, As, Ag, Au, Zn, Co, Ni, Pb, Sb and Bi are inconsistent from early to later stage. As and Au show strong positive correlation in every pyrite subtype, Cu-Zn, Ag-Sb and several other element pairs have high correlation, Pb-Bi has an upper correlation especially in three subtypes of Py1-1, Py2-1 and Py2-2, and also Co-Ni in most pyrite subtypes. The Co/Ni ratio is mainly in the range of 1.1 ~ 3.3, which indicates that the pyrite is mainly of magmatic hydrothermal origin. The ore-forming fluid of Heilangou gold deposit is rich in Au-As, and the trace elements are relatively enriched in S1 and S3 stages, which indicates that the ore-forming fluid activity lasts for a relatively long time and has the pulsating characteristics. Gold is precipitated by the fluid rich in Au-As for multiple activities and several times.

**Key words:** As-rich pyrite; LA-ICP-MS; trace element; Heilangou gold deposit; Jiaodong

胶东地区位于华北克拉通东南缘,是中国最大的金矿集区,也是世界第三大金矿集中区<sup>[1]</sup>。区内金矿床主要分布在胶西北、牟乳(牟平—乳山)和栖霞福(栖霞—蓬莱—福山)3个成矿区,前人对前2个成矿区金矿床成因研究程度较高,而对栖霞福成矿区的相关研究略显弱<sup>[2-4]</sup>。

关于胶东地区金矿床的成因类型认识一直处于不断发展中,目前仍然存在较大争议。早期研究者认为,太古宙—元古宙绿岩带是金的矿源层,胶东地区金矿床接近绿岩带型金矿床<sup>[5]</sup>;也有学者认为,金成矿与中生代花岗质岩浆活动有关,将胶东地区金矿床归为岩浆热液型、混合岩化岩浆热液型或岩浆期后热液型矿床<sup>[6-9]</sup>。近年来,较多学者认为,胶东乃至华北地区的金成矿作用应该与华北克拉通的破坏密切相关。朱日祥等<sup>[10]</sup>提出华北金矿床属于克拉通破坏型金矿床,认为在早白垩世华北克拉通破坏强烈伸展构造背景下,岩石圈地幔部分熔融的产物与其他复杂熔/流体或地壳相互作用造成金元素短期巨量聚集成矿,构造体制转变是其动力学基础。另一些学者则认为,古太平洋 Izanagi 俯冲板片的回转作用可能是引起区域前寒武纪变质基底岩石中成矿物质大规模活化再造的主要驱动机制,成矿流体主体来源于俯冲板片变质脱水,金可能来源于失速俯冲板片和洋壳沉积物的脱挥发分作用,胶东地区金矿床属于(板片脱挥发分)造山型金矿床<sup>[11-18]</sup>,还有部分学者强调胶东地区金矿床是与岩浆热液有关的中低温脉状金矿床,提出了胶东型金矿床<sup>[19-20]</sup>。主流观点“克拉通破坏型”和“(板片脱挥发分)造山型”模式争论的焦点之一是含金流体的相关问题。因此,成矿流体演化研究对

确定胶东地区金矿床成因类型具有重要的理论意义。

黄铁矿是胶东地区金矿床中金的主要载体,与金关系最密切。前人研究表明,黄铁矿的微量元素特征因金矿床类型不同而存在明显的差异,对黄铁矿微量元素开展研究,可以间接示踪金的来源,反映成矿作用过程,对判定矿床成因类型有重要的指示作用<sup>[21-26]</sup>。本文选取胶东栖霞福地区开采历史最悠久且盛产明金的黑岚沟金矿为研究对象,在详细划分金矿成矿阶段的基础上进一步细分含金黄铁矿亚类/世代,讨论黄铁矿原位微区微量元素含量特征、相关性等不同成矿阶段微量元素的变化趋势,以及含金流体性质、演化及金的富集沉淀过程,为确定矿床成因类型提供基础依据。

## 1 区域地质背景

华北克拉通是世界最古老的克拉通之一,主要由太古宙—古元古代变质基底和上覆中元古代—新生代盖层组成。显生宙以来,华北克拉通不断遭受周围板片的俯冲和碰撞作用。在中—晚侏罗世之交,由于西太平洋 Izanagi 板块向东亚大陆之下的高速斜向俯冲<sup>[27]</sup>,经历了区域性压扭过程的华北克拉通东部一方面形成了 NNE 走向的郯庐左行平移断裂带<sup>[28-31]</sup>,另一方面形成了一系列平行的左行平移断裂,标志着华北克拉通东部大地构造演化开始受控于西太平洋板块活动<sup>[28, 31]</sup>。早白垩世,华北克拉通东部的胶东地区进入破坏峰期,广泛发育岩浆活动、构造变形和金成矿作用<sup>[32-33]</sup>。

胶东金矿集区由北部的胶北隆起区和南部的苏鲁超高压造山带组成,两者以五莲—荣成断裂为



界。栖霞福地区是胶东3个主要金矿成矿区之一,位于胶北隆起区中北部,主要由前寒武纪变质基底、中生代岩浆岩、白垩纪火山-沉积岩系等组成, NNE 向断裂构造十分发育,成矿地质条件优越(图1)。前寒武纪变质基底主要包括太古宙花岗绿岩带(TTG 岩系)和古元古代粉子山群、荆山群的高级变质岩<sup>[1]</sup>。中生代岩浆岩主要包括晚侏罗世(165~150 Ma)玲珑型二长花岗岩、早白垩世(132~123 Ma)郭家岭型花岗岩、早白垩世(118~111 Ma)伟德山型花岗岩,以及以煌斑岩和闪长玢岩为主的各类脉岩。白垩纪火山-沉积岩系主要分布在臧家庄地区,构成臧家庄中生代盆地的主体。西林断裂(F4)是区内重要的大型断裂,控制了臧家庄盆地的北边界。臧家庄盆地将栖霞福成矿区分割为南北两部分,北部为蓬莱大柳行地区,发育了以黑岚沟、大柳行等大型金矿为代表的数十处金矿床,南部为栖霞盘子涧—马家窑地区,主要发育以马家窑金矿为代表的众多石英脉型金矿床,盆地内部及周缘则主

要发育斑岩-矽卡岩型多金属矿床(如香乔中型铅锌矿床、邢家山大型钨钼矿床等)<sup>[34]</sup>。

## 2 矿床地质

黑岚沟金矿床位于栖霞福成矿区中北部(图1),以出产“明金”而闻名胶东。矿床内绝大多数金矿体均受 NNE 向断裂控制。主要的 NNE 向控矿断裂为觅鹿乔-韩家山断裂和曲家庵口-毛沟断裂,以及与主断裂基本同向的大量次级断裂,断裂总体走向20°~30°,多数倾向SE,倾角40°~85°,多由绢英岩化花岗质碎裂岩、绢英质碎斑岩和碎裂岩组成,规模不一;NW 向齐家沟断裂为破矿断裂,呈左行张扭性,切割了几乎所有 NNE 向断裂、矿脉和岩脉,据矿山技术人员介绍,该断裂错开黑岚沟金矿VI号蚀变破碎带的距离最大可达60 m。区内侵入岩主要为中生代燕山期郭家岭序列罗家单元斑状中细粒含黑云二长花岗岩,呈岩基状产出(图2)。

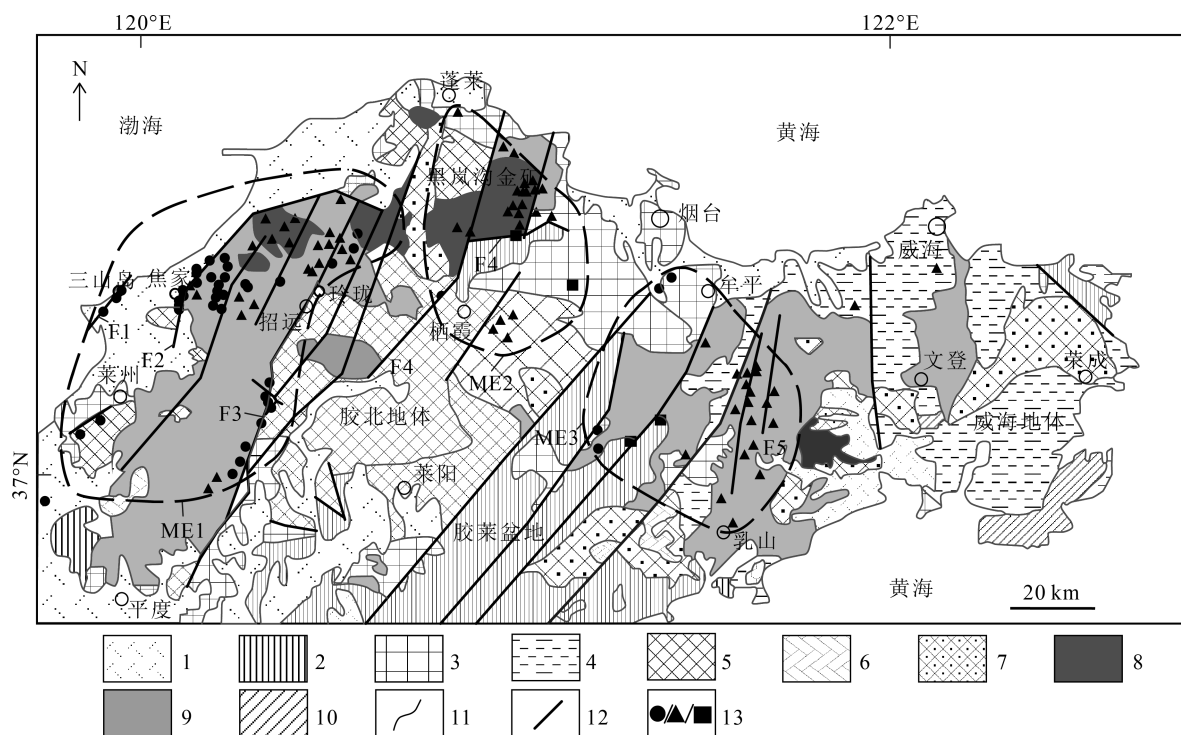


图1 胶东半岛区域地质和金矿分布简图(据参考文献[1]修改)

Fig. 1 Regional geological map and distribution of gold deposits in Jiaodong Peninsula

