



编号: 0258-7106 (2010) 06-1125-13

# 胶东金青顶金矿床黄铁矿热电性标型特征 及其地质意义\*

陈海燕<sup>1</sup>, 李胜荣<sup>1</sup>, 张秀宝<sup>1</sup>, 周起凤<sup>1</sup>, 张运强<sup>1</sup>, 刘振豪<sup>2</sup>, 张海芳<sup>2</sup>, 王 宁<sup>2</sup>

(1 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083; 2 山东金洲矿业集团有限公司, 山东乳山 264500)

**摘 要** 金青顶金矿床内黄铁矿热电性标型特征的研究表明:从黄铁绢英岩阶段(I)至多金属硫化物阶段(IV),黄铁矿热电导型的变化规律是 $P < N(I) \rightarrow P < N(II) \rightarrow P > N(III) \rightarrow P > N(IV)$ ;P型黄铁矿热电系数均值 $\bar{\alpha}_p$ 和出现率P%由浅部到深部,总体为逐渐降低,局部呈波状起伏,与矿石平均金品位呈正相关关系。黄铁矿的热电系数-温度投图表明,该矿床的成矿温度集中在130~310℃,为中-低温矿床。黄铁矿的P%值由浅部至深部,沿矿体侧伏方向递减,推测成矿热液从NNE下方沿断裂向SSW上方运移,与矿体的侧伏方向一致。黄铁矿热电性参数填图显示, $\bar{\alpha}_p$ 和P%沿矿体侧伏方向出现与富矿段基本吻合的6个局部高值区,在785 m以下, $\bar{\alpha}_p$ 和P%都呈明显降低趋势,推测II号矿体在深部可能趋于尖灭。金青顶金矿床内黄铁矿的导型变化梯度与玲珑西山及玲珑东山金矿床相近,推测其延伸规模可能与玲珑西山及玲珑东山相当。

**关键词** 地质学 矿物学 黄铁矿 热电性 金矿床 金青顶 胶东

**中图分类号**: P618.51

**文献标志码**: A

## Thermoelectric character of pyrite from Jinqingding glod deposit in eastern Shandong Province and its significance

CHEN HaiYan<sup>1</sup>, LI ShengRong<sup>1</sup>, ZHANG XiuBao<sup>1</sup>, ZHOU QiFeng<sup>1</sup>, ZHANG YunQiang<sup>1</sup>,  
LIU ZhenHao<sup>2</sup>, ZHANG HaiFang<sup>2</sup> and WANG Ning<sup>2</sup>

(1 State Key Laboratory of Geological Process and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;  
2 Gold Continent Group Geological Prospecting Co., Ltd., Rushan 264500, Shandong, China)

### Abstract

Based on a study of the thermoelectricity characteristics of pyrite, the authors consider that the electric conduct assemblage type of the pyrite changes in order of  $P > N \rightarrow P < N \rightarrow P > N \rightarrow P > N$  from stage I to IV. With some local fluctuations, P% and  $\bar{\alpha}_p$  of pyrite gradually decrease from the shallow part to the depth, and there exists a positive correlation between the P%,  $\bar{\alpha}_p$  values and the average gold grade. A calculation with empirical formula implies that the ore deposit is a low-medium temperature gold deposit, whose pyrite crystallization temperature is in the range of 130~310 °C. In the NE lateral dipping direction of No. II ore body, P% shows a regular increasing trend from the depth to the shallow part, implying that the migration of the hy-

\* 本文得到国家自然科学基金项目(90914002)、全国危机矿山接替资源找矿项目(20089937)和高等学校学科创新引智计划项目(B07011)资助

**第一作者简介** 陈海燕,女,1983年生,硕士,研究方向为成因矿物学与找矿矿物学。Email:chenhaiyanok@163.com

**通讯作者** 李胜荣,男,1956年生,博士,教授,博士生导师,研究方向:成因与找矿矿物学及环境与生命矿物学。Email:lshr@cugb.edu.cn

**收稿日期** 2010-04-23; **改回日期** 2010-09-20。许德煊编辑。

drothermal solution was from NNE upward to SSW. Pyrite-thermoelectricity mapping shows that there are six local high-value areas of  $P\%$  and  $\bar{\alpha}_p$  along the SSW to NNE line, which are basically consistent with the gold grades of the high-value areas. The No. II ore body may tend to pitch out toward the deeper part, as implied by the significant reduction of  $P\%$  and  $\bar{\alpha}_p$ . Based on a comparison of the variation gradient of pyrite between Jinqingding and others deposits in eastern Shandong Province, the authors hold that the extension in the dipping direction of the No. II ore body might be similar to the extensions of the Linglong Xishan and Linglong Dongshan gold deposits.

**Key words:** geology, mineralogy, pyrite, thermoelectricity, gold deposit, Jinqingding, Jiaodong

迄今为止,国内外对矿物标型已有大量的研究(Shuey, 1975; Сейфуллин, 1978; Новгородова et al., 1980; 陈光远等, 1989; 李胜荣等, 1996; 周学武等, 2005; 祝向平等, 2008), 并在找矿工作中得到广泛应用, 经实践证明, 它是一种行之有效的方法。黄铁矿作为最主要的载金矿物, 普遍产于各种类型的金矿床中, 其标型特征的研究对指导找矿具有重要意义。前人曾对黄铁矿的晶体形态、化学成分、热电性参数、晶胞参数等特征的标型意义进行了研究, 多次成功地地为金矿的深部找矿勘探提供了有用评价信息, 并将其作为典型的找矿标志, 在玲珑、三山岛、金青顶、普弄巴等金矿田建立矿化垂直空间分带、估计矿床剥蚀深度、寻找深部隐伏矿体等方面起到了显著作用(陈光远等, 1989; 李胜荣等, 1996)。黄铁矿的热电性物理性质能灵敏地反应矿物成分及晶体结构中的某些细微差异, 利用热电性对晶体微观性状的识别能力, 结合矿物形成的地质条件, 可有效地取得矿物物性标型和找矿标志。黄铁矿的热电系数数据, 可直接或经过一定的数学处理后用于矿物填图或标型性质填图, 其研究成果可作为确定找矿靶区、标定成矿温度、预测隐伏矿体、研究成矿流体运移方向和矿体延伸规模以及矿床远景评价的依据(陈光远等, 1989)。

金青顶金矿床位于山东省乳山市东北部, 是目前中国最大的石英单脉型金矿床, 据金洲矿业集团 2009 年底储量核实, 其金储量在 50 t 以上, 矿床规模为超大型。该矿床也是牟平-乳山成矿带内最典型的石英脉型金矿床之一, 具有重要的研究价值。自上世纪 60 年代以来, 中国地质工作者对金青顶金矿床的研究从未间断过, 在矿床地质、叠加晕特征、围岩蚀变、成矿年龄、流体来源、矿床成因等方面取得了大量成果(李治平, 1992; 应汉龙, 1994; 李胜荣等, 1996; 杨敏之, 1998; 翟建平等, 1995; 李振江等,

1999; 李惠等, 2000; 凌洪飞等, 2002; 陈绪松等, 2002; Hu et al., 2004; 刘善宝等, 2005; 胡芳芳等, 2005; 2006; 赵明川, 2006; 李士先等, 2007), 其中, 对黄铁矿标型特征的研究仅限于 -385 m 水平以上的矿体, 而缺少对 -385 m 水平以下矿体内黄铁矿标型特征的研究。目前, 在该矿床 -385 ~ -785 m 中段, 已建有完整的坑道工程, 可进行系统的采样工作。虽然, 目前对该矿床控制的标高已达 -1 100 m, 但对其更深部的前景预测尚缺乏充分的依据, 因此, 开展深部系统矿物学填图是十分必要的。本文系统研究了该矿床内黄铁矿的热电性标型特征, 结合矿石平均金品位变化特征, 来揭示该矿床由浅部到深部, 黄铁矿热电性特征的变化规律, 以期对成矿温度、流体运移方向、矿体变化规律和延伸规模起到标识作用, 为进行深部找矿提供依据。

## 1 矿区地质概况

金青顶金矿床位于胶东牟平-乳山成矿带的中部, 矿体产在中生代昆嵛山杂岩体内, 成矿年龄为  $(117 \pm 3)$  Ma (Hu et al., 2004)。该地区内, 出露的地层有古元古界粉子山群和荆山群变质岩系, 以及第四系 岩浆岩以灰色中粗粒含黑云二长花岗岩(昆嵛山二长花岗岩)分布最广, 测得其锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 140 ~ 160 Ma (郭敬辉等, 2005), 其形成时代为中生代燕山期, 断裂构造以 NNE 向和 NE 向两组最为发育, 呈近等间距展布, 金青顶金矿床即位于 NNE 向将军石断裂的南段(图 1)。

金青顶金矿床由 18 个矿体组成, 其中的 II 号矿体(图 2)是该区内规模最大的一条石英单脉矿体。该矿体在地表出露约 250 m, 总体走向 50 ~ 30°, 倾向 SE (局部反倾), 倾角 83 ~ 90°, 向 NNE 侧伏, 侧伏角 55 ~ 65°, 侧伏斜深大于 1 100 m, 平均厚度为 2.10

