

# 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

翟德高<sup>1)</sup>, 刘家军<sup>1)</sup>, 韩思宇<sup>1)</sup>, 王建平<sup>1)</sup>, 张红雨<sup>2)</sup>, 柳振江<sup>1)</sup>, 杨隆勃<sup>1)</sup>, 张华锋<sup>1)</sup>, 吕军<sup>3)</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) 中国地质大学科学研究院, 北京, 100083;

3) 黑龙江省地质调查研究总院齐齐哈尔分院, 黑龙江齐齐哈尔, 161005

**内容提要:**三道湾子金矿床是近年来在中国北方地区新发现的典型碲金矿床, 矿石矿物由大量碲化物及自然金和少量硫化物组成。本文主要研究产于矿床中黄铁矿的标型特征及其地质意义, 重点探讨了该矿床形成后的变化与保存过程。通过研究表明矿床产出的黄铁矿主要有两期: 第一期黄铁矿(Py<sub>1</sub>)呈粗粒立方体自形晶产出, 为碲金成矿前黄铁矿化蚀变阶段的产物; 第二期黄铁矿(Py<sub>2</sub>)主要呈细粒产出, 与碲金矿化关系较为密切。黄铁矿的微量元素特征显示第二期的黄铁矿中存在微细粒的碲银矿; 稀土元素研究表明黄铁矿及金矿化的形成与安山质岩浆活动关系较为紧密, 而与该区花岗岩岩浆活动关系不大。对三道湾子碲金矿床产出的黄铁矿进行热电分析表明, 黄铁矿热电系数主要变化于-180~-90  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 之间, 以N型导电型为主; 且由矿体顶部至底部, N型导电型出现的频率逐渐增大(57.5%→84.2%→92%→97.4%); 与蚀变安山岩中黄铁矿的热电系数比较, 产于脉状石英中的黄铁矿具有更低的热电系数值。通过黄铁矿热电系数分析以及流体包裹体的研究可以计算出该矿床的平均剥蚀速率为53.6 m/Ma。最后对该矿床形成后的变化与保存过程进行了分析, 提出对于该区内寻找中生代之前形成的矿床应注意砂矿的重要指示意义。

**关键词:**黄铁矿; 标型特征; 变化与保存; 碲金矿床; 三道湾子; 黑龙江

在世界已发现的金矿床类型中, 含碲-金-银系列矿物组合的金矿床是一种重要的金矿床类型。这类矿床最重要的特征之一就是金属矿物由大量碲化物和自然元素矿物(如自然金、自然银或自然碲等)组成, 而硫化物的含量一般都比较稀少。国内外学者对碲化物型金矿床(或碲金矿床)的成矿机理和形成模式展开了深入的研究, 尤其应用地球化学、热力学等方法构建了碲化物和硫化物及氧化物之间的共生和分异的热力学基础(Afifi et al., 1988; Zhang et al., 1994; Simon et al., 1996; Tombros et al., 2010; Voudouris, 2011)。在中国, 已发现的碲金矿床主要产于华北地台北缘(如河北东坪碲金矿床)和南缘(如上官金矿床)、秦岭造山带(如杨砦峪碲金矿床)及华南陆块(如银坑山金银碲矿床)等地质背景中。近年来, 在黑龙江新发现了三道湾子金矿床, 矿床金属矿物由大量的金银碲化物和少量硫化物组成, 已被确认

为碲金矿床(陈美勇等, 2008)。对该矿床的地质特征、成矿年代学、矿床地球化学及碲化物组成前人进行了研究(吕军等, 2005a, 2005b; 陈美勇等, 2008; Liu et al., 2011)。但对矿床产出的少量硫化物(以黄铁矿为主)尚未展开研究, 而这些硫化物的存在可为分析矿床成因及成矿过程提供微观信息, 并且结合流体包裹体的研究可以有效地认识矿床形成后的变化与保存条件。因此本文重点开展对矿床硫化物标型特征的研究, 分析这些硫化物的标型特征及形成环境可为深入了解矿床成因提供依据, 同时还可对矿床形成后的变化保存条件进行分析, 为该区找矿勘探提供一些思路。

## 1 地质概况

矿区大地构造位置属大兴安岭早古生代陆缘增生构造带, 多宝山奥陶纪岛弧型活动带东南缘(吕军

注: 本文为国家自然科学基金项目(编号 40973035)、高等学校科技创新引智计划(编号 B07011)及中国地质调查局地质矿产调查评价专项“覆盖区矿产综合预测”计划项目(编号 1212011085471)联合资助的成果。

收稿日期: 2011-10-31; 改回日期: 2012-03-26; 责任编辑: 周健。

作者简介: 翟德高, 男, 1985年生。博士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, 研究方向: 矿床地球化学。通讯地址: 100083, 中国地质大学(北京)地学院; Email: zhaidegao198537@yahoo.com.cn。

等,2005b)。区内出露的地层主要为中生界的塔木兰沟组( $K_1tm$ )和光华组( $K_1gn$ )及第四系( $Q$ )。塔木兰沟组岩石组合为安山岩和安山质角砾岩,这些岩石构成了矿床主要的赋矿围岩(图1)。安山岩的同位素年龄为125 Ma(锆石 LA-ICP-MS 方法, Liu et al., 2011),属于早白垩世。白垩系下统光华组主要分布于矿床东北部(图1),岩石类型由流纹岩组成,同位素年代学研究表明其形成于140.8 Ma(腾宪锋等,2005),属于早白垩世。第四系主要分布于沟谷及河谷中,其中疙瘩沟河谷中存在冲洪积型砂金矿分布<sup>①</sup>。

三道湾子矿区以北西向断裂为主,北东向次之,含金石英脉主要充填在北西向断裂带中。该带中见有多条含金石英脉和矿化蚀变带,大体平行排列,成群出现,走向 $290^{\circ}\sim 320^{\circ}$ ,倾向北东,倾角 $50^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 。

矿区出露的侵入岩主要为中粒二长花岗岩,岩体呈北东向不规则岩席状产出于矿区东南部(图1)。通过锆石 LA-ICP-MS 定年获得花岗岩的结晶年龄为 $182.2\pm 1.1$  Ma(未发表资料),属于早侏罗世侵入,表明花岗岩为成矿前岩体。区内发育的岩脉类型主要为辉绿玢岩脉( $\beta\mu$ )和流纹(石英)斑岩脉

( $\lambda\pi$ ),均侵入塔木兰沟组( $K_1tm$ )粗面安山岩中(图1)。辉绿玢岩的锆石 LA-ICP-MS 年龄为 $112.2\pm 1.0$  Ma(据王力等,2010,第十届全国矿床会议交流),而且空间上切穿矿体,确定这些脉岩属于成矿后岩脉。Liu 等(2011)根据矿体与安山岩及辉绿玢岩之间的穿插关系大致确定了该矿床的成矿时代介于125.3~116.6 Ma。

