

胶东西北部望儿山金矿床黄铁矿标型特征及找矿意义

张 龙¹, 李胜荣², 宋英昕³, 朱随洲⁴

(1. 中国地质调查局 牡丹江自然资源综合调查中心, 黑龙江 牡丹江 157021; 2. 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083; 3. 山东省地质科学实验研究院, 山东 济南 250013; 4. 中国冶金地质总局 山东正元地质勘查院, 山东 济南 250101)

摘 要: 对胶东西北部望儿山金矿床中的黄铁矿进行了系统的采样和热电系数、热电导型、晶胞参数、化学成分等特征的分析, 在此基础上探讨了黄铁矿的找矿意义。研究表明, 望儿山金矿床中的黄铁矿化学成分亏S, 特征元素为Au、Ag、Cu、Pb、Zn、As、Co、Ni、Se; 黄铁矿热电导型P型的出现率为29.4%, 热电性各项参数的变化在时间和空间上都与矿石品位有明显的相关性; 黄铁矿热电系数-温度标尺显示成矿温度集中在130.3~339.8℃之间; 黄铁矿晶胞参数 a_0 、 v_0 值及X射线衍射峰半高宽都偏低, 具有深部黄铁矿特征。黄铁矿 $\delta\text{Fe}-\delta\text{S}$ 图和晶胞参数 a_0 图均显示望儿山金矿床为中低温热液成因, 矿体的剥蚀程度较深, 向下可能转化为蚀变岩型。

关键词: 黄铁矿; 热电系数; 晶胞参数; 化学成分; 望儿山金矿

中图分类号: P578.2⁺92

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2020)02-0159-13

Typomorphic characteristics of pyrite in the Wang'ershan gold deposit, northwest Jiaodong, and its prospecting significance

ZHANG Long¹, LI Sheng-rong², SONG Ying-xin³ and ZHU Sui-zhou⁴

(1. Mudanjiang Natural Resources Survey Center, China Geological Survey, Mudanjiang 157021, China; 2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, Faculty of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. Shandong Provincial Institute of Geological Sciences, Jinan 250013, China; 4. Shandong Zhengyuan Geological Prospecting Institute, China Metallurgical Geological Administration, Jinan 250101, China)

Abstract: The Wang'ershan gold deposit is located in southern Wang'ershan fault belonging to the Jiaojia gold ore-field and lies in the western part of Zhaoyuan-Lai Zhou gold ore belt of Shandong Province. As a large-scale gold deposit, it combines the characteristics of both altered rock type and quartz vein type. Systematic sampling was conducted. The typomorphic characteristics of pyrite and its prospecting significance were discussed. The chemical composition of pyrite is characterized by sulfur depletion and relative enrichment of Au, Ag, Cu, Pb, Zn, As, Co, Ni and Se as trace elements. The occurrence ratio of P-type pyrite is 29.4% in the Wang'ershan deposit. The parameters of thermoelectricity and thermal resistance of pyrites are closely related to gold grade in time and space. The metallogenic temperatures are concentrated in 130.3~339.8℃ according to the thermoelectric coefficient-

收稿日期: 2019-05-14; 接受日期: 2019-12-16; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 中国地质调查局工作项目(1212011220926, 12120113082700); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(20130022110003)

作者简介: 张 龙(1987-), 男, 硕士, 助理工程师, 矿物学、岩石学、矿床学专业, 研究方向为成因矿物学与找矿矿物学, E-mail: 270418334@qq.com; 通讯作者: 李胜荣, 男, 教授, 博士生导师, 从事成因与找矿矿物学及环境与生命矿物学研究, E-mail: lsr@cugb.edu.cn。

temperature scale. Cell parameters (a_0 and v_0) and half-peak bandwidth of X-ray diffraction in pyrites are low, with the feature of deep-derived source. $\delta\text{Fe} - \delta\text{S}$ plots and lattice parameter a_0 show that the Wang'ershan gold deposit might be a mid-low temperature hydrothermal deposit with relatively serious denudation. It may grade into altered rock type in the deep part.

Key words: pyrite; thermoelectric coefficients; cell parameters; chemical composition; the Wang'ershan gold deposit

Fund support: Project of China Geological Survey (1212011220926); Project of Special Research Found for the Doctoral Programme of Higher Education (20130022110003)

利用半导体矿物的热电性标型特征指导矿点评价和预测矿床深部及外围找矿是一种经济、快速有效的方法,它可以节省大量野外工作量和勘查资金。从1950年开始,结合找矿工作的需要,国内外对常见的深色硫化物(如黄铁矿)及氧化物(如磁铁矿)等半导体矿物的热电系数和热电导型标型进行了大量研究,取得了许多成果(Patrick and Ronald, 1962; Shuey, 1975; 杨国杰等, 1988; 陈光远等, 1989; 邵伟等, 1990; 赵亨达, 1990; 李胜荣等, 1996)。

黄铁矿是一种重要的载金矿物,普遍存在于与热液有关的各种类型矿床中,其热电系数和热电导型标型的研究具有重要找矿意义。20世纪80年代以来我国学者对黄铁矿热电性在金矿找矿和评价方面的应用做了大量深入研究,并进行了相应的热电性填图,有效地指导了金矿的深部和外围找矿实践,取得了明显的经济效益(陈光远等, 1989; 宋焕斌, 1989; 李胜荣等, 1994, 1996; 谢玉玲等, 1999)。黄铁矿作为热液金矿中最主要的硫化物矿物,不同温度、压力和氧化还原电位等条件对其化学成分、晶体结构和物理性质等都有十分显著的影响,应用现代矿物学的研究方法查明这些微观的差别可以为矿床成因研究、矿床综合评价、矿床远景预测等问题提供有用的矿物学依据(杨赞中等, 2007)。黄铁矿热电性是在矿床成因和成矿预测研究中应用较为广泛的标型特征之一,其在判断成矿温度、矿床规模和寻找隐伏矿体方面具有重要意义(李胜荣等, 2007; 李胜荣, 2013; 申俊峰等, 2013)。黄铁矿的晶胞参数不仅与其化学成分关系密切,而且受到成矿介质中杂质组分含量、成矿温度和成矿压力等物理化学条件的制约,是研究矿床成因和找矿的重要标型(储刚等, 1995)。

望儿山金矿床位于华北克拉通东南缘著名的山东招远-莱州金矿带西部,焦家金矿田望儿山断裂带南段,是一个大型黄金矿床,属于典型的与早中生代岩石圈减薄有关的胶东型金矿(Li *et al.*, 2006,

2013, 2014, 2015a, 2015b; Shen *et al.*, 2013; Guo *et al.*, 2013; Li and Santosh, 2014; Song *et al.*, 2015)。由于多年的开采,矿山浅部矿体已近开采殆尽,找矿主体由地表矿、浅部矿向隐伏矿、深部矿逐步转变,找矿难度不断增加。前人对该矿床的普查勘探、构造特征和成矿物质来源等方面做了大量工作(李念凤等, 2000; 方金云等, 2000; 王义文等, 2002; 毛景文等, 2005; 汤磊等, 2007; 钱建平等, 2011; 王中亮等, 2011),基本查明了该矿床地质特征、成矿物质来源和成因特征,但在成因矿物学方面尚未进行系统的研究。本文在望儿山金矿的黄铁矿热电系数、晶胞参数和化学成分等方面对黄铁矿标型特征进行了系统的分析,旨在总结成矿规律,识别找矿标志,以期对该矿床的下一步勘探有一定的指导意义。

1 矿区地质及矿床特征

望儿山矿区位于焦家断裂带北段,矿区地层较简单,除第四系外即为胶东群变质岩(图1)。区内构造以断裂为主,主要为焦家断裂及其派生的次级断裂构造,按其规模大小可分为Ⅰ级、Ⅱ级和Ⅲ级构造,属新华夏系同序次不同级别的压扭性断裂。Ⅰ级构造有焦家断裂带,Ⅱ级构造有河东-望儿山断裂带,Ⅲ级构造有河东-望儿山主断裂上下盘与主断裂近于平行的同序次次级构造。矿区内岩浆岩分布广泛,主要为郭家岭岩体和玲珑岩体(张龙等, 2016)。

望儿山矿区开采矿段位于望儿山西坡。矿石矿物以硫化物为主,主要有黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿和斑铜矿等,脉石矿物主要有石英、方解石、白云石、钾长石、斜长石,蚀变生成的绢云母、绿泥石,副矿物有磷灰石、锆石等。金矿物颗粒主要以包体金、裂隙金的形式赋存于硫化物中,其中黄铁矿是最主要的载金矿物。围岩蚀变发育,主要有绢云母化、硅化、钾长石化、碳酸盐化等(周铸, 2012)。

