

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2021.02.009

# 胶东黑岚沟金矿田黄铁矿热电性研究 及深部成矿预测

吴晋超<sup>1</sup>, 申俊峰<sup>1,\*</sup>, 申玉科<sup>2</sup>, 李国武<sup>1</sup>, 张华锋<sup>1</sup>, 杜佰松<sup>1</sup>, 何泽宇<sup>1</sup>, 徐渴鑫<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081)

**摘要:**黑岚沟金矿田位于胶东中部栖霞-蓬莱金成矿带北段, 区内发育黑岚沟、河西、侯各庄、初格庄等多个石英脉型金矿。其金矿化主要出现在含黄铁矿和多金属硫化物的石英脉中。黄铁矿是主要的载金矿物。因此, 基于黄铁矿热电性标型特征指导找矿勘查具有实际意义。采用新型原位矿物热电仪进行黑岚沟金矿集区46件主成矿阶段黄铁矿的热电性测试, 结果表明, 在该区-170~-616 m 标高内, 黄铁矿热电导型P型率大多在90%以上, 暗示目前揭露的矿体仍然处于矿床上部或顶部; 特别是热电系数主要集中在 $200\sim 350\ \mu\text{V}\cdot\text{℃}^{-1}$ , 且其离散性较大, 推测矿床垂向延伸较大; 通过热电系数计算成矿垂向延伸指数平均值为30.4%, 该值也说明目前探采部位属于矿床上部。综合分析, 认为黑岚沟金矿田深部仍然具有较大的成矿潜力。

**关键词:**黄铁矿; 热电性; 金矿; 黑岚沟金矿田; 胶东

中图分类号: P618.51

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2021)02-0111-15

## The Thermoelectricity Property and Deep Metallogenic Forecast of Pyrite in Heilangou Gold Field of Jiaodong, Shandong Province

WU Jinchao<sup>1</sup>, SHEN Junfeng<sup>1,\*</sup>, SHEN Yuke<sup>2</sup>, LI Guowu<sup>1</sup>,  
ZHANG Huafeng<sup>1</sup>, DU Baisong<sup>1</sup>, HE Zeyu<sup>1</sup>, XU Kexin<sup>1</sup>

(1. School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

2. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Heilangou gold field is located in the northern part of Qixia-Penglai gold metallogenic belt of Jiaodong, Shandong province. There are many quartz vein type of gold deposits as Heilangou, Hexi, Hougezhuang and Chugezhuang, etc. The gold mineralization mainly occurs in quartz veins containing pyrite and polymetallic sulfide. Pyrite is the main gold bearing mineral, therefore the prospecting based on the typomorphic characteristics of pyrite thermoelectricity is of practical significance. The thermoelectric properties of 46 pyrites were measured by a new in-situ mineral thermoelectric instrument. The results show that the P-type ratios of pyrite are mostly a-

收稿日期: 2020-07-23; 修回日期: 2021-01-03

**基金项目:**国家重点研发计划“深地资源勘查开采”重点专项(2016YFC0600107)、“胶东地区中生代花岗岩调查及与金矿关系研究”(鲁勘字[2018]19号)、“山东蓬莱黑岚沟金矿控矿构造研究与找矿预测”(企业项目)和国家重点研发计划“深地资源勘查开采”(2016YFC0600106)联合资助。

**作者简介:**吴晋超(1994-), 男, 硕士研究生, 从事成因矿物学与找矿矿物学研究。E-mail: 805070916@qq.com。

**\* 通讯作者:**申俊峰(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事成因矿物学与找矿矿物学研究。E-mail: shenj@cggb.edu.cn。

bove 90%, being in the elevation range of  $-170 \sim -616\text{m}$ , indicating that the ore bodies exposed are at the top of the deposit. The thermoelectric coefficient is especially concentrated in the range of  $200 \sim 350 \mu\text{V} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ . The average value of the vertical extension index (30.4%) calculated by the thermoelectric coefficient indicates that the current exploration position is in the upper part of the deposit. It is held that there is still much metallogenic potential deep in Heilangou gold field.

**Keywords:** pyrite; thermoelectric property; gold mine; Heilangou gold field; Jiaodong

胶东是中国最重要的金矿集中区。目前,共发现超大-特大型金矿 7 处,大型金矿 8 处,中小型金矿近 200 余处(范宏瑞等,2005;卫青等,2018),已探明金储量已超过 4 500 t,产量占国内黄金的 1/4 以上(宋英昕等,2017;毛先成等,2019)。胶东从西到东依次分布招远-莱州、栖霞-蓬莱、牟平-乳山 3 条主要的金成矿带。黑岚沟金矿田位于中部的栖霞-蓬莱成矿带北段,由多个石英脉型金矿床组成,主要包括黑岚沟金矿、初格庄金矿、齐沟金矿、河西金矿、黑金顶金矿和侯格庄金矿等。矿集区目前金探明储量占蓬莱地区探明储量的 70% 以上(孙永深,1999)。除上述金矿床外,还发现了若干新的矿化点,表明黑岚沟矿集区金尚有较大的找矿前景。

黄铁矿是自然界分布最广的硫化物之一,同时也是重要的载金矿物,研究区内金在黄铁矿中的赋存状态分为可见金与不可见金,可见金常出现在黄铁矿颗粒间隙与黄铁矿裂隙间;不可见金以固溶体和纳米颗粒的贵金属杂质形式大量存在于黄铁矿晶体内部(Artur et al., 2014; Mills et al., 2015; Morishita et al., 2018),是以黄铁矿标型特征对金矿预测具有重要的指示意义(孙岱生等,1987;贾建业,1996;Zhao et al., 2011;李洪梁等,2019)。在研究区内典型金矿中共采集含黄铁矿矿石样品 46 件,采用新型原位热电性测试仪对主成矿阶段的黄铁矿进行原位热电性测试,大大降低了非主成矿阶段黄铁矿样品的影响。

笔者主要依据黄铁矿热电性数据的分析结果,特别是针对热电导型在垂向上的变化趋势、热电系数的离散性变化特点和矿体延伸指数估算等,整理归纳了黑岚沟金矿田黄铁矿热电性标型特征,为深部找矿和成矿潜力评价提供最新的证据。

## 1 区域地质特征

胶东地区位于华北克拉通东南缘,西部以郯庐

断裂为界,北部是黄海,东部以青岛-荣成断裂为界,南临胶莱盆地(图 1)。研究区构造活动频繁,以北东向为主(张宗庆,2008;严育通等,2013)。区内岩浆活动剧烈,广泛分布侵入岩。其特殊的地质环境对金成矿十分有利。

### 1.1 区域地层

胶东金矿集中区出露地层以太古宙胶东群和中生代花岗岩为主,另有中生代早期苏鲁高压超高压变质岩块、白垩纪火山岩、元古宙荆山群和粉子山群,第四系零星分布(陈衍景等,2004;范宏瑞等,2005;Liu et al., 2013)。太古宙胶东群变质岩地层是胶东区域变质岩基底的主要组成部分,岩性主要为斜长角闪岩和变辉绿岩等(毛先成等,2019);元古代荆山群和粉子山群岩性以片麻岩、斜长角闪岩和钙硅酸盐岩等为主(刘跃等,2014);中生代早期的苏鲁变质岩块岩性以含榴辉岩花岗质片麻岩和中生代花岗岩为主(宋明春等,2013);第四纪地层主要由沉积物和玄武岩组成(陈衍景等,2004)。

### 1.2 区域构造

胶东金矿集中区地质历史时期发生了 2 次重要的构造事件:其一是华北克拉通与扬子板块的碰撞造山运动;其二是古太平洋板块俯冲与亚欧大陆板块的地质作用(胡受悉等,1993;陈衍景等,2004;丁正江等,2015)。也有学者指出,胶东成矿更源于郯庐断裂等新华夏构造的作用(吕古贤,2017)。

研究区内控矿断裂构造的成生与郯庐断裂的活动关系密切,区内金矿主要受控于北东和北北东走向的断裂构造,其次为晚期北西向断裂构造(卫青等,2018)。招平断裂、三山岛断裂和焦家断裂等是主要的控矿构造(杜长学等,1991;李洪杰等,2010;丁正江等,2015;吕承训等,2017)。

### 1.3 区域岩浆岩

胶东金矿集中区岩浆岩分布广泛,整体具有以下特点:西部出露岩体侵入年龄大都较老,早期为

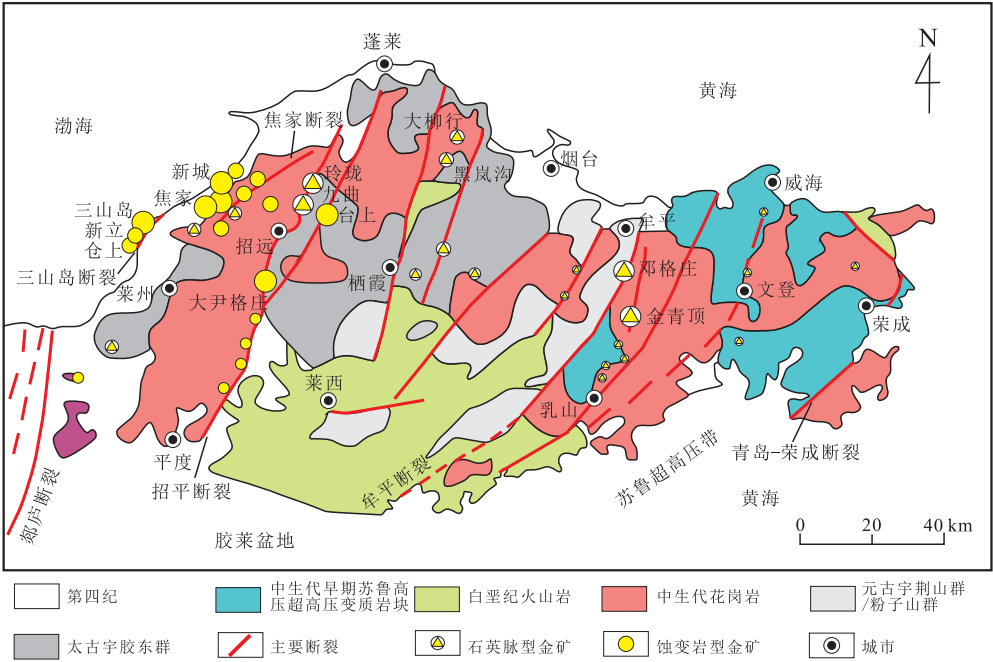


图 1 胶东区域地质图(据陈衍景等,2004;吕承训等,2017;Feng et al. ,2018 修改)

