

编号: 0258-7106(2011)05-0855-12

黑龙江三道湾子碲金矿床物质组成及成因意义*

韩思宇^{1,2}, 翟德高^{1,2}, 刘家军^{1,2,*}, 吕军^{1,3}, 吴胜华^{1,2}, 杨隆勃^{1,2}

(1 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083; 2 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; 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)

摘要 三道湾子碲金矿床位于黑龙江省北部大兴安岭中段成矿带的东部, 为一典型的碲化物型金矿床。笔者采用显微镜观察和电子探针分析技术, 确认该矿床的矿石中存在碲金银矿、针碲金银矿、碲金矿、碲银矿和碲铅矿等碲化物。矿石中也存在大量自然金颗粒, 产在石英、碲金银矿的裂隙中, 或与碲化物共生产出。电子探针分析结果显示, 该矿床内自然金的 $w(\text{Au}) = 85.64\% \sim 93.41\%$, $w(\text{Ag}) = 6.17\% \sim 13.48\%$, 为含银自然金, 成色为 864~938。碲在中、低温条件下易置换硫而使 Te 以类质同象的形式分散在硫化物的晶格中, 但在高碲逸度 (f_{Te_2}) 的条件下, Te 易与 Au、Ag 结合形成大量碲化物。

关键词 地质学; 碲金矿床; 碲化物; 自然金; 三道湾子; 黑龙江

中图分类号: P618.51

文献标志码: A

Mineral assemblage of Sandaowanzi tellurium-gold deposit in Heilongjiang Province and its genetic significance

HAN SiYu^{1,2}, ZHAI DeGao^{1,2}, LIU JiaJun^{1,2}, LÜ Jun^{1,3}, WU ShengHua^{1,2} and YANG LongBo^{1,2}

(1 School of Geosciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2 State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3 Qiqihar Branch, Heilongjiang Institute of Geological Survey, Qiqihar 161005, Heilongjiang, China)

Abstract

The Sandaowanzi tellurium-gold deposit is a typical telluride-gold deposit in northern Heilongjiang Province. The ore deposit located in the central section of the Da Hinggan Mountains. Microscope observation and electron microprobe analyses of mineral assemblages of this deposit reveal that 6 different kinds of tellurides such as petzite, sylvanite, calaverite, hessite and altaite are existent in ores of this ore deposit. Lots of native gold occurring in veins of quartz and petzite or coexistent with tellurides were also found in this ore deposit. EP-MA test shows that Au possesses 85.64%~93.41% and Ag possesses 6.17%~13.48% in native gold, which can be classified as Ag-bearing native gold with gold fineness of 864~938. Tellurium could easily replace sulfur in middle-low temperature, making tellurium dispersed in lattice of sulfides in the isomorphous form, whereas under high tellurium fugacity conditions, tellurium could easily coexist with Au and Ag to form a number of tellurides.

Key words: geology, tellurium-gold deposit, tellurides, native gold, Sandaowanzi, Heilongjiang

* 本文为国家自然科学基金(40973035)、教育部长江学者和创新团队发展计划(IRT0755)、高等学校学科创新引智计划(B07011)和中国地质调查局“我国三稀金属资源战略调查”项目(编号 1212011120354)的部分研究成果

第一作者简介: 韩思宇, 男, 1987年生, 硕士研究生, 矿床学专业, 主要从事矿床学及矿床地球化学方面的研究。Email: henryhan.19870918@yahoo.com.cn

** 通讯作者简介: 刘家军, 男, 1963年生, 教授, 博士生导师, 主要从事矿床地球化学方面的教学与研究工作。Email: liujiajun@cugb.edu.cn

收稿日期: 2010-10-01; 改回日期: 2011-08-03。许德焕编辑。

碲 (Te) 在自然界中主要与 Pb、Bi、Cu、Fe、Zn、Ni 以及 Au、Ag、铂族元素等金属元素结合形成碲化物、碲(碲)化物等。这些元素按其地球化学性质可分为铜族 (Cu、Au、Ag)、铂族、铋族和铁族, 其中铜族元素组成的碲化物矿物种类最多 (钱汉东等, 2000)。碲 (Te) 位于化学周期表的第六族 VI A 亚族, 原子量为 127.60, 克拉克值为 0.001×10^{-6} 。Te 与 S 在元素周期表中都位于第五周期 VI A 族, 与硫的结晶化学及某些地球化学性质相似: 离子半径 $S^{2-} = 0.184$ nm、 $Te^{2-} = 0.211$ nm, 离子电位 $S^{2-} = 1.09$ eV、 $Te^{2-} = 0.95$ eV, 晶格能系数 $S^{2-} = 1.15$ 、 $Te^{2-} = 0.95$ 。因此, 碲具有亲硫性 (司荣军等, 2006)。

三道湾子金矿床是上世纪 90 年代末在黑龙江省北部发现的中-低温火山热液型金矿床。矿石类型为贫硫石英脉型, 成矿温度为 $150 \sim 276$ °C, 同位素研究表明, 其成矿流体主要为大气降水并具幔源硫特征 (吕军等, 2005; 武子玉等, 2005; 赵胜金等, 2010)。随着近期勘查工作的深入, 在深部已发现特别富集的金矿体, 其 $w(\text{Au})$ 高达 $13\ 000$ g/t。富矿段中的金主要以金-银碲化物的形式产出 (陈美勇等, 2008)。然而, 笔者在研究该矿床物质组成时发现, 在深部富矿段的矿石中, 除存在大量金-银碲化物外, 也存在大量自然金矿物。因此, 从元素地球化学方面来解释碲化物及自然金生成的先后关系, 对研究碲化物及自然金的生成机制具有积极意义。

1 矿床地质特征

黑龙江省黑河市三道湾子金矿床的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, 大兴安岭中段海西期、燕山期 (钼)、铁 (锡)、铅、锌、金、银成矿带的东部 (庞奖励, 1995; 江思宏等, 2004; 祁进平等, 2005; 陈炳蔚等, 2007)。矿区出露的地层主要是上侏罗统塔木兰沟组 (J_3t) (吕军等, 2005), 其岩性为粗安岩、粗安质火山角砾岩等, 是金矿体的直接围岩 (图 1)。在矿区的北侧, 出露有下白垩统光华组 (K_1g) 的流纹质含角砾凝灰岩、流纹岩、英安岩等, 覆盖在龙江组 (K_1l) 之上 (吕军等, 2009a)。

金矿体受 NW 向张性断裂的控制。石英脉是金的主要载体, 次为硅化粗面安山岩。矿体形态以脉

状、透镜状为主, 沿走向和倾向有膨胀和狭缩现象, 产状总体呈 NW 走向, SW 向侧伏。矿区内围岩蚀变分带比较明显, 自石英脉向两侧依次为含金石英脉-强硅化带-弱硅化带-黄铁矿化带-黏土化带-碳酸盐化带-绿帘石、绿泥石化带^①。金矿化与硅化关系密切, 硅化强烈的地段金矿化好 (吕军等, 2005)。

笔者对三道湾子碲金矿床中矿物流体包裹体的测温结果表明, 主要成矿阶段的均一温度范围为 $200 \sim 280$ °C, 平均 240 °C, 盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 $3.55\% \sim 8.68\%$, 压力为 $34 \sim 88$ MPa, 估算其形成深度为 $1.3 \sim 2.85$ km, 显示出该矿床为一中-低温、低盐度、中-浅成的热液型碲金矿床。其成矿过程可划分为石英-黄铁矿、金属硫化物-碲化物、碲化物-自然金、自然金-石英和石英-碳酸盐 5 个阶段 (表 1)。其中, 金属硫化物-碲化物、碲化物-自然金、自然金-石英 3 个阶段为金的主要成矿阶段。