1—第四系;2—白垩系;3—古元古界和新元古界;4—含榴辉岩的新元古代花岗质片麻岩;5—太古宙花岗-绿岩带;6—白垩纪崂山型花岗岩;7—白垩纪伟德山型花岗岩;8—白垩纪郭家岭型花岗岩;9—侏罗纪花岗岩类;10—三叠纪花岗岩类;11—地质界线;12—断层;13—蚀变岩型和网脉型金矿,石英脉型和硫化物石英脉型金矿,以及蚀变角砾岩型、蚀变砾岩型和层间滑脱拆离带型金矿;F1—三山岛断裂;F2—焦家断裂;F3—招平断裂;F4—西林断裂;F5—金牛山断裂;ME1—胶西北成矿区;ME2—栖霞福成矿区;ME3—牟乳成矿区

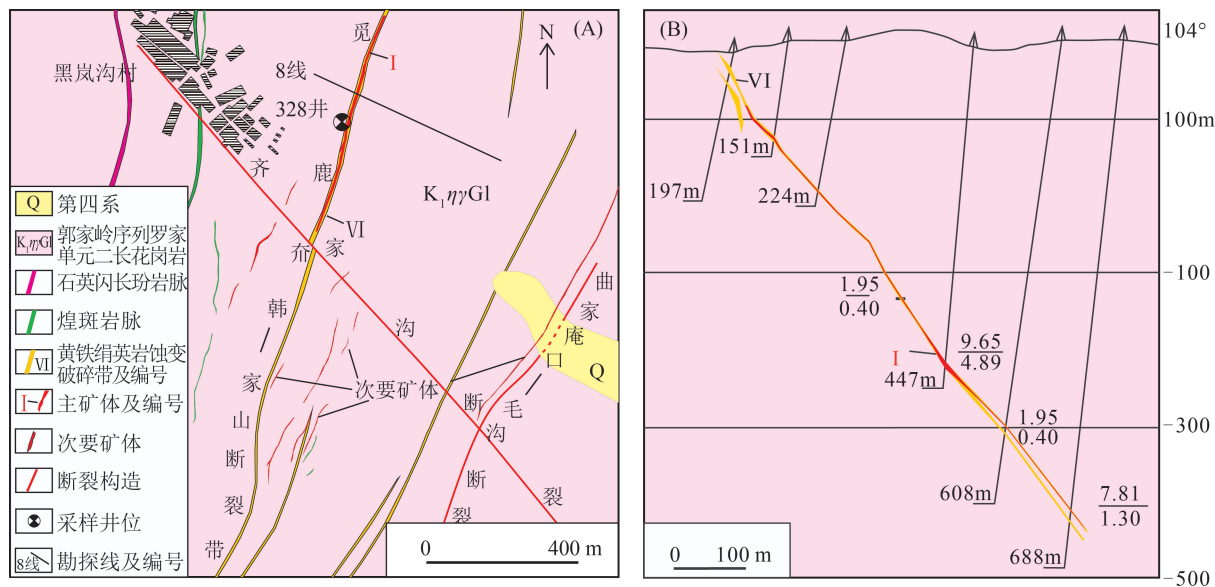


图2 黑岚沟金矿床地质简图(A)及典型剖面图(B)

Fig. 2 Simplified geological map(A) of part of Heilangou gold deposit and section map of profile 8(B)

## 2.1 矿体特征

矿床内累计查明矿体数十个,其中I号矿体为主矿体,占金资源储量的一半以上(图2),矿体呈脉状赋存于VI号黄铁绢英岩蚀变破碎带内,产状与蚀变带基本一致,平均走向 $10^{\circ}\sim 30^{\circ}$ ,倾向SE,平均倾角约 $60^{\circ}$ 。矿体向SW侧伏,走向最长1320 m(地表出露长度仅700 m),平均品位 $8.67\times 10^{-6}$ 。浅部矿石类型主要为石英脉型,随着深度的增加石英脉明显减少,且蚀变岩中的金品位变高,矿石类型转变为蚀变岩型。

## 2.2 矿石特征

### 2.2.1 矿石结构、构造

矿石结构类型主要有自形晶结构、半自形—他形结构、压碎结构、交代溶蚀结构、包含结构、填隙结构、乳滴状结构等(图版I),矿石构造类型有细脉浸染状构造、斑杂状构造、致密块状构造等(图版II)。

### 2.2.2 矿物组成

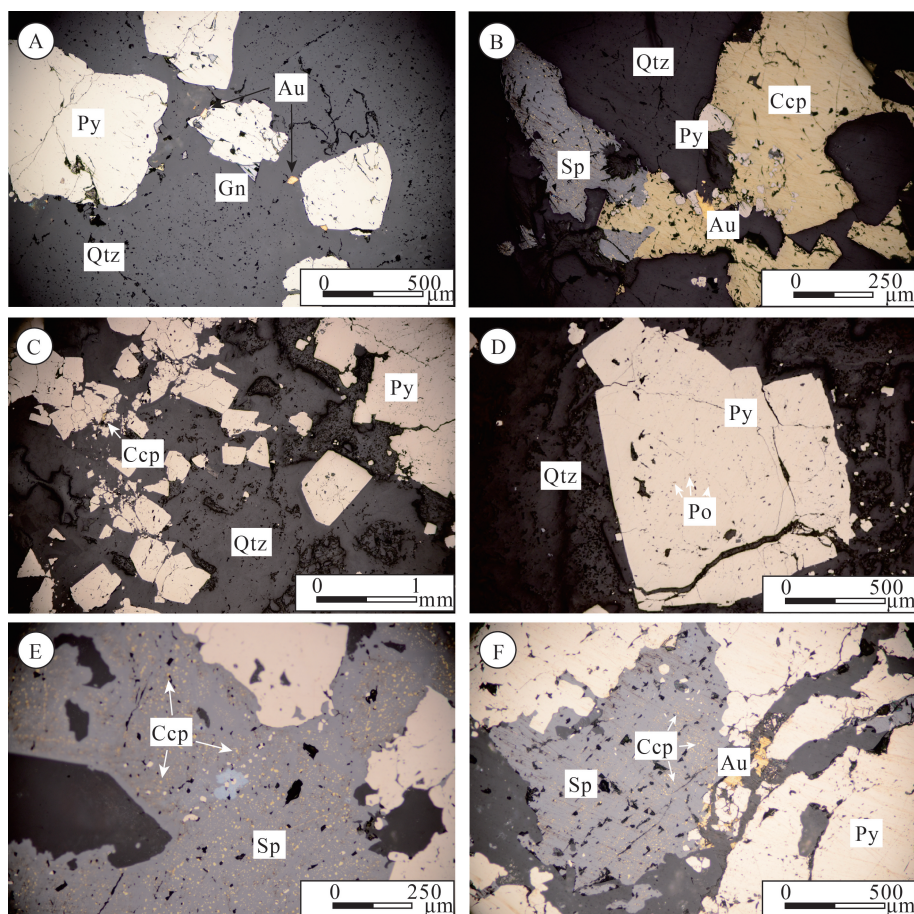
矿石由金属矿物和非金属矿物两大部分组成。金属矿物以金属硫化物类矿物为主,主要为黄铁矿,其次为闪锌矿、黄铜矿、方铅矿等。

黄铁矿为矿石中的主要金属矿物,占金属矿物的90%以上。肉眼见呈团块状或因与细脉状石英共生而呈细脉状;镜下反射色呈淡黄色,自形—半

自形,粒径 $10\sim 1000\ \mu\text{m}$ ,多呈点状、稀疏浸染状、脉状、团块状分布(图版I-D、图版II)。闪锌矿镜下反射色为灰色,呈他形粒状集合体,粒径 $10\sim 1000\ \mu\text{m}$ ,多与黄铁矿、方铅矿呈共生边结构,其中包裹有乳滴状黄铜矿(图版I-E、F)。黄铜矿含量较少,反射色为浅金黄色或黄铜色,约占金属矿物的2%,呈不规则粒状或他形粒状与方铅矿、黄铁矿共生,产于石英裂隙或黄铁矿裂隙中(图版I-B、C、E、F)。自然金多为他形,金黄色,呈脉状、粒状及不规则枝杈状分布于石英脉的裂隙中,常与金属硫化物共生,颗粒较小( $5\sim 200\ \mu\text{m}$ ),分布不均(图版I-A、B、F,图版III-A~C)。银金矿是金矿物的主要类型,反射色为金黄色,亮度比自然金低,主要为裂隙金,次为晶隙金,少量银金矿被金属硫化物所包裹,形成包体金,呈不规则粒状、枝杈状、脉状分布于石英裂隙中或与黄铁矿、闪锌矿等共生(图版III-D、F、H)。方铅矿(图版II-E、F)、磁黄铁矿(图版I-D)等矿物在矿石中含量少,一般不超过1%。

非金属矿物主要有石英、钾长石、绢云母、方解石等,扫描电镜下可以观察到黄铁矿中还含有少量白云石和极少量独居石等非金属矿物。石英为矿石中的主要非金属矿物,主要表现为3种形式:一种为残晶石英,为早期花岗岩中的石英重结晶而成或经构造作用而呈棱角状、碎裂状等(图3-A);第二

图版 I Plate I



A、B.主要为黄铁矿-石英阶段(S1)及石英-黄铁矿阶段(S2)矿物特征,见半自形—他形黄铁矿、方铅矿、黄铜矿、闪锌矿等金属矿物,交代溶蚀结构、包含结构、填隙结构等;C、D.主要为石英-黄铁矿阶段(S2)矿物特征,见自形晶黄铁矿,压碎结构;E、F.主要为石英-多金属硫化物阶段(S3)矿物特征,见乳滴状黄铜矿,交代溶蚀结构、包含结构、填隙结构等。Py—黄铁矿;Ccp—黄铜矿;Gn—方铅矿;Sp 闪锌矿;Po—磁黄铁矿;Au—金;Qtz—石英

种为热液交代而成的石英,呈细粒状与绢云母共生,是绢英岩化蚀变现象的主体(图 3-B);第三种为呈细脉、网脉状产出的石英,是硅质热液充填的结果(图 3-C)。

根据矿物薄片显微观察,结合能谱数据,金矿物主要为银金矿(Au 60%~85%, Ag 15%~40%)和部分自然金。金的产出部位可大致归为 3 类,分别分布于黄铁矿和闪锌矿内部(图版 III-A~C)、黄铁矿或石英裂隙内部(图版 III-D~F)、其他矿物边缘(图版 III-G~I)等位置。

### 2.3 成矿阶段划分

矿区内沿断裂及两侧发育明显的围岩蚀变现象,主要有钾化、硅化、黄铁矿化、绢云母化等(图版 I)。早期形成的钾化-硅化蚀变,与后期叠加的黄

铁矿化构成重要的找矿标志。根据野外实地调查及样品分析,可将矿床成矿作用进一步划分出 4 个阶段(图版 I、图版 II),前 3 个阶段为主成矿阶段,相应矿物生成顺序见表 1,从早到晚分述如下。