Fig. 1 Regional geological map of Jiaodong (Revised according to Chen et al. , 2004; Lü et al. , 2017; Feng et al. , 2018)

基性-超基性,后期偏酸性,呈近东西向分布;东部出露岩体年龄相对较新,岩性以花岗质为主,表现为北东向展布(丁正江等,2015;吕承训等,2017)。花岗类岩体主要包括中生代玲珑花岗岩、伟德山花岗岩和早白垩世郭家岭花岗岩等。另外,该区域还分布大量中生代侵入的中基性、中酸性岩脉(范宏瑞等,2005;卫清等,2018)。

2 矿床地质特征

黑岚沟金矿田位于栖霞-蓬莱金成矿带之中北部,区域内构造较为发育。

2.1 矿区地层

矿区内地层较发育(图 2),从老到新主要由太古宙地层胶东群、古元古代粉子山群、震旦纪蓬莱群、白垩纪青山群和新生代第四系组成(侯明兰等,2004;Yan et al. ,2014;蓝信杰等,2019)。太古宙胶东群主要岩性以斜长角闪岩和黑云变粒岩为主,多以规模较小的弧岛状、扁豆状等残留体形式分布于中生代花岗岩体中(陈光远等,1987;原显顺,2019)。第四纪地层主要由冲积物、洪积物和残坡积物等组成,分布于山前洼地、河流两侧及汇水盆地(于昌明,

1999;葛平江等,2007;李洪奎等,2018)。其中太古宙胶东群可能为该区域金的矿源层(蓝信杰等,2019)。

2.2 矿区构造

矿区断裂构造发育,根据实测 31 组控制矿体产出的断裂构造产状,绘制玫瑰花图(图 3)。控矿断裂以北东、北北东走向为主,少数为北北西近 350°走向。这些断裂控制着黑岚沟金矿田范围内的矿脉、蚀变带及矿体的分布、产状和规模(侯明兰等,2006;Yan et al. ,2014;申玉科等,2018;蓝信杰等,2019;刘洋等,2020)。

北东、北北东向控矿断裂构造近于平行排列,具等间距分布特点(图 2),规模大小不一,宽几米到几十米,延伸几米至十几千米,走向为 10°~30°,南东倾向,倾角为 40°~65°,裂隙被石英脉充填。控矿断裂构造带内发育大量碎裂岩、构造透镜体,可见斜冲擦痕和不连续的断层泥等,反映该组断裂构造的多期次性活动。

北西向断裂构造基本为张扭性断裂,规模较大的可以延伸几千米,总体走向北西 310°~350°,倾向南西,倾角为 55°~88°;成矿前及成矿期的北西向断裂构造不发育,大都为成矿后形成,断裂破碎带由碎裂状花岗岩组成,错断成矿期蚀变带或金矿体。

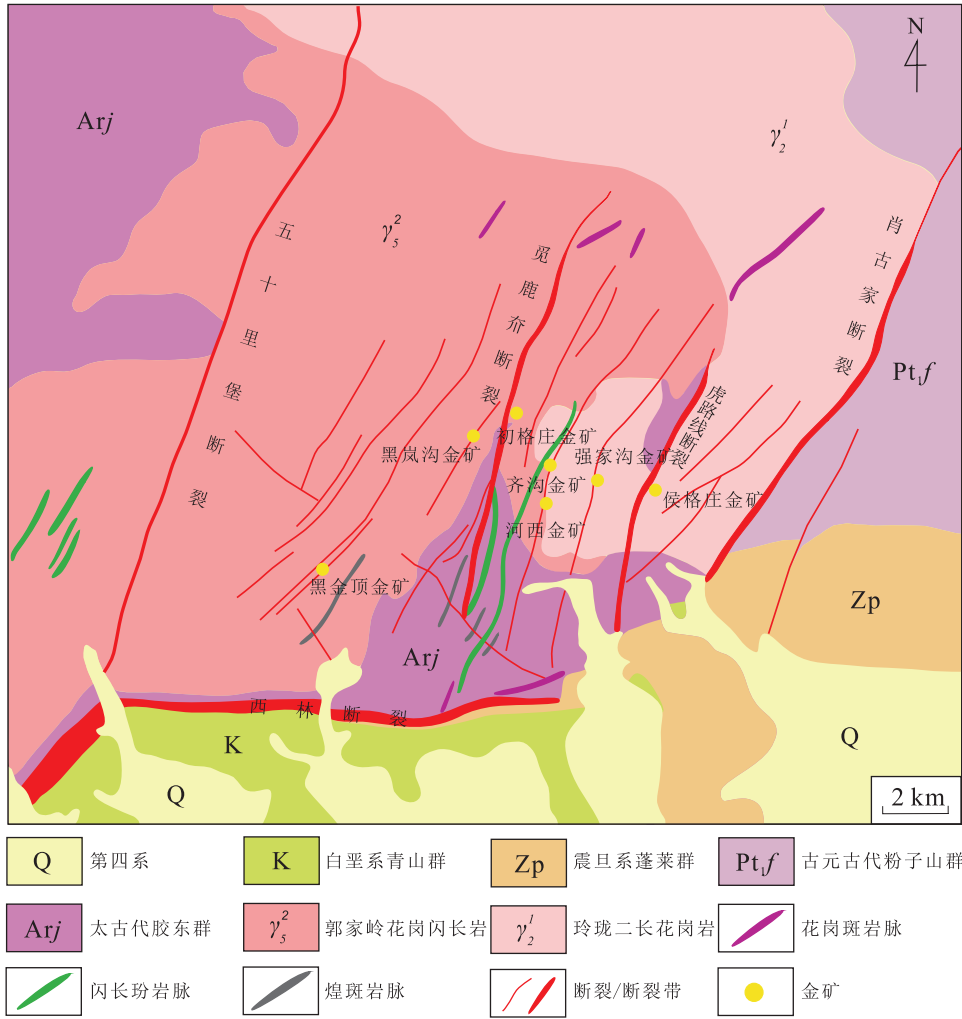


图 2 胶东黑岚沟金矿田地质简图(据 Yan et al. , 2014 修改)

Fig. 2 Geological map of Heilangou gold field, Jiaodong (Revised according to Yan et al. , 2014)

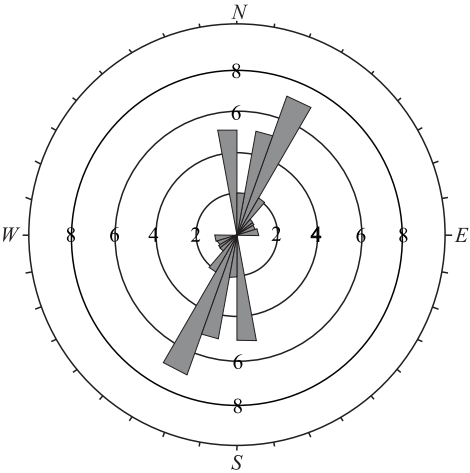


图 3 胶东黑岚沟金矿田含矿断裂构造走向玫瑰花图

Fig. 3 Rose diagram of ore bearing fault structure strike in Heilangou gold field, Jiaodong

2.3 矿区岩浆岩

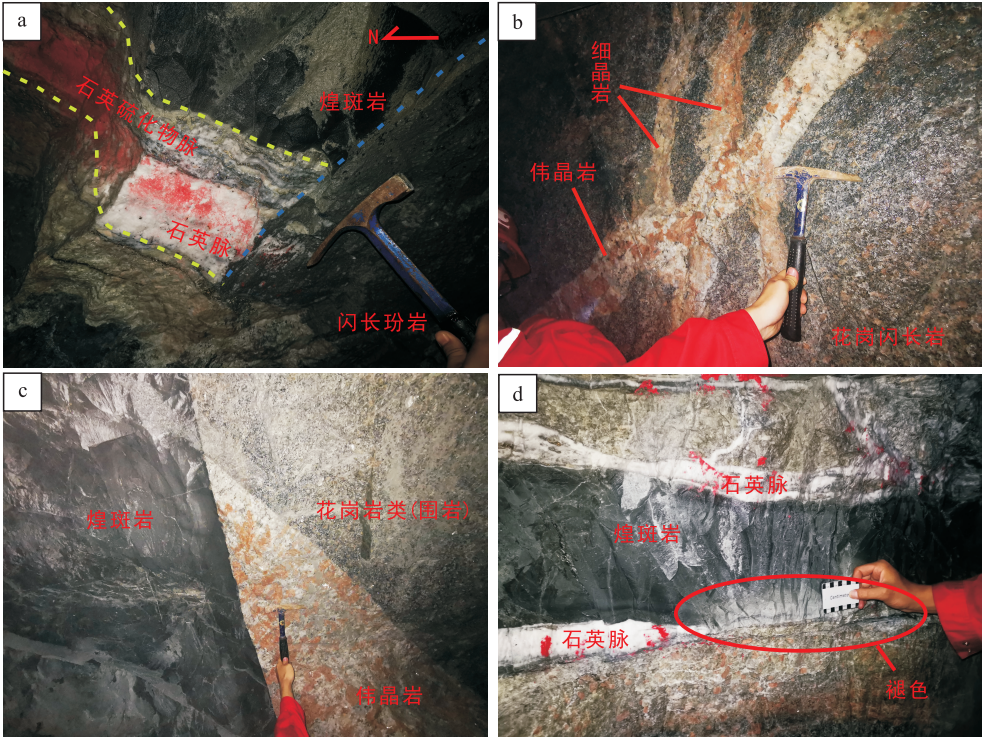
黑岚沟金矿田岩浆岩发育燕山早期玲珑二长花岗岩系列及郭家岭型花岗闪长岩系列。另外,有燕山晚期中基性、中酸性脉岩。其中,玲珑花岗岩和郭家岭花岗岩来源于下地壳部分熔融(蒋少涌等, 2009)。