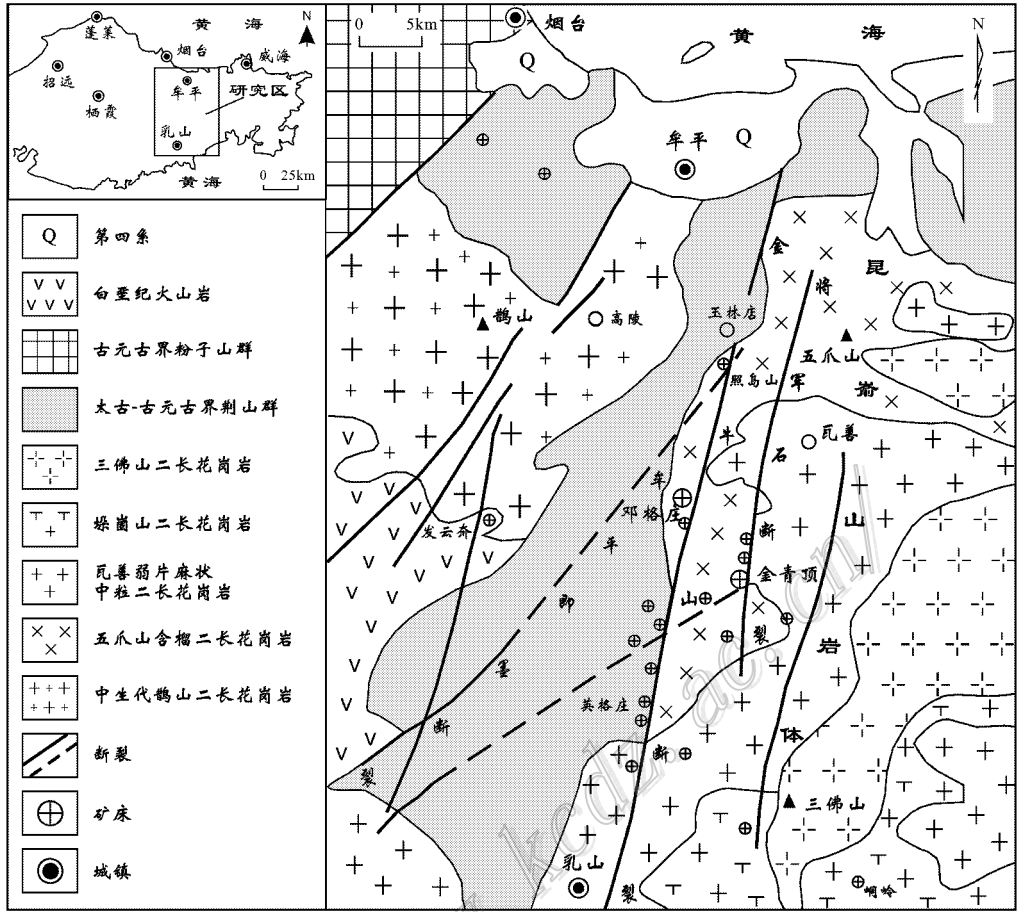


图 1 山东牟乳地区区域地质略图(据李胜荣等,1996 张华锋等,2004 范宏瑞等,2005 资料改编)

注 三佛山、垛崮山、瓦善和五爪山岩体均为中生代昆崙山杂岩体的组成部分

Fig. 1 Regional geological sketch map of Mouping-Rushan area  
(modified after Li et al., 1996; Zhang et al., 2004; Fan et al., 2005)

m,呈似板状,严格受断裂构造带的控制。矿石类型为黄铁石英脉型和多金属硫化物型。矿石内的金属矿物以黄铁矿为主,其次为黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、磁黄铁矿、碲金银矿、毒砂、辉铜矿、斑铜矿、碲银矿、碲铅矿、碲铋矿。脉石矿物以石英为主,其次为方解石、菱铁矿、绿泥石、铁白云石、铁方解石和重晶石等。矿石结构主要有自形、半自形和他形粒状结构,压碎、包含结构,交代残余结构,溶蚀结构等。矿石构造主要有块状、梳状、浸染状、网脉状、条带状、晶洞状及角砾状等(李胜荣等,1996)。矿石内的金主要以自然金产出,其次为银金矿和碲金银矿。其赋存状态以裂隙金为主,次为晶隙金和包体金。

围岩蚀变具分带特征,不同蚀变带之间呈渐变关系,一般以含金石英脉为中心,向两侧依次对称出现黄铁绢英岩化带、绢英岩化带、钾长石化带。

成矿过程可划分为 2 期 8 阶段:第 1 成矿期包

括黄铁绢英岩阶段、黄铁石英阶段、石英黄铁矿阶段和石英菱铁矿阶段;第 2 成矿期包括镜铁石英阶段、多金属硫化物阶段、石英绿泥石阶段和石英方解石阶段。其中的石英黄铁矿阶段和多金属硫化物阶段是最主要的成矿阶段(李胜荣等,1996)。

## 2 黄铁矿的产出特征

金青顶金矿床以含金黄铁石英脉型及多金属石英脉型矿体为主,黄铁矿是该矿床的主要载金矿物。本次工作着重研究了 -385 m 以下矿石的矿物组合及穿插关系,结合显微镜下观察,笔者认为,该矿床内的黄铁矿具有多期多阶段产出的特征。本文对 II 号矿体黄铁绢英岩阶段、黄铁石英阶段、石英黄铁矿阶段和多金属硫化物阶段矿石中的黄铁矿进行了较详细的统计研究,其具体特征如下:

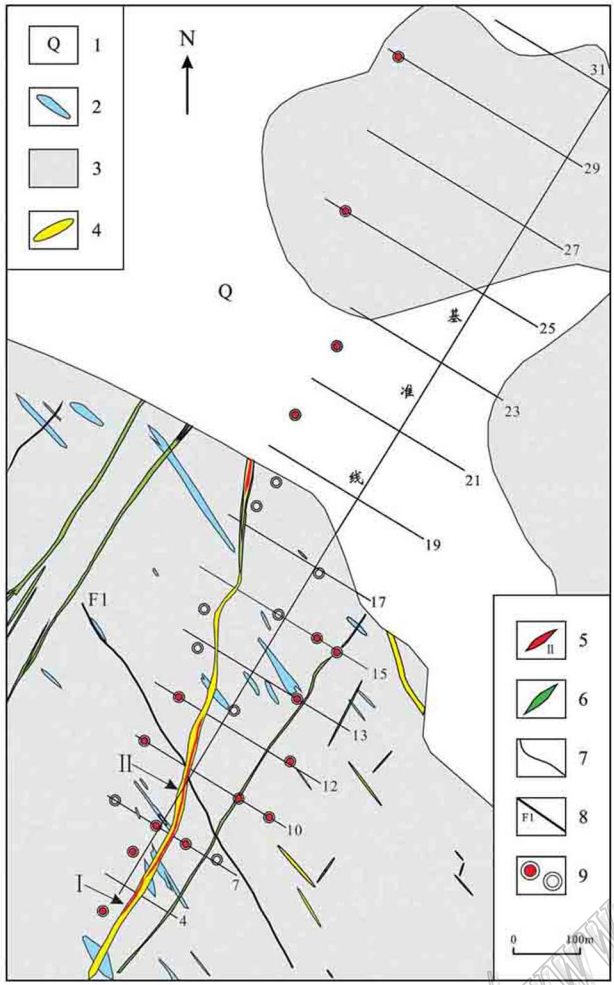


图 2 金青顶金矿区地质略图

(据山东正元地质勘查院资料<sup>①</sup>修编)

1—第四纪；2—角闪黑云斜长片麻岩；3—含黑云二长花岗岩；4—硅化绢云母化石英脉；5—矿体及编号；6—煌斑岩脉；7—地层层界线；8—断裂及编号；9—钻孔(实心见矿，空心未见矿)

Fig. 2 Geological sketch map of the Jinqingding gold ore district (modified after Zhengyuan Geological Prospecting Institute of Shandong Province)

1—Quaternary; 2—Homblende-biotite plagioclase gneiss; 3—Biotite-bearing monzonitic granite; 4—Silicified sericitized quartz vein; 5—Ore body and its serial number; 6—Lamprophyre vein; 7—Stratigraphic boundary; 8—Fault and its serial number; 9—Drill hole

黄铁绢英岩阶段(Ⅰ) 为成矿早阶段,主要显示于围岩与矿脉之间。该阶段的黄铁矿为铜黄色,自形结构,晶形多为{100}、{210},呈稀疏浸染状产出,含量10%左右。矿物共生组合为绢云母、石英、

黄铁矿和绿泥石等。含矿性不佳。

黄铁矿石英阶段(Ⅱ) 黄铁矿为浅黄白色,自形-半自形结构,晶形以{100}、{210}为主,呈稀疏浸染状产出,含量5%~20%,碎裂现象较多。矿物共生组合为黄铁矿、石英等。含矿性较好。

石英黄铁矿阶段(Ⅲ) 黄铁矿多为铜黄色,细粒半自形、他形、浑圆和碎裂结构,晶形以{210}、{311}为主,呈稠密浸染状产出,含量40%~80%。矿物共生组合为石英、黄铁矿和磁黄铁矿等。含矿性很好。

