

安徽天井山金矿成矿流体特征及成矿过程初探

姜妍岑¹, 谢玉玲¹, 唐燕文¹, 李应栩², 王爱国³, 曾献育⁴, 李媛¹, 刘保顺¹

(1. 北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 100083; 2. 中国地质调查局 成都地调中心, 四川 成都 610000;
3. 中国地质调查局 南京地质矿产研究所, 江苏 南京 210016; 4. 安徽省地质矿产勘查局 332 地质队,
安徽 黄山 245000)

摘要: 本文在矿床地质调研的基础上, 通过主要矿石和蚀变岩石的岩矿相、SEM/EDS、流体包裹体岩相学、显微测温 and 成分分析, 对天井山金矿成矿流体特征、流体来源及成矿过程进行了研究。结果表明, 金矿化主要发育于石英脉中, 少数产于蚀变围岩中, 矿区蚀变以硅化、绢云母化最为发育, 另发育含铁碳酸盐化、绿泥石化、黄铁矿化、黄铜矿化、方铅矿化、闪锌矿化等。金矿化发生于石英脉形成后的脆性变形阶段, 与之相关的蚀变以绢云母化为主, 其次为含铁碳酸盐化和硫化物矿化。金主要以自然金的形式与绢云母共生于石英脉的裂隙中或蚀变围岩中。通过与绢云母同期的流体包裹体研究表明, 与金矿化有关的成矿流体为富水、含 CO₂ 的中高温(286~380℃)、低盐度流体(3.0%~5.1% NaCl_{eq}, 质量分数), 单个流体包裹体的 LA-ICP-MS 成分分析表明, 成矿流体中富含 Pb、Zn、Cu、Bi、Mo、Sb 等金属元素。综合流体包裹体中水的 H 同位素组成和流体成分特征, 成矿流体主要为岩浆水的贡献。含 CO₂ 的岩浆流体沿活化的先期断裂上升并发生流体沸腾, 在流体沸腾过程中 CO₂ 进入气相而改变了流体的 pH 值, 造成金和其它金属硫化物的沉淀, 同时形成石英裂隙中和围岩中的绢云母化、含铁碳酸盐化等蚀变。

关键词: 天井山金矿; 流体包裹体; LA-ICP-MS; 成矿过程

中图分类号: P618.51

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2013)03-0329-12

A tentative discussion on the characteristics of ore-forming fluid and ore-forming process of the Tianjingshan gold deposit in Anhui Province

JIANG Yan-cen¹, XIE Yu-ling¹, TANG Yan-wen¹, LI Ying-xu², WANG Ai-guo³, ZENG Xian-yu⁴,
LI Yuan¹ and LIU Bao-shun¹

(1. School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, China Geological Survey, Chengdu 610000, China; 3. Nanjing Institute of Geology and Mineral Resources, China Geological Survey, Nanjing 210016, China; 4. No. 332 Geological Party, Anhui Bureau of Geology and Mineral Exploration, Huangshan 245000, China)

Abstract: Based on field survey, petrographic, ore microscopic and SEM/EDS analyses of ores and altered wall rocks as well as petrographic, microthermometric, LRM and LA-ICP-MS analyses of fluid inclusions in quartz, this paper deals with the characteristics and origin of ore-forming fluid and the metallogenic process in the Tianjingshan gold deposit. The results show that gold mineralization occurs dominantly in quartz veins and subordinately in altered wall rocks and is related mainly to sericitization and Fe-bearing carbonization and subordinately to chloritization, pyritization, chalcopyritization, galenitization and sphaleritization. Gold mineralization took

收稿日期: 2012-11-10; 修订日期: 2013-03-11

基金项目: 国家科技计划资助项目(2011BAB04B00)

作者简介: 姜妍岑(1988-), 矿物学、岩石学、矿床学专业, 硕士研究生, E-mail: jiangyancen@163.com; 通讯作者: 谢玉玲(1963-), 博士, 教授, 主要从事矿床学和资源勘查等方面的研究, E-mail: yulingxie63@hotmail.com.

place after the formation of quartz veins and took place during the brittle deformation stage of quartz. Native gold has been found together with sericite as infillings in quartz fractures or as cement of quartz breccia. Fluid inclusion analyses indicate that the ore-forming fluid is a water-rich and CO₂-bearing fluid characterized by middle-high temperature (286~380℃) and low salinity (3.0%~5.1% NaCl_{eq}). The LA-ICP-MS analyses of fluid inclusions in quartz reveal high Pb, Zn, Cu, Bi, Mo and Sb in the fluid. The H isotope measurements together with the enrichment of polymetallic components in ore-forming fluid imply an obvious magmatic origin. The upward migration of the magmatic fluid along the reactivated fault and the decreasing of temperature and pressure caused the boiling of the fluid. During the boiling process, the CO₂ preferentially went into the vapor phase and resulted in pH change of the ore-forming fluid. The change of pH caused the precipitation of gold and sulfides and also generated sericitization and Fe-carbonation.

Key words: Tianjingshan gold deposit; fluid inclusions; LA-ICP-MS; ore-forming process

天井山金矿位于安徽省休宁县,由孙坑、韩家、新岭脚 3 个矿段组成,其北为小贺铅锌矿。矿区属青山-小贺-富竹圩构造岩浆岩带(吴建阳等,2010)。从成矿区带划分上,天井山金矿处于我国新近确立的钦-杭成矿带东段(图 1a)。钦-杭成矿带大体呈 NE 向沿钦-杭(钦州湾-杭州湾)古板块结合带及其两侧展布。钦-杭结合带位于扬子和华夏两板块之间,南起广西钦州湾,经梧州-郴州-萍乡-德兴,北至浙江杭州。杨明桂等(1997)将绍兴-北海断裂带作为其东南界线,而将凭祥-歙县断裂带作为其西北界线。钦-杭结合带在长沙-萍乡附近走向明显变化,以此为界可将该成矿带分为东、西两段,天井山矿区即位于该成矿带东段的中部。

天井山金矿是安徽皖南地区金矿的典型代表,前人对该矿床的地质、地球化学等进行了一定的工作(郑新建等,2006;吴建阳等,2010;段留安等,2011),但对成矿流体特征、矿床成因研究方面尚较为薄弱,对矿床成因和成矿物质来源等仍存在不同认识。本文在详细的野外地质调研、主要矿石和蚀变岩石的岩矿相鉴定、主要矿物组成的 SEM/EDS 分析、流体包裹体寄主矿物石英的阴极发光等基础上,开展了流体包裹体岩相学、显微测温及成分分析,对成矿流体特征、流体演化、矿质沉淀机制和矿床成因进行了探讨。

1 区域地质背景

大地构造位置上,天井山金矿位于赣东北断裂带北侧,属华夏与扬子板块对接部位(钦-杭古板块结合带)中江南古陆之溪口片岩带(徐有华等,2008)。溪口片岩带北西为扬子板块,南东为怀玉构

造单元。矿床为产于韧性剪切带中的石英脉型和蚀变岩型金矿床,其产出的大地构造位置及矿床特征与江西德兴的金山金矿床很相似,有着很好的成矿条件和广阔的找矿空间(吴建阳等,2010)。区内广泛出露中、新元古界浅变质基底岩系和零星分布的古生界和中生界,基底地层为青白口系火山岩和火山碎屑岩以及中元古界牛屋组、木坑组浅变质复理石建造。区域岩浆活动强烈,包括元古宙晋宁期花岗岩和中生代燕山期花岗岩、二长花岗(斑)岩、花岗闪长(斑)岩、花岗斑岩等。从区域已有研究成果看,燕山期中酸性侵入岩与成矿关系密切(李治平等,1989)。

