

李强, 杨富全, 柴凤梅, 等. 新疆准噶尔北缘阿克希克铁金矿流体包裹体研究[J]. 中国地质, 2014, 41(6): 1897-1913.

Li Qiang, Yang Fuquan, Chai Fengmei, et al. Study on fluid inclusions of the Akexike Fe-Au deposit in northern Junggar, Xinjiang[J]. Geology in China, 2014, 41(6): 1897-1913(in Chinese with English abstract).

# 新疆准噶尔北缘阿克希克铁金矿流体包裹体研究

李 强<sup>1</sup> 杨富全<sup>1</sup> 柴凤梅<sup>2</sup> 杨俊杰<sup>2</sup>

(1. 中国地质科学院矿产资源研究所 国土资源部成矿作用与资源评价重点开放实验室, 北京 100037; 2. 新疆大学新疆中亚造山带大陆动力学与成矿预测实验室, 新疆 乌鲁木齐 830046)

**摘要:** 阿克希克铁金矿床位于准噶尔北缘, 矿体呈似层状、脉状、透镜状赋存于南明水组火山岩及凝灰岩的接触带上。围岩蚀变不发育, 主要为硅化、绢云母化、绿泥石化、黄铁矿化、碳酸盐化等。矿床的形成经历了火山沉积期和热液期, 铁矿化主要形成于火山沉积期, 金矿化主要形成于热液期。火山沉积期石英以发育液体包裹体和少量含 CO<sub>2</sub> 包裹体为特征, 热液期石英以发育含 CO<sub>2</sub> 和碳质(CH<sub>4</sub>和 C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>)包裹体为特征。火山沉积期成矿流体为中温(集中于 180~320℃)、低盐度(集中于 6~10 wt% NaCl<sub>eq</sub>)、中-低密度(0.59~0.98 g/cm<sup>3</sup>)的 NaCl-H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub> 体系。热液期成矿流体为中温(集中于 220~320℃), 低盐度(集中于 2~10 wt% NaCl<sub>eq</sub>), 中-低密度(0.55~1.03 g/cm<sup>3</sup>)的 NaCl-H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub> 型流体。火山沉积期石英的 δD<sub>SMOW</sub> 为 -129.9‰~-97.9‰, δ<sup>18</sup>O<sub>SMOW</sub> 值介于 7.9‰~12.3‰, δ<sup>18</sup>O<sub>H<sub>2</sub>O</sub> 值为 -2.6‰~4.4‰, 推测成矿流体为海水与岩浆水的混合。热液期石英的 δD<sub>SMOW</sub> 介于 -129.8‰~-102.6‰, δ<sup>18</sup>O<sub>SMOW</sub> 值介于 11.2‰~16.1‰, δ<sup>18</sup>O<sub>H<sub>2</sub>O</sub> 变化于 3.1‰~7.4‰, 推测成矿流体为变质水混合深循环的大气降水。结合矿床地质特征、流体成分和性质, 本文认为热液期金矿化与 CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub> 流体有关。

**关键词:** 成矿流体; 稳定同位素; 成矿过程; 铁金矿; 阿克希克

**中图分类号:** P618.31; P618.51    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1000-3657(2014)06-1897-17

新疆准噶尔北缘是中亚造山带的重要组成部分, 位于西伯利亚板块和哈萨克斯坦-准噶尔板块的结合部位, 哈、中、蒙巨型有色成矿带的中段, 具有复杂的地质构造和强烈的岩浆活动, 是寻找铜、金、多金属矿床的有利地段<sup>[1-6]</sup>。目前在准噶尔北缘和阿尔泰山南缘已发现 100 余处铁矿床(点), 它们具有分布广、规模小、多期次、多成因和多矿物组合的特征<sup>[7]</sup>。其中大多数铁矿床(点)赋存于上志留统一下泥盆统康布铁堡组和中泥盆统北塔山组、阿勒泰镇组变质火山-沉积岩系<sup>[8]</sup>, 如蒙库铁矿(大型)、乌吐布拉克铁矿(中型)、巴特巴克布拉克铁矿(中型)、乔夏

哈拉铁铜金矿(小型)、老山口铁铜金矿(小型)等, 还有少量矿床(点)赋存于石炭纪火山-沉积岩系, 如阿克希克铁金矿(小型)。

阿克希克铁金矿位于福海县西南约 135 km, 阿勒泰市东南约 90 km 处。系统的地质找矿工作始于 20 世纪 80 年代后期, 2006 年由新疆汇达矿产资源勘查开发咨询有限责任公司进行过普查工作, 查明矿床规模为小型, 现未开采。关于该矿床的研究较少, 吴礼道等<sup>[9]</sup>对矿床地质特征和元素地球化学异常进行了研究。但对成矿流体性质及来源、成矿物质来源、矿床成因类型等还缺乏研究。本文在详细

收稿日期: 2014-08-03; 改回日期: 2014-11-23

基金项目: 国土资源公益性行业科研专项经费项目(201211073)和国家重点基础研究发展计划“973”项目(2012CB416803)联合资助。

作者简介: 李强, 男, 1987 年生, 博士生, 矿床学专业; E-mail: liqiangcags@gmail.com。

通讯作者: 杨富全, 男, 1968 年生, 博士, 研究员, 从事矿床地质、地球化学研究; E-mail: fuquanyang@163.com。

野外地质调查的基础上,对阿克希克铁金矿床的流体包裹体和氢氧同位素进行了系统的研究,初步确定了成矿流体的性质及来源,为阿克希克铁金矿床的成矿作用探讨提供了依据。

### 1 成矿地质背景

阿克希克铁金矿位于阿尔泰造山带与准噶尔造山带接合部位的额尔齐斯断裂带南侧(图1)。区域出露地层主要为中泥盆统北塔山组,下石炭统黑山头组、南明水组,另见少量古近-新近系及第四系。北塔山组为一套海陆交互的中基性火山熔岩、火山碎屑岩、火山碎屑沉积岩夹碳酸盐岩建造,主要岩性为安山岩、角砾状安山岩、辉石安山玢岩等。黑山头组为一套海相、海陆交互的中性火山岩及其碎屑岩建造,与南明水组呈不整合接触。南

明水组为一套海陆交互的正常沉积岩-火山碎屑岩、火山熔岩建造,主要岩性为碳质千枚岩、板岩、砂岩、玄武岩、安山岩、凝灰岩等。

区域褶皱、断裂主要呈NW-SE向展布,次为横切主构造线的NNW向和NE向断裂,形成特有的菱形格子状构造格架。其中莫勒迪尔巴斯陶复向斜轴向 $300^{\circ}\sim 310^{\circ}$ ,长120 km,为一枢纽起伏的紧闭倒转线性褶皱,核部由下石炭统组成,两翼为中泥盆统。萨尔布拉克-阿克塔斯断裂西起乌尔腾萨依,经萨尔布拉克、乔夏哈拉到阿克塔斯,走向 $315^{\circ}$ ,倾向NE,长70 km,是中泥盆统北塔山组与下石炭统南明水组的分界断裂,为逆冲断层。阿克希克铁金矿位于莫勒迪尔巴斯陶复向斜北东翼的北西端、萨尔布拉克-阿克塔斯断裂带中、NW向压扭性断裂的复合偏张地段。

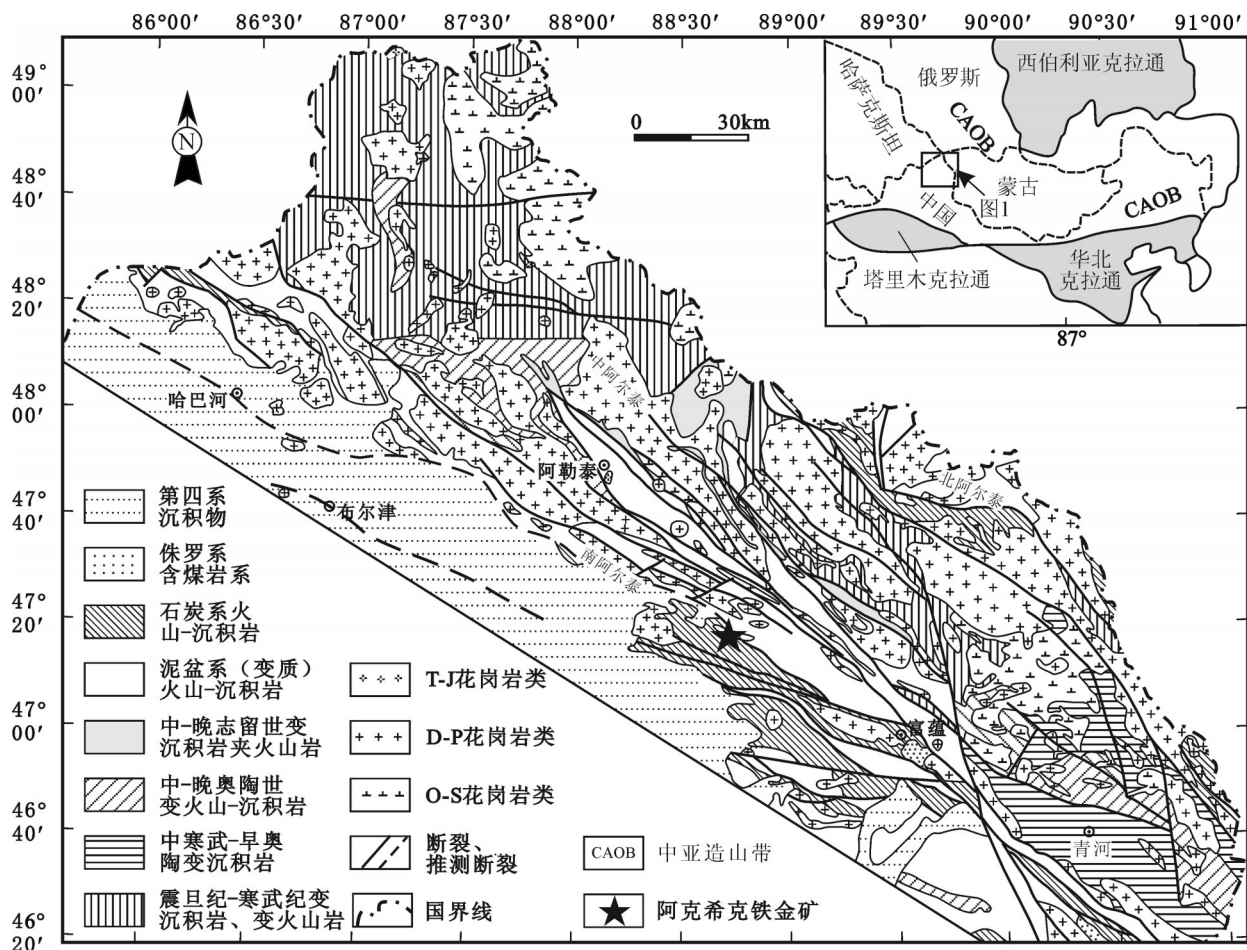


图1 阿尔泰造山带区域地质图(据文献[7]修改)

Fig.1 Regional geological map of the Altay orogenic belt (modified after reference [7])

区域岩浆活动强烈,与准噶尔洋俯冲作用有关的花岗岩主要分布于卡拉先格尔—老山口一带,如玉勒肯哈腊苏矿区石英闪长岩(382 Ma)、闪长玢岩(379 Ma)和黑云母石英二长岩(375~374 Ma)<sup>[10]</sup>;老山口矿区黑云母闪长岩(379 Ma)和闪长玢岩(380 Ma)<sup>[11]</sup>;哈腊苏矿区花岗岩(381~375 Ma)<sup>[12]</sup>等。与后碰撞有关的花岗岩和基性侵入岩主要集中于311~265 Ma<sup>[13-14]</sup>。