该矿床的矿石在地表因金属硫化物氧化而使其表面呈褐黄色, 深部矿石则呈灰白色、灰色 (吕军等, 2009b)。矿石中的金属硫化物和氧化物主要有黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿、磁铁矿, 偶见黝铜矿和赤铁矿。笔者通过显微镜下观察和电子探针分析, 在矿石中确认的碲化物有碲金银矿、针碲金银矿、碲金矿、斜方碲金矿、碲银矿和碲铅矿。

矿石结构主要有自形、半自形、他形、乳滴状、交代、环带、包含等结构; 矿石构造有致密块状、角砾状、稀疏浸染状、孔洞状、梳状-晶簇状、脉状等构造。

2 矿床物质组成

三道湾子碲金矿床内的碲化物主要以金、银碲化物的形式存在, 包括碲金银矿、针碲金银矿、碲金矿、斜方碲金矿、碲银矿和碲铅矿。金主要存在于碲化物中, 也有部分自然金产出于石英、碲金银矿的裂隙中。

2.1 碲化物的组成特征

碲金银矿

碲金银矿是矿石中分布最广的碲化物之一。其产出形式多种多样: ① 与闪锌矿、黄铜矿、自然金共生 (图 2A、E); ② 单独产出, 呈独立粗粒、不规则粒状、脉状产于石英颗粒裂隙间或充填石英裂隙, 颗粒大小变化较大, 大者可达 n mm, 小者仅 $10 \sim 20$ μm ,

① 吕军, 岳邦江, 谷华娟, 等. 2008. 黑龙江省黑河市三道湾子岩金矿普查报告. 黑龙江省地质调查研究院齐齐哈尔分院. 31-32.

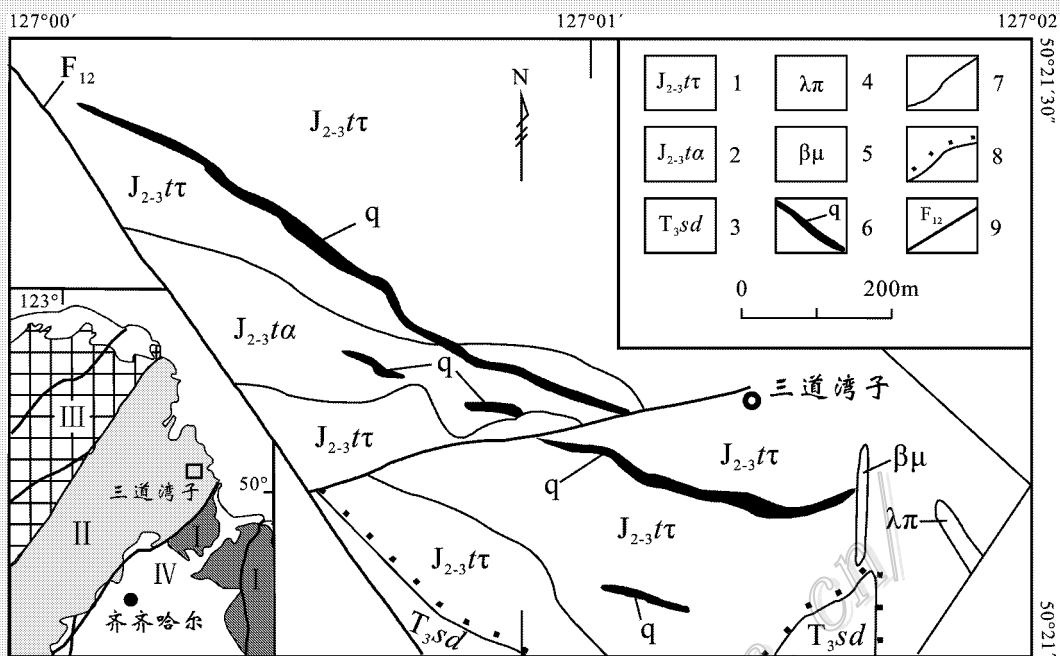


图 1 三道湾子碲金矿床地质图(引自陈美勇, 2008)

1—塔木兰沟组粗面安山岩; 2—塔木兰沟组安山质火山角砾岩; 3—三道湾子单元二长花岗岩; 4—流纹斑岩; 5—辉绿玢岩; 6—含金石英脉; 7—地质界线; 8—不整合界线; 9—断裂及编号; I—松嫩-张广才岭微板块; II—大兴安岭微板块; III—额尔古纳微板块; IV—松辽盆地

Fig. 1 Geological sketch map of the Sandaowanzi tellurium-gold deposit

1—Trachyandesite of Tamulangou Formation; 2—Andesite breccia of Tamulangou Formation; 3—Adamellite of Sandaowanzi Unit; 4—Rhyolite porphyry; 5—Diabase porphyrite; 6—Au-bearing quartz vein; 7—Geological boundary; 8—Unconformity boundary; 9—Fault and its serial number; I—Songneng-Zhangguangcailing microplate; II—Da Hinggan Ling microplate; III—Ergun microplate; IV—Songliao basin

表 1 三道湾子碲金矿床成矿阶段和矿物组成

Table 1 Ore-forming stages and mineral composition of the Sandaowanzi tellurium-gold deposit

成矿阶段	早阶段		主阶段		晚阶段
	石英-黄铁矿	金属硫化物-碲化物	碲化物-自然金	自然金-石英	石英-碳酸盐
特征矿物组成	石英, 黄铁矿(晶形较好)	黄铜矿、黄铁矿、碲金银矿、针碲金银矿、碲金矿、碲银矿, 少量自然金、方铅矿、碲汞矿	碲银矿、碲金银矿、针碲金银矿、碲金矿、自然金	独立颗粒自然金、裂隙金、石英	石英、方解石

其中多包含细脉状、乳滴状自然金和碲金矿, 偶见有黄铁矿、闪锌矿颗粒(图 2B、C、D); ③ 呈固溶体分离结构产出, 碲金银矿呈乳滴状、脉状包裹于闪锌矿、黄铜矿中, 常见有自然金、碲金矿沿碲金银矿与金属硫化物的接触处析出, 或包裹于碲金银矿中, 与金属硫化物同时生成(图 2F); ④ 与针碲金银矿、碲金矿共生, 碲金银矿与碲金矿除连生外, 多形成固溶体分离结构分布于彼此内。在反光显微镜下可见, 碲金银矿的反射色为亮灰白色或浅灰色, 反射率大于黄铜矿, 表面多擦痕, 硬度较黄铜矿和闪锌矿低, 无双反射色, 均质性或弱非均质性, 无内反射。

电子探针分析结果(表 2)表明, 碲金银矿的

$w(\text{Au})$ 为 23.15%~24.79%, $w(\text{Ag})$ 为 40.23%~41.57%, $w(\text{Te})$ 为 34.03%~34.42%。根据电子探针分析结果的平均值, 计算出碲金银矿的化学分子式为 $\text{Ag}_{2.95}\text{Au}_{0.96}\text{Te}_{2.1}$, 简写式为 Ag_3AuTe_2 。

针碲金银矿

针碲金银矿的产出状态多种多样: ① 与金属硫化物连生, 与黄铜矿连生是针碲金银矿最主要的产出方式, 少数与闪锌矿共生, 针碲金银矿与黄铜矿连生的同时其内部可出现少量碲金银矿固溶体, 固溶体严格限于针碲金银矿中, 与金属硫化物界线明显(图 3A); ② 与碲化物连生, 针碲金银矿呈粗粒产出, 与碲金矿、碲金银矿共生, 粗粒针碲金银矿的粒径可

