

文章编号: 0258-7106 (2000) 04-0307-08

# 胶东北部超高品位金矿黄铁矿热电性研究

杨竹森<sup>1</sup> 李红阳<sup>1</sup> 高振敏<sup>1</sup> 王志敬<sup>2</sup>

(1 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学开放实验室, 贵阳 550002

2 国土资源部地质调查局, 北京 100812)

提 要: 对胶东北部超高品位金矿集中区黄铁矿热电标型的时空分布研究表明, P 型黄铁矿出现率和 P 型黄铁矿热电系数平均值及 P 型黄铁矿热电系数离散性呈 NE 和 NNE 向带状展布, 超高品位金矿位于这两组方向交汇部位的 P 型黄铁矿出现率大于 90%, P 型黄铁矿热电系数平均值大于  $250 \mu\text{V}/\text{C}$ , P 型黄铁矿热电系数离散性小于 1.5 的区域内, 反映了超高品位金矿形成于温度较低, 成矿流体中 As、Sb、Te 等的含量较高, 且温度和成分变化较小的条件, 成矿部位处于成矿流体上升通道附近。

关键词: 黄铁矿热电性 超高品位金矿 胶东北部

中图法分类号: P618.51 文献标识码: A

胶东地区是我国重要产金区之一, 区内不仅有磁山、玲南、大伊格庄、焦家、新城、三山岛等大型和超大型金矿<sup>[1,2]</sup>, 而且在其北部发现有黑岚沟、大柳行等超高品位金矿<sup>[11]</sup>。由于超高品位金矿产金量高, 经济效益巨大, 已引起有关部门的高度重视。因黄铁矿与金矿成矿关系密切, 其热电性标型能够反映成矿条件<sup>[3,4]</sup>, 故本文着重从成矿贯通性矿物黄铁矿热电性标型的时空分布, 探讨胶东北部超高品位金矿床的形成条件。

## 1 矿床地质概况

胶东北部的超高品位金矿, 集中分布在蓬莱市东南黑岚沟—大柳行一带 (图 1)。该区西北部和东南部分布有太古宇胶东群深变质岩系, 下元古界粉子山群中深变质岩系, 上元古界蓬莱群浅变质岩系, 以及中生界白垩系部分陆相盆地沉积岩系。中部有大面积的燕山期中酸性侵入岩出露, 呈 NE-SW 向展布, 早期为磁山花岗岩, 晚期为郭家岭花岗闪长岩, 其角闪石  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年龄为  $(148.4 \pm 2.3) \times 10^6 \text{a}$ <sup>[5,12]</sup>。区内构造活动强烈, 在东部和西部发育两条 NNE 向区域性大断裂, 分别为肖家断裂和大夺沟断裂, 其间发育众多的 NE 和 NNE 向次级断裂, 并有晚期 NW 向断裂发育。

该区金矿成矿与郭家岭花岗闪长岩密切相关<sup>[5]</sup>, 金矿床主要为石英脉型, 分布在郭家岭花岗闪长岩、磁山花岗岩和胶东群变质岩系内, 控矿构造为 NE 和 NNE 向断裂构造, 矿体赋存