玲珑二长花岗岩( $\gamma_2^1$ )呈浅灰色,矿物组成主要有钾长石、斜长石、石英和云母等,黑云母等暗色矿物定向排列,片麻状结构。玲珑花岗岩的 SHRIMP U - Pb 年龄为(158±3) Ma(宋雪龙等, 2014; Feng et al. , 2018; 宋英昕等, 2018),早于金成矿形成时代;郭家岭花岗闪长岩( $\gamma_s^2$ )呈灰色和暗灰色,矿物主要为斜长石、石英、角闪石、钾长石和云母等,似斑状结构,也可见蠕虫状结构和微文象结构等。郭家岭花岗岩的 SHRIMP U - Pb 年龄为 130~126 Ma(宋雪龙等,

2014;Feng et al. ,2018;宋英昕等,2018),略早于金成矿时代。在井下观察,矿体围岩为玲珑花岗岩或郭家岭花岗岩,根据从井下岩体切穿关系,结合前人年代学研究,推测这两类花岗岩与黑岚沟金矿田金成矿关系不密切,深部可能存在未被揭露且与成矿有关的地质体。

矿区内脉岩主要有煌斑岩、闪长岩、闪长玢岩、伟晶岩等脉岩(图 4a、图 4b、图 4d),规模相对较小,主要穿插于玲珑型花岗岩和郭家岭花岗闪长岩体内

(图 4b)。局部含 Au 石英脉沿煌斑岩脉两侧发育(图 4d),宽度在 1~10 cm,多处呈闪长玢岩脉或煌斑岩脉错断矿脉的现象(图 4a、图 4c)。根据图 4 中几种岩浆岩与矿脉之间的穿切关系,表明由早到晚依次是玲珑花岗岩体、郭家岭花岗闪长岩、浅色细晶岩脉、伟晶岩脉、矿体、煌斑岩脉、闪长岩脉、闪长玢岩脉等。其中,煌斑岩大致有 2 期,成矿前和成矿后的煌斑岩脉均有发育。



a. 闪长玢岩切煌斑岩、矿体;b. 细晶岩沿裂隙填充花岗闪长岩,后被伟晶岩脉切穿;c. 煌斑岩切花岗岩和伟晶岩;d. 石英脉沿着煌斑岩生长,出现烘烤边,围岩褪色

图 4 胶东黑岚沟金矿田矿脉和脉岩穿切关系图

Fig. 4 Cross cutting relationship between vein and vein rock in Heilangou gold field, Jiaodong

### 3 样品采集及测试方法

黄铁矿的热电性研究是金矿深部预测及判别矿床成因类型的重要手段之一(孙岱生等,1987)。通过黄铁矿的热电性研究,提取黑岚沟金矿田的深部找矿信息,取样至关重要,原则上,为保证数据的全面性和准确性,取样要涉及矿田内典型金矿床和样品的垂向分布。

在当前矿山开采条件下,在黑岚沟金矿田(包括黑岚沟金矿、初格庄金矿、齐沟金矿、河西金矿和侯

格庄等金矿)采集样品共计 57 件;通过实验室镜下观察热电测试样片与光薄片(图 5),挑选出不同成矿阶段(绢英岩化阶段、黄铁石英阶段、石英黄铁矿阶段、多金属硫化物阶段和碳酸盐阶段)的黄铁矿样品共计 46 件。

黄铁矿热电性测试方法采用改进后的黄铁矿薄片原位测试法,相比传统颗粒测试黄铁矿热电性的方法,其优点是提高了测试目标的精确度,测试样片中矿物颗粒可以通过镜下观察划分出不同成矿阶段,更精准地对黄铁矿进行热电性测试(吴晋超等,2019)。

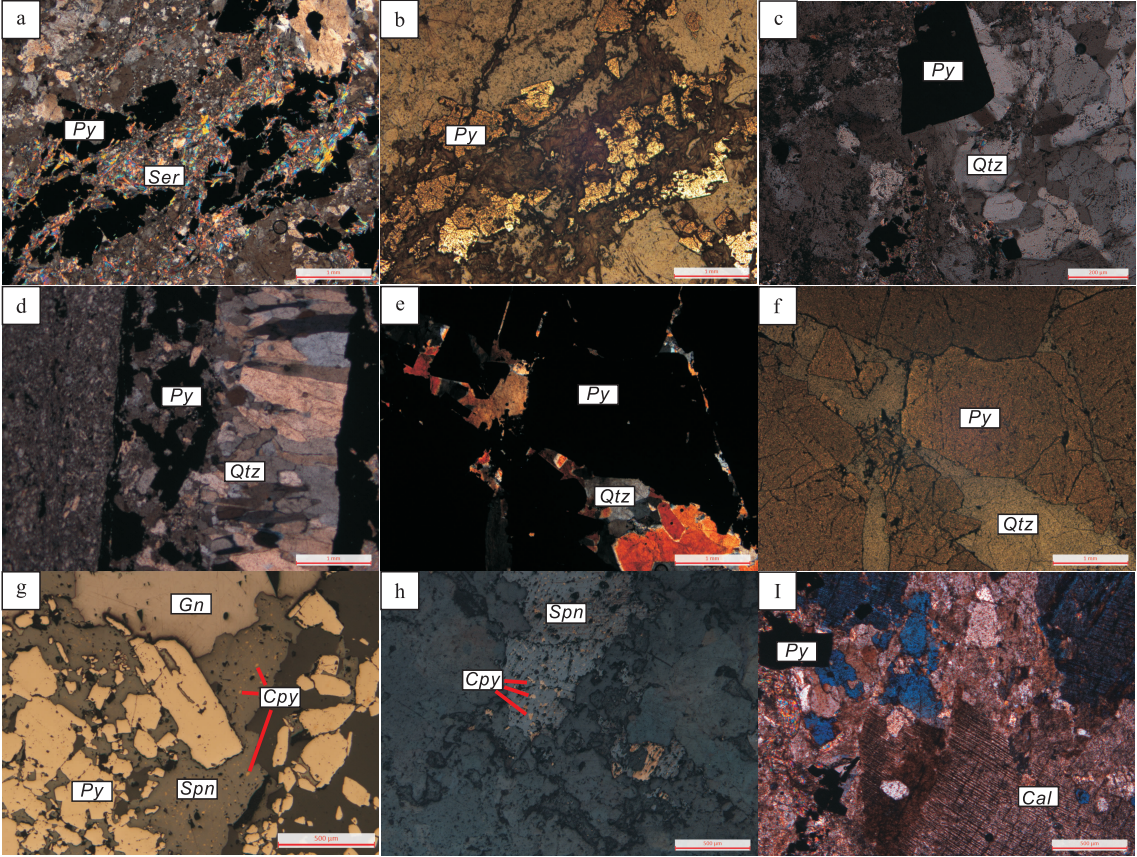


图 5 黑岚沟金矿田主成矿阶段黄铁矿镜下照片

Fig. 5 Microscopic photograph of pyrite in main mineralization stage of Heilangou gold field

绢英岩化阶段(图 5a、图 5b):主要矿物为石英、黄铁矿和绢云母。该阶段矿化为最早期的矿化,矿化程度极弱或无矿化;黄铁石英阶段(图 5c、图 5d):主要矿物为石英、黄铁矿,黄铁矿含量相对较少,矿化程度相对较弱;石英黄铁矿阶段(图 5e、图 5f):主要矿物为石英、黄铁矿,黄铁矿含量相对上一阶段较多,矿化程度更高;多金属硫化物阶段(图 5g、图 5h):该阶段主要矿物为黄铁矿、石英、方铅矿、闪锌矿和黄铜矿,矿化程度较强。

黄铁矿多呈自形-半自形粒状结构、浸染状构造,部分聚集呈脉状,闪锌矿中出融黄铜矿;碳酸盐阶段(图 5i):晚期矿化阶段,碳酸盐细脉广泛产出,黄铁矿为自形半自形,还可见聚形,主要呈团块状产出。

黄铁矿样品的热电性测试在中国地质大学(北京)地球科学与资源学院矿物标型实验室完成。先在显微镜下观察每件热电测试样片,划分不同成矿阶段的黄铁矿颗粒,分别测试目标阶段的黄铁矿热电性。使用的测试仪器是改良版的 BHTE-08 热

电系数测试仪,设置冷端温度和热端温度分别为 30℃和 90℃,将活化温度控制为  $60 \pm 1^\circ\text{C}$ 。每个热电测试样品选取主成矿阶段的黄铁矿进行测试,每个样品测试不少于 50 个数据点。

#### 4 黄铁矿热电性测试结果与讨论

通过黄铁矿薄片原位测试法测得 46 件样品的主成矿阶段黄铁矿的热电性数据(表 1)。由测试数据可以得出研究区内所有黄铁矿样品的热电性 P 型率较高,为 66%~100%,主要集中在 90%~100%,黑岚沟矿集区黄铁矿样品的 P 型率数值整体较高。通过每个样品测试得到共计 2 211 个数据,绘制黑岚沟黄铁矿样品热电系数频数分布直方图(图 6),结合表 1 和图 6 可得出,P 型黄铁矿热电系数在  $3.4 \sim 340.1 \mu\text{V} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ,集中于  $200 \sim 350 \mu\text{V} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ,热电系数整体偏高。46 件黄铁矿样品中有 24 件样品的 P 型率为 100%,剩余 22 件样品

中的 N 型黄铁矿热电系数在  $-329.5 \sim -1.7 \mu\text{V} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$  内,集中于  $-150 \sim -20 \mu\text{V} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ 。同时统计不同成矿阶段黄铁矿热电性特征,得出表 2,得出黄铁矿石英阶段和石英黄铁矿阶段的热电性特征差异不大;多金属硫化物阶段黄铁矿本次研究测试得到