## 2 矿床地质特征

### 2.1 矿区地层

矿区出露地层主要为下石炭统南明水组(C<sub>1n</sub>)和第四系(图2)。南明水组为一套滨海—浅海相火山碎屑岩、陆源碎屑岩及碳酸盐岩沉积建造,厚度大于1300 m,自下而上划分为下、中、上3部分:下部分布于矿区中部,由一套海相中基性火山熔岩组成,主要岩性为变质玄武岩、变质玄武安山岩等;中部分布于矿区南北两侧,出露面积最广,主要岩性为变质凝灰岩;南明水组上部主要分布于矿区东西边缘地带,由一套正常沉积的粉砂岩、泥质粉砂岩及玻屑晶屑凝灰岩等组成。磁(赤)铁石英岩多呈透镜体出露,有时呈雁行状斜列,发育于南明水组下部、中部的火山熔岩与凝灰岩接触部位(图2)。

### 2.2 构造及侵入岩

区内断裂主要有3组:EW向断裂、NW向断裂和近SN向后期断裂,其中以EW横向断裂与成矿关系最密切(图2)。EW横向断裂(如F<sub>1</sub>)大致顺地层展布,为区内主要控矿、容矿断裂,沿断裂发育破

碎蚀变带,控制着矿体的空间分布,石英脉在其间断续分布,多见于蚀变破碎带中及其两侧,具不等粒、半自形、他形粒状结构,块状构造,发育毒砂化、硅化、绿泥石化、碳酸盐化、褐铁矿化、泥化及少量硫化物。NW向断裂分布于矿区中部和东部,主要有F<sub>4</sub>、F<sub>5</sub>、F<sub>6</sub>、F<sub>7</sub>等断裂,错断了部分地层的延续性。近SN向后期断裂分布于矿区中部和南部,主要有F<sub>2</sub>、F<sub>3</sub>等断裂,局部错断了磁(赤)铁石英岩。

区内未见大的岩体出露,仅见少量呈脉状的玄武玢岩、安山玄武玢岩。玄武玢岩、安山玄武玢岩脉表现为集中分布、成群出现的特点,脉宽0.5~24 m,长20~280 m,产状可分为EW向、NE向及NW向3组,多沿断裂或裂隙产出。

### 2.3 矿体及矿石特征

阿克希克铁金矿化带总长约2.3 km,宽1 km以上,由近东西向构造破碎带中发育的6条大致平行分布的磁铁矿化蚀变带组成,受断层或裂隙控制。现已在6条矿化带中分别圈出了I、II、III、IV、V、VI号含金磁(赤)铁矿矿体(图2),矿体以磁(赤)铁石英岩的形式存在于玄武岩和凝灰岩的接触带上,主要呈似层状、脉状、透镜状近东西向平行分布(图3),矿体倾向335°~5°,倾角50°~75°,长120~300 m,宽4.48~6.16 m,延深20~65 m<sup>[15]</sup>。赋矿围岩主要为变质凝灰岩、变质玄武岩、变质玄武安山岩等。

矿石类型为磁(赤)铁矿矿石、含金磁(赤)铁矿矿石、含金石英脉。铁矿石多被含金石英脉穿切(图4-B)。矿石构造主要有条带状、浸染状、网脉状、角砾状、块状构造(图4),矿石结构主要为包含结构,半

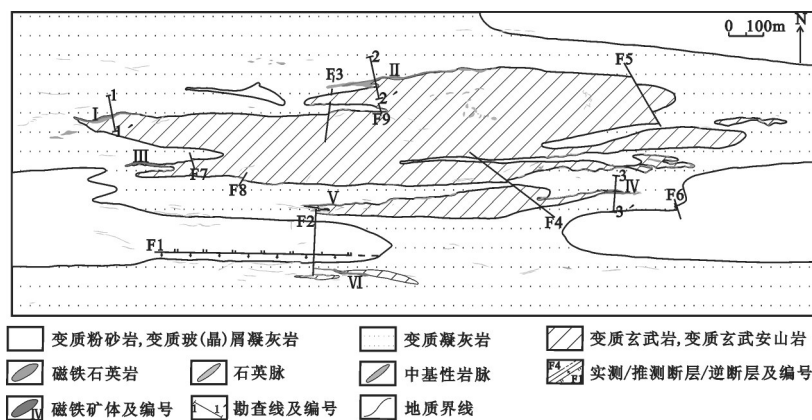


图2 阿克希克铁金矿床矿区地质图(据文献[15]修改)

Fig.2 Geological map of the Akexike Fe-Au deposit (modified after reference [15])



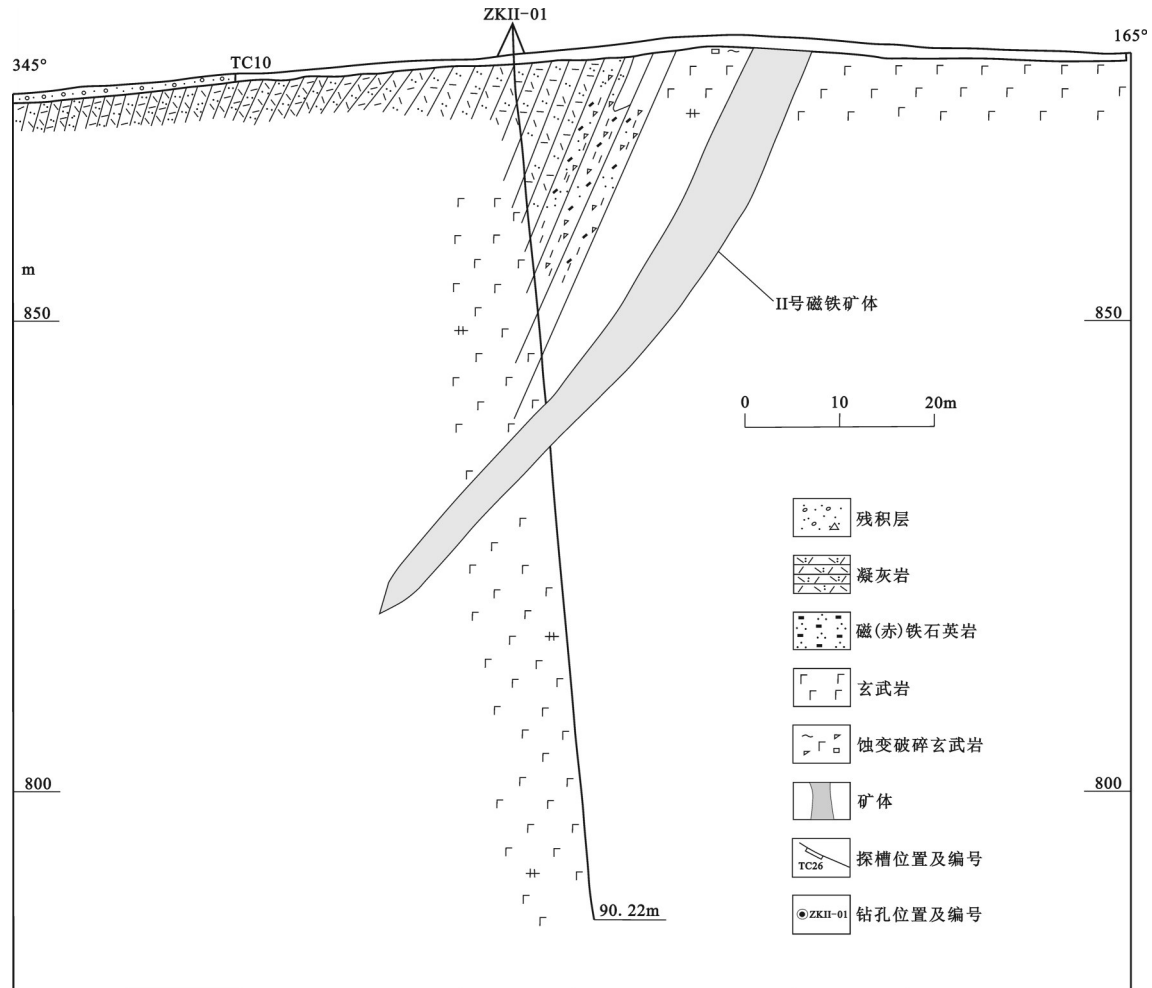


图3 阿克希克铁金矿床2号勘探线剖面图(据文献[15]修改)

Fig.3 Geological section along No. 2 exploration line in the Akexike Fe-Au deposit (modified after reference [15])

自形、自形细粒结构,假象结构。矿石中金属矿物主要有磁铁矿、赤铁矿、黄铁矿、自然金等,脉石矿物主要有斜长石、石英、角闪石、绢云母、黑云母、高岭土、透闪石、阳起石等。磁铁矿粒径一般介于0.01~0.15 mm,个别集合体可达0.4 mm。金主要以自然金或含银自然金的形式存在。它们以包体金、晶隙金、裂隙金的方式赋存于黄铁矿中或石英与黄铁矿晶隙间及褐铁矿裂隙中,含硫化物的石英细脉以及磁(赤)铁石英岩中,粒径变化于0.01~0.02 mm。矿石中全铁品位变化于25.0%~53.1%,平均29.1%~35.1%,伴生金平均品位0.36~1.19 g/t<sup>[15]</sup>。

#### 2.4 围岩蚀变及成矿期次划分

矿区围岩蚀变不发育,主要为硅化、绢云母化、绿泥石化、黄铁矿化、碳酸盐化等。成矿过程划分

为2期,即火山沉积期和热液期。火山沉积期为铁的主要成矿期,形成磁(赤)铁石英岩。热液期是金的主要成矿期,形成含硫化物、自然金的石英脉,穿切早期形成的铁矿体。

### 3 样品及分析方法

#### 3.1 样品采集

用于流体包裹体、氢氧同位素、激光拉曼研究的14件样品均采自石英,其中AKXK12-1、AKXK12-4、AKXK12-11、AKXK12-12、AKXK12-13、AKXK12-14、AKXK12-16、AKXK12-17为火山沉积期样品,AKXK12-3、AKXK12-6、AKXK12-8、AKXK12-9、AKXK12-15、AKXK12-18为热液期样品。火山沉积期的石英一般与磁(赤)铁矿共生形