区域内经历了复杂的构造变形历史,其中加里东构造事件对皖浙赣相邻区产生了较大影响,奠定了该区基本构造格局,并对晋宁期的基底变形产生影响,印支、燕山事件对加里东构造形迹产生了不可忽略的改造,并最终形成了基本延续至今的构造格局(余心起等,2006)。区内主构造线方向以 NE、NNE 和近 EW 向构造为主。

2 矿床地质特征

矿区出露的地层主要为牛屋组火山碎屑岩系和井潭组变质细碎屑岩系,两套地层之间为断层接触(图 1b)。青白口系井潭组分布在矿区南东侧,为白际岭岛弧地体的火山碎屑岩系,主要岩性为变质安山岩、变质流纹质凝灰岩夹含碳千枚岩、凝灰质粉砂岩、流纹斑岩及变质英安斑岩等;中元古界牛屋组分布在矿区北西侧,为障公山复理石地体的变质细碎屑岩系,主要岩性为:青灰、黄绿、黄褐色千枚状砂岩,灰黑色粉砂质千枚岩夹含钙砂岩等(段留安等,2011)。

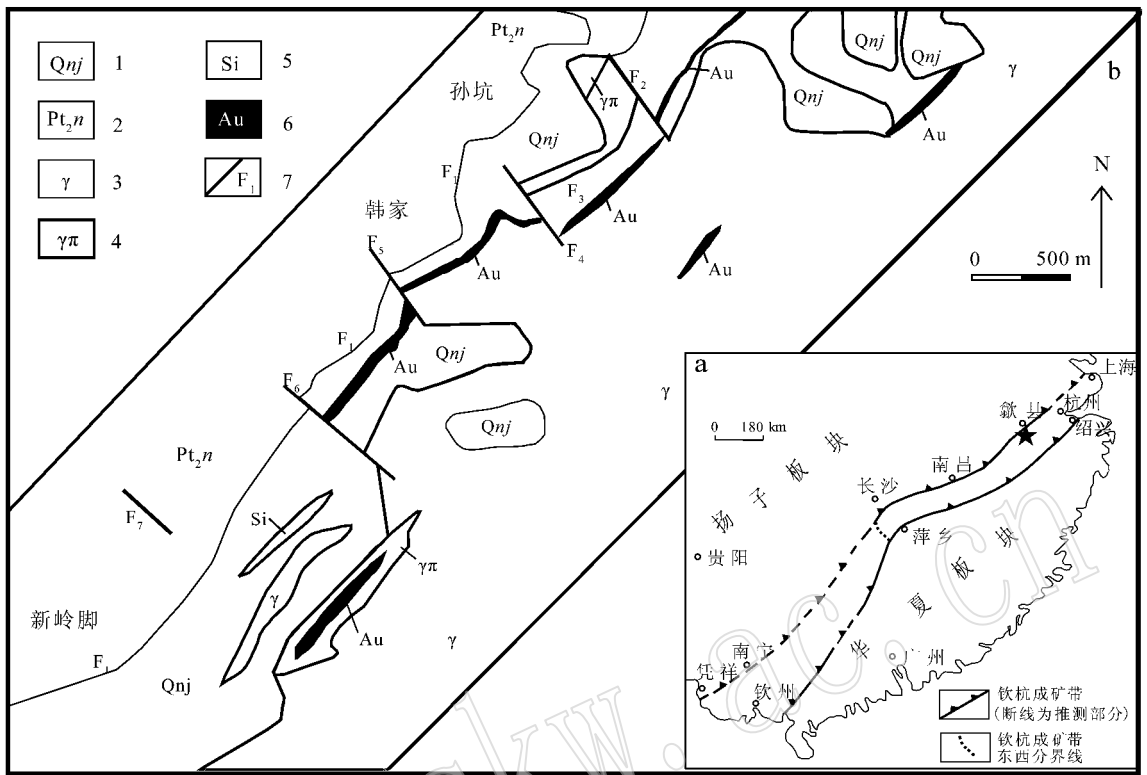


图1 钦杭成矿带简图(a,据杨明桂等,1997修绘)及天井山矿区地质简图(b,据段留安等,2011修绘)

Fig. 1 Simplified geological map of the Qingzhou-Hangzhou metallogenic belt (a, after Yang Minggui *et al.*, 1997) and geological map of Tianjingshan area (b, after Duan Liu'an *et al.*, 2011)

- 1—青白口系井潭组;2—中元古界牛屋组;3—晋宁期花岗岩;4—燕山期花岗岩斑岩;5—硅质脉;6—金矿体;7—断裂及编号
1—Jingtai Formation of Qingbaikou system; 2—middle Proterozoic Niuwu Formation; 3—granite of Jinning period; 4—Yanshanian granite porphyry; 5—siliceous vein; 6—Au ore body; 7—fault and its serial number

受多期次构造活动影响,区内断裂构造发育,主要有NE、NW和近SN向三组。其中NE向断裂规模最大、延伸较长、具有多期活动的特点,为区内主要控矿断裂,控制着区内矿化带的展布;NW向及SN向断裂为次级断裂,规模一般较小,以平移断层为主,对矿体起破坏作用。

区内出露的侵入岩主要有晋宁期花岗岩和燕山期花岗岩斑岩(吴建阳等,2010)。晋宁期花岗岩占矿区面积的三分之二以上,分布于矿区的南东侧(图1),主要岩性为片麻状花岗岩。燕山期花岗岩一般沿晋宁期花岗岩与围岩井潭组地层接触带侵入,呈不规则的NE向延伸的岩枝、岩脉状产出。

矿区主要矿化带展布受构造控制明显,产于晋宁期花岗岩及围岩中变形强烈的剪切带中。金矿化主要赋存于石英脉及其蚀变岩中,矿石以石英脉型为主,另有千枚岩型、碳质千枚岩型。矿区发育的围岩蚀变主要有硅化、绢云母化、碳酸盐化、黄铁矿化、

方铅矿化、闪锌矿化、绿泥石化、高岭石化等。其中,绢云母化、黄铁矿化、含铁碳酸盐化与金成矿关系最为密切。可见早期石英脉的角砾岩化和碎裂结构,绢云母化和金矿化即发育于石英角砾间的绢云母化胶结物中。主要矿石和蚀变岩样品的岩矿相分析和SEM/EDS分析表明,矿区主要金属矿物包括自然金、黄铁矿、黄铜矿、黝铜矿、毒砂、方铅矿、闪锌矿等。主要脉石矿物为石英、绢云母、长石、绿泥石、碳酸盐矿物等。与金矿化有关的蚀变为绢云母化、含铁碳酸盐化和硫化物矿化,蚀变矿物组合包括绢云母、铁白云石、菱铁矿和少量金属硫化物,如黄铜矿、黄铁矿、黝铜矿、毒砂、方铅矿、闪锌矿等。

根据脉体穿插关系、矿物组成及矿石结构特征,天井山金矿的成矿过程可划分为3个阶段:①无矿石英脉阶段,主要表现为地层中各种石英脉,常呈透镜状顺层产出,或斜交地层片理,少数垂直地层片理产出,未见金矿化。这一阶段形成的石英常常被后

期构造破坏形成碎裂结构、角砾状构造；② 绢云母—含铁碳酸盐阶段，为主要的金成矿阶段。表现为早期石英脉发生脆性变形，如碎裂岩化(图 2a, b)、角砾

岩化等，并伴有石英裂隙间和围岩地层中的绢云母化(图 2b)、含铁碳酸盐化、硫化物矿化(图 2c, d, e)及金矿化(图 2f, 图 3)。含铁碳酸盐矿物主要为铁白云

