

doi: 10.12029/gc20180412

刘华南, 刘家军, 李小伟, 刘冲昊, 代鸿章, 陶银龙, 王建锋, 杜映东, 范云飞. 2018. 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, 45(4): 819–838.

Liu Huanan, Liu Jiajun, Li Xiaowei, Liu Chonghao, Dai Hongzhang, Tao Yinlong, Wang Jianfeng, Du Yingdong, Fan Yunfei. 2018. Thermoelectric characteristics of pyrite from the Xindigou gold deposit in Inner Mongolia and its significance on deep prospecting[J]. Geology in China, 45(4): 819–838(in Chinese with English abstract).

内蒙古新地沟金矿床黄铁矿热电性特征及深部找矿意义

刘华南^{1,2} 刘家军^{1,2} 李小伟^{1,2} 刘冲昊^{1,2} 代鸿章^{1,2}

陶银龙^{1,2} 王建锋³ 杜映东³ 范云飞³

(1. 中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083;

2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 3. 内蒙古自治区矿产实验研究所, 内蒙古呼和浩特 010031)

摘要:内蒙古新地沟金矿是中型绿岩型金矿床,但已属于严重资源危机的矿山,急待寻找接替资源,因此对新地沟金矿床进行深部远景预测具有十分重要的意义。本文根据找矿矿物学和成因矿物学理论,利用显微镜、电子探针及热电仪系统分析新地沟金矿床不同标高和矿段中黄铁矿的热电型标型特征,研究结果表明:新地沟金矿床中黄铁矿的晶型以立方体、五角十二面体及聚形为主;热电系数变化主要集中在 $-331.10\sim 340.20\ \mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$ 范围内,导电型多以N型为主,约占总含量的80%;成矿温度主要集中于 $250\sim 340\text{C}$,属于中温矿床。黄铁矿热电性参数 X_{NP} 变化范围较大,估算矿体剥蚀率为67.96%~74.31%。通过对黄铁矿导型的空间分布规律和矿体剥蚀分析表明:油篓沟矿段位于矿体中底部,向深部可能有小规模延伸,小西沟矿段钻孔ZK106在深部有较大规模的延伸,其矿化前景最好;小西沟矿段钻孔ZK102深部矿化前景次之;大汗青矿段钻孔ZK2802其深部矿化前景较差。综合分析认为,该矿床深部具有较好的找矿潜力。

关键词:新地沟;金矿床;黄铁矿;热电性;内蒙古

中图分类号: P678.51 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2018)04-0819-20

Thermoelectric characteristics of pyrite from the Xindigou gold deposit in Inner Mongolia and its significance on deep prospecting

LIU Huanan^{1,2}, LIU Jiajun^{1,2}, LI Xiaowei^{1,2}, LIU Chonghao^{1,2}, DAI Hongzhang^{1,2}, TAO Yinlong^{1,2},
WANG Jianfeng³, DU Yingdong³, FAN Yunfei³

(1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 3. Inner Mongolia Minerals Experiment Research Institute, Hohhot 010031, Inner Mongolia, China)

Abstract: The Xindigou gold deposit in Inner Mongolia is a medium-sized greenstone type gold deposit but belongs to crisis mine

收稿日期: 2016-05-30; 改回日期: 2018-05-16

基金项目: 中国地质调查局新兴产业资源战略调查评价专项工程项目(1212011220673)资助。

作者简介: 刘华南, 男, 1988年生, 博士生, 主要从事金属矿床地球化学研究; E-mail: northchina1@163.com。

通讯作者: 刘家军, 男, 1963年生, 教授, 博士生导师, 主要从事矿床研究与教学工作; E-mail: liujiajun@cugb.edu.cn。

which needs replaceable resources, and hence it is of great significance to evaluate the deep resources. Based on the prospecting and genetic mineralogy theory, the authors analyzed the thermoelectric characteristics of pyrites at different elevations and orebodies using the microscope, electron probe and thermoelectric instrument. Some conclusions have been reached: The pyrite crystals are mainly characterized by cubic, pentadododecahedral and poly-type in the Xindigou deposit, the thermoelectric properties of pyrites, ranging from -331.10 to $340.20 \mu\text{V} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, are mainly of the N type, which accounts for about 80%. The ore-forming temperature of the deposit ranges from 250 to 340°C , indicating that the deposit is a medium temperature gold deposit. The thermoelectric parameters of pyrite vary greatly; the degree of denudation varies from 67.96% to 74.31%. According to the spatial distribution of the thermoelectric parameters of the pyrite and the denudation of the orebody, Youlougou orebody may be located at the bottom, and may have a small-scale extension toward the depth. Drill hole ZK106 of Xiaoxigou orebody has a better exploration prospect with large-scale extension, and drill hole of ZK102 of Xiaoxigou orebody has more potential than ZK2802 of Dahanqing orebody in terms of exploration prospect in the depth. Furthermore, comprehensive results suggest that the deep deposit has good prospecting potential.

Key words: Xindigou; gold ore deposit; pyrite; thermoelectricity; Inner Mongolia

About the first author: LIU Huanan, male, born in 1988, doctor candidate, engages in the study of ore deposit geochemistry; E-mail: northchina1@163.com.

About the corresponding author: LIU Jiajun, male, born in 1963, professor and supervisor of doctor candidates, engages in the study of ore deposit geochemistry.

Fund support: Supported by the project evaluation of emerging industry resources strategic investigation of China Geological Survey (No. 1212011220673).

1 引 言

黄铁矿作为载金矿物不仅是各种类型金矿床中分布最广的金属矿物,而且隐藏着丰富的地质信息(宋焕斌等,1989)。自1950年,国外基于找矿需要,对常见黄铁矿等深色硫化物半导体的热电系数和热电导型标型进行研究,取得了大量进展与成果(Patrick et al., 1962; Shuey, 1975; 陈光远等, 1989; 邵伟等, 1990; 李胜荣等, 1996; 李青等, 2013)。从20世纪80年代开始,在金矿找矿和金矿评价等方面,中国学者对黄铁矿的研究进入了飞速发展的时期,出现了大量的黄铁矿热电性和成分方面研究的文献资料,并深入进行了热电性填图和黄铁矿成因分类探讨,有效地指导了金矿的深部找矿实践,取得了显著的经济效益(陈光远等, 1989; 宋焕斌等, 1989; 李胜荣等, 1994, 1996; 谢玉玲等, 1999; 严育通等, 2012; 李青等, 2013)。

黄铁矿的热电性能够灵敏地反映矿物成分和晶种结构的细微差异,指示矿物形成的地质条件(邵伟等, 1990)。黄铁矿的晶型可以指示金矿的建造类型(宋焕斌, 1989);黄铁矿的化学成分与成因的关系也是多年来的热点,根据其Fe、S比值可以分为硫亏损、铁亏损(邵洁涟, 1988; 周学武等, 1994),

黄铁矿中的微量元素含量十分丰富,多达50种,其中研究程度较高的为As、Ag、Au、Co、Ni等(Bralia et al., 1979; Lehner et al., 2006; Zhao et al., 2011; Morishita et al., 2018),根据Co、Ni含量及比值可以指示矿床成因(Hegemann et al., 1943; 宋学信和张景凯, 1986);黄铁矿的稀土元素和高场强元素还可以对成矿流体进行示踪(毕献武等, 2004)。

因此利用黄铁矿的热电性特征指导找矿是一种实用且有效的地质方法,这不仅可以为矿区深部的矿化远景预测及评价提供科学依据,而且对判断矿床的成矿温度、剥蚀程度、矿体规模、矿床成因以及寻找隐伏矿体等方面起着重要的作用,这一方法在金矿研究中有广泛应用(侯满堂, 2000; 要梅娟等, 2008; 严育通等, 2012; 刘冲昊等, 2013; 翟德高等, 2013; 张方方等, 2013; 刘坤等, 2014; 曹煦等, 2015; 李逸凡等, 2015; 许杰辉等, 2015; 李杰等, 2016; 于明杰等, 2016; 申俊峰等, 2018; 余文林等, 2018)。

内蒙古自治区察哈尔右翼中旗境内的新地沟金矿是一个正在开采的中型绿岩型金矿。新地沟金矿以厚度大、品位低、地表氧化程度高为特征,浅部适于露采堆浸,具有较大的工业价值,但是就中型矿山而言,已属于严重资源危机的矿山,急待寻找接替资源。目前,尚未有学者对新地沟金矿的黄

铁矿热电性特征进行系统研究。本文系统分析了油篓沟矿段、小西沟矿段 ZK102、小西沟矿段钻孔 ZK106 和大汗青矿段 ZK2802 中黄铁矿的热电性标型特征,研究黄铁矿热电性在垂直空间上的变化规律,及其对矿床形成温度和剥蚀程度的指示意义,为该矿床的深部远景预测及深部探矿工作提供理论依据和实践指导。

2 区域地质背景

华北地台以发育古老地层和中生代岩石圈巨量减薄闻名于世,是我国许多学者研究的重要区域(吴飞等,2014;张运强等,2014;刘训等,2015;钟福平等,2015),同时华北克拉通中绿岩带型金矿床是我国最重要的矿床类型之一,也是我国黄金产量和

储量的主要来源(翟裕生等,2002),该区处于华北地台北缘内蒙古台隆阴山断隆东段,固阳—武川—察右中旗大断裂的东段南侧。

区域出露地层由老至新主要有新太古界乌拉山群、古元古界二道凹群、中元古界渣尔泰山群、什那干群、上石炭统栓马桩组、中下侏罗系统石拐群、上侏罗统大青山组以及新生界第四系(图1)。与古元古代侵入岩共同组成了花岗岩—绿岩带(胡凤祥等,2002),区域褶皱构造较发育,多呈东西向展布。断裂构造主要有东西向、北西向和北东向3组,动力变质作用强烈,形成了一套动力变质岩类的岩石,其主要岩石为千糜棱、糜棱岩等为主。区域内主要分布的岩浆岩有元古宙片麻状黑云母花岗岩、早古生代闪长岩、晚古生代钾长花岗岩、中生代二长

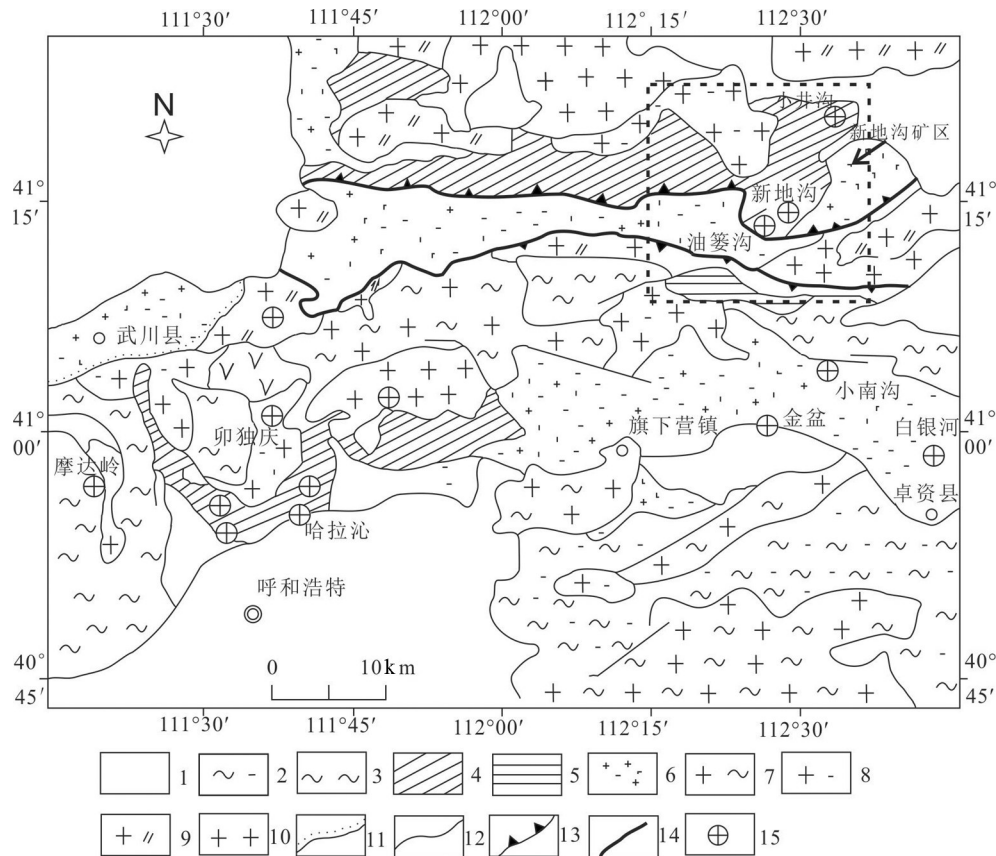


图1 大青山新地沟金矿区域地质简图(据胡凤祥等,2002)

1—更新世;2—集宁岩群;3—乌拉山群;4—二道凹群;5—渣尔泰山群;6—晚生代—中生代地层;7—太古宙深成侵入体;8—古元古代侵入体;9—晚古生代侵入体;10—中生代侵入体;11—不整合线;12—地质界线;13—推覆构造;14—断层;15—金矿体(点)