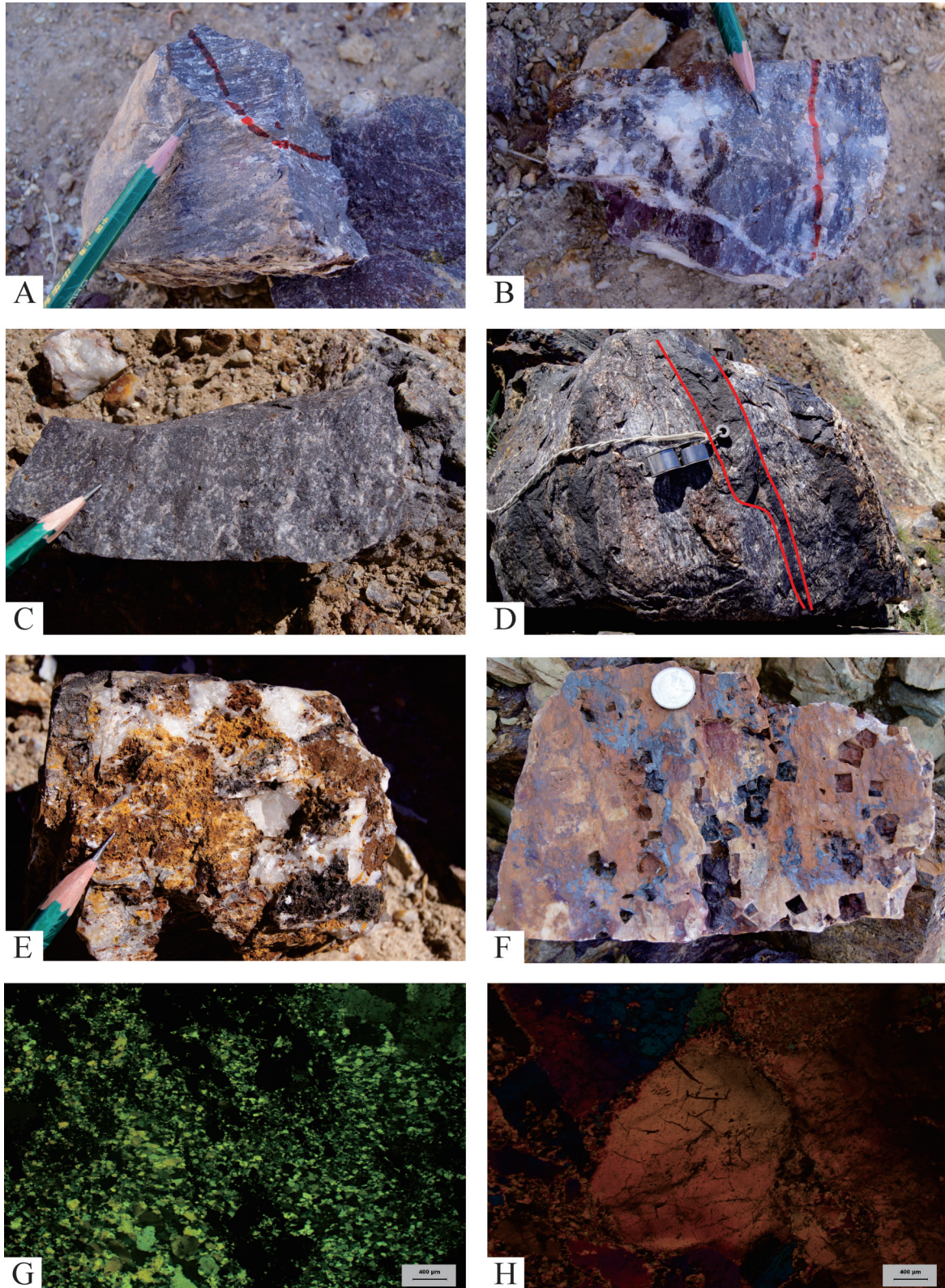


图4 阿克希克铁金矿床矿化特征

Fig.4 Features of mineralization within the Akexike Fe-Au deposit



成磁(赤)铁石英岩(图4-A、C、D), 粒度较细; 热液期形成含黄铁矿的石英脉, 穿插早期的磁(赤)铁石英(图4-B、E、F)。

### 3.2 分析方法

#### 3.2.1 流体包裹体显微测温

将样品磨成厚度为0.25~0.3 mm双面抛光的包裹体片, 对其中石英进行流体包裹体岩相学和显微测温研究。液体包裹体显微测温工作在中国地质大学(北京)地球化学实验室利用英国产 Linkam THMSG 600 冷热台上进行, 可测温范围为-196~+600 °C, 测试精度在30 °C以下时为 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ , 30°C以上时为 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ , 冰点温度误差 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 。显微镜型号为OLMPUS-BX51, 放大倍数100~800倍。

#### 3.2.2 氢、氧同位素

首先在显微镜下挑选新鲜纯净的石英和硫化物单矿物, 纯度达99%以上。氧同位素分析方法为 $\text{BrF}_3$ 法<sup>[16]</sup>, 首先将纯净的12 mg 石英样品与 $\text{BrF}_3$ 反应15 h, 萃取氧。分离出的氧进 $\text{CO}_2$ 转化系统, 温度为700°C, 时间为12 min, 最后收集 $\text{CO}_2$ <sup>[17]</sup>。

氢同位素分析采用爆裂法, 其测试程序为: 加热石英包裹体样品使其爆裂, 释放挥发份, 提取水蒸气, 然后在400 °C条件下使水与锌反应30 min 产生氢气, 再用液氮冷冻后, 收集到有活性炭的样品瓶中<sup>[18]</sup>。

同位素测试在中国地质科学院矿产资源研究所同位素实验室进行, 同位素所用质谱计型号为MAT253EM。氧同位素的分析精密密度为 $\pm 0.2\text{‰}$ , 氢同位素的分析精密密度为 $\pm 2\text{‰}$ 。

#### 3.2.3 流体包裹体激光拉曼光谱测试

拉曼光谱原位测试分析在中国地质科学院矿产资源研究所激光拉曼光谱实验室完成, 分析仪器为英国Renishaw公司产System 2000型显微共焦激光拉曼光谱仪, 激光波长514.53 nm, 激光功率20 mW, 最小激光束斑直径1  $\mu\text{m}$ , 扫描范围100~4500  $\text{cm}^{-1}$ , 分辨率1~2  $\text{cm}^{-1}$ , 分析样品为双面抛光包裹体片。

## 4 分析结果

### 4.1 流体包裹体研究

#### 4.1.1 流体包裹体类型和特征

依据室温下包裹体的物理相态和化学组成不同, 按卢焕章等<sup>[19]</sup>的分类方案将阿克希克铁金矿原

生流体包裹体分为 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 型和 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{NaCl}$ 型。 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 型划分为气体包裹体和液体包裹体(气液两相包裹体)。 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{NaCl}$ 型划分为含液体 $\text{CO}_2$ 的两相和三相包裹体(图5)。

液体包裹体由气相和液相组成, 气液比5%~35%, 加热时均一到液相。包裹体长轴2~15  $\mu\text{m}$ , 多数在4~10  $\mu\text{m}$ , 形态主要为不规则状、椭圆状、长条状、多边形等。此类包裹体分布普遍, 成群分布, 常与其他类型包裹体共生。气体包裹体由气相和液相组成, 气液比60%~90%, 加热时均一到气相。包裹体长轴3.9~6.9  $\mu\text{m}$ , 形态主要为不规则状、椭圆状、长条状、三角形等。此类包裹体较少发育, 一般孤立分布。

含液体 $\text{CO}_2$ 的三相包裹体在火山沉积期和热液期的石英中均有分布, 由 $V_{\text{CO}_2}$ 、 $L_{\text{CO}_2}$ 和 $L_{\text{H}_2\text{O}}$ 三相组成,  $\text{CO}_2$ 相的体积百分数为10%~90%不等。室温下一般出现液态 $\text{CO}_2$ 、气态 $\text{CO}_2$ 和水溶液相, 部分呈现两相( $V_{\text{CO}_2}$ 和 $L_{\text{H}_2\text{O}}$ ), 但降温后出现三相。包裹体形态为不规则形、椭圆状、长条状、多边形、负晶形等, 长轴为4~15.2  $\mu\text{m}$ 。该类包裹体分布较广泛, 与含 $\text{CO}_2$ 的两相包裹体共生。含 $\text{CO}_2$ 的两相包裹体由气相和液相 $\text{CO}_2$ 组成, 气液比5%~35%, 主要为10%~25%, 包裹体形态为不规则形、椭圆状、长条状、多边形, 长轴为3.7~10.9  $\mu\text{m}$ , 该类包裹体稍少于含液体 $\text{CO}_2$ 的三相包裹体。包裹体类型及其特征见图5和表1。

#### 4.1.2 显微测温结果

对火山沉积期98个石英中原生液体包裹体进行了显微测温, 完全均一温度变化范围较大, 介于164~414°C, 主要集中在180~320°C, 峰值为270°C(图6)。冰点温度变化于-12.4~-1.5°C。利用冰点在冷冻冰点-盐度关系表中<sup>[20]</sup>, 查得流体的盐度值为2.03~16.34 wt%  $\text{NaCl}_{\text{eq}}$ , 主要集中在6~10 wt%  $\text{NaCl}_{\text{eq}}$ 。用包裹体均一温度和盐度在 $\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}$ 体系的T-W- $\rho$ 相图<sup>[20]</sup>上查得密度为0.59~0.98  $\text{g}/\text{cm}^3$ 。33个含 $\text{CO}_2$ 包裹体的初熔温度为-60.6~-56.6°C, 表明包裹体中 $\text{CO}_2$ 不纯, 有一定量 $\text{CH}_4$ 或 $\text{N}_2$ 存在<sup>[21]</sup>。笼形物消失温度为3.7~9.0°C, 部分均一温度为9.2~23.9°C, 完全均一温度介于215~385°C, 主要集中在240~300°C, 峰值为250°C, 盐度为2.03~15.52 wt%  $\text{NaCl}_{\text{eq}}$ 。