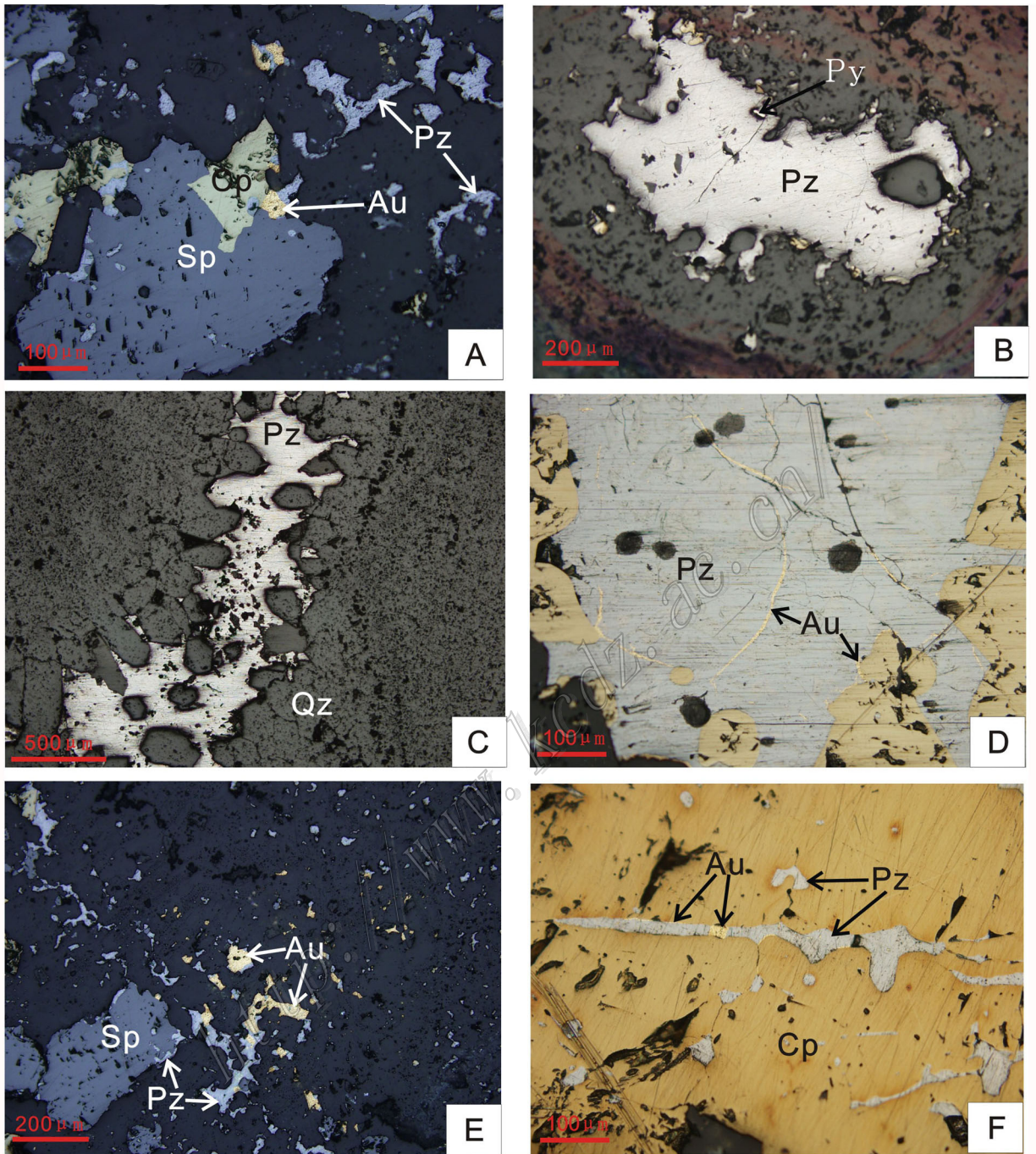


图2 三道湾子碲金矿床内碲金银矿产出状态的镜下照片

A. 闪锌矿与自然金、碲金银矿和黄铜矿连生; B. 片状碲金银矿, 其中包含少量黄铁矿; C. 碲金银矿充填于石英颗粒裂隙中, 石英晶形较好; D. 碲金银矿中见细脉状自然金充填于其裂隙中或沿黄铜矿边缘分布; E. 碲金银矿与自然金、闪锌矿连生; F. 碲金银矿呈乳滴状、长条状固溶体分离结构形成于黄铜矿中, 碲金银矿内可见自然金; Au—自然金; Cp—黄铜矿; Pz—碲金银矿; Qz—石英; Sp—闪锌矿; Py—黄铁矿

Fig. 2 Reflected light photomicrographs of petzite from the Sandaowanzi tellurium-gold deposit

A. Coexistence of sphalerite, native gold, petzite and chalcopyrite; B. Pyrite in sheet petzite; C. Petzite in crack of quartz; D. Veinlet native gold in petzite; E. Coexistence of petzite, native gold, sphalerite; F. Petzite in chalcopyrite, native gold in petzite; Au—Native gold; Cp—Chalcopyrite; Pz—Petzite; Qz—Quartz; Sp—Sphalerite; Py—Pyrite