## 2 矿床特征

矿体主要赋存于塔木兰沟组安山岩及安山角砾岩中,由一系列北西走向的石英脉组成。这些石英脉在平面上呈S型展布,局部呈收缩形态,均受控于北西向的张性断裂(图1)。纵剖面显示矿体呈不连续的脉状产出,倾角约 $55^{\circ}\sim 75^{\circ}$ ,向下延伸有变窄、品位增高的趋势(图2)。该矿床主要包括I、II和III矿带,各矿带矿体水平长度分别为510 m、210 m和400 m不等,共含有15条大小不等的金矿体。其中I、II矿体为主要的矿体,该矿体水平长度为200米,厚度在3~10.9 m之间,平均厚度为6.01 m(腾宪锋等,2005)。近年来在该矿体的130 m中段发现了异常富集的金矿石,最高品位可达30000 g/t,是自然界极为罕见的高品位金矿石。矿体围岩蚀变主要有硅化、黄铁矿化、绢云母化、高岭土化、绿泥石化、绿帘石化和碳酸盐化等,其中硅化和黄铁矿化最为发育,硅化和金矿化的关系最密切。矿体除产于石英脉中外,部分硅化安山岩和安山角砾岩中也有矿化。

矿石构造有块状、浸染状、角砾状、孔洞状、梳状-晶簇状、脉状构造等。矿石结构主要包括自形、半自形、他形、交代、乳滴状、环带、包含结构等。矿石金属矿物组成主要为碲金银矿、针碲金银矿、碲金矿、六方碲金矿、碲银矿和碲铅矿等碲化物,还含有大量自然金和少量硫化物矿物和氧化物。其中硫化物包括黄铁矿、黄铜矿、方铅矿和闪锌矿等,氧化物主要为磁铁矿、赤铁矿和金红石等。

依据野外脉体间的穿插关系及显微镜下矿物的交代次序,可将成矿过程划分为石英-黄铁矿阶段(I阶段);石英-碲金银矿-针碲金银矿-碲金矿-六方碲金矿-碲银矿-自然金-黄铜矿-方铅矿-闪锌矿-黄铁矿阶段(II阶段);石英-自然金-碲铅矿-闪锌矿阶段(III阶段)和石英-赤铁矿-碳酸盐阶段(IV阶段)。矿床中大量自然金主要产于第III阶段。

## 3 分析方法

将野外采集的样品观察描述,选择代表性样品

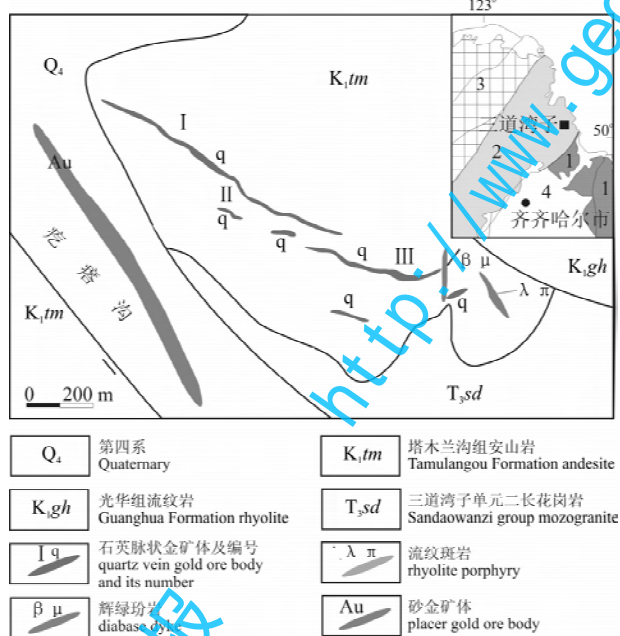


图1 三道湾子碲金矿床地质图(据吕军等,2005b 修改)  
Fig. 1 Geological map of the Sandaowanzi telluride-gold deposit (modified from Lü et al., 2005b)

1—松嫩-张广才岭微板块; 2—大兴安岭微板块;

3—额尔古纳微板块; 4—松辽盆地

1—Songneng-Zhangguangcailing microplate; 2—Daxing'anling

microplate; 3—Eerguna microplate; 4—Songliao basin

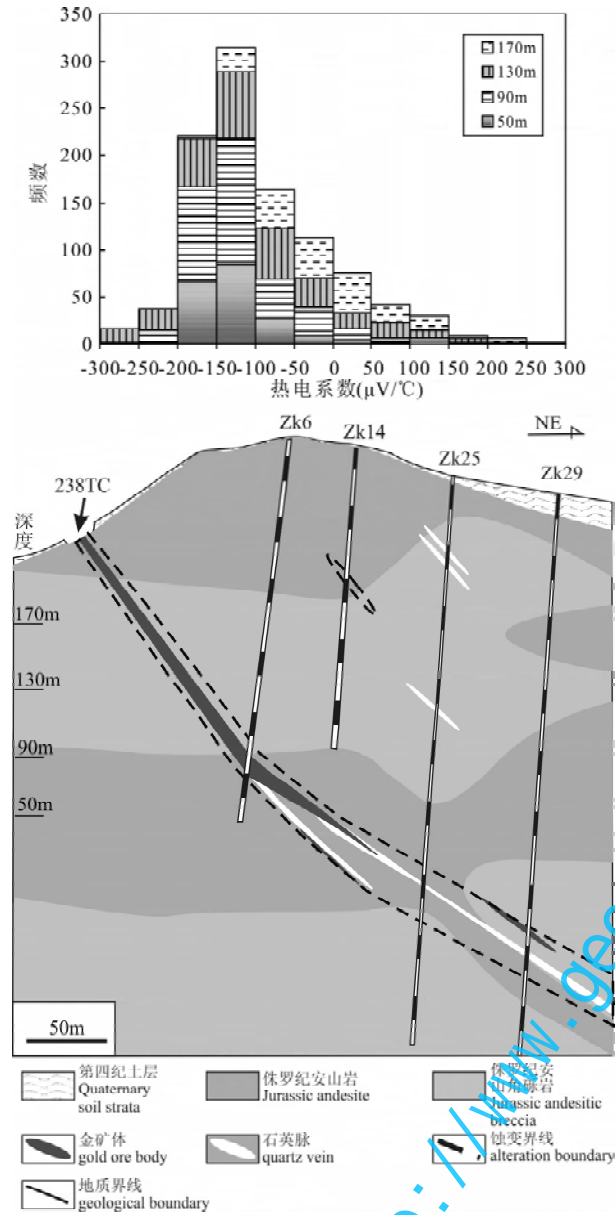


图 2 三道湾子金矿床不同中段黄铁矿热电系数直方图  
底图据黑龙江省地质调查研究院齐齐哈尔分院<sup>①</sup>修改)

Fig. 2 Histogram of pyroelectric coefficient of pyrite in different depths of the Sandaowanzi telluride-gold deposit (modified from Qiqihar Branch of Heilongjiang Institute of Geological Survey<sup>①</sup>)

进行磨片和单矿物分选。本次研究的样品分别采集于矿床的 170 m、130 m、90 m 及 50 m 等 4 个不同的中段,用于挑选黄铁矿单矿物的岩石样品为蚀变安山岩及脉状石英。采用双目镜观察黄铁矿颗粒的晶形并分选出较为纯净的单矿物。利用光学显微镜观察黄铁矿的产出形式及和其他矿物之间的关系。

黄铁矿的电子探针分析在核工业北京地质研究院电子探针室完成,使用型号为 JXA-8100 的电子

探针分析完成。测试条件为:加速电压 20 kV,束斑电流 10 nA,束斑直径 2~5 μm,峰值计算时间 20~60 s。采用 ZAF 法修正数据,分析准确度小于 1%。