的热电导型都显示 P 型,该阶段 P 型黄铁矿的热电系数特征与前 2 个主成矿阶段的黄铁矿热电系数数值差异较小;绢英岩化阶段和碳酸盐化阶段矿化程度极低或无矿化,黄铁矿热电性系数差异与主成矿阶段差异不大,P 型导型率相对较低。

表 1 黑岚沟矿集区黄铁矿热电性测试结果表  
Tab. 1 Test results of pyroelectricity of pyrite in Heilangou gold field

| 标高(m) | 样品编号      | N 型热电系数( $\mu\text{V} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ) |        |        |        | P 型热电系数( $\mu\text{V} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ) |       |       |        |
|-------|-----------|----------------------------------------------------|--------|--------|--------|----------------------------------------------------|-------|-------|--------|
|       |           | 最大值                                                | 最小值    | 平均值    | 出现率(%) | 最大值                                                | 最小值   | 平均值   | 出现率(%) |
| -170  | 侯各庄-08-01 | —                                                  | —      | —      | 0      | 335.0                                              | 147.6 | 240.1 | 100    |
| -170  | 侯各庄-08-02 | —                                                  | —      | —      | 0      | 327.7                                              | 219.5 | 266.7 | 100    |
| -170  | 侯各庄-08-03 | —                                                  | —      | —      | 0      | 338.4                                              | 212.0 | 278.5 | 100    |
| -170  | 侯各庄-08-05 | —                                                  | —      | —      | 0      | 334.5                                              | 155.1 | 259.2 | 100    |
| -170  | 侯各庄-08-08 | —                                                  | —      | —      | 0      | 323.9                                              | 235.7 | 281.4 | 100    |
| -250  | 侯各庄-10-01 | -15.1                                              | -85.1  | -48.5  | 10     | 324.3                                              | 20.0  | 235.2 | 90     |
| -250  | 侯各庄-10-02 | —                                                  | —      | —      | 0      | 336.1                                              | 198.0 | 276.6 | 100    |
| -250  | 侯各庄-10-03 | -3.4                                               | -208.8 | -81.3  | 8      | 338.4                                              | 8.4   | 232.1 | 92     |
| -250  | 侯各庄-10-04 | -26.2                                              | -132   | -66.2  | 11     | 335.0                                              | 59.5  | 215.3 | 89     |
| -260  | 初格庄-11-01 | —                                                  | —      | —      | 0      | 321.5                                              | 210.0 | 270.7 | 100    |
| -260  | 初格庄-11-05 | -10                                                | -278.1 | -105.0 | 16     | 323.9                                              | 30.0  | 225.2 | 84     |
| -300  | 初格庄-12-06 | —                                                  | —      | —      | 0      | 329.9                                              | 173.4 | 271.1 | 100    |
| -300  | 初格庄-12-07 | —                                                  | —      | —      | 0      | 333.3                                              | 148.5 | 248.4 | 100    |
| -300  | 初格庄-12-08 | —                                                  | —      | —      | 0      | 336.1                                              | 212.0 | 262.2 | 100    |
| -300  | 初格庄-12-09 | —                                                  | —      | —      | 0      | 330.0                                              | 237.9 | 278.6 | 100    |
| -300  | 初格庄-12-10 | —                                                  | —      | —      | 0      | 324.3                                              | 58.9  | 230.3 | 100    |
| -300  | 齐沟-12-01  | -79.5                                              | -253.8 | -162.6 | 26     | 291.0                                              | 183.6 | 246.4 | 74     |
| -300  | 齐沟-12-03  | —                                                  | —      | —      | 0      | 333.3                                              | 196.7 | 269.4 | 100    |
| -390  | 河西-10-01  | -10.1                                              | -66.2  | -36.6  | 10     | 331.7                                              | 10.2  | 240.3 | 90     |
| -390  | 河西-10-02  | —                                                  | —      | —      | 0      | 329.9                                              | 72.8  | 274.2 | 100    |
| -390  | 河西-10-03  | -8.4                                               | -50.5  | -24.6  | 6      | 331.6                                              | 31.8  | 260.1 | 94     |
| -456  | 黑岚沟-16-01 | —                                                  | —      | —      | 0      | 327.9                                              | 3.4   | 190.6 | 100    |
| -456  | 黑岚沟-16-02 | —                                                  | —      | —      | 0      | 339.6                                              | 56.0  | 249.6 | 100    |
| -510  | 河西-13-01  | —                                                  | —      | —      | 0      | 316.7                                              | 96.1  | 221.8 | 100    |
| -510  | 河西-13-02  | -10.3                                              | -110.9 | -52.7  | 5      | 339.6                                              | 133.7 | 254.0 | 95     |
| -510  | 河西-13-03  | -8.3                                               | -125.8 | -67.1  | 2      | 336.1                                              | 21.9  | 253.4 | 98     |
| -510  | 河西-13-04  | —                                                  | —      | —      | 0      | 340.1                                              | 215.9 | 289.1 | 100    |
| -510  | 河西-13-05  | -30.3                                              | -245.8 | -131.2 | 10     | 333.9                                              | 10.1  | 268.6 | 90     |
| -510  | 河西-13-06  | -72.3                                              | -93.7  | -83    | 2      | 336.1                                              | 11.8  | 265.3 | 98     |
| -510  | 河西-13-07  | -9.9                                               | -39.7  | -22.0  | 10     | 334.5                                              | 38.6  | 235.8 | 90     |
| -550  | 河西-14-07  | —                                                  | —      | —      | 0      | 316.0                                              | 137.6 | 254.3 | 100    |
| -550  | 河西-14-08  | —                                                  | —      | —      | 0      | 331.1                                              | 174.2 | 284.9 | 100    |
| -550  | 河西-14-09  | -1.7                                               | -320   | -159.1 | 34     | 340.1                                              | 16.7  | 190.7 | 66     |

续表 1

| 标高(m) | 样品编号      | N 型热电系数( $\mu\text{V} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ) |        |        |        | P 型热电系数( $\mu\text{V} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ) |       |       |        |
|-------|-----------|----------------------------------------------------|--------|--------|--------|----------------------------------------------------|-------|-------|--------|
|       |           | 最大值                                                | 最小值    | 平均值    | 出现率(%) | 最大值                                                | 最小值   | 平均值   | 出现率(%) |
| −550  | 河西−14−10  | −6.6                                               | −59.1  | −25.2  | 30     | 318.9                                              | 78.3  | 180.8 | 70     |
| −550  | 河西−14−12  | −15.0                                              | −197.3 | −106.2 | 2      | 337.8                                              | 6.6   | 264.7 | 98     |
| −550  | 河西−14−13  | −34.6                                              | −329.5 | −162.0 | 20     | 331.1                                              | 59.8  | 263.4 | 80     |
| −576  | 黑岚沟−19−02 | —                                                  | —      | —      | 0      | 291.0                                              | 273.5 | 282.3 | 100    |
| −590  | 河西−15−01  | —                                                  | —      | —      | 0      | 329.4                                              | 107.4 | 256.4 | 100    |
| −590  | 河西−15−02  | −31.8                                              | −73.8  | −48.6  | 4      | 338.4                                              | 22.0  | 247.3 | 96     |
| −590  | 河西−15−03  | −10                                                | −145.8 | −57.9  | 5      | 335.6                                              | 75.8  | 278.4 | 95     |
| −590  | 河西−15−04  | −1.7                                               | −106.8 | −45.7  | 8      | 337.3                                              | 15.0  | 202.5 | 92     |
| −590  | 河西−15−05  | −43                                                | −98.7  | −62.5  | 2      | 330.0                                              | 33.3  | 261.5 | 98     |
| −590  | 河西−15−06  | −25.1                                              | −208.3 | −117.0 | 10     | 336.7                                              | 8.3   | 237.7 | 90     |
| −616  | 黑岚沟−20−01 | —                                                  | —      | —      | 0      | 319.6                                              | 176.5 | 265.1 | 100    |
| −616  | 黑岚沟−20−02 | −33.2                                              | −112.8 | −66.0  | 10     | 322.0                                              | 4.9   | 199.2 | 90     |
| −616  | 黑岚沟−20−04 | —                                                  | —      | —      | 0      | 334.5                                              | 175.0 | 299.9 | 100    |

表 2 黑岚沟金矿田成矿阶段黄铁矿热电性特征表  
Tab. 2 Thermoelectric characteristics of pyrite in the mineralization stage of Heilangou gold field

| 成矿阶段     | N 型热电系数( $\mu\text{V} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ) |        |        |        | P 型热电系数( $\mu\text{V} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ) |      |       |        |
|----------|----------------------------------------------------|--------|--------|--------|----------------------------------------------------|------|-------|--------|
|          | 最大值                                                | 最小值    | 平均值    | 出现率(%) | 最大值                                                | 最小值  | 平均值   | 出现率(%) |
| 绢英岩化阶段   | −31.8                                              | −253.8 | −105.6 | 10     | 338.4                                              | 22.0 | 258.4 | 90     |
| 黄铁石英英阶段  | −9.9                                               | −110.9 | −37.4  | 8      | 339.6                                              | 38.6 | 248.7 | 92     |
| 石英黄铁矿阶段  | −1.7                                               | −329.5 | −101.4 | 9      | 339.6                                              | 3.4  | 233.6 | 91     |
| 多金属硫化物阶段 | —                                                  | —      | —      | 0      | 336.1                                              | 58.9 | 267.8 | 100    |
| 碳酸盐阶段    | −6.6                                               | −125.8 | −46.2  | 8      | 338.4                                              | 21.9 | 244.9 | 92     |