Fig.1 Regional geological sketch map of the Xindigou gold deposit in Daqing Mountains (after Huet al., 2002)

1—Pleistocene;2—Jining Group;3—Wulashan Group;4—Erdaowa Group;5—Chaertaihang Group;6— Paleozoic Mesozoic Formation;7—Archean Plutonic Intrusion;8—Paleoproterozoic Intrusion;9—Late Paleozoic Intrusion;10—Mesozoic Intrusion;11—Unconformity Boundary;12—Geological boundary;13—Nappe Structure ;14—Fault;15—Gold deposit

花岗岩和安山玢岩,与金矿有关的岩浆侵入活动为中生代,在本区显示最为强烈。区域内矿产有铁、铜、铅、锌、金、水晶、萤石、石棉、煤等。

3 矿区地质概况

3.1 矿区地质

新地沟金矿位于二道凹群地层中,二道凹群主要岩性为绿泥片岩、长石石英片岩,局部夹有薄层结晶灰岩、石英岩和大理岩等,变形较为复杂,糜棱化较为普遍,靠近花岗岩体边部见有条带状混合花岗岩(胡凤祥等,2002;吕召恒,2012)。在绿泥片岩和长石石英片岩中发育糜棱岩化带,金矿体赋存于糜棱岩带中,主要包括新地沟矿段、油篓沟矿段、小井沟矿段、大汗青矿段(王新亮等,2002),多呈层状、似层状、透镜状产出,与容矿围岩呈渐变过渡关系。矿体(层)产状与岩层产状一致(图2),随着岩层产状变化而变化。矿体(层)多数分布在灰黄色硅化微晶灰岩附近,而硅化微晶灰岩多数与糜棱岩层或矿层呈断层接触,少数分布在灰绿色千糜岩或

糜棱岩底板,矿区内褶皱构造特别发育,从区域上有如下规律:从北或北东向西或南西方向到侏罗系推覆构造带,褶皱强度逐渐加强,特别是在推覆构造前锋带,褶皱更为强烈。褶皱构造控制了矿层的构造形态与产状,而断裂构造对矿层起着围限、切割与破坏作用。其中推覆构造位于含矿地层下界,为本区规模最大,以破碎带的形迹出现。新地沟矿区内出露的岩浆岩主要为三叠纪大东山岩体,其位于矿区1.5 km处,此外,显生宙以来的安山玢岩脉、闪长玢岩脉、辉绿岩脉、石英脉等也很发育(王新亮等,2002)。由于附近地层金的背景值较高,在大东山岩体的边部有混合岩化,形成一些小规模的热液型金矿,与区域上大东山岩体同期形成的花岗质糜棱岩或糜棱岩化花岗岩在矿区内亦有出露。该区矿产较为丰富,主要有铁矿、金矿、煤矿等矿产,尤其以蚀变岩型和石英脉型金矿最为发育(吕召恒,2012)。

3.2 矿体特征

新地沟金矿床主要包括新地沟矿段、油篓沟矿

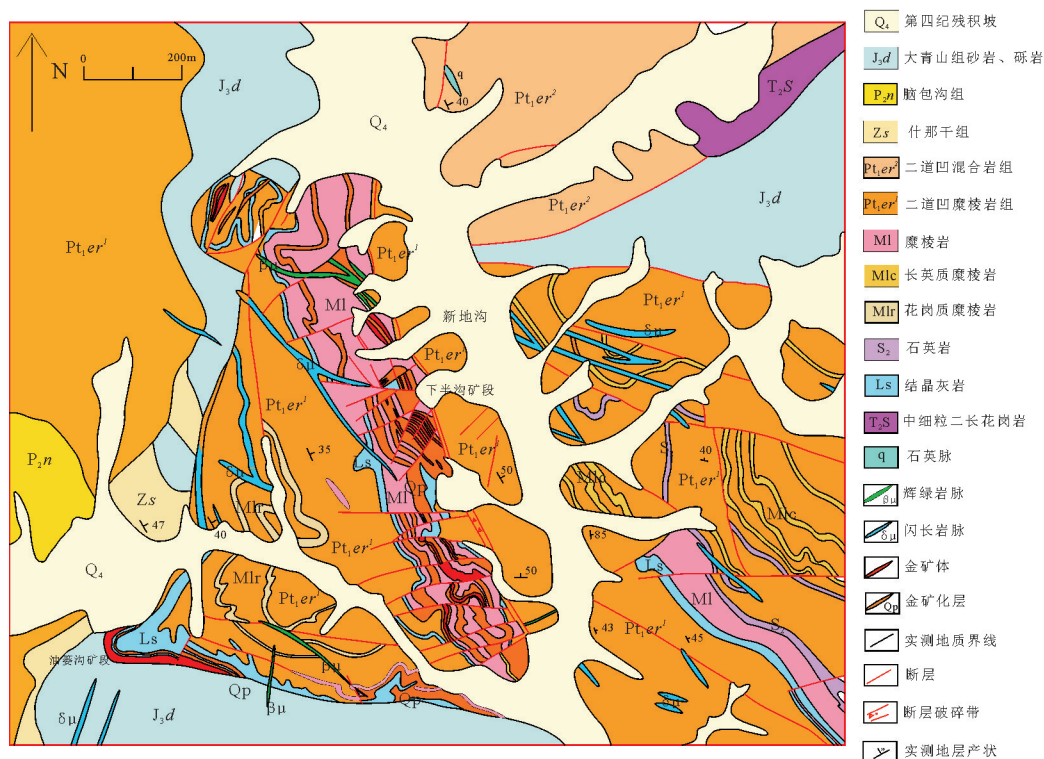


图2 新地沟金矿矿区地质简图(据内蒙古沃野矿冶技术开发公司,2009^①)

Fig.2 Geological sketch map of the Xindigou gold deposit (after Inner Mongolia Woye Mining and Metallurgy Technology Development Company^①, 2009)

段、小西沟矿段、下半沟矿段、大汗青矿段等。新地沟矿段的矿化带总体规模长2.3 km,宽150 m。含矿岩石为糜棱岩化绿泥石英片岩或糜棱岩,底板为薄层大理岩和结晶灰岩。矿化带较连续,但成矿期后断裂较发育,使得矿体连续性受到破坏。目前控制的矿体地表出露长大于270 m,厚度1.62~7.21 m,平均厚3.79 m,矿体平均品位4.49 g/t,矿石类型为片岩夹石英脉型。Ⅱ号矿体产于含矿层上部,与Ⅰ号矿体平行产出,矿体地表出露长260 m,厚度0.85~6.10 m,矿体平均厚3.57 m,金的平均品位2.87 g/t,矿石类型为片岩型(王守光等,2004)。油篓沟金矿段的矿体赋存在糜棱岩化绿泥绢云石英片岩或糜棱岩内,顶底板为大理岩及结晶灰岩。矿体产状为层状、似层状,与容矿围岩呈渐变过渡关系。矿层与岩层产状一致,形态随岩层产状变化而变化。该矿段共圈定金矿体3个,Ⅰ号矿体规模最大,地表控制长743 m,走向300。倾向北东,倾角45~50°,平均厚8.6 m,最厚24.75 m,沿倾向控制延深227 m,金最高品位6.84 g/t,矿体平均品位2.01 g/t,矿体厚度、品位均较稳定(图3)。

新地沟金矿矿石类型主要有4种:矿石自然类型为糜棱岩型(图4a、d)、千糜岩型、石英脉型(图4c)、角砾岩型和黄铁矿细晶岩型(王新亮等,2002),以糜棱岩型为主。

在矿石中,金属矿物有金、黄铁矿、磁铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、褐铁矿、赤铁矿、斑铜矿、黝铜矿和钛铁矿。非金属矿物主要有石英、长石、方解石、绢云母、绿泥石、绿帘石等。矿石结构主要有

鳞片变晶、细—粗糜棱、胶状、填隙、自形、半自形、它形、包含、裂碎、乳滴状、叶片状、假象、揉皱、共结边、骸晶、交代、反应边等结构。矿石构造有纹层状、千枚状、块状、蜂窝状(图4b)、眼球状(图4d)、条带状、角砾浸染状、脉状、网状等构造。

矿体及围岩蚀变主要有绿泥石化、绿帘石化、碳酸盐化、绢云母化、钾化、硅化、褐铁矿化、黄铁矿化等,其中绢云母化、钾化、硅化、黄铁矿化、褐铁矿化等强烈蚀变地段,与金矿化关系密切。

通过对新地沟金矿的野外观察、地质背景、矿床特征、脉体穿切、矿石组成及矿物组合的详细研究后(刘华南等,2016),认为成矿阶段可以分为以下3个:黄铁矿—石英—钾长石阶段(Ⅰ)、石英—多金属硫化物阶段(Ⅱ)、石英—方解石阶段(Ⅲ)。

4 黄铁矿产出特征

黄铁矿的形态十分复杂,但最常见的晶形是由立方体、八面体、五角十二面体及它们相互的聚形组成(宋焕斌等,1989),黄铁矿晶型特征取决于其形成的地质环境(温度、压力、硫逸度、组分)。一般认为,在低过饱和度、低硫逸度以及在较高温度(约320℃)或较低温度(约200℃),温度变化梯度大的条件下,有利于黄铁矿{100}习性的晶体生长,晶形较简单;在高过饱和度、高硫逸度以及适中温度(250~300℃),温度变化梯度小的条件下,有利于黄铁矿{111}、{hk0}习性的晶体形成,晶型趋于复杂(Sunagawa et al., 1978; 陈光远等, 1987; Murowchick et al., 1987; 饶东平等,2010)。

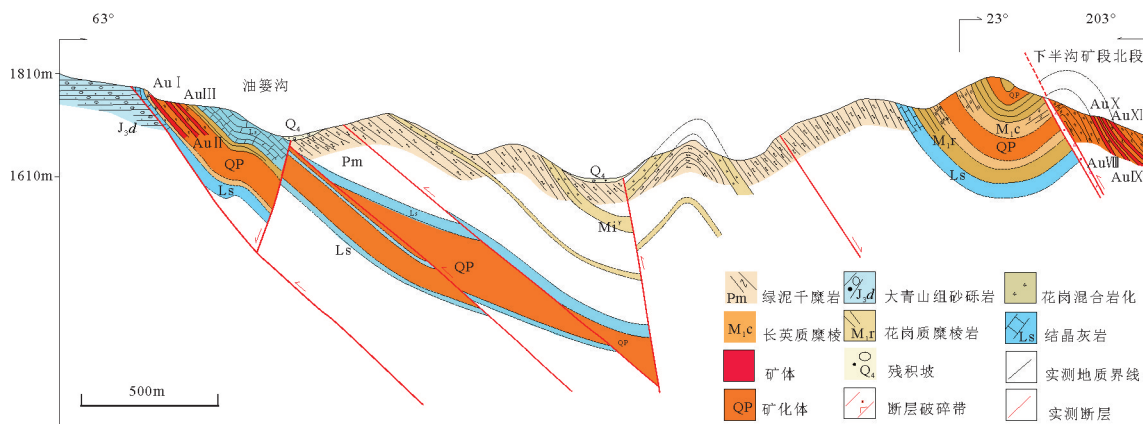


图3 新地沟金矿矿脉地质剖面图(据内蒙古沃野矿冶技术开发公司,2009^①)

Fig. 3 Geological section of main vein in the Xindigou gold deposit (modified after Inner Mongolia Woye Mining and Metallurgy Technology Development Company, 2009^①)



图4 新地沟金矿床矿石类型

Py—黄铁矿; Qz—石英; a—含黄铁矿型矿石; b—蜂窝状矿石; c—石英脉型矿石; d—糜棱岩型矿石

Fig.4 The ore types in the Xindigou gold deposit

Py—Pyrite; Qz—Quartz; a—Pyrite-type ore; b—Honeycomb ore; c—Quartz-vein type ore; d—Mylonite-type ore

新地沟金矿中,黄铁矿的晶形主要为立方体{100}和五角十二面{hk0}及它们相互的聚形组成。黄铁矿的构造主要为脉状和浸染状。结构主要为自形一半自形(图5b、c、d)、碎裂结构(图5a)。自然金赋存在半自形及其他形黄铁矿中(图5e、f)。黄铁矿粒度差别较大,粒径一般为0.1~6.0 mm,以0.1~4.0 mm为最多。电子探针结果显示(表1)新地沟金矿床中黄铁矿的S含量52.99%~53.73%,Fe含量45.86%~47.07%,并含有其他元素。如Co含量为0.03%~0.84%,Ni含量为0%~0.24%,Au含量为0%~0.05%,As含量为0%~0.20%。

5 黄铁矿热电性测试

5.1 测试原理及应用

矿物的热电性是金属或半导体矿物在温差条件下产生热电效应的反应,主要受温度和微量元素组分等条件的制约(陈光远等,1989)包括热电系数和导电类型两个方面。热电系数(α)是指处在一定温差条件下的半导体矿物,由温差引起的非平衡载