多金属硫化物阶段(Ⅳ) 黄铁矿多为铜黄色,自形和碎裂结构,多呈细脉状产出,晶形以{111}、{210}为主,含量20%~30%。矿物共生组合为石英、黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿和黝铜矿等。含矿性好。

3 黄铁矿热电性研究

3.1 测试原理及应用

矿物热电性是金属或半导体矿物在温差条件下产生的热电效应,主要受温度和微量元素组分等条件的制约,包括热电系数和导电类型(简称导型)等。热电系数是指,处在温差条件下的半导体矿物,由于温差形成的非平衡载流子由高温区向低温区扩散,扩散的结果在半导体矿物内形成了电场,对外表现为温差热电动势( $E$ ),温差一定时, $E$ 达到一平衡值,热电系数即为单位温差下的热电动势,其计算公式为:

$$\alpha = E / (t_H - t_L) = E / \Delta t。$$

式中, $\alpha$ 为热电系数( $\mu V/^{\circ}C$ ); $E$ 为热电动势(mV); $\Delta t$ 为温差( $^{\circ}C$ )。

导电类型有2种:电子型导电(N型)和空穴型导电(P型)。当 $E$ 为负值时,矿物表现为N型导电;当 $E$ 为正值时,矿物表现为P型导电(邵伟等,1990;苏文超,1997)。

3.2 样品及测试结果

本次研究在金青顶金矿床-385 m~-785 m范围的9个开采中段内,采集了169件矿石样品,在-800 m~-1 100 m范围的5个钻孔中,采集了6件矿石样品。从每件样品中挑选出50粒纯净黄铁

① 中国冶金地质总局山东正元地质勘查院, 2007. 山东省乳山市金青顶、三甲金矿接替资源勘查设计. 内部资料.

表 1 金青顶金矿床不同标高黄铁矿的热电性参数  
Table 1 Thermoelectric coefficients of pyrites from different levels of the Jinqingding gold deposit

| 成矿阶段                      | 标高/m  | 黄铁矿<br>粒数/个 | P 型热电系数/ $\mu\text{V}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ |          | N 型热电系数/ $\mu\text{V}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ |          | P 型出现率/% |
|---------------------------|-------|-------------|--------------------------------------------------|----------|--------------------------------------------------|----------|----------|
|                           |       |             | 范围                                               | P 均值     | 范围                                               | N 均值     |          |
| 黄铁绢英岩 (I)<br>(7/350)      | -485  | 50          | 4.4~297.4                                        | 173.332  | -7.5~-150.2                                      | -89.74   | 82       |
|                           | -585  | 50          | 15~301.8                                         | 159.63   | -34.5~-134                                       | -78.89   | 60       |
|                           | -635  | 150         | 3.4~305.1                                        | 109.31   | -15.8~-290.2                                     | -92.33   | 36       |
|                           | -735  | 100         | 14.3~63.9                                        | 47.54    | -3.6~-137.8                                      | -68.93   | 14       |
| 黄铁石英 (II)<br>(83/4150)    | -385  | 50          | 5.8~287.8                                        | 146.39   | -5.9~-19.1                                       | -11.78   | 88       |
|                           | -585  | 100         | 25.5~241                                         | 168.4    | -9~-186.8                                        | -88.39   | 52       |
|                           | -635  | 900         | 5.5~337.5                                        | 143.43   | -10.9~-149.8                                     | -84.4963 | 44       |
|                           | -685  | 800         | 12.8~341                                         | 167.8    | -3.4~-166                                        | -85.9225 | 46       |
|                           | -735  | 1400        | 3.6~257.3                                        | 105.7    | -12.6~-250.9                                     | -97.4847 | 31       |
|                           | -785  | 800         | 43.2~255                                         | 122.6    | -30.6~-291.2                                     | -112.617 | 40       |
|                           | -964  | 50          | 14.7~189                                         | 110.81   | -50.7~-197.1                                     | -136.1   | 14       |
|                           | -991  | 50          | 9~214.5                                          | 137.08   | -1.9~-291.2                                      | -165     | 32       |
| 石英黄铁矿 (III)<br>(122/6036) | -115  | 105         | 89~361                                           | 292      | -67~-104                                         | -86      | 96       |
|                           | -155  | 259         | 180~397                                          | 296      | -58~-146                                         | -88      | 95       |
|                           | -195  | 227         | 34~430                                           | 241      | -56~-86                                          | -70      | 95       |
|                           | -235  | 170         | 87~426                                           | 195      | -48~-155                                         | -65      | 88       |
|                           | -285  | 427         | 56~462                                           | 210      | -63~-446                                         | -167     | 88       |
|                           | -335  | 590         | 49~496                                           | 255      | -50~-530                                         | -137     | 91       |
|                           | -385  | 1208        | 16~303.8                                         | 234      | -32.2~-72.2                                      | -135     | 86       |
|                           | -485  | 50          | 6~287.4                                          | 171.65   | -38~-231.9                                       | -143.85  | 40       |
|                           | -535  | 50          | 75.8~295                                         | 224.635  | -94.1~-40.4                                      | -35.05   | 96       |
|                           | -585  | 150         | 27.4~298                                         | 172.705  | -15.2~-188.9                                     | -63.7    | 90       |
|                           | -635  | 900         | 7.2~366.3                                        | 158.6367 | -31.1~-296.4                                     | -116.987 | 51       |
|                           | -685  | 750         | 5.6~328.1                                        | 150.2929 | -31.4~-201                                       | -72.2829 | 59       |
|                           | -735  | 700         | 7.2~360.5                                        | 165.825  | -11.2~-213.9                                     | -72.426  | 82       |
|                           | -785  | 300         | 5.5~354.3                                        | 150.23   | -60.4~-108.1                                     | -45.06   | 72       |
|                           | -1029 | 50          | 17~156.2                                         | 86.24    | -5.7~-159.5                                      | -90.24   | 27       |
|                           | -1051 | 50          | 6.7~205.7                                        | 129      | -3.7~-179.6                                      | -125     | 34       |
| 多金属硫化物 (IV)<br>(13/650)   | -1100 | 50          | 3.3~143.8                                        | 48.23    | -5~-126.7                                        | -65.89   | 24       |
|                           | -535  | 100         | 15.6~261                                         | 125.71   | -10.2~-110                                       | -66.51   | 70       |
|                           | -585  | 50          | 24~301.5                                         | 168.5    | -3~-173.8                                        | -77.675  | 76       |
|                           | -635  | 200         | 11~348.1                                         | 146.19   | -13~-183.5                                       | -77.98   | 84       |
|                           | -685  | 250         | 1.8~309.1                                        | 133.37   | -1.8~-129.7                                      | -55.87   | 86       |
|                           | -785  | 50          | 26.6~349                                         | 239.22   | -36.2~-50.5                                      | -36.2    | 98       |

注：括号内数字表示“黄铁矿样品数/单颗粒数”，每件样品含 50 粒黄铁矿，测试数据总计 11 186 个。其中，石英黄铁矿阶段的数据包括李胜荣等(1996)所测 59 件样品 2 986 粒黄铁矿的数据。

矿单晶,共挑选了 8 750 粒,在纯酒精溶液中,用超声波清洗掉矿物表面的氧化膜和杂质后,运用中国地质大学(北京)成因矿物学实验室的 BHTE-06 型热电系数测量仪(北京航空航天大学研制),进行了热电性测试〔设定  $\Delta t = (60 \pm 3)^{\circ}\text{C}$ 〕。测试结果见表 1。

结合 -385 m 以上样品的测试数据(李胜荣等, 1996),得知该矿床矿石内单粒黄铁矿的热电系数  $\alpha$  的变化范围为  $-530 \sim 496 \mu\text{V}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。其中,N 型黄铁矿的  $\alpha$  变化于  $-1.8 \sim -530 \mu\text{V}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$  之间,集中区为  $-50 \sim -300 \mu\text{V}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ ;P 型黄铁矿的  $\alpha$  变化于

$+1.8 \sim +496 \mu\text{V}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$  之间,集中区为  $100 \sim 350 \mu\text{V}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ ;P 型黄铁矿出现率平均为 63.7%。

4 分析与讨论

4.1 黄铁矿热电性参数的时间分布特征

金青顶金矿床从黄铁绢英岩阶段 (I) 到多金属硫化物阶段 (IV),黄铁矿的热电导型呈规律性变化(表 1 及图 3),总体表现为,P 型黄铁矿出现率(P%)逐渐增大,而 N 型黄铁矿出现率(N%)则逐渐减小,即为  $P < N(\text{I}) \rightarrow P < N(\text{II}) \rightarrow P > N(\text{III}) \rightarrow P > N(\text{IV})$ 。