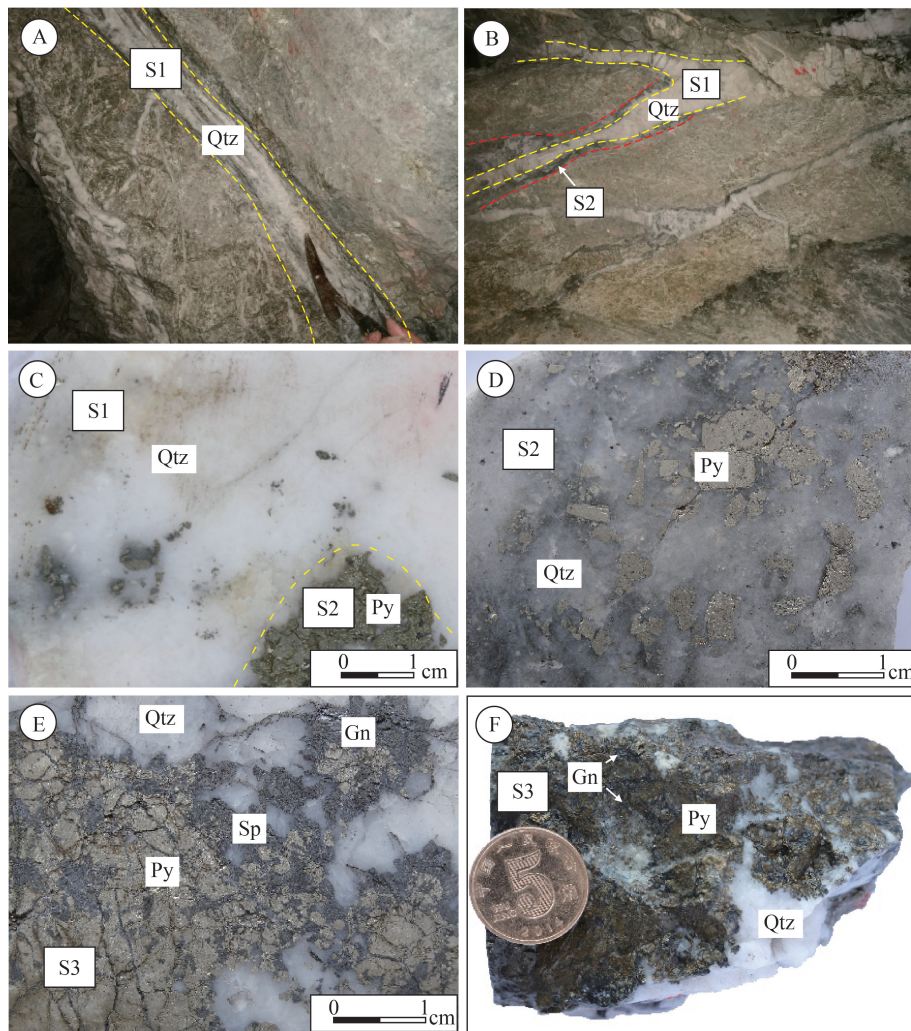
(1)黄铁矿-石英阶段(S1):以乳白色石英脉为主,石英多为两侧向中间生长,石英脉一般宽 3~20 cm,偶见少量星点状他形黄铁矿或细粒浸染状黄铁矿,偶见少量自然金沿着石英的裂隙充填。

(2)石英-黄铁矿阶段(S2):主要发育以黄铁矿为主的烟灰色石英硫化物脉,黄铁矿颗粒普遍较大,呈自形—半自形产出,其他金属硫化物不发育。

(3)石英-多金属硫化物阶段(S3):蚀变矿化强烈,金属硫化物以黄铁矿、闪锌矿、黄铜矿为主。多



图版 II Plate II



A. 含黄铁石英细脉; B. 黄铁矿-石英(S1)、石英-黄铁矿(S2)阶段金矿石; C. 块状含黄铁石英; D. 浸染状矿石; E、F. 石英-多金属硫化物(S3)阶段金矿石。Py—黄铁矿; Sp—闪锌矿; Gn—方铅矿; Qtz—石英

金属硫化物呈细脉状、团块状、浸染状产出, 自然金、银金矿大量形成, 是最主要的成矿阶段。方铅矿(图版 II-E、F)、磁黄铁矿(图版 I-D)等矿物也多在 S3 阶段产出。可见金主要分布在 S3 阶段, 少量在 S1 阶段。

(4) 石英-碳酸盐阶段(S4): 为成矿晚期, 基本无金矿化。低温热液沿构造裂隙充填形成的碳酸盐石英细脉, 穿插于早期形成的蚀变岩石和矿石中。碳酸盐矿物含量较少, 仅在井下部分地段见少量细小方解石脉。

### 3 样品采集及分析方法

在黑岚沟金矿床 328 井的-260 m 中段 11#穿脉和-500 m 中段 17#穿脉, 针对 I 号主矿体共采集

典型矿石及围岩样品 27 件, 在对前 3 个主成矿阶段(S1~S3)单矿物形貌进行详细鉴定的基础上, 开展了背散射(BSE)图像和硫化物原位微区微量元素测试。石英-碳酸盐阶段(S4)黄铁矿含量极低, 未开展微量元素测试。

#### 3.1 背散射图像分析

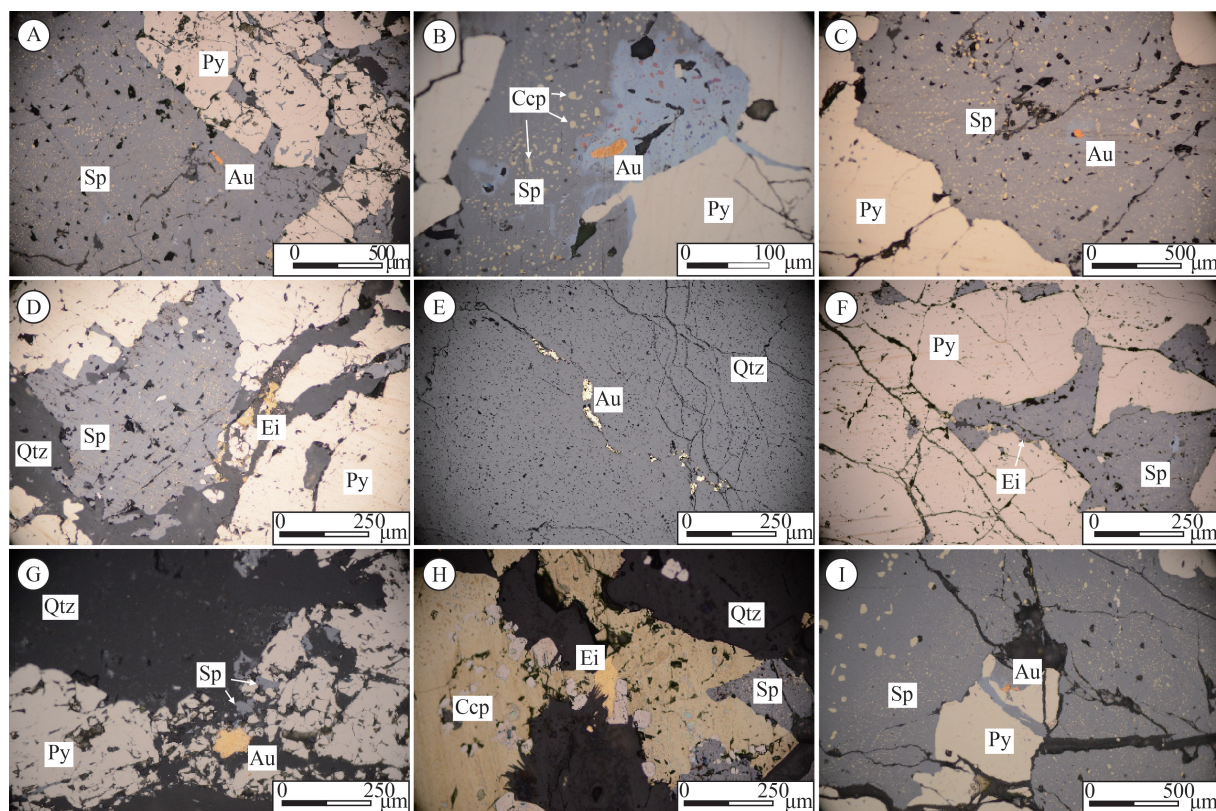
背散射图像分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)完成。为探究黄铁矿等矿物的赋存状态及伴生矿物, 选用配备有 5 道波谱仪的 JEOL JXA-8230 电子探针(日本电子公司)对其进行了研究。测试样品经过了喷碳处理, 加速电压为 15 kV。

#### 3.2 黄铁矿原位微区微量元素测试

黄铁矿原位微区微量元素含量测试在中国科学院



图版 III Plate III



A~C. 闪锌矿内可见的包裹金; D~F. 赋存于裂隙中的可见金; G~I. 沿矿物边界生长的可见金。Py—黄铁矿; Au—金;  
Ccp—黄铜矿; Sp—闪锌矿; Ei—银金矿; Qtz—石英

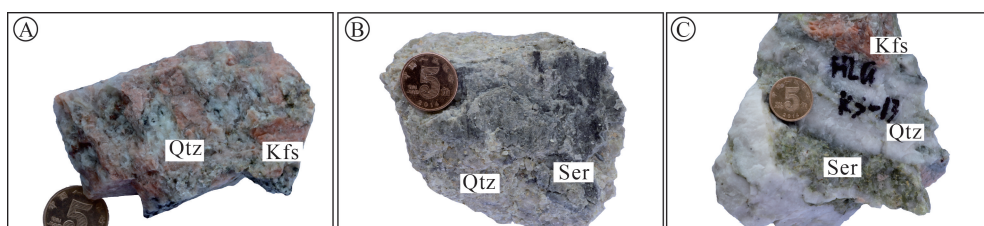


图 3 不同产出部位石英手标本照片

Fig. 3 Photos of hand specimens of quartz in different occurrences

A—残晶石英; B—热液交代石英; C—细脉-网络状石英; Qtz—石英; Kfs—钾长石; Ser—绢云母

广州地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室利用 LA-ICP-MS 完成。实验室采用 NWR193UC 激光剥蚀系统, 该系统由 NWR 193 nm ArF 准分子激光器和光学系统组成, ICP-MS 型号为 iCAP RQ。激光剥蚀过程中采用氦气作载气, 激光剥蚀系统配置有信号平滑装置。本次分析的激光能量、束斑和频率分别为  $5 \text{ J/cm}^2$ ,  $30 \text{ }\mu\text{m}$  和 8 Hz。单矿物微量元素含量处理采用标准物质硫化铁、Cu、Zn 组成的 MASS-1、玻璃标样 NIST610 及 GSE-2G 和  $^{57}\text{Fe}$  ( $\text{Fe} = 466700 \times 10^{-6}$ ) 进行多外标单内