对热液期85个石英中原生液体包裹体进行了

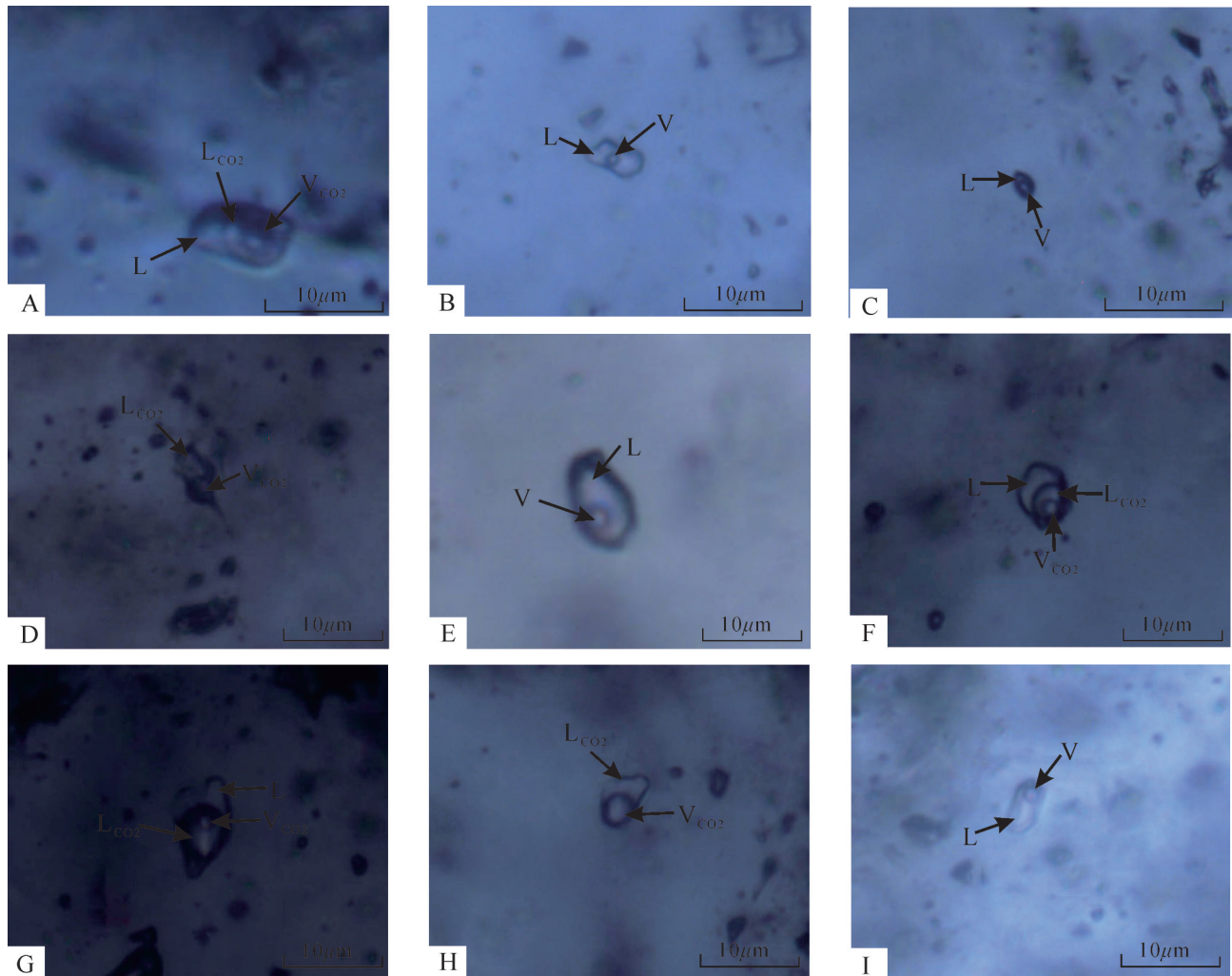


图5 阿克希克铁金矿床石英中流体包裹体显微照片

Fig.5 Photomicrographs of fluid inclusions from the Akexike Fe-Au deposit

显微测温,完全均一温度变化范围较大,介于160~376℃,主要集中在220~320℃,峰值为250℃(图6)。冰点温度变化于-15.3~-1.1℃,查得流体的盐度值为1.23~21.68 wt% NaCl<sub>eq</sub>,主要集中在2~10 wt% NaCl<sub>eq</sub>,查得密度为0.55~1.03 g/cm<sup>3</sup>。54个含CO<sub>2</sub>包裹体的初熔温度为-65.0~-56.6℃,笼形物消失温度为4.7~10.2℃,利用笼形化合物的熔化温度和盐度的关系表<sup>[22]</sup>,求得CO<sub>2</sub>包裹体盐度为1.23~9.54 wt% NaCl<sub>eq</sub>。CO<sub>2</sub>的部分均一温度为7.5~20.9℃,完全均一温度介于220~365℃,主要集中在240~320℃,峰值为250℃和290℃。

#### 4.1.3 流体包裹体激光拉曼光谱分析

激光拉曼光谱仪可用于鉴定大于1 μm的单个

流体包裹体中气体(CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O等)和水溶液中的离子(CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>等),也可以作为鉴定流体包裹体中未知子矿物的手段之一<sup>[23]</sup>,从而确定流体的性质<sup>[24]</sup>。

对火山沉积期和热液期石英中液相、含CO<sub>2</sub>的两相和三相包裹体成分进行了分析。火山沉积期极少数含CO<sub>2</sub>的三相包裹体中CO<sub>2</sub>相拉曼谱图中可见清晰CH<sub>4</sub>峰(2911.2 cm<sup>-1</sup>)、SO<sub>2</sub>峰(1152.6 cm<sup>-1</sup>)和CO<sub>2</sub>峰(1283.4 cm<sup>-1</sup>、1386.1 cm<sup>-1</sup>)(图7-B),气液两相包裹体液相和气相成分拉曼谱图中可见H<sub>2</sub>O峰(3755.8 cm<sup>-1</sup>),说明包裹体中含液相(气相)H<sub>2</sub>O(-OH)。热液期包裹体气相成分拉曼谱图中可见较多CH<sub>4</sub>峰(2911.2 cm<sup>-1</sup>)、C<sub>4</sub>H<sub>6</sub>峰(2642.3 cm<sup>-1</sup>)、SO<sub>2</sub>峰



表 1 阿克希克铁金矿床流体包裹体类型及特征  
Table 1 Inclusion types and characteristics of the Akexike Fe-Au deposit

成矿期次	主矿物	包裹体类型	观察包裹体数/个	组成	形态	长轴/ $\mu\text{m}$	气相分数/%
火山沉积期	石英	液体包裹体	98	液相和气相	不规则状、多边形、 长条状、椭圆状	2~12	一般 10~20
		含液体 $\text{CO}_2$ 包裹体	19	气体 $\text{CO}_2$ 、液体 $\text{CO}_2$ 和水溶液	不规则状、椭圆状	4~15	一般 10~50, 少数 60~80
	$\text{CO}_2$ 包裹体	14	气体 $\text{CO}_2$ 、液体 $\text{CO}_2$	椭圆状、长条状、多边形	4~8	10~30	
	气体包裹体	2	气相和液相	椭圆状	3~5	30~60	
热液期	石英	液体包裹体	85	液相和气相	不规则状、多边形、长条状、椭圆状	3~11	一般 10~20
		含液体 $\text{CO}_2$ 包裹体	36	气体 $\text{CO}_2$ 、液体 $\text{CO}_2$ 和水溶液	不规则状、椭圆状、长条状	4~13	一般 10~60, 少数 70~90
	$\text{CO}_2$ 包裹体	18	气体 $\text{CO}_2$ 、液体 $\text{CO}_2$	椭圆状、长条状、不规则状	5~11	10~35	
	气体包裹体	2	气相和液相	椭圆状、三角形	4~7	35~90	

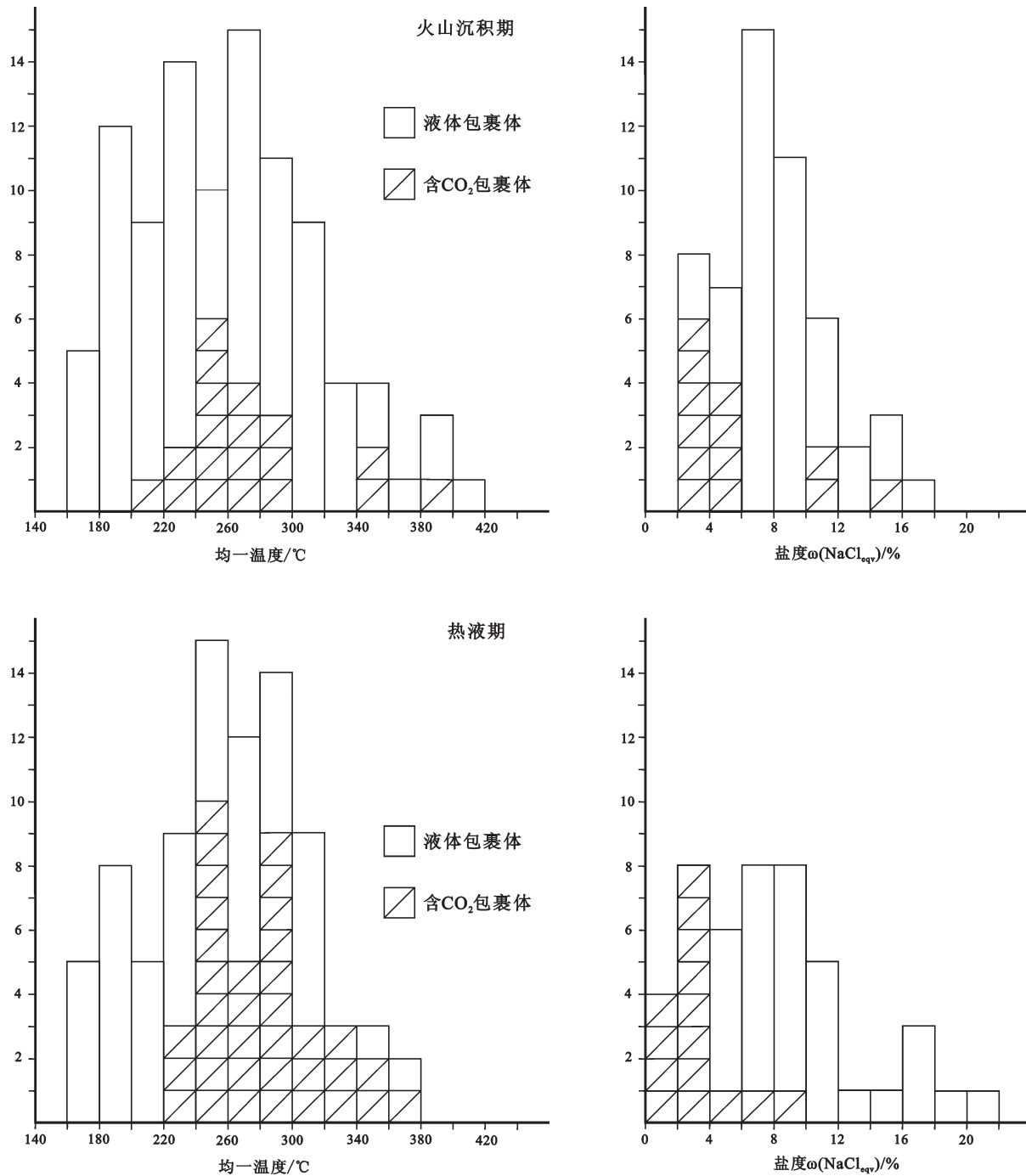


图6 阿克希克铁金矿床流体包裹体均一温度和盐度直方图

Fig.6 Histograms of homogenization temperature and salinity for the fluid inclusions of the Akexike Fe-Au deposit

(1153.9  $\text{cm}^{-1}$ ) 和  $\text{CO}_2$  峰 (1282  $\text{cm}^{-1}$ 、1283.4  $\text{cm}^{-1}$ 、1284.7  $\text{cm}^{-1}$ 、1386.1  $\text{cm}^{-1}$ 、1384.8  $\text{cm}^{-1}$ 、1387.4  $\text{cm}^{-1}$ ) (图7-A、C、E-F), 液相成分拉曼谱图中可见清晰  $\text{CO}_3^{2-}$  峰 (1069.9  $\text{cm}^{-1}$ )、 $\text{CO}$  峰 (2141.3  $\text{cm}^{-1}$ ) 和  $\text{H}_2\text{O}$  峰 (3412.9  $\text{cm}^{-1}$ ) (图7-D)。另外, 包裹体拉曼谱图受石