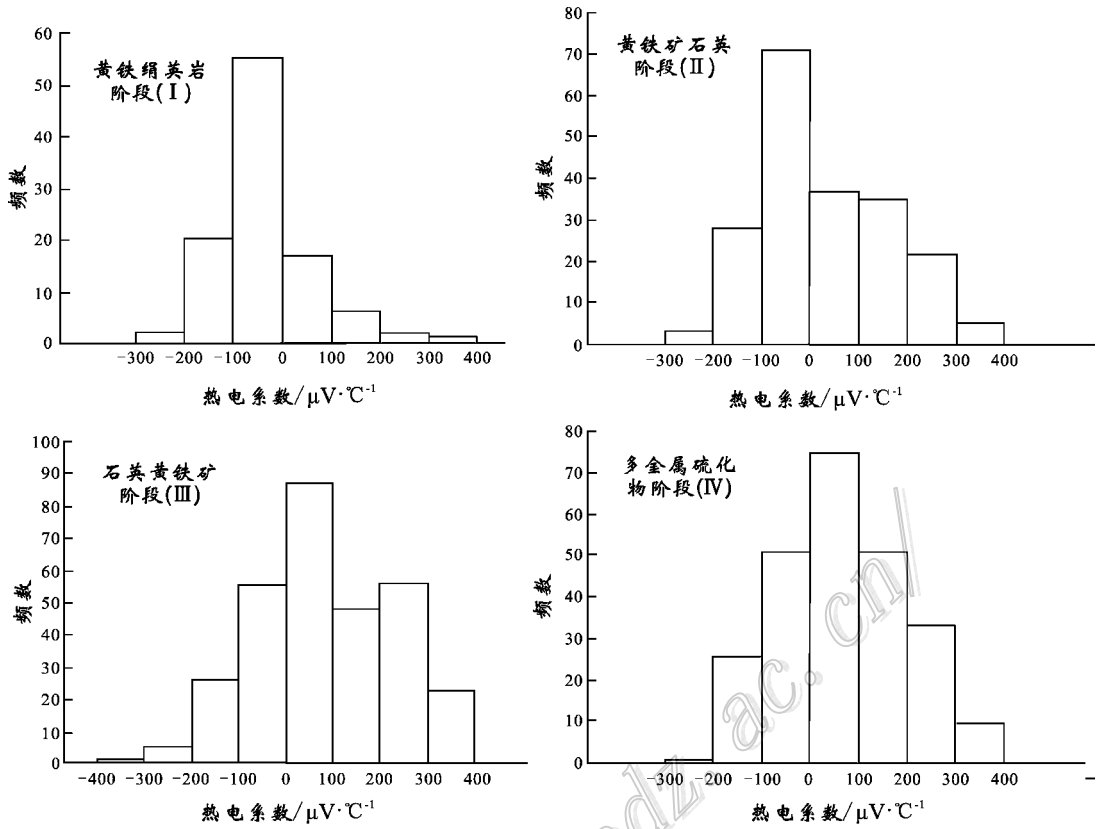


图 3 金青顶金矿床不同成矿阶段黄铁矿热电系数出现率直方图

Fig. 3 Frequency histogram of thermoelectric coefficients of pyrites from different stages in the Jinqingding gold deposit

N(IV),其中,主成矿阶段(Ⅲ、Ⅳ)为 $P \gg N$ 。这与前人总结的黄铁矿热电性在时间上的变化规律是一致的,即早期黄铁矿的形成温度高,其导电类型以N型为主,随着温度逐渐降低,其导电类型逐渐从N型向P型过渡(陈光远等,1989 李胜荣等,1996)。

4.2 黄铁矿热电性参数的空间分布特征

对金青顶金矿床内产于不同标高的黄铁矿的热电性参数进行了研究(表1)。研究表明,从I阶段至IV阶段,黄铁矿的 $P\%$ 、 $\bar{\alpha}_p$ 及 $\bar{\alpha}_N$ 值均随着深度的改变而呈现规律性变化(图4)。

黄铁绢英岩阶段(I) 在-485 m~-735 m范围内,黄铁矿的 $P\%$ 由82%下降至14%(图4A), $\bar{\alpha}_p$ 由 $173.3 \mu V \cdot ^\circ C^{-1}$ 减小到 $47.54 \mu V \cdot ^\circ C^{-1}$ (图4B), $\bar{\alpha}_N$ 绝对值总体变化不明显(图4C)。结合矿石平均金品位变化特征,表明该阶段黄铁矿的 $P\%$ 、 $\bar{\alpha}_p$ 的变化趋势与金品位呈正相关关系; $\bar{\alpha}_N$ 的变化趋势与金品位呈反相关关系。

黄铁石英阶段(Ⅱ) 在-385 m~-991 m范围内,黄铁矿的 $P\%$ 、 $\bar{\alpha}_p$ 总体降低,局部出现3个高值区(图4D和4E)。 $\bar{\alpha}_N$ 的绝对值总体增大,局部减

小(图4F)。结合矿石平均金品位变化特征,表明该阶段黄铁矿的 $P\%$ 、 $\bar{\alpha}_p$ 的变化趋势与金品位呈正相关关系; $\bar{\alpha}_N$ 的变化趋势与金品位呈反相关关系。

石英黄铁矿阶段(Ⅲ) 在-115 m~-1100 m范围内,黄铁矿的 $P\%$ 、 $\bar{\alpha}_p$ 都呈现逐渐降低趋势,且出现6次同步幅波动,相应出现6个局部高值区(图4G和4H)。 $\bar{\alpha}_N$ 由浅部至深部变化不大,仅存在局部小波动,且与 $P\%$ 、 $\bar{\alpha}_p$ 呈反相关关系(图4I)。结合矿石平均金品位变化特征,表明该阶段黄铁矿的 $P\%$ 、 $\bar{\alpha}_p$ 的变化趋势与金品位呈正相关关系; $\bar{\alpha}_N$ 的变化趋势与金品位呈反相关关系。

多金属硫化物阶段(Ⅳ) 在-535 m~-785 m范围内,黄铁矿的 $P\%$ 、 $\bar{\alpha}_p$ 呈现逐渐上升的趋势,而 $\bar{\alpha}_N$ 则呈现降低的趋势(图4J、4K和4L)。由于测试数据较少,所控制的空间范围有限,因此,该阶段黄铁矿的 $P\%$ 、 $\bar{\alpha}_p$ 的变化趋势与矿石金品位变化的关系不明显,有待进一步测试和研究。