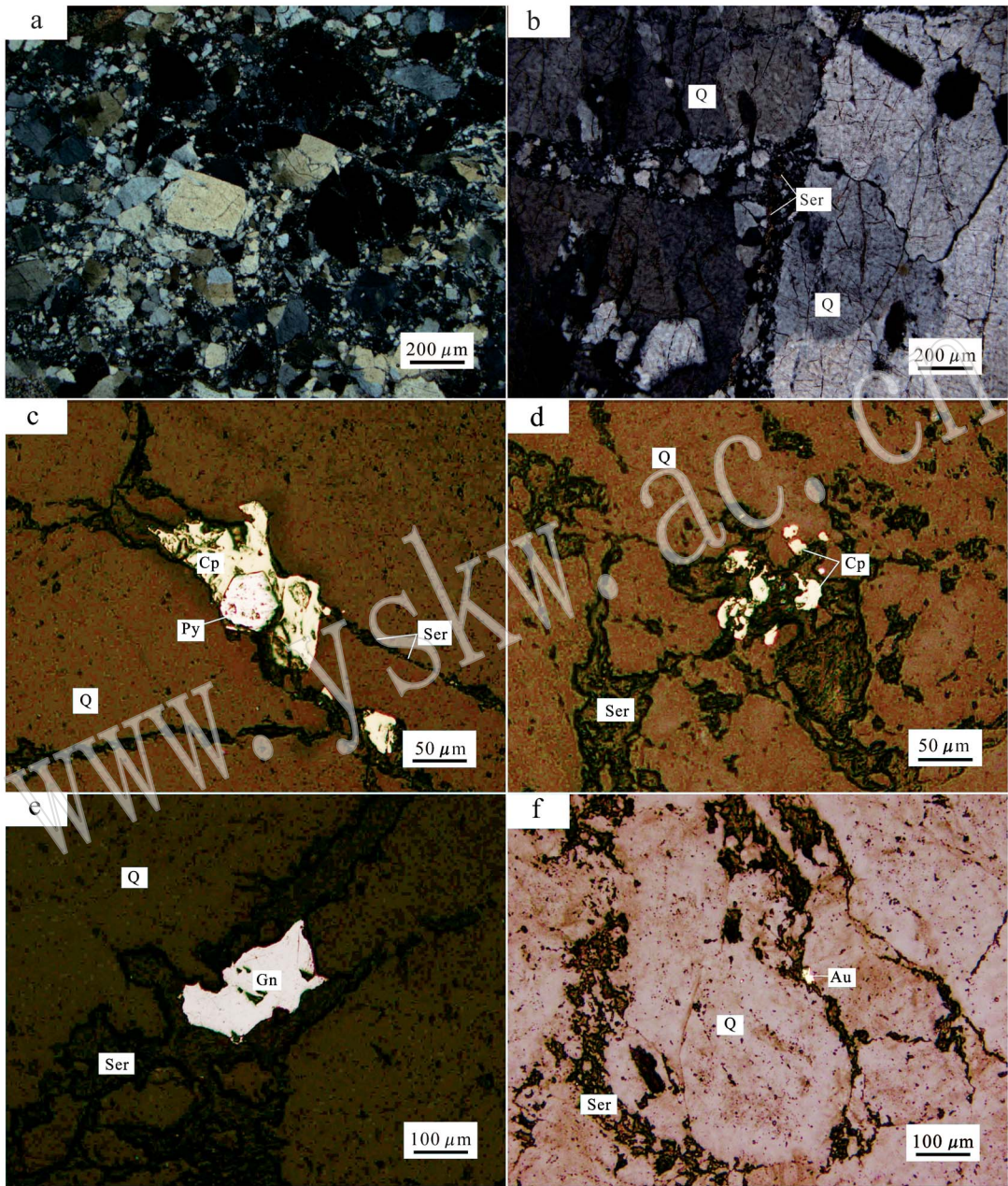


图 2 矿化石英脉的显微镜下照片

Fig. 2 Micrographs of mineralized quartz veins

a—石英的碎裂结构(透射光,正交偏光); b—石英粒间的碎裂结构与绢云母化(透射光,正交偏光); c—石英裂隙间与绢云母化共生的黄铁矿、黄铜矿(反射光,单偏光); d—石英裂隙间与绢云母化共生的黄铜矿(反射光,单偏光); e—石英裂隙间与绢云母化共生的方铅矿(反射光,单偏光); f—石英裂隙间与绢云母化共生的自然金(反射光,单偏光); Q—石英; Au—自然金; Ser—绢云母; Py—黄铁矿; Cp—黄铜矿; Gn—方铅矿

a—quartz with cataclastic texture (transmitted light, crossed nicols); b—cataclastic texture and sericitization in quartz fractures (transmitted light, crossed nicols); c—pyrite, chalcopyrite and sericitization in quartz fractures (reflected light and polarized light); d—chalcopyrite and sericitization in quartz fractures (reflected light and polarized light); e—galena and sericitization in quartz fractures (reflected light and polarized light); f—gold and sericitization in quartz fractures (reflected light and polarized light); Q—quartz; Au—native gold; Ser—sericite; Py—pyrite; Cp—chalcopyrite; Gn—galena