基金项目: 国家科委攀登计划项目 (B: 85-34-05C) 资助

第一作者简介: 杨竹森 (1964—), 男, 博士, 讲师, 从事成因矿物学与找矿矿物学、矿床学研究工作

收稿日期: 1999-06-29; 修订日期: 1999-12-14

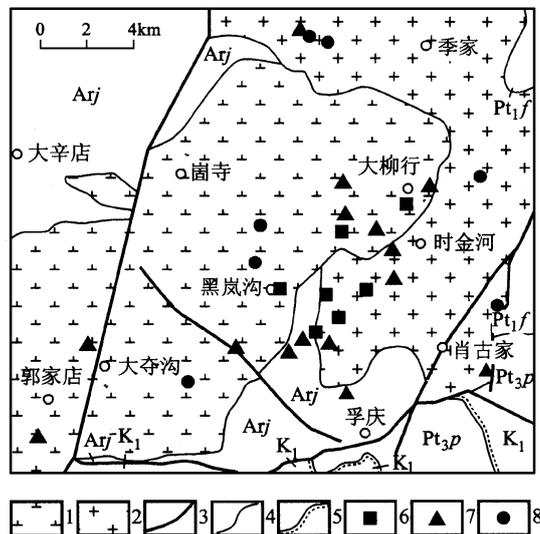


图1 胶东北部超高位金矿集中区地质简图

K<sub>1</sub>—下白垩统; Pt<sub>3p</sub>—上元古界蓬莱群; Pt<sub>1f</sub>—下元古界粉子山群; Arj—太古宇胶东群; 1—郭家岭花岗闪长岩; 2—磁山花岗岩; 3—断裂; 4—地质界线; 5—不整合线; 6—超高位金矿床; 7—金矿床; 8—金矿点

Fig. 1. Geological sketch map of superhigh-grade gold-concentrated area in northern Jiaodong.

K<sub>1</sub>—Lower Cretaceous; Pt<sub>3p</sub>—Upper Proterozoic Penglai Group; Pt<sub>1f</sub>—Lower Proterozoic Fenzishan Group; Arj—Archean Jiaodong Group; 1—Guojialing Granodiorite; 2—Cishan Granite; 3—Fault; 4—Geological line; 5—Unconformity line; 6—Superhigh-grade gold deposit; 7—Gold deposit; 8—Gold occurrence.

及其外围30个金矿床和金矿点的蚀变期和成矿期黄铁矿所做的热电性测量结果(表1)表明:超高位金矿床相对于其它金矿床和金矿点具有较高的P型黄铁矿出现率、较高的P型黄铁矿热电系数平均值和较小的P型黄铁矿热电系数离散性;超高位金矿床的成矿期相对于蚀变期,P型黄铁矿出现率集中在更高的范围内,P型黄铁矿热电系数平均值的分布范围更窄,P型黄铁矿热电系数离散性更趋集中。

由蚀变期和成矿期P型黄铁矿出现率等值线图(图2)可知,P型黄铁矿出现率的空间分布具有明显的分带性,其中大于70%的区域呈NE和NNE向带状展布,显示NE和NNE两组构造和矿化方向,而超高位金矿床集中分布在受这两组矿化方向交汇部位控制的P型黄铁矿出现率大于90%的区域附近。此外,P型黄铁矿出现率大于70%的区域,在蚀变期呈NE向带状展布,而到成矿期集中分布于两组矿化方向的交汇部位,表明成矿流体活动在蚀变期

在沿控矿断裂分布的石英脉内。矿床围岩蚀变强烈,由内向外依次发育硅化带、黄铁绢英岩化带和红化钾长石化带。成矿期包括4个阶段,由早到晚为黄铁矿-石英阶段、石英-黄铁矿阶段、多金属硫化物-石英阶段和石英-碳酸盐阶段,其中多金属硫化物-石英阶段是金大量沉淀富集阶段。

该区金矿的硫化物含量相对较低(平均不足1%)。金矿物除部分呈包体金和裂隙金赋存于黄铁矿中外,主要以粗颗粒金形式赋存于石英和多金属硫化物晶隙,呈不规则粒状、片状和板状等,最大粒度可达1.3 cm。矿石品位较高,明金普遍出现,在黑炭沟-大柳行一带的金矿中,矿体局部地段金矿物含量可达20%~30%,构成超高位金矿床。

## 2 黄铁矿热电性特征

黄铁矿的热电性通常包括导电类型(P型,空穴导电型;N型,电子导电型)和热电系数(单位温差的热电势)。对胶东北部超高位金矿集中区

主要受 NE 向断裂控制, 到成矿期 NNE 向断裂控制作用加强, 这与胶东地区其它金矿成矿特征相似<sup>[2, 6-10]</sup>。

表 1 胶东北部超高品位金矿集中区黄铁矿热电性特征

Table 1. Thermoelectric characteristics of pyrites from superhigh-grade gold-concentrated area, northern Jiaodong