流子由高温区域向低温区域扩散,扩散的结果是在半导体内形成了电场,对外表现为温差的热电势(E)。当温差一定时, E 达到一平衡值。其计算公式为(Patrick et al.,1962):

$$\pm \alpha = (\pm E / \Delta t) \times 1000$$

式中: α 为热电系数,单位 $\mu V \cdot ^\circ C^{-1}$; E 为热电势,单位 μV ; Δt 为活化温度,单位 $^\circ C$ 。黄铁矿是半导体矿物,其导电类型是电子型(N型)与空穴型(P型)两种。当热电势 E 为负值时,矿物表现为N型导电,反之则为P型导电。其中P型含量越高,成矿越好(谢玉玲等,1999),黄铁矿形成于不同深度时,其温度压力也不同,热电性也随之产生差异。同时前人(Chen et al.,2013,2014)在研究黄铁矿中Au与As的关系时认为:在黄铁矿中Au不可能在简单的环境下替代Fe,As的存在是非常有利于Au进入黄铁矿晶格中的,预测As和Au是正相关的,Au、Fe、As原子之间存在反键相互作用,电子结构计算显示:用As和Au代替S并不能改变P型黄铁矿,但是随着As的增加,同时Au的间隙位置合并,能引起P型黄

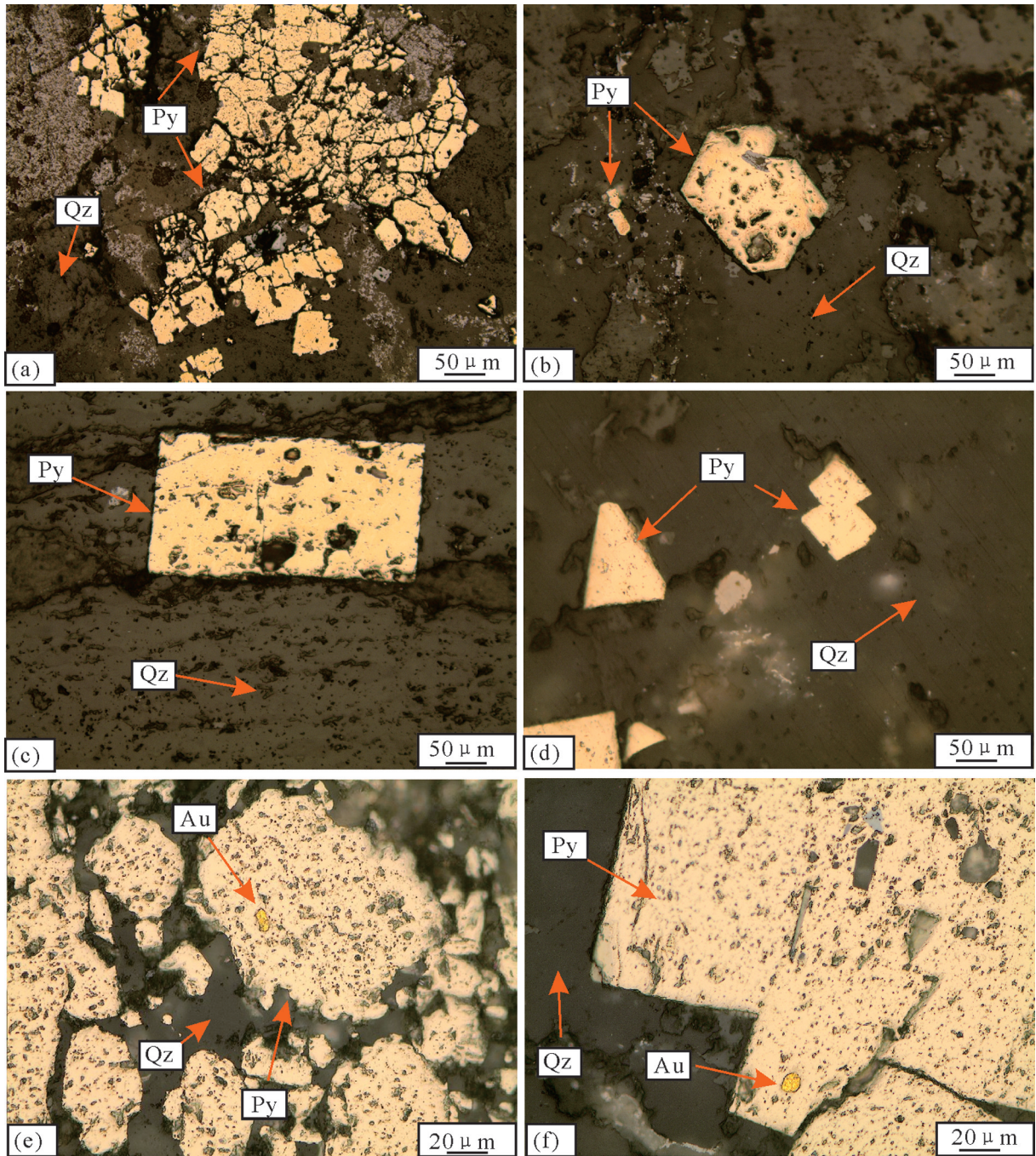


图5 新地沟金矿黄铁矿特征

Py—黄铁矿; Qz—石英; Au—金;

a—黄铁矿碎裂结构; b—晶形为五角十二面体黄铁矿; c—早期立方体晶形黄铁矿; d—早期立方体二连晶形黄铁矿; e—成矿期中的自然金赋存在晶形蚀变的黄铁矿中; f—成矿期中的自然金赋存在半自形的黄铁矿中

Fig.5 The characteristics of pyrites from the Xidigou gold deposit

Py—Pyrite; Qz—Quartz; Au—Native gold;

a—Cataclastic structure of pyrite; b—Pentagonal dodecahedron of pyrite; c—Cube crystal of the early period pyrite; d—Polycrystalline cube of the early period pyrite; e—Native gold in altered crystal of the main period pyrite; f—Native gold in the main period subhedral pyrite

表1 新地沟金矿黄铁矿矿物电子探针数据(%)

Table 1 Electron microprobe analyses of pyrite in the Xindigou gold deposit (%)

序号	矿物名称	样品编号	As	Zn	S	Sb	Fe	Co	Ni	Au	Total
1	黄铁矿	14XDG-8-q2-3	0.00	0.05	53.60	0.01	47.07	0.03	0.03	0.02	100.82
2	黄铁矿	14XDG-8-q3-2	0.00	0.03	53.73	0.02	46.52	0.08	0.03	0.02	100.42
3	黄铁矿	14XDG-gb8-q1	0.03	0.00	53.70	0.00	46.22	0.09	0.00	0.05	100.09
4	黄铁矿	13DHQ7-2	0.00	0.00	53.60	0.00	45.86	0.84	0.15	0.00	100.45
5	黄铁矿	13HW4-1	0.20	0.00	53.20	0.00	46.78	0.22	0.00	0.00	100.40
6	黄铁矿	13CDS0-1	0.09	0.00	52.99	0.00	46.23	0.20	0.24	0.00	99.75

注:测试单位为中国地质科学院矿产资源研究所电子探针实验室,2015;测试者为陈振宇;实验条件为加速电压20kV,电流 2×10^{-8} A,束斑 $5 \mu\text{m}$,ZAF修正法,数据为0.00表示低于检测下限;样品1、2、3引自刘华南等,2016。

铁矿向N性黄铁矿转变。一般认为在轴向上P型黄铁矿的热电系数随着取样位置增高而增大,N型黄铁矿热电系数随取样位置增高而减小;从矿体中部至边缘,导型呈P型到N-P混合型再到N型变化(李胜荣等,1994;侯满堂,1995;要梅娟等,2008)。前人通过对双王金矿(刘冲昊等,2013)、胶家新城金矿(戢兴忠等,2013)、马坞金矿(刘坤等,2014)、夹皮沟金矿(张琦等,2010)、金青顶金矿(陈海燕等,2011)、三道弯子金矿(翟德高等,2013)等的载金黄铁矿热电性研究也证实了上述结论。根据上述变化规律,可以判断金矿床成因、分析矿体剥蚀程度、确定矿体延伸规模以及进行深部预测(Liet al.,2001)。

5.2 样品及测试结果

本次研究样品采自新地沟金矿床油篓沟矿段、小西沟矿段ZK102、小西沟矿段ZK106和大汗青矿段ZK2802。其中油篓沟矿段样品分别采集于标高1730 m、1690 m、1650 m、1600 m,每个标高采集4件,油篓沟矿段共采集16件;小西沟矿段钻孔ZK102共选取19件样品,样品岩性为糜棱岩与千枚岩;小西沟矿段钻孔ZK106共选取24件样品,样品岩性均为糜棱岩;大汗青矿段钻孔ZK2802共选取13件样品,样品岩性多为糜棱岩;均为有代表性的岩心样。对黄铁矿单矿物进行热电性分析测试,测试前样品进行表面氧化膜和杂质的去除。使用YHZ-1106型热电仪进行黄铁矿单矿物热电性测试。活化温度 Δt 选取 $(60 \pm 3)^\circ\text{C}$,每件样品随机选取30粒单矿物进行测试,共测72件样品2160粒黄铁矿,测试结果见表2、表3、表4、表5,新地沟金矿黄铁矿热电系数(α)变化范围较大,在 $-331.10 \sim 340.20 \mu\text{V} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ 。其中N型黄铁矿(α)变化范围为 $-331.10 \sim$

$-1.70 \mu\text{V} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$;P型黄铁矿(α)变化范围为 $6.80 \sim 340.20 \mu\text{V} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$;总体上以N型导电性为主,出现频率为80.40%。各钻孔及矿体中黄铁矿热电性系数分布情况如图6。各钻孔及油篓沟矿段中P型黄铁矿出现率在垂向空间分布上呈一定的规律性变化,平均为19.60%(图7)。

6 结果分析

6.1 黄铁矿热电性的垂向空间分布特征

从表2及图7可以看出,油篓沟矿体P型黄铁矿热电性系数均值 α_p 在标高1730 m中段为 $152.5 \mu\text{V} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$,而P%型黄铁矿出现的平均值为0.83%,在标高1690 m中段P型黄铁矿热电性系数均值 α_p 为 $33.7 \sim 115.55 \mu\text{V} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$,而P%型黄铁矿出现的平均值为14.37%。在标高1650 m中段P型黄铁矿热电性系数均值 α_p 为 $62.55 \sim 186.81 \mu\text{V} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$,P%型黄铁矿出现的平均值为42.06%;在标高1600 m中段P型黄铁矿热电性系数均值 α_p 为 $68.79 \sim 152.83 \mu\text{V} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$,P%型黄铁矿出现的平均值为27.60%。总体油篓沟矿段黄铁矿导电类型变化主要呈以N和N-P型为主,大量研究发现,黄铁矿热电性在空间位置上具有正向分带,即自上而下为P型、N-P混合型、P-N混合型和N型(邵洁涟等,1988;李胜荣等,1994),指示开采金矿体位于中部或底部,同时也表明矿体的剥蚀程度较高。

钻孔ZK102中黄铁矿热电系数变化范围 $-233.00 \sim 340.20 \mu\text{V} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$,主要集中在 $-150 \sim -50 \mu\text{V} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ 范围内。黄铁矿导型由N-P型到P型,再由P型N型、再由N型到N-P型,明显呈脉动变化,说明矿段成矿多期多阶段。从表3及图7中可以看出样品自

表2 油篓沟中段黄铁矿热电性系数值
Table 2 Thermoelectric coefficients of pyrites from Youlougou orebody

标高/m	样品号	N型 α ($\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$)				P型 ($\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$)			
		最小值	最大值	平均值	频率	最小值	最大值	平均值	频率
1600	14x-97	-229.5	-54.7	-143.87	82.5	33.4	130.6	68.79	17.5
1600	14x-98	-283.1	-58.8	-176.26	100	—	—	—	—
1600	14x-99	-286.7	-6.6	-107.06	39.53	13.4	307.6	141.16	60.47
1600	14x-100	-221.7	-11.8	-118.74	67.57	20.3	320.9	152.83	32.43
1650	14x-85	-201	-18.5	-104.83	81.25	31.4	102.7	63.55	18.75
1650	14x-86	-275.9	-51.4	-189.8	97	86.5	86.5	86.5	3
1650	14x-87	-187.6	-28.4	-84.81	40	38.4	321.1	186.81	60
1650	14x-88	-60.6	-19.9	-40.26	13.51	16.8	278.5	155.56	86.49
1690	14x-93	-176.5	-38.7	-117.68	98.34	33.7	33.7	33.7	1.66
1690	14x-94	-150.3	-15	-73.99	47.5	18.6	296.7	115.55	52.5
1690	14x-95	-267.20	-75.8	-178.35	100	—	—	—	—
1690	14x-96	-243.3	-18.3	-136.32	96.67	35.4	35.4	35.4	3.33
1730	14x-89	-196	-77.1	-150.69	100	—	—	—	—
1730	14x-90	-181.8	-42	-131.23	96.67	152.5	152.5	152.5	3.33
1730	14x-91	-227.3	-119.1	-182.36	100	—	—	—	—
1730	14x-92	-177.1	-61.8	-125.71	100	—	—	—	—