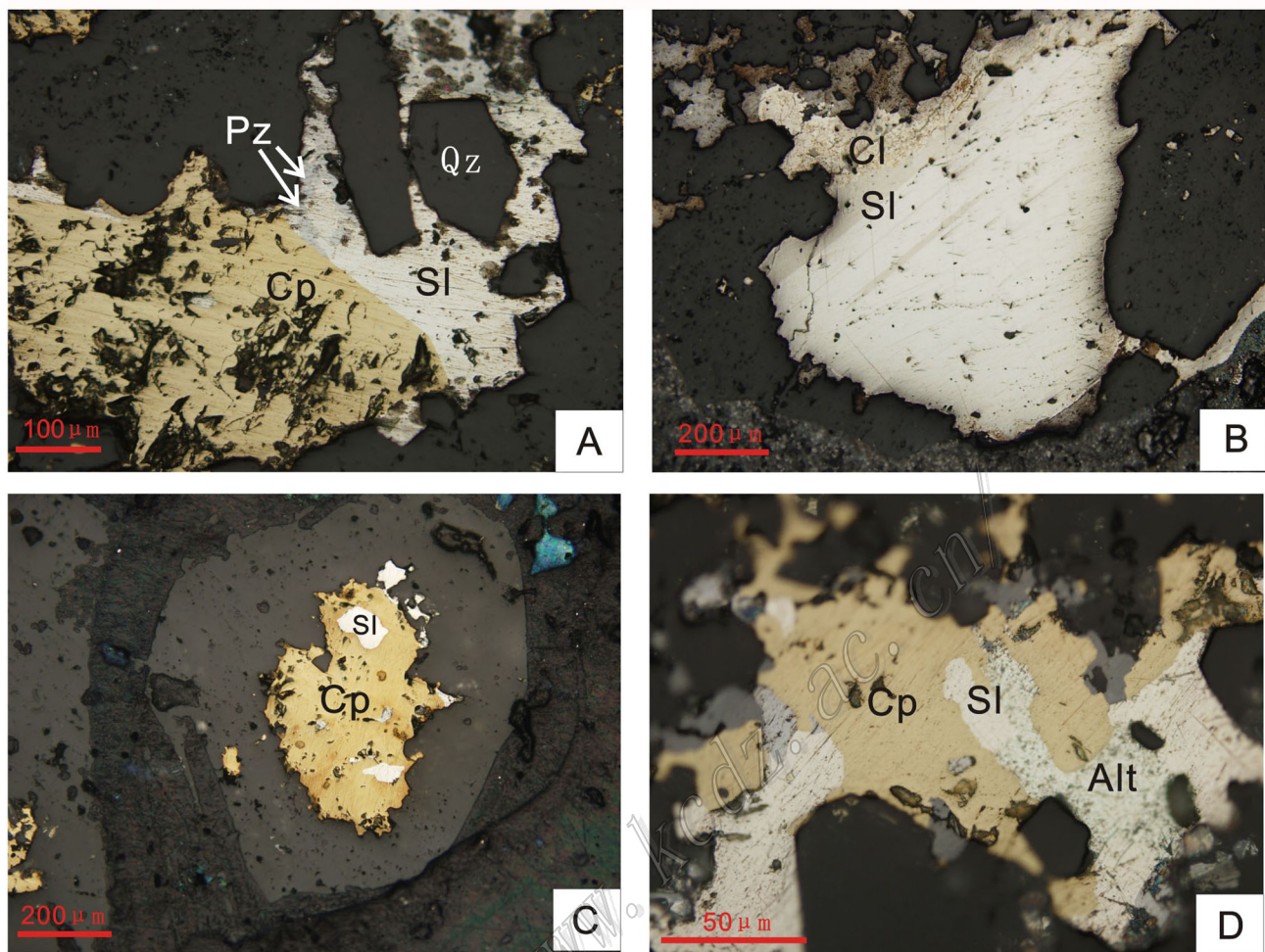


图3 三道湾子碲金矿床内针碲金银矿产出状态的镜下照片

A. 针碲金银矿与黄铜矿连生的同时其内部可出现少量碲金银矿；B. 针碲金银矿呈片状产出，其周缘被碲金矿交代；C. 针碲金银矿包裹于黄铜矿中；D. 针碲金银矿与碲金矿、碲铅矿、黄铜矿和闪锌矿连生；Cp—黄铜矿；Pz—碲金银矿；Qz—石英；Sl—针碲金银矿；Cl—碲金矿；Alt—碲铅矿

Fig. 3 Reflected light photomicrographs of sylvanite from the Sandaowanzi tellurium-gold deposit

A. Petzite in sylvanite which coexistence with chalcopyrite; B. Calaverite replacing sylvanite; C. Coexistence of sylvanite with chalcopyrite; D. Coexistence of sylvanite with petzite, altaite, chalcopyrite, and sphalerite; Cp—Chalcopyrite; Pz—Petzite; Qz—Quartz; Sl—Sylvanite; Cl—Calaverite; Alt—Altaite

达 $250\ \mu\text{m}$ ，其周缘有碲金矿和碲金银矿交代带(图3B)，周围无金属硫化物出现，可知针碲金银矿的形成时间应早于碲金矿和部分碲金银矿；③ 呈乳滴状包裹于黄铜矿中或与碲铅矿、碲银矿共生组成黄铜矿脉(图3C、D)；④ 呈片状交代碲银矿表面，形成时间明显晚于碲银矿。针碲金银矿及碲金银矿是矿石中2种分布最广的矿物。在反光显微镜下可见其反射色为亮乳白色，反射率大于碲金银矿、小于自然金，表面具擦痕，具明显双反射色，可见双晶，无内反射，具强非均质性(灰褐色-棕褐色)。

电子探针分析结果(表2)表明，针碲金银矿的 $w(\text{Au})$ 为 $24.08\% \sim 27.93\%$ ， $w(\text{Ag})$ 为 $8.72\% \sim 12.75\%$ ， $w(\text{Te})$ 为 $62.71\% \sim 63.47\%$ 。根据电子探针分析结果的平均值，计算出针碲金银矿的化学分子式为 $\text{Au}_{0.81}\text{Ag}_{1.08}\text{Te}_{4.03}$ ，简写式为 AuAgTe_4 。

碲金矿和斜方碲金矿

碲金矿主要的产状有：① 与黄铜矿、碲金银矿、针碲金银矿连生，多交代碲金银矿和针碲金银矿，形成碲金矿的交代脉体和交代边(图3B)；② 呈乳滴状、叶片状和细脉状产于碲金银矿之中(图4A、B)，

表2 三道湾子碲金矿床中碲金银矿、针碲金银矿、碲金矿、碲银矿和碲铅矿的电子探针分析数据
Table 2 Electron microprobe analyses of petzite, sylvanite, calaverite, hessite and altaite from the Sandaowanzi tellurium-gold deposit

矿物名称及样品号	分子式	$\omega(B)\%$				总量/%
		Au	Te	Ag	Pb	
碲金银矿						
09sdwz-47-3	$Ag_{2.99}Au_{0.97}Te_{2.10}$	24.5	34.38	41.57		100.45
09sdwz-51-1	$Ag_{2.89}Au_{0.96}Te_{2.08}$	24.4	34.03	40.23		98.66
09sdwz-47-10	$Ag_{2.95}Au_{0.98}Te_{2.10}$	24.79	34.4	41.02		100.21
09sdwz-47-10	$Ag_{2.97}Au_{0.91}Te_{2.1}$	23.15	34.42	41.25		98.82
平均值	$Ag_{2.95}Au_{0.96}Te_{2.1}$	24.21	34.31	41.02		99.54
针碲金银矿						
09sdwz-47-2	$Au_{0.66}Ag_{1.16}Te_{4.00}$	27.93	62.71	8.72		99.36
09sdwz-51-5 光	$Au_{0.96}Ag_{1.00}Te_{4.05}$	24.08	63.47	12.75		100.3
平均值	$Au_{0.81}Ag_{1.08}Te_{4.03}$	26.01	63.09	10.74		99.84
碲金矿						
09sdwz-47-10	$Au_{0.97}Te_{2.03}$	42.17	57.37			99.54
09sdwz-47-10	$Au_{0.93}Te_{2.06}$	40.56	58.28			98.84
平均值	$Au_{0.95}Te_{2.05}$	41.37	57.83			99.20
碲银矿						
09sdwz-47-10	$Ag_{1.92}Te_{1.03}$		60.3	38.37		98.67
09sdwz-51-5 光	$Ag_{1.90}Te_{1.05}$		59.69	39.62		99.31
09sdwz-51-1	$Ag_{1.77}Te_{1.18}$		55.51	43.77		99.28
09sdwz-43-3	$Ag_{1.97}Te_{1.04}$		61.79	38.88		100.67
09sdwz-51-6	$Ag_{1.88}Te_{0.99}$		59.1	37.02		96.12
平均值	$Ag_{1.88}Te_{1.06}$		59.28	39.53		98.81
碲铅矿						
09sdwz-51-5 光	$Pb_{0.97}Te_{1.05}$		40.25		60.1	100.35
09sdwz-51-1-	$Pb_{0.97}Te_{1.04}$		39.56		59.84	99.4
09sdwz-47-10	$Pb_{0.95}Te_{1.04}$		39.85		59.09	98.94
09sdwz-43-3	$Pb_{0.96}Te_{1.05}$		40.09		59.37	99.46
09sdwz-51-6	$Pb_{0.95}Te_{1.05}$		40.03		58.85	98.88
平均值	$Pb_{0.96}Te_{1.05}$		39.96		59.45	99.41

测试单位及测试者:中国地质大学(北京)实验中心电子探针室尹经武教授、郝金华博士。

这是碲金矿的主要产出形式,碲金矿脉体严格限于碲金银矿中,与黄铜矿具有明显的界限,可见碲金矿的形成明显晚于黄铜矿和碲金银矿;③呈乳滴状、不规则粒状与自然金紧密共生产于碲金银矿中,或与自然金连生呈细脉状共同充填粗粒碲金银矿的裂隙(图4C、D)。后2种产状为碲金矿的主要产出形式,较为常见。碲金矿与斜方碲金矿在显微镜下难以区分,一般根据化学成分予以鉴别。两者的反射色均为乳白色,与针碲金银矿相比,其反射色略偏黄,反射率小于针碲金银矿但大于黄铜矿,不显双反射色及反射多色性,无内反射,具弱非均质性,表面磨光较好,不见擦痕,硬度大于针碲金银矿。