矿床类型	矿床名称	蚀变期				成矿期			
		测量粒数/粒	P 型黄铁矿出现率/%	P 型黄铁矿热电系数平均值/ $(\mu\text{V}/\text{C})$	P 型黄铁矿热电系数离散性	测量粒数/粒	P 型黄铁矿出现率/%	P 型黄铁矿热电系数平均值/ $(\mu\text{V}/\text{C})$	P 型黄铁矿热电系数离散性
超 高 品 位 金 矿 床	黑岚沟	64	100	310	0.80	141	97	289	0.80
	一分矿	56	96	286	0.80	119	100	336	0.87
	二分矿	76	100	305	0.90	61	85	167	1.11
	三分矿	51	100	353	1.86	188	90	317	1.25
	大柳行	61	100	250	0.87	115	94	265	1.28
	庵口二矿	42	70	263	1.25	55	82	247	1.73
	燕子芥	63	62	187	2.59	57	100	234	1.21
金 矿 床	庄官					77	99	277	1.02
	潮水镇					66	62	168	1.99
	觅鹿芥						90		
	水沟	58	90	219	1.48				
	庵口三矿	84	58	226	1.61	70	49	162	2.96
	门楼	62	85	217	1.34				
	时金河					65	74	197	1.24
	土屋					58	93	243	1.15
	齐家沟					71	20	152	4.66
	西石棚					74	45	154	2.37
	强家沟					65	83	140	1.38
	大夺沟					70	54	141	1.79
	燕山河西	82	61	123	1.33				
虎路线					60	72	226	2.40	
郭家店	69	94	149	0.91	69	94	149	0.91	
南张家	71	85	242	1.43	141	95	234	0.88	
金 矿 点	全口刘家	58	5	154	19.89	71	56	153	2.28
	刘家庄					63	10	109	9.05
	下岚子	50	100	255	1.45	68	71	254	1.72
	大齐家					57	95	229	1.42
	柳家					63	83	203	1.14
	黑金顶	62	82	213	1.67				
穹顶	76	21	174	6.61					

由蚀变期和成矿期 P 型黄铁矿热电系数平均值等值线图 (图 3) 可见, P 型黄铁矿热电系数平均值的空间分布也具有分带性, 其中大于  $200 \mu\text{V}/\text{C}$  的区域呈 NE 和 NNE 向带状展布, 也反映 NE 和 NNE 两组构造和矿化方向, 而超高品位金矿床也集中分布在受这两组矿化方向交汇部位控制的 P 型黄铁矿热电系数平均值大于  $250 \mu\text{V}/\text{C}$  的区域附近, 尤其在成矿期更加明显。此外, P 型黄铁矿热电系数平均值大于  $200 \mu\text{V}/\text{C}$  的区域在蚀变期范围较大, 呈 NE 向展布, 而成矿期范围缩小, 主要呈 NNE 向展布, 表明到成矿期富含矿质的热液活动范围逐渐缩小到 NE 和 NNE 向两组断裂的交汇部位, 并主要受 NNE 向断裂控制。