注:“—”表示未检出;测试单位为中国地质大学(北京)资源勘查实验室,2015;测试仪器为BHTE-8型热电仪(温差设定为 $\Delta t=(60\pm 3)\text{C}$)。

1405~1438 m和1531~1562 m总体P型黄铁矿较多,表明在1405~1438 m和1531~1562 m矿化比较好。

钻孔 ZK106 中黄铁矿热电系数变化范围-331.10~336.20 $\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$,主要集中在-200~-50 $\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$ 范围内。从表4及图7中可以看出,样品自标高1553~1245 m, α_p 平均值从上到下呈现先增大后减小再增大,总体上为增大趋势。根据P型黄铁矿热电系数在矿体上部值较大,说明在1245 m以下还会有P型黄铁矿出现,且1417~1245 m P型黄铁矿所占比例为增大趋势,表明目前控制标高范围内可能处于矿化体中的中部位置,在深部有一定规模的矿化体。

钻孔 ZK2802 中黄铁矿热电系数变化范围-318.70~331.10 $\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$,主要集中在-150~-50 $\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$ 范围内。从表5及图7中可以看出,样品在1661~1585 m,其中 α_p 平均值在标高1587 m处较高,指示1587 m附近矿化较好。

6.2 黄铁矿热电性系数与成矿温度

不同温度条件下形成的黄铁矿,其热电性系数和导电类型不同,其与矿物形成温度有密切关系黄铁矿的热电系数与其形成温度之间存在着函数关系,戈尔

巴乔夫(1964)利用大量数据做出黄铁矿热电性-温度图(要梅娟等,2008),其相关的方程如下:

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

$$\text{P型 } t=3(122.22+\alpha)/5.0$$

利用上述方程,并结合表2~5中的数据,得到新地沟金矿黄铁矿形成温度范围为77~384 $^{\circ}\text{C}$,其中N型黄铁矿形成温度为283~384 $^{\circ}\text{C}$,分布相对集中;P型黄铁矿形成温度为77~256 $^{\circ}\text{C}$,分布相对分散。将温度数据投点于黄铁矿热电性-温度图(图8)和温度直方图(图9)中,可知,新地沟金矿床黄铁矿成矿温度集中在110~340 $^{\circ}\text{C}$ 和250~370 $^{\circ}\text{C}$,综合图8、图9,指示黄铁矿形成温度主要集中250~340 $^{\circ}\text{C}$,该矿床形成温度为中温,这与前人(王守光等,2004)利用石英测得矿床形成温度(220~320 $^{\circ}\text{C}$)基本吻合。

6.3 黄铁矿热电性系数离散度特征

根据金品位、离散度和P型黄铁矿关系图(图10)可知,总体上P型黄铁矿的出现率越大,金的品位越高,新地沟金矿床的P型黄铁矿出现率与金的品位呈正相关,在金品位与离散度的关系图中,离散度小于200%或大于300%,金的品位越高。在离

表3 钻孔ZK102黄铁矿热电性系数值

Table 3 Thermoelectric coefficients of pyrites from drill hole ZK102

标高/m	样品号	N型 $\alpha(\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1})$				P型 $(\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1})$				金品位(g/t)
		最小值	最大值	平均值	频率	最小值	最大值	平均值	频率	
1405	14x-163	-145.30	-5.10	-66.79	50.00	15.30	165.80	65.05	50.00	—
1411	14x-157	-130.50	-9.90	-67.17	85.71	24.90	186.20	78.38	14.29	0.13
1413	14x-158	-176.30	-5.00	-90.84	56.00	18.10	302.60	106.22	44.00	0.26
1423	14x-159	-201.00	-84.20	-136.32	100.00	—	—	—	—	—
1431	14x-161	-211.50	-30.70	-104.13	90.00	25.60	153.70	86.37	10.00	—
1438	14x-162	-166.90	-72.60	-125.84	96.67	6.50	6.50	6.50	3.33	—
1481	14x-164	-233.00	-70.60	-130.30	100.00	—	—	—	—	0.23
1484	14x-165	-170.90	-32.00	-110.75	83.10	33.70	220.90	97.40	16.90	0.13
1490	14x-166	-220.00	-60.80	-103.74	100.00	—	—	—	—	—
1495	14x-167	-200.30	-72.30	-104.40	100.00	—	—	—	—	—
1499	14x-168	-158.50	-55.60	-98.19	100.00	—	—	—	—	—
1513	14x-170	-145.20	-69.60	-108.47	100.00	—	—	—	—	0.26
1520	14x-171	-116.00	-15.20	-85.73	100.00	—	—	—	—	—
1526	14x-172	-187.40	-66.70	-119.11	100.00	—	—	—	—	—
1531	14x-173	-209.80	-8.50	-111.41	94.59	57.40	270.30	163.85	5.41	—
1546	14x-175	-177.50	-21.90	-99.70	6.45	35.70	340.20	232.56	93.55	—
1557	14x-176	-193.60	-79.10	-127.25	100.00	—	—	—	—	—
1559	14x-177	-153.50	-18.50	-80.86	44.00	37.00	331.60	125.93	56.00	0.13
1562	14x-178	-156.30	-37.40	-96.40	82.50	33.20	137.10	58.93	17.50	—

注：“—”表示未检出；测试单位为中国地质大学(北京)资源勘查实验室，2015；测试仪器为BHTE-8型热电仪(温差设定为 $\Delta t=(60\pm 3)\text{C}$)。

散度小于200%，金品位集中，且出现较大值。

黄铁矿热电系数离散度(σ_{α}')可以较准确地反映出热电系数相差较大的不同样品其热电系数值相对集中与分散的情况(邵伟等, 1990; 刘平等, 1991; 杨竹森等, 2000)。离散度的计算采用:

$$\sigma_{\alpha}' = \frac{\sigma_{\alpha}}{\alpha'} \times 100\%$$

其中： α' 为黄铁矿样品热电系数的平均值； σ_{α} 为热电系数的标准差。 σ_{α}' 数值越大，指示黄铁矿热电系数的分散程度越大，数值较小，指示黄铁矿热电系数分布相对集中。 σ_{α}' 可以反映出成矿条件的稳定程度，在较稳定的成矿条件下形成的黄铁矿晶体性质接近。离散范围较小，则 σ_{α}' 也相应较小；反之，波动范围较大； σ_{α}' 相应较大， σ_{α}' 也可以指示不同阶段黄铁矿的叠加程度，早期叠加较强的黄铁矿以N型为主，晚期叠加较强的黄铁矿以P型为主，两种情况下成矿条件相对稳定，具有较小的 σ_{α}' ；

而在两期叠加作用接近时，会造成成矿条件波动强烈； σ_{α}' 会急剧增大。如果P型黄铁矿出现率高对应 σ_{α}' 数值较小，表明矿化较好；P型黄铁矿出现率高但 σ_{α}' 数值偏大，表明矿化不连续；P型黄铁矿出现率低且 σ_{α}' 数值较大，表明矿化较差(刘冲昊等, 2013; 张方方等, 2013; 刘坤等, 2014)。

根据P型黄铁矿频率与离散度的关系图(图11)可以看出，P型黄铁矿频率在小于20%和大于80%时， σ_{α}' 均较小，在200%以内，P型黄铁矿频率越接近40%， σ_{α}' 越大，接近指数形态增长。

根据样品标高与离散度值绘制出离散度与标高的关系图(图12)，可以看出，标高1650~1250 m的离散度投点较为分散，但离散度小于200%比大于300%的投点多，而且相对集中，总体各个层位矿化体在上由浅到深，离散度高值逐渐增多，因此，推测新地沟金矿成矿阶段热液活动有多次脉动，造成不同区域的叠加程度有所差异。根据数据统计，在油

表4 钻孔ZK106黄铁矿热电性系数值
Table 4 Thermoelectric coefficients of pyrites from drill hole ZK106

标高/m	样品号	N型 α ($\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$)				P型 ($\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$)				金品位(g/t)
		最小值	最大值	平均值	频率	最小值	最大值	平均值	频率	
1245	14x-24	-162.30	-38.20	-106.81	33.33	18.50	318.80	167.51	66.67	0.71
1253	14x-25	-249.60	-21.40	-132.56	72.00	16.80	214.60	94.36	28.00	0.39
1280	14x-26	-286.70	-21.80	-157.62	70.00	6.80	327.20	176.42	30.00	0.52
1285	14x-27	-78.70	-28.50	-62.23	20.00	34.70	323.20	200.33	80.00	1.03
1299	14x-28	-331.10	-76.00	-183.04	66.00	42.10	336.20	199.94	34.00	0.52
1314	14x-30	-193.00	-20.20	-78.56	27.50	13.40	312.00	132.55	72.50	0.13
1320	14x-31	-196.60	-21.80	5.92	42.50	30.30	286.70	36.99	57.50	0.06
1323	14x-32	-299.00	-18.50	154.26	67.00	25.10	327.30	144.27	33.00	—
1329	14x-33	-243.70	-20.10	177.30	100.00	—	—	—	—	0.13
1360	14x-35	-32.00	-22.00	-27.00	6.70	50.30	331.60	170.69	93.30	0.13
1368	14x-36	-237.50	-23.90	-154.86	60.00	25.50	253.80	106.81	40.00	0.13
1401	14x-37	-209.70	-13.20	-141.89	82.85	108.60	253.00	194.85	17.15	0.07
1405	14x-38	-218.30	-69.00	-132.91	97.00	16.90	16.90	16.90	3.00	—
1412	14x-39	-225.60	-70.90	-136.53	93.00	38.90	291.00	164.95	7.00	0.07
1417	14x-41	-284.10	-1.70	-137.89	80.20	40.60	314.10	149.60	19.80	0.26
1425	14x-42	-167.20	-82.80	-118.53	100.00	—	—	—	—	1.05
1444	14x-44	-189.50	-84.70	-125.08	100.00	—	—	—	—	—
1470	14x-47	-220.40	-23.50	-142.67	100.00	—	—	—	—	—
1503	14x-50	-287.10	-38.00	-121.05	70.00	26.50	242.50	116.75	30.00	—
1520	14x-53	-198.00	-78.90	-121.12	100.00	—	—	—	—	—
1524	14x-54	-156.90	-60.90	-101.88	97.00	141.70	141.70	141.70	3.00	—
1526	14x-55	-262.80	-25.00	-160.35	86.67	46.30	163.50	120.33	13.33	0.13
1537	14x-57	-281.20	-73.90	-155.55	100.00	—	—	—	—	—
1553	14x-58	-174.10	-62.70	-128.17	100.00	—	—	—	—	—

注:“—”表示未检出;测试单位为中国地质大学(北京)资源勘查实验室,2015;测试仪器为BHTE-8型热电仪(温差设定为 $\Delta T=(60\pm 3)\text{C}$)

筭沟矿段81%的离散度小于200%,且随着标高变化不大,表明成矿环境较为稳定,不同阶段叠加影响较小。在钻孔ZK102中有83.3%的离散度小于200%,虽总体P型黄铁矿出现率不高,但在标高1405~1438 m和1531~1562 m处均以离散度小于200%为主,且总体P型黄铁矿出现率较高,表明两处矿化较好。在钻孔ZK106中有87.5%的离散度小于200%,在标高1417~1245 m处有87%的离散度小于200%较集中,P型黄铁矿出现率高,表明在1417~1245 m处矿化较好,成矿环境较为稳定。在钻孔ZK2802虽然离散度以小于200%为主,但P型黄铁

矿出现率低,表明矿化较差。

6.4 黄铁矿热电性对矿体及矿化带延伸的标识

根据黄铁矿热电系数值,利用下列方程可以求出黄铁矿的热电性参数 X_{NP} 。

$$X_{NP}=(2f_I+f_{II})-(f_{IV}+2f_V)$$

式中: f_I 为黄铁矿样品中热电性系数 $\alpha > 400\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$ 的百分比; f_{II} 为 α 在 $200\sim 400\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$ 的百分比; f_{IV} 为 α 在 $0\sim -200\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$ 的百分比; f_V 为 $\alpha < -200\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$ 的百分比。矿体最上部为 X_{NP} 值为 $200\sim 100$,上部为 $100\sim 50$,中部为 $50\sim -50$,下部为 $-50\sim -100$,最下部 $-100\sim -200$ 。根据黄铁矿的热