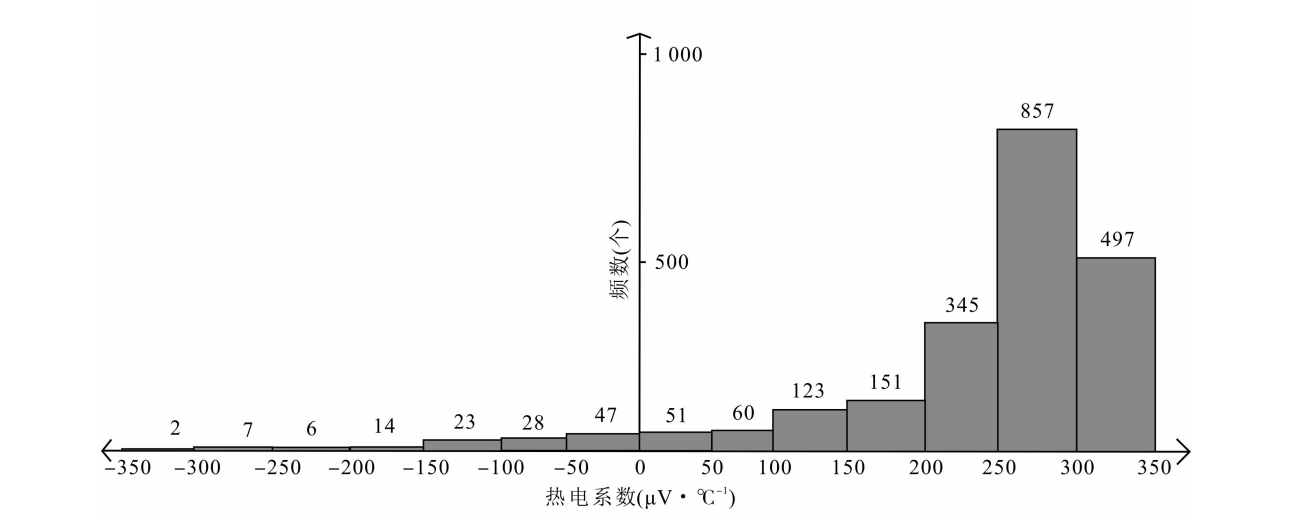


图 6 黑岚沟金矿田黄铁矿热电系数频数直方图  
Fig. 6 Frequency histogram of thermoelectric coefficient of pyrite in Heilangou gold field

4.1 黄铁矿 P 型率

黄铁矿的热电性研究对于金矿深部预测有着重要的意义,是一种较为实用且可靠的研究方法(孙岱生等,1987)。当金矿中某位置黄铁矿的热电性 P 型黄铁矿较多时,一般可以指示该点金成矿可能较好(李胜荣等,1994);同时,金矿中的黄铁矿的热电性导型在垂向上的分布规律对金矿找矿预测也有着重要的意义。一般情况下,矿体顶部或上部黄铁矿热电导型以 P 型为主,不含或极少 N 型,随着深度的不断增加,P 型黄铁矿的占比逐渐减少,到达矿体底部时,黄铁矿的热电导型以 N 型黄铁矿为主,少量或者不含 P 型黄铁矿(邵伟等,1990;李胜荣等,1993;申俊峰等,2013;刘华南等,2018;高永伟等,2019)。

黑岚沟金矿田采集到的 46 件黄铁矿样品分布于-170~-616 m,且同一深度的取样数量并不唯一,整理 46 件样品,其中有 22 件样品从河西金矿的 4 个中段取得,综合整理得到不同深部下河西金矿和黑岚沟金矿黄铁矿的热电导型 P 型率(表 3、表 4)。以表 3 的热电导型 P 型率绘制河西金矿不同深度黄铁矿热电性 P 型率平均值垂向分布图(图 7),河西金矿采集样品缺少-390~-510 m 的样品,图 7 中以虚线过渡表示,但从图中可以整体看出,-390~-590 m 内,黄铁矿的热电性 P 型率垂向上随着深度有一定的升降变化,但整体上都保持着一个较高的 P 型率数值。由此可以推测河西金矿在该研究的区间仍然可能处于矿体的顶部或者上部,下部金矿可能还具有一定的成矿潜力。

表 3 河西金矿不同深度黄铁矿热电性 P 型率表

Tab. 3 Pyroelectric p - type ratios of pyrite in different depths of Hexi Gold Mine

| 深度(m)   | -390 | -510 | -550 | -590 |
|---------|------|------|------|------|
| P 型率(%) | 95   | 96   | 86   | 95   |

表 4 黑岚沟金矿田不同深度黄铁矿热电性 P 型率表

Tab. 4 Pyroelectric p - type ratios of pyrite in different depths in Heilangou gold field

| 深度(m)   | -170 | -250 | -260 | -300 | -390 | -456 | -510 | -550 | -576 | -590 | -616 |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| P 型率(%) | 100  | 93   | 92   | 94   | 95   | 100  | 96   | 86   | 100  | 95   | 97   |

4.2 黄铁矿热电系数

依据前人的研究认为,黄铁矿热电性的热电系数离散范围是指示金矿矿化强弱的重要依据,这里的热电系数离散范围指的是热电系数的变化区间,

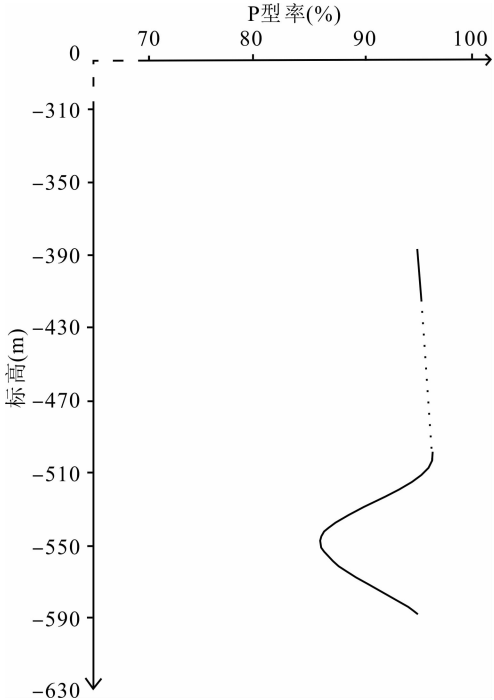


图 7 河西金矿不同深度黄铁矿热电性 P 型率平均值垂向分布图

Fig. 7 Vertical distribution of pyroelectric P - type rate of pyrite in different depths of Hexi Gold Mine

以表 4 的热电导型 P 型率绘制黑岚沟金矿田不同深度黄铁矿热电性 P 型率平均值垂向分布图(图 8)。通过图 8 可以看出,黑岚沟金矿田从-170~-616m 的黄铁矿 P 型率较高,范围为 86%~100%,虽然 P 型率在这个区间随着深度有一定的变化趋势,但研究区内不同深度黄铁矿 P 型率基本都在 90%以上,保持着一个较高的数值。由此可以推测出本次的这个研究区间可能还处于金矿体的上部,下部成矿潜力较大。通过黄铁矿热电性导型在垂向上的分布情况比较,河西金矿与黑岚沟金矿田的深部矿体预测结果也相对应。

当热电系数的离散范围较大时,一般可以指示金矿的矿化较强,同时矿体的规模也可能较大,金矿的矿石品位可能较高(陈光远等,1989;李胜荣等,1996;李青等,2013)。

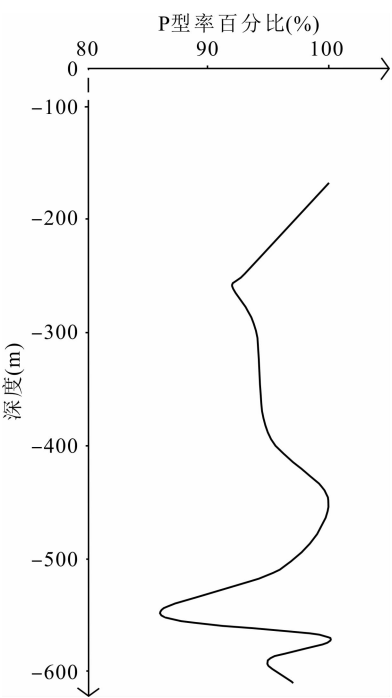


图 8 黑岚沟金矿田不同深度黄铁矿热电性 P 型率平均值垂向分布图

Fig. 8 Vertical distribution of pyroelectric p - type ratio of pyrite in different depths in Heilangou gold field

通过表 1 中各个金矿的黄铁矿热电系数范围,整理得出黑岚沟金矿田典型金矿床黄铁矿热电系数离散范围图(图 9)。从图 9 可以明显看出,黑岚沟金矿田中,初格庄、侯各庄、黑岚沟、河西和齐沟金矿中黄铁矿热电系数的离散范围都较大,初格庄金矿中黄铁矿热电系数的离散范围为 $-287.1\sim336.1\mu\text{V}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ ;侯各庄金矿中黄铁矿热电系数的离散范围为 $-208.8\sim338.4\mu\text{V}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ ,黑岚沟金矿中黄铁矿热电系数的离散范围为 $-112.8\sim339.6\mu\text{V}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ ;河西金矿中黄铁矿热电系数的离散范围为 $-329.5\sim340.1\mu\text{V}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ ;齐沟金矿中黄铁矿热电系数的离散范围为 $-253.8\sim333.3\mu\text{V}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。说

明研究区内黄铁矿热电系数离散范围整体较大,表明黑岚沟金矿田金矿化可能较强,深部矿体的规模可能相对较大,同时金的品位可能也较高,其深部可能具有较好的成矿潜力。

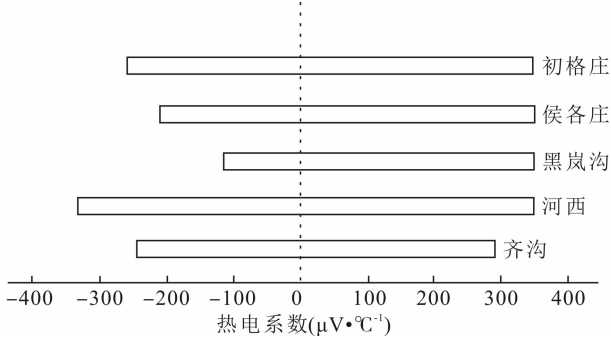


图 9 黑岚沟金矿田各金矿黄铁矿热电系数离散范围图  
Fig. 9 Discrete range of thermoelectric coefficient of pyrite in Heilangou gold field