标校正。每个时间分辨分析数据包括约 50 s 空白信号和 40 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及元素含量计算)采用 Iolite 软件完成。

#### 4 黄铁矿亚类划分

矿石中的黄铁矿矿物发育明显的环带特征, 对不同成矿阶段的黄铁矿矿物开展显微观察, 再结合其背散射图像特征, 将黑岚沟金矿床主成矿阶段 (S1~S3) 的黄铁矿 (Py1~Py3) 进一步划分为 6 个亚

表 1 黑岚沟金矿床矿物生成顺序  
Table 1 Mineral paragenetic sequence of Heilangou gold deposit

| 矿物生成顺序 | 热液期      |          |             |          |
|--------|----------|----------|-------------|----------|
|        | 黄铁矿-石英阶段 | 石英-黄铁矿阶段 | 石英-多金属硫化物阶段 | 石英-碳酸盐阶段 |
| 石英     |          |          |             |          |
| 黄铁矿    |          |          |             |          |
| 绢云母    |          |          |             |          |
| 钾长石    |          |          |             |          |
| 自然金    |          |          |             |          |
| 黄铜矿    |          |          |             |          |
| 银金矿    |          |          |             |          |
| 磁黄铁矿   |          |          |             |          |
| 毒砂     |          |          |             |          |
| 方铅矿    |          |          |             |          |
| 闪锌矿    |          |          |             |          |
| 方解石    |          |          |             |          |

类(图 4;表 2)。

黄铁矿-石英阶段的黄铁矿(Py1)产于乳白色石英脉中,主要以小颗粒他形结构产出,在石英脉中总体含量少,多呈群聚状出现。与其他阶段黄铁矿矿物相比,其核边结构不明显。根据背散射图像观察,该阶段黄铁矿矿物可进一步分为 2 个亚类:Py1-1 和 Py1-2。Py1-1 是背散射图像下呈现颜色较亮的黄铁矿,主要分布在他形颗粒的边部;Py1-2 是背散射图像下呈现颜色较暗的黄铁矿,占据了黄铁矿颗粒的大部分(图 4-A、B)。

石英-黄铁矿阶段中的黄铁矿(Py2)产于早期黄铁矿-烟灰色石英脉中,主要以半自形—他形结构产出,中粗粒,大小为 0.5~2 mm,或以大面积聚集的形式产出。除极少量黄铜矿和磁黄铁矿外,其内很少出现其他金属硫化物。该阶段黄铁矿矿物也分为 2 个亚类:Py2-1 和 Py2-2。黄铁矿核部见孔隙结构发育的现象,形成 Py2-1,黄铁矿边部呈现出表面较光滑的现象,则形成 Py2-2(图 4-C~F)。

晚期石英-多金属硫化物阶段的黄铁矿(Py3)则大多以大面积聚集状产出,常伴生有大量闪锌矿和少量黄铜矿、方铅矿。根据镜下观察,该阶段的黄铁矿矿物也可分成表面较光滑、多金属硫化物较少的 Py3-1 亚类,以及表面孔隙结构发育、多金属硫化物包体较多的 Py3-2 亚类(图 4-G、H)。

表 2 黑岚沟金矿床不同亚类黄铁矿结构特征  
Table 2 Structural characteristics of different subtypes of pyrite in Heilangou gold deposit

| 成矿阶段           | 黄铁矿世代 | 形态特征                    | 矿物共生组合       | 背散射图像表现 |
|----------------|-------|-------------------------|--------------|---------|
| 黄铁矿-石英阶段 S1    | Py1-1 | 他形颗粒,多呈聚集产出,常位于黄铁矿颗粒的边部 | 乳白色石英        | 亮色      |
|                | Py1-2 | 他形颗粒,多呈聚集产出,占据了黄铁矿颗粒大部  |              | 暗色      |
| 石英-黄铁矿阶段 S2    | Py2-1 | 位于黄铁矿颗粒核部、孔隙结构发育        | 烟灰色石英        | 成分均一    |
|                | Py2-2 | 位于黄铁矿颗粒边部、表面光滑          |              | 成分均一    |
| 石英-多金属硫化物阶段 S3 | Py3-1 | 表面光滑,多金属硫化物包体较少         | 烟灰色石英、多金属硫化物 | 成分均一    |
|                | Py3-2 | 表面粗糙,含有较多的多金属硫化物包体      |              | 成分均一    |



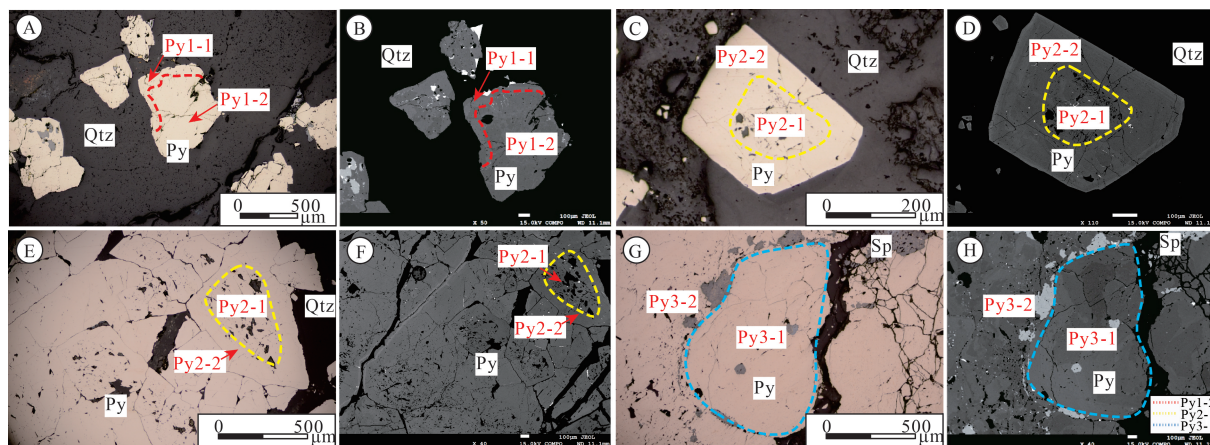


图 4 不同亚类黄铁矿镜下结构及背散射图像特征

Fig. 4 Microscopic structure and backscatter image characteristics of pyrites of different subtypes

A、B—黄铁矿—石英阶段(S1)矿物特征;C~F—石英—黄铁矿阶段(S2)矿物特征;G、H—石英—多金属硫化物阶段(S3)矿物特征;A、C、E及G为镜下特征,B、D、F及H为对应的背散射图像特征;Py—黄铁矿;Sp—闪锌矿;Qtz—石英

## 5 黄铁矿微量元素测试结果

利用 LA-ICP-MS 对黑岚沟金矿床 3 个主成矿阶段(黄铁矿—石英阶段 S1、石英—黄铁矿阶段 S2、石英—多金属硫化物阶段 S3)的黄铁矿(Py1~Py3)进行原位微区微量元素测试。激光剥蚀前,先在高倍镜下挑选合适的黄铁矿颗粒,在黄铁矿颗粒内部选择表面干净且不含微小包体的区域布置实验点位。测试过程中,如出现信号值突然升高的情况,一般是由于触及了黄铁矿内其他矿物的微小包体,在数据处理过程中要尽量排除这些突然升高的信号值,选择相对平坦的信号区域。上述措施保证了本次测试数据的可靠,真实地反映了黄铁矿内微量元素含量的变化(表 3;图 5)。另外,部分元素在黑岚沟金矿床黄铁矿中含量(如 Hg、Mo、Nd 等)低于仪器检出限,不具备代表性,未纳入本次数据解释工作。

## 6 讨论

### 6.1 黄铁矿微量元素特征及相关性

黄铁矿微量元素显示出 Au、As、Cu、Zn、Ag、Pb、Sb、Co、Ni、Bi 等元素的含量较高,其他元素含量较低或普遍低于检出限。对含量较高的 10 种元素进行分析可知,Au-As、Cu-Zn、Ag-Sb、Co-Ni 四对元素在多个黄铁矿亚类中均存在较强的相关性(图 6),尤其 Au-As 元素对。将不同世代黄铁矿中

10 种微量元素做含量箱型图(图 7),可直观地反映出不同亚类黄铁矿中微量元素的变化特征。图中不同亚类的黄铁矿所含各类元素均大于该元素的检出限。

黑岚沟金矿床 Au 在黄铁矿中的赋存形式可以分为 2 种,一种是可见金,在光学显微镜下,可见大量自然金和银金矿主要分布在黄铁矿裂隙中或被黄铁矿等硫化物包裹(图版 III);另一种是不可见金,主要赋存在黄铁矿晶格中或小于 250 nm 的显微金。根据微量元素分析结果(表 3;图 6-A),黄铁矿中 As 元素含量为  $360 \times 10^{-6} \sim 54300 \times 10^{-6}$ ,与胶东其他地区相比<sup>[35-36]</sup>,呈明显富集的现象,本区金矿石中黄铁矿显示富 As 的特征,尤其 Py1 和 Py3 中出现了多个高于  $10000 \times 10^{-6}$ (即 1%)的数值。同时,As 与 Au 元素( $0.06 \times 10^{-6} \sim 92.8 \times 10^{-6}$ )呈现出极强的正相关性。Reich 等<sup>[37]</sup>对热液矿床含砷黄铁矿中 Au-As 相关性的研究表明,As 含量是影响 Au 赋存形式的重要因素,黑岚沟金矿床矿石黄铁矿内 Au 元素含量与 As 元素确实关系密切。不同类型黄铁矿激光剥蚀曲线(图 5)表明,不可见金不单以晶格金的形式赋存在黄铁矿内,同时也以显微包裹金的形式存在。根据 Reich 等<sup>[37]</sup>模拟的 Au-As 饱和曲线投图(图 6-A 中虚线为 Au-As 饱和曲线)发现,Py1-2、Py3-1、Py3-2 三个亚类的数据接近 Au 饱和曲线,除 Py1-1 中个别数据高于饱和曲线外,其余样品数据均落在曲线之下,显示出黄铁矿晶格中金不