电子探针分析结果(表2)表明,碲金矿的 $\omega(Au)$ 为40.56%~42.17%, $\omega(Te)$ 为57.37%~58.28%。根据电子探针分析结果的平均值,计算出

碲金矿的化学分子式为 $Au_{0.95}Te_{2.05}$,简写式为 $AuTe_2$ 。

碲银矿

碲银矿的产状多样,主要有:①呈独立颗粒产于石英裂隙中;②呈长柱状产于黄铁矿和黄铜矿粒间裂隙中或与黄铜矿紧密连生;③呈乳滴状、叶片状等固溶体形式产于碲金银矿内(图5A),分布不均匀,颗粒大小差异较大,此为碲银矿的主要产出形式。在反光显微镜下可见碲银矿呈灰色略偏褐色,反射率低于黄铜矿,双反射色显著,具强非均质性(黄褐色-浅蓝灰色),无内反射,表面具擦痕,颗粒大小不均。

电子探针分析结果(表2)表明,碲银矿的 $\omega(Ag)$ 为37.02%~43.77%, $\omega(Te)$ 为55.51%~61.79%。根据电子探针分析结果的平均值,计算出

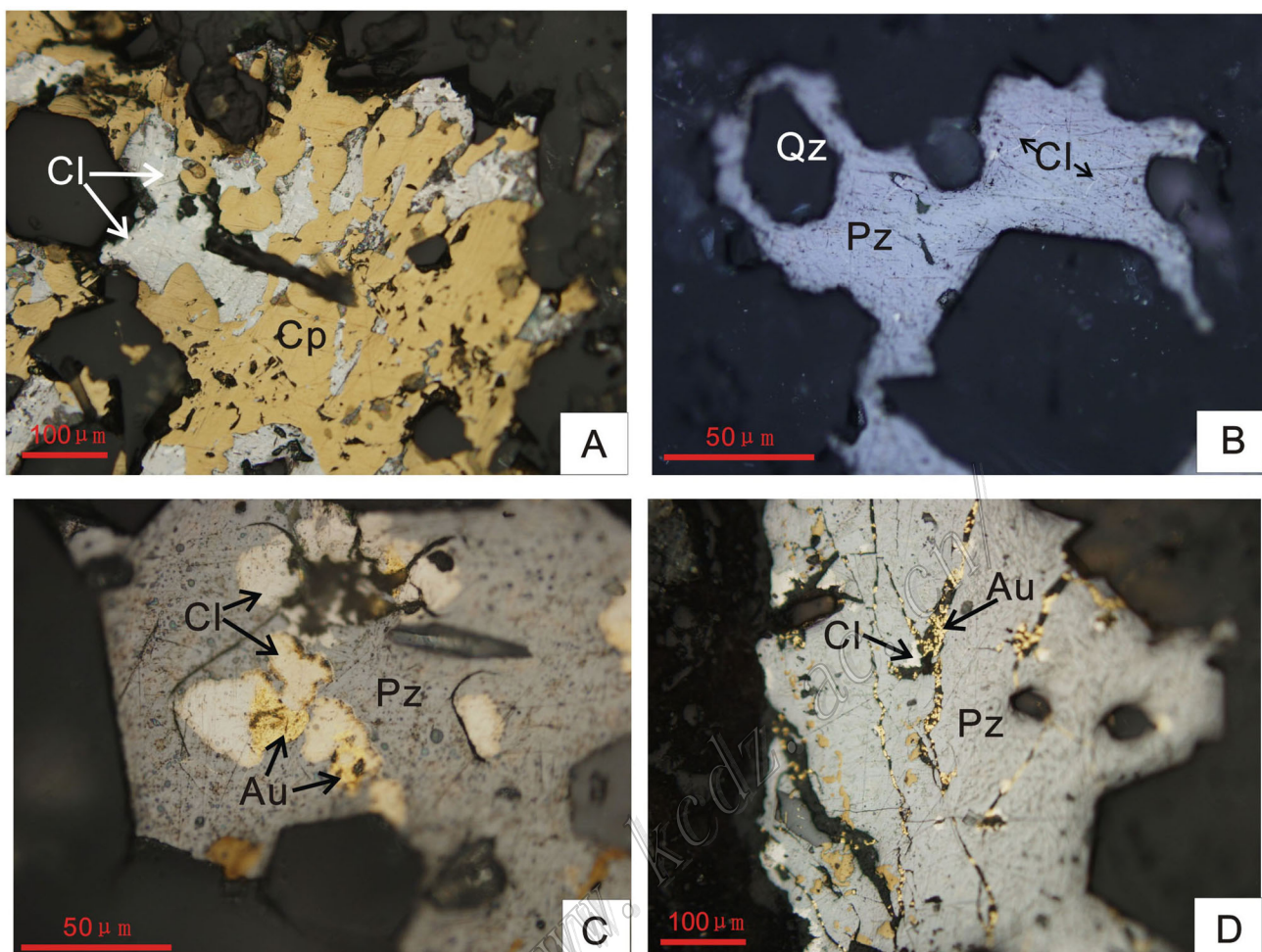


图4 三道湾子碲金矿床内碲金矿产出状态的镜下照片

- A. 碲金矿成乳滴状产于碲金银矿中,碲金银矿与黄铜矿相互穿插,紧密连生; B. 碲金矿呈细脉状充填于碲金银矿内; C. 碲金矿呈乳滴状与自然金共生产出于碲金银矿中; D. 碲金矿与自然金连生共同充填片状碲金银矿的裂隙; Au—自然金; Cl—碲金矿; Cp—黄铜矿; Pz—碲金银矿; Qz—石英

Fig. 4 Reflected light photomicrographs of calaverite from the Sandaowanzi tellurium-gold deposit

- A. Calaverite in petzite interpenetrating chalcopyrite; B. Calaverite in petzite; C. Coexistence of calaverite with native gold in petzite; D. Coexistence of calaverite with native gold in interstice of petzite; Au—Native gold; Cl—Calaverite; Cp—Chalcopyrite; Pz—Petzite; Qz—Quartz

碲银矿的化学分子式为 $Ag_{1.88}Te_{1.06}$, 简写式为 Ag_2Te 。

碲铅矿

碲铅矿产出状态多样,镜下主要可见3种:①碲铅矿呈独立颗粒产于石英裂隙中(图5B),晶形中等,粒径约 $75\ \mu m$,碲铅矿颗粒内包裹有乳滴状碲金银矿或部分被碲金银矿交代;②碲铅矿与黄铜矿、闪锌矿以及碲金银矿、针碲金银矿共生产于石英裂隙中,碲化物多穿插金属硫化物而呈长柱状,可知金属硫化物的形成早于碲化物;③碲铅矿呈长柱状、乳滴状和片状包裹于碲金银矿、针碲金银矿及碲银

矿中(图5C),这是碲铅矿的主要产出形式,可知该期次碲铅矿的形成应晚于碲银矿,与碲金银矿和针碲金银矿形成时间接近。在矿石中,碲铅矿分布较普遍,其含量仅次于碲金银矿和针碲金银矿。在反光显微镜下可见碲铅矿呈乳白偏灰色,反射率大于针碲金银矿和碲金银矿,略小于自然金,不显双反射色,强非均质性,无内反射,磨光差,表面较“脏”,颗粒大小不均,大者可达 $150\ \mu m$,小者仅 $30\ \mu m$ 。碲铅矿中可包裹有少量黄铜矿固溶体。

电子探针分析结果(表2)表明,碲铅矿的 $w(Pb)$ 为 $58.85\% \sim 60.10\%$, $w(Te)$ 为 $39.56\% \sim 40.25\%$ 。