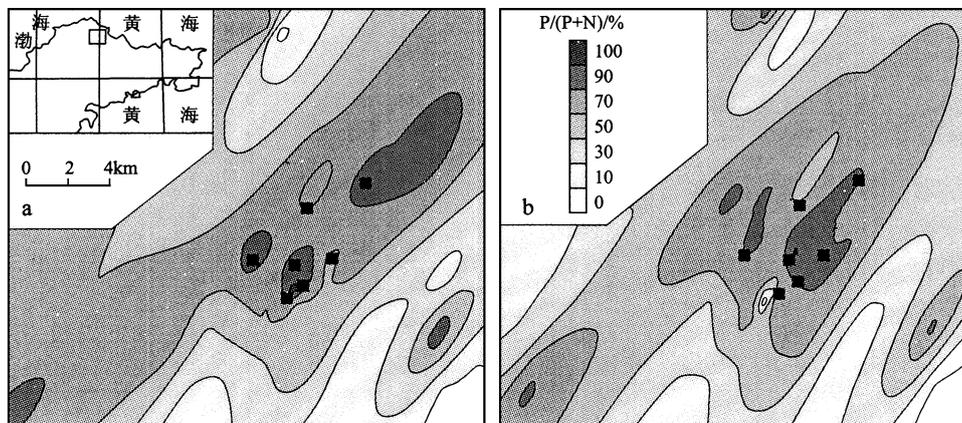


图2 胶东北部超高位金矿集中区P型黄铁矿出现率等值线图

a—蚀变期; b—成矿期

Fig. 2. Contour map of frequencies of P-type pyrites in super-high grade gold-concentrated area, northern Jiaodong.

a—Alteration stage; b—Ore-forming stage.

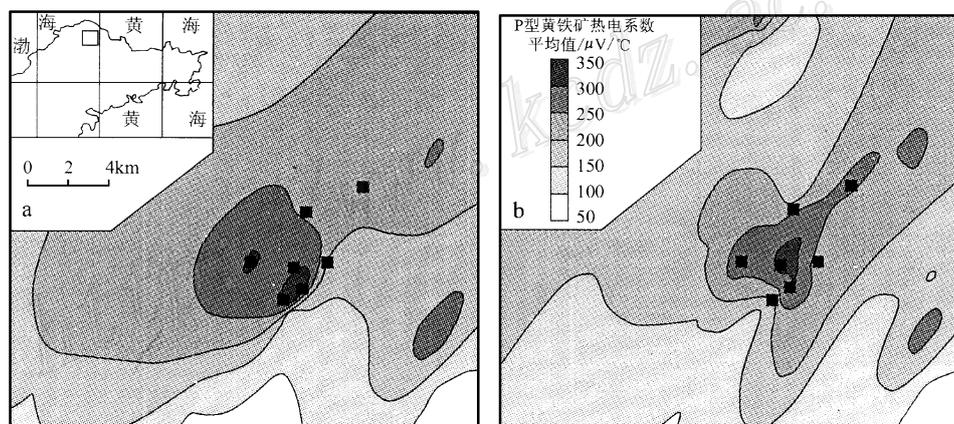


图3 胶东北部超高位金矿集中区P型黄铁矿热电系数平均值等值线图

a—蚀变期; b—成矿期

Fig. 3. Contour map of average thermoelectrical coefficient values of P-type pyrites in superhigh-grade gold-concentrated area, northern Jiaodong.

a—Alteration stage; b—Ore-forming stage.

由蚀变期和成矿期P型黄铁矿热电系数离散性等值线图(图4)可以看出,P型黄铁矿热电系数离散性的空间分布同样具有明显的分带性,其中小于3的区域呈NE和NNE向带状展布,反映NE和NNE两组矿化方向,且超高位金矿集中分布在P型黄铁矿热电系数离散性小于1.5的区域附近,尤其在成矿期主要围绕小于1.0的区域分布,并位于NE和NNE两组矿化方向的交汇部位。同时P型黄铁矿热电系数离散性小于3的区域,在蚀变期范围较小,呈NE向分布,而在成矿期范围较大,且呈NE和NNE两组方向。