表 3 不同亚类黄铁矿原位微区微量元素分析结果  
Table 3 In-situ microanalyses results of different subtypes of pyrites

| 10 <sup>-6</sup> |        |        |       |      |       |      |        |        |         |       |       |        |       |
|------------------|--------|--------|-------|------|-------|------|--------|--------|---------|-------|-------|--------|-------|
| 亚类               | 编号     | Cu     | As    | Ag   | Au    | Zn   | Co     | Ni     | Pb      | Sb    | Bi    | Au/As  | Co/Ni |
| 平均检出限            |        | 0.35   | 2.22  | 0.11 | 0.036 | 1.55 | 0.09   | 0.80   | 0.12    | 0.42  | 0.030 |        |       |
| Py1-1            | HLG-01 | 281.0  | 28500 | 286  | 73.00 | 310  | 12.7   | 5.3    | 25400.0 | 54.0  | 0.360 | 0.0026 | 2.4   |
|                  | HLG-02 | 520.0  | 16500 | 89   | 14.90 | 439  | 0.3    | 4.3    | 3080.0  | 60.0  | 0.031 | 0.0009 | 0.1   |
|                  | HLG-03 | 70.0   | 45700 | 34   | 67.10 | 2.3  | 3.0    | 2.2    | 1900.0  | 4.4   | 0.059 | 0.0015 | 1.4   |
|                  | HLG-04 | 40.9   | 43900 | 35   | 53.40 | 7.3  | 1.6    | 1.5    | 1900.0  | 8.0   | 0.030 | 0.0012 | 1.1   |
|                  | HLG-05 | 72.9   | 54300 | 6.6  | 92.80 | 4.7  | 1.5    | 3.4    | 460.0   | 5.5   | 0.003 | 0.0017 | 0.4   |
| Py1-2            | HLG-06 | 360.0  | 5580  | 48.1 | 6.80  | 1240 | 0.1    | 1.9    | 1330.0  | 28.8  | 0.008 | 0.0012 | 0.1   |
|                  | HLG-07 | 65.5   | 3380  | 13.6 | 2.08  | 58   | 0.5    | 1.3    | 454.0   | 61.5  | 0.001 | 0.0006 | 0.4   |
|                  | HLG-08 | 490.0  | 5930  | 125  | 3.08  | 570  | 0.4    | 1.8    | 1790.0  | 40.6  | 0.003 | 0.0005 | 0.2   |
|                  | HLG-09 | 158.0  | 8500  | 36.2 | 10.10 | 234  | 0.1    | —      | 1330.0  | 32.1  | —     | 0.0012 | —     |
|                  | HLG-10 | 131.0  | 360   | 77   | 1.85  | 1880 | 0.6    | 1.7    | 1300.0  | 29.0  | 0.004 | 0.0051 | 0.4   |
| py2-1            | HLG-11 | 100.0  | 4360  | 4.3  | 2.25  | 6.5  | 699.0  | 365.0  | 200.0   | 8.8   | 0.302 | 0.0005 | 1.9   |
|                  | HLG-12 | 39.0   | 1000  | 5.8  | 0.43  | 9.7  | 1040.0 | 1190.0 | 780.0   | 1.6   | 0.480 | 0.0004 | 0.9   |
|                  | HLG-13 | 11.9   | 2840  | 0.6  | 2.99  | 3.1  | 44.4   | 43.6   | 64.0    | 1.6   | 0.271 | 0.0011 | 1.0   |
| Py2-2            | HLG-14 | 0.7    | 878   | —    | 0.06  | 5.9  | 150.0  | 2.3    | —       | —     | —     | 0.0001 | 65.2  |
|                  | HLG-15 | 0.9    | 1223  | —    | 0.24  | 2.2  | 132.0  | 3.5    | 2.2     | —     | 0.010 | 0.0002 | 37.7  |
|                  | HLG-16 | 2.7    | 1340  | 0.2  | 0.12  | 9.2  | 175.0  | 1.8    | 10.0    | 0.5   | 0.038 | 0.0001 | 97.2  |
|                  | HLG-17 | 25.0   | 9260  | 7.8  | 6.15  | 27   | 1010.0 | 361.0  | 112.0   | 7.9   | 0.199 | 0.0007 | 2.8   |
|                  | HLG-18 | 23.5   | 11900 | 1.2  | 14.10 | 5.4  | 524.0  | 311.0  | 73.0    | 3.8   | 0.034 | 0.0012 | 1.7   |
| Py3-1            | HLG-26 | 1200.0 | 978   | 32.1 | 1.38  | 2310 | 1.0    | 2.1    | 628.0   | 63.0  | —     | 0.0014 | 0.5   |
|                  | HLG-27 | 1000.0 | 1670  | 27.1 | 2.38  | 2700 | 1.5    | 2.1    | 750.0   | 68.0  | 0.006 | 0.0014 | 0.7   |
|                  | HLG-28 | 62.0   | 22000 | 6.7  | 10.2  | 4.5  | 3.4    | 2.0    | 16.1    | 2.4   | —     | 0.0005 | 1.7   |
|                  | HLG-29 | 49.0   | 15800 | 10   | 17.7  | 5.9  | 1.9    | 1.7    | 53.0    | 7.5   | —     | 0.0011 | 1.1   |
|                  | HLG-30 | 940.0  | 800   | 33.4 | 0.96  | 1010 | —      | 2.4    | 508.0   | 54.3  | —     | 0.0012 | —     |
|                  | HLG-31 | 453.0  | 1890  | 24   | 2.22  | 1350 | —      | 1.4    | 754.0   | 54.8  | —     | 0.0012 | —     |
| Py3-2            | HLG-32 | 950.0  | 5700  | 490  | 7.10  | 1080 | 6.3    | 1.9    | 6500.0  | 152.3 | —     | 0.0012 | 3.3   |
|                  | HLG-33 | 660.0  | 3250  | 123  | 5.50  | 1380 | 1.2    | 1.3    | 3880.0  | 89.2  | —     | 0.0017 | 0.9   |
|                  | HLG-34 | 93.0   | 19200 | 158  | 21.20 | 340  | 2.6    | 1.0    | 6900.0  | 43.0  | 0.006 | 0.0011 | 2.6   |

注:“—”代表该元素低于仪器的检出限或无数据;Au/As 和 Co/Ni 数值代表比值,无单位

饱和,指示黄铁矿内不可见金以晶格金(Au<sup>+</sup>)形式存在。因此,黑岚沟金矿床 As 的过量富集可能是导致 Au 沉淀的重要因素,其主要沉淀机制可能是:As 元素进入黄铁矿后引起了寄主黄铁矿的矿物晶胞参数增大或产生晶格错位,为 Au 的富集提供了空间,而黄铁矿内部裂隙中赋存的可见 Au(图版Ⅲ)可能是由于黄铁矿内部空间振荡引发晶格金卸载,导致金以细小包体形式存在于黄铁矿中<sup>[38-39]</sup>。

Cu 元素(0.7×10<sup>-6</sup>~1200.0×10<sup>-6</sup>)、Zn 元素(2.2×10<sup>-6</sup>~2700.0×10<sup>-6</sup>)及 Sb 元素(0.5×10<sup>-6</sup>~152.3×10<sup>-6</sup>)除在 Py2-2 中元素含量较低外,在其余黄铁矿亚类中整体上具有较高的元素含量。微量元素散点图(图 6-B)显示,Cu 与 Zn 元素具有高相关性,箱型图(图 7)中亦显示相似的变化趋势。Ag 含量(0.2×10<sup>-6</sup>~490.0×10<sup>-6</sup>)、Pb 含量(2.2×10<sup>-6</sup>~6900.0×10<sup>-6</sup>)、As 含量(360×10<sup>-6</sup>~54300×10<sup>-6</sup>)及

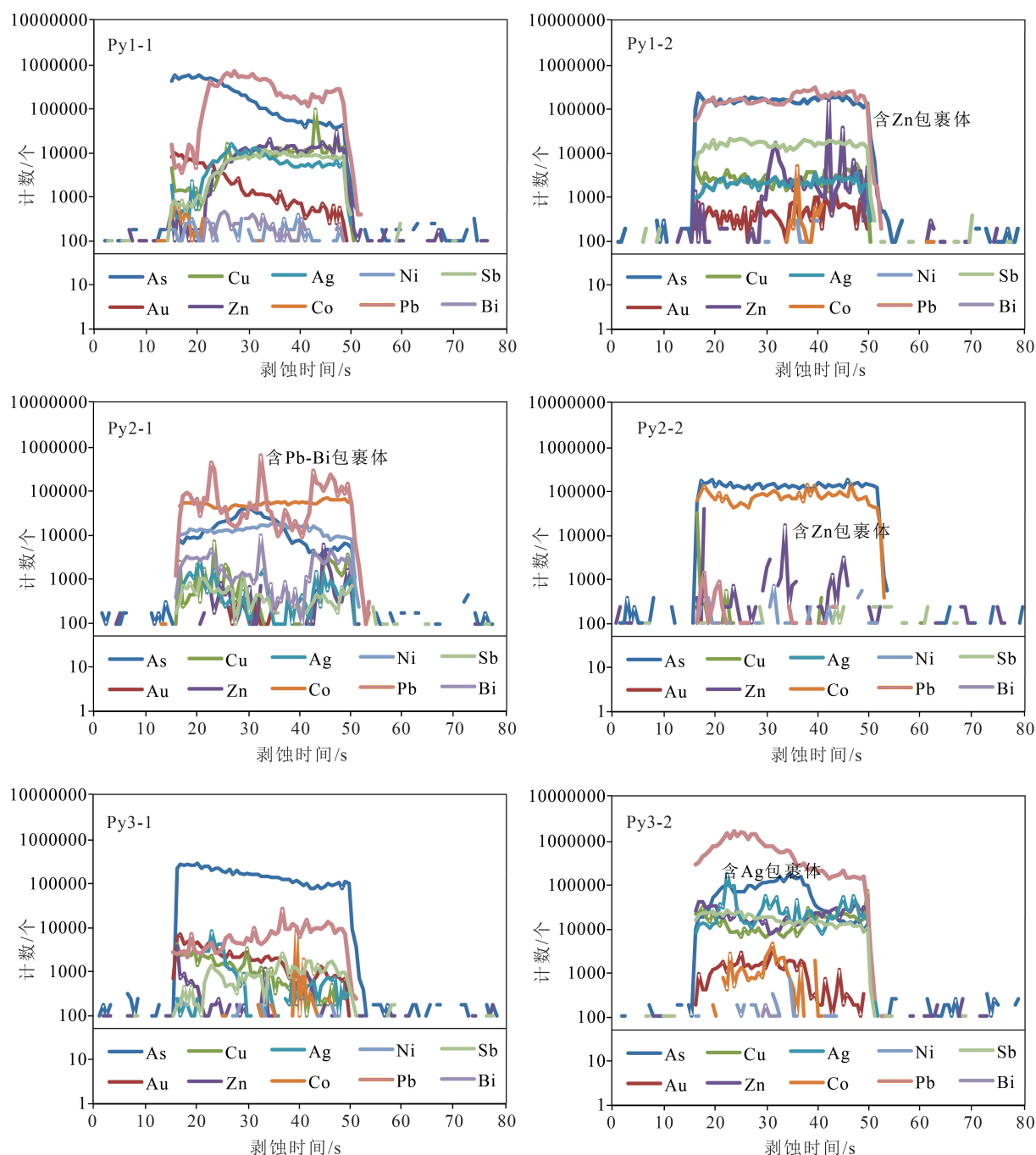


图 5 不同亚典型黄铁矿激光剥蚀曲线

Fig. 5 Laser ablation curves of typical pyrites of different subtypes

Au 含量( $0.06 \times 10^{-6} \sim 92.8 \times 10^{-6}$ )整体上具有相似的变化趋势特征,按时间从早到晚,Py1-1、Py1-2、Py2-1、Py2-2 四个亚类中,元素含量不断降低,而 Py2-2、Py3-1、Py3-2 三个亚类中,元素含量不断升高,推断随着成矿阶段的进行,温度降低,氧逸度等物理化学条件发生变化,低温元素沉淀,导致元素