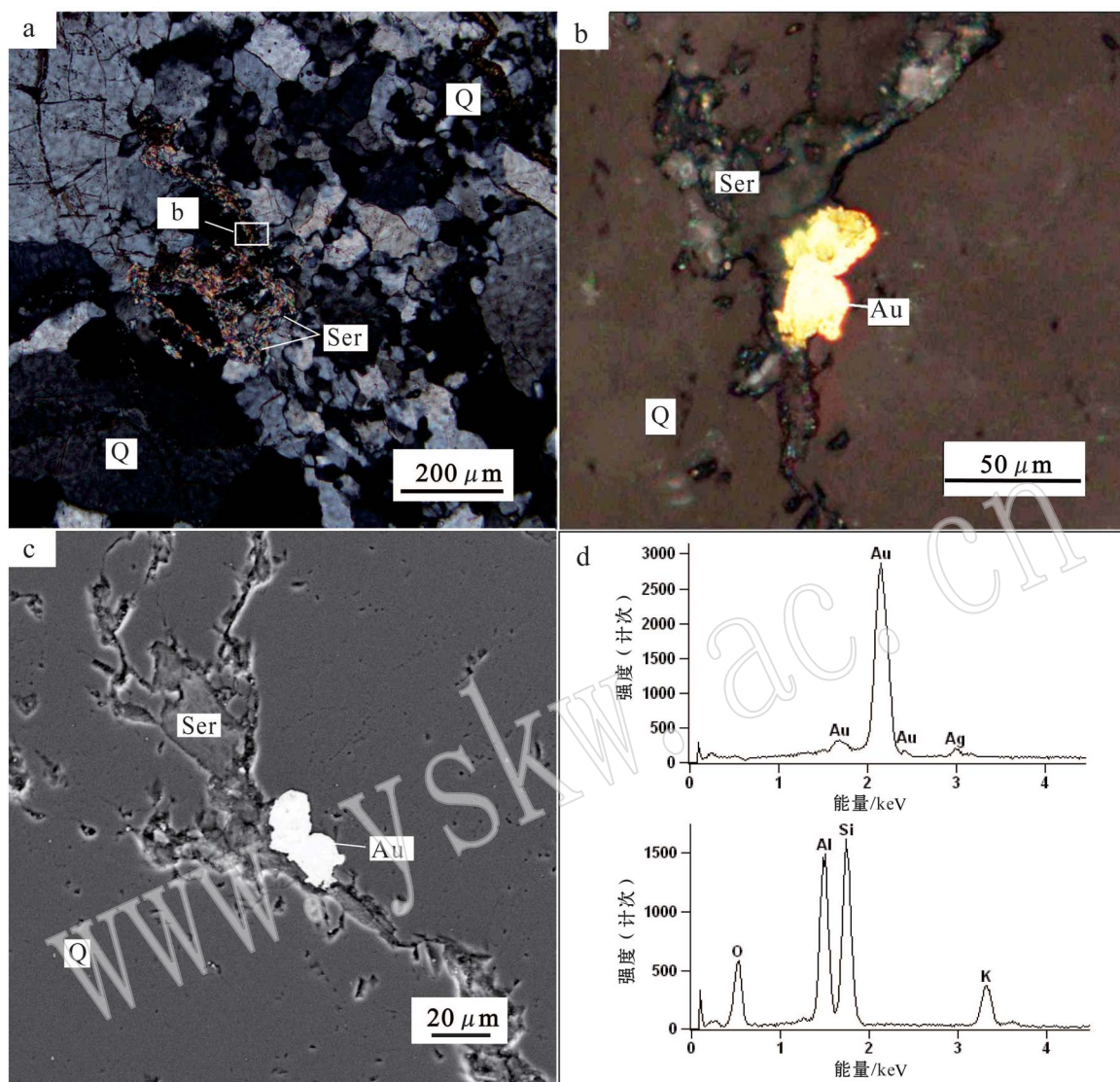


图3 天井山金矿自然金的显微镜、扫描电镜照片及能谱图

Fig. 3 Microphotograph and energy spectra of native gold under microscope

a—石英裂隙间的绢云母化(透射光,正交偏光); b—照片a局部放大的反光镜下照片; c—照片a局部的背散射电子照片;
d—自然金和绢云母的能谱图; 矿物缩写同图2

a—sericitization and brecciated quartz fractures (transmitted light, crossed nicols); b—native gold and sericite in quartz fracture (reflected light, see Fig. 3a for the frame); c—BSE image of native gold and sericite in quartz fracture; d—X-ray energy spectra of native gold and sericite

石(图4a, b)和镁菱铁矿(图4c, d)。硫化物包括黄铁矿、黄铜矿、黝铜矿(图4a, b)、毒砂、方铅矿、闪锌矿等,另还发现少量独居石(图4c, d)、金红石、萤石等;石英的阴极发光结果(图5)也表明,早期石英具有生长环带,可见绢云母化蚀变切穿早期石英的生长环带;③方解石阶段,主要表现为白色方解石细脉切穿地层片理和早期石英脉。

3 流体包裹体研究

3.1 样品及测试方法

本次研究样品主要采自孙坑矿段地表和韩家矿段的1号平硐、6号平硐、PD200平硐及地表。研究对象主要为矿化石英脉。先将样品磨制成厚度约

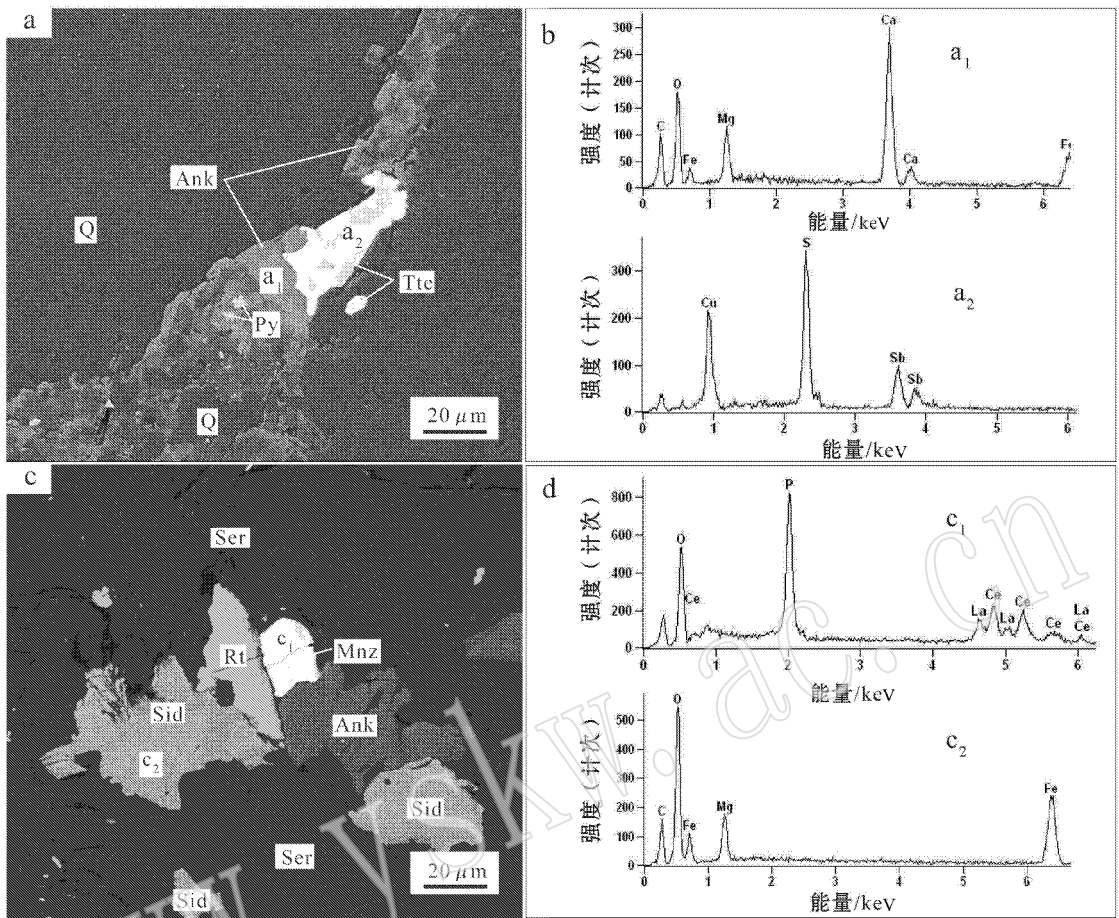


图 4 石英裂隙中蚀变矿物的扫描电镜照片及能谱图

Fig. 4 Energy spectra and scanning electron microscope (SEM) images of sericitization

a—石英裂隙间的绢云母化蚀变的 SEM 图片；b—照片 a 中部分矿物的 X 射线能谱图（a₁ 铁白云石，a₂ 黝铜矿）；c—石英中碳酸盐硫化物脉；d—照片 c 中部分矿物的能谱图（c₁ 独居石 c₂ 菱铁矿）；Ank—铁白云石；Tte—黝铜矿；Mnz—独居石；Rt—金红石；Sid—菱铁矿；其它矿物缩写同图 2

a—SEM image of sericitization in quartz fractures；b—some minerals in image a (a₁ ankerite, a₂ tetrahedrite)；c—carbonate and sulfide vein in quartz；d—some minerals in image c (c₁ monazite, c₂ magnesian siderite)；Ank—ankerite；Tte—tetrahedrite；Mnz—monazite；Rt—rutile；Sid—magnesian siderite

0.3 mm 双面抛光的包裹体片进行流体包裹体岩相学观察,然后选择其中有代表性的样品进行显微测温、激光显微拉曼探针(LRM)分析和流体包裹体成分的 LA-ICP-MS 分析。流体包裹体中水的 H₂O 同位素分析所用样品为破碎至 0.1~0.3 mm 的单矿物石英(纯度达 98% 以上)。

流体包裹体岩相学和显微测温实验在北京科技大学流体包裹体实验室进行,所用冷热台型号为 Linkam THMS 600(测定的温度范围为 -196~+600℃),冷冻数据和均一温度数据精度 30℃ 以下时为 ±0.1℃,30℃ 以上时为 ±1.0℃。