4.3 据黄铁矿热电系数对成矿温度的标定

黄铁矿的热电系数与其形成温度有一定的关系,戈尔巴乔夫(1964)利用大量实验数据得出了黄



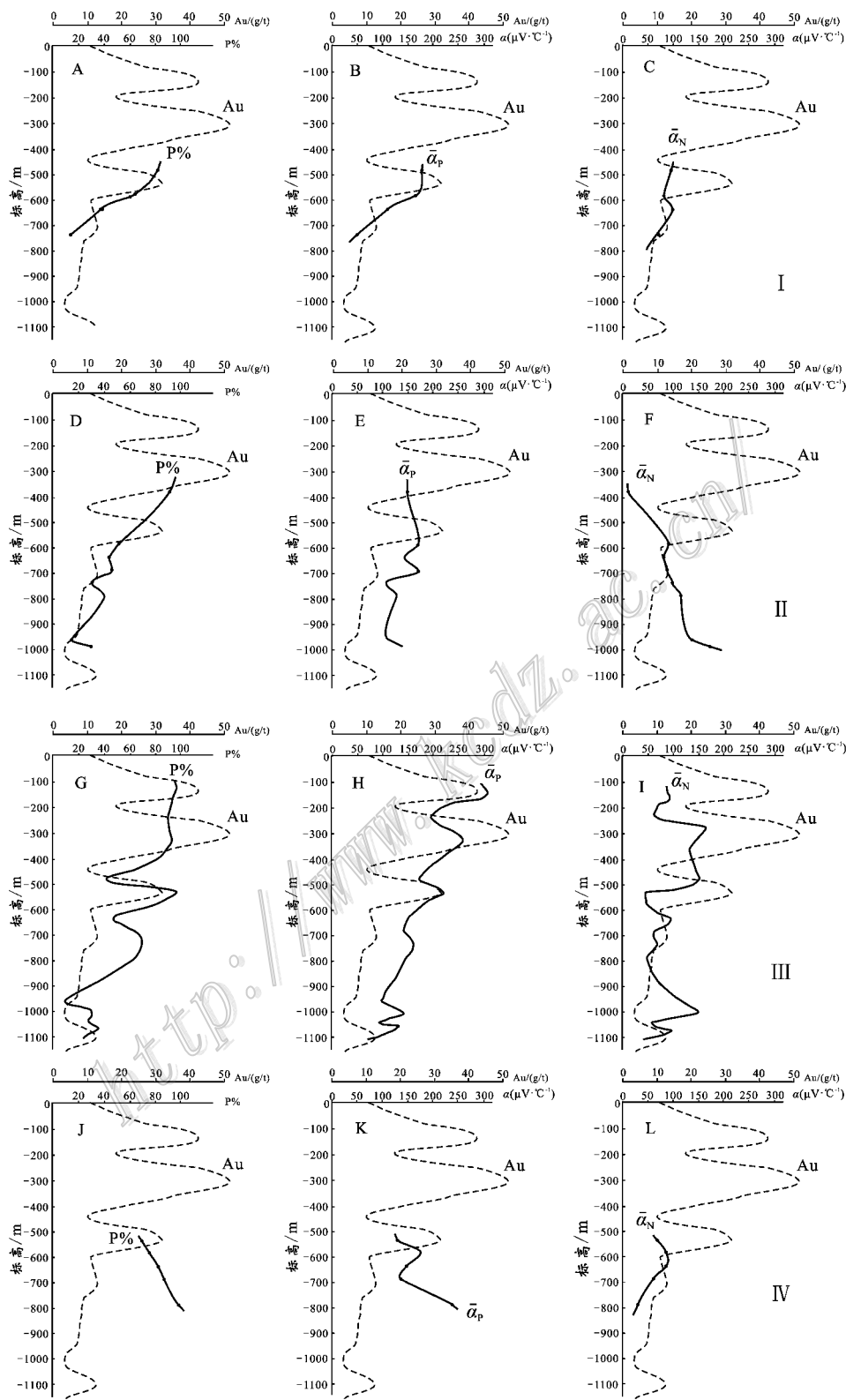


图 4 金青顶金矿床不同标高不同成矿阶段黄铁矿热电性变化特征

注：Au—矿石平均金品位变化曲线； $\bar{\alpha}_p$ —P 型黄铁矿热电系数平均值； $\bar{\alpha}_N$ —N 型黄铁矿热电系数平均值绝对值；P%—P 型黄铁矿出现率。  
I—黄铁绢英岩阶段；II—黄铁矿石英阶段；III—石英黄铁矿阶段；IV—多金属硫化物阶段。-800 m 以下数据较少，只有 8 个。金品位数据据金州集团各中段平面图

Fig. 4 Variation characteristics of thermoelectricity of pyrites from various stage and different levels in the Jinqingding gold deposit

铁矿的热电系数-温度相关关系图,以及相关的方程(Hollister et al., 1985):

$$t = (704.51 - \alpha) / 1.818 \quad (\text{N型});$$

$$t = 3(122.22 + \alpha) / 5.0 \quad (\text{P型}).$$

将金青顶金矿床内黄铁矿的热电系数测定值代入上述 2 式,计算得出其黄铁矿的形成温度范围为 77~385 °C,将其投点于黄铁矿热电系数-温度图(图 5)上,显示出黄铁矿的形成温度主要集中在 130~310 °C 之间,从而得知该矿床为中-低温矿床。这与前人利用石英内流体包裹体所测得的主成矿期成矿温度(170~324 °C)(胡芳芳等, 2005)基本吻合,说明利用黄铁矿的热电系数来标定成矿温度是可行的。

#### 4.4 黄铁矿热电性参数对成矿流体运移方向的标识

Сейфуллин(1978)、Новгородова 等(1980)、陈光远等(1989)研究认为,矿物结晶和类质同象的某些规律对结晶温度具有指示意义。这些规律是:高温条件下结晶,高价离子杂质进入晶格的趋势较强,它们通常成为施主(形成 N 型晶体),高温下结晶的黄铁矿为 Fe 过饱和,这意味着存在 S 的空位,而 S 空位通常起施主作用(形成 N 型黄铁矿);低温条件下结晶,低价离子杂质进入晶格,它们通常成为受主(形成 P 型晶体),低温下结晶的黄铁矿为 S 过饱和,这意味着存在 Fe 的空位,而 Fe 空位通常起受主作用(形成 P 型黄铁矿)。结晶温度间接影响着黄铁矿的热电性,高温下形成的黄铁矿常为 N 型,低温下形成的黄铁矿常为 P 型,中温条件下形成的黄铁矿为

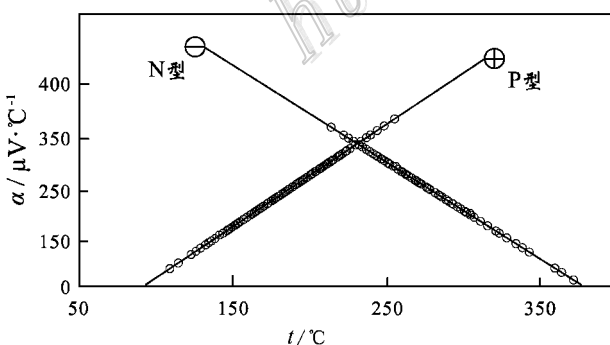


图 5 金青顶金矿床黄铁矿热电系数-温度图解  
(底图据戈尔巴乔夫, 1964)

Fig. 5 Relationship between thermoelectricity and temperatures of pyrites from the Jinqingding gold deposit (base map after Горбачёв, 1964)

P+N 型,但还不具有较广泛的定量意义。因此,可以尝试通过研究金青顶金矿床内不同标高黄铁矿的导型变化特征,来反演黄铁矿结晶的温度条件,得出成矿温度在垂向上的变化特征,从而间接指示出成矿流体的运移方向。

金青顶金矿床石英内流体包裹体的均一温度在垂向上的变化规律以及石英的高环带韵律特征表明,成矿热液从 II 号矿体的 NNE 下方,沿断裂向 SSW 上方运移,运移路线与矿体的侧伏方向一致(李胜荣等, 1996)。本次研究发现,黄铁矿的 P% 沿 II 号矿体的侧伏方向,由 NNE 下方,向 SSW 上方有规律地递增,据上述原理反演出成矿温度应由 NNE 下方,向 SSW 上方有规律地递减,间接指示出成矿热液由 NNE 下方沿断裂向 SSW 上方运移。这与前人的研究结果基本一致,说明应用黄铁矿热电性参数的变化规律来标识成矿流体的运移方向是可行的。

#### 4.5 黄铁矿热电性参数对富矿段的标识

笔者应用金青顶金矿床内黄铁矿的热电性参数数据,系统填制了 II 号矿体的黄铁矿 P% 和  $\bar{\alpha}_p$  等值线垂直纵投影图(图 6 和图 7),结合该矿体矿石的金品位等值线垂直纵投影图(图 8),系统研究了该矿床内黄铁矿热电性参数分布特征与金矿化的关系。

通过分析 P 型黄铁矿出现率(P%)垂直纵投影图(图 6)可知,在 -115 m~-785 m 范围内,P% 沿矿体 NE 侧伏方向逐渐降低,出现 6 个近等间距分布的局部高值区,大致呈串珠状依次分布于 13 线以南 -115 m~-195 m、12-15 线之间 -195 m~-385 m、13-17 线之间 -385 m~-485 m、17-19 线之间 -535 m~-635 m、19-23 线之间 -585 m~-685 m 和 23-27 线之间 -635 m~-735 m 范围内,与金品位等值线垂直纵投影图(图 8)内的高值区基本吻合。此外,在 15-17 线-785 m 中段、25-29 线-800 m~-900 m,也出现局部高值区,但其 P% 的数值已较上部明显降低。

P 型黄铁矿热电系数平均值  $\bar{\alpha}_p$  等值线的分布规律(图 7)与 P% 基本相同,即沿矿体 NE 侧伏方向出现 6 个局部高值区,与 P% 的 6 个局部高值区及金品位高值区基本吻合。此外,在 15-17 线之间 -785 m 中段以及 25-29 线之间 -800 m~-900 m,也出现局部高值区,但其  $\bar{\alpha}_p$  的数值较上部明显减小。

值得注意的是,在 -785 m 以下,P% 及  $\bar{\alpha}_p$  沿矿体 NE 侧伏方向出现大范围的低值区,而且,实际控矿钻孔的化验结果亦显示出金矿化强度具明显减弱