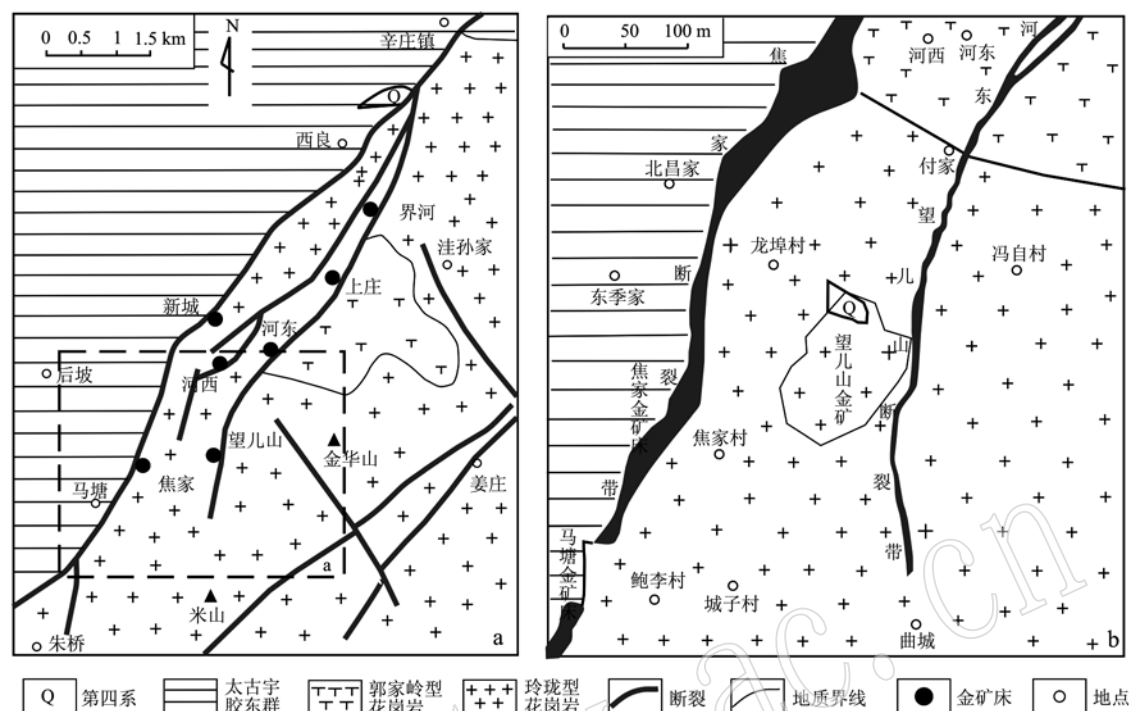


图1 胶东望儿山金矿地质图[据汤磊等(2007)修编]

Fig. 1 Geological map of the the Wang'ershan gold depoist, Jiaodong (after Tang Lei *et al.*, 2007)

通过系统研究,同时与焦家金矿进行对比,将本区成矿作用分为热液期和表生期。热液在演化和发生交代作用的同时伴随着频繁的构造运动,因此成矿过程中呈现出热液活动的多期性和成矿作用的多阶段性(表1)。热液期可分为蚀变期和成矿期。热液蚀变期,钾长石化作用首先出现,随着成矿流体氧逸度的降低,绢英岩化作用发生。绢英岩化阶段晚期,碱性介质向酸性转化,氧化条件转变为还原条件,同时发生黄铁绢英岩化作用,标志着成矿期的开端。热液成矿期又可分为黄铁矿-石英阶段、石英-黄铁矿阶段、多金属硫化物阶段、石英碳酸盐阶段。

本次工作主要对-390 m、-430 m、-470 m和-510 m这4个坑道中段的矿石进行了采样,通过观察其矿物组合及穿插关系,并结合室内岩相学和矿相学研究,将本次选取的黄铁矿分为3个成矿阶段:

黄铁矿-石英阶段(Ⅰ):黄铁矿多产自于黄铁绢英岩,粒度约0.1 mm,多以浸染状、条带状产出,含金量较低。共生矿物以石英为主,含少量绢云母,石英含量相对较高,含矿性较差。

石英-黄铁矿阶段(Ⅱ):黄铁矿多产自于黄铁绢英岩化碎裂花岗岩,粒度一般小于0.1 mm,多呈团块、条带、脉状等形式产出,金主要以包体金的形

式存在,共生矿物以石英、绢云母为主,石英含量相对减少,黄铁矿含量相对增多,为主成矿期的产物,含金量较高。

多金属硫化物阶段(Ⅲ):黄铁矿多产自于黄铁绢英岩化碎裂花岗岩,颗粒大小不一,一般为0.1~1 mm,较破碎,多呈条带状产出,与黄铜矿、方铅矿、闪锌矿等硫化物共生,为主成矿期的产物,剪含量高。金主要呈裂隙金赋存于硫化物中。

2 黄铁矿样品及测试方法

2.1 样品

本次测试的样品来自于望儿山金矿-390 m、-430 m、-470 m和-510 m这4个坑道中段的矿石,分属黄铁矿-石英阶段(Ⅰ)、石英-黄铁矿阶段(Ⅱ)、多金属硫化物阶段(Ⅲ)3个成矿阶段。共选取14件样品共计2800粒黄铁矿进行了热电系数和热电导型测量,选取14件样品进行了黄铁矿晶胞参数测量。

2.2 测试方法

黄铁矿热电系数的测试工作在中国地质大学(北京)矿物标型实验室完成,所用仪器为BHTE-6

表 1 胶东望儿山金矿成矿阶段及矿物生成顺序表

Table 1 Stages of mineralization and paragenetic sequence of minerals in the Wang’ershan gold deposit, Jiaodong

期次阶段 矿物生成 顺序	热液蚀变期			热液成矿期				表生期
	钾长石化 阶段	绢英岩化 阶段	黄铁绢英岩 阶段	黄铁矿- 石英阶段 (I)	石英-黄 铁矿阶段 (II)	多金属硫 化物阶段 (III)	石英-碳 酸盐阶段 (IV)	
钾长石	——							
石英	——	——	——	——	——	——	——	
绿泥石	—	——						
磁铁矿		——	——	——	——	——		
绢云母	—	——	——	—				
黄铁矿			——	——	——	——	—	
银金矿			—	—	—	—		
金银矿			——	—	—	——		
方解石				—	—		——	
黄铜矿					—	——		
方铅矿						——		
闪锌矿						——		
斑铜矿								
白云石							——	
褐铁矿								——
孔雀石								—

型热电仪。样品在划分成矿阶段后进行粉碎、过筛和挑纯,并用酒精浸泡和清洗以溶解黄铁矿表面的氧化膜及杂质,活化温度设定为 $60 \pm 3^{\circ}\text{C}$ 。黄铁矿晶胞参数测试工作在中国地质大学(北京)矿物标型实验室完成,实验流程为挑选黄铁矿单矿物颗粒并粉碎至 200 目,选取 0.5 g 的样品进行分析测试,测试仪器为 D2 PHASER 粉晶衍射仪,步长 0.02° ,每步时间 0.3 s,电压 30 kV,电流 10 mA。黄铁矿矿物成分分析在中国地质科学院电子探针实验室完成,所

用仪器为 JXA-8230,分析条件为加速电压 20 kV,电流 $2 \times 10^{-8}\text{A}$,束斑直径 $5\text{ }\mu\text{m}$,修正方法 ZAF。

3 黄铁矿热电系数和热电导型分析结果

3.1 总体特征

望儿山金矿床黄铁矿热电系数和热电导型分析数据见表 2。由表 2 可见,该矿床黄铁矿热电系数 α 变化范围为 $-354 \sim 357\text{ }\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$,主要集中在 $-300 \sim$

表 2 胶东望儿山金矿黄铁矿热电性特征

Table 2 Thermoelectric coefficients of pyrites in the Wang’ershan gold deposit, Jiaodong

样号	成矿阶段	标高/m	热电系数 $\alpha/(\mu\text{V} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$						N 型出现 率/%	P 型出现 率/%
			N 型			P 型				
			最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值		
01-3-3	I	510	-315	-2	-157	14	232	100	95.5	4.5
B01-4-2	I	510	-354	-57	-235	-	-	-	100.0	-
B04-4-3	I	510	-288	-66	-146	91	235	170	98.0	2.0
B04-4-4	II	510	-249	-2	-127	5	324	142	74.0	26.0
B01-1-4	I	470	-234	-13	-143	31	171	106	96.0	4.0
B04-2-2	II	470	-328	-28	-149	7	353	129	76.5	23.5
B04-2-4	I	470	-312	-12	-143	21	303	144	92.5	7.5
B04-3-3	II	470	-341	-14	-167	11	331	148	63.5	36.5
B04-3-4	III	470	-315	-2	-139	7	354	162	57.0	43.0
B01-6-4	III	430	-250	-5	-116	5	357	179	50.0	50.0
B02-7-3	II	430	-342	-19	-187	5	342	148	78.0	22.0
B02-12-4	III	390	-273	-9	-122	2	331	166	65.0	35.0
B04-6-3	II	390	-241	-5	-109	9	337	134	55.5	44.5
B04-6-4	III	390	-209	-10	-86	5	337	186	29.0	71.0