单个流体包裹体的激光拉曼探针分析在核工业北京地质研究院流体包裹体实验室进行,测试仪器

为 Lab RAM HR800 型研究级显微激光拉曼光谱仪,激光波长为 633 nm。本次拉曼实验选择的所测光谱计数时间为 8 s,100~4 200 cm⁻¹ 全波段一次取峰。激光束斑大小约 1 μm,光谱分辨率 0.14 cm⁻¹。H₂O 同位素分析在北京核工业地质研究院稳定同位素实验室完成。测试仪器为质谱仪 MAT-253。LA-ICP-MS 分析在澳大利亚 James Cook 大学高级测试中心(Advanced Analysis Center,简称 AAC)进行,所用的仪器为 GeoLas 193 nm Excimer 激光剥蚀系统,N₂ 做为送载气体,配以 Varian 820-MS 系列电感耦合等离子质谱仪。

含 CO₂ 流体包裹体的盐度由 Collins(1979)的 CO₂ 笼合物分解温度和盐度关系表求得,对气泡较

小、 CO_2 含量低的流体包裹体,因无法精确测定 CO_2 笼形物分解温度,其盐度根据Hall等(1988)提供的冰点和盐度的关系计算得出。

3.2 流体包裹体岩相学及显微测温分析

石英中流体包裹体较为丰富,但多较小,一般在 $1\sim 15\ \mu\text{m}$,多 $< 7\ \mu\text{m}$,形状为拉长状、多边形、圆形、椭圆形以及不规则状等。流体包裹体岩相学观察表明,石英中流体包裹体多显示次生包裹体的特征,成群、成簇或线状分布,未发现典型的原生流体包裹体。石英中流体包裹体可明显划分为两个期次(FI-1和FI-2)。早期流体包裹体(FI-1)成群、成片分布,或呈断续的串状分布,但包裹体形态较为规则,呈四边形、圆形、椭圆形;晚期包裹体(FI-2)明显沿愈合裂隙分布,包裹体形态多为拉长的不规则状,低倍镜下显示为一暗色裂隙,其常切穿早期包裹体群(FI-1),并形成叠加型包裹体。石英的阴极发光结果显示,石英至少经历了两期流体蚀变作用(在图5b中分别对应于石英中灰色和高亮的纹理)。根据流体包裹体室温下的相态特征,可将石英中流体包裹体分为①气液两相流体包裹体(AV类,图6a)和②纯气相流体包裹体(V类,图6b),暂未发现含子矿物的多相流体包裹体。另常见卡脖子形成的不同气相充填度的流体包裹体共生(图6c)。气液两相包裹

体其气相百分数变化较大,从 $< 5\%$ 至 60% 以上不等,其中以 $30\%\sim 40\%$ (图6a)和 $5\%\sim 10\%$ (图6d)为主,分别对应于FI-1和FI-2,其中FI-1与绢云母化阶段有关。

流体包裹体(FI-1)显微测温结果表明(表1),FI-1气液相均一温度在 $286\sim 380^\circ\text{C}$,盐度在 $3.0\%\sim 6.12\%$ (NaCl_{eq} ,质量分数,下同)表明与成矿有关的流体为中高温、低盐度流体。FI-2气液相均一温度($135\sim 195^\circ\text{C}$)和盐度($1.91\%\sim 5.56\%$)变化范围较大(图7),造成这一现象的原因可能有以下几种可能:①部分低气相充填度的包裹体为早期中高温、低盐度流体在低温时发生卡脖子现象形成,这类包裹体具有较低的气相充填度和均一温度,但盐度与中高温流体包裹体类似;②晚期低温、低盐度流体对主成矿期中高温、较低盐度流体包裹体进行改造,形成盐度介于中高温、低盐度流体与低温低盐度流体之间,但均一温度相对较低。由于矿区发现的包裹体均较小,对其中气相充填度过大($> 60\%$)和纯气相包裹体未获得有效的测温数据。

3.3 流体包裹体成分的激光拉曼探针(LRM)分析

测试选取了7件有代表性的样品进行了LRM测试,结果表明,代表主成矿期的气液两相流体包裹体中,气相以 CO_2 为主(图8a),液相以 H_2O 为主,并

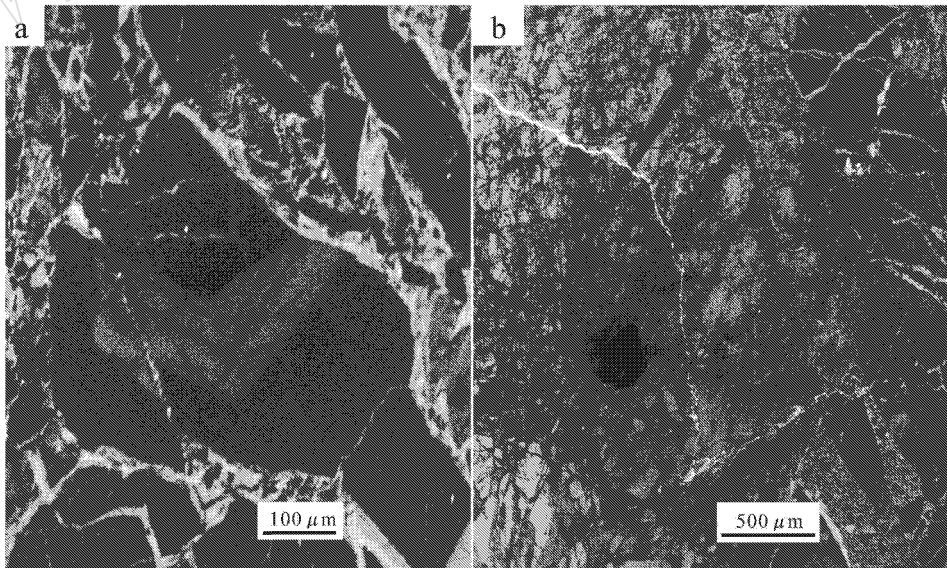


图5 天井山金矿矿化石英脉的阴极发光照片

Fig. 5 Cathodoluminescence images of quartz in the Tianjingshan gold deposit

a—破碎石英角砾中的生长环带;b—碎裂石英及晚期流体活动迹象(亮白色)

a—growth zoning in fragmented quartz breccia;b—fragmented quartz and later fluid alteration fingerprint (bright white line)