含量增多。此外,散点图(图 6-C)显示,Ag 与 Sb 元素具有较高的相关性。

Bi 元素( $0.0004 \times 10^{-6} \sim 0.4800 \times 10^{-6}$ )在黑岚沟石英脉型金矿床主成矿阶段黄铁矿中整体含量极低,较多测点数值甚至低于检出限(表 3;图 7),中位数为  $0.03 \times 10^{-6}$ 。林祖苇等<sup>[36]</sup>将胶西北三山岛金



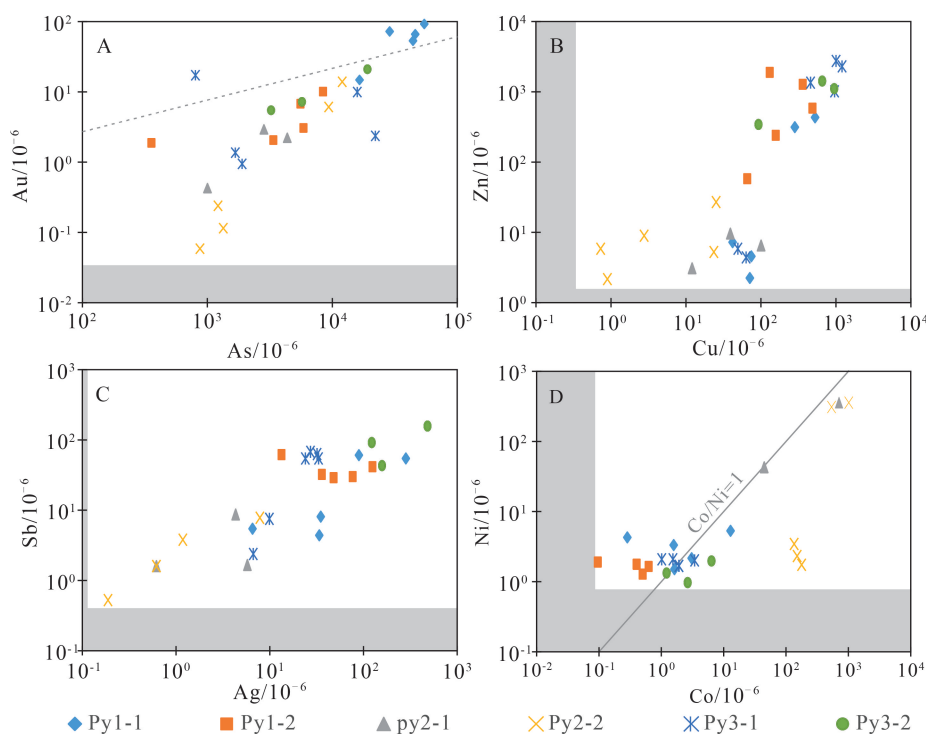


图6 黑岚沟金矿床黄铁矿微量元素含量散点图(阴影部分为检出限范围)

Fig. 6 Scatter diagram of trace elements of pyrites in Heilangou gold deposit(the shaded part is the detection limit)

矿成矿过程划分为5个阶段,并测得第2和3阶段黄铁矿原位微区Bi元素含量中位数为 $0.035 \times 10^{-6}$ ,该数值与黑岚沟金矿前3个主成矿阶段Bi元素含量中位数( $0.03 \times 10^{-6}$ )相当。这表明黑岚沟金矿与三山岛金矿成矿过程存在类似之处。两矿床成矿过程的共性还包括均存在最早期的钾化蚀变和最晚期的石英-碳酸盐成矿阶段,但三山岛金矿床成因类型,一般认为是蚀变岩型,而黑岚沟金矿床则主要为石英脉型,暗示胶东金矿床两大主要成因类型——石英脉型与蚀变岩型可能属于同一成矿体系,可能是赋矿环境的不同导致了2种不同成因类型矿床的差异。总结前人研究成果发现,胶东地区上述2种成因类型的矿床具有相似的成矿流体性质(中—低温、中—低盐度、较低密度的富 $\text{CO}_2$ 体系)及成矿物质来源(主要起源于岩浆和/或地幔),也支持上述推断<sup>[2, 19, 40-46]</sup>。Bi与Pb元素在一些金矿床的黄铁矿中具有一定相关性<sup>[26]</sup>,甚至2种元素也可形成稀有铋铅碲硫化物<sup>[47]</sup>。Bi元素在Py1-2、Py3-1、Py3-2三个亚类中含量都较低,接近或低于检出限。Bi元素在Py1-1、Py2-1、Py2-2三个亚类

中则高于检出限,含量高于 $0.01 \times 10^{-6}$ 的数据有11个,尽管可供对比的测点数有限,但Bi与Pb元素含量在每个黄铁矿亚类中仍表现为较好的正相关(图8)。

黑岚沟金矿床黄铁矿微量元素中Co、Ni元素比值介于0.1~97.2之间,除Py1-2和Py2-2两个亚类外,大部分位于 $\text{Co}/\text{Ni}=1$ 的比值线附近,Co、Ni含量及 $\text{Co}/\text{Ni}$ 值表明,黑岚沟金矿床中的黄铁矿为热液沉淀而成,结合前人研究表明,黑岚沟矿床的成矿流体应以岩浆作用为主,成矿过程中可能混入了少量大气降水<sup>[2-3, 11, 34]</sup>。本次测试结果中,Co元素( $0.1 \times 10^{-6} \sim 1040.0 \times 10^{-6}$ )与Ni元素( $0.9 \times 10^{-6} \sim 1190.0 \times 10^{-6}$ )含量跳跃幅度大,在不同黄铁矿亚类中的含量显现出不同的特征(图7)。大部分黄铁矿亚类中Co与Ni元素含量存在正相关关系, $\text{Co}/\text{Ni}$ 元素含量比值大多在1.1~3.3之间,但除Py2-2外的5个黄铁矿亚类中,均有少量测点 $\text{Co}/\text{Ni}$ 元素含量比值低于1,尤其Py1-2黄铁矿亚类最明显,其 $\text{Co}/\text{Ni}$ 元素含量比值全部低于1(表3;图6-D)。结合前人同位素研究表明,黑岚沟金矿床中黄铁矿

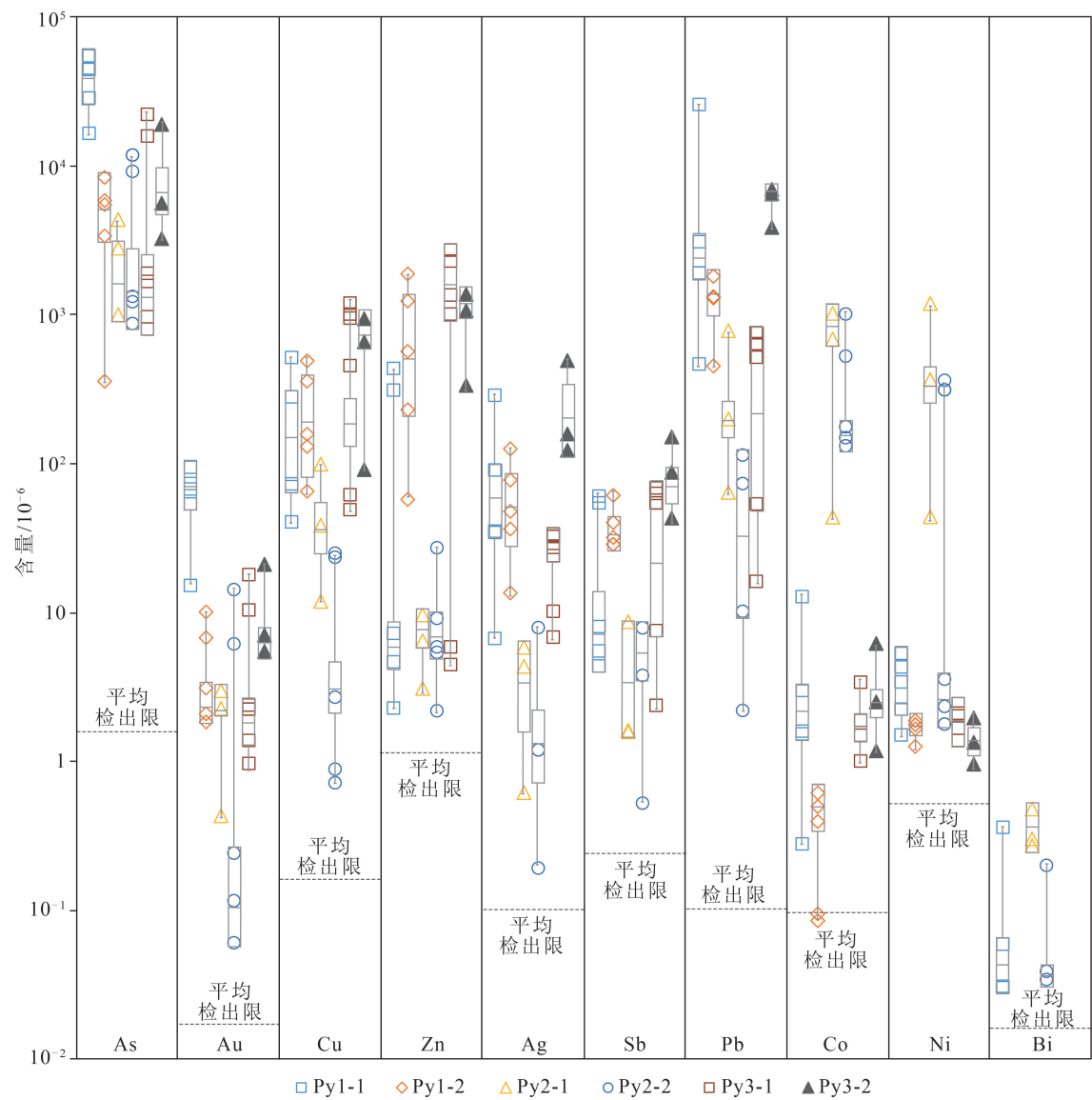


图 7 黑岚沟金矿床黄铁矿微量元素含量箱型图

Fig. 7 Box diagram of trace elements of pyrites in Heilangou gold deposit

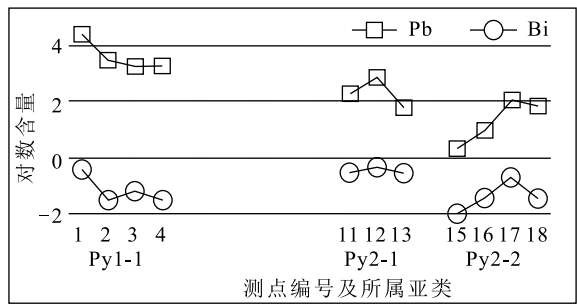


图 8 Bi、Pb 元素含量对数对比

(因含量跳跃幅度大, 为方便显示, 以元素含量对数成图;  
未包含 Bi 含量低于  $0.01 \times 10^{-6}$  的样品)