300 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 范围内,数值变化比较稳定,说明其处于较为稳定的形成环境。本区黄铁矿热电导型以 N 型为主,出现率为 70.6%,N 型热电系数平均值为 $-143 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$;P 型为辅,出现率为 29.4%,P 型热电系数平均值为 $162 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 。

3.2 时空变化

望儿山金矿床黄铁矿在形成过程中,热电系数从黄铁矿-石英阶段到多金属硫化物成矿阶段呈规

律性变化,均以 N 型黄铁矿为主,N 型分布较为集中,P 型分布较为离散(图 2、图 3)。随着成矿作用的不断进行,金品位逐渐升高,P 型出现率(P/%)升高,P 型黄铁矿热电系数($\bar{\alpha}_P$)升高,N 型出现率(N/%)降低,N 型黄铁矿热电系数($\bar{\alpha}_N$)降低,即 P 型黄铁矿出现率、P 型热电系数及 N 型热电系数与金品位呈正相关,N 型黄铁矿出现率与金品位呈负相关。

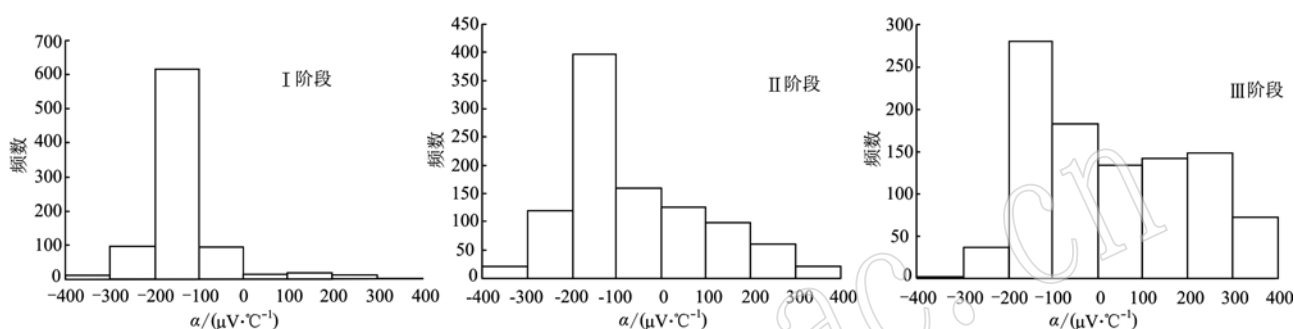


图 2 胶东望儿山金矿黄铁矿不同世代热电系数分布直方图

Fig. 2 Histogram of the distribution of thermoelectric coefficients of pyrite in different mineralization stages of the Wang'ershan gold district, Jiaodong

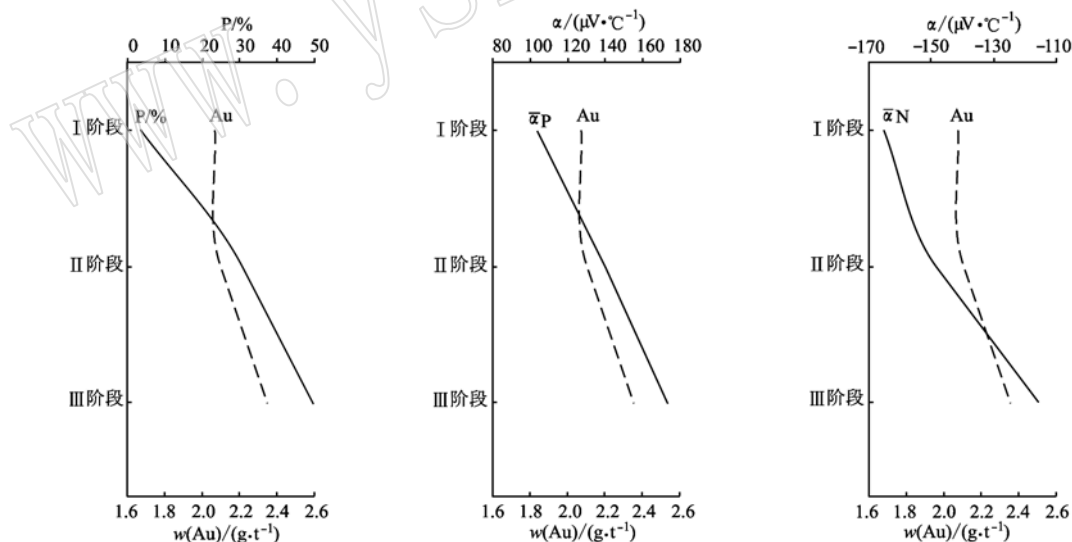


图 3 胶东望儿山金矿不同世代黄铁矿热电性变化特征

Fig. 3 Thermoelectric variation of the pyrite in different mineralization stages of the Wang'ershan gold deposit, Jiaodong

望儿山金矿床黄铁矿热电性标型特征随标高变化的规律性也很明显,黄铁矿热电性的分布、金品位和 P 型出现率等随着深度变化而呈现规律性变化(图 4、图 5)。各中段都是以 N 型黄铁矿为主,N 型黄铁矿热电系数主要集中于 $-200 \sim -100 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 之间,P 型黄铁矿分布则较为离散。从浅部到深部,黄

铁矿 P 型出现率呈逐渐降低趋势, $\bar{\alpha}_P$ 为先增大再减小, $\bar{\alpha}_N$ 为先减小再增大。结合矿石平均金品位变化特征可以发现,在主成矿阶段即石英-黄铁矿阶段到多金属硫化物阶段黄铁矿 P 型出现率和 $\bar{\alpha}_P$ 的变化趋势与金品位呈正相关关系,而 $\bar{\alpha}_N$ 变化趋势与金品位关系不明显。

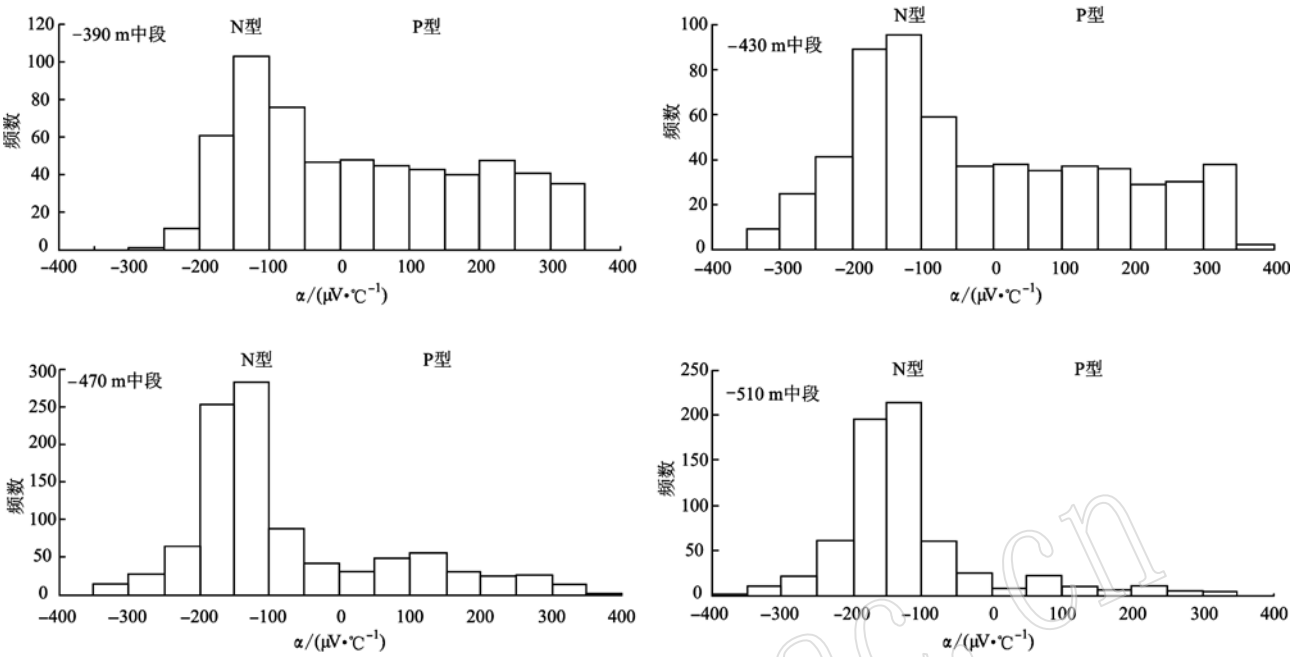


图 4 胶东望儿山金矿不同标高黄铁矿热电系数分布柱状图

Fig. 4 Histogram of distribution of thermoelectric coefficients of pyrite at different elevations of the Wang'ershan gold deposit, Jiaodong