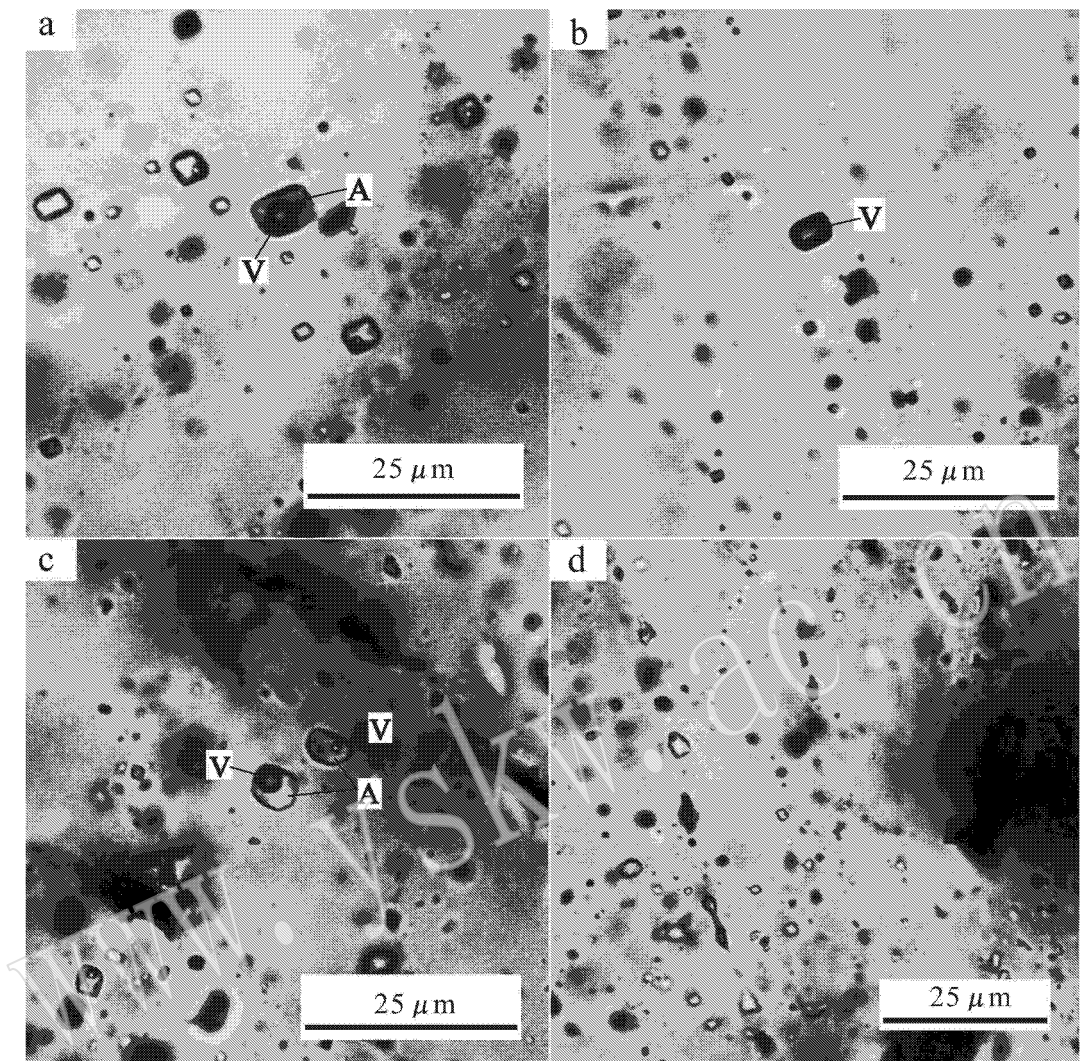


图 6 天井山金矿流体包裹体显微照片

Fig. 6 Microphotographs of fluid inclusions in the Tianjingshan Au deposit

- a—与绢云母化有关的 AV 类流体包裹体；b—与绢云母化有关的 V 类流体包裹体；c—卡脖子形成的富气相和富液相流体包裹体；
d—晚期次生流体包裹体
- a—AV type fluid inclusions related to sericitization；b—V type fluid inclusions related to sericitization；c—coexistence of fluid inclusions with varied vapor volume percentages；d—late secondary fluid inclusions

含 CO_3^{2-} (1064 cm^{-1} 图 8b), 与该期蚀变矿物组合中发现碳酸盐矿物的结果吻合。富气相和纯气相包裹体中气相也以 CO_2 为主, 并含少量 N_2 (2326 cm^{-1} 图 8c d)。

3.4 流体包裹体成分 LA-ICP-MS 分析

由于石英在激光下易破裂且剥蚀效果欠佳, 因此此次流体包裹体 LA-ICP-MS 分析效果欠佳, 仅得到 2 个主成矿期气液相流体包裹体的成分谱图。由于测试仪器中 Na 的背景值偏高, 因此无法用 Na

做为内标进行定量, 但从流体包裹体的 LA-ICP-MS 谱图(图 9)上仍可以提供成矿流体成分的定性信息。对寄主矿物石英的 EPMA 分析表明, 石英中主要元素组成为 Si、O 并含少量 Al、Ti 等, 但其它金属元素如 Pb、Zn、Cu、Mo、Sb、Bi 等含量低于检出限, 因此包裹体 LA-ICP-MS 谱图中高的 Pb、Zn、Cu、Mo、Sb、Bi 峰显示流体中富含成矿金属元素。流体包裹体的 LA-ICP-MS 谱图中未显示 Au 和 Fe 的峰, 但可见 Ag 的峰。

表 1 气液两相流体包裹体的显微测温结果
Table 1 Microthermometric results of gas and liquid two-phase fluid inclusions

成矿阶段	样号	冰点	CO ₂ 笼形物分解温度/℃	均一温度/℃	盐度/% (NaCl _{eq})
II	TJS-2001		6.8	286	6.12
II	TJS-2010		8.2	319	3.57
II	TJS-2095		7.5	380	4.87
II	TJS-2095		8	345	3.95
II	TJS-2095		8.4	340	3.19
II	TJS-2095		8.5	315	3
II	TJS-2095		7.4	340	5.05
III	TJS-2021	-3.3		195	5.41
III	TJS-2021	-3.4		194	5.56
III	HJQ-b1	-3.5		192	5.71
III	TJS-2010	-1.6		192	2.74
III	ZTC01-RZ1	-3.3		188	5.41
III	TJS-2021	-2.1		183	3.55
III	GCCM-RZ3	-2		170	3.39
III	TJS-2001	-1.4		159	2.41
III	TJS-2010	-1.4		154	2.41
III	TJS-1046	-1.1		135	1.91

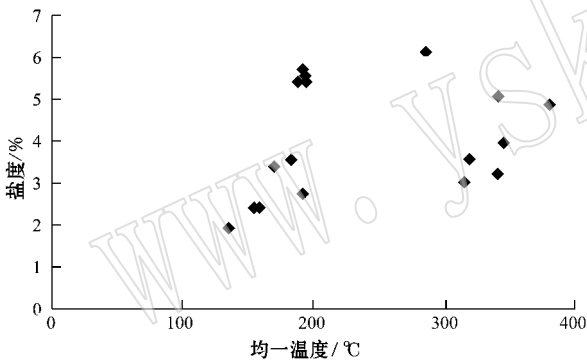


图 7 石英中气液两相流体包裹体均一温度-盐度图解
Fig. 7 Temperature and salinity relationship of two-phase (gas and liquid phases) fluid inclusions in quartz

3.5 流体包裹体中水的 H 同位素和石英 O 同位素组成分析

此次研究共测试了天井山金矿 17 件样品包裹体中水的 H 同位素和石英的 O 同位素组成。结果表明,除一个样品 δD_{H_2O} 值为 -103.3‰ 外, δD_{H_2O} 变化范围均集中在 $-67.3\text{‰} \sim -57.4\text{‰}$ 之间,位于正常岩浆水的范围。 $\delta^{18}O_{\text{石英}}$ 值在 $7.6\text{‰} \sim 12.9\text{‰}$ 之间,变化范围不大。

4 讨论

4.1 成矿流体的物理化学特征

主要矿石的岩矿相和 SEM/EDS 分析表明,金

主要呈自然金的形式产于破碎石英的裂隙中,与绢云母化蚀变关系密切。对代表绢云化阶段的流体包裹体岩相学、显微测温和成分分析表明,成矿流体为中高温、较低盐度的富水、含 CO₂ 流体,其中富含 Pb、Zn、Cu、Bi、Mo、Sb 等成矿金属,并含少量银,铁和金在 LA-ICP-MS 谱图上未显示明显的峰。石英中流体包裹体应为捕获的成矿后残余流体,由于此时金已发生了沉淀,因此残余流体中金含量不高。另外,同期蚀变矿物中含大量铁白云石和镁菱铁矿,表明铁也以碳酸盐的形式发生了沉淀,而亲硫的金属元素(如 Cu、Pb、Zn 等)则保存于残余流体相中继续迁移,并可在适当的条件下发生沉淀,形成相关矿化(如矿区北部的小贺铅锌矿)。

4.2 成矿流体和成矿物质来源

石英中群体包裹体中水的 H 同位素研究中采用了分阶段爆裂提取的方法,其目的是减少晚期次生流体包裹体中水的影响。但以往的经验表明,包裹体爆裂温度受多种因素影响,其与实际捕获温度和流体包裹体均一温度有较大差异。另外,石英颗粒受热后位于石英颗粒表面的流体包裹体易于爆裂,而石英颗粒内部的包裹体难于爆裂,爆裂过程得到的水难免有晚期低温、低盐度次生流体包裹体中水的混合。