4.3 矿体延伸指数

矿体的延伸指数是指矿体被采探位置相对于整个矿体总延伸的百分比(邵伟等,1990)。黄铁矿的热电系数( $\alpha$ )通过下面的公式(1)计算得出黄铁矿的补偿热电参数( $X_{np}$ ),黄铁矿的补偿热电参数( $X_{np}$ )可以通过式(2)计算出矿体的延伸指数( $\gamma$ )(杨国杰等,1992;侯满堂,2000;张屿等,2010):

$$X_{np}=(2f_{\text{I}}+f_{\text{II}})-(f_{\text{III}}+2f_{\text{IV}})\tag{1}$$

$$\gamma=50-X_{np}/4\tag{2}$$

式中的  $f_x$  是指热电系数在一定范围内的数据点所占样品总数据点的百分比; $f_{\text{I}}$  是指热电系数范围高于  $400\mu\text{V}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$  的百分比; $f_{\text{II}}$  是指热电系数范围在  $200\sim400\mu\text{V}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$  的百分比; $f_{\text{III}}$  是指热电系数范围在  $-200\sim0\mu\text{V}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$  的百分比; $f_{\text{IV}}$  是指热电系数范围为小于  $-200\mu\text{V}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$  的部分的百分比。根据上述 2 个公式计算出黑岚沟金矿田典型金矿床黄铁矿样品指示的延伸指数( $\gamma$ ),结果见表 5。

表 5 黑岚沟金矿田黄铁矿补偿热电系数与延伸指数表

Tab. 5 Compensated thermoelectric coefficient and elongation index of pyrite in Heilangou gold field

| 样品号     | $f_{\text{I}}$ | $f_{\text{II}}$ | $f_{\text{III}}$ | $f_{\text{IV}}$ | $X_{np}$ | $\gamma$ | 样品号      | $f_{\text{I}}$ | $f_{\text{II}}$ | $f_{\text{III}}$ | $X_{np}$ | $\gamma$ |
|---------|----------------|-----------------|------------------|-----------------|----------|----------|----------|----------------|-----------------|------------------|----------|----------|
| 河西-10-1 | 0              | 70              | 7                | 0               | 63       | 34.2     | 初格庄-11-1 | 0              | 100             | 0                | 100      | 25.0     |
| 河西-10-2 | 0              | 97              | 0                | 0               | 97       | 25.8     | 初格庄-11-5 | 0              | 60              | 12               | 40       | 40.0     |
| 河西-10-3 | 0              | 78              | 6                | 0               | 72       | 32.0     | 初格庄-12-6 | 0              | 95              | 0                | 95       | 26.3     |
| 河西-13-1 | 0              | 65              | 0                | 0               | 65       | 33.8     | 初格庄-12-7 | 0              | 70              | 0                | 70       | 32.5     |

续表 5

| 样品号      | $f_{\text{I}}$ | $f_{\text{II}}$ | $f_{\text{III}}$ | $f_{\text{IV}}$ | $X_{\text{np}}$ | $\gamma$ | 样品号       | $f_{\text{I}}$ | $f_{\text{II}}$ | $f_{\text{III}}$ | $X_{\text{np}}$ | $\gamma$ |
|----------|----------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|----------|-----------|----------------|-----------------|------------------|-----------------|----------|
| 河西-13-2  | 0              | 80              | 1                | 0               | 79              | 30.3     | 初格庄-12-8  | 0              | 100             | 0                | 100             | 25.0     |
| 河西-13-3  | 0              | 82              | 1                | 0               | 81              | 29.8     | 初格庄-12-9  | 0              | 100             | 0                | 100             | 25.0     |
| 河西-13-4  | 0              | 70              | 0                | 0               | 70              | 32.5     | 初格庄-12-10 | 0              | 89              | 0                | 89              | 27.8     |
| 河西-13-5  | 0              | 78              | 7                | 1               | 69              | 32.8     | 侯各庄-08-1  | 0              | 80              | 0                | 80              | 30.0     |
| 河西-13-6  | 0              | 81              | 1                | 0               | 80              | 30.0     | 侯各庄-08-2  | 0              | 100             | 0                | 100             | 25.0     |
| 河西-13-7  | 0              | 60              | 3                | 0               | 57              | 35.8     | 侯各庄-08-3  | 0              | 100             | 0                | 100             | 25.0     |
| 河西-14-07 | 0              | 80              | 0                | 0               | 80              | 30.0     | 侯各庄-08-5  | 0              | 93              | 0                | 93              | 26.8     |
| 河西-14-08 | 0              | 95              | 0                | 0               | 95              | 26.3     | 侯各庄-08-8  | 0              | 100             | 0                | 100             | 25.0     |
| 河西-14-09 | 0              | 76              | 6                | 8               | 54              | 36.5     | 侯各庄-10-1  | 0              | 70              | 10               | 60              | 35.0     |
| 河西-14-10 | 0              | 80              | 6                | 2               | 70              | 32.5     | 侯各庄-10-2  | 0              | 98              | 0                | 98              | 25.5     |
| 河西-14-12 | 0              | 88              | 2                | 0               | 86              | 28.5     | 侯各庄-10-3  | 0              | 70              | 4                | 62              | 34.5     |
| 河西-14-13 | 0              | 64              | 14               | 6               | 38              | 40.5     | 侯各庄-10-4  | 0              | 66              | 10               | 56              | 36.0     |
| 河西-15-1  | 0              | 87              | 0                | 0               | 87              | 28.3     | 黑岚沟-16-1  | 0              | 54              | 0                | 54              | 36.5     |
| 河西-15-2  | 0              | 76              | 4                | 0               | 72              | 32.0     | 黑岚沟-16-2  | 0              | 84              | 0                | 84              | 29.0     |
| 河西-15-3  | 0              | 91              | 5                | 0               | 86              | 28.5     | 黑岚沟-19-2  | 0              | 100             | 0                | 100             | 25.0     |
| 河西-15-4  | 0              | 69              | 5                | 0               | 64              | 34.0     | 黑岚沟-20-1  | 0              | 94              | 0                | 94              | 26.5     |
| 河西-15-5  | 0              | 86              | 2                | 0               | 84              | 29.0     | 黑岚沟-20-2  | 0              | 64              | 10               | 54              | 36.5     |
| 河西-15-6  | 0              | 70              | 4                | 2               | 62              | 34.5     | 黑岚沟-20-4  | 0              | 95              | 0                | 95              | 26.3     |
| 黑金顶-08-1 | 0              | 98              | 0                | 0               | 98              | 25.5     | 齐沟-12-01  | 0              | 70              | 10               | 50              | 37.5     |
| 黑金顶-08-2 | 0              | 100             | 0                | 0               | 100             | 25.0     | 齐沟-12-03  | 0              | 90              | 0                | 90              | 27.5     |

通过表 5 可以看出,黑岚沟金矿田的研究区在-170~-616 m 内矿体的延伸指数范围约为 25%~40.5%,平均值为 30.4%。研究区间内矿体延伸指数在垂向上无明显的升降变化,但保持在 30.4%左右的数值,说明现阶段研究区内矿体的位置应该处于矿体的上部,下部成矿潜力应该较大。

4.4 黄铁矿成矿温度

黄铁矿的热电系数与其形成温度具有一定的线性相关(邵伟等,1990;侯满堂,2000;李杰等,2016),戈尔巴乔夫线性方程式如下。

$T=3(122.22+\alpha)/5$  (P 型黄铁矿)

$T=(704.51-\alpha)/1.818$  (N 型黄铁矿)

式中: $T$  为黄铁矿形成温度; $\alpha$  为黄铁矿热电系数。利用上述线性方程式将不同热导型黄铁矿分别计算出对应黄铁矿的形成温度,整理黑岚沟金矿田内采集的 46 件黄铁矿样品中测试的 2 211 个数据点,计算形成温度后绘制黄铁矿热电系数计算温度分布直方图(图 10)。通过计算结果和图 10 可

知,黑岚沟金矿田黄铁矿的形成温度约在 74.7~568.8 ℃,其中 P 型黄铁矿的形成温度在 74.4~277.4 ℃;N 型导型黄铁矿的形成温度在 388.5~568.8 ℃。从图 7 中可以明显看出 P 型导型黄铁矿的形成温度峰值在 240~300 ℃;N 型导型黄铁矿的数量较少,无明显峰值区间。计算结果在 140~300 ℃的数据点占总数据点的 90%以上,显示黑岚沟金矿田上部主要为中低温矿床。

通过对黑岚沟金矿田黄铁矿的热电性研究可知,区内黄铁矿的形成温度集中在 140~300 ℃,表明黑岚沟金矿田内主要为中低温热液型矿床。通过黄铁矿热导型的垂向分布特征和矿体的延伸指数两方面可知,矿田内黄铁矿整体保持近 90%以上的 P 型率和通过计算得到的 30.4%的延伸指数,表明研究区间(-170~-616 m)仍然处于矿体顶部或者上部。同时较大的黄铁矿热电系数离散范围指示深部矿体的规模可能较大,金的品位可能较高,推测黑岚沟金矿田深部的成矿潜力较大。

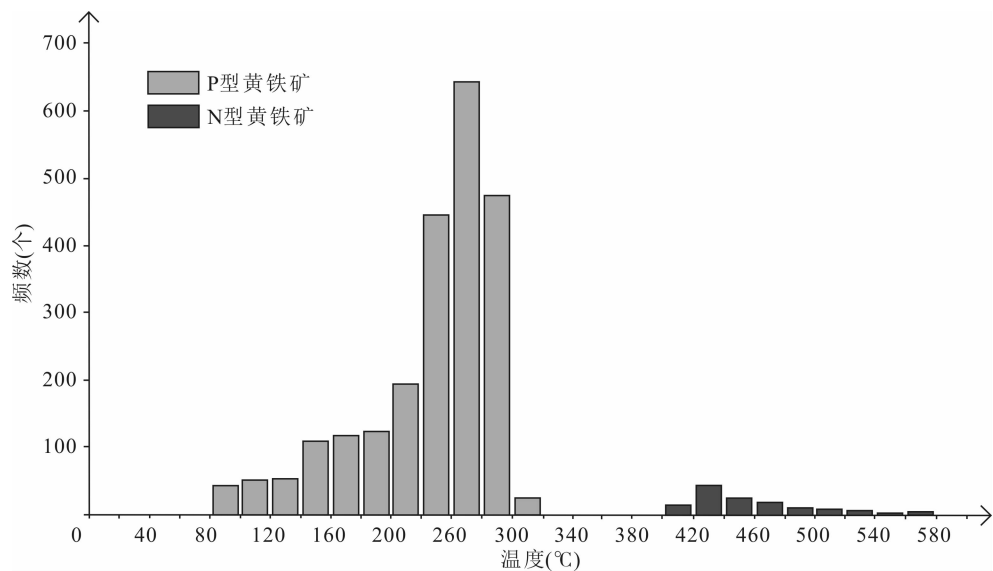


图 10 黑岚沟金矿田黄铁矿热电系数计算温度分布直方图

Fig. 10 Temperature distribution histogram of pyrite thermoelectric coefficient calculation in Heilangou gold field