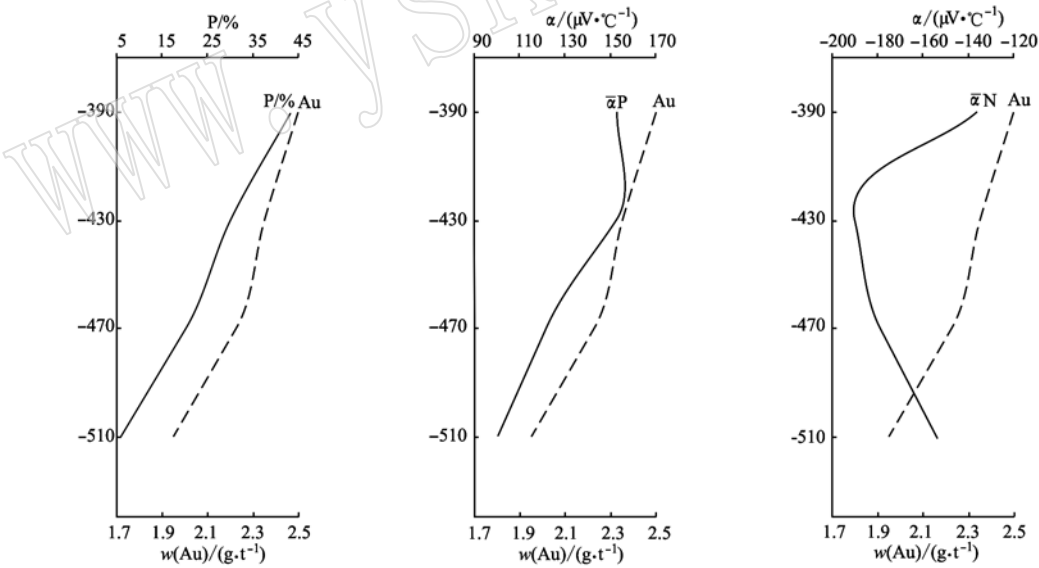


图 5 胶东望儿山金矿不同标高黄铁矿热电性变化特征

Fig. 5 Thermoelectric variation of pyrite at different elevations of the Wang'ershan gold deposit, Jiaodong

3.3 对成矿温度的判定

根据黄铁矿热电系数与结晶温度的关系而制定的黄铁矿热电系数温度标尺可用来计算成矿温度。戈尔巴乔夫利用大量数据做出黄铁矿热电系数温度图(图 6,转引自李成禄等, 2009)。从该图获得线性方程: $t = (704.51 - |\alpha|)/1.818$ (N 型), $t = 3$

$(122.22 + \alpha)/5.0$ (P 型)。前人应用此方法对陕西镇安太白庙金矿(候满堂, 2000)和山西繁峙义兴寨金矿(李成禄等, 2009)等矿床进行研究, 得出的成矿温度与其他方法(如流体包裹体方法、热爆法、S 同位素方法)研究得出的成矿温度基本一致。本文利用该方程计算出望儿山金矿床黄铁矿的形成温度

范围为 130.3 ~ 339.8℃, 其中 N 型黄铁矿的形成温度为 252.7 ~ 339.8℃, 均值为 307.92℃, P 型黄铁矿的形成温度为 130.3 ~ 184.5℃, 均值为 161.67℃, 表明望儿山金矿属于中低温矿床。

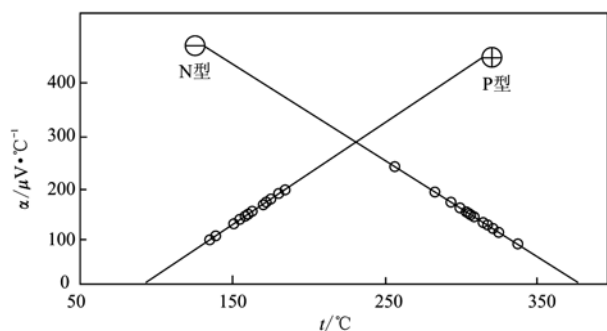


图 6 胶东望儿山金矿黄铁矿热电系数-温度图

Fig. 6 Relationship between thermoelectricity and temperatures of pyrites from the Wang'ershan gold deposit, Jiaodong

4 黄铁矿晶胞参数和 X 射线衍射特征

4.1 总体特征

望儿山金矿床黄铁矿晶胞参数实验结果列于表 3。由表 3 可见, 该矿床黄铁矿晶胞参数值的变化范围为 $a_0 = 0.54083 \sim 0.54212$ nm, 平均 0.54157 nm; $v_0 = 15.8190 \sim 15.9330$ nm³, 平均 15.8879 nm³, 与标准值 $a_0 = 0.54176$ nm 和 $v_0 = 15.9009$ nm³ (曹焯等, 2010) 相比均偏低。半高宽变化范围在 0.06° ~ 0.08° 之间, 平均值为 0.066°, 变化范围不大。

4.2 成因分析

严育通(2012)认为石英脉型金矿中黄铁矿的晶胞参数大于蚀变岩型。本文收集了前人关于胶东金青顶、邓格庄 2 个石英脉型金矿床和三山岛、新城、

表 3 胶东望儿山金矿黄铁矿晶胞参数及 X 射线衍射峰半高宽表

Table 3 Cell parameters and half-peak bandwidth of X-ray diffraction of the pyrite from the Wang'ershan gold deposit, Jiaodong

样品号	中段	阶段	a_0/nm	$\Delta a_0/\text{nm}$	v_0/nm^3	$\Delta v_0/\text{nm}^3$	半高宽 $2\theta/(\circ)$
B01-3-3	510	I	0.54138	0.00025	15.9130	0.0216	0.07
B04-4-4	510	II	0.54142	0.00023	15.8710	0.0200	0.07
B04-2-2	470	II	0.54184	0.00013	15.9080	0.0116	0.06
B04-2-4	470	I	0.54153	0.00021	15.8810	0.0181	0.06
B04-3-3	470	II	0.54130	0.00031	15.8610	0.0274	0.06
B04-3-4	470	III	0.54116	0.00035	15.8480	0.0304	0.07
B01-6-3	430	III	0.54190	0.00008	15.9130	0.0072	0.07
B01-6-4	430	III	0.54104	0.00038	15.8370	0.0334	0.06
B02-7-3	430	II	0.54169	0.00016	15.8950	0.0140	0.06
B01-7-2	390	I	0.54212	0.00010	15.9330	0.0090	0.08
B01-8-1	390	I	0.54203	0.00006	15.9250	0.0050	0.07
B02-12-2	390	III	0.54171	0.00015	15.8960	0.0133	0.06
B04-6-3	390	II	0.54083	0.00083	15.8190	0.0727	0.07
B05-2-3	390	II	0.54209	0.00007	15.9300	0.0062	0.07

界河、付家 4 个蚀变岩型金矿床的多金属硫化物阶段黄铁矿晶胞参数 a_0 的数据 (潘玉成, 1991; 桂志利, 1992; 陈光远等, 1993; 陈仁义, 1995^①), 做出了胶东各金矿多金属硫化物阶段黄铁矿晶胞参数分布特征图 (图 7), 表明望儿山金矿床是蚀变岩型金矿和石英脉型金矿的复合类型, 但是以蚀变岩型为主。

与其他成矿阶段相比, I 阶段黄铁矿的晶胞参数 a_0 、 v_0 值和半高宽均最大。随着成矿作用的进行, 晶胞参数 a_0 、 v_0 值和半高宽逐渐减小, 主成矿阶段黄铁矿的 a_0 、 v_0 值和半高宽均最小。垂向上向下 a_0 值逐

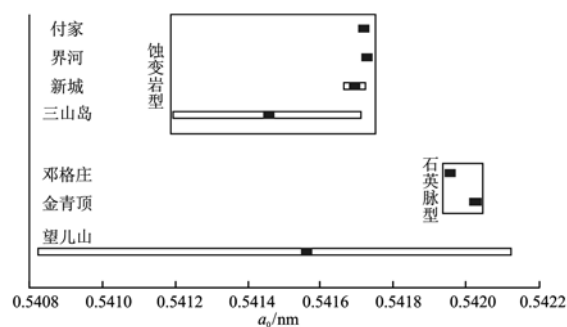


图 7 胶东各金矿多金属硫化物阶段黄铁矿晶胞参数图
Fig. 7 Pyrite cell parameters in sulfides stage of the gold ore district in Jiaodong

① 陈仁义. 1995. 胶东新城金矿成因矿物学及成矿机理研究 (博士后研究报告). 中国地质大学 (北京).