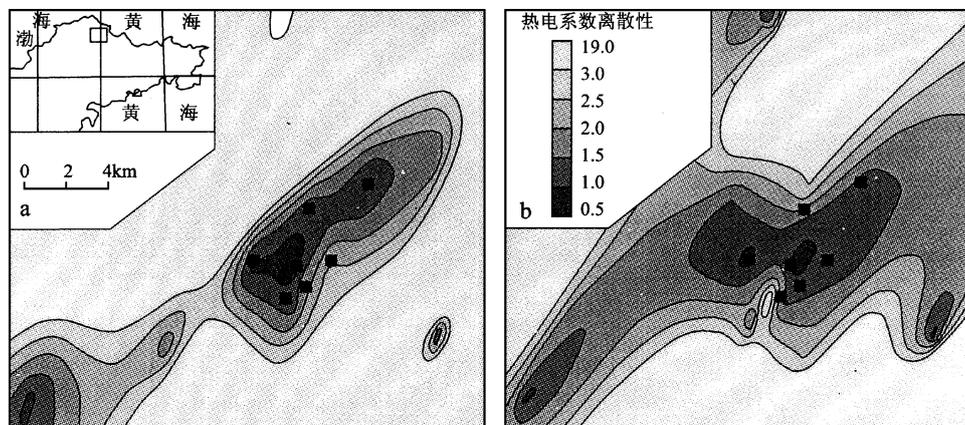


图4 胶东北部超高品位金矿集中区P型黄铁矿热电系数离散性等值线图

a—蚀变期; b—成矿期

Fig. 4. Contour map of the thermoelectrical coefficient dispersions of P-type pyrites in superhigh-grade gold-concentrated area, northern Jiaodong.

a—Alteration stage; b—Ore-forming stage.

值得注意的是,东南部的南张家金矿具有与超高品位金矿类似的黄铁矿热电性特征,但该矿床金品位却很低,其原因与其它一些控矿因素有关,如该矿床位于磁山花岗岩与蓬莱群之间的断裂破碎带内,距郭家岭花岗闪长岩较远,控矿断裂呈近NS走向等。这种情况表明,上述黄铁矿热电性标型只是超高品位金矿成矿的重要因素之一。

### 3 黄铁矿热电性与超高品位金矿形成条件

黄铁矿的热电性特征取决于黄铁矿中类质同象杂质的种类、浓度和结构缺陷的类型、密度在晶体能带结构中形成的杂质能级<sup>[4,13]</sup>。当杂质能级靠近导带时,其中的电子受激易进入导带而形成自由电子型载流子,使黄铁矿呈现N型导电,这样的杂质称为施主。黄铁矿中最常见的施主是类质同象的Co、Ni等,硫的空位也具有施主的特性。当杂质能级靠近价带时,价带中受激的电子易进入杂质能级并被定域在此能级内,价带因失去部分电子出现多余的正电荷即空穴,构成空穴型载流子,使黄铁矿呈现P型导电,这样的杂质称为受主。黄铁矿中的受主以类质同象的As、Sb、Te为主,铁的空位也具有受主的效应。因此,黄铁矿的热电性能能够标定其形成的条件。高温有利于受主杂质Co、Ni代替黄铁矿中的Fe,并出现硫的空位,形成N型黄铁矿。低温有利于受主杂质As、Sb、Te代替黄铁矿中的S,并出现铁的空位,形成P型黄铁矿。当受主杂质As、Sb、Te含量增高时,P型黄铁矿的热电系数增大。当受主杂质As、Sb、Te均匀分布(介质物化条件稳定)使黄铁矿呈均一导型结构时,P型黄铁矿热电系数的离散性较小。

胶东北部超高品位金矿集中区的P型黄铁矿出现率和P型黄铁矿热电系数平均值普遍较高,反映金矿成矿的总体温度偏低,且成矿流体中的As、Sb、Te含量较高。由蚀变期到成矿期,P型黄铁矿出现率和热电系数平均值的高值区趋于集中,表明As、Sb、Te等含量较高

的成矿流体在蚀变期的扩散范围较大,到成矿期的活动范围趋于集中。超高品位金矿主要位于P型黄铁矿出现率大于90%和P型黄铁矿热电系数平均值大于 $250\mu\text{V}/\text{C}$ 的核心区域,说明超高品位金矿是在大范围的蚀变作用后,成矿流体温度较低且As、Sb、Te等的含量更高的条件下形成的,这与超高品位金矿多金属硫化物-石英阶段晚期金大量沉淀的同时有少量辉铜矿产出的事实相吻合,也同金与As、Sb、Te的络合物比与S的络合物较稳定<sup>[14]</sup>,金可在晚期As、Sb、Te等含量更高的阶段大量富集相吻合。因此,本区石英脉型超高品位金矿床是在郭家岭花岗闪长岩提供丰富矿质的基础上<sup>[5]</sup>,由富含As、Sb、Te等的成矿流体,在温度较低条件下,于NE和NNE向小规模张剪性断裂带的局限空间内成矿。这与胶东地区蚀变岩型金矿在大规模断裂带的弥散空间内成矿不同,导致某些蚀变岩型金矿虽然P型黄铁矿出现率很高,但金品位却较低<sup>[4]</sup>的事实。