A. 碲银矿呈乳滴状产于碲金银矿中; B. 碲铅矿呈独立颗粒产于石英裂隙中, 与碲金银矿连生; C. 碲铅矿呈长柱状产于碲金银矿中; Alt—碲铅矿; Hs—碲金银矿
A. Hessite in petzite; B. Altaite in interstice of quartz; C. Altaite in petzite; Alt—Altaite; Hs—Hessite; Pz—Petzite

图5 三道湾子碲金矿床内碲银矿和碲铅矿产出状态的镜下照片

Fig. 5 Reflected light photomicrographs of hessite and altaite from the Sandaowanzi tellurium-gold deposit

根据电子探针分析结果的平均值, 计算出碲铅矿的化学分子式为 $Pb_{0.96}Te_{1.05}$, 简写式为 $PbTe$ 。

2.2 自然金

形态

(1) 显微镜观察显示, 自然金的形态多种多样, 有: 不规则粒状(图 2A)、短柱状(图 6A)、长椭圆粒状(图 6B)、纺锤状(图 6C)、不规则三角状(图 6D)、长条状(图 6E)、细脉状(图 6F)等。

粒度

目前仅在显微镜下见到自然金, 肉眼尚未观察到。该矿床中自然金的粒度变化较大, 大者可达 $200 \mu m$, 小者不足 $5 \mu m$, 以 $20 \sim 40 \mu m$ 为多。

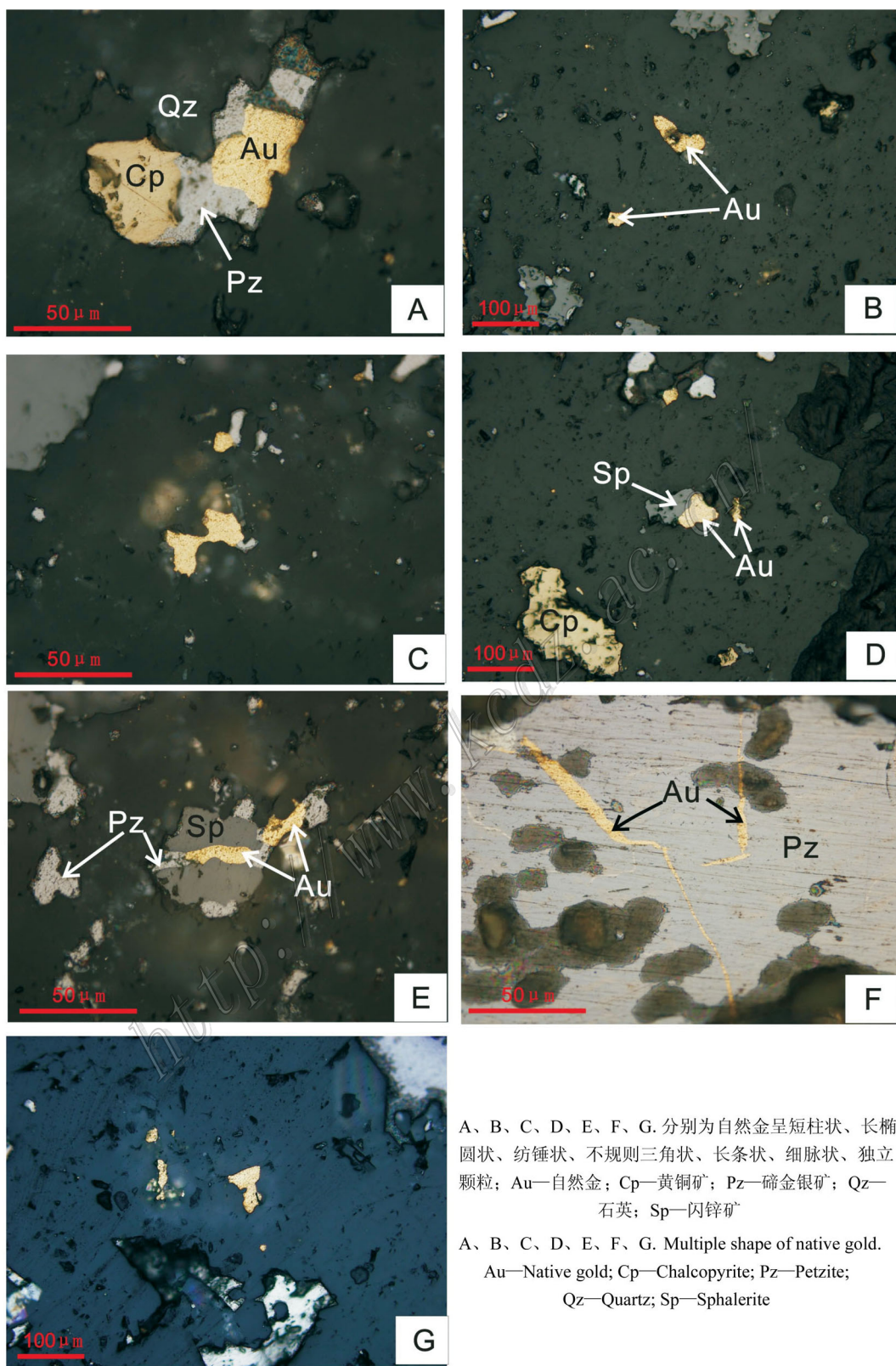
产出状态

(1) 呈独立颗粒产出 由镜下观察可知, 自然金呈独立矿物出现(图 6G)是该矿床自然金产出的主要形式之一, 主要分布在石英颗粒的边部和裂隙中, 粒度一般不超过 $30 \mu m$, 分布集中, 多为数粒自然金颗粒集中出现。碲化物尤其是碲金银矿虽不与其连生但一般都会出现在其附近。

(2) 呈包体金、固溶体金产出 镜下可见, 包体金主要呈乳滴状、蠕虫状包裹于碲金银矿中(图 4C), 包裹于碲金银矿中的 Au 多与碲金矿连生或被包裹其中, 少数单独产出, 该类自然金的粒度仅 $5 \sim 10 \mu m$, $w(Au)$ 在 90% 以上, 其形成时间晚于碲金银矿, 与碲金矿形成时间接近。固溶体金在镜下少见, 目前仅见 2 处, 呈蠕虫状、细脉状产在碲金银矿中, 沿碲金银矿与黄铜矿的接触带分布, 与黄铜矿具有明显的边界(图 2D、F)。其形成时间明显晚于黄铜矿, 与碲金银矿相近。

(3) 呈连生产产出 自然金主要与碲金银矿连生产产出, 呈不规则粒状、柱状等, 有少量与针碲金银矿、黄铜矿、闪锌矿连生(图 2E)产在其边缘与石英接触的部位或插入金属硫化物中。该类自然金的形成时间晚于金属硫化物, 与碲金银矿、针碲金银矿同时。

(4) 呈裂隙金产出 裂隙金是该矿床中自然金的主要产出形式之一, 且仅在碲金银矿内出现。自然金呈细脉状、金芽状和粒状充填于粗粒碲金银矿



A、B、C、D、E、F、G. 分别为自然金呈短柱状、长椭圆状、纺锤状、不规则三角状、长条状、细脉状、独立颗粒；Au—自然金；Cp—黄铜矿；Pz—碲金银矿；Qz—石英；Sp—闪锌矿

A、B、C、D、E、F、G. Multiple shape of native gold. Au—Native gold; Cp—Chalcopyrite; Pz—Petzite; Qz—Quartz; Sp—Sphalerite

图 6 三道湾子碲金矿床内自然金产出状态的镜下照片

Fig. 6 Reflected light photomicrographs of native gold from the Sandaowanzi tellurium-gold deposit

表3 三道湾子碲金矿床中自然金的电子探针分析数据

Table 3 Electron microprobe analyses of native gold from the Sandaowanzi tellurium-gold deposit