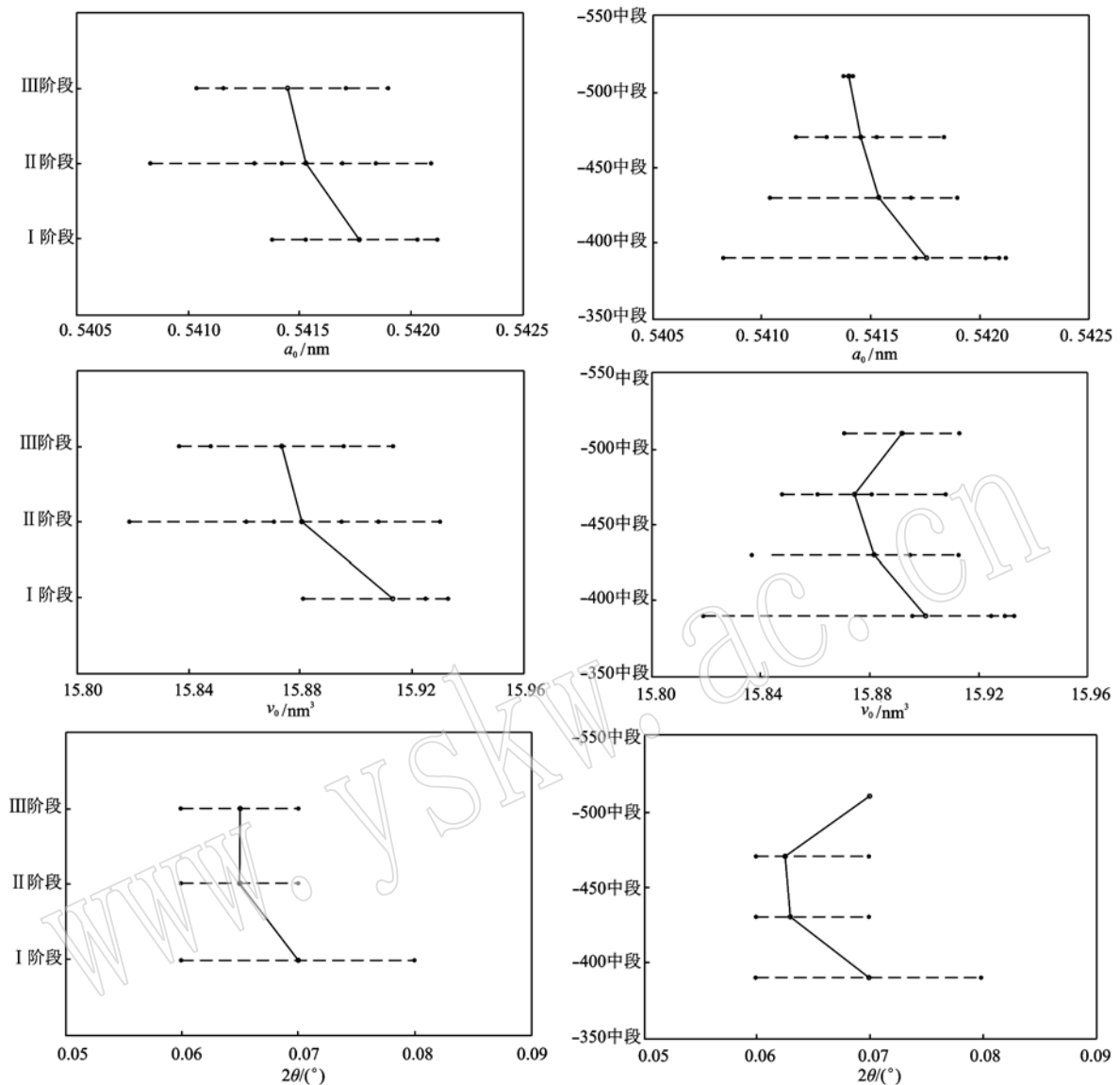


图 8 胶东望儿山金矿黄铁矿晶胞参数 a_0 、 v_0 和半高宽时空变化趋势图

Fig. 8 Variation trend of pyrite cell parameters a_0 and v_0 and half-peak bandwidth in time and space of the Wangershanshan gold deposit, Jiaodong

渐减小, v_0 值和半高宽整体也呈逐渐减小的趋势(图 8), 根据这种变化可以推断下部有较好的成矿潜力。

黄铁矿晶胞参数标准值 a_0 为 0.54176 nm, 一般认为其影响因素为类质同像元素的种类与数量以及 S 离子的数量。Fe—S、Co—S、Ni—S 键长依次增大, 分别为 0.226、0.234 和 0.240 nm (曹焘等, 2010)。As 置换 S 也会引起 a_0 值增大, 若 1% 的 As 置换 S, 至少引起黄铁矿 a_0 值增大 0.00024 nm, 所以 Co、Ni、As、Se、Te 等进入黄铁矿会使 a_0 值增大, 当 S 离子亏损时, 硫空位会使得 Fe—S 共价键加强, a_0 值减小(陈光远等, 1989)。本矿区 S/Fe 平均值

为 1.993, 硫亏损导致的硫空位可能是 a_0 值小于标准值的主要原因。随着成矿作用的进行, 晶胞参数 a_0 、 v_0 值和半高宽都逐渐减小, 推测是由于 Co、Ni 含量减小导致 a_0 值减小, 而 Co、Ni 含量减小也会使黄铁矿 P 型出现率增大, 这与黄铁矿热电性随时间的变化趋势相一致。随着成矿深度的增加, a_0 值逐渐减小, v_0 值和半高宽整体也呈逐渐减小的趋势, 推测是由于 As 含量减少所致, 而 As 含量减少会导致 N 型黄铁矿增多, 这也与黄铁矿热电性的空间变化规律相一致。因此, 望儿山金矿床黄铁矿中 Co、Ni、As 的含量对晶胞参数都有一定影响。

5 黄铁矿主微量元素及相关参数

5.1 主量元素

大量天然黄铁矿化学分析结果表明, S /Fe 值 (原子个数比, 下同) 往往大于或者小于 2, 一般将比值小于 2 称为硫亏损, 比值大于 2 称为铁亏损 (Doyle and Mirza, 1996; Oberthur *et al.*, 1997)。本区黄铁矿电子探针分析结果 (表 4) 表明, 其 S 含量在 52.39% ~ 53.36% 之间, 平均值 52.91% (理论值 53.45%), Fe 含量在 45.78% ~ 46.94% 之间, 平均值 46.23% (理论值为 46.55%), S/Fe 值为 1.954 ~ 2.024, 平均为 1.993 (理论标准值为 2.00)。由此可见, S 亏损型黄铁矿在本区黄铁矿中占优势, 这反映出望儿山金矿床可能形成于硫含量相对较低的环境。

望儿山金矿床黄铁矿 S、Fe 的含量偏低, 而沉积成因的黄铁矿中 S、Fe 的含量与标准值相近或略多, 中低温热液矿床中黄铁矿亏 S、亏 Fe (徐国风等, 1980), 由此可知望儿山金矿床可能具中低温热液成因。研究表明黄铁矿 S/Fe 值能够标识金矿床的成因类型, 内生黄铁矿型铜矿床、多金属矿床中的黄铁矿与标准值相比亏硫, 与超基性岩有关的铜镍矿床中的黄铁矿铁和硫的含量与理论值相近 (邵洁涟, 1988)。严育通等 (2013) 收集大量数据提出用 δFe

和 δS 参数对金矿成矿期的黄铁矿主量元素 (Fe 和 S) 进行标型特征分析, δFe 和 δS 分别表示黄铁矿样品中的主量元素 Fe 和 S 偏移理论值的程度, 包括质量的偏离程度和元素个数的偏离程度。对本区黄铁矿数据进行 δFe 和 δS 体系投图 (图 9), 发现望儿山黄铁矿样品集中于石英脉型和蚀变岩型金矿的交界区域, 说明该矿床为石英脉和蚀变岩的复合类型金矿。

5.2 微量元素

望儿山金矿床不同中段的黄铁矿的 Au、Ag、Cu、Pb、Zn、As、Co、Ni、Se 等元素电子探针分析数据见表 4。Co²⁺、Ni²⁺ 等在黄铁矿中能与 Fe²⁺ 发生类质同像