该区P型黄铁矿热电系数离散性的低值区在蚀变期分布范围较小,在成矿期分布范围较大,反映蚀变期的环境条件不稳定,成矿流体的温度和成分变化较大,而成矿期的环境条件相对稳定,成矿流体的温度和成分变化较小。超高品位金矿位于P型黄铁矿热电系数离散性较小的区域,说明其成矿的环境条件较为稳定,成矿流体的温度和成分变化较小,这与矿石中石英的粒度较粗,自形程度较高所反映的条件一致。此外,P型黄铁矿出现率和P型黄铁矿热电系数平均值的高值区及P型黄铁矿热电系数离散性的低值区呈NE和NNE向带状展布,且超高品位金矿所处的最高值或最低值区域位于两组方向的交汇部位,指示成矿流体的上升运移受NE和NNE向断裂联合控制,其通道即位于超高品位金矿集中区所在处。

本区超高品位金矿床黄铁矿的热电性标型所反映的成矿条件与矿床的地质特征基本吻合。虽然超高品位金矿的形成还与其它一些重要因素有关,如赋矿围岩和控矿构造的特征,矿质和成矿流体的来源等,但在其它因素相同的情况下,黄铁矿的热电性标型是指示超高品位金矿成矿的良好标志。据此分析,在超高品位金矿集中区北东方向的大柳行—季家一带,有望找到类似的超高品位金矿床。因为该地段具有较高的P型黄铁矿出现率和P型黄铁矿热电系数平均值,并与超高品位金矿集中区处于同一组NE和NNE向张剪性断裂带上,且为郭家岭花岗闪长岩向NE方向的延伸地段,具备有形成超高品位金矿床的条件。

## 4 结 论

(1) 胶东北部超高品位金矿床集中分布于P型黄铁矿出现率大于90%,P型黄铁矿热电系数平均值大于 $250\mu\text{V}/\text{C}$ ,P型黄铁矿热电系数离散性小于1.5的区域附近。

(2) 胶东北部超高品位金矿集中区P型黄铁矿出现率、P型黄铁矿热电系数平均值及P型黄铁矿热电系数离散性呈NE和NNE向带状展布,超高品位金矿位于这两组方向的交汇部位。

(3) 胶东北部超高品位金矿形成的温度较低,成矿流体中As、Sb、Te等的含量较高,成矿过程中成矿流体的温度和成分变化较小,成矿部位处于成矿流体上升通道附近。

(4) 在超高品位金矿集中区北东侧的大柳行—季家一带,有望找到类似的超高品位金矿床。

工作和成文过程中,得到中国地质大学(北京)陈光远教授、孙岱生教授、邵伟教授和

李胜荣教授的悉心指导, 在此致以衷心感谢!