黄铁矿微量及稀土元素组成分析在中国地质大学(北京)地学实验中心与核工业北京地质研究院完成,均采用等离子质谱法(ICP-MS)分析。黄铁矿热电系数分析由笔者在中国地质大学(北京)成因矿物学实验室完成。选取矿床 4 个中段 12 个样品中的 1030 粒纯净黄铁矿单晶,在 BHTe-6 型热电仪上进行测试。根据前人大量的实验对比,选取活化温度  $\Delta T = 67 \pm 3^\circ\text{C}$  (曹焯等,2008)。

## 4 黄铁矿标型特征

### 4.1 黄铁矿产出特征

三道湾子金矿中黄铁矿的产出主要有两个阶段:石英-黄铁矿阶段(1 阶段),该阶段黄铁矿颗粒较大,自形程度较高,均为立方体晶形产于安山岩和安山角砾岩之中(图 3a、b),属于碲-金成矿前黄铁矿化阶段的产物。石英-硫化物-碲化物-少量自然金阶段(2 阶段)存在少量的自形一半自形黄铁矿,这些黄铁矿均在石英脉矿体裂隙中充填,与碲化物和硫化物共生或形成稍晚于碲化物。黄铁矿晶形除立方体外,还含少量五角十二面体。显微镜下观察表明 1 阶段黄铁矿大小约 0.1~0.3 mm 左右,表面具麻点,部分黄铁矿表面具溶蚀的孔洞,有的呈碎裂结构(图 3c)。2 阶段黄铁矿大小约 0.05~0.25 mm 左右,表面具麻点和裂纹,多具溶蚀孔洞,黄铁矿多被石英溶蚀呈港湾状(图 3d)。矿石样品中可见 2 阶段的黄铁矿与其他硫化物、碲化物及少量自然金共生。

### 4.2 黄铁矿成分特征

对三道湾子碲金矿床不同阶段的黄铁矿进行电子探针分析(表 1),不同阶段产出的黄铁矿物质组成中都含有一定量的钼(1.28%~1.67%),还含有少量的 Pb、Zn、Cu、Bi、Co 等呈类质同象替代 Fe,少量的 Se 以类质同象替代 S,还存在少量的 Cd、Sb 混入物。黄铁矿组成中硫含量的变化范围为 52.5%~53.3%,铁含量的变化范围为 42.9%~46.8%。电子探针数据还显示黄铁矿中含少量的 Au 和 Ag,表明在黄铁矿矿物中存在少量微细粒的银金矿或金银碲化物。

对三道湾子碲金矿中不同阶段黄铁矿的微量元素进行分析(表 2),2 阶段黄铁矿中 Te 和 Ag 的含量异常高,分别可高达  $85145.55 \times 10^{-6}$  和  $23810.3 \times 10^{-6}$ ,说明在该阶段黄铁矿中存在微细粒的碲银矿。

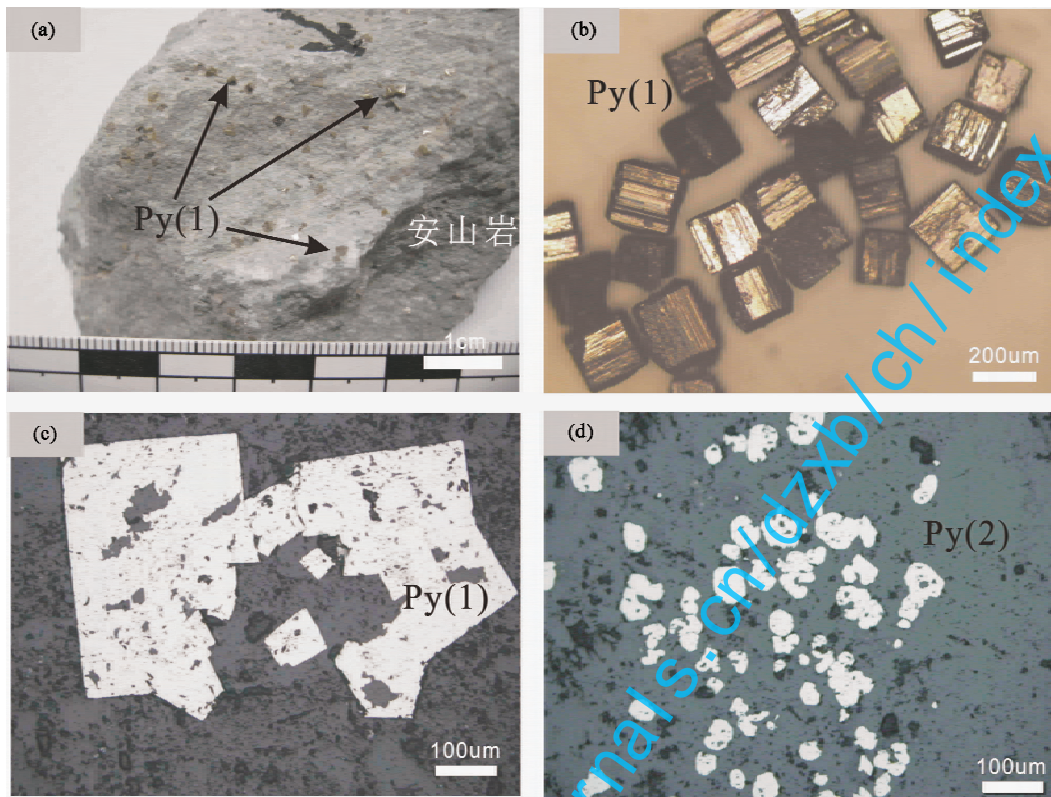


图3 三道湾子碲金矿床黄铁矿的产出特征

Fig. 3 Occurrence of pyrite in the Sandaowanzi telluride-gold deposit

(a)—安山岩中的立方体黄铁矿;(b)—双目镜下黄铁矿立方体单晶;(c)—反光镜下黄铁矿的碎裂结构;(d)—反光镜下黄铁矿的溶蚀结构;  
其中Py(1)和Py(2)分别代表1和2阶段的黄铁矿  
(a)—Cubic pyrite in andesite; (b)—single cubic pyrite under binoscope; (c)—pyrite cataclastic texture under reflecting microscope;  
(d)—pyrite corrosion texture under reflecting microscope; Py(1) and Py(2) represent pyrites in 1 and 2 stage

表1 三道湾子碲金矿黄铁矿电子探针数据(%)

Table 1 EPMA data (%) of pyrite in the Sandaowanzi telluride-gold deposit

序号	样品编号	采样位置	Se	Ag	S	Fe	Au	Cd	Cu	Sb	Pb	Bi	Zn	Mo	Ni	Co	Total
1	sdwz-38-1 <sup>I</sup>	90 m 中段 CM37	0.024		53.205	42.933		0.071		0.019	0.036	0.130	0.038	1.481	0.003	0.111	98.051
2	sdwz-38-2 <sup>I</sup>	90 m 中段 CM37	0.019		53.316	46.775		0.031	0.099	0.009	0.029	0.037	0.002	1.502	0.005	0.035	101.840
3	sdwz-50-1 <sup>I</sup>	130 m 中段 CM23			52.494	45.474	0.039	0.020	0.069		0.106	0.159	0.023	1.572		0.013	99.969
4	sdwz-50-2 <sup>I</sup>	130 m 中段 CM23	0.001	0.019	52.869	45.104			0.062	0.041		0.164		1.668		0.093	100.021
5	sdwz-51 <sup>II</sup>	130 m 中段 CM31			52.666	45.388		0.068			0.213	0.218	0.021	1.370		0.054	99.998
6	sdwz-52 <sup>II</sup>	130 中段 CM33		0.022	52.899	43.485			0.120			0.230	0.052	1.259		0.113	98.180