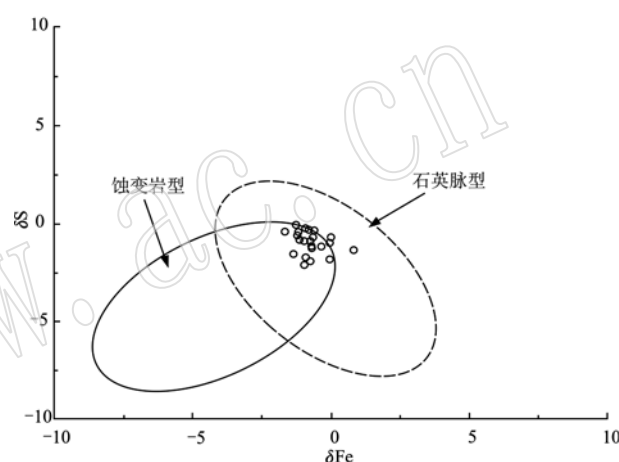


图 9 胶东金矿 δS - δFe 特征图 (底图据严育通等, 2013)

Fig. 9 δS - δFe characteristics of the gold deposits in Jiaodong (after Yan Yutong *et al.*, 2013)

表 4 胶东望儿山金矿黄铁矿电子探针数据

$w_B/\%$

Table 4 EPMA data of pyrite in the Wang'ershan gold deposit, Jiaodong

样品号	Fe	S	Cu	Pb	Zn	As	Co	Ni	Au	Ag	Se	S/Fe	Au/ Ag	As/ (Co + Ni)	Co/ Ni	S/Se
B01-7-1-1	46.39	52.78	0.002		0.011	0.031	0.062	0.016	0.032			1.981		0.397	3.875	
B01-7-1-3	46.52	52.44	0.011		0.025	0.007	0.064		0.301			1.963		0.109		
B01-3-2-1	45.78	53.19			0.048	0.042	0.078			0.001		2.024		0.538		
B01-3-2-2	46.12	52.46			0.000	0.057	0.070	0.017		0.011		1.981		0.655	4.118	
B01-9-1	45.93	52.57			0.027	0.010	0.079		0.362			1.994		0.127		
B01-1-1-1	45.97	53.09		0.083			0.091		0.000	0.002		2.011				
B01-6-2-1	46.26	53.23	0.014	0.012	0.010	0.049	0.074	0.013	0.482	0.004		2.004	120.5	0.563	5.692	
B02-5-2-2	45.96	53.36				0.044	0.077				0.013	2.022		0.571		4 104.385
B04-4-2-1	46.13	53.27		0.065		0.030	0.035		0.121			2.011		0.857		
B04-4-1-1	46.18	53.22	0.029	0.049		0.002	0.056	0.014	0.000		0.014	2.007		0.029	4.000	3 801.357
B04-3-1-1	46.20	52.39		0.019		0.059	0.049	0.010	0.181			1.975		1.000	4.900	
B02-7-3-1	46.55	53.05	0.001	0.037		0.004	0.033				0.002	1.985		0.121		26 526.000
B02-7-1-1	46.94	52.68	0.008		0.027	0.038	0.032					1.954		1.188		
B04-2-2-1-2	46.53	52.90	0.009	0.019	0.013	0.028	0.046				0.004	1.980		0.609		13 223.750
B04-2-2-3-1	46.03	52.97	0.010	0.043	0.010	0.042	0.073	0.013				2.004		0.488	5.615	
B04-3-4-1	46.21	52.93	0.001	0.012	0.003		0.063		0.007			1.995				

替代,使黄铁矿亏损 Fe;而 As^{3-} 等离子与 $[S_2]^{2-}$ 发生类质同像替代,会使黄铁矿亏损 S。该矿区黄铁矿杂质元素含量较高导致了同时亏损 Fe 和 S,使得黄铁矿结构上出现空位,增加了构造缺陷的程度,使晶形不完整的机会增大,更有利于金的富集。

Au 是指示金矿最直接的元素,从表 4 中可以看出本区黄铁矿含金性较好。金矿床中黄铁矿的 Au/Ag 值也可以反映矿床成因方面的信息。栾世伟(1987)认为,岩浆热液型金矿床中黄铁矿含金量较高, $Au/Ag \geq 0.5$;火山岩型、构造破碎带蚀变岩型、沉积变质热液交代型及各类伴生金矿床中黄铁矿的 $Au/Ag < 0.5$ 。本区黄铁矿 Au/Ag 最高为 120.50,表明望儿山金矿床为岩浆热液型金矿床。

黄铁矿中 As、Co、Ni 含量是影响晶形、导电性等物理性质的主要因素。P 型黄铁矿含 As、Au 高,Co、Ni 低, $As/(Co + Ni)$ 值大,N 型黄铁矿则相反。本区 Co、Ni 含量相对较高,而 As 含量相对较低, $As/(Co + Ni)$ 值小,这也是黄铁矿导电型为 N 型的主要原因。从 Co-Ni-As 三角关系图(图 10)中可以看出样品点偏向 As、Co 端员,除 1 个点位于火山-次火山岩热液型区,其他点均位于岩浆热液和变质热液中,说明本区黄铁矿主要是岩浆和变质热液型。

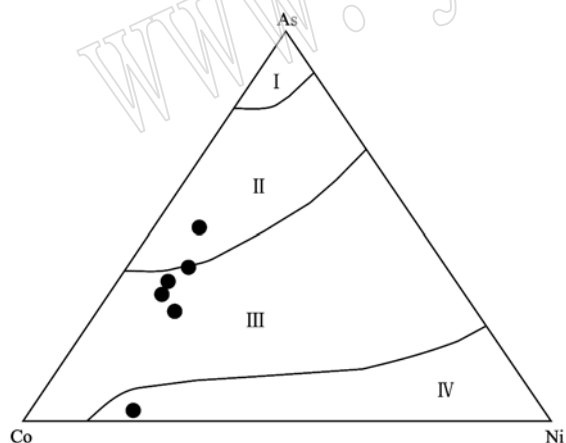


图 10 胶东望儿山金矿黄铁矿 Co-Ni-As 三角图解
(据宋学信等, 1986)

Fig. 10 Plots of Co-Ni-As content of the Wang'ershan gold deposit, Jiaodong (after Song Xuexin *et al.*, 1986)

I—地下卤水淋滤型金矿床黄铁矿; II—岩浆热液型金矿床黄铁矿; III—变质热液型金矿床黄铁矿; IV—火山与次火山岩热液型金矿床黄铁矿

I—pyrite in leaching type gold deposit of underground brine; II—pyrite of magmatic hydrothermal gold deposit; III—metamorphic hydrothermal type pyrite; IV—pyrite in volcanic and subvolcanic hydrothermal gold deposits

陈光远等(1989)研究表明在岩浆结晶分异过程中,由于 Co、Ni 的八面体择位能不同, Ni^{2+} 倾向富集于八面体配位,因此 Ni 集中于八面配位比例高的岩浆早期结晶形成的矿物中,而 Co 则在岩浆晚期形成的矿物中相对富集,所以 Co/Ni 值因黄铁矿形成时所处地质背景的不同而具一定变化规律,从而能够指示矿床成因和成矿作用。一般认为沉积成因的黄铁矿 $Co/Ni < 1$,变质热液成因的 Co/Ni 接近 1,岩浆热液成因的 $1 < Co/Ni < 5$,火山热液成因的 $Co/Ni > 5$ 。本区 Co/Ni 均值为 4.7,表明望儿山金矿床黄铁矿为岩浆热液成因。

Se 是通过类质同像替换 S 而进入黄铁矿晶格的,高温条件下 Se 在黄铁矿中的含量较高,S 的含量在黄铁矿中变化不大,所以可以根据 S/Se 值来判别黄铁矿的形成条件。沉积型黄铁矿 S/Se 值为 250 000 ~ 500 000,岩浆热液矿床 S/Se 值多在 10 000 ~ 26 700 范围内(邵洁涟, 1988)。本区 S/Se 均值为 11 914,说明本区黄铁矿为岩浆热液成因。

6 讨论和结论

(1) 望儿山金矿黄铁矿 S/Fe 平均值为 1.993,说明处于硫含量相对较低的环境;通过对特征元素 Au、Ag、As、Co、Ni、Se 的分析可以得知本区黄铁矿主要为岩浆热液型;黄铁矿热电系数-温度标尺显示成矿温度集中在 130.3 ~ 339.8℃ 之间,表明该矿床为中低温矿床。

(2) 望儿山金矿黄铁矿的热电系数和晶胞参数在时间和空间上都与金品位有明显的相关性,这主要受 Co、Ni、As 含量的影响,对其时空的分布规律进行组合分析,可以提供很好的找矿信息。热电性 P 型出现率较高和晶胞参数 a_0 、 v_0 和半高宽较小可作为本区的重要找矿标志。矿区黄铁矿晶胞参数 a_0 、 v_0 值及 X 射线衍射峰半高宽都偏低,具有深部黄铁矿特征,因此推断矿体中下部具较好的找矿潜力,通过晶胞参数的变化预测 III 号脉深部具有较好的找矿前景。