另外,包裹体岩相学表明,石英中包裹体与石英形成并非同期,因此包裹体中水是否与石英达到氧同位素分馏平衡不得而知,利用流体包裹体均一温度计算的包裹体中水的氧同位素组成($\delta^{18}O_{H_2O} = 2.01\text{‰} \sim 7.31\text{‰}$)不能代表源区流体的氧同位素组成,但氢同位素仍对指示流体来源有一定的意义,从包裹体中水的 δD_{H_2O} 结果看,其主要落于岩浆水范围内。

一般认为,产于老变质岩中韧性剪切带中的石英脉是变质作用的产物,其流体主要来自于变质地层。该矿床主要金矿化发生于石英脉形成之后的脆性变形阶段,主要与绢云母化、含铁碳酸盐化和硫化物矿化等蚀变有关。金矿化及相关蚀变与燕山期浅成侵入岩在空间上密切相关。前人研究结果表明(李治平等,1989),区域内金矿化主要与燕山期岩浆活动有关。另外与绢云母化蚀变有关的流体表现为富 CO₂ 和低盐度的特征,并富含多种成矿金属元素,仅用变质流体难以解释,应有岩浆热液的贡献,低盐度和富 CO₂ 可用岩浆流体沸腾后富 CO₂ 的低密度气相流体冷凝或与大气水混合解释。

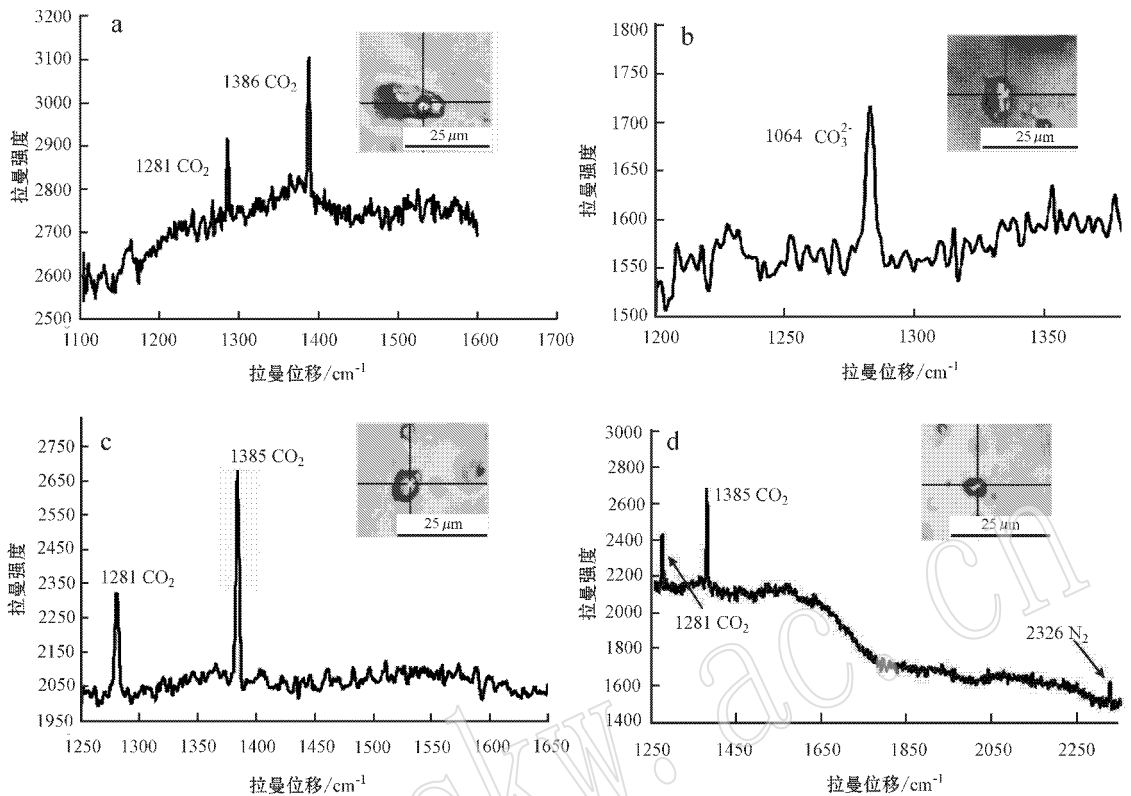


图 8 天井山金矿流体包裹体显微拉曼分析谱图

Fig. 8 Raman spectra of fluid inclusions in quartz from the Tianjingshan gold deposit

- a—富液相的 AV 类流体包裹体中的气相；b—富液相的 AV 类流体包裹体中的液相；c—富气相 AV 类流体包裹体中的气相；
d—富气相的 AV 类流体包裹体中的气相
a—vapor phase in AV type fluid inclusion；b—aqueous phase in AV type fluid inclusion；c—vapor phase in vapor-rich fluid inclusion；
d—vapor phase in vapor-rich fluid inclusion

4.3 成矿过程初探

天井山金矿床金矿化主要产于破碎石英的裂隙中和蚀变围岩中,成矿流体以低盐度、富 CO_2 和多种成矿金属为特征,成矿流体可能主要来自岩浆热液。矿区表现出的早期韧性剪切带的脆性变形表明该区经历了明显的地壳抬升。区域内燕山期岩浆活动与金矿化主要沿先期断裂分布,表明构造的再次活动,使先期断裂再次张开,并发生脆性变形,特别是在较刚性的石英脉中表现强烈。先期形成的石英脉发生碎裂岩化、角砾岩化等,形成大量裂隙,并使其渗透性明显增加,这是造成金矿化主要发育于石英脉中的原因。岩浆流体沿断裂上升过程中,由于温度和压力的降低,造成流体沸腾,富 CO_2 的低密度气相快速上升到地壳浅部,并与大气降水混合,是造成金、含铁碳酸盐和及其它金属硫化物沉淀的主要机制。前人研究表明, CO_2 具有弱酸性,可以调节流体的

pH 值,使流体保持在硫金络合物稳定存在的范围内,提高金的溶解度(Phillip and Evans, 2004),因此有利于金的迁移(侯明兰等, 2007)。而流体沸腾会使大量 CO_2 及 H_2S 等进入气相,因此改变了残余流体的 pH 值,造成金的溶解度降低和金的沉淀, CO_2 的逸出同时也造成碳酸盐矿物的溶解度降低和沉淀,这可以合理解释与金矿化同期的含铁碳酸岩和硫化物矿化蚀变。

5 结论

(1)天井山金矿矿化主要以自然金的形式产于石英裂隙或蚀变围岩中,金矿化主要发生于石英脉形成后的脆性变形阶段,与绢云母化、铁碳酸盐化关系密切。主成矿期成矿流体为中高温、较低盐度、富水、含 CO_2 的流体,成矿流体主要来自于岩浆热液。