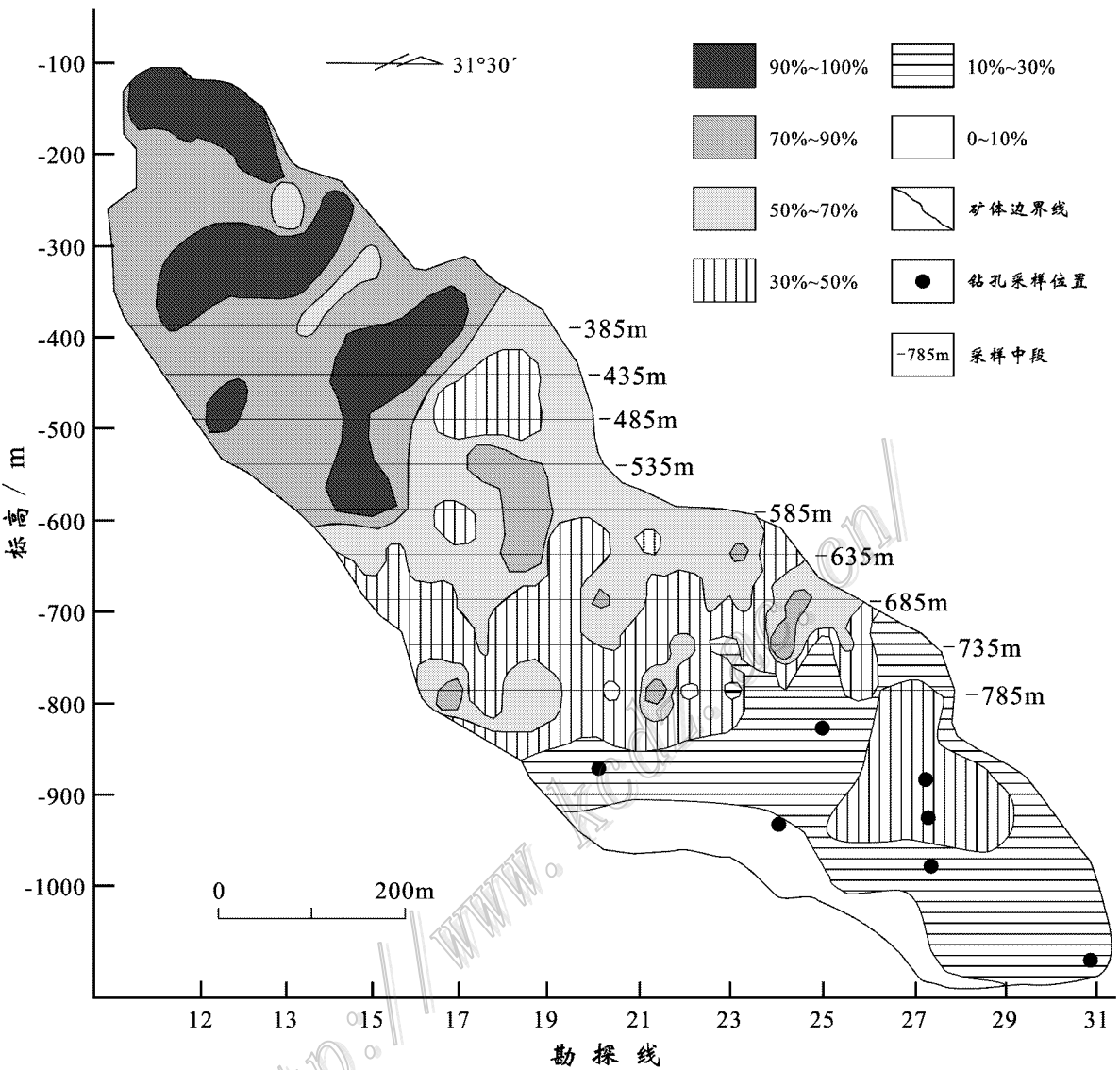


图 6 金青顶金矿床Ⅱ号矿体 P 型黄铁矿出现率(P%)等值线垂直纵投影图

注：+60 m～-385 m 的数据据李胜荣(1996)；-385 m～-535 m 各中段约隔 20 m 取样，-585 m～-785 m 各中段约隔 5 m 取样  
Fig. 6 Vertical longitudinal projection of P-type pyrite from No. II ore body in the Jinqingding gold deposit

的趋势。邵伟等(1990)及李胜荣等(1996)经研究认为,胶东地区多数金矿床内黄铁矿的热电性垂向分带具有规律性:矿体浅部的黄铁矿以 P 型为主或为单一 P 型,向深部则转化为以 N 型为主或为单一 N 型。在金青顶金矿区 -800 ~ -1 100 m 范围内,采集了 5 个钻孔中的黄铁矿,其 P% 为 12% ~ 24%,基本上以 N 型占主导,其化验结果亦显示其金品位小于  $9 \times 10^{-6}$ ,矿化已明显减弱。综合  $\bar{\alpha}_p$  和 P% 及金品位的分布规律、导型组合规律,可推测Ⅱ号矿体在 -785 m 以下很可能已到根部,向下延深可能趋于尖灭,但若再出现黄铁矿  $\bar{\alpha}_p$  和 P% 的高值,则有可能

在深部找到新的富矿段。

4.6 黄铁矿热电导型组合对矿体延伸规模的标识

前人研究发现,黄铁矿的导型变化梯度与矿体在倾向方向上的延伸规模关系密切(陈光远等, 1989)。依据采自不同位置的黄铁矿的热电性导型组合,可以计算出在取样位置所表示的方向上一定距离内导型的变化程度,即导型变化梯度[导型变化梯度 = (两个取样位置的 P 或 N 型黄铁矿出现率的差/两个取样位置标高的差) × 100]。胶东地区金矿床总的特点是,黄铁矿的热电性变化梯度小,则矿体沿倾向的延伸距离较大,反之,矿体沿倾向的延伸距离较小。

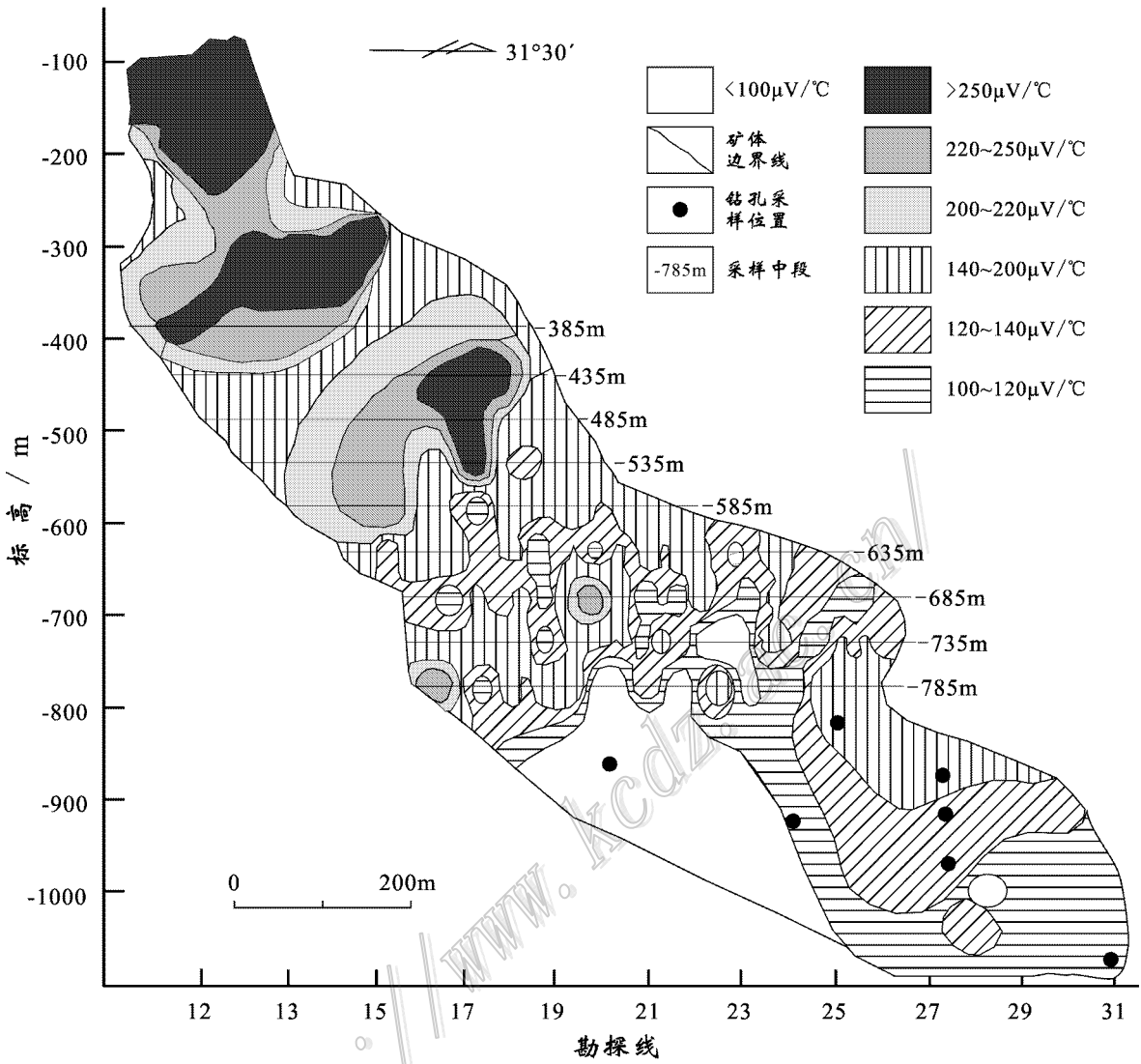


图 7 金青顶金矿床Ⅱ号矿体 P 型黄铁矿热电系数平均值( $\alpha_p$ )等值线垂直纵投影图

注：+60 m ~ -385 m 数据据李胜荣(1996)；-385 m ~ -535 m 各中段约隔 20 m 取样，-585 m ~ -785 m 各中段约隔 5 m 取样  
Fig. 7 Vertical longitudinal projection of average thermoelectric coefficient of P-type pyrite from No. II ore body in the Jinqingding gold deposit

对胶东地区一些金矿床内黄铁矿的导型变化率与矿体沿倾向延伸规模的关系进行了对比研究(表 2)。研究表明,金青顶金矿床内黄铁矿的导型变化梯度平均值较小,为 3.2,与玲珑东山、玲珑西山黄铁矿的导型变化梯度相近,推测金青顶金矿床Ⅱ号矿体沿倾向延伸的规模可能与玲珑东山、玲珑西山相当,应在 700 m 以上。该结果与金青顶金矿床已探明的矿体延伸规模(>1 200 m)是一致的。