英背景值的影响, 大部分激光拉曼图中都有一个强的石英拉曼峰值(拉曼位移为 464 ~ 466  $\text{cm}^{-1}$ ) (图7)。

#### 4.2 稳定同位素

阿克希克铁金矿床氢、氧同位素测试结果列于表2。4件火山沉积期石英的  $\delta\text{D}_{\text{SMOW}}$  变化范围较大,

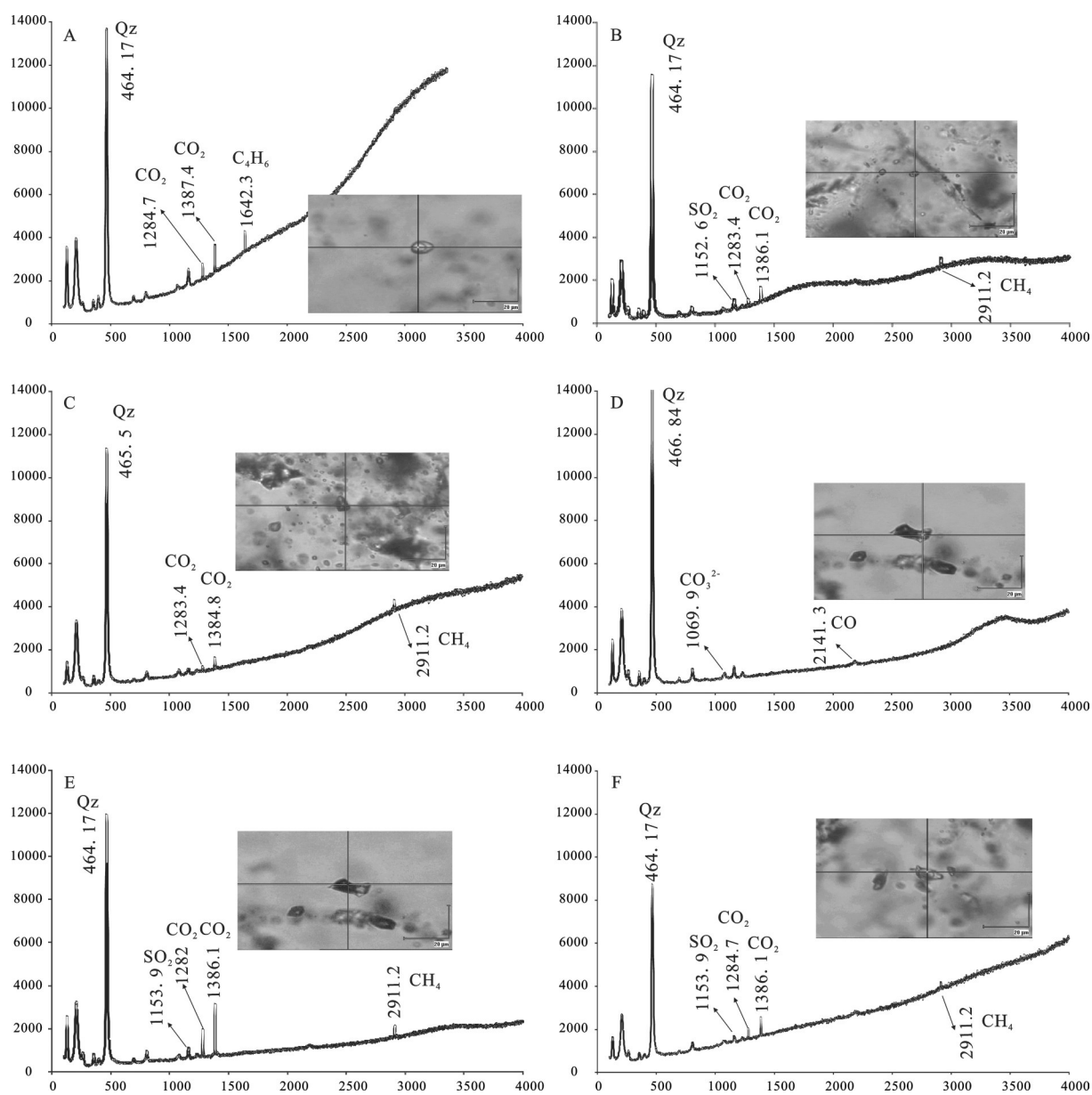


图7 阿克希克石英中流体包裹体拉曼测试分析图

Fig.7 LRM spectra of fluid inclusions in quartz from the Akexike Fe-Au deposit

介于 $-129.9\text{‰}$ ~ $-97.9\text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$  值介于 $7.9\text{‰}$ ~ $12.3\text{‰}$ 。使用石英-水分馏方程  $1000 \ln \alpha = 3.38 \times 10^6 T^{-2} - 3.40$  [25] 和同一样品石英中流体包裹体完全同一温度平均值, 计算出流体的  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  值为 $-2.6\text{‰}$ ~ $4.4\text{‰}$ , 平均值为 $2.4\text{‰}$ 。6件热液期石英  $\delta\text{D}_{\text{SMOW}}$  介于 $-129.8\text{‰}$ ~ $-102.6\text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$  值介于 $11.2\text{‰}$ ~ $16.1\text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  变化于 $3.1\text{‰}$ ~ $7.4\text{‰}$ 。

## 5 讨论

### 5.1 成矿流体性质

阿克希克铁金矿火山沉积期石英中流体包裹体以液体包裹体和少量含 $\text{CO}_2$ 的两相和三相包裹体为特征, 测温结果表明成矿流体具有中温(集中于 $180\sim 320\text{ }^\circ\text{C}$ )、低盐度(集中于 $6\sim 10\text{ wt}\% \text{ NaCl}_{\text{eq}}$ )、中-



表2 阿克希克铁金矿氢氧同位素组成  
Table 2 Hydrogen and oxygen isotopic data from the Akexike Fe-Au deposit

序号	样号	矿物	$\delta D_{V-SMOW}/\text{‰}$	$\delta^{18}O_{V-SMOW}/\text{‰}$	Th/ $^{\circ}\text{C}$	$\delta^{18}O_{H_2O}/\text{‰}$	成矿期次
1	AKXK12-1	石英	-129.9	11.5	290	4.3	火山沉积期
2	AKXK12-4	石英	-129.9	7.9	220	-2.6	
3	AKXK12-11	石英	-97.9	12.3	252	3.5	
4	AKXK12-12	石英	-100.8	11.5	295	4.4	
5	AKXK12-3	石英	-129.8	11.2	269	3.1	热液期
6	AKXK12-6	石英	-118.1	12.2	283	4.7	
7	AKXK12-8	石英	-105.8	13.3	262	4.9	
8	AKXK12-9	石英	-108.5	12.7	247	3.6	
9	AKXK12-15	石英	-102.6	13.7	256	5	
10	AKXK12-18	石英	-103.3	16.1	256	7.4	

低密度(0.59~0.98 g/cm<sup>3</sup>)的特征(图6)。与托莫尔特铁(锰)矿床火山沉积期石英中流体(均一温度集中于170~300 $^{\circ}\text{C}$ , 盐度集中于6~9 wt% NaCl<sub>eq</sub>和14~20 wt% NaCl<sub>eq</sub>, 密度为0.62~1.09 g/cm<sup>3</sup>, 张志欣等<sup>[26]</sup>)、铁木尔特铅锌矿喷流沉积期石英中流体(均一温度为150~340 $^{\circ}\text{C}$ , 盐度为4~16 wt% NaCl<sub>eq</sub>, 密度为0.77~0.97 g/cm<sup>3</sup>, 耿新霞等<sup>[27]</sup>)、大东沟铅锌矿成矿流体(均一温度集中于140~300 $^{\circ}\text{C}$ , 盐度集中于(3.2~14.8) wt% NaCl<sub>eq</sub>, 密度为0.89~1.08 g/cm<sup>3</sup>, 刘敏等<sup>[28]</sup>)、恰夏铁铜矿火山沉积期石英中流体(均一温度集中于230~290 $^{\circ}\text{C}$ , 盐度集中于(10~22) wt% NaCl<sub>eq</sub>, 密度为0.70~1.07 g/cm<sup>3</sup>, 项目未刊资料)类似, 暗示区域上VMS型铅锌矿和火山-沉积型铁矿在火山沉积成矿作用过程中的成矿流体性质相似。单个包裹体激光拉曼光谱分析表明火山沉积期成矿流体以NaCl-H<sub>2</sub>O型流体为主, 含有一定量的CO<sub>2</sub>和极少量的CH<sub>4</sub>、SO<sub>2</sub>(图7-B)。

阿克希克铁金矿热液期石英中流体包裹体以含液体CO<sub>2</sub>两相和三相包裹体为特征, 均一温度( $T_{h, CO_2}$ )高于固相熔化温度( $T_{m, CO_2}$ ), 在31 $^{\circ}\text{C}$ 前均一呈单相(液相或气相), 属Van den Kerkhof and Thiery<sup>[29]</sup>划分的H-型包裹体。显微测温结果表明成矿流体具有中温(集中于220~320 $^{\circ}\text{C}$ ), 低盐度(集中于2~10 wt% NaCl<sub>eq</sub>), 中-低密度(0.55~1.03 g/cm<sup>3</sup>)的性质(图6), 与托莫尔特铁(锰)矿、铁木尔特铅锌矿区域变质作用形成的包裹体特征类似<sup>[26, 30]</sup>。晚泥盆世到早二叠世末, 额尔齐斯剪切带区域上为NE-SW向强烈

挤压的造山构造环境, 使得早中泥盆世形成的海相火山沉积矿床受到造山-变质作用的叠加改造, 碳质流体(CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>-N<sub>2</sub>)发育<sup>[31-34]</sup>。单个包裹体激光拉曼光谱分析表明该期流体以发育CO<sub>2</sub>-NaCl-H<sub>2</sub>O型包裹体和碳质(CH<sub>4</sub>和C<sub>4</sub>H<sub>6</sub>)流体包裹体为特征。与火山沉积期相比, 热液期流体碳质成分明显升高, 具有造山型矿床或变质热液矿床低盐度、富碳质变质流体的特征<sup>[35-36]</sup>。

综上所述, 从火山沉积期到热液期, 成矿流体温度略有升高(图6), 含CO<sub>2</sub>包裹体明显增多, 流体盐度有降低的趋势(图6), 流体中碳质含量明显升高。

## 5.2 成矿流体来源

4件火山沉积期石英样品落在岩浆水左下方与大气降水线之间(图8)。尽管 $\delta D-\delta^{18}O_{H_2O}$ 图解表明火山沉积期成矿流体为岩浆水与大气降水的混合, 但实际上成矿作用发生在海底, 大气降水的贡献可能不大。Suzuoki et al.<sup>[37]</sup>提出母岩浆房的去气作用能够导致同位素分馏, 造成岩浆水的 $\delta D$ 值偏低。大气降水中更富集较轻的氢同位素, 也能造成流体的 $\delta D$ 值偏低。陈毓川等<sup>[38]</sup>在解释阿舍勒铜锌矿的氢氧同位素时认为, 水岩反应影响热流体的氧同位素组成, 具有大气降水的特征实际上是深循环的海水。阿克希克铁金矿与托莫尔特铁矿、恰夏铁铜矿火山沉积期一样, 火山沉积期成矿流体可能是海水与岩浆水的混合。

6件热液期石英样品点落在变质水和岩浆水左下侧。野外地质观察表明, 矿区及周围缺乏热液期

岩浆活动,因此,排除了岩浆水来源的可能性。低盐度、富碳质的流体包裹体是造山型矿床或变质热液矿床区别于其他类型矿床的重要标志<sup>[35-36, 39-41]</sup>。阿尔泰造山带的主期变质作用属于区域动力热流变质作用<sup>[31]</sup>。徐九华等<sup>[33]</sup>指出阿尔泰南缘的海相火山沉积矿床受到造山-变质作用的叠加改造,区域变质作用形成的石英脉中发育CO<sub>2</sub>-NaCl-H<sub>2</sub>O型包裹体和碳质流体包裹体(由单相或富CO<sub>2</sub>包裹体组成)。陈衍景等<sup>[42]</sup>认为准噶尔北缘的额尔齐斯金矿带与碰撞造山背景有关。阿克希克铁金矿热液期石英脉中碳质流体发育,为矿区地层变质和变形时形成,推断成矿流体主要为变质水混合深循环的大气降水。