注:I表示1阶段黄铁矿,II表示2阶段黄铁矿;计算分子式分别为:1—Fe<sub>0.93</sub>Mo<sub>0.02</sub>S<sub>2.00</sub>;2—Fe<sub>1.01</sub>Mo<sub>0.02</sub>S<sub>2.00</sub>;3—Fe<sub>0.99</sub>Mo<sub>0.02</sub>S<sub>2.00</sub>;4—Fe<sub>0.98</sub>Mo<sub>0.02</sub>S<sub>2.00</sub>;5—Fe<sub>0.99</sub>Mo<sub>0.02</sub>S<sub>2.00</sub>;6—Fe<sub>0.94</sub>Mo<sub>0.02</sub>S<sub>2.00</sub>。

表2 三道湾子碲金矿床黄铁矿微量元素组成(×10<sup>-6</sup>)

Table 2 Trace element compositions (×10<sup>-6</sup>) of pyrite in the Sandaowanzi telluride-gold deposit

样品编号	Ti	V	Cr	Co	Ni	As	Se	Rb	Sr	Mo	Ag	Cd	Te	Au	Pb	Bi
09Sdwz-19 <sup>I</sup>	529.600	8.606	3.268	94.080	40.380	4.072	4.306	6.268	54.340	12.622	3.900	0.584	14.360	0.417	230.200	1.000
09Sdwz-38 <sup>I</sup>	1340.800	10.742	4.324	98.820	32.940	7.782	5.484	2.040	52.320	7.270	3.266	0.524	47.720	0.504	85.440	1.136
09Sdwz-39 <sup>I</sup>	1716.400	11.980	10.738	117.640	129.980	17.958	2.776	1.658	45.560	3.326	2.422	0.414	26.040	1.094	94.320	5.964
09Sdwz-35 <sup>II</sup>	143.129	2.722	13.790	23.568	22.043	7.030	7.376	0.843	3.198	122.998	21424.375	3.239	85145.550	5.084	815.143	2.192
09Sdwz-51 <sup>II</sup>	129.922	2.901	9.994	29.201	17.102	4.057	42.540	0.857	4.537	5.832	23810.303	3.356	31946.738	2.619	1066.555	1.022
09Sdwz-58 <sup>II</sup>	3409.241	27.788	11.286	116.843	30.747	10.071	4.973	5.314	25.217	14.447	31.316	0.680	69.391	6.213	157.694	0.906

注:I表示1阶段黄铁矿,II表示2阶段黄铁矿。

而 1 阶段黄铁矿中 Te 和 Ag 的含量不高,暗示 2 阶段黄铁矿与 Te-Ag 的成矿关系较为密切。不同阶段黄铁矿中 Ti 和 Pb 的含量也较高(最高可达  $3409.24 \times 10^{-6}$ 、 $1066.56 \times 10^{-6}$ ),暗示黄铁矿中存在微细粒的金红石和方铅矿或碓铅矿。在不同阶段的黄铁矿中 Au 的含量为  $0.417 \times 10^{-6} \sim 6.213 \times 10^{-6}$ ,指示含金碓化物在黄铁矿中的分布较少,但 2 阶段黄铁矿中 Au 的含量普遍高于 1 阶段黄铁矿,这也进一步表明 2 阶段黄铁矿与 Te-Au-Ag 成矿较为密切。

黄铁矿的稀土元素组成表明(表 3,图 4)。稀土元素配分总体呈现出 LREE 富集的右倾趋势,具有弱的负 Eu 异常,不同阶段黄铁矿的稀土元素组成差别不大。通过对比矿石、黄铁矿、安山岩及花岗岩的 REE 组成可知(图 4):不同阶段黄铁矿的稀土元素组成与围岩安山岩及矿石的组成较为相近,而同该区产出的花岗岩稀土元素组成差别较大,这暗示黄铁矿及金矿化的形成与安山质岩浆活动的关系紧密,而与该区花岗质岩浆活动关系不大。

表 3 三道湾子碓金矿床黄铁矿稀土元素组成( $\times 10^{-6}$ )

Table 3 REE compositions ( $\times 10^{-6}$ ) of pyrite in the Sandaowanzi telluride-gold deposit

样品编号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
09Sdwz-19 <sup>I</sup>	10.97	22.60	2.80	11.66	2.15	0.457	1.802	0.230	1.302	0.242	0.710	0.100	0.685	0.104
09sdwz-26 <sup>I</sup>	12.40	21.90	2.46	8.93	1.36	0.323	0.903	0.114	0.655	0.094	0.266	0.033	0.237	0.034
09Sdwz-38 <sup>I</sup>	0.77	1.38	0.20	1.81	1.13	0.028	0.097	0.012	0.075	0.015	0.049	0.006	0.049	0.005
09Sdwz-38(2) <sup>I</sup>	6.29	13.60	1.72	7.27	1.42	0.289	0.994	0.155	0.698	0.134	0.367	0.049	0.286	0.046
09Sdwz-39 <sup>I</sup>	5.74	12.13	1.52	6.36	1.30	0.282	1.177	0.164	0.962	0.189	0.552	0.080	0.558	0.083
09sdwz-39(2) <sup>I</sup>	7.35	14.90	1.81	7.23	1.32	0.334	0.904	0.141	0.633	0.106	0.312	0.042	0.283	0.037
09sdwz-50 <sup>I</sup>	13.90	26.10	3.00	11.70	2.04	0.539	1.470	0.226	1.110	0.193	0.528	0.079	0.433	0.054
09sdwz-55 <sup>I</sup>	6.12	13.00	1.63	6.40	1.07	0.314	0.918	0.129	0.611	0.099	0.303	0.041	0.236	0.033
09sdwz-32 <sup>II</sup>	4.94	9.86	1.14	4.22	0.72	0.117	0.546	0.083	0.421	0.073	0.214	0.031	0.196	0.030
09Sdwz-58 <sup>II</sup>	0.10	0.21	0.04	0.54	1.13	0.001	0.017	0.000	0.012	0.000	0.003	0.001	0.003	0.001

注: I 表示 1 阶段黄铁矿, II 表示 2 阶段黄铁矿。

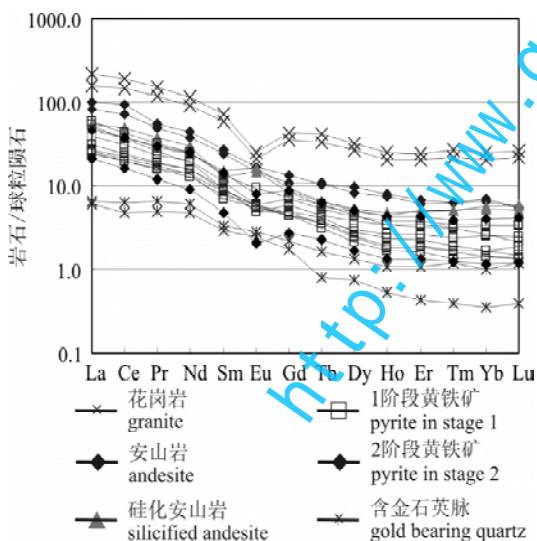


图 4 三道湾子碓金矿床岩石及黄铁矿稀土元素配分图解(球粒陨石标准化数据据 Sun et al., 1989)

Fig. 4 REE patterns of rocks and pyrite in the Sandaowanzi telluride-gold deposit (chondrite-normalized data after Sun et al., 1989)