Fig. 8 Comparison of logarithmic contents of Bi and Pb

主要为岩浆热液成因, 并且在成矿过程中不同阶段的成矿流体性质发生了不同程度的改变, 该认识与 Feng 等<sup>[48]</sup> 近年开展的研究结果基本一致。

6.2 不同成矿阶段微量元素变化趋势

黄铁矿-石英阶段(S1), 黄铁矿整体上具较高的微量元素含量, 尤其 Au、As 含量偏高。其中, Py1-1 中 Au 含量为  $14.9 \times 10^{-6} \sim 92.8 \times 10^{-6}$ 、As 含量为  $16500 \times 10^{-6} \sim 54300 \times 10^{-6}$ 、Pb 含量为  $460 \times 10^{-6} \sim 3080 \times 10^{-6}$ 、Ag 含量为  $6.6 \times 10^{-6} \sim 286.0 \times 10^{-6}$ ; Py1-2 中 Au 含量为  $1.8 \times 10^{-6} \sim 10.1 \times 10^{-6}$ 、As 含量为  $360 \times 10^{-6} \sim 8500 \times 10^{-6}$ 、Pb 含量为  $454 \times 10^{-6} \sim 1790 \times 10^{-6}$ 、Ag 含量为  $13.6 \times 10^{-6} \sim 125.0 \times 10^{-6}$ 。从箱型图(图

7) 及变化趋势图(图 9)可以看出,按照形成时间从早(Py1-1)到晚(Py1-2),Cu、Zn、Sb 等元素含量呈上升趋势,而 Au、As、Ag、Pb 等元素含量呈下降趋势。

石英-黄铁矿阶段(S2),黄铁矿微量元素含量整体较 S1 阶段低。其中,Py2-1 中 Au 含量为  $0.43 \times 10^{-6} \sim 2.99 \times 10^{-6}$ 、As 含量为  $1000 \times 10^{-6} \sim 4360 \times 10^{-6}$ 、Pb 含量为  $64 \times 10^{-6} \sim 780 \times 10^{-6}$ 、Ag 含量  $0.6 \times 10^{-6} \sim 5.8 \times 10^{-6}$ ; Py2-2 中 Au 含量为  $0.1 \times 10^{-6} \sim 14.1 \times 10^{-6}$ 、As 含量为  $878 \times 10^{-6} \sim 11900 \times 10^{-6}$ 、Pb 含量为  $2.2 \times 10^{-6} \sim 112.0 \times 10^{-6}$ 、Ag 为  $0.2 \times 10^{-6} \sim 7.8 \times 10^{-6}$ 。从箱型图(图 7)可以看出,按照形成时间从早(Py2-1)到晚(Py2-2),Cu、As、Ag、Au、Zn、Pb、Bi 等元素含量均呈下降趋势。但由于矿物内微量元素含量变化较大,矿物环带微量元素分析所展现出的规律性不强,变化趋势图(图 9)上仅 Cu、Pb、Sb、Ag 与整体变化规律一致。

石英-多金属硫化物阶段(S3),Py3-1 中 Au 含量为  $0.9 \times 10^{-6} \sim 14.7 \times 10^{-6}$ 、As 含量为  $800 \times 10^{-6} \sim 22000 \times 10^{-6}$ 、Pb 含量为  $16.1 \times 10^{-6} \sim 754.0 \times 10^{-6}$ 、Ag 含量为  $6.7 \times 10^{-6} \sim 33.4 \times 10^{-6}$ ; Py3-2 中 Au 含量为  $5.5 \times 10^{-6} \sim 21.2 \times 10^{-6}$ 、As 含量为  $3250 \times 10^{-6} \sim 19200 \times 10^{-6}$ 、Pb 含量为  $3880 \times 10^{-6} \sim 6900 \times 10^{-6}$ 、Ag 含量为  $123 \times 10^{-6} \sim 490 \times 10^{-6}$ 。从箱型图(图 7)与变化趋势图(图 9)可以看出,按照形成时间从早(Py3-1)到晚(Py3-2),As、Ag、Au、Pb、Sb 等元素含量整体呈上升趋势,Cu、Zn 等元素含量则有下降趋势。

本次测试,主要针对的是黄铁矿颗粒中的不可见金(光学显微镜下不可见)。从分析结果看,黄铁矿-石英阶段(S1)的黄铁矿(Py1)中有较高的 Au 元素沉淀(表 3;图 9),因此,S1 阶段 Au 元素在黄铁矿颗粒中相对沉淀较多。在 S1 阶段与 S3 阶段,各类微量元素相对富集,而 S2 阶段相对贫化(图 9)。

从各微量元素含量在不同成矿阶段及黄铁矿亚类中变化趋势不一的结果看,黑岚沟金矿床成矿流体具有多期旋回的特点,成矿流体的持续时间较长,含量较大,Au 与 As 元素呈现出明显的正相关关系。在黄铁矿 BSE 图像中可见黄铁矿颗粒边部出现明暗相间的“环带”或出现较亮的边部(图 4),Feng 等<sup>[48]</sup>对黑岚沟金矿床这类黄铁矿颗粒进行 Nano-SIMS 及微量元素分析表明,成矿后期还存在异常富 As 流体的加入。因此,黑岚沟金矿床中 Au 元素在多次不断加入的富 Au-As 流体中多次沉淀成矿,As 元素的加入和富集可能对高品位金矿的形成具有重要作用。

## 7 结 论

(1) 根据野外地质调查,结合矿相学和 BSE 图像观察,将黑岚沟金矿床前 3 个主成矿阶段(S1-S3)的黄铁矿(Py1~Py3)进一步划分为 6 个亚类:Py1-1、Py1-2、Py2-1、Py2-2、Py3-1 和 Py3-2。

(2) 通过黄铁矿原位微量元素分析发现,从早阶段到晚阶段,黄铁矿中 Cu、As、Ag、Au、Zn、Co、Ni、Pb、Sb、Bi 等元素变化趋势不一致。Au-As、Cu-Zn、Ag-

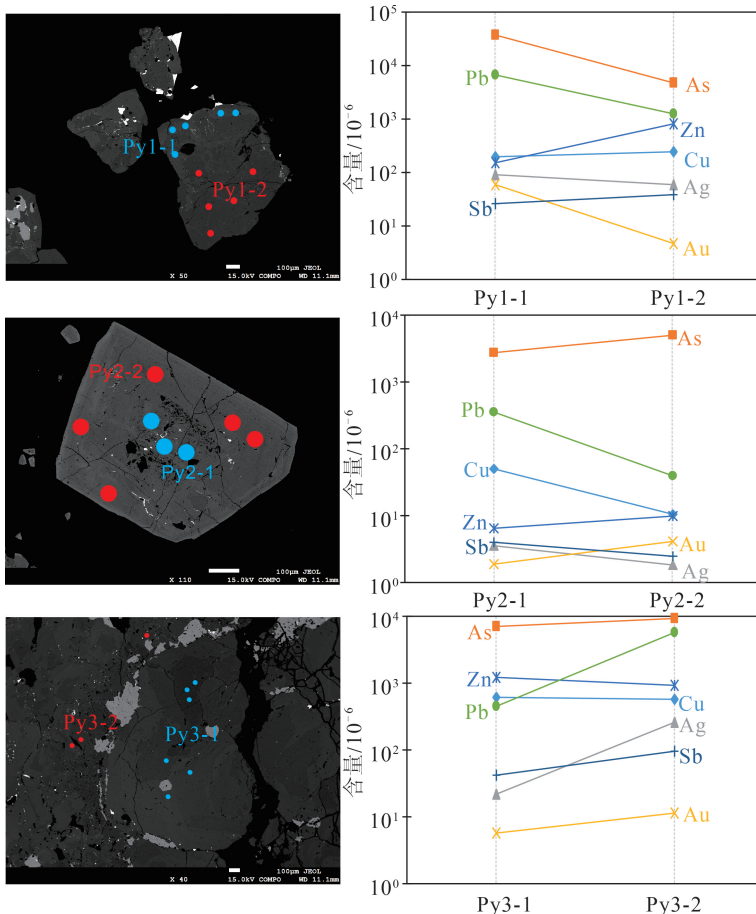


图 9 黑岚沟金矿床不同亚类黄铁矿测试点位及变化趋势图

Fig. 9 Test points of different subtypes of pyrite and the trend of corresponding data in Heilangou gold deposit



Sb 等多对元素在黄铁矿中具有高相关性; Pb 与 Bi 也具有较高的正相关性, 尤其在 Py1-1、Py2-1、Py2-2 三个黄铁矿亚类中; 大部分黄铁矿亚类中 Co 与 Ni 存在正相关关系, 且 Co/Ni 值位于 1 附近, 说明黑岚沟金矿床中黄铁矿主要为岩浆热液成因, 其成矿过程中成矿热液物理化学性质发生了不同程度的变化。

(3) 黑岚沟石英脉型金矿前 3 个主成矿阶段 Bi 元素含量均较低, 与胶西北三山岛蚀变岩型金矿 2、3 阶段的 Bi 元素含量特征基本一致。结合前人研究认为, 胶东石英脉型金矿与蚀变岩型金矿属同一成矿体系, 可能是赋矿环境的不同导致了差异。

(4) S1 阶段与 S3 阶段 Au 元素相对富集, 说明成矿流体的持续时间较长, 具有多期旋回的特点, As 的富集可能是导致 Au 沉淀的重要因素, 金在多期次的富 Au-As 流体中多次沉淀成矿。