### 5.3 成矿机制探讨

海相火山岩型铁矿是中国一种重要类型的铁矿,也是具有重要潜力的富铁矿类型<sup>[44]</sup>,主要分布于云南大红山、新疆阿勒泰和东西天山等地区<sup>[45]</sup>,其成因在国外研究较少<sup>[46]</sup>。在该类铁矿中,矿体与海相火山岩浆-热液系统关系密切,矿区缺乏相应的侵入岩<sup>[44]</sup>,矿体与熔岩和火山碎屑岩共生时,多数发育矽卡岩化,如东天山雅满苏铁矿<sup>[47]</sup>;矿体与火山沉积岩和沉积岩共生时,蚀变则较弱<sup>[44]</sup>。阿克希克铁矿赋存于南明水组火山沉积岩中,矿体顺地层分布,矿区未见与成矿有空间关系的侵入岩,围岩蚀变较弱,应属海相火山岩型铁矿。

早古生代以前,准噶尔北缘属于古中亚板块的一部分,为稳定大陆边缘阶段,从早奥陶世到早泥盆世,准噶尔洋开始形成并分隔准噶尔板块与阿尔泰地块<sup>[48-49]</sup>。伴随准噶尔洋向北俯冲,泥盆纪火山活动强烈,在岛弧构造环境下,形成了早泥盆世托让格库都克组火山岩,中泥盆世北塔山组玻安岩、苦橄岩和中基性火山岩<sup>[50-56]</sup>。早石炭世,板块停止俯冲,在岛弧的后方出现拉张状态并出现弧后盆地,形成南明水组火山沉积岩<sup>[48-49]</sup>。在南明水组火山沉积岩的形成过程中,岩浆分异作用形成的岩浆热液在岩浆房提供的大量热能作用下发生对流循环<sup>[44]</sup>,通过水岩反应萃取玄武岩、安山岩围岩中的铁形成富铁流体。在流体的上升过程中,与加热的下渗海水混合后喷发到海底,在低洼处形成卤水池<sup>[44]</sup>。铁以氯络合物的形式在高温、中高盐度的富铁流体中迁移<sup>[57]</sup>,与低温海水的接触造成铁的大量

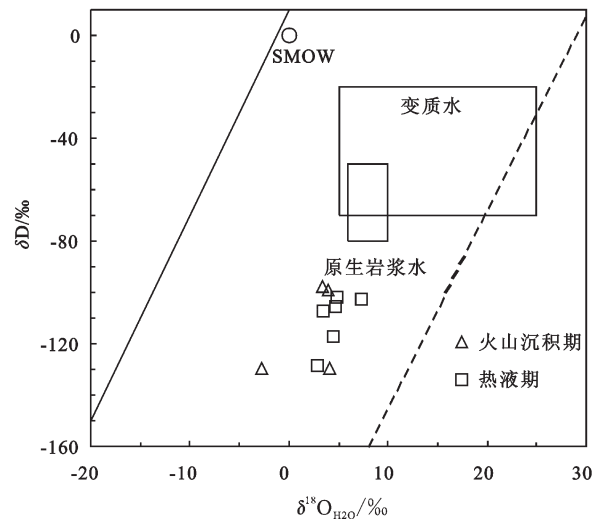


图8 阿克希克 $\delta D - \delta^{18}O_{H_2O}$ 图解(原始岩浆水范围据文献[43])

Fig.8  $\delta D$  versus  $\delta^{18}O_{H_2O}$  diagram of the Akexike Fe-Au deposit (data of primary magmatic water after reference [43])

沉淀,在玄武岩、玄武安山岩之上形成似层状、脉状、透镜状的磁(赤)铁石英岩。

陈衍景等<sup>[40]</sup>将金成矿系统的地质和流体包裹体特征划分为5类,认为造山型金矿床以常产于增生型造山带的俯冲增生楔变质地体<sup>[35]</sup>和碰撞型造山带内部、矿体常呈脉状产于剪切带等断裂构造中、发育次生交代石英岩或石英脉、发育低盐度富CO<sub>2</sub>变质流体等特点区别于其他类型金矿<sup>[58]</sup>。前人<sup>[59-62]</sup>的大量研究表明造山型金矿床的成矿流体为低盐度、富CO<sub>2</sub>的H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>体系,部分矿床还发育纯CO<sub>2</sub>或CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>包裹体。富含CO<sub>2</sub>±CH<sub>4</sub>的成矿流体广泛分布于额尔齐斯剪切带两侧金矿床中,徐九华<sup>[61]</sup>认为这些金矿床与区域构造存在密切联系,属于Groves等定义的造山型金矿<sup>[64-65]</sup>,如多拉纳萨依金矿、萨尔布拉克金矿、萨热阔布金矿<sup>[62]</sup>、赛都金矿等。阿克希克铁金矿位于额尔齐斯剪切带上,火山沉积岩围岩大部分为变质岩石,表明该矿床可能与区域变质作用有关;矿体呈脉状、透镜状分布于EW向横向断裂控制的破碎蚀变带中,构造控矿明显;热液期成矿流体具有中温、低盐度、富CO<sub>2</sub>和碳质(CH<sub>4</sub>和C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>)的特征,结合所处构造地质背景,认为阿克希克含金硫化物石英脉与上述造山型金矿具有一定的相似性。

在金矿床中,通常认为CO<sub>2</sub>对Au的迁移没有直

接的意义,碳质流体的来源及其与Au矿化的关系也存在争议<sup>[66]</sup>,但不可否认的事实是含金石英脉往往比不含金石英脉的包裹体更富CO<sub>2</sub>流体<sup>[63]</sup>。Phillips and Evans<sup>[67]</sup>提出CO<sub>2</sub>在金的运移过程中有缓冲pH值的作用,可以使Au以还原硫的络合物形式保持稳定状态。Yardley et al.<sup>[68]</sup>通过实验分析,得出金矿床包裹体中至少含0.05 wt% H<sub>2</sub>S,支持了Au以还原硫络合物迁移的解释。徐九华等<sup>[63]</sup>通过研究阿尔泰山南缘萨热阔布、赛都和乌兹别克斯坦穆龙套等金矿,认为CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>流体可以促使流体产生不混溶,从而有利于Au的富集沉淀。由此可见,阿克希克铁金矿热液期石英脉包裹体中的CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>流体对金矿化具有重要作用。除此之外,阿克希克石英脉中大量黄铁矿的沉淀可以破坏Au的还原硫络合物( $\text{Fe}^{2+} + 2\text{Au}(\text{HS})_2^- = 2\text{Au} + \text{FeS}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{HS}^-$ , Bodnar<sup>[69]</sup>),导致金的沉淀,这也解释了Au在黄铁矿晶体中富集的现象。

## 6 结 论

(1)阿克希克铁金矿床位于准噶尔北缘,矿体呈似层状、脉状、透镜状等赋存于南明水组火山岩及凝灰岩的接触带上。围岩蚀变不发育,主要为硅化、绢云母化、绿泥石化、黄铁矿化、碳酸盐化等。矿床的形成经历了火山沉积期和热液期,铁矿化主要形成于火山沉积期,金矿化主要形成于热液期。

(2)火山沉积期石英以发育液体包裹体和少量含CO<sub>2</sub>包裹体为特征,热液期石英以发育含CO<sub>2</sub>和碳质(CH<sub>4</sub>和C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>)包裹体为特征。

(3)火山沉积期成矿流体为中温(集中于180~320℃)、低盐度(集中于6~10 wt% NaCl<sub>eq</sub>)、中-低密度(0.59~0.98 g/cm<sup>3</sup>)的NaCl-H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>体系。热液期成矿流体为中温(集中于220~320℃)、低盐度(集中于2~10 wt% NaCl<sub>eq</sub>)、中-低密度(0.55~1.03 g/cm<sup>3</sup>)的NaCl-H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>型流体。

(4)石英中氢氧同位素表明火山沉积期成矿流体为海水与岩浆水的混合。热液期成矿流体为变质水混合深循环的大气降水。结合矿床地质特征、流体成分和性质,本文认为热液期金矿化与CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>流体有关。

**致谢:** 流体包裹体测定得到了中国地质大学(北京)地球化学实验室诸慧燕女士的帮助,氢氧同位素由中国地质科学院矿产资源研究所同位素实验室

张增杰和万德芳老师完成,包裹体激光拉曼光谱分析得到了中国地质科学院矿产资源研究所陈伟十老师的支持,审稿专家及责任编辑杨艳老师对论文提出了宝贵修改意见,在此一并致以衷心的感谢!

## 参考文献(References):

- [1] Sengör A M C, Natal' in B A, Burtman V S. Evolution of the Altaid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia[J]. *Nature*, 1993, 364: 299-307.
- [2] 何国琦, 成守德, 徐新, 等. 中国新疆及邻区大地构造图(1: 2500000)说明书[M]. 北京: 地质出版社, 2004: 1-65.  
He Guoqi, Cheng Shoude, Xu Xin, et al. An introduction to the explanatory text of the map of tectonics of Xinjiang and Its Neighbouring Areas (1: 2500000) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004: 1-65 (in Chinese with English abstract).
- [3] Windley B F, Kroener A, Guo J, et al. Neoproterozoic to Paleozoic geology of the Altai Orogen, NW China: New zircon age data and tectonic evolution[J]. *Journal of Geology*, 2002, 110(6): 719-737.
- [4] 王登红, 陈毓川, 徐志刚, 等. 阿尔泰山成矿省的成矿系列及成矿规律[M]. 北京: 原子能出版社, 2002: 1-493.  
Wang Denghong, Chen Yuchuan, Xu Zhigang, et al. Metallogenic Series and Regularity of Altay Metallogenic Province[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2002: 1-493 (in Chinese).
- [5] Mao J W, Pirajno F, Zhang Z H, et al. A review of the Cu-Ni sulphide deposits in the Chinese Tianshan and Altay orogens (Xinjiang Autonomous Region, NW China): Principal characteristics and ore-forming processes[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 32: 184-203.
- [6] Xiao W J, Kröner A, Windley B F. Geodynamic evolution of Central Asia in the Paleozoic and Mesozoic[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2009, 98(6): 1185-1188.
- [7] 杨富全, 刘锋, 柴凤梅, 等. 新疆阿尔泰山铁矿: 地质特征、时空分布及成矿作用[J]. *矿床地质*, 2011, 30(4): 575-598.  
Yang Fuquan, Liu Feng, Chai Fengmei, et al. Iron deposits in Altay, Xinjiang: Geological characteristics, time-space distribution and metallogenesis[J]. *Mineral Deposits*, 2011, 30(4): 575-598 (in Chinese with English abstract).
- [8] 柴凤梅, 毛景文, 董连慧, 等. 阿尔泰山南缘克朗盆地康布铁堡组变质火山岩年龄及岩石成因[J]. *岩石学报*, 2009, 25(6): 1403-1415.  
Chai Fengmei, Mao Jingwen, Dong Lianhui, et al. Geochronology and genesis of the meta-rhyolites in the Kangbutiebao Formation from the Kelang basin at the southern margin of the Altay, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(6): 1403-1415 (in Chinese with English abstract).
- [9] 吴礼道, 周维康, 王占宇. 新疆阿克希克金矿地球化学异常的研究[J]. *地质找矿论丛*, 1993, 8(1): 73-83.  
Wu Lidao, Zhou Weikang, Wang Zhanyu. A study on geochemical anomalies of Akexike gold deposit[J]. *Contributions to Geology*