### 4.3 热电系数研究

(1)基本原理:黄铁矿属于半导体矿物,当其单晶在一定温差条件下就会产生热电效应,一般认为

热电效应与温差和黄铁矿的微量元素组成有关(蔡元吉等,1999;李成禄等,2009)。热电效应可用热电系数和导电类型来表示。根据测量获得黄铁矿的温差电动势( $\Delta E/\mu V$ ),令该值比上测量的温差即可获得黄铁矿的热电系数  $\alpha(\mu V/^\circ C)$ 。根据热电系数值的不同,可将黄铁矿的导电类型划分为 2 类:一类为空穴型(P 型)导电;一类为电子型(N 型)导电。

(2)不同深度黄铁矿热电系数分布:根据上述原理及划分依据,本文选取了三道湾子金矿床的 4 个中段的 12 件黄铁矿进行了热电系数的实验,结果见表 4 和图 2。对获取的数据进行统计,结果表明热电系数变化于  $-308.1 \sim 301.3 \mu V/^\circ C$  之间,主要变化于  $-180 \sim -90 \mu V/^\circ C$  之间,总体以 N 型导电型为主,N 型出现的频率为 84%。对矿床不同标高的黄铁矿热电系数数据进行统计,由矿体顶部到深部,N 型导电型出现的频率逐渐增大( $57.5\% \rightarrow 84.2\% \rightarrow 92.0\% \rightarrow 97.4\%$ ),同时 P 型导电型出现的频率逐渐减小( $42.5\% \rightarrow 15.8\% \rightarrow 8.0\% \rightarrow 2.6\%$ )的变化规律。分析各个中段的热电系数数据表明:170 m 中段 N 型和 P 型导电型出现的频率大致相当,从 130 m  $\rightarrow$  50 m 中段,黄铁矿的 N 型电子型占主导,说明随着黄铁矿产出深度的增加,N 型导电型所占

的比值越大。大量研究表明,从金矿体的顶部、中部至底部,黄铁矿导电类型的变化趋势为P型→P-N型或N-P型→N型(邵洁涟,1988;李成禄等,

2009)。目前三道湾子金矿黄铁矿导电类型变化主要呈现出P-N型和N型,说明开采金矿体的部位为中部或底部,也进一步说明矿体的剥蚀程度较高。

表4 三道湾子金矿床不同中段黄铁矿热电性组成

Table 4 Thermoelectric properties of pyrite in different depths from the Sandaowanzi telluride-gold deposit

样品编号	采样位置	黄铁矿产状	N型黄铁矿热电系数 $\alpha$ ( $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ )			P型黄铁矿热电系数 $\alpha$ ( $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ )			剥蚀率(%)
			变化范围	平均值	出现频率(%)	变化范围	平均值	出现频率(%)	
09sdwz-23	170 m 中段	蚀变安山岩	-139.5~-6.2	-67.8	46	1.6~234.9	67.1	54	50.11
09sdwz-26			-187.4~-7.8	-73.0	69	4.7~246.1	74.2	31	50.17
09sdwz-47	130 m 中段	石英脉	-308.1~-13.9	-143.5	100	—	—	0	50.31
09sdwz-50			-165.4~-7.7	-79.1	62	7.6~225.6	80.1	39	50.15
09sdwz-51			-294.9~-43	-191.3	98	—	69.5	2	50.37
09sdwz-55		蚀变安山岩	-238.5~-7.6	-134.7	94	24.9~52	39.3	6	50.25
09sdwz-32		90 m 中段	石英脉	-242.3~-5.9	-132.4	96	12.2~27.4	19.3	4
09sdwz-35	-207.2~-7.7			-97.8	60	16.9~301.3	109.5	40	50.15
09sdwz-36	-258.6~-7.9			-137.1	96	10.9~58.3	34.7	4	50.27
09sdwz-38	蚀变安山岩		-184.8~-10.8	-127.1	99	—	148.5	1	50.25
09sdwz-58	50 m 中段	石英脉	-194.5~-32.5	-125.3	96	13.8~53.3	37.8	4	50.24
09sdwz-59			-200~-17.2	-137.3	99	—	21.7	1	50.25

(3)不同岩石类型中黄铁矿的热电系数分布:三道湾子金矿床的黄铁矿主要产于蚀变的安山岩(或安山角砾岩)和脉状石英中。对这两种不同岩石类型中黄铁矿的热电系数值进行分类和统计(图5),结果表明:产于蚀变安山岩中黄铁矿的N型导电型出现的频率为77%( $n=400$ ),热电系数的平均值为 $-67.3 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ;产于脉状石英中黄铁矿的N型导电型出现的频率为88.6%( $n=630$ ),热电系数的平均值为 $-105.3 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 。统计数据表明,与蚀变安山岩中黄铁矿的热电系数比较,产于脉状石英中的黄铁矿具有更低的热电系数值,且N型导电型所占的比重更大。野外观测及显微镜下鉴定表明,三道湾子金矿床中大量的碲化物及自然金基本产于脉状石

英中,与石英脉中的黄铁矿关系较为密切,而与安山岩中的黄铁矿关系不大。根据获得不同产状黄铁矿热电系数值的统计结果,大体可以判断矿体及围岩的矿化程度,即矿化程度高的部位伴生有较低热电系数的黄铁矿。

## 5 讨论

### 5.1 黄铁矿的形成环境

不同温度下形成的黄铁矿其导电类型和热电系数是不同的,如高温条件下黄铁矿多为N型导电型,中温条件下多为N-P或P-N混合型,低温条件下则多为P型导电型。前人根据大量研究总结出了热电系数 $\alpha$ ( $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ )和形成温度 $T$ ( $^\circ\text{C}$ )之间的关

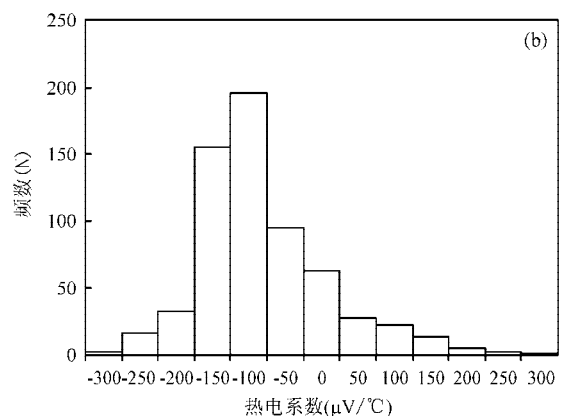
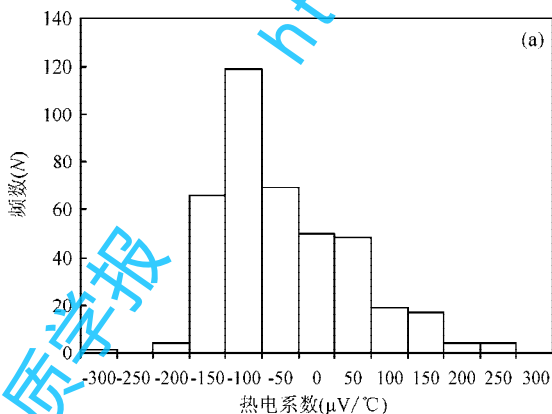


图5 三道湾子碲金矿床安山岩(a)和石英脉(b)中黄铁矿热电系数的分布

Fig. 5 Distribution of pyroelectric coefficient of pyrite in andesite (a) and quartz vein (b) of the Sandaowanzi telluride-gold deposit