表5 钻孔ZK2802黄铁矿热电系数值

Table 5 Thermoelectric coefficients of pyrites from drill hole ZK2802

标高/m	样品号	N型 α ($\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$)				P型 ($\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$)			
		最小值	最大值	平均值	频率	最小值	最大值	平均值	频率
1284	14x-139	-195.40	-28.10	-111.75	57.50	22.80	323.90	178.31	42.50
1290	14x-140	-244.30	-33.30	-138.29	100.00	—	—	—	—
1293	14x-141	-249.60	-58.60	-115.04	100.00	—	—	—	—
1314	14x-145	-184.90	-92.70	-136.26	100.00	—	—	—	—
1336	14x-133	-179.20	-63.00	-92.24	96.77	304.60	304.60	304.60	3.23
1361	14x-134	-203.70	-41.80	-99.53	100.00	—	—	—	—
1381	14x-136	-203.70	-48.70	-119.30	77.50	25.40	271.20	93.09	22.50
1384	14x-137	-318.70	-42.10	-138.33	100.00	—	—	—	—
1393	14x-138	-248.80	-68.90	-129.77	100.00	—	—	—	—
1459	14x-152	-190.60	-77.20	-133.83	100.00	—	—	—	—
1529	14x-149	-226.70	-38.50	-133.02	100.00	—	—	—	—
1556	14x-151	-148.10	-33.70	-101.53	96.67	156.90	156.90	156.90	3.33
1587	14x-147	-227.80	-15.10	-108.42	40.00	36.90	271.00	132.40	60.00

注：“—”表示未检出；测试单位为中国地质大学(北京)资源勘查实验室，2014；测试仪器为BHTE-8型热电仪(温差设定为 $\Delta t=(60\pm 3)\text{C}$)。

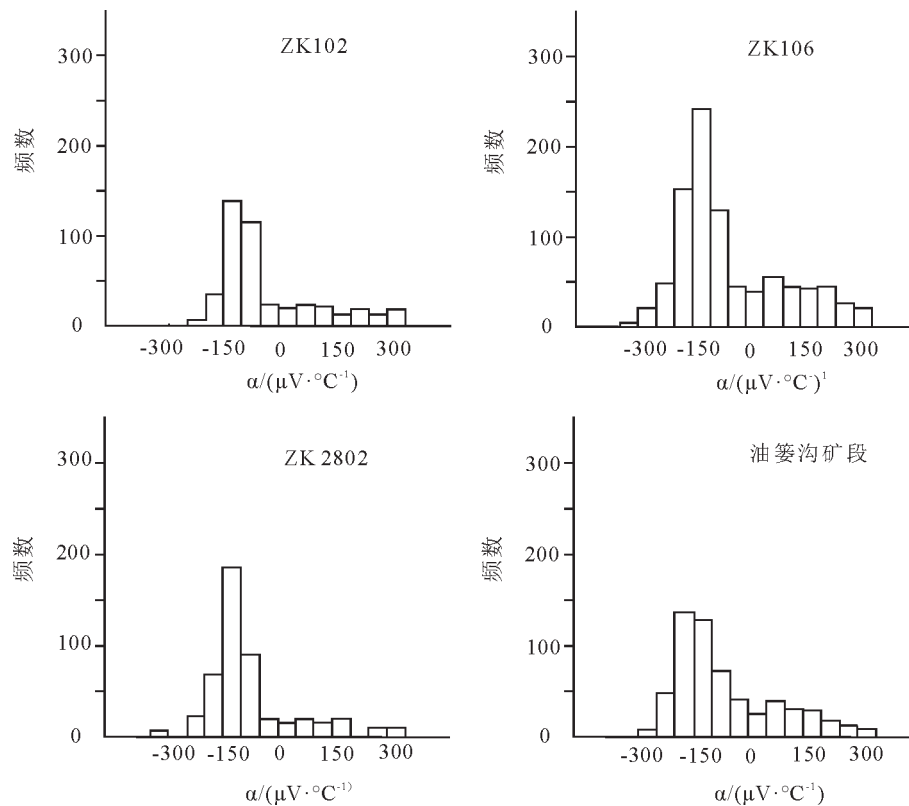


图6 新地沟金矿床各钻孔及矿体黄铁矿热电系数直方图

Fig.6 Histograms of thermoelectric coefficients of pyrites from various drill holes and orebodies in the Xindigou gold deposit

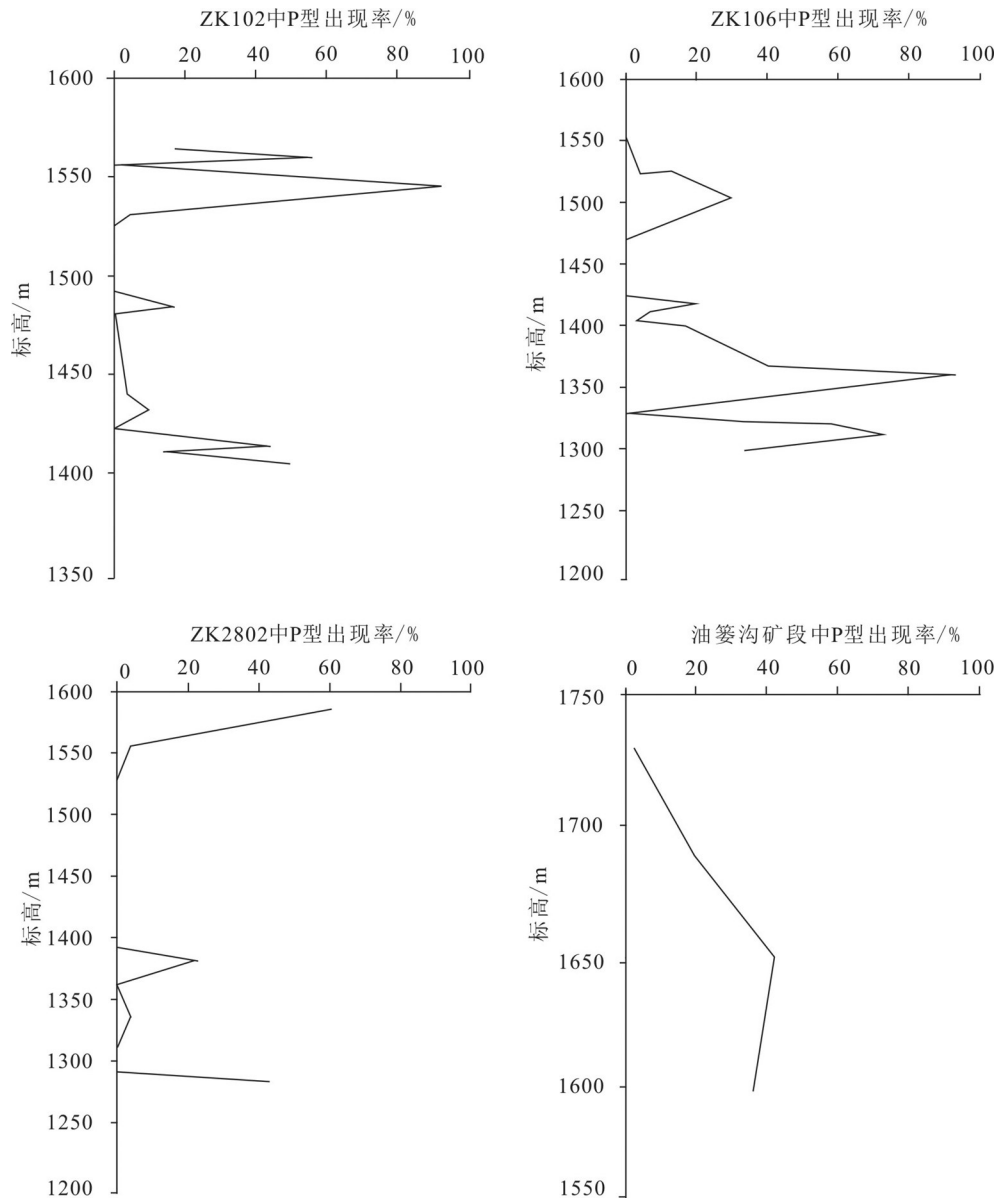


图7 新地沟金矿床各钻孔及油篓沟矿体P型黄铁矿出现率垂向变化趋势图

Fig.7 Attitude-changing trend diagram of frequencies of P-type pyrite from various drill holes and Youlougou orebodies in the Xindigou gold deposit

电性参数可以进一步算出矿体剥蚀率(矿体相对于矿化总长度的剥蚀百分比) γ ($\gamma = X_{NP} / 4$) (权志高等, 1995)。新地沟金矿的形成具有多阶段成矿特征, 在同一钻孔中, 同一标高位置测试的不同样品, 可能存在不同成矿阶段的产物, 从而出现个别样品热电性参数值偏大或偏小, 所以采用各钻孔 X_{NP} 及 γ 的平均值来判断矿体延伸规模。

新地沟金矿床油篓沟矿段 X_{NP} 变化范围为 16.2~ -136.7, 主要集中在 -136.67~-84.4 平均值为 -83, 剥

蚀率百分比平均 70.75%, 1730 m 中段向下至 1600 m 中段, X_{NP} 平均值为 -17.3 → -82.6 → -102.9 → -129.2, 总体为减小趋势, 以上数据表明矿体处于中下部出露, 深部仍具有良好矿化远景, 指示矿体向下可能 有小规模延伸。钻孔 ZK102 X_{NP} 变化范围为 54.83~-106.67, 平均值 -80.39, 剥蚀率百分比平均 70.09%, 其中在标高 1531~1562m X_{NP} 变化范围为 54.83~-94.59, 平均值 -51.25, 在 1405~1438 m X_{NP} 平均值为 -80, 为中部偏下部热电性特征, 指示深部有

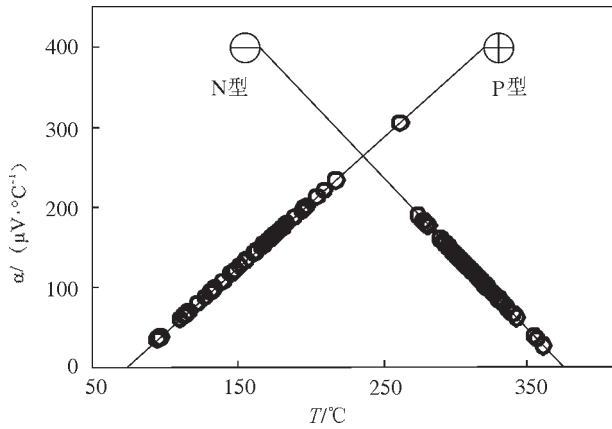


图8 新地沟金矿床黄铁矿热电系数-温度图解
Fig.8 The relationship between thermoelectricity and temperature of pyrites from the Xindigou gold deposit

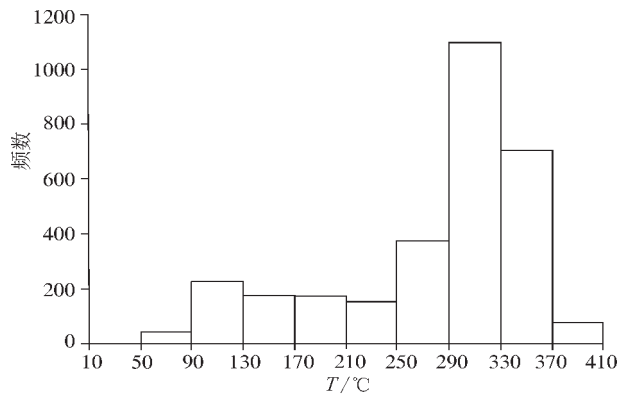


图9 新地沟金矿床黄铁矿温度直方图
Fig.9 Histograms of temperature of pyrites in the Xindigou gold deposit

一定规模延伸。

钻孔 ZK106 X_{NP} 变化范围为 26.67~-110, 平均值 -71.85, 剥蚀率百分比平均 67.96%, 其中在矿化较好的 1417~1245 m 中, 已圈定矿体 1245~1299 m 的 X_{NP} 变化范围 26.67~-88, 平均值为 -38.82, 为矿体中部热电性特征, 指示矿体沿矿体倾向方向有较大规模延伸。

钻孔 ZK2802 X_{NP} 变化范围为 -35~-193.33, 平均值 -97.26, 剥蚀率百分比平均 74.31%, 在钻孔垂向 X_{NP} 变化不大, P 型黄铁矿出现率低, 虽然在 1587 m 矿化较好, 但总体较钻孔 ZK102、钻孔 ZK106 相比矿化较差。

7 讨论

中国大多金矿中以 N 型黄铁矿为主, 如义兴寨

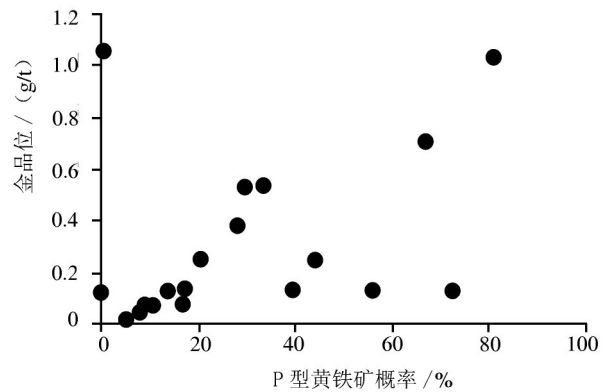
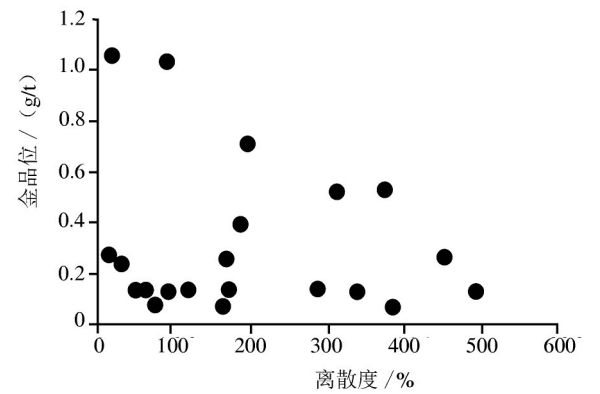