5 结 论

(1)在金青顶金矿床,从黄铁绢英岩阶段(Ⅰ)到

多金属硫化物阶段(Ⅳ),黄铁矿的热电导型总体表现为  $P < N(Ⅰ) \rightarrow P < N(Ⅱ) \rightarrow P > N(Ⅲ) \rightarrow P > N(Ⅳ)$ ,其中主成矿阶段(Ⅲ、Ⅳ)为  $P > N$ 。

(2)Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ 阶段矿石内 P 型黄铁矿的热电系数均值  $\alpha_p$  和出现率 P%,由浅部到深部,总体为逐渐降低,局部呈波状起伏,与矿石平均金品位呈正相关关系。Ⅳ 阶段由于测试数据较少,所控制的空间范围有限,其 P%和  $\alpha_p$  与矿石金品位变化的关系不明显,有待进一步测试和研究。

(3)应用黄铁矿热电系数与其形成温度的经验公式进行了计算和投图,结果表明,金青顶金矿床的成矿温度集中在 130 ~ 310℃,为中-低温矿床。此

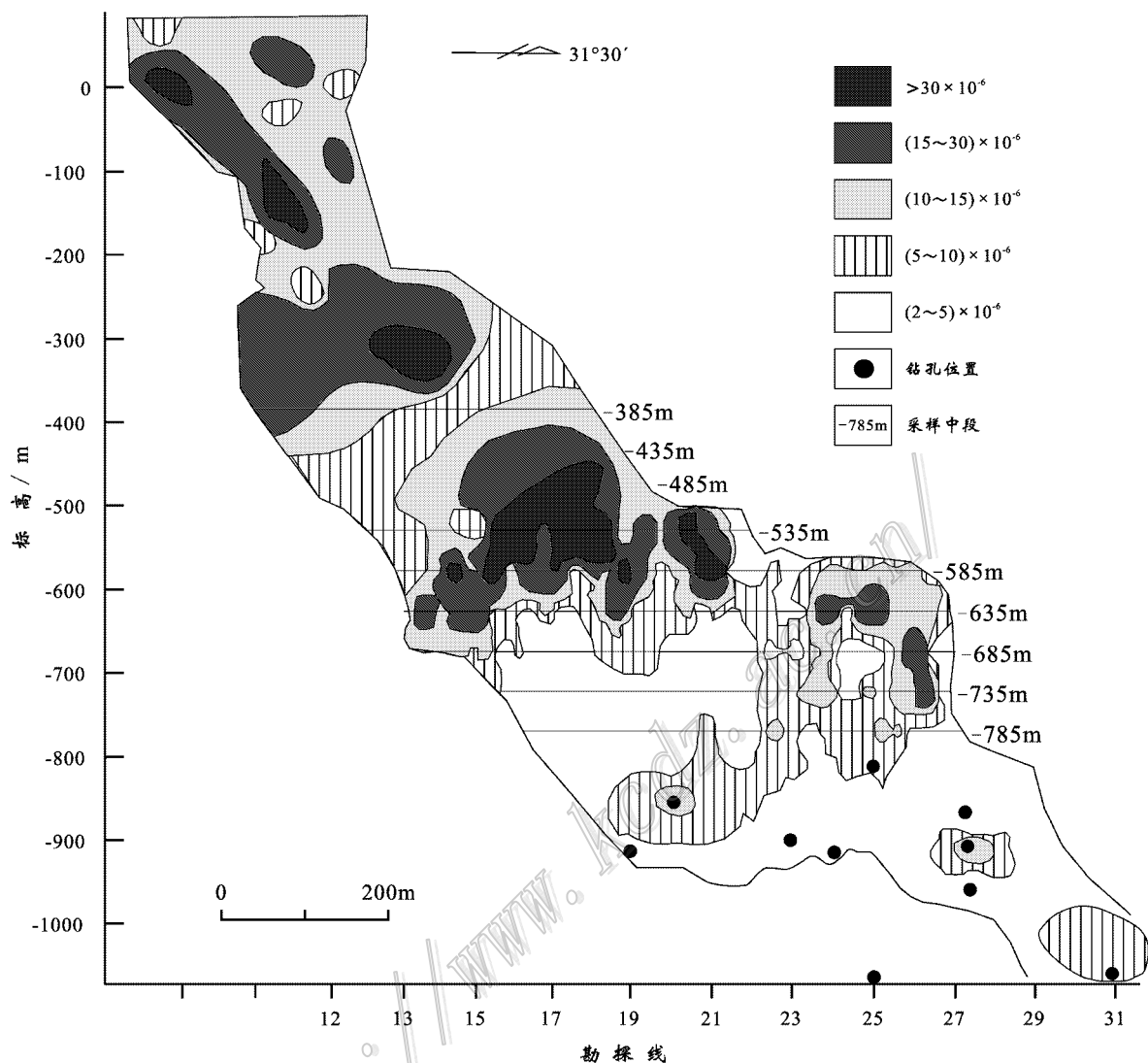


图 8 金青顶金矿床Ⅱ号矿体金品位等值线垂直纵投影图

Fig. 8 Vertical longitudinal projection of gold grade of No. II ore body in the Jinqingding gold deposit

表 2 胶东地区一些金矿床内黄铁矿的导型变化梯度与矿体延伸规模

Table 2 Relationship between variation gradient of pyrite and downward extention of the ore body in in the Jiaodong gold deposits

|                                                | 夏甸  | 玲珑西山 | 玲珑东山 | 三山岛  | 金青顶   |
|------------------------------------------------|-----|------|------|------|-------|
| 矿体延伸长度/m                                       | 115 | >700 | >750 | >950 | >1200 |
| P 型黄铁矿变化梯度/<br>( $1/\text{m} \times 10^{-2}$ ) | 83  | 3.6  | 3    | 0    | 3.2   |

注 金青顶矿区的数据取自 -115 m ~ -785 m 范围内各中段变化梯度的平均值,其他数据引自陈光远等(1989)。

结论与该矿床石英内流体包裹体均一温度的测定结果相一致。

(4) P 型黄铁矿出现率 P% 沿Ⅱ号矿体侧伏方向,由 NNE 下方向 SSW 上方有规律地递增,据其反演出成矿温度应由 NNE 下方,向 SSW 上方有规律地递减,间接指示出成矿热液由 NNE 下方沿断裂向 SSW 上方运移。这与前人的流体包裹体测温结果基本一致。

(5)黄铁矿热电性参数填图显示,沿矿体 NE 侧伏方向, $\bar{\alpha}_p$  和 P% 出现 6 个局部高值区,与金品位高值区基本吻合。在 -785 m 以下, $\bar{\alpha}_p$  和 P% 虽局部有小幅波动,但总体上出现明显降低趋势,推测Ⅱ号矿体在 -785 m 以下很可能已到根部,向下延深可能趋于尖灭。但若再出现黄铁矿  $\bar{\alpha}_p$  和 P% 的高值,则有可能在深部找到新的富矿段。

(6) II号矿体沿倾向黄铁矿的导型变化梯度与玲珑西山及玲珑东山金矿床相近,推测其延伸规模可能与玲珑西山及玲珑东山的矿体延伸规模相当,应在700 m以上。目前,金青顶金矿床II号矿体实际钻孔控制的沿倾向的延伸规模已超过1200 m,说明应用黄铁矿热导型变化梯度来估算出矿体的延伸规模是可行的。

志 谢 野外工作中得到山东金洲矿业集团有限公司李振江总经理、于虎副总经理和地勘公司柳玉明经理的大力协助,研究工作得到山东金洲矿业集团有限公司地质探矿专家组的指导,并承蒙中国地质大学(北京)赵国春老师、张华锋老师等对本文初稿提出了宝贵修改意见,在此一并表示衷心感谢!