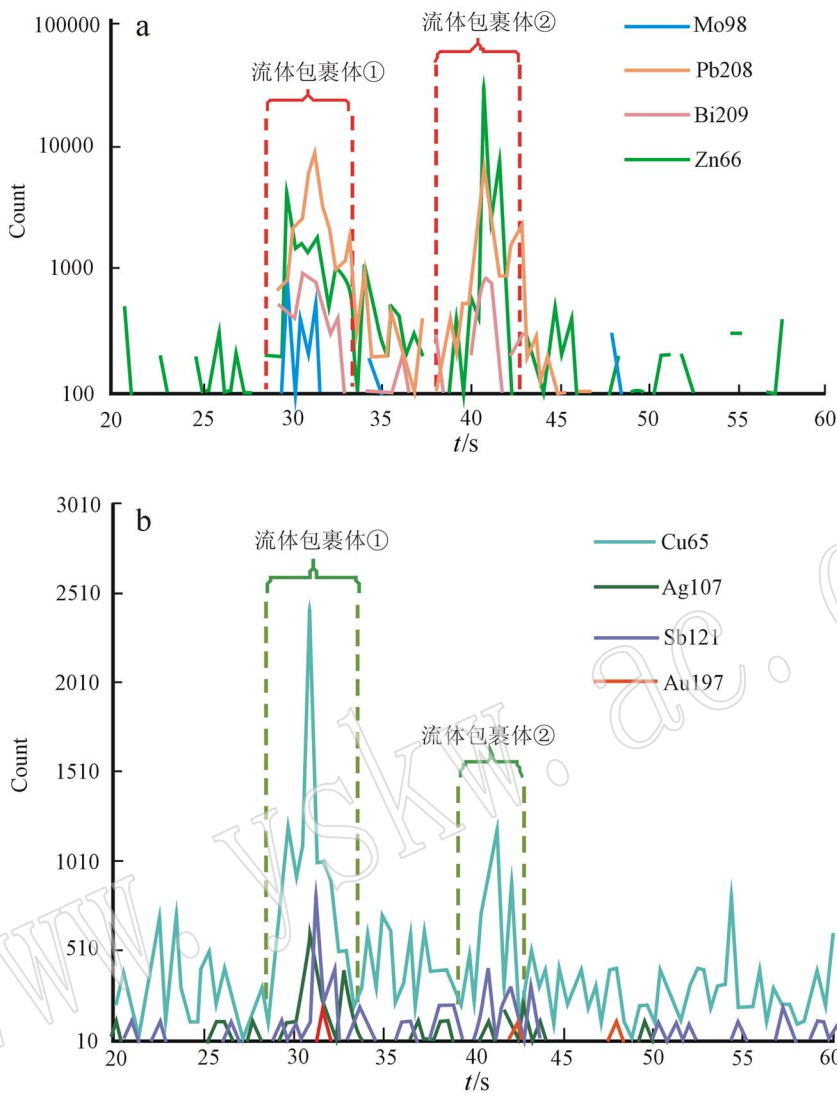


图9 天井山石英中气液两相包裹体的LA-ICP-MS谱图

Fig. 9 Spectral images of gas and liquid two-phase fluid inclusions from quartz by LA-ICP-MS in the Tianjingshan Au deposit

a—Mo、Pb、Zn、Bi的谱图；b—Cu、Sb、Ag、Au的谱图

a—Mo, Pb, Zn, Bi spectra; b—Cu, Sb, Ag, Au spectra

(2) 主成矿期流体包裹体成分的LA-ICP-MS结果表明,其富含Pb、Zn、Cu、Bi、Mo、Sb,并含少量Ag,但由于金、铁分别以自然金和碳酸盐矿物的形式发生沉淀,因此残余流体中金、铁含量低;

(3) 由于构造运动,先期在地壳深部形成的韧性剪切带抬升至地壳浅部,并发生脆性变形,特别是在较刚性的石英脉中表现强烈。岩浆流体沿先期断裂上升并发生流体沸腾,形成石英裂隙中和围岩中的绢云母化、含铁碳酸盐化、硫化物矿化等蚀变,并伴随有金的沉淀。

限公司、332地质队等的大力帮助,在显微拉曼探针分析和H-O同位素试验中得到核工业北京地质研究院欧光习研究员和刘牧老师的大力帮助,在此一并致谢。

References

- Collins P L F. 1979. Gas hydrates in CO₂-bearing fluid inclusions and the use of freezing data for estimation of salinity[J]. *Economic Geology*, 74(6): 1 435~1 444.
- Duan Liu'an, Yang Xiaoyong, Sun Weidong, et al. 2011. Geochemical characteristics and prospecting in the Tianjingshan Gold Deposit,

致谢 在野外工作中得到安徽光太实业集团有

- South Anhui [J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(6): 965 ~ 978 (in Chinese with English abstract).
- Hall D L, Sterner M S and Bodnar R J. 1988. Freezing point depression of NaCl-KCl-H₂O solutions [J]. *Economic Geology*, 83 : 197 ~ 202.
- Hou Minglan, Jiang Shaoyong, Shen Kun, *et al.* 2007. Fluid inclusion and H-O isotope study of gold mineralization in the Penglai gold field, Eastern Shandong [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(9): 2 241 ~ 2 256 (in Chinese with English abstract).
- Li Zhiping, Yang Wensi, Wang Yu, *et al.* 1989. Relation between magmatism and gold mineralization in South Anhui Province [J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 4(2): 42 ~ 53 (in Chinese with English abstract).
- Phillips G N and Evans K A. 2004. Role of CO₂ in the formation of gold deposits [J]. *Nature*, 429 : 860 ~ 863.
- Wu Jianyang and Zhang Jun. 2010. Study Prospecting potential and breakthrough direction of the Tianjingshan Gold Deposit based on comparing with the metallogenic characteristics of the Tianjingshan Gold Deposit and the Jinshan Gold Deposit [J]. *Mineral Deposits*, (29): 1 003 ~ 1 004 (in Chinese).
- Xu Youhua, Wu Xinhua and Lou Fasheng. 2008. Division and correlation of the Middle Proterozoic strata in Jiangnan Old Land [J]. *Resources Survery&Environment*, 29(1): 1 ~ 11 (in Chinese with English abstract).
- Yang Minggui and Mei Yongwen. 1997. Characteristics of geology and metalization in the Qinzhou-Hangzhou Paleoplate Junction [J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, (3): 52 ~ 59 (in Chinese with English abstract).
- Yu Xinqi, Zhang Da, Wang Longwu, *et al.* 2006. Features of Caledonian tectonic deformation in the Zhejiang-Anhui-Jiangxi border region, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 25(6): 676 ~ 684 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Xinjian, Cheng Jinhua, Hu Wenhua, *et al.* 2006. Initial analysis of geological and geochemical features of the deposit of arsenopyrite-polymetals and associated gold and gold-prospecting potential in Xiaohu, Xiuning County, Anhui Province [J]. *Geology of Anhui*, 16(3): 185 ~ 189 (in Chinese with English abstract).

附文中参考文献

- 段留安, 杨晓勇, 孙卫东, 等. 2011. 皖南天井山金矿床地质-地球化学特征及找矿前景 [J]. *地质学报*, 85(6): 965 ~ 978.
- 侯明兰, 蒋少涌, 沈 昆, 等. 2007. 胶东蓬莱金矿区流体包裹体和氢氧同位素地球化学研究 [J]. *岩石学报*, 23 : 2 241 ~ 2 256.
- 李治平, 杨文思, 王 郁, 等. 1989. 皖南岩浆作用及其与金矿化的关系 [J]. *地质找矿论丛*, 4(2): 42 ~ 53.
- 吴建阳, 张 均. 2010. 从天井山金矿和金山矿的成矿特征对比天井山金矿的找矿前景及突破方向 [J]. *矿床地质*, (29): 1 003 ~ 1 004.
- 徐有华, 吴新华, 楼法生. 2008. 江南古陆中元古代地层的划分与对比 [J]. *资源调查与环境*, 29(1): 1 ~ 11.
- 杨明桂, 梅勇文. 1997. 钦-杭古板块结合带与成矿带的主要特征 [J]. *华南地质与矿产*, (3): 52 ~ 59.
- 余心起, 张 达, 汪隆武, 等. 2006. 浙皖赣相邻区加里东期构造变形特征 [J]. *地质通报*, 25(6): 676 ~ 684.
- 郑新建, 程金华, 胡文华, 等. 2006. 安徽省休宁县小贺毒砂-多金属伴生金矿地质地化特征及找金前景浅析 [J]. *安徽地质*, 16(3): 185 ~ 189.