图10 新地沟金矿金品位与离散度、P型黄铁矿概率关系图
Fig.10 The relationship of gold grade and thermoelectrical coefficient and the frequency of P-type from the Xindigou gold deposit

金矿 N 型黄铁矿出现率为 75.1%(李成禄等, 2009), 胶东新城金矿 N 型黄铁矿出现率为 70.2%(戢兴忠等, 2013), 三道弯子金矿 N 型黄铁矿出现率为 84%(翟德高等, 2013), 康古尔金矿 N 型黄铁矿出现率为 86%(许杰辉等, 2015 年), 马坞金矿 N 型黄铁矿出现率为 71.2%(刘坤等, 2014) 等, 其中新地沟金矿床为 N 型黄铁矿出现率较高的金矿, 这与矿石中黄铁矿大多呈自形或半自形结构有着密切关系, 黄铁矿的热电性与成矿介质的硫逸度之间存在一定的关系(高浩中等, 1999; 李红兵等, 2005; 戢兴忠等, 2013): 硫逸度较高时多形成 P 型黄铁矿, 较低时则多形成 N 型黄铁矿, 新地沟金矿床早期成矿阶段可能形成低硫逸度环境。

不同成矿阶段的黄铁矿的晶体形态标型可以指示其相应的成矿条件(陈光远等, 1987; 蔡元吉等, 1993; 李楠等, 2012, 张瑞忠等, 2016), 成矿早期阶段黄铁矿以粗粒自形立方体为主, 说明成矿环境

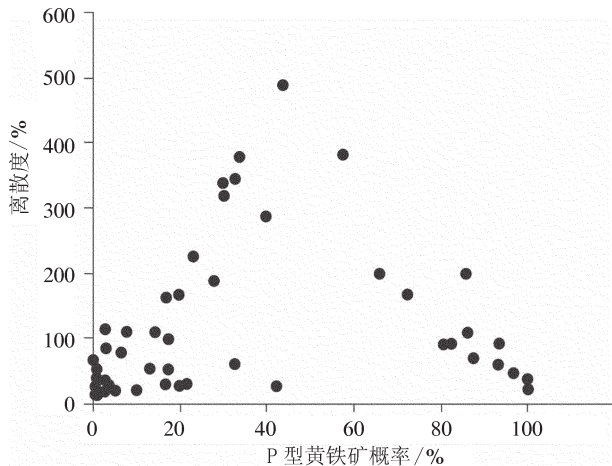


图11 新地沟金矿床黄铁矿热电系数离散度-P型黄铁矿概率关系图

Fig.11 Relationship between thermoelectrical coefficient dispersions and the probability of P-type from the Xindigou gold deposit

为较高温度、快速冷却。新地沟金矿床早期黄铁矿以粗粒立方为主(图5),指示早期成矿条件以较高温度为主。王守光等(2004)对新地沟金矿床主成矿阶段石英流体包裹体测得均一温度略低于黄铁矿形成温度,指示新地沟金矿床主成矿阶段黄铁矿形成温度较早期黄铁矿相对偏低,这也可能与主成矿阶段黄铁矿P型较多有关。

黄铁矿的微量元素特征可以指示其成矿流体来源、沉淀就位时的物化条件,因此可以很好地示踪成矿物质来源(王亚芬,1981;雷万彬等,2017)。黄铁矿中微量元素可以分为两类:一是呈类质同象替代形式进入黄铁矿晶格的元素,如Co、Ni元素替代Fe;二是呈机械混入物形式存在于黄铁矿中的元素,如Au、Ag、Cu、Pb、Zn等元素(张瑞忠等,2016)。新地沟金矿床的黄铁矿电子探针结果显示,微量元素普遍含Co、Ni,含Au的黄铁矿中Co、Ni含量较不含Au黄铁矿偏低,这可能是黄铁矿中Au在机械混入时影响了Co、Ni对Fe的替代。大量研究表明(Bralia et al., 1979;李成禄等,2018),热液成因黄铁矿Co/Ni一般为1.17,岩浆成因黄铁矿Co/Ni值一般为0.09~12,新地沟金矿床黄铁矿Co/Ni值变化范围0.83~5.6,均值2.5,指示其成因具有岩浆-热液成因。

在金矿床中,黄铁矿、石英等标型矿物与剥蚀程度有着非常密切的关系,能指示成因、找矿意义

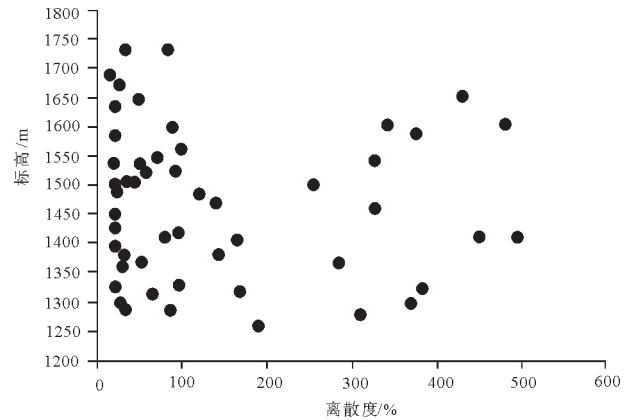


图12 新地沟金矿床黄铁矿热电系数离散度-标高关系图

Fig.12 Relationship between thermoelectrical coefficient dispersions and elevation from the Xindigou gold deposit

(汪立今和索建军,1992),黄铁矿晶体中存在很多空洞、显微裂隙、错位等圈封的宏观缺陷(先永骏,2013),这些缺陷大小不一,也通常是裂隙金和包体金存在的空间(刘华南等,2015),而新地沟金矿床的含金黄铁矿往往是以P型黄铁矿为主,表2、3中可以看出,随着P型黄铁矿频率增加,其金品位呈增大趋势;相比ZK102,ZK106的剥蚀程度较小,但金品位较高,指示新地沟金矿床的金品位与剥蚀程度呈反比趋势;金的品位随着矿体的深度增加,呈现出增大趋势。虽然在剥蚀过程中,可能由于流体的介入或物化条件的改变而发生金在矿体深部的富集,但新地沟金矿床并没有显示出剥蚀程度与金品位呈正相关的趋势,而是呈现出负相关趋势,因此,在找矿过程中,剥蚀程度可以作为一个很重要的找矿依据和储量的参考。

李俊建等(2005)对新地沟金矿区出露的含金石英细脉浸染状矿石进行 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法同位素年龄测定,其形成时代为1991.43~1988.93 Ma,刘华南(2016)对新地沟金矿中岩脉进行锆石U-Pb同位素测年,其形成时代为 (241 ± 3) Ma(MSWD=0.57),说明在新地沟金矿床的形成过程中,受到不同时期的热液影响,同时根据黄铁矿热电性系数离散度特征也指示,新地沟金矿床成矿阶段热液活动有多次脉动。以上说明了黄铁矿热电型特征不仅对深部远景预测提供可靠地指导(申俊峰等,2018),还可以有效地指示成矿机制。总体上,新地沟金矿床在深

部可能存在一定规模的矿体延伸。

8 结 论

通过本文对新地沟金矿床油篓沟矿段及3个钻孔黄铁矿的热电性标识特征进行系统研究以及深部远景预测得出以下结论:

(1)新地沟金矿黄铁矿热电系数(α)变化范围较大,在 $-331.10\sim 340.20 \mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$ 。总体上以N型导电性为主,出现频率为80.40%。根据热电数据得到新地沟金矿床成矿温度主要集中在 $250\sim 340\text{C}$,该矿床为中温矿床。

(2)新地沟金矿床油篓沟矿段 X_{NP} 平均值为 -83 ,剥蚀率百分比平均70.75%,钻孔ZK102 X_{NP} 平均值 -80.39 ,剥蚀率百分比平均70.09%;钻孔ZK106 X_{NP} 平均值 -71.85 ,剥蚀率百分比平均67.96%,钻孔ZK2802 X_{NP} 平均值 -97.26 ,剥蚀率百分比平均74.31%。

(3)通过钻孔空间垂向规律、离散度与空间关系及热电性参数等表明:油篓沟矿段位于矿体中底部,向深部可能有小规模延伸。小西沟矿段钻孔ZK106在已圈定矿体标高1245~1299 m的深部矿化前景最好,深部有较大规模延伸。小西沟矿段钻孔ZK102次之,在深部有一定规模延伸,大汗青矿段钻孔ZK2802深部矿化前景较差。

致谢: 本文的撰写中得到了责任编辑和匿名审稿老师的指导;野外工作得到内蒙古沃野金矿矿长田润福、廖主任等领导的大力支持;室内工作得到樊铭静、王雷的指导和帮助,在此一并表示衷心的感谢!

注释

① 内蒙古沃野矿冶技术开发公司. 2009. 内蒙古自治区察哈尔右翼中旗新地沟矿区油篓沟矿段、下半沟矿段金矿生产详查报告[R].

References

Bi Xianwu, Hu Ruizhong, Peng Jiantang, Wu Kaixin. 2004. REE and HFSE geochemical characteristics of pyrites in Yao' an Gold deposit: Tracing ore forming fluid signatures[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 23(1):1-4(in Chinese with English abstract).

Bralia A, Sabatini G, Troja F. 1979. A revaluation of the Co/Ni ratio in pyrite as geochemical tool in ore genesis problems[J]. Mineralium

Deposita, 14(3): 353-374.

Cai Yuanji, Zhou Mao. 1993. Crystalomorphological characteristics of pyrite in hydrothermal gold deposit: An experimental study[J]. Science in China (Series B), 23(9): 972-978 (in Chinese).

Cao Xu, Li Quanheng, Ye Rong, Wang Yong. 2015. Typomorphic characteristics of Pyrites in the 210 gold deposit, Xinjiang Province and its geological significance[J]. Xinjiang Geology, 33(1): 56-60 (in Chinese with English abstract).

Chen Guangyuan, Sun Daisheng, Yin Hui'an. 1987. Genetic Mineralogy and Prospecting Mineralogy [M]. Chongqing: Chongqing Publishing Group, 11-32(in Chinese with English abstract).

Chen Guangyuan, Shao Wei, Sun Daisheng. 1989. Genetic Mineralogy of Gold Deposits in Jiaodong Region with Emphasis on Gold Prospecting [M]. Chongqing: Chongqing Publishing Group, 94-134 (in Chinese).

Chen Haiyan, Li Shengrong, Zhang Xiubao, Zhou Qifeng, Zhang Yunqiang, Liu Zhenhao, Zhang Haifang, Wang Ning. 2011. Thermoelectric character of pyrite from Jinqingding glod deposit in eastern Shandong Province and its significance [J]. Mineral Deposits, (6): 1125-1137 (in Chinese with English abstract).

Chen Jianhua, Li Yuqiong. 2013. DFT simulation of the occurrences and correlation of gold and arsenic in pyrite[J]. American Mineralogist, 98(10): 1765-1771.

Chen Jianhua, Li Yuqiong, Zhao Cuihua. 2014. First principles study of the occurrence of gold in pyrite[J]. Computational Materials Science, 8: 1-6.

Gao Haozhong, Cai Xinping, Zhang Baolin, Wang Jie, Qin Dajun, Liang Guanghe, Xu Xingwang. 1999. The characters of pyrite and gold mineralization[J]. Gold Science and Technology, 7(3): 11-15.

Gao Haozhong, Cai Xinping, Zhang Baolin, Wang Jie, Qin Dajun, Liang Guanghe, Xu Xingwang. 1999. The characters of pyrite and gold mineralization[J]. Gold Science and Technology, 7(3): 11-15.

Hou Mantang. 1995. Geological significance and characteristic of the thermoelectricity characteristics of pyrite of Taibaimiao gold deposit[J]. Northwestern Geology, 1: 26-35 (in Chinese with English abstract).

Hou Mantang. 2000. Study and application of the thermoelectricity characteristics of pyrite of Taibaimiao gold deposit, Zhen'an County, Shaanxi Province [J]. Gold, 21(7): 5-9 (in Chinese with English abstract).

Hu Fengxiang, Huang Zhanqi, Li Siwa, Wang Xinliang, Zhang Zhixiang. 2002. The geological characteristics of greenstone and greenstone-type gold deposit in central Inner Mongolia[J]. Progress in Precambrian Research, 25(4): 190-198(in Chinese with English abstract).