5 结论

- (1)黑岚沟金矿田内黄铁矿的热电导型 P 型率基本都在 90% 以上,同时热电系数主要集中在  $200\sim350\mu\text{V}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ ,且离散范围较大,推测目前探采部位仍然处于矿床上部或者顶部,且矿体的垂向延伸可能较大。
- (2)通过热电系数计算的成矿延伸指数平均值为 30.4%,推测目前探采部位应该处于矿床的上部。
- (3)通过黄铁矿的热电系数计算得出的黄铁矿形成温度主要集中在  $140\sim300^{\circ}\text{C}$ ,表明黑岚沟金矿田上部主要以中-低温热液型矿床为主。

参考文献(References):

陈光远,孙岱生,张立,等. 黄铁矿成因形态学[J]. 现代地质,1987,6(1):139-140.

CHEN Guangyuan, SUN Daisheng, ZHANG Li, et al. Genetic morphology of pyrite[J]. Geoscience, 1987, 6(1): 139-140.

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(04):907-922.

CHEN Yanjing, FRANCO P, LAI Yong, et al. Metallogenic time and tectonic setting of the Jiaodong gold province, eastern China [J]. Acta Petrologica Sinica,

2004,20(04): 907-922.

丁正江,孙丰月,刘福来,等. 胶东中生代动力学演化及主要金属矿床成矿系列 [J]. 岩石学报, 2015, 31 (10): 3045-3080.

DING Zhengjiang, SUN Fengyue, LIU Fulai, et al. Mesozoic geodynamic evolution and metallogenic series of major metal deposits in Jiaodong Peninsula, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2015, 31(10): 3045-3080.

杜长学,韩云松,范东宣,等. 招平断裂地质特征及形成机制探讨[J]. 山东地质,1991,7(2):51-59.

DU Changxue, HAN Yunsong, FAN Dongxuan, et al. Geological characteristics and formation mechanism of Zhaoping fault[J]. Geology of Shandong, 1991, 7(2): 51-59.

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(05):1317-1328.

FAN Hongrui, HU Fangfang, YANG Jinhui, et al. Fluid evolution and large-scale gold metallogeny during Mesozoic tectonic transition in the eastern Shandong province [J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21(05): 1317-1328.

高永伟,王志华,黎卫亮,等. 热液型金矿床中的黄铁矿矿物学研究综述[J]. 西北地质, 2019, 52(03):58-69.

GAO Yongwei, WANG Zhihua, LI Weiliang, et al. A Review of Pyrite Mineralogy Research in Hydrothermal Gold Deposits [J]. Northwestern Geology, 2019, 52 (03): 58-69.

葛平江,廉宗根,许国庆,等. 河西金矿深部矿床地质特征及找矿方向[J]. 中国矿山工程,2007,06:21-24.

- GE Pingjiang, LIAN Zonggen, XU Guoqing, et al. Geological characteristics and prospecting direction of Hexi gold deposit deep area [J]. China Mining Engineering, 2007, 06:21-24.
- 侯满堂. 陕西镇安太白庙金矿黄铁矿热电性特征研究及其应用[J]. 黄金, 2000, 07:5-10.
- HOU Mantang. Study and application of the thermoelectricity characteristics of pyrite of Taibaimiao golddeposit, Zhen-ancounty, Shaanxi province [J]. Gold, 2000, 07:5-10.
- 侯明兰, 丁昕, 蒋少涌. 胶东蓬莱河西金矿床铅、硫同位素地球化学特征[J]. 地球学报, 2004, 25(02):145-150.
- HOU Minglan, DING Xin, JIANG Shaoyong. Lead and Sulfur Isotope Geochemistry of the Hexi Gold Deposit in Penglai, Eastern Shandong [J]. Acta Geologica Sinica, 2004, 25(02):145-150.
- 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(10):2525-2533.
- HOU Minglan, JIANG Shaoyong, JIANG Yaohui, et al. S-Pb isotope geochemistry and Rb-Sr geochronology of the Penglai gold field in the eastern Shangdong province [J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(10):2525-2533.
- 胡受奚, 赵乙英, 卢冰, 等. 胶北地体金矿富集的构造环境 [J]. 地质找矿论丛, 1993, 8(1):1-10.
- HU Shouxi, ZHAO Yiyang, LU Bing, et al. Tectonic environment for gold enrichment in Jiaobei terrane. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 1993, 8(1):1-10.
- 贾建业. 主要载金矿物及其找矿意义[J]. 西北地质, 1996, 17(03):7-14.
- JIA Jianye. Main gold bearing minerals and their prospecting significance[J]. Northwestern Geology, 1996, 17(03):17-14.
- 蒋少涌, 戴宝章, 姜耀辉, 等. 胶东和小秦岭:两类不同构造环境中的造山型金矿省[J]. 岩石学报, 2009, 25(11):2727-2738.
- JIANG Shaoyong, DAI Baozhang, JIANG Yaohui, et al. Jiaodong and Xiaolinling: two orogenic gold provinces formed in different tectonic settings [J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(11):2727-2738.
- 蓝信杰, 赵宪东, 卢文姬, 等. 胶东地区金成矿带成矿潜力及找矿前景分析[J]. 中国高新技术, 2019, 47(11):41-43.
- LAN Xinjie, ZHAO Xiandong, LU Wenji, et al. Analysis of metallogenic potential and prospecting prospect of gold metallogenic belt in Jiaodong area [J]. Zhong Guo Gao Xin Keji, 2019, 47(11):41-43.
- 李洪杰, 戚静洁, 马树江. 胶西北地区金矿床构造控矿规律 [J]. 黄金科学技术, 2010, 18(4):41-46.
- LI Hongjie, QI Jingjie, MA Shuijiang. Structural Ore-controlling Rules of Gold Deposit in Northwestern Jiaodong [J]. Gold Science and Technology, 2010, 18(4):41-46.
- 李洪奎, 陈国栋, 耿科, 等. 山东胶东金矿成矿地质背景初论 [J]. 山东国土资源, 2018, 34(05):34-41.
- LI Hongkui, CHEN Guodong, GENG Ke, et al. Primary Discussion on Mineralization Geological Background of Jiaodong Gold Deposits in Shandong Province [J]. Shangdong Land and Resources, 2018, 34(05):34-41.
- 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(03):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(03):202-210.
- 李青, 李胜荣, 张秀宝, 等. 河北省灵寿县西石门金矿黄铁矿热电性标型及其找矿意义 [J]. 地质学报, 2013, 87(04):542-553.
- LI Qing, LI Shengrong, ZHANG Xiubao, et al. Thermoelectric Coefficient of Pyrite from the Xishimen Gold Deposit in Lingshou County, Hebei Province and Its Prospecting Significance [J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87(04):542-553.
- LI Qing, LI Shengrong, ZHANG Xiubao, et al. Thermoelectric Coefficient of Pyrite from the Xishimen Gold Deposit in Lingshou County, Hebei Province and Its Prospecting Significance [J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87(04):542-553.
- 李胜荣, 陈光远, 邵伟, 等. 胶东乳山金矿石英形态与微形貌标型研究 [J]. 矿物岩石地球化学通讯, 1993, (03):122-125.
- LI Shengrong, CHEN Guangyuan, SHAO Wei, et al. Typomorphic study of quartz morphology and Micromorphology in Rushan Gold Deposit, Jiaodong [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 1993, (03):122-125.
- 李胜荣, 陈光远, 邵伟, 等. 胶东乳山金矿双山子矿区黄铁矿环带结构研究 [J]. 矿物学报, 1994, 14(02):152-156.
- LI Shengrong, CHEN Guangyuan, SHAO Wei, et al. Study on the zoning structure of pyrite in Shuangshanzi mining area of Rushan Gold Deposit, Jiaodong [J]. Acta Mineralogica Sinica, 1994, 14(02):152-156.
- 李胜荣, 陈光远, 邵伟, 等. 胶东乳山金青顶金矿区黄铁矿化学成分研究 [J]. 黄金科学技术, 1994, 2(06):7-12.
- LI Shengrong, CHEN Guangyuan, SHAO Wei, et al. Chemical constituents of pyrite from Jinqingding Gold Deposit, Rushan, Jiaodong [J]. Gold Science and Technology, 1994, 2(06):7-12.
- 刘华南, 刘家军, 李小伟, 等. 内蒙古新地沟金矿床黄铁矿热电性特征及深部找矿意义 [J]. 中国地质, 2018, 45(04):

819-838.

LIU Huanan, LIU Jiajun, LI Xiaowei, et al. Thermoelectric characteristics of pyrite from the Xindigou gold deposit in Inner Mongolia and its significance on deep prospecting[J]. *Geology in China*, 2018, 45(04): 819-838.

刘跃, 邓军, 王中亮, 等. 胶西北新城金矿床二长花岗岩岩石地球化学、锆石 U-Pb 年龄及 Lu-Hf 同位素组成[J]. *岩石学报*, 2014, 30(09): 2559-2573.

LIU Yue, DENG Jun, WANG Zhongliang, et al. Zircon U-Pb age, Lu-Hf isotopes and petrogeochemistry of the monzogranites from Xincheng gold deposit, northwestern Jiaodong Peninsula, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(09): 2559-2573.