系(戈尔巴乔夫,1964):

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

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

根据上述黄铁矿的热电系数和形成温度之间的关系,计算得到三道湾子金矿床中黄铁矿的结晶温度集中在 290~330℃。笔者还对该矿床石英中的流体包裹体进行均一测温,其均一温度集中于 280~340℃,与热电系数计算得到的黄铁矿结晶温度范围基本吻合,代表了矿床主成矿期的温度范围。所以可以利用黄铁矿的热电系数来计算获得矿床的成矿温度。此外,还对矿床不同中段(170~50 m 中段)黄铁矿的结晶温度进行计算和对比(表 5),发现由矿体底部至顶部黄铁矿的平均结晶温度变化依次为 309℃→302℃→285℃→249℃。黄铁矿结晶温度的规律性变化可以有效的指示成矿流体的运移方向,即流体是由底部向上运移的,且成矿流体在向上运移过程中,整个流体体系的温度是不断降低的。可以根据不同深度黄铁矿结晶温度的差异,有效识别成矿流体的运移方向。

### 5.2 成矿物质来源

由于黄铁矿中的 Fe<sup>2+</sup> 与 Co 和 Ni 的地球化学参数非常相似,因此黄铁矿中常存在 Co 和 Ni 以类质同象的形式替代 Fe 进入黄铁矿的晶格之中。大量研究表明(Bralia et al., 1979; 苏文超, 1997; 郑杰等, 2010),黄铁矿中的 Co/Ni 值对于指示成矿流体的温度和来源有着重要的意义。一般来讲,较高温度下形成的黄铁矿具有较高的 Co/Ni 值。经过计算得到三道湾子碓金矿床黄铁矿的 Co/Ni 值为 0.9~3.8 之间,基本接近于 1 或略大于 1,这表明黄铁矿的形成温度较高,与包裹体均一测温获得的成矿温度一致。对三道湾子碓金矿黄铁矿的 Co/Ni 比值进行投图(图 6),数据点主要位于火山成因和热液成因的范围内及附近,这表明矿床黄铁矿的形成与火山作用和热液活动密切相关。由此推测成矿物质来源可能与安山质岩浆活动的关系紧密。此外,前人对三道湾子碓金矿床黄铁矿的硫同位素进行分析(吕军等, 2005a; 刘宝山等, 2006; 赵胜金等, 2010),黄铁矿的 δ<sup>34</sup>S 变化范围

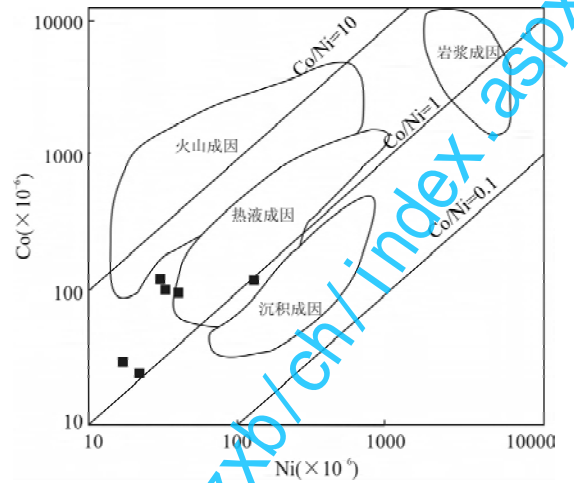


图 6 三道湾子碓金矿床黄铁矿 Co/Ni 分布图 (底图据 Bajwah et al., 1987; Brill, 1989)

Fig. 6 Distribution of Co/Ni of pyrite in the Sandaowanzi telluride-gold deposit (based on Bajwah et al., 1987; Brill, 1989)

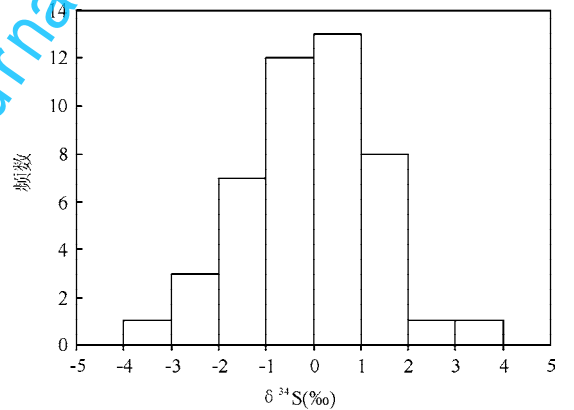


图 7 三道湾子碓金矿床黄铁矿硫同位素直方图(数据引自吕军等, 2005a; 刘宝山等, 2006; 赵胜金等, 2010)

Fig. 7 Histogram of sulfur isotopes of pyrite in the Sandaowanzi telluride-gold deposit (data from Lü et al., 2005; Liu et al., 2006; Zhao et al., 2010)

为-3.1‰~3.8‰,主要集中于-1.5‰~1.5‰之间,硫同位素直方图上呈现出明显的塔式分布(图 7),推测成矿物质具有深源特征,很可能与安山质岩浆活动的关系紧密。因此,根据黄铁矿的 Co/Ni 值

表 5 三道湾子碓金矿床不同中段黄铁矿结晶温度计算结果

Table 5 Calculated crystallization temperature of pyrite in different depths from the Sandaowanzi telluride-gold deposit

采样位置	黄铁矿颗粒数(个)	温度变化区间(℃)	温度集中区间(℃)	温度平均值(℃)
170 m	200	74~384	74~150, 310~384	249
130 m	291	78~383	275~375	285
90 m	350	80~384	275~355	302
50 m	189	82~378	280~340	309

以及硫同位素组成特征一致揭示矿床的成矿物质来源与安山质岩浆活动密切相关。

### 5.3 矿体保存条件分析

近年来,由翟裕生(1997)、翟裕生等(2000, 2002, 2011)提出并倡导开展矿床的变化与保存研究已成为矿床学研究的重要方向。在以往的矿床学研究中,国内外矿床学家关注最多的是矿床的成矿过程及形成机理,而对矿床形成之后的保存与变化过程研究不够深入,因此加强矿床形成之后变化与保存的分析对于深化研究矿床成因和提高矿产预测能力都有重要的意义。

根据获得的黄铁矿热电系数值,可以计算矿体的剥蚀率(即被剥蚀矿体占剥蚀前矿体的百分比),计算方法详见侯满堂(2000)。计算结果表明三道湾子碲金矿床矿体的平均剥蚀率为50.23%,显示矿体的剥蚀程度较高,矿体形成后已被后期的地质作用改造消失近半。被后期地质作用改造消失的另一半矿体已经被河水搬运至地势较低的山谷或河道之

中(图1、8),成为矿体周边的砂金矿体。

根据获得的流体包裹体热力学参数可以计算得到矿床的形成深度,经计算得到成矿深度均值为6.3 km。结合矿床的产出深度、成矿时代(120 Ma)及矿体的剥蚀率,这样计算得到该矿床的平均剥蚀速率为53.6 m/Ma。与其他矿床的剥蚀速率相比较,三道湾子金矿床的剥蚀速率是比较快的,如柳振江等(2010)通过磷灰石裂变径迹的手段获得胶东玲珑金矿的平均剥蚀速率为30.3 m/Ma;马星华等(2010)通过流体包裹体计算得到内蒙古中南部敖伦花Cu-Mo矿床的最小剥蚀速率为32.6 m/Ma;陈衍景等(2008)认为东秦岭北坡产出的大量斑岩型及爆破角砾岩型矿床的最大剥蚀速率应小于38.5 m/Ma。本次计算表明三道湾子金矿床的剥蚀深度至少为6.4 km,体现了该区在中生代(120 Ma)以来地质构造活动较为强烈,这样强烈的构造活动对于中生代之前形成的矿床起到一定的破坏作用。如在胶东地区有人通过对花岗岩的侵位和金矿床的形成深度计