Ji Xingzhong, Yang Liqiang, Wang Zhongliang. 2013. Thermoelectricity characteristics of pyrite from Xincheng Gold Deposit, eastern Shandong [J]. Geoscience, 27(1) 37-45 (in

- Chinese with English abstract).
- Lei Wangshan, Zhang Yanfei, Liu Yajun, Liu Jinming. 2017. Typomorphic characteristics of Au-bearing pyrites from Luyuangou altered gold deposit, western Henan Province[J]. *Earth Science Frontiers*, 24(2):176–185(in Chinese with English abstract).
- Li Chenglu, Li Shengrong, Xu Wenxi, Yuan Maowen, Li Shisheng, Qu Hui, Wang Zhuo. 2018. Typomorphic characteristics and stable isotopes of pyrite from the Yongxin Tellurium–Gold deposit in Heilongjiang Province[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 37(1): 75–86 (in Chinese with English abstract).
- Li Chenglu, Li Shengrong, Luo Junyan, Song Jiye, Zhang Juquan. 2009. Thermoelectric coefficient, conductive type and significance of the Pyrite from Yixingzhai gold deposit in Fanshi County, Shanxi Province, China[J]. *Geoscience*, 23(6) 1056 – 1063 (in Chinese with English abstract).
- Li Hongbing, Zeng Fanzhi. 2005. The pyrite's typomorphic characteristics in gold deposit[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*. 20(3): 199 – 203. (in Chinese with English abstract).
- Li Jie, Shen Junfeng, Li Jinchun, Liu Shengqiang, Wang Dongli, Zhang Hong. 2016. Stable isotope geochemical characteristics and ore-forming material source of the Gangcha gold deposit, Gansu Province, China [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 35(2): 379–384.
- Li Junjian, Zhou Xuewu, Shen Baofeng, Hu Fengxiang, Sang Haiqing, Liu Xiaoyang, Wang Jianmin, Li Tiejun. 2005. Metallogenic age of the Xindigou greenstone belt-type gold deposit in the Daqingshan area, central inner Mongolia[J]. *Geology and Prospecting*, 41(5): 1–4.
- Li Nan, Yang Liqiang, Zhang Chuang, Zhang Jing, Lei Shibin, Wang Hengtao, Wang Hongwei, Gao Xue. 2012. Sulfur isotope characteristics of the Yangshan gold belt, west Qinling: Constraints on ore-forming environment and material source[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(5): 1577 – 1587 (in Chinese with English abstract).
- Li Qing, Li Shengrong, Zhang Xiubao, Zhang Linjie, Zhao Yi, Zhao Fuwang, Liu Yang. 2013. Thermoelectric coefficient of Pyrite from the Xishimen Gold Deposit in Lingshou County, Hebei Province and its Prospecting significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 87(4): 542–553(in Chinese with English abstract).
- Li Shengrong, Chen Guangyuan, Shao Wei, Sun Daisheng. 1996. *Genetic Mineralogy in Rushan Gold Mines, Jiaodong Region*[M]. Beijing: Geological Publishing Group, 89–93(in Chinese).
- Li Shengrong, Chen Guangyuan, Shao Wei, Sun Daisheng. 1994. Study on morphology of pyrite from Rushan gold mines, Jiaodong region[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 9(1): 79–86(in Chinese with English abstract).
- Li Shengrong, Deng Jun, Hou Zengqian, Xiao Run, Yuan Wanming, Feng Xiaoliang, Zhao Zhidan, Shen Junfeng, Zhou Su. 2001. Regional fractures and denudation of gold deposits in Gangdise belt, Tibet: Enlightenment of Ag/Au ratio[J]. *Science in China (series D)*, (S1):104–108(in Chinese).
- Li Yifan, Li Hongkui, Tang Qiyun, Zhuo Chuanyuan, Geng Ke, Liang Taitao. 2015. Typomorphic characteristics and geological significance of Pyrite in Jiudian gold deposit, Shandong Province [J]. *Gold Science and Technology*, 23(2): 45 – 50(in Chinese with English abstract).
- Liu Chonghao, Liu Jiajun, Wang Jianping, Wu Jie, Wang Weiyu, Wang Lixin, Yu Kangwei, Chen Dong, Li Zhiguo. 2013. Thermoelectric characteristics of pyrite from the main ore zone of Huachangou gold deposit, Shangxi Province and its significance[J]. *Earth Science Frontiers*, 20(4): 264 – 272(in Chinese with English abstract).
- Liu Huanan, Liu Jiajun, Dai Hongzhang, Tao Yinlong, Wang Lei, Wang Janfeng. 2016. Modes of occurrence of gold in the Xindigou gold deposit, Inner Mongolia [J]. *Geology in China*, 43(1): 261–274 (in Chinese with English abstract).
- Liu Huanan. Study on Geochemistry and Ore Genesis of the Xindigou Gold Deposit in Inner Mongolia, China[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2016.
- Liu Kun, Liu Jiajun, Wu Jie, Liu Chonghao, Yang Shangsong, Xin Xiaojun, Li Yuan. 2014. Thermoelectric characteristic of pyrites from No.8 Orebody of the Mawu gold deposit in Gansu Province and its significance[J]. *Geoscience*, 28(4): 711 – 720 (in Chinese with English abstract).
- Liu Ping, Qiu Zhaoxia. 1991. The distribution features of pyroelectric coefficient values of pyrite samples from some gold deposits in China and their significance [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 11(1): 60 – 69 (in Chinese with English abstract).
- Lehner S W, Savage K S, Ayers J C. 2006. Vapor growth and characterization of pyrite (FeS₂) doped with Co, Ni, and As: Variations in semiconducting properties[J]. *Journal of Crystal Growth*, 286(2): 306–317.
- Liu Xun, You Guoqing. 2015. Tectonic regional subdivision of China in the light of plate theory[J]. *Geology in China*, 42(1): 1 – 17(in Chinese with English abstract).
- Liu Yuheng, Li Baolong, Cao Xu, Luo Maocheng, Zhou Wenlin. 2015. Ore-forming fluid characteristics of the Jinchang gold deposit in Hainan island of China and its constraint on ore genesis[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(4): 755–765 (in Chinese with English abstract).
- Lv Zhaoheng. 2012. Geological characteristics and genesis in the Xindigou gold deposit in Chahaeryouqi, Inner Mongolia[J]. *West Resources*, 2012(5) :144–149
- Morishita Yuichi, Shimada, Nobutaka Shimada, Kazuhiko. 2018. 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*, 95: 79– 93.
- Murowchick J B, Barnes H L. 1987. Effects of temperature and degree of supersaturation on pyrite morphology[J]. *American Mineralogist*, 72: 1241–1250

- Patrick A H, Ronald G. 1962. Thermoelectricity and resistivity of pyrite from renison bell and MT, Bischoff, Tasmania[J]. *Economic Geology*, 57: 579–589
- Quan Zhigao. 1995. A study on thermoelectricity of gold-bearing pyrite in Pangjiahe and Zuojiashuang deposits[J]. *Mineral Resources and Geology*, 9(6): 509–513(in Chinese with English abstract).
- Rao Dongping, Cao Xinzhi, Xu Bojun, Zhao Ming. 2010. Typomorphic characteristics of pyrite and its prospecting significance in Jinwozi deposit, Xinjiang[J]. *Gold*, 31 (10): 10–16 (in Chinese with English abstract).
- Shao Jielian. 1988. *Prospecting Mineralogy of Gold Ore*[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press: 2–7
- Shao Wei, Chen Guangyuan, Sun Daisheng. 1990. Method of investigating thermoelectricity of pyrite and its application of pyrites from gold deposits in Jiaodong region[J]. *Geoscience*, 4(1): 46–57(in Chinese with English abstract).
- Shen Junfeng, Li shengrong, Du Bosong, Wang Dongli, Liu Haiming, Peng Zidong, Bo Haijun, Li Ke, Liu Shengqiang. 2018. Minerals alteration and typomorph in gold deposit and their implications for prospecting[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 37(2): (in Chinese with English abstract).
- Shuey R T. 1975. *Semiconducting ore mineral*[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 with English abstract).
- Sunagawa, I. 1978. Vapour growth and epitaxy of minerals and synthetic crystals[J]. *Journal of Crystal Growth*, 45: 3–12.
- Suo Jianjun, Wang Lijin. 1993. Discussion on the typomorphic characteristics of the minerals of the Hatu gold deposit and the denudation depth of the deposit[J]. *Xinjiang Nonferrous Metals*, (3):8-11.
- Wang Shouguang, Wang Cunxian, Zheng Baojun, Shen Cunli, Xu Zhongpei. 2004. The geochemical characteristics of Xindigou gold deposit, Inner Mongolia[J]. *Geological Survey and Research*, 27 (2): 112–117 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xinliang, Hu Fengxiang, Su Maorong, Hao Junfeng. 2002. Geological features, metallogenetic condition and regularity of Xindigou gold deposit, Inner Mongolia[J]. *Inner Mongolia Geology*, (4):1–7 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yafen. 1981. The Co/Ni ratio of pyrite in the marine volcanic rock type copper deposit and its geological significance[J]. *Geology and Exploration*, (8):52–58(in Chinese).
- Wu Fei, Zhang Shuanhong, ZhaoY ue, Ye Hao, 2014. Emplacement depths of the Early Permian plutons in Guyang area of northern North China Block and their tectonic implications [J]. *Geology in China*, 41(3): 824–837(in Chinese with English abstract).
- Xian Yongjun. Study on the defects of pyrite crystal and its surface adsorption characteristics[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2013.
- Xie Yuling, Xu Jiuhua, Qian Dayi, He Zhili. 1999. Pyroelectricity of pyrite and application to prospecting in Taibai gold deposit [J]. *Journal of University of Science and Technology (Beijing)*, (1): 1–5 (in Chinese with English abstract).
- Xu Jiehui, Ge Wensheng, Xing Dechao, Chen Xiaodong, Song Wenjie, Yu Wenlin, Zhang Wei, Wu Shengjun. 2015. Thermoelectric characteristics and trace element characteristics of pyrite from Kangguer gold deposit in eastern Tianshan of Xinjiang and its geological significance[J]. *Geoscience*, 29(3): 542–552 (in Chinese with English abstract).
- Yan Yutong, Li Shengrong, Jia Baojian, Zhang Na, Yan Lina. 2012. Composition typomorphic characteristics and statistic analysis of pyrite in gold deposits of different genetic types [J]. *Earth Science Frontiers*, 19(4): 214–226(in Chinese with English abstract).
- Yang Zhusen, Li Hongyang, Gao Zhenmin, Wang Zhijing. 2000. A study on thermoelectricity of pyrite from super high-grade gold deposits, Northern Jiaodong [J]. *Mineral Deposits*, 19 (4) : 307–314 (in Chinese with English abstract).
- Yao Meijuan, Shen Junfeng, Li Shengrong, Cao Ye, Liu Xiuyan. 2008. Thermoelectric and thermal decrepitation characteristics of pyrite in the Qianhe gold deposit, Songxian County, Henan, China, and their relationships with gold mineralization[J]. *Geological Bulletin of China*, 27(5): 649–656 (in Chinese with English abstract).
- Yu Mingjie, Wang Jingbin, Mao Qigui, Fang Tonghui, Zhang Rui, Cheng Fenwei. 2016. Pyroelectricity characteristics of pyrite from the No.M1 orebody in Meiling copper-gold deposit and its geological significance in the Kalatage area, eastern Tianshan[J]. *Mineral Exploration*, 7(1):149 – 156(in Chinese with English abstract).
- Yu Wenlin, Ge Wensheng, Liao Hua, Hu Weixing, Lu Shudong, Liu Xu, Li Lei, Wang Quanle. 2018. Thermoelectricity and trace element characteristics of Pyrites from Tiyier gold deposit in west Junggar, Xinjiang and their geological significance[J]. *Geoscience*, 32(1): 66–76(in Chinese with English abstract).
- Zhao Haixiang, Frimmel Hartwig E, Jiang Shaoyong, Dai Baozhang. 2011. LA- ICP- MS trace element analysis of pyrite from the Xiaoqingling gold district, China: Implications for ore genesis[J]. *Ore Geology Reviews*, 43(1): 142–153.
- Zhai Degao, Liu Jiajun, Han Siyu, Wang Jianping, Zhang Hongyu, Liu Zhenjiang, Yang Longbo, Lv Jun. 2013. Typomorphic characteristics of pyrite and processes of changes and preservation of Sangdaowanzi telluride-gold deposit in Heilongjiang Province[J]. *Acta Geological Sinica*, 87(1): 81–90 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Yusheng, Miao Laicheng, Xiang Yunchuan, Deng Jun, Wang Jianping. 2002. Preliminary discussion on gold ore-forming system in greenstone belt-type of north China craton[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 27(5): 522–531 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Baolin, Cai Xiping, Wang Jie, Xu Xingwang, Qin Dajun and