## References

- Chen G Y, Shao W and Sun D S. 1989. Genetic mineralogy of gold deposits in Jiaodong region and gold prospecting [M]. Chongqing: Chongqing Pub. House (in Chinese).
- Chen X S, Xu J H, Liu J M, Xie Y L, Zhu H P and Li Y B. 2002. REE composition of fluid inclusions in Jinjingding and Qibaoshan gold deposits, Jiaodong area [J]. Mineral Deposits, 21 (4): 387-392 (in Chinese with English abstract).
- Fan H R, Hu F F, Yang J H, Shen K and Zhai M G. 2005. Fluid evolution and large-scale gold metallogeny during Mesozoic tectonic transition in the eastern Shandong Province [J]. Acta Petrologica Sinica, 21 (5): 1317-1328 (in Chinese with English abstract).
- Guo J H, Chen F K and Zhang X M. 2005. Evolution of syn-to post-collisional magmatism from north Sulu UHP belt, eastern China: Zircon U-Pb geochronology [J]. Acta Petrologica Sinica, 21 (4): 1281-1301 (in Chinese with English abstract).
- Hollister V F, et al. 1985. Discoveries of epithermal precious metal deposits [A]. Case histories of mineral discoveries, New Jersey [C]. 1: 169.
- Hu F F, Fan H R, Yang J H, Wang Y S, Liu D Y, Zhai M G and Jin C W. 2004. Mineralizing age of the Rushan lode gold deposit in the Jiaodong Peninsula: SHRIMP U-Pb dating on hydrothermal zircon [J]. Chinese Science Bulletin, 49 (15): 1629-1636.
- Hu F F, Fan H R, Shen K, Zhai M G, Jin C W and Chen X S. 2005. Nature and evolution of ore-forming fluids in the Rushan lode gold deposit, Jiaodong peninsula of eastern China [J]. Acta Petrologica Sinica, 21 (5): 1329-1338 (in Chinese with English abstract).
- Hu F F, Fan H R, Yang J H, Wang F and Zhai M G. 2006. The  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating Age of sericite from altered rocks in the Rushan Lode gold deposit, Jiaodong Peninsula and its constraints on the gold mineralization [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 25 (2): 109-114 (in Chinese with English abstract).
- Li H, Liu Z C, Wang J C, Li T and Gao X H. 2000. Overprint halo feature research on Jinjingding Au deposit and ore prediction following ore exploration [J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 15 (2): 151-157 (in Chinese with English abstract).
- Li S R, Chen G Y, Shao W and Sun D S. 1996. Research on genetic mineralogy in Jinjingding gold deposit [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1-24, 78-93 (in Chinese).
- Li S X, Liu C C, An Y H, Wang W C, Huang T L and Yang C H. 2007. Gold deposit in East Shangdang [M]. Beijing: Geol. Pub. House (in Chinese with English abstract).
- Li Z J, Liu S B and Sun Y T. 1999. The genesis and concentration regularity of Jinjingding gold deposit [J]. Gold, 20 (5): 3-12 (in Chinese with English abstract).
- Li Z P. 1992. The genesis of Rushan gold deposit in East Shangdong [J]. Mineral Deposits, 11 (2): 165-178 (in Chinese with English abstract).
- Ling H F, Hu S X, Sun J G, Ni P and Shen K. 2002. Geochemical study of granitic wall-rock alteration in Dayingezhuang gold deposit of alteration rock type and Jinjingding gold deposit of quartz-vein type [J]. Mineral Deposits, 21 (2): 187-197 (in Chinese with English abstract).
- Liu S B, Zhang B L, Xu X W, Wang J, Cai X P and Chen Y. 2005. The localizing mechanism of ore-forming fluids in the Jinjingding gold deposit [J]. Gold Science and Technology, 13 (3): 7-16 (in Chinese with English abstract).
- Shao W, Chen G Y and Sun D S. 1990. Study on Thermoelectricity of pyrite and adhibition on gold deposit in Jiaodong region [J]. Geo-science, 4 (1): 46-57 (in Chinese with English abstract).
- Shuey R T. 1975. Semiconducting ore minerals [M]. Amsterdam, Oxford, New York: Elsevier Scientific Publishing Company.
- Su W C. 1997. A pyroelectricity study on pyrite and its prospecting significance in lannigou gold deposit, southwestern guizhou [J]. Gold geology, 3 (2): 7-12 (in Chinese with English abstract).
- Yang M Z. 1998. The geochemistry of wallrock alteration zone of gold deposits: As exemplified by Jiaodong gold deposits [M]. Geol. Pub. House. 11-81 (in Chinese with English abstract).
- Ying H L. 1994. Isotopic compositions and their geological significance of Jinjingding and Denggezhuang gold deposits, Jiaodong [J]. Journal of Precious Metallic Geology, 3 (3): 201-207 (in Chinese with English abstract).
- Zhai J P, Hu K and Lu J J. 1995. Study on fluid inclusions and hydrogen and oxygen isotope geochemistry of Rushan gold deposit in Shandong province [J]. Geochimica, 15 (4): 358-364 (in Chinese with English abstract).
- Zhang H F, Zhai M G, He Z F, Peng P and Xu B L. 2004. Petrogenests and implications of the sodium-rich granites from the Kunyushan complex, eastern Shandong Province [J]. Acta Petrologica Sinica, 20 (3): 369-380 (in Chinese with English abstract).
- Zhao M C. 2006. The geologic feature and metallization of Jinjingding gold Deposit [J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 21 (Supp.): 48-51 (in Chinese with English abstract).
- Zhou X W, Li S R, Lu L and Lin W B. 2005. Research on the composi-

tion typomorphism of pyrite from Longkeng gold-silver mineralization district in Wuyi, Zhejiang province, China [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 24 (4): 317-326 (in Chinese with English abstract).

Zhu X P, Wang M J, Yao P, Xu J S, Li J Z, Chen M H and Tang G L.

2008. Typomorphic characteristics of pyrrhotite as an ore-forming indicator of Heiniudong copper deposit [J]. Acta Petrologica Sinica, 24 (3): 562-568 (in Chinese with English abstract).

Новгородова М И, Гамянин Г Н и Цепин А И. 1980. Типоморфизм золотовосных сульфидов и их минеральных ассоциаций [A]. Общие вопросы типоморфизма минералов [M]. Москва: Изд. «Наука» (in Russian).

Сейфуллин Р С. 1978. Возможности и перспективы развития термоэлектрического метода изучения рудных минералов [M]. ЗВМО. Вып: 5 (in Russian).

## 附中文参考文献

陈光远, 邵伟, 孙岱生. 1989. 胶东金矿成因矿物学与找矿 [M]. 重庆: 重庆科技出版社.

陈绪松, 徐九华, 刘建明, 谢玉玲, 朱和平, 李永兵. 2002. 山东金青顶金矿床和七宝山金矿床的流体包裹体 REE 组成 [J]. 矿床地质, 21 (4): 387-392.

范宏瑞, 胡芳芳, 杨进辉, 沈昆, 翟明国. 2005. 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, 21 (5): 1317-1328.

郭敬辉, 陈福坤, 张晓曼. 2005. 苏鲁超高压带北部中生代岩浆侵入活动与同碰撞—碰撞后构造过程: 锆石 U-Pb 年代学 [J]. 岩石学报, 21 (4): 1281-1301.

胡芳芳, 范宏瑞, 沈昆, 翟明国, 金成伟, 陈绪松. 2005. 胶东乳山脉状金矿床成矿流体性质与演化 [J]. 岩石学报, 21 (5): 1329-1338.

胡芳芳, 范洪瑞, 杨进辉, 王菲, 翟明国. 2006. 胶东乳山金矿蚀变岩中绢云母<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 年龄及其对金成矿事件的制约 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 25 (2): 109-114.

李惠, 刘振昌, 王敬臣, 李涛, 高祥海. 2000. 对山东金青顶金矿床原生叠加晕特征的跟踪研究及预测 [J]. 地质找矿论丛, 15 (2): 151-157.

李胜荣, 陈光远, 邵伟, 孙岱生. 1996. 胶东乳山金矿田成因矿物学 [M]. 北京: 地质出版社. 1-24, 78-93.

李士先, 刘长春, 安郁宏, 王为聪, 黄太岭, 杨承海. 2007. 胶东金矿地质 [M]. 北京: 地质出版社.

李振江, 刘善宝, 孙玉堂. 1999. 金青顶金矿床成因及富集规律 [J]. 黄金, 20 (5): 8-12.

李治平. 1992. 胶东乳山金矿床成因 [J]. 矿床地质, 11 (2): 165-178.

凌洪飞, 胡受奚, 孙景贵, 倪培, 沈昆. 2002. 胶东金青顶和大尹格庄金矿床花岗质围岩的蚀变地球化学研究 [J]. 矿床地质, 21 (2): 187-197.

刘善宝, 张宝林, 徐兴旺, 王杰, 蔡新平, 陈雁. 2005. 金青顶金矿床成矿流体的空间定位机制 [J]. 黄金科学技术, 13 (3): 7-16.

邵伟, 陈光远, 孙岱生. 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.

苏文超. 1997. 黔西南烂泥沟金矿黄铁矿热电性研究及其找矿意义 [J]. 黄金地质, 3 (2): 7-12.

杨敏之. 1998. 金矿床围岩蚀变带地球化学—以胶东金矿为例 [M]. 北京: 地质出版社. 11-81.

应汉龙. 1994. 胶东金青顶和邓格庄金矿床的同位素组成及其地质意义 [J]. 贵金属地质, 3 (3): 201-207.

翟建平, 胡凯, 陆建军. 1995. 山东乳山金矿床的流体包裹体和氢氧同位素地球化学研究 [J]. 地球化学, 15 (4): 358-364.

张华锋, 翟明国, 何中甫, 彭澎, 许保良. 2004. 胶东昆嵛山杂岩中高锆花岗岩地球化学成因及其意义 [J]. 岩石学报, 20 (3): 369-380.

赵明川. 2006. 金青顶金矿床地质特征及成矿作用 [J]. 地质找矿论丛, 21 (增刊): 48-51.

周学武, 李胜荣, 鲁力, 林卫兵. 2005. 浙江弄坑金银矿区黄铁矿成分标型研究 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 24 (4): 317-326.

祝向平, 汪名杰, 姚鹏, 徐金沙, 李建忠, 陈敏华, 唐高林. 2008. 四川黑牛洞铜矿床磁黄铁矿的标型特征及成矿指示意义 [J]. 岩石学报, 24 (3): 562-568.