(3) 望儿山金矿是蚀变岩型金矿和石英脉型金矿的复合类型,但是以蚀变岩型为主。

致谢 野外工作得到了望儿山金矿孙庆周主任、李旭工程师等工作人员的大力支持,中国地质大学(北京)博士生李玉洁在处理数据方面给予很大帮

助,矿物标型实验室张秀宝工程师、李国武教授和中国地质科学院矿产资源研究所电子探针实验室陈振宇副研究员为测试工作提供了诸多便利和支持,审稿专家提出了宝贵的修改意见,在此一并致以诚挚谢意。

References

- Cao Ye, Li Shengrong, Zhang Huafeng, *et al.* 2010. Characteristics of cell parameters of pyrite and quartz and their geological significance at Shihu gold deposit in western Hebei, North China[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 29(2): 185 ~ 191 (in Chinese with English abstract).
- Chen Guangyuan, Shao Wei, Sun Daisheng, *et al.* 1989. Genetic Mineralogy and Prospecting of the Jiaodong Gold Deposit[M]. Chongqing: Chongqing Science and Technology Publishing House (in Chinese).
- Chen Guangyuan, Sun Daisheng, Zhou Xunruo, *et al.* 1993. Genetic Mineralogy and Gold Mineralization of Granodiorite in Jiaodong[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press (in Chinese).
- Chu Gang, Huang Jiliang, Chen Gang, *et al.* 1995. Accurate determination of lattice constant by extension function method of X-ray diffraction[J]. *Computers and Applied Chemistry*, 12(1): 72 ~ 75 (in Chinese).
- Doyle F M and Mirza A H. 1996. Electrochemical oxidation of pyrite samples with known composition and electrical properties[J]. *Electrochemical Proceedings*, 96 (6): 203 ~ 214.
- Fang Jinyun and Sun Jingyu. 2000. Study on mass transfer in the process of mineralization of Wangershan gold deposit, East Shandong[J]. *Gold*, 21(1): 1 ~ 3 (in Chinese).
- Gui Zhili. 1992. Genetic Mineralogy and Prospecting Mineralogy of the Muping Gold Deposit Shandong Province (Master Graduation Thesis) [D]. China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese).
- Guo Pu, Santosh M, Li Shengrong, *et al.* 2013. Geodynamics of gold metallogeny in the Shandong Province, NE China: An integrated geological, geophysical and geochemical perspective[J]. *Gondwana Research*, 24: 1 172 ~ 1 202.
- Hou Mantang. 2000. Study and application of the thermoelectricity characteristics of pyrite of Taibaimiao Gold Deposit, Zhen'an County, Shaanxi Province[J]. *Gold*, 21: 5 ~ 9 (in Chinese).
- Li Chenglu, Li Shengrong, Luo Junyan, *et al.* 2009. The moelectric coefficient, conductive type and significance of the pyrite from Yixingzhai gold deposit in Fanshi County, Shanxi Province, China[J]. *Geoscience*, 23(6): 1 056 ~ 1 063 (in Chinese with English abstract).
- Li Jianwei, Vasconcelos P M, Zhou Meifu, *et al.* 2006. Geochronology of the Pengjiakuang and Rushan gold deposits, eastern Jiaodong gold province, northeastern China: Implications for regional mineralization and geodynamic setting[J]. *Economic Geology*, 101: 1 023 ~ 1 038.
- Li Lin, Santosh M, Li Shengrong, *et al.* 2015a. The "Jiaodong type" gold deposits: Characteristics, origin and prospecting[J]. *Ore Geology Reviews*, 65: 589 ~ 611.
- Li Nianfeng and Dong Jianle. 2000. Ore-control condition and metallogenic prognosis of meta-llogenic subzone in Wangershan, Eastern Shandong[J]. *Gold Geology*, 6(1): 27 ~ 31 (in Chinese).
- Li Shengrong. 2013. On the dissemination and development of genetic mineralogy in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 20(3): 46 ~ 54 (in Chinese with English abstract).
- Li Shengrong, Chen Guangyuan, Shao Wei, *et al.* 1994. A Study on the zonal structure of pyrite from the shuangshanzi gold mine, East Shandong Province[J]. *Manazine*, 14(2): 152 ~ 156 (in Chinese).
- Li Shengrong, Chen Guangyuan, Shao Wei, *et al.* 1996. Genetic Mineralogy of the Rushan Gold Orefield, Jiaodong[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1 ~ 111 (in Chinese).
- Li Shengrong and Santosh M. 2014. Metallogeny and craton destruction: Records from the North China Craton[J]. *Ore Geology Reviews*, 56: 376 ~ 414.
- Li Shengrong, Santosh M, Zhang Huafeng, *et al.* 2013. Inhomogeneous lithospheric thinning in the central North China Craton: Zircon U-Pb and S-He-Ar isotopic record from magmatism and metallogeny in the Taihang Mountains[J]. *Gondwana Research*, 23: 141 ~ 160.
- Li Shengrong, Santosh M, Zhang Huafeng, *et al.* 2014. Metallogeny in response to lithospheric thinning and craton destruction: Geochemistry and U-Pb zircon chronology of the Yixingzhai gold deposit, central North China Craton[J]. *Ore Geology Reviews*, 56: 457 ~ 471.
- Li Shengrong, Shen Junfeng, Cao Ye, *et al.* 2007. Mineralogical methods for mineral exploration of replacement resources in crisis mines[J]. *Geology in China*, 34(Supplements): 366 ~ 370 (in Chinese).
- Li Yujie, Li Shengrong, Santosh M, *et al.* 2015b. Zircon geochronology, geochemistry and stable isotopes of the Wang'ershan gold deposit, Jiaodong Peninsula, China[J/OL]. *Ore Geology Reviews*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jseae.2015.03.036>.
- Luan Shiwei. 1987. *Geology of Gold Deposits and Prospecting Methods* [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Publishing House, 78 ~ 84 (in Chinese).
- Mao Jingwen, Li Houmin, Wang Yitian, *et al.* 2005. The Relationship between mantle-derived fluid and gold ore-formation in the eastern Shangdong Peninsula: Evidences from D-O-C-S isotopes[J]. *Acta*