- and Mineral Resources Research, 1993, 8(1): 73–83 (in Chinese with English abstract).
- [10] Yang F Q, Mao J W, Pirajno Franco, et al. A review of the geological characteristics and geodynamic setting of Late Paleozoic porphyry copper deposits in the Junggar region, Xinjiang Uygur Autonomous Region, Northwest China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012, 49: 80–98.
- [11] 吕书君, 杨富全, 柴凤梅, 等. 东准噶尔北缘老山口铁铜金矿区侵入岩U–Pb定年及地质意义[J]. 地质论评, 2012, 58(1): 149–164.  
Lv Shujun, Yang Fuquan, Chai Fengmei, et al. Zircon U–Pb dating for intrusions in Laoshankou ore district in northern margin of east Junggar and their significances[J]. Geological Review, 2012, 58(1): 149–164 (in Chinese with English abstract).
- [12] Zhang Z C, Yan S H, Chen B L, et al. SHRIMP zircon U–Pb dating for subduction–related granitic rocks in the northern part of east Junggar, Xinjiang[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(8): 952–962.
- [13] Chen B, Jahn B M. Genesis of post–collisional granitoids and basement nature of the Junggar terrane, NW China: Nd–Sr isotope and trace element evidence[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2004, 23: 691–703.
- [14] 张作衡, 柴凤梅, 杜安道, 等. 新疆喀拉通克铜镍硫化物矿床Re–Os同位素测年及成矿物质来源示踪[J]. 岩石矿物学杂志, 2005, 24(4): 285–293.  
Zhang Zuoheng, Chai Fengmei, Du Andao, et al. Re–Os dating and ore–forming material tracing of the Karatungk Cu–Ni sulfide deposit in norther Xinjiang[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2005, 24(4): 285–293 (in Chinese with English abstract).
- [15] 安希贵, 王建平. 新疆福海县阿克希克铁矿普查报告[R]. 2006: 1–38.  
An Xigui, Wang Jianping. Preliminary exploration report of the Akexike Fe deposit in Fuhai county, Xinjiang[R]. 2006: 1–38 (in Chinese).
- [16] Clayton R N and Mayeda T K. The use of bromine pentafluoride in the extraction of oxygen from oxides and silicates for isotopic analysis[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1963, 27: 43–52.
- [17] Mao J W, Wang Y T, Ding T P, et al. Dashuigou tellurium deposit in Sichuan Province, China: S, C, O, and H isotope data and their implications on hydrothermal mineralization[J]. Resource Geology, 2002, 52: 15–23.
- [18] Coleman M L, Sheppard T J, Durham J J, et al. Reduction of water with zinc for hydrogen isotope analysis[J]. Analytical Chemistry, 1982, 54: 993–995.
- [19] 卢焕章, 范宏瑞, 倪培, 等. 流体包裹体[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 1–485.  
Lu Huanzhang, Fan Hongrui, Ni Pei, et al. Fluid inclusions[M]. Beijing: Science Press, 2004: 1–485 (in Chinese with English abstract).
- [20] Bodnar R J. A method of calculating fluid Inclusion volumes based on vapor bubble diameters and PVTX properties of fluids inclusions[J]. Economic Geology, 1983, 78: 535–542.
- [21] Burruss R C. Analysis of phase equilibria in C–O–H–S fluid inclusions // Hollister L S, Crawford M L. Short Course Handbook. Mineralogical Association of Canada, 1981, 6: 39–74.
- [22] Collins P L F. Gas hydrates in CO<sub>2</sub>–bearing fluid inclusions and the use of freezing data for estimation of salinity[J]. Economic Geology, 1979, 74: 1435–1444.
- [23] 张敏, 张建锋, 李林强, 等. 激光拉曼探针在流体包裹体研究中的应用[J]. 世界核地质科学, 2007, 24(4): 238–244.  
Zhang Min, Zhang Jianfeng, Li Linqiang, et al. The application of Laser Raman Microprobe to the study of fluid inclusion[J]. World Nuclear Geoscience, 2007, 24(4): 238–244 (in Chinese with English abstract).
- [24] 何谋春, 张志坚. 显微激光拉曼光谱在矿床学中的应用[J]. 岩矿测试, 2001, 20(1): 43–47.  
He Mouchun, Zhang Zhijian. The application of Laser Raman Microspectroscopy to study of mineral deposits[J]. Rock and Mineral Analysis, 2001, 20(1): 43–47 (in Chinese with English abstract).
- [25] Clayton R N, O’neil J R and Mayeda T K. Oxygen isotope exchange between quartz and water[J]. Journal of Geophysical Research, 1972, 77: 3057–3067.
- [26] 张志欣, 杨富全, 黄承科, 等. 新疆阿尔泰托莫尔特铁(锰)矿床成矿流体研究[J]. 矿床地质, 2012, 31(5): 1025–1037.  
Zhang Zhixin, Yang Fuquan, Huang Chengke, et al. A study of ore–forming fluids of Tuomoerte Fe–(Mn) deposit in Altay, Xinjiang[J]. Mineral Deposits, 2012, 31(5): 1025–1037 (in Chinese with English abstract).
- [27] 耿新霞, 杨富全, 杨建民, 等. 新疆阿尔泰铁木尔特铅锌矿床流体包裹体研究及地质意义[J]. 岩石学报, 2010, 26(3): 695–706.  
Geng Xinxia, Yang Fuquan, Yang Jianmin, et al. Characteristics of fluid inclusions in the Tiemurte Pb–Zn deposit, Altay, Xinjiang and its geological significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(3): 695–706 (in Chinese with English abstract).
- [28] 刘敏, 张作衡, 王永强, 等. 新疆阿尔泰大东沟铅锌矿床流体包裹体特征及成矿作用[J]. 矿床地质, 2009, 28(3): 282–296.  
Liu Min, Zhang Zuoheng, Wang Yongqiang, et al. Fluid inclusion characteristics and mineralization of Dadonggou Pb–Zn ore deposit in Altay, Xinjiang[J]. Mineral Deposits, 2009, 28(3): 282–296 (in Chinese with English abstract).
- [29] Van den Kerkhof A and Thiery R. Carbic inclusions[J]. Lithos, 2001, 55: 49–68.
- [30] 徐九华, 单立华, 丁汝福, 等. 阿尔泰铁木尔特铅锌矿床的碳质流体组合及其地质意义[J]. 岩石学报, 2008, 24(9): 2094–2104.  
Xu Jiuhua, Shan Lihua, Ding Rufu, et al. Carbonic fluid inclusion assemblages and their geological significance at the Tiemurte lead–zinc deposit, Altay[J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(9):

- 2094–2104 (in Chinese with English abstract).
- [31] 徐学纯, 郑常青, 赵庆英. 阿尔泰海西造山带区域变质作用类型与地壳演化[J]. 吉林大学学报, 2005, 35(1): 7–11.  
Xu Xuechun, Zheng Changqing, Zhao Qingying. Metamorphic types and crustal evolution of Hercynian orogenic belt in Altai region, Xinjiang[J]. Journal of Jilin University, 2005, 35(1): 7–11 (in Chinese with English abstract).
- [32] 郑常青, 徐学纯, Takenori K, 等. 新疆阿尔泰冲乎尔地区蓝晶石-夕线石型变质带独居石 CHIME 二叠纪年龄及其地质意义[J]. 高校地质学报, 2007, 13(3): 566–573.  
Zheng Changqing, Xu Xuechun, Takenori K, et al. Permian CHIME ages of monazites for the kyanite-sillimanite type metamorphic belt in Chonghuer area, Altai, Xinjiang and their geological implications[J]. Geological Journal of China Universities, 2007, 13(3): 566–573 (in Chinese with English abstract).
- [33] 徐九华, 林龙华, 王琳琳, 等. 阿尔泰克兰盆地 VMS 矿床的变形变质与碳质流体特征[J]. 矿床地质, 2009, 28(5): 585–598.  
Xu Jiuhua, Lin Longhua, Wang Linlin, et al. Deformation, metamorphism and carbonic fluids in VMS deposits of Kelan Basin, Altay[J]. Mineral Deposits, 2009, 28(5): 585–598 (in Chinese with English abstract).
- [34] 徐九华, 肖星, 迟好刚, 等. 阿尔泰南缘克兰盆地的脉状金-铜矿化及其流体演化[J]. 岩石学报, 2011, 27(5): 1299–1310.  
Xu Jiuhua, Xiao Xing, Chi Haogang, et al. Fluid inclusion study on gold-copper mineralization in Lower Devonian strata of the Kelan basin, Altay, Chian[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(5): 1299–1310 (in Chinese with English abstract).
- [35] Kerrich R, Goldfarb R J, Groves D I, et al. The characteristics, origins and geodynamic setting of supergiant gold metallogenic provinces[J]. Science in China (Series D), 2000, 43(supp): 1–68.
- [36] Fan H R, Zhai M G, Xie Y H, et al. Ore-forming fluids associated with granite-hosted gold mineralization at the Sanshandao deposit, Jiaodong gold province, China[J]. Mineralium Deposita, 2003, 38: 739–750.
- [37] Suzuoki T, Epstein S. Hydrogen isotope fractionation between OH-bearing minerals and water[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1976, 40: 1229–1240.
- [38] 陈毓川, 叶庆同, 冯京, 等. 阿舍勒铜锌成矿带成矿条件和成矿预测[M]. 北京: 地质出版社, 1996: 1–330.  
Chen Yuchuan, Ye Qingtong, Feng Jing, et al. Ore-forming Conditions and Metallogenic Prognosis of the Ashele Copper-Zinc Metallogenic Belt, Xinjiang, China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996: 1–330 (in Chinese with English abstract).
- [39] 陈衍景. 造山型矿床、成矿模式及找矿潜力[J]. 中国地质, 2006, 33: 1181–1196.  
Chen Yanjing. Orogenic-type deposits and their metallogenic model and exploration potential[J]. Geology in China, 2006, 33: 1181–1196 (in Chinese with English abstract).
- [40] 陈衍景, 倪培, 范宏瑞, 等. 不同类型热液金矿系统的流体包裹体特征[J]. 岩石学报, 2007, 23(9): 2085–2108.  
Chen Yanjing, Ni Pei, Fan Hongrui, et al. Diagnostic fluid inclusions of different types hydrothermal gold deposits[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(9): 2085–2108 (in Chinese with English abstract).
- [41] Mernagh T P, Bastrakov E N, Zaw K, et al. Comparison of fluid inclusion data and mineralization processes for Australian orogenic gold and intrusion-related gold system[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(1): 21–32.
- [42] 陈衍景, 张静, 刘丛强, 等. 试论中国陆相油气侧向源——碰撞造山成岩成矿模式的拓展和运用[J]. 地质论评, 2001, 47(3): 261–271.  
Chen Yanjing, Zhang Jing, Liu Congqiang, et al. The lateral source of the continental oil and gas of China: extension and application of the CPMF model[J]. Geological Review, 2001, 47(3): 261–271 (in Chinese with English abstract).
- [43] Sheppard S M F. Characterization and isotopic variations in natural waters[J]. Reviews in Mineralogy, 1986, 16: 165–183.
- [44] 张招崇, 侯通, 李厚民, 等. 岩浆-热液系统中铁的富集机制探讨[J]. 岩石学报, 2014, 30(5): 1189–1204.  
Zhang Zhaochong, Hou Tong, Li Houmin, et al. Enrichment mechanism of iron in magmatic-hydrothermal system[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(5): 1189–1204 (in Chinese with English abstract).
- [45] 李厚民, 王登红, 李立兴, 等. 中国铁矿成矿规律及重点矿集区资源潜力分析[J]. 中国地质, 2012, 39(3): 559–580.  
Li Houmin, Wang Denghong, Li Lixing, et al. Metallogeny of iron deposits and resource potential of major iron minerogenetic units in China[J]. Geology in China, 2012, 39(3): 559–580 (in Chinese with English abstract).
- [46] Dill H G. The “chessboard” classification scheme of mineral deposits: mineralogy and geology from aluminum to zirconium[J]. Earth Sci. Rev., 2010, 100: 1–420.
- [47] Hou T, Zhang Z C, Santosh M, et al. Geochronology and geochemistry of submarine volcanic rocks in the Yamansu iron deposit, Eastern Tianshan Mountain, NW China: Constraints on the metallogenesis[J]. Ore Geology Reviews, 2014, 56: 487–502.
- [48] 张招崇, 周刚, 闫升好, 等. 阿尔泰山南缘晚古生代火山岩的地质地球化学特征及其对构造演化的启示[J]. 地质学报, 2007, 81(3): 344–357.  
Zhang Zhaochong, Zhou Gang, Yan Shenghao, et al. Geology and geochemistry of the Late Paleozoic volcanic rocks of the south margin of the Altai Mountains and implications for tectonic evolution[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(3): 344–357 (in Chinese with English abstract).
- [49] Zhang Z C, Zhou G, Kusky T M, et al. Late Paleozoic volcanic record of the Eastern Junggar terrane, Xinjiang, Northwestern China: Major and trace element characteristics, Sr-Nd isotopic