刘洋, 张海东, 王金雅. 胶东地区夏甸金矿床构造蚀变带元素质量迁移与 Au 沉淀关系研究[J]. *西北地质*, 2017, 50(04): 176-185.

LIU Yang, ZHANG Haidong, WANG Jinya. Elements Migration in Tectonic-alteration Zones of the Xiadian Gold Deposit, Eastern Shandong Province and Its Relationship with Au Precipitation[J]. *Northwestern Geology*, 2017, 50(04): 176-185.

吕承训, NORBERT H. M, KENNETH J. B, 等. 胶东区域成矿断裂带蚀变年龄研究及其矿床学意义[J]. *地学前缘*, 2017, 24(02): 140-150.

LÜ Chengxun, NORBERT H. M, KENNETH J. B, et al. The alteration age of fracture zone and its implication for the formation of gold deposits in Jiaodong area[J]. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24(02): 140-150.

吕古贤. 我国中生代陆内“岩浆核隆起-拆离带”热液成矿的实例—胶东玲珑-焦家式金矿的成矿特征[A]. *中国地球科学联合学术年会*[C]. 2017, 57-59.

LÜ Guxian. An example of hydrothermal mineralization in Mesozoic intracontinental “magmatic uplift detachment zone” in China: metallogenic characteristics of Linglong Jiaojia type gold deposit in Jiaodong, China[A]. *Annual Meeting of Chinese Geoscience Union*[C]. 2017, 57-59.

毛先成, 王迷军, 刘占坤, 等. 基于勘查数据的胶东大尹格庄金矿床控矿地质因素定量分析[J]. *地学前缘*, 2019, 26(04): 84-93.

MAO Xiancheng, WANG Mijun, LIU Zhankun, et al. Quantitative analysis of ore-controlling factors based on exploration data of the Dayingezhuang gold deposit in the Jiaodong Peninsula[J]. *Earth Science Frontiers*, 2019, 26(04): 84-93.

邵伟, 陈光远, 孙岱生. 黄铁矿热电性研究方法及其在胶东金矿的应用[J]. *现代地质*, 1990, 4(01): 46-57.

SHAO Wei, CHEN Guangyuan, SUN Daisheng. Research

method of pyrite thermoelectricity and its application in Jiaodong gold deposit [J]. *Geoscience*, 1990, 4 (01): 46-57.

申俊峰, 李胜荣, 马广钢, 等. 玲珑金矿黄铁矿标型特征及其大纵深变化规律与找矿意义[J]. *地学前缘*, 2013, 20(03): 55-75.

SHEN Junfeng, LI Shengrong, MA Guanggang, et al. Typomorphic characteristics of pyrite from the Linglong gold deposit: Its vertical variation and prospecting significance[J]. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(03): 55-75.

申玉科, 徐春森, 余恩源, 等. 山东蓬莱侯格庄金矿构造解析与控矿规律研究[A]. *中国地质学会年会论文*[C]. 2018, 5-6.

SHEN Yuke, XU Chunsen, YU Enyuan, et al. Structural analysis and ore control law of hougezhuang gold deposit in Penglai, Shandong Province [A]. *Annual Meeting of Chinese Geoscience Union*[C]. 2018, 5-6.

宋明春, 伊丕厚, 崔书学, 等. 胶东金矿“热隆—伸展”成矿理论及其找矿意义[J]. *山东国土资源*, 2013, 29(07): 1-12.

SONG Mingchun, YI Pihou, CUI Shuxue, et al. Metallogenic theory of “thermal uplift extension” of Jiaodong gold deposit and its prospecting significance[J]. *Shandong land and Resources*, 2013, 29(07): 1-12.

宋雪龙, 李俊建, 李秀章, 等. 胶东金矿床成矿流体、稳定同位素及成矿时代研究进展[J]. *地质找矿论丛*, 2014, 29(01): 13-19.

SONG Xuelong, LI Junjian, LI Xiuzhang, et al. The research progress of ore-forming fluids, stable isotope and mineralizing age in Jiaodong peninsular of eastern China[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 2014, 29(01): 13-19.

宋英昕, 宋明春, 丁正江, 等. 胶东金矿集区深部找矿重要进展及成矿特征[J]. *黄金科学技术*, 2017, 25(3): 4-18.

SONG Yingxin, SONG Mingchun, DING Zhengjiang, et al. Major Advances on Deep Prospecting in Jiaodong Gold Ore Cluster and Its Metallogenic Characteristics [J]. *Gold Science and Technology*, 2017, 25(3): 4-18.

宋英昕, 宋明春, 孙伟清, 等. 胶东金矿成矿时代及区域地壳演化—基性脉岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *地质通报*, 2018, 37(05): 908-919.

SONG Yingxin, SONG Mingchun, SUN Weiqing, et al. Metallogenic epoch and regional crust evolution in the Jiaodong gold deposit, Shandong Province: Evidence from SHRIMP zircon U-Pb ages of mafic dykes[J]. *Geological Bulletin of China*, 2018, 37(05): 908-919.

孙岱生, 陈光远. 黄铁矿成因形态学[J]. *矿物岩石地球化学通讯*, 1987, (03): 139-140.

- SUN Daisheng, CHEN Guangyuan. Genetic morphology of pyrite[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 1987, (03): 139-140.
- 孙永深. 黑岚沟矿区金矿成矿规律探讨[J]. 黄金, 1999, 20(06): 15-19.
- SUN Yongshen. Exploration on metallogenic regularity of gold deposit in Heilangou gold field[J]. Gold, 1999, 20(06): 15-19.
- 卫清, 范宏瑞, 蓝廷广, 等. 胶东寺庄金矿热液蚀变作用与元素迁移规律[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2018, 37(02): 283-293.
- WEI Qing, FAN Hongrui, LAN Tingguang, et al. Hydrothermal Alteration and Element Migration in the Sizhuang Gold Deposit, Jiaodong Province, China[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2018, 37(02): 283-293.
- 吴晋超, 申俊峰, 李国武, 等. 黄铁矿热电性测试方法改进及其在金矿找矿勘查中的应用—以辽宁五龙金矿为例[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2019, 39(02): 283-292.
- WU Jinchao, SHEN Junfeng, LI Guowu, et al. The Improved Method for Measuring Thermoelectric Property of Pyrite and Its Implication for Exploring Gold Resources—A Case Study of the Wulong Gold Deposit in Liaoning Province[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2019, 39(02): 283-292.
- 严育通, 张娜, 李胜荣, 等. 胶东各类型金矿床黄铁矿化学成分标型特征[J]. 地学前缘, 2013, 20(03): 88-93.
- YAN Yutong, ZHANG Na, LI Shengrong, et al. Compositional typomorphic characteristics of pyrite in each type of gold deposit of Jiaodong[J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(03): 88-93.
- 杨国杰, 孟舞平. 黄铁矿热电性作为金矿找矿矿物学应用的机理探讨[J]. 山东地质情报, 1992, (03): 36-43.
- YANG Guojie, MENG Wuping. Discussion on the mechanism of pyrite thermoelectricity as ore prospecting mineralogy[J]. Shandong Geological Information, 1992, (03): 36-43.
- 于昌明. 黑岚沟金矿的综合地球物理研究[J]. 地球物理学进展, 1999, (02): 114-122.
- YU Changming. The research of exploring gold ore by comprehensive geophysical methods at Heilangou[J]. Progress in Geophysics, 1999, (02): 114-122.
- 原显顺. 河西金矿区地质特征及找矿方向[J]. 世界有色金属, 2019, (11): 74-76.
- YUAN Xianshun. Geological characteristics and prospecting direction of Hexi gold deposit[J]. World Nonferrous Metals, 2019, (11): 74-76.
- 张珂, 袁万明, 王庆飞, 等. 吉林夹皮沟金矿带黄铁矿热电性及热爆裂特征[J]. 现代地质, 2010, 24(05): 870-879.
- ZHANG Yu, YUAN Wanming, WANG Qingfei, et al. Thermoelectric and Thermal Decrepitation Characteristics of Pyrites from Jiapigou Gold Ore Belt, Jilin Province[J]. Geoscience, 2010, 24(05): 870-879.
- 张宗庆. 山东蓬莱黑岚沟金矿田断裂控矿特征浅析[J]. 科技创新导报, 2008, (24): 97-98.
- ZANG Zongqing. Analysis on ore controlling characteristics of faults in Heilangou gold field, Penglai, Shandong Province[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2008, (24): 97-98.
- Artur P D, Martin R, Stephen E K, et al. The coupled geochemistry of Au and As in pyrite from hydrothermal ore deposits[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2014, (140): 644-670.
- Feng K, Fan HR, Hu FF, 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.
- Liu JH, Liu FL, Ding ZJ, et al. U-Pb dating and Hf isotope study of detrital zircons from the Zhifu Group, Jiaobei Terrane, North China Craton: Provenance and implications for Precambrian crustal growth and recycling[J]. Precambrian Research, 2013, 235: 230-250.
- Mills S E, Tomkins A G, Weinberg R F, et al. Implications of pyrite geochemistry for gold mineralisation and remobilisation in the Jiaodong gold district, northeast China[J]. Ore Geology Reviews, 2015, 71: 150-168.
- Morishita Y, Shimada N, Shimada K. Invisible gold in arsenian pyrite from the high-grade Hishikari gold deposit, Japan: Significance of variation and distribution of Au/As ratios in pyrite[J]. Ore Geology Reviews, 2018, 95: 79-93.
- Yan YT, Zhang N, Li SR, et al. Mineral chemistry and isotope geochemistry of pyrite from the Heilangou gold deposit, Jiaodong Peninsula, Eastern China[J]. Geoscience Frontiers, 2014, 5(02): 205-213.
- Zhao HX, Hartwig E, Frimmel L, Jiang SY, et al. LA-ICP-MS trace element analysis of pyrite from the Xiaoqinling gold district, China: Implications for ore genesis[J]. Ore Geology Reviews, 2011, 43(1): 142-153.