### 参 考 文 献

- 1 吕古贤, 孔庆存. 胶东磁山-焦家式金矿地质 [M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- 2 李兆龙, 杨敏之等. 胶东金矿床地质地球化学 [M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1993.
- 3 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 (1): 46~ 57.
- 4 陈光远, 邵伟, 孙岱生. 胶东金矿成因矿物学与找矿 [M]. 重庆: 重庆出版社, 1989.
- 5 陈光远, 孙岱生, 周珣若等. 胶东郭家岭花岗岩闪长岩成因矿物学与金矿化 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1993.
- 6 林文蔚, 赵一鸣, 赵国红等. 胶东西北部金矿的控制因素 [J]. 矿床地质, 1997, 16 (2): 107~ 119.
- 7 许顺山, 杨农, 孙青. 山东文登金矿成矿动力学研究 [J]. 矿床地质, 1997, 16 (3): 272~ 277.
- 8 颜丹平, 万天丰, 栾久春. 山东招远北截金矿床地质特征及深部成矿预测 [J]. 矿床地质, 1997, 16 (4): 365~ 375.
- 9 谢宏远, 沈远超, 王岳军等. 山东三甲金矿的矿体变化特征及其找矿意义 [J]. 矿床地质, 1998, 17 (2): 165~ 171.
- 10 刘玉强, 杨东来, 董太岭等. 山东胶莱盆地金矿床地质特征及找矿方向 [J]. 矿床地质, 1999, 18 (3): 195~ 207.
- 11 Chen Guangyuan, Yang Zhusen, Wang Zhijing. Mineralogical mapping in Jiaodong Gold Province, China [C]. Proc. 30th Int'l. Geol. Congr., 1997, 16, 75~ 83.
- 12 Chen Guangyuan, Wang Jian, Huang Wenyong. Hornblende favourable for indicating gold mineralization [C]. Proc. ISGGE, Shenyang, 1989, 688~ 690.
- 13 Shuey R T. Semiconducting ore minerals [M]. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, Oxford, New York, 1975.
- 14 Boyle R W. The geochemistry of gold and its deposits [J]. Canada Geological Survey Bulletin 280, 1979.

## A STUDY ON THERMOELECTRICITY OF PYRITE FROM SUPERHIGH-GRADE GOLD DEPOSITS, NORTHERN JIAODONG

Yang Zhusen, Li Hongyang, Gao Zhenmin

(Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002)

Wang Zhijing

(Bureau of Geological Survey, Ministry of Land and Resources, Beijing 100812)

**Key words:** thermoelectricity of pyrite, gold deposit with superhigh-grade ore, northern Jiaodong

### Abstract

Several gold deposits with superhigh-grade ore are concentratedly distributed in Guojialing granodiorite, Cishan granite and Archean Jiaodong Group in southeastern Penglai County, northern Jiaodong. A study of the thermoelectricity of pyrites from these superhigh-grade gold deposits and adjacent gold deposits shows that the frequency of P-type pyrite, the average value and dispersion of thermoelectrical coefficient of P-type are distributed spatially in NE-

and NNE-trending zones. The gold deposits with superhigh-grade ore are located in the intersections of the two sets of zones, where the frequency of P-type pyrite is higher than 90%, the average value of thermoelectrical coefficient of P-type pyrite is higher than  $250\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ , and the dispersion of thermoelectrical coefficient of P-type pyrite is lower than 1.5. These characteristics indicate that the superhigh-grade gold deposits were formed in the confined tensile faulted zone under the conditions of lower temperature, higher content of As, Sb and Te in ore-forming fluid, and insignificant variation of temperatures and composition in the fluid. The abundant gold was derived from Guojialing granodiorite through the ore-forming fluid. Metallogenic location was close to the channel along which ore-forming fluid migrated upward.

(上接第 306 页 continued from p. 306)

gold deposits in northern Xinjiang can be divided into seven types, namely epithermal gold deposits, altered rock type gold deposits in the ductile shear zone, micro-fine-grained dissemination gold deposits, supergene and structural-altered rock type gold deposits, metamorphic hydrothermal type gold deposits, auriferous quartz vein type deposits and copper-gold associated deposits. By means of analysing and comparing these typical gold deposits in such aspects as REE partitioning patterns, trace element content and their partitioning patterns in gold ores, sulfur and lead isotopic composition and composition of quartz fluid inclusions, the authors deal with their metallogenic geochemical characteristics. In the light of their metallogenic geochemical features and basic ore-forming background, the authors generalize these gold deposits into four important mineralization series, viz. low-temperature and supergene gold series formed in some lateral districts beside large fractures in the island arc, gold series hosted in some ductile shear zones related to dynamic and metamorphic environment, middle-high temperature and middle-hypogene gold series formed in some orogenic belts, and copper-gold associated series formed in Late Paleozoic marine volcanics. The authors also consider that a large-size gold deposit is often characterized by some special preferential mineralization conditions, and metamorphic hydrothermal type gold deposits have some specific mineralization features.