**致谢:** 中国地质大学(武汉)陈耀硕士等参加了野外调查工作, 黑岚沟金矿原总工上官义宁对井下调查工作提供了帮助, 中国地质大学(武汉)谭俊副教授对本文初稿提出了修改建议, 一并表示感谢。

## 参考文献

- [1] 宋明春, 宋英昕, 丁正江, 等. 胶东金矿床: 基本特征和主要争议[J]. 黄金科学技术, 2018, 26(4): 406-422.
- [2] 侯明兰, 蒋少涌, 姜耀辉, 等. 胶东蓬莱金成矿区的 S-Pb 同位素地球化学和 Rb-Sr 同位素年代学研究[J]. 岩石学报, 2006, 22: 2525-2533.
- [3] 侯明兰, 蒋少涌, 沈昆, 等. 胶东蓬莱金矿区流体包裹体和氢氧同位素地球化学研究[J]. 岩石学报, 2007, 23: 2241-2256.
- [4] Yang K F, Jiang P, Fan H R. Tectonic transition from a compressional to extensional metallogenic environment at ~120 Ma revealed in the Hushan gold deposit, Jiaodong, North China Craton [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2018, 160: 408-425.
- [5] 杨敏之, 吕古贤. 胶东绿岩带金矿地质地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 1996: 1-222.
- [6] 王铁军, 阎方. 胶东地区岩浆热液型金矿成矿流体演化与成矿预测[J]. 地质找矿论丛, 2002, 17: 169-174.
- [7] 朱奉三. 混合岩化热液金矿床成矿作用初步研究——以招掖地区的金矿床为例[J]. 地质与勘探, 1980, 7: 1-10.
- [8] 王勇军, 刘颜, 黄鑫, 等. 胶东牟乳成矿带范家庄金矿床成矿流体特征及其地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2020, 50(4): 1012-1028.
- [9] 智云宝, 孙海瑞, 李风华. 山东栖霞笏山金矿床成因: 元素地球化学与流体包裹体证据[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2020, 50(5): 1552-1569.
- [10] 朱日祥, 范宏瑞, 李建威, 等. 克拉通破坏型金矿床[J]. 中国科学: 地球科学, 2015, 45: 1153-1168.
- [11] Groves D I, Santosh M. The giant Jiaodong gold province: the key to a unified model for orogenic gold deposits? [J]. Geoscience Frontiers, 2016, 7: 409-417.
- [12] Yang L Q, Deng J, Wang Z L, et al. Relationships between gold and pyrite at the Xincheng gold deposit, Jiaodong Peninsula, China: Implications for gold source and deposition in a brittle epizonal environment [J]. Economic Geology, 2016, 111: 105-126.
- [13] Goldfarb R J, Groves D I. Orogenic gold: Common or evolving fluid and metal sources through time [J]. Lithos, 2015, 233: 2-26.
- [14] Goldfarb R J, Santosh M. The dilemma of the Jiaodong gold deposits: are they unique? [J]. Geoscience Frontiers, 2014, 5: 139-153.
- [15] Goldfarb R J, Hart C, Davis G, et al. East Asian gold: Deciphering the anomaly of Phanerozoic gold in Precambrian cratons [J]. Economic Geology, 2007, 102: 341-345.
- [16] 陈衍景, Franco P, 赖勇, 等. 胶东矿集区大规模成矿时间和构造环境[J]. 岩石学报, 2004, 20: 907-922.
- [17] 蒋少涌, 戴宝章, 姜耀辉, 等. 胶东和小秦岭: 两类不同构造环境中的造山型金矿省[J]. 岩石学报, 2009, 25: 35-46.
- [18] Wang L G, Qiu Y M, Mcnaughton N J, et al. Constraints on crustal evolution and gold metallogeny in the Northwestern Jiaodong Peninsula, China, from SHRIMP U-Pb zircon studies of granitoids [J]. Ore Geology Reviews, 1998, 13: 275-291.
- [19] 杨立强, 邓军, 王中亮, 等. 胶东中生代金成矿系统[J]. 岩石学报, 2014, 30(9): 2447-2467.
- [20] Li L, Santosh M, Li S R. The 'Jiaodong type' gold deposits: Characteristics, origin and prospecting [J]. Ore Geology Reviews, 2015, 65: 589-611.
- [21] Gregory Daniel, Large Ross, Halpin Jacqueline. Trace element content of sedimentary pyrite in black shales [J]. Economic Geology, 2015, 110: 1389-1410.
- [22] Lang J, Baker T. Intrusion-related gold systems: The present level of understanding [J]. Mineralium Deposita, 2001, 36(6): 477-489.
- [23] Shabani K, Nezafati N, Momenzadeh M, et al. Geology, geochemistry and mineralogy of the Tareek Darreh Gold Deposit, Northeast Iran [J]. Geología Colombiana, 2010, 35: 131-142.
- [24] Jones C, Jenkin G, Boyce A, et al. Tellurium, magmatic fluids and orogenic gold: An early magmatic fluid pulse at Cononish gold deposit, Scotland [J]. Ore Geology Reviews, 2018, 102: 894-905.
- [25] Large R A. carbonaceous sedimentary source-rock model for carlin-type and orogenic gold deposits [J]. Economic Geology, 2011, 106: 331-358.
- [26] Cook N, Ciobanu C, Meria D, et al. Arsenopyrite-Pyrite association in an Orogenic Gold Ore: Tracing mineralization history from textures and trace [J]. Economic Geology, 2013, 108: 1273-1283.
- [27] Maruyama S, Isozaki Y, Kimura G, et al. Paleogeographic maps of the Japanese Islands: Plate tectonic synthesis from 750 Ma to the present [J]. Isl. Arc, 1997, 6: 121-142.
- [28] Xu J, Zhu G, Tong W, et al. Formation and evolution of the Tancheng-Lujiang wrench fault system: A major shear system to the northwest of the Pacific Ocean [J]. Tectonophysics, 1987, 134: 273-310.
- [29] Zhu G, Niu M, Xie C, et al. Sinistral to normal faulting along the

- Tan-Lu Fault Zone: Evidence for geodynamic switching of the East China continental margin[J]. *Anglais*, 2010, 118: 277-293.
- [30] Wang Y. The onset of the Tan-Lu fault movement in eastern China: Constraints from zircon (SHRIMP) and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating[J]. *Terra Nova*, 2006, 18: 423-431.
- [31] Zhu G, Wang Y, Liu G, et al.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating of strike-slip motion on the Tan-Lu fault zone, East China[J]. *J. Struct. Geol.*, 2005, 27: 1379-1398.
- [32] Zheng J P, O'Reilly S Y, Griffin W L, et al. Relict refractory mantle beneath the eastern North China block: Significance for lithosphere evolution[J]. *Lithos*, 2001, 57: 43-66.
- [33] Zhang H F, Goldstein S, Zhou X H, et al. Evolution of subcontinental lithospheric mantle beneath eastern China: Re-Os isotopic evidence from mantle xenoliths in Paleozoic kimberlites and Mesozoic basalts[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 2008, 155: 271-293.
- [34] 田杰鹏. 胶东栖霞福矿集区中生代金多金属矿区域成矿作用[D]. 中国地质大学(北京)博士学位论文, 2020.
- [35] 朱照先, 赵新福, 林祖苇, 等. 胶东金翅岭金矿床黄铁矿原位微量元素和硫同位素特征及对矿床成因的指示[J]. *地球科学*, 2020, 45(3): 945-959.
- [36] 林祖苇, 赵新福, 熊乐, 等. 胶东三山岛金矿床黄铁矿原位微量元素特征及对矿床成因的指示[J]. *地球科学进展*, 2019, 34(4): 399-413.
- [37] Reich M, Kesler S, Utsunomiya S, et al. Solubility of gold in arsenian pyrite[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, 69(11): 2781-2796.
- [38] Li X C, Fan H R, Santosh M, et al. Hydrothermal alteration associated with Mesozoic granite-hosted gold mineralization at the Sanshandao deposit, Jiaodong Gold Province, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2013, 53: 403-421.
- [39] 靳晓野. 黔西南泥堡、水银洞和丫他金矿床的成矿作用特征与矿床成因研究[D]. 中国地质大学(武汉)博士学位论文, 2017.
- [40] 范宏瑞, 冯凯, 李兴辉, 等. 胶东-朝鲜半岛中生代金成矿作用[J]. *岩石学报*, 2016, 32(10): 3225-3238.
- [41] Cha P, Hou Z Q, Zhang Z Y. Geology, Fluid Inclusion and Stable Isotope Constraints on the Fluid Evolution and Resource Potential of the Xiadian Gold Deposit, Jiaodong Peninsula[J]. *Resource Geology*, 2017, 67(3): 341-359.
- [42] 范宏瑞, 胡芳芳, 杨进辉, 等. 胶东中生代构造体制转折过程中流体演化和金的大规模成矿[J]. *岩石学报*, 2005, 21(5): 1317-1328.
- [43] Li S R, Santosh M. Metallogeny and craton destruction: records from the North China Craton[J]. *Ore Geology Reviews*, 2014, 56: 376-414.
- [44] Wen B J, Fan H R, Santosh M, et al. Genesis of Two Different Types of Gold Mineralization in the Linglong Gold Field, China: Constraints From Geology, Fluid Inclusions and Stable Isotope[J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 65(3): 643-658.
- [45] Guo L N, Deng J, Yang L Q, et al. Gold Deposition and Resource Potential of the Linglong Gold Deposit, Jiaodong Peninsula: Geochemical Comparison of Ore Fluids[J]. *Ore Geology Reviews*, 2020, 120: 103434.
- [46] Hu H L, Fan H R, Santosh M, et al. Ore-Forming Processes in the Wang' Ershan Gold Deposit (Jiaodong, China): Insight From Microtexture, Mineral Chemistry and Sulfur Isotope Compositions[J]. *Ore Geology Reviews*, 2020, 123: 103600.
- [47] Cepedal A, Martínez-Abad I, Fuertes-Fuente M, et al. The presence of plumboan ingodite and a rare Bi-Pb tellurosulfide,  $\text{Pb}_3\text{Bi}_4\text{Te}_4\text{S}_5$ , in the limarinho gold deposit, northern Portugal[J]. *The Canadian Mineralogist*, 2013, 51(4): 643-651.
- [48] Feng K, Fan H R, Hu F F, et al. Involvement of anomalously As-Au-rich fluids in the mineralization of the Heilangou gold deposit, Jiaodong, China: Evidence from trace element mapping and in-situ sulfur isotope composition[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 160: 304-321.