- systematic and implications for tectonic evolution[J]. *Gondwana Research*, 2009, 16: 201–215.
- [50] 于学元, 梅厚钧, 姜福芝, 等. 额尔齐斯火山岩和成矿作用[M]. 北京: 科学出版社, 1995: 1–245.  
Yu Xueyuan, Mei Houjun, Jiang Fuzhi, et al. *Volcanic Rocks and Metallogenesis of Irtysh*[M]. Beijing: Science Press, 1995: 1–245 (in Chinese).
- [51] 陈毓川, 刘德权, 王登红, 等. 新疆北准噶尔苦橄岩的发现及其地质意义[J]. *地质通报*, 2004, 31(11): 1059–1065.  
Chen Yuchuan, Liu Dequan, Wang Denghong, et al. Discovery and geological significance of picritic rocks in north Junggar, Xinjiang[J]. *Geological Bulletin of China*, 2004, 31(11): 1059–1065 (in Chinese with English abstract).
- [52] 张海祥, 牛贺才, Hiroaki Sato, 等. 新疆北部晚古生代埃达克岩、富铌玄武岩组合: 古亚亚洲洋板块南向俯冲的证据[J]. *高校地质学报*, 2004, 10(1): 106–113.  
Zhang Haixiang, Niu Hecai, Hiroaki Sato, et al. Late Paleozoic adakite and Nb-enriched basalt from Northern Xinjiang: Evidence for the southward subduction of the Paleo-Asian ocean[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2004, 10(1): 106–113 (in Chinese with English abstract).
- [53] Zhang Z C, Mao J W, Cai J H, et al. Geochemistry of picrites and associated lavas of a Devonian island arc in the Northern Junggar terrane, Xinjiang (NW China): implications for petrogenesis, arc mantle sources and tectonic setting[J]. *Lithos*, 2008, 105: 379–395.
- [54] 张招崇, 闫升好, 陈柏林, 等. 阿尔泰山造山带南缘中泥盆世苦橄岩及其大地构造和岩石学意义[J]. *地球科学*, 2005, 30(3): 289–297.  
Zhang Zhaochong, Yan Shenghao, Chen Bailin, et al. Middle Devonian picrites of south margin of Altay orogenic belt and implications for tectonic setting and petrogenesis[J]. *Earth Science*, 2005, 30(3): 289–297 (in Chinese with English abstract).
- [55] 张招崇, 闫升好, 陈柏林, 等. 新疆东准噶尔北部俯冲花岗岩的 SHRIMP U–Pb 锆石定年[J]. *科学通报*, 2006, 51(13): 1565–1574.  
Zhang Zhaochong, Yan Shenghao, Chen Bailin, et al. SHRIMP zircon U–Pb dating for subduction-related granitic rocks in the northern part of east Junggar, Xinjiang[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(8): 952–962 (in Chinese with English abstract).
- [56] 柴凤梅, 杨富全, 刘锋, 等. 新疆准噶尔北缘北塔山组火山岩年龄及岩石成因[J]. *岩石学报*, 2012, 28(7): 2183–2198.  
Chai Fengmei, Yang Fuquan, Liu Feng, et al. Geochronology and genesis of volcanic rocks in Beitashan Formation at the northern margin of the Junggar, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(7): 2183–2198 (in Chinese with English abstract).
- [57] Bell A S, Simon A. Experimental evidence for the alteration of the  $Fe^{2+}/\Sigma Fe$  of silicate melt caused by the degassing of chlorine-bearing aqueous volatiles[J]. *Geology*, 2011, 39: 499–502.
- [58] 郑义, 张莉, 郭正林. 新疆铁木尔特铅锌铜矿床锆石 U–Pb 和 黑云母  $^{40}Ar/^{39}Ar$  年代学及其矿床成因意义[J]. *岩石学报*, 2013, 29(1): 191–204.  
Zheng Yi, Zhang Li, Guo Zhenglin. Zircon LA–ICP–MS U–Pb and biotite  $^{40}Ar/^{39}Ar$  geochronology of the Tiemuert Pb–Zn–Cu deposit, Xinjiang: Implications for ore genesis[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(1): 191–204 (in Chinese with English abstract).
- [59] Boullier A M, Firdaus K, Robert F. On the significance of aqueous fluid inclusions in gold–quartz vein deposits from the southeastern Abitibi Sub Province (Quebec, Canada) [J]. *Economic Geology*, 1998, 93: 216–223.
- [60] Uemoto T, Ridley J, Mikucky E, et al. Fluid chemical evolution as a factor in controlling the distribution of gold at the Archean Golden Crown Lode Gold Deposit, Murchison Province, Western Australia[J]. *Economic Geology*, 2002, 97: 1227–1248.
- [61] 范宏瑞, 谢弈汉, 翟明国, 等. 豫陕小秦岭脉状金矿床三期流体运移成矿作用[J]. *岩石学报*, 2003, 19(2): 260–266.  
Fan Hongrui, Xie Yihan, Zhai Mingguo, et al. A three stage fluid flow model for Xiaoqinling lode gold metallogenesis in the Henan and Shaanxi provinces, central China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2003, 19(2): 260–266 (in Chinese with English abstract).
- [62] Xu J H, Ding R F, Xie Y L, et al. Pure  $CO_2$  fluid in the Sarekoubu gold deposit at southern margin of Altai Mountains in Xinjiang, West China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(4): 333–340.
- [63] 徐九华, 谢玉玲, 丁汝福, 等.  $CO_2$ – $CH_4$  流体与进程矿作用: 以阿尔泰山南缘和穆龙套金矿为例[J]. *岩石学报*, 2007, 23(8): 2026–2032.  
Xu Jiuhua, Xie Yuling, Ding Rufu, et al.  $CO_2$ – $CH_4$  fluids and gold mineralization: southern margin of Altay, China and Murantau of Uzbekistan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(8): 2026–2032 (in Chinese with English abstract).
- [64] Goldfarb R J, Groves D I, Gardoll S. Orogenic gold and geologic time: A global synthesis[J]. *Ore Geology Review*, 2001, 18: 1–75.
- [65] Groves D I, Goldfarb R J, Robert F, et al. Gold deposits in metamorphic belts: Overview of current understanding, outstanding problems, future research, and exploration significance[J]. *Economic Geology*, 2003, 98: 1–29.
- [66] Ridley J R, Diamond L W. Fluid chemistry of orogenic lode gold deposits and implications for genetic models[J]. *Reviews in Economic Geology*, 2000, 13: 141–162.
- [67] Phillips G N, Evans K A. Role of  $CO_2$  in the formation of gold deposits[J]. *Nature*, 2004, 429: 860–863.
- [68] Yardley B W D, Banks D A, Bottrell S H, et al. Post-metamorphic gold–quartz veins from N. W. Italy the composition and origin of the ore fluid[J]. *Mineralogical Magazine*, 1993, 57: 407–422.
- [69] Bodnar. Short Course “Fluids in the Earth” in Nanjing[R]. 2014.

## Study on fluid inclusions of the Akexike Fe–Au deposit in northern Junggar, Xinjiang

LI Qiang<sup>1</sup>, YANG Fu–quan<sup>1</sup>, CHAI Feng–mei<sup>2</sup>, YANG Jun–jie<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Ministry of Land and Resources, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. Xinjiang Key Laboratory for Geodynamic Processes and Metallogenic Prognosis of the Central Asian Orogenic Belt, Xinjiang University, Urumqi 830046, Xinjiang, China)

**Abstract:** The Akexike Fe–Au deposit on the northern margin of the Junggar Basin occurs in the contact zone between volcanic rocks and tuffs of the Nanmingshui Formation. The orebodies are podiform, veined, and lenticular in form. The deposit has experienced silicification, sericitization, chloritization, pyritization and carbonatization. Field evidence and petrographic analysis indicate two periods of metallogenesis: the volcanic–sedimentary period associated with the development of Fe mineralization and the hydrothermal period associated with Au mineralization. Liquid– and a few CO<sub>2</sub>– rich inclusions characterize the volcanic–sedimentary period, whereas CO<sub>2</sub>– and carbon (CH<sub>4</sub> and C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>)– rich inclusions characterize the hydrothermal period. Volcanic–sedimentary period had NaCl–H<sub>2</sub>O–CO<sub>2</sub> fluids with moderate temperature (major T<sub>h</sub> of 180–320 °C), low salinity (mainly 6–10 wt% NaCl<sub>eq</sub>), and moderate to low density (0.59–0.98 g/cm<sup>3</sup>). Hydrothermal period has NaCl–H<sub>2</sub>O–CO<sub>2</sub>–CH<sub>4</sub> fluids with moderate temperature (major T<sub>h</sub> of 220–320°C), low salinity (mainly 2–10 wt% NaCl<sub>eq</sub>), and moderate to low density (0.55–1.03 g/cm<sup>3</sup>). Stable isotope analysis of quartz yielded values of –129.9‰ to –97.9‰ for δD, 7.9‰ to 12.3‰ for δ<sup>18</sup>O<sub>SMOW</sub>, and –2.6‰ to 4.4‰ for δ<sup>18</sup>O<sub>fluid</sub>, indicating that the ore–forming fluids were magmatic fluids mixed with seawater. δD, δ<sup>18</sup>O<sub>SMOW</sub>, and δ<sup>18</sup>O<sub>fluid</sub> values of the hydrothermal period are –129.8‰ – –102.6‰, 11.2‰ – 16.1‰, and 3.1‰ – 7.4‰, respectively, indicating that the ore–forming fluids were metamorphic water mixed with deeply circulated meteoric water. Combined with geological characteristics and fluids composition, the authors hold that Au mineralization of hydrothermal period was closely associated with CO<sub>2</sub>–CH<sub>4</sub> fluids.

**Key words:** ore–forming fluids; stable isotope; metallogenic processes; Fe–Au deposit; Akexike.

**About the first author:** LI Qiang, male, born in 1987, doctor candidate, majors in mineral deposit; E–mail: liqiangcags@gmail.com.

**About the corresponding author:** YANG Fu–quan, male, born in 1968, supervisor of doctor candidates, engages in the study of mineral deposits and geochemistry; E–mail: fuquanyang@163.com.