- Gao Haozhong. 1999. A preliminary study of the denudation extent of Mesozoic Vein gold deposits of continental volcanic rocks in the northern part of the greater and lesser Hinggan mountains, northeast China [J]. Geological Review, 45(S1): 414 - 421 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Fangfang, Wang Jianping, Liu Chonghao, Cao Ruirong, Cheng Jianjun, Yang Yongrong, Qi Feng, Wang Luo. 2013. The crystal forms and thermoelectricity of pyrite from the Shuangwang gold deposit, Shaanxi Province and their applications to metallogenic prognosis[J]. Geology in China, 40(5): 1634 - 1643 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Ruizhong, Wang Zhongliang, Wang Sirui, Liu Yu, Qin Wenkai. 2016. Metallogenic mechanism of Dayingezhuang gold deposit, northwestern Jiaodong Peninsula: Geochemistry constrains from the gold bearing pyrite typomorph and sulfur isotope[J]. Acta Petrologica Sinica, 32(8): 2451 - 2464 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yu, Yuan Wanming, Wang Qingfei, Liu Xiangwei, Ma Nan, Zhao Kai. 2010. Thermoelectric and thermal decrepitation characteristics of pyrites from Jiapigou gold ore belt, Jinlin Province[J]. Geoscience, 24(5): 870 - 879 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yunqiang, Chen Haiyan, Li Xian, Wei Wentong, Zhang Zhenli, Xu Hongcai, Liu Zengxiao, Peng Qianpeng. 2014. Geochemistry of the Mesoproterozoic diabase sills from Yanshan Mountain area in the northern part of North China Plate [J]. Geology in China, 41(2): 351 - 360 (in Chinese with English abstract).
- Zhong Fuping, Zhong Jianhua, Ahmatjan Abdurahman, Wang Yi, You Weifeng, Yang Liwei. 2015. Timing and scale of the destruction of the north China craton: Revelation from the early Cretaceous volcanic rocks in Suhongtu depression of Inggan-Ejin Banner basin[J]. Geology in China, 42(2): 435 - 456 (in Chinese with English abstract).
- 毕献武, 胡瑞忠, 彭建堂, 吴开兴. 2004. 黄铁矿微量元素地球化学特征及其对成矿流体性质的指示[J]. 矿物岩石地球化学通报, 23(1): 1-4.
- 蔡元吉, 周茂. 1993. 金矿床黄铁矿晶形特征实验研究[J]. 中国科学(B辑), 23(9): 972-978.
- 曹煦, 李权衡, 叶荣, 王勇. 2015. 新疆210金矿床黄铁矿标型特征及地质意义[J]. 新疆地质, 01: 56-60.
- 陈光远, 孙岱生, 殷辉安. 1987. 成因矿物学找矿矿物学[M]. 重庆: 重庆出版社: 697-702.
- 陈光远, 邵伟, 孙岱生. 1989. 胶东金矿成因矿物学与找矿[M]. 重庆: 重庆出版社, 94-134.
- 陈海燕, 李胜荣, 张秀宝, 周起凤, 张运强, 刘振豪, 张海芳, 王宁. 2011. 胶东金青顶金矿床黄铁矿热电性标型特征及其地质意义[J]. 矿床地质, (6): 1125-1137.
- 高浩中, 蔡新平, 张宝林, 王杰, 秦大军, 梁光河, 徐兴旺. 1999. 黄铁矿的诸多特征与金矿化[J]. 黄金科学技术, (3): 11-15.
- 侯满堂. 1995. 陕西镇安太白庙金矿床黄铁矿标型特征及其地质意义[J]. 西北地质, (1): 26-35
- 侯满堂. 2000. 陕西镇安太白庙金矿床黄铁矿热电性特征研究及其应用[J]. 黄金, 21(7): 5-9.
- 胡凤翔, 黄占起, 李四娃, 王新亮, 张志祥. 2002. 内蒙古中部地区绿岩及绿岩型金矿成矿地质特征[J]. 前寒武纪研究进展, 25(4): 190 - 198.
- 戢兴忠, 杨立强, 王中亮. 2013. 胶东新城金矿床黄铁矿热电性特征[J]. 现代地质, (1): 37-45.
- 雷万彬, 张严飞, 刘亚剑, 刘锦明. 2017. 豫西陆院沟蚀变型金矿床黄铁矿标型研究[J]. 地学前缘, 24(2): 176-185.
- 李成禄, 李胜荣, 徐文喜, 袁茂文, 李士胜, 曲晖, 王卓. 2018. 黑龙江省嫩江县永新碛金矿床黄铁矿标型特征及稳定同位素研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 37(1): 75-86.
- 李成禄, 李胜荣, 罗军燕, 宋继叶, 张聚全. 2009. 山西繁峙义兴寨金矿黄铁矿热电系数与导型特征及其地质意义[J]. 现代地质, (6): 1056-1063.
- 李红兵, 曾凡治. 2005. 金矿中的黄铁矿标型特征[J]. 地质找矿论丛, 03: 199-203.
- 李杰, 申俊峰, 李金春, 刘圣强, 王东丽, 张弘. 2016. 甘肃岗盆金矿床同位素地球化学特征及成矿物质来源探讨[J]. 矿物岩石地球化学通报, 35(2): 379-384.
- 李俊建, 周学武, 沈保丰, 胡凤翔, 桑海清, 刘晓阳, 王建民, 李铁军. 2005. 内蒙古中部大青山新地沟绿岩带型金矿的成矿时代[J]. 地质与勘探, (5): 1-4.
- 李楠, 杨立强, 张闯, 张静, 雷时斌, 王恒涛, 王宏伟, 高雪. 2012. 西秦岭阳山金矿带硫同位素特征: 成矿环境与物质来源约束[J]. 岩石学报, 28(5): 1577-1587.
- 李青, 李胜荣, 张秀宝, 张林杰, 赵毅, 赵夫旺, 刘洋. 2013. 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, 87(4): 542-553.
- 李胜荣, 陈光远, 邵伟, 孙岱生. 1994. 胶东乳山金矿黄铁矿形态研究[J]. 地质找矿论丛, 9(1): 79-86.
- 李胜荣, 陈光远, 邵伟, 孙岱生. 1996. 胶东乳山金矿田成因矿物学. 北京: 地质出版社, 89-93.
- 李胜荣, 邓军, 侯增谦, 肖润, 袁万明, 冯效良, 赵志丹, 申俊峰, 周肃. 2001. 西藏冈底斯带区域性断裂与金矿床剥蚀程度: Ag/Au 比值的启示[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 31(S1): 104-108.
- 李逸凡, 李洪奎, 汤启云, 糕传源, 耿科, 梁太涛. 2015. 山东旧店金矿黄铁矿标型特征及其地质意义[J]. 黄金科学技术, 02: 45-50.
- 刘冲昊, 刘家军, 王建平, 吴杰, 王维钰, 王立新, 于康伟, 陈冬, 李志国. 2013. 陕西省铍厂沟金矿床主矿带黄铁矿热电性特征及其地质意义[J]. 地学前缘, 20(4): 1-26.
- 刘华南, 刘家军, 代鸿章, 陶银龙, 王雷, 王建锋. 2016. 内蒙古新地沟金矿床中金的赋存状态研究[J]. 中国地质, 43(1): 261-274.
- 刘华南. 2016. 内蒙古新地沟金矿床地球化学与矿床成因研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 刘坤, 刘家军, 吴杰, 刘冲昊, 杨尚松, 辛晓军, 李渊. 2014. 甘肃马坞金矿床8号矿体黄铁矿热电性特征及其地质意义[J]. 现代地质,

- 28(4): 711-720.
- 刘平, 邱朝霞. 1991. 某些金矿床中黄铁矿热电系数值的分布特点及其意义[J]. 矿物学报, 11(1): 60-69.
- 刘训, 游国庆. 2015. 中国的板块构造区划[J]. 中国地质, 1: 1-17.
- 刘昱恒, 李宝龙, 曹煦, 罗茂澄, 周文林. 2015. 海南金昌金矿成矿流体特征及其对矿床成因的制约[J]. 地质学报, (4): 755-765.
- 吕召恒. 2012. 内蒙古察哈尔右翼中旗新地沟金矿床地质特征及矿床成因探讨[J]. 西部资源, (5): 144-149
- 权志高. 1995. 庞家河、左家庄金矿床载金矿物黄铁矿热电性的研究[J]. 矿产与地质, 9(6): 509-513.
- 饶东平, 曹新志, 徐伯骏, 赵明. 2010. 新疆金窝子矿床黄铁矿标型特征及其找矿意义[J]. 黄金, (10): 10-16.
- 邵洁涟. 1988. 金矿找矿矿物学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2-7.
- 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.
- 申俊峰, 李胜荣, 杜柏松, 王冬丽, 刘海明, 彭自栋, 薄海军, 李可, 刘圣强. 2018. 金矿床的矿物蚀变与矿物标型及其找矿意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 37(2).
- 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.
- 王守光, 王存贤, 郑宝军, 沈存利, 徐宗培. 2004. 内蒙古新地沟绿岩型金矿床地球化学特征[J]. 地质调查与研究, 27(2): 112-117.
- 王新亮, 胡凤祥, 苏茂荣, 郝俊峰. 2002. 内蒙古大青山新地沟金矿地质特征、成矿条件及成矿规律[J]. 内蒙古地质, (4): 1-7.
- 王亚芬. 1981. 海相火山岩型铜矿床中黄铁矿 Co/Ni 比值特征及地质意义[J]. 地质与勘探, (8): 52-58.
- 吴飞, 张拴宏, 赵越, 叶浩. 2014. 华北地块北缘内蒙古固阳地区早二叠世岩体的侵位深度及其构造意义[J]. 中国地质, 41(3): 824-837.
- 先永骏. 2013. 黄铁矿晶体缺陷及其表面吸附特性的研究[D]. 昆明: 昆明理工大学.
- 谢玉玲, 徐九华, 钱大益, 何知礼. 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, 01: 1-5.
- 许杰辉, 葛文胜, 邢德超, 陈晓东, 宋文杰, 余文林, 张伟, 吴生军. 2015. 新疆东天山康古尔金矿黄铁矿热电性与微量元素特征及其地质意义[J]. 现代地质, 29(3): 542-552.
- 严育通, 李胜荣, 贾宝剑, 张娜, 闫丽娜. 2012. 中国不同成因类型金矿床的黄铁矿成分标型特征及统计分析[J]. 地学前缘, 19(4): 214-226.
- 杨竹森, 李红阳, 高振敏, 王志敬. 2000. 胶东北部超高位金矿黄铁矿热电性研究[J]. 矿床地质, 19(4): 307-314.
- 要梅娟, 申俊峰, 李胜荣, 曹焯, 刘秀艳. 2008. 河南嵩县前河金矿黄铁矿的热电性热爆特征及其与金矿化的关系[J]. 地质通报, 27(5): 649-656.
- 于明杰, 王京彬, 毛启贵, 方同辉, 张锐, 程奋维. 2016. 东天山卡拉塔格地区梅岭铜(金)矿床M1号矿体黄铁矿热电性特征及其地质意义[J]. 矿产勘查, 7(1): 149-156.
- 余文林, 葛文胜, 廖华, 胡卫星, 卢树东, 刘旭, 李磊, 王全乐. 2018. 新疆西准噶尔提依尔金矿黄铁矿热电性与微量元素特征及其地质意义[J]. 现代地质, 32(1): 66-76.
- 翟德高, 刘家军, 韩思宇, 王建平, 张红雨, 柳振江, 杨隆勃, 张华锋, 吕军. 2013. 黑龙江三道湾子碲金矿床黄铁矿标型特征及矿床变化保存过程分析[J]. 地质学报, 87(1): 81-90.
- 翟裕生, 苗来成, 向运川, 邓军, 王建平. 2002. 华北克拉通绿岩带型金成矿系统初析[J]. 地球科学, 27(5): 522-531.
- 张宝林, 蔡新平, 王杰, 徐兴旺, 秦大军, 高浩中. 1999. 大、小兴安岭北部中生代火山岩区岩金矿床剥蚀程度的初步研究[J]. 地质论评, (S1): 414-421.
- 张方方, 王建平, 刘冲昊, 曹瑞荣, 程建军, 杨永荣, 齐峰, 王罗. 2013. 陕西双王金矿黄铁矿晶体形态和热电性特征对深部含矿性的预测[J]. 中国地质, 40(5): 1634-1643.
- 张瑞忠, 王中亮, 王偲瑞, 刘育, 秦文凯. 2016. 胶西北大尹格金矿床成矿机理: 载金黄铁矿标型及硫同位素地球化学约束[J]. 岩石学报, 32(8): 2451-2464.
- 张琦, 袁万明, 王庆飞, 刘向伟, 马楠, 赵凯. 2010. 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, 24(5): 870-879.
- 张运强, 陈海燕, 李先, 魏文通, 张振利, 许洪才, 刘增校, 彭芊芄. 2014. 华北陆块北部燕山地区中元古代辉绿岩地球化学特征及成因意义[J]. 中国地质, 41(2): 351-360.
- 钟福平, 钟建华, 艾合买提江·阿不都热合曼, 王毅, 由伟丰, 杨伟利. 2015. 华北克拉通破坏时间与破坏范围分布特征——来自银根—额济纳旗盆地苏红图坳陷早白垩世火山岩的启示[J]. 中国地质, 41(2): 435-456.
- 周学武, 邵洁涟, 边秋娟. 1994. 四川松潘东北寨金矿黄铁矿标型特征研究[J]. 地球科学, 19(1): 52-59.