样品号	颗粒号-点号	分子式	$w(B)\%$					成色	
			Au	Ag	Cu	Te	Hg		总量
09sdwz-51(1)	1-1	$Au_{0.89}Ag_{0.11}$	93.12	6.17				99.29	938
09sdwz-51(1)	1-2	$Au_{0.88}Ag_{0.12}$	93.41	6.79				100.20	932
09sdwz-43(3)	2-1	$Au_{0.86}Ag_{0.14}$	90.32	8.39				98.71	915
09sdwz-51(6)	3-1	$Au_{0.78}Ag_{0.22}$	86.72	13.09				99.81	869
09sdwz-51(6)	3-2	$Au_{0.78}Ag_{0.22}$	86.28	13.23				99.51	867
09sdwz-51(6)	3-3	$Au_{0.78}Ag_{0.22}$	85.64	13.48				99.12	864
平均值		$Au_{0.83}Ag_{0.12}$	89.25	10.19				99.44	898

测试单位及测试者:中国地质大学(北京)实验中心电子探针室尹经武教授、郝金华博士。

的裂隙中(图2D,图4D),有少量自然金分布在碲金银矿边缘与石英接触的裂隙中。金脉体可穿切碲金银矿但严格终止于黄铜矿,部分金脉体中还可可见少量碲金矿。金芽多为沿裂隙单壁生长,少见对生长,自然金颗粒多在 $5\sim 10\mu m$ 范围内。该类自然金的生成时间明显晚于金属硫化物和碲金银矿,与少量共生的碲金矿同时。

(5)呈粒间金产出 自然金呈长柱状充填于闪锌矿颗粒间,其四周被闪锌矿和碲金银矿包围(图6E)。

光学性质和化学成分

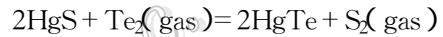
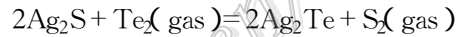
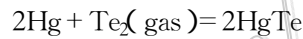
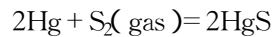
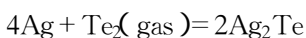
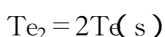
在反光显微镜下,自然金的反射色呈金黄色,反射率明显高于黄铜矿、碲金银矿和针碲金银矿,为均质矿物,无反射多色性和内反射色,表面磨光较差,硬度低。

电子探针结果(表3)表明,自然金的 $w(Au)$ 为 $85.64\%\sim 93.41\%$, $w(Ag)$ 为 $6.17\%\sim 13.48\%$,Ag含量较高。

根据化学成分,计算出自然金的成色,其变化范围为 $864\sim 938$,可见自然金的成分不纯,含有较多的杂质。根据金银系列矿物的六分法(潘兆槽,1994),三道湾子碲金矿床的自然金属于含银自然金系列。

3 形成条件分析

根据矿石矿物组合特点,笔者列出了部分碲化物形成的化学反应方程式:



将有关热力学参数(见文献 Patterson et al., 1984; Afifi et al., 1988a; 1988b; Simon et al., 1996, 1997)代入到下列热力学公式中:

$$\log K = -\Delta G^0 / (2.303RT)$$

即可计算出在 $240^\circ C$ 条件下,上述各化学反应发生时所需的硫逸度和碲逸度的临界值,并由此建立了 $240^\circ C$ 时成矿主阶段的 $\log f_{S_2} - \log f_{Te_2}$ 图解(图7)。由图7可知,成矿主阶段的 $\log f_{S_2}$ 变化范围为 $-14.76 \sim -8.5$, $\log f_{Te_2}$ 变化范围为 $-12.24 \sim -8.12$ 。

通过研究三道湾子碲金矿床各成矿阶段不同期次的矿物组合发现,金属硫化物主要集中在成矿早阶段及成矿主阶段的早期(表1),在大量产出的金属硫化物(如 FeS_2 、 $CuFeS_2$ 、 PbS 和 ZnS)的周边,往往分布有呈浸染状、填隙状的碲化物,说明金属硫化物的形成早于碲化物。随着成矿作用的进行,成矿系统中 f_{Te_2}/f_{S_2} 比值不断增高,在成矿主阶段的中期(即碲化物-自然金阶段),成矿溶液已不具备形成 PbS 等金属硫化物的条件,转而形成了大量以 $PbTe$ 、 $AuAgTe_4$ 、 Ag_3AuTe_2 和 $AuTe_2$ 为主的碲化物,同时伴随有少量自然金的形成(表1)。进入成矿主阶段的晚期(即自然金-石英阶段),因碲化物的大量沉淀而使成矿溶液中 f_{Te_2} 相当低,此时不再有碲化物形成。由于成矿流体中的 f_{S_2} 、 f_{Te_2} 均较低,这时成矿溶液中金的过饱和,有利于独立自然金颗粒的形成(见表1,图6)。此时形成的自然金,或以细脉的

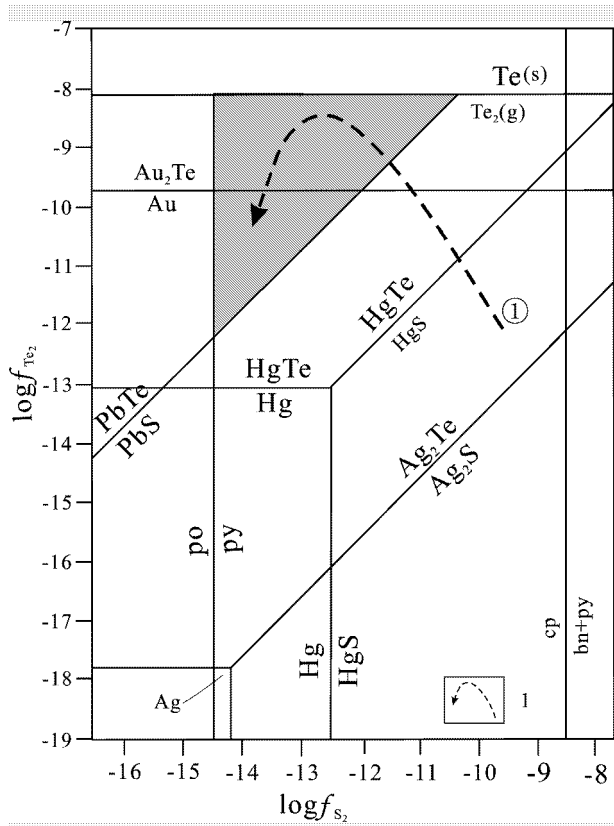


图 7 成矿主阶段 240 °C 时 $\log f_{S_2}$ - $\log f_{Te_2}$ 图

1— $\log f_{S_2}$ - $\log f_{Te_2}$ 变化趋势线

Fig. 7 $\log f_{S_2}$ versus $\log f_{Te_2}$ diagram showing the approximate conditions for dominant mineralization at 240 °C

1—Trend of $\log f_{S_2}$ versus $\log f_{Te_2}$ in the mineralization

形式穿切 Ag_3AuTe_2 等碲化物颗粒,或以单一自然金颗粒的形式存在。

结合矿物共生组合(表 1)和 $\log f_{S_2}$ - $\log f_{Te_2}$ 相图(图 7)还可见,在成矿主阶段早-中期可生成 Au_2Te ,但在成矿主阶段晚期仅有自然金产出而不出现 Au_2Te 。这种变化趋势是成矿流体 f_{Te_2} 逐渐降低所致。当 f_{Te_2} 低至 Au_2Te/Au 平衡线(图 7)时, Au_2Te 在成矿环境中不能稳定存在而直接形成自然金。

4 结 论

黑龙江三道湾子碲金矿床内,既存在大量碲金、银矿、针碲金银矿、碲金矿、碲银矿和碲铅矿等碲化物,又有大量黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿等硫化物产出,同时也存在大量独立自然金。