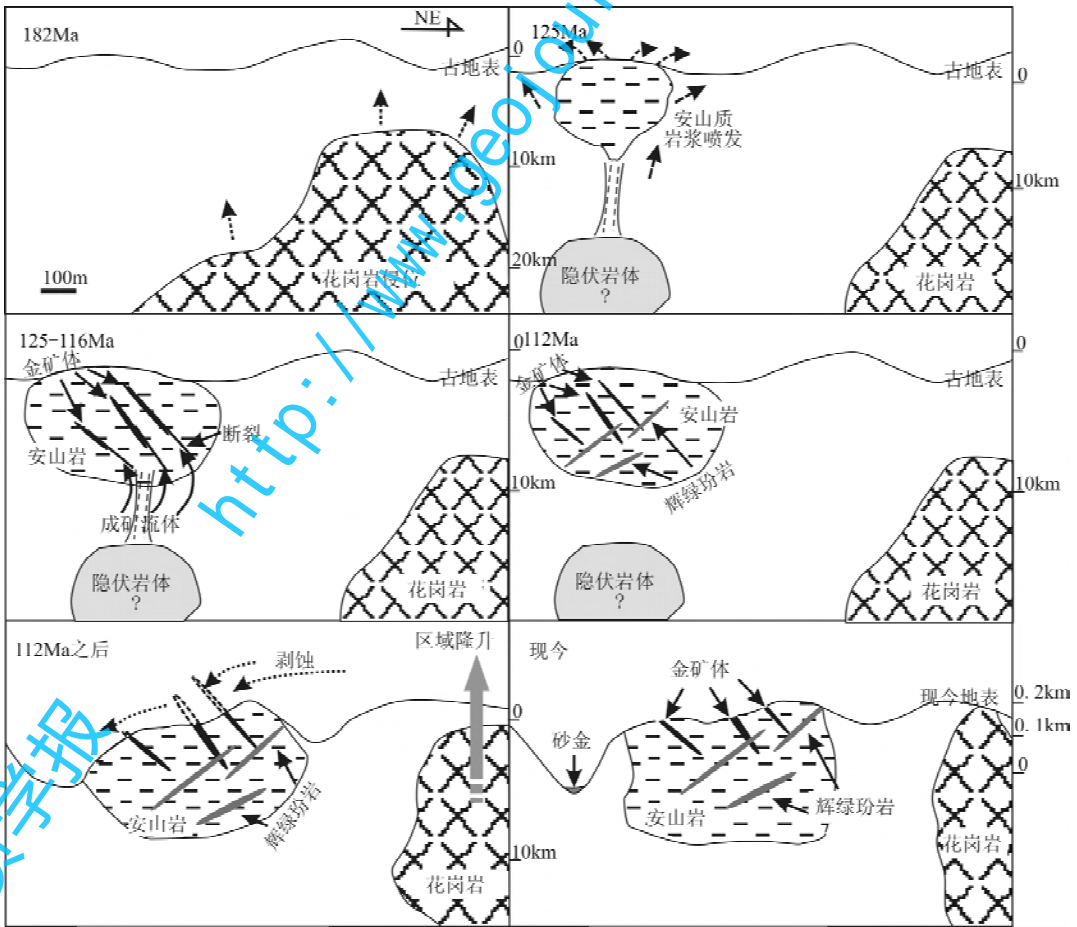


图 8 三道湾子碲金矿床变化与保存过程图解

Fig. 8 Process about changes and preservation of the Sandaowanzi telluride-gold deposit



算,认为胶东半岛在中生代 140~110 Ma 之间地壳隆升厚度约 7 km(张华锋等,2006),该区整体快速隆升剥蚀是金矿床保存的不利因素。适度的剥蚀对于金矿床的发现及良好的保存是非常有利的因素,如胶东地区照岛山金矿床黄铁矿的热电研究表明矿体总体剥蚀较浅,深部矿体未被揭露(张运强等,2010);根据流体包裹体压力估算法计算获得胶东西北部地区的剥蚀深度为 2.0~2.5 km(郭春影等,2011),这样较小的剥蚀量是热液矿床良好保存的有利因素。本次研究的三道湾子地区在中生代以后发生了较为强烈的构造隆升与剥蚀,这对金矿床的保存是极为不利的因素。该矿床的形成与变化保存过程如图 8 所示。鉴于该区早白垩纪以来较为快速的区域剥蚀隆升,因此对于该区内寻找中生代之前形成的矿床应注意砂矿的指示意义。

## 6 结论

(1)矿床产出的黄铁矿主要有两期:第一期黄铁矿(Py1)呈粗粒立方体自形晶产出;第二期黄铁矿(Py2)主要呈细粒产出,与碓金矿化关系较为密切。

(2)黄铁矿的微量元素特征显示第二期的黄铁矿中存在微细粒的碓银矿;稀土元素研究表明黄铁矿及金矿化的形成与安山质岩浆活动关系紧密,而与该区花岗质岩浆活动关系不大。

(3)黄铁矿的热电分析表明黄铁矿热电系数主要变化于 $-180\sim-90\mu\text{V}/\text{C}$ 之间,以 N 型导电型为主;由矿体顶部至底部,N 型导电型出现的频率之间增大,说明开采金矿体的部位为中部或底部;与蚀变安山岩中黄铁矿的热电系数比较,产于脉状石英中的黄铁矿具有更低的热电系数值,表明矿化程度高的部位伴生有较低热电系数的黄铁矿。

(4)通过黄铁矿热电系数分析以及流体包裹体的研究计算得出该矿床的平均剥蚀速率为 53.6 m/Ma,这表明三道湾子金矿床的剥蚀速率是比较快的,对该矿床的保存是一个不利的因素。

(5)鉴于该区早白垩纪以来较为快速的区域剥蚀隆升,因此对于该区内寻找中生代之前形成的矿床应注意砂矿的指示意义。

致谢:中国地质大学(北京)李胜荣老师及另一名匿名审稿老师对本文初稿提出了宝贵的修改意见,笔者在此深表感谢。

## 注 释

① 黑龙江省地质调查研究院齐齐哈尔分院. 2008. 黑龙江省黑河

市三道湾子金矿区及外围金矿普查报告.