- Geologica Sinica, 79(6): 839 ~ 857 (in Chinese with English abstract).
- Oberthur T, Cabri L J, Weiser T W, *et al.* 1997. Pt, Pd and other trace elements in sulfides of the main sulfide zone, Great Dyke, Zimbabwe: A reconnaissance study[J]. Canadian Mineralogist, 35: 597 ~ 609.
- Pan Yucheng. 1991. Genetic Mineralogy and Prospecting Mineralogy of Jinniushan Gold Deposit in Muping County, Jiaodong and Fujia Gold Deposit in Zhaoyuan (Master Graduation Thesis) [D]. China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese).
- Patrick A H and Ronald G. 1962. Thermoelectricity and resistivity of pyrite from Renison Bell and MT. Bischoff, Tasmania[J]. Economic Geology, 57: 579 ~ 586.
- Qian Jianping, Chen Hongyi, Wu Xiaolei, *et al.* 2011. Study of ore-forming structure and metallogenic prognosis of the Wangershans gold mine in Jiaodong Peninsula[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2(35): 221 ~ 231 (in Chinese with English abstract).
- Shao Jielian. 1988. Mineralogy of Gold Ore Prospecting[M]. Beijing: China University of Geosciences Press, 38 ~ 45 (in Chinese).
- Shao Wei, Chen Guangyuan, Sun Daisheng, *et al.* 1990. Method of investigating thermoelectricity of Pyrite and its application to Pyrites from gold deposits in Jiaodong Region[J]. Geoscience, 4(1): 46 ~ 57 (in Chinese).
- Shen Junfeng, Li Shengrong, Ma Guanggang, *et al.* 2013. Typomorphic characteristics of pyrite from the Linglong gold deposit: Its vertical variation and prospecting significance[J]. Earth Science Frontiers, 20(3): 55 ~ 75 (in Chinese with English abstract).
- Shen Junfeng, Li Shengrong, Santosh M, *et al.* 2013. He-Ar isotope geochemistry of iron and gold deposits reveals heterogeneous lithospheric destruction in the North China Craton[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 78(15): 237 ~ 247.
- Shuey R T. 1975. Semiconducting Ore Minerals[M]. Amsterdam, Oxford, New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 51 ~ 52.
- Song Huanbin. 1989. Applications of typomorphic characteristics of pyrite in gold geology[J]. Geology and Prospecting, 25(7): 31 ~ 37 (in Chinese).
- Song Mingchun, Li Sanzhong, Santosh M, *et al.* 2015. Types, characteristics and metallogenesis of gold deposits in the Jiaodong Peninsula, Eastern North China Craton[J]. Ore Geology Reviews, 65: 612 ~ 625.
- Song Xuexin and Zhang Jingkai. 1986. Micronutrient features of various genetic pyrite deposits in China[J]. Institute of Mineral Deposit Geology, Chinese Academy of Geosciences, 12(2): 66 ~ 175 (in Chinese).
- Tang Lei, Luo Xianrong, Chen Xiquan, *et al.* 2007. Mineralization regularities of V ore body and prospecting orientation of Wangershans gold mine[J]. Mineral Resources and Geology, 21(1): 31 ~ 34 (in Chinese).
- Wang Yiwen, Zhu Fengsan, Gong Runtan, *et al.* 2002. Tectonic isotope geochemistry: Further study on sulphur isotope of Jiaodong gold concentration area[J]. Gold, 4(23): 1 ~ 16 (in Chinese).
- Wang Zhongliang, Gong Qingjie, Yang Liqiang, *et al.* 2011. Timing of structural-thermal events in the Wangershans gold deposit, eastern Shandong: Evidence from field investigations[J]. Geology and Prospecting, 47(6): 1 067 ~ 1 076 (in Chinese).
- Xie Yuling, Xu Jiuhua, Qian Dayi, *et al.* 1999. Pyroelectricity of pyrite and application to prospecting in Taibai gold deposit[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 21(1): 2 ~ 5 (in Chinese).
- Xu Guofeng and Shan Jielian. 1980. Typomorphic characteristics of pyrite and its practical significance[J]. Geological Review, 11(6): 541 ~ 546 (in Chinese).
- Yan Yutong. 2012. Genetic Mineralogical Study on the Relationship between Quartz Vein Type and Altered Rock Type Gold Deposits in Jiaodong (Doctoral Dissertation) [D]. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Yan Yutong, Zhang Na, Li Shengrong, *et al.* 2013. Typomorphic characteristics of chemical composition of pyrite in various types of gold deposits in eastern Shandong Province[J]. Earth Science Frontiers, 20(3): 88 ~ 93 (in Chinese with English abstract).
- Yang Guojie and Zhao Bin. 1988. Assembly and application of thermoelectricity instrument[J]. Automatic Instrument, 3(1): 41 ~ 42 (in Chinese).
- Yang Zhazhong, Shi Xuefa, Yu Hongjun, *et al.* 2007. Typomorphic characteristic of mineral thermoelectricity and its application to oceanic prospecting[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 27(1): 11 ~ 17 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Long, Li Shengrong, Zhu Suizhou, *et al.* 2016. Characteristics and prospecting significance of the thermoluminescence and cell parameters of quartz from the Wangershans gold deposit, Jiaodong Peninsula, China[J]. Geoscience, 30(4): 792 ~ 801 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Hengda. 1990. A study on the pyroelectricity of pyrite and its application in gold prospecting[J]. Magazine, 10(3): 278 ~ 284 (in Chinese).
- Zhou Zhu. 2012. Ore-controlling Tectonic Stress Field of Wangershans

Gold Deposit in Northwestern Shandong Province (Master Graduation Thesis) [D]. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 曹 烨, 李胜荣, 张华锋, 等. 2010. 冀西石湖金矿黄铁矿和石英的晶胞参数特征及其地质意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 29(2): 185 ~ 191.
- 陈光远, 邵 伟, 孙岱生, 等. 1989. 胶东金矿成因矿物学与找矿[M]. 重庆: 重庆科技出版社.
- 陈光远, 孙岱生, 周珣若, 等. 1993. 胶东郭家岭花岗闪长岩成因矿物学与金矿化[M]. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 储 刚, 黄继亮, 陈 刚, 等. 1995. X 射线衍射外推法精确测定晶胞参数[J]. 计算机与应用化学, 12(1): 72 ~ 75.
- 方金云, 孙景瑜. 2000. 胶东望儿山金矿床成矿过程中物质迁移研究[J]. 黄金, 21(1): 1 ~ 3.
- 桂志利. 1992. 山东省牟平金矿成因矿物学与找矿矿物学(硕士学位论文)[D]. 中国地质大学(北京).
- 候满堂. 2000. 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, 21: 5 ~ 9.
- 李成禄, 李胜荣, 罗军燕, 等. 2009. 山西繁峙义兴寨金矿黄铁矿热电系数与矿型特征及其地质意义[J]. 现代地质, 23(6): 1 056 ~ 1 063.
- 李念凤, 董建乐. 2000. 胶东望儿山金成矿亚带控矿条件与成矿预测. 黄金地质, 6(1): 27 ~ 31.
- 李胜荣. 2013. 成因矿物学在中国的传播与发展[J]. 地学前缘, 20(3): 46 ~ 54.
- 李胜荣, 陈光远, 邵 伟, 等. 1994. 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, 14(2): 152 ~ 156.
- 李胜荣, 陈光远, 邵 伟, 等. 1996. 胶东乳山金矿田成因矿物学[M]. 北京: 地质出版社, 1 ~ 111.
- 李胜荣, 申俊峰, 曹 烨, 等. 2007. 危机矿山接替资源找矿的矿物学方法[J]. 中国地质, 34(增刊): 366 ~ 370.
- 栾世伟. 1987. 金矿地质及找矿方法[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 78 ~ 84.
- 毛景文, 李厚民, 王义天, 等. 2005. 地幔流体参与胶东金矿成矿作用的氢氧碳硫同位素证据[J]. 地质学报, 79(6): 839 ~ 857.
- 潘玉成. 1991. 胶东牟平县金牛山金矿及招远县傅家金矿成因矿物学与找矿矿物学研究(硕士学位论文)[D]. 中国地质大学(北京).
- 钱建平, 陈宏毅, 吴小雷, 等. 2011. 胶东望儿山金矿成矿构造分析和成矿预测[J]. 大地构造与成矿学, 2(35): 221 ~ 231.
- 邵洁涟. 1988. 金矿找矿矿物学[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 38 ~ 45.
- 邵 伟, 陈光远, 孙岱生, 等. 1990. 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, 4(1): 46 ~ 57.
- 申俊峰, 李胜荣, 马广刚, 等. 2013. 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, 20(3): 55 ~ 75.
- 宋焕斌. 1989. 黄铁矿标型特征在金矿地质中的应用[J]. 地质与勘探, 25(7): 31 ~ 37.
- 宋学信, 张景凯. 1986. 中国各种成因黄铁矿的微量元素特征[J]. 中国地质科学院矿床地质研究所刊, 12(2): 66 ~ 175.
- 汤 磊, 罗先熔, 陈希泉, 等. 2007. 望儿山金矿 V 号矿体的构造控矿规律及找矿方向[J]. 矿产与地质, 21(1): 31 ~ 34.
- 王义文, 朱奉三, 宫润谭, 等. 2002. 构造同位素地球化学-胶东金矿集中区硫同位素再研究[J]. 黄金, 4(23): 1 ~ 16.
- 王中亮, 龚庆杰, 杨立强, 等. 2011. 胶东望儿山金矿床构造-热事件时序: 野外地质证据[J]. 地质与勘探, 47(6): 1 067 ~ 1 076.
- 谢玉玲, 徐九华, 钱大益, 等. 1999. 太白金矿黄铁矿热电性及其在找矿中的应用[J]. 北京科技大学学报, 21(1): 2 ~ 5.
- 徐国风, 邵洁涟. 1980. 黄铁矿的标型特征及其实际意义[J]. 地质评论, 11(6): 541 ~ 546.
- 严育通. 2012. 胶东石英脉型和蚀变岩型金矿关系的成因矿物学研究(博士学位论文)[D]. 北京: 中国地质大学.
- 严育通, 张 娜, 李胜荣, 等. 2013. 胶东各类型金矿床黄铁矿化学成分标型特征[J]. 地学前缘, 20(3): 88 ~ 93.
- 杨国杰, 赵 斌. 1988. 热电仪的组装及应用. 自动化仪表, 3(1): 41 ~ 42.
- 杨赞中, 石学法, 于洪军, 等. 2007. 矿物热电性标型及其在大洋地质找矿中的应用[J]. 矿物岩石, 27(1): 11 ~ 17.
- 张 龙, 李胜荣, 朱随洲, 等. 2016. 胶东望儿山金矿床石英热释光和晶胞参数特征及其找矿意义[J]. 现代地质, 30(4): 792 ~ 801.
- 赵亨达. 1990. 黄铁矿热电性研究及在金矿找矿中的应用[J]. 矿物学报, 10(3): 278 ~ 284.
- 周 铸. 2012. 胶西北望儿山金矿床控矿构造应力场(硕士学位论文)[D]. 北京: 中国地质大学.