该矿床的矿物共生组合表明,在成矿作用的早

期,因成矿流体具有较高 f_{S_2} 、较低 f_{Te_2} ,故而形成了大量金属硫化物。此时,成矿溶液中的 Te 主要以类质同象的形式进入硫化物的晶格中,没有或很少有碲化物及自然金的形成。在成矿主阶段,随着成矿物理化学条件的改变,成矿流体的 f_{S_2} 降低而 f_{Te_2} 逐渐升高,大量 Te 与 Au、Ag 结合形成碲化物而不形成金属硫化物。在成矿作用的晚期,随着大量碲化物的形成,致使成矿流体的 f_{Te_2} 降低,导致成矿流体中的 f_{S_2} 和 f_{Te_2} 都较低,有利于自然金的大量形成。因此,在一定温度下,较高的 f_{Te_2}/f_{S_2} 比值是形成大量碲化物的关键因素。

References

- Afifi A M, Kelly W C and Esscue E J. 1988a. Phase relations among tellurides, sulfides, and oxides: I. Thermochemical data and calculated equilibria [J]. *Econ. Geol.*, 83: 377-394.
- Afifi A M, Kelly W C and Esscue E J. 1988b. Phase relations among tellurides, sulfides, and oxides: II. Applications to telluride-bearing ore deposits [J]. *Econ. Geol.*, 83: 395-404.
- Chen B W and Chen T Y. 2007. Trans-Asian tectonic mega-belt: Its principal characteristics and metallogeny [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(5): 865-876 (in Chinese with English abstract).
- Jiang S H, Nie F J, Zhang Y and Hu P. 2004. The latest advances in the research of epithermal deposits [J]. *Earth Science Frontiers*, 11(2): 401-411 (in Chinese with English abstract).
- Lü J, Wang J M, Yue B J, Wang H B, Yu R W and Zhao L G. 2005. Fluid inclusion and stable isotope geochemistry of Sandaowanzi gold deposit [J]. *Geology and Exploration*, 41(3): 33-37 (in Chinese with English abstract).
- Lü J, Zhao Z D, Cao Y P, Han Z Z, Zhang A K and Yu J C. 2009a. Geological characteristics and genesis of the Shandaowanzi gold deposit in Heilongjiang Province [J]. *Geology in China*, 36(4): 853-859 (in Chinese with English abstract).
- Lü J, Liu X G, Han Z Z, Zhang A K, Zhao H D and Li D R. 2009b. A study on ore features and gold occurrence state of the Sandaowanzi gold deposit [J]. *Geology and Exploration*, 45(4): 395-401 (in Chinese with English abstract).
- Pan Z L. 1994. Crystallography and mineralogy [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 23-25 (in Chinese).
- Pang J L. 1995. The current situation and tendency of research on epithermal gold deposits [J]. *Gold Geology*, 1(3): 34-38 (in Chinese with English abstract).
- Patterson G C and Watkinson D H. 1984. Metamorphism and supergene alteration of Cu-Ni sulfides, Thierry mine, northwestern Ontario [J]. *Canadian Mineralogist*, 22: 13-21.
- Qian H D, Chen W, Xie J D and Huang J. 2000. A review of tellurium mineral [J]. *Geological Journal of China Universities*, 6(2): 178-

- 187 (in Chinese with English abstract).
- Qi J P, Chen Y J and Franco P. 2005. Geological Characteristics and tectonic setting of the epithermal deposits in the northeast Chiar [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 25(2):47-59 (in Chinese with English abstract).
- Si R J, Gu X X, Zhou D S, Gao P and Yang S Q. 2006. Dispersed elements: Geochemistry information in gold deposits should be paid attention [J]. *Geology and Exploration*, 42(1): 68-71 (in Chinese with English abstract).
- Simon G, and Essene E J. 1996. Phase relation among selenides, sulfides, tellurides, and oxides: I. Thermodynamic data and calculated equilibria [J]. *Econ. Geol.*, 91:1183-1208.
- Simon G, Kesler S E and Essene E J. 1997. Phase relation among selenides, sulfides, tellurides, and oxides: II. Application to selenide-bearing ore deposits [J]. *Econ. Geol.*, 92:468-484.
- Tran M D, Liu J L, Hu J J, Zou Y X and Zhang H Y. 2008. Discovery and geological significance of Sandaowanzi telluride type gold deposit in the northern Daxing'anling, Heilongjiang, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 27(4): 584-587 (in Chinese with English abstract).
- Wu Z Y, Wang H B, Xu H D and Zhou Y C. 2005. Geological and geochemical studies of the Sandaowanzi gold deposit, Heihe County, Heilongjiang Province [J]. *Geological Review*, 51(3):264-267 (in Chinese with English abstract).
- Zhao S J, Liu J L, Bai X D, Zhao H B, Lü J, Chen Y and Tran M D. 2010. Fluid inclusions and sulfur isotopes of Sandaowanzi gold telluride deposit, Heilongjiang Province [J]. *Mineral Deposits*, 29(3): 476-488 (in Chinese with English abstract).
- [J]. *岩石学报*, 23(5):865-876.
- 陈美勇, 刘俊来, 胡建江, 邹运鑫, 张宏远. 2008. 大兴安岭北段三道湾子碲化物型金矿床的发现及意义 [J]. *地质通报*, 2008, 27(4):584-587.
- 江思宏, 聂凤军, 张义, 胡朋. 2004. 浅成低温热液型金矿床研究最新进展 [J]. *地学前缘*, 2004, 11(2):401-411.
- 吕军, 王建民, 岳邦江, 王洪波, 于荣文, 赵立国. 2005. 三道湾子金矿床流体包裹体及稳定同位素地球化学特征 [J]. *地质与勘探*, 41(3):33-37.
- 吕军, 赵志丹, 曹亚平, 韩振哲, 张爱奎, 于俊川. 2009a. 黑龙江三道湾子金矿床地质特征及成因探讨 [J]. *中国地质*, 36(4):853-859.
- 吕军, 刘旭光, 韩振哲, 张爱奎, 赵寒冬, 李德荣. 2009b. 三道湾子金矿床矿石特征及金的赋存状态研究 [J]. *地质与勘探*, 45(4):395-401.
- 庞奖励. 1995. 浅成低温热液金矿研究现状及其趋势 [J]. *黄金地质*, 1(3):34-38.
- 潘兆橹. 1994. *结晶学及矿物学* [M]. 北京:地质出版社. 23-25.
- 钱汉东, 陈武, 谢家东, 黄瑾. 2000. 碲矿物综述 [J]. *高校地质学报*, 6(2):178-187.
- 祁进平, 陈衍景, Franco Pirajno. 2005. 东北地区浅成低温热液矿床的地质特征和构造背景 [J]. *矿物岩石*, 25(2):47-59.
- 司荣军, 顾雪祥, 周登诗, 高鹏, 杨升岐. 2006. 分散元素-金矿床中应引起注意的地球化学信息 [J]. *地质与勘探*, 42(1):68-71.
- 武子玉, 王洪波, 徐海东, 周永昶. 2005. 黑龙江黑河三道湾子金矿床地质地球化学研究 [J]. *地质论评*, 51(3):264-267.
- 赵胜金, 刘俊来, 白相东, 赵海滨, 吕军, 陈越, 陈美勇. 2010. 黑龙江三道湾子碲化物型金矿床流体包裹体及硫同位素研究 [J]. *矿床地质*, 29(3):476-488.
- 吕军, 岳邦江, 谷华娟, 等. 2008. 黑龙江省黑河市三道湾子岩金矿普查报告 [R]. 黑龙江省地质调查研究总院齐齐哈尔分院. 31-32.

附中文参考文献

陈炳蔚, 陈廷愚. 2007. 贯亚洲巨型构造带的基本特征和成矿作用