## 参 考 文 献

- 蔡元吉,马承安,蒋永才. 1999. 金矿床黄铁矿热性质形成机理实验研究及其找矿应用. 火山地质与矿产, 20(3): 213~224.
- 曹焯,李胜荣,敖静,张华锋,李真真,刘小滨. 2008. 黄铁矿热电性特征在冀西石湖金矿床中的应用. 中国地质, 35(4): 746~753.
- 陈衍景,肖文交,张进江. 2008. 成矿系统:地球动力学的有效探针. 中国地质, 35(6): 1059~1068.
- 陈美勇,刘俊来,胡建江,邹逸鑫,张宏远. 2008. 大兴安岭北段三道湾子碓化物型金矿床的发现及意义. 地质通报, 27(4): 584~587.
- 郭春影,张文钊,葛良胜,卿敏,高帮飞,夏锐. 2011. 胶东西北部金矿形成深度与剥蚀程度概略评价. 金属矿山, 8: 112~115.
- 侯满堂. 2000. 陕西镇安太白庙金矿黄铁矿热电性特征研究及其应用. 黄金, 21: 5~9.
- 李成禄,李胜荣,罗军燕,宋继业,张聚全. 2009. 山西繁峙义兴寨金矿黄铁矿热电系数与矿型特征及其地质意义. 现代地质, 23(6): 1056~1063.
- 柳振江,王建平,郑德文,刘家军,刘俊,付超. 2010. 胶东西北部金矿剥蚀程度及找矿潜力和方向——来自磷灰石裂变径迹热年代学的证据. 岩石学报, 26(12): 3597~3611.
- 刘宝山,吕军. 2006. 黑河市三道湾子金矿床地质、地球化学和成因探讨. 大地构造与成矿学, 30(4): 481~485.
- 吕军,王建民,岳邦江,王洪波,于荣文,赵立国. 2005a. 三道湾子金矿床流体包裹体及稳定同位素地球化学特征. 地质与勘探, 41(3): 33~37.
- 吕军,岳邦江,王建民,于荣文,张大鹏. 2005b. 黑河市三道湾子金矿床特征及找矿标志. 地质与资源, 14(4): 256~264.
- 马星华,陈斌,赖勇,窦金龙,邹涛. 2010. 斑岩铜钼矿床成矿流体的出溶、演化与成矿:以大兴安岭南段奥仑花矿床为例. 岩石学报, 26(5): 1397~1410.
- 邵洁涟. 1988. 金矿找矿矿物学. 武汉:中国地质大学出版社, 158.
- 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. 黄金地质, 3(2): 7~12.
- 腾宪锋,王建民,王翠平,王春雨. 2005. 黑龙江省黑河市三道湾子岩金矿床地质特征. 地质与资源, 14(4): 261~264.
- 翟裕生. 1997. 论矿床形成后的改变与保存. 地学研究, 29~30 号, 北京:地质出版社, 268~273.
- 翟裕生,邓军,彭润民. 2000. 矿床变化与保存的研究内容和研究方法. 地球科学, 25(4): 340~345.
- 翟裕生,王建平,邓军,彭润民. 2002. 成矿系统与矿化网络研究. 矿床地质, 21(2): 106~112.
- 翟裕生,王建平. 2011. 矿床学研究的历史观. 地质学报, 85(5): 603~611.
- 张华锋,李胜荣,翟明国,郭敬辉. 2006. 胶东半岛早白垩世地壳隆升剥蚀及其动力学意义. 岩石学报, 22(2): 285~295.
- 张运强,李胜荣,陈海燕,薛建玲,孙文燕,张旭. 2010. 胶东牟平照岛山金矿蚀变矿化阶段及控矿要素. 矿物岩石, 30(3): 23~33.
- 赵胜金,刘俊来,白相东,赵海滨,吕军,陈越,陈美勇. 2010. 黑龙江三道湾子碓化物型金矿床流体包裹体及硫同位素研究. 矿床地质, 29(3): 476~488.
- 郑杰,余大龙,杨忠琴. 2010. 黔东南八克金矿床毒砂和黄铁矿微量元素地球化学研究. 矿物学报, 30(1): 107~113.
- Afifi A M, Kelly W C, Essene E J. 1988. Phase relations among tellurides, sulfides, and oxides: I. Thermochemical data and calculated equilibria. Economic Geology, 83: 377~394.
- Bajwah Z U, Seccombe P K, Offler R. 1987. Trace element

- distribution, Co:Ni ratios and genesis of the Big Cadia iron-copper deposit, New South Wales, Australia. *Mineralium Deposita*, 22:292~303.
- Bralia A, Sabatini G, Troja F. 1979. A reevaluation of the Co/Ni ratio in pyrite as geochemical tool in ore genesis problems. *Mineralium Deposita*, 14: 353~374.
- Brill B A. 1989. Trace element contents and partitioning of elements in ore minerals from the CSA Cu-Pb-Zn deposit, Australia. *Can. Mineral.*, 27:263~274.
- Simon G, Essene E J. 1996. Phase relations among selenides, sulfides, tellurides, and oxides; I. Thermodynamic properties and calculated equilibrium. *Economic Geology*, 91: 1183 ~ 1208.
- Liu Junlai, Bai Xiangdong, Zhao Shengjin, Tran MyDung, Zhang Zhaochong, Zhao Zhidan, Zhao Haibin, Lu Jun. 2011. Geology of the Sandaowanzi telluride gold deposit of the northern Great Xing'an Range, NE China: geochronology and tectonic controls. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(2):107 ~118.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; implications for mantle composition and processes. In: Saunders A D, Norry M J, eds. *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publications 42, 313~346.
- Zhang X M, Spry P G. 1994. Petrological, mineralogical, fluid inclusion, and stable isotope studies of the Gies gold-silver telluride deposit, Judith Mountains, Montana. *Economic Geology*, 89: 602~627.

## Typomorphic Characteristics of Pyrite and Processes of Changes and Preservation of the Sandaowanzi Telluride-Gold Deposit in Heilongjiang Province

ZHAI Degao<sup>1)</sup>, LIU Jiajun<sup>1)</sup>, HAN Siyu<sup>1)</sup>, WANG Jianping<sup>1)</sup>,

ZHANG Hongyu<sup>2)</sup>, LIU Zhenjiang<sup>1)</sup>, YANG Longbo<sup>1)</sup>, ZHANG Huafeng<sup>1)</sup>, LÜ Jun<sup>3)</sup>

1) *State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing, 100083;*

2) *The Geological Lab Center, China University of Geosciences, Beijing, 100083;*

3) *Qiqihar Branch, Heilongjiang Institute of Geological Survey, Qiqihar, Heilongjiang, 161005*

### Abstract

The Sandaowanzi gold deposit, which was recently discovered in northern China, is a typical telluride-gold deposit. Metallic minerals are composed mainly of various tellurides and native gold with minor sulfides. In this paper we carried out work focusing on the typomorphic characteristics of pyrite and processes of changes and preservation of the Sandaowanzi telluride-gold deposit. Study showed that pyrite occurred mainly in two stages: the early pyrite (Py1) occurred in cubic euhedral crystals, which represented pyritized alteration; the late pyrite (Py2) showed fine anhedral crystals, which had relationship with Te-Au mineralization. Trace element study about pyrite indicated that there are fine hessite grains in pyrite and REE analysis identified that pyrite had close relationship with gold mineralization and andesite magmatism, while with no relationship with granite magmatism. Analysis about thermoelectric properties of pyrite in deposit showed that the pyroelectric coefficient mainly varied  $-180 \sim -90 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$  with N type dominated; frequency (57.5%→84.2%→92%→97.4%) of N type pyrite increased from top to bottom of the deposit; pyrite occurred in quartz vein had lower pyroelectric coefficient than in altered andesite. Combined with thermoelectric properties of pyrite and fluid inclusions study we calculated the average erosion rate as 53.6 m/Ma. Finally we gave a summary about changes and preservation of the Sandaowanzi telluride-gold deposit after its formation and put forward a conclusion that searching for ore deposits that formed before Mesozoic in this area should pay attention to the significance of placer.

**Key words:** pyrite; typomorphic characteristics; changes and preservation; telluride-gold deposit; Sandaowanzi; Heilongjiang