

# 卡拉麦里金矿带典型矿床

## ——双泉金矿的地质地球化学特征及成因

聂晓勇<sup>1,2,3</sup>, 宋谢炎<sup>1</sup>, 薄科武<sup>3</sup>, 章文忠<sup>3</sup>, 刘涛<sup>3</sup>

1. 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550002; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049;

3. 武警黄金部队第八支队, 乌鲁木齐 830057

**摘要:**双泉金矿是东准噶尔卡拉麦里金矿带中新近发现的一个中型构造蚀变岩型金矿床。矿床产于韧性剪切带中, 赋矿地层为下石炭统南明水组地层, 矿石类型主要为蚀变岩型。本文通过主要矿化阶段热液矿物毒砂成分的测定, 利用相图中共生金属硫化物稳定温度范围得出主要矿化阶段的温度为 300~450℃, 它比通过石英流体包裹体测得的均一温度更准确地代表成矿流体的温度, 由此温度平均值计算出的氢氢同位素能准确判断初始流体的来源。氢氢同位素的小范围内变化可能受成矿流体不同阶段温度的变化和组分变化的影响。综合地质地球化学资料表明, 双泉金矿为与韧性剪切带有关的变质热液金矿床, 韧性剪切带即为导矿构造和容矿构造; 成矿物质可能主要来源于下石炭统南明水组中的火山岩和火山碎屑岩。

**关键词:**共生矿物; 矿化阶段; 成矿温度; 双泉金矿; 卡拉麦里金矿带

中图分类号: P618.510.145 文献标识码: A 文章编号: 1007-2802(2009)02-0169-08

### The Geological-geochemical Characteristics and Genesis of Shuangquan Typical Gold Deposit in Kalameily Belt, East Junggar, Xinjiang

NIE Xiao-yong<sup>1,2,3</sup>, SONG Xie-yan<sup>1</sup>, BO Ke-wu<sup>3</sup>, ZHANG Wen-zhong<sup>3</sup>, LIU Tao<sup>3</sup>

1. Institute of Geochemistry of Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. No. 8 Geological Party of CAPF, Urumchi 830057, China

**Abstract:** Shuangquan gold deposit is a medium size tectono-alteration ore gold deposit recently discovered in kalamaily gold metallogenic belt of east junggar. The deposit is hosted in ductile shear zone and occurs in Nanmingshui group formation of Lower Carboniferous. The Au ore types are mostly metamorphic rock. Based on EPMA analysis of arsenopyrite and the phase diagram of coexisting minerals pyrite-arsenopyrite, we conclude that temperature of the main mineralization stage is stable within 300~450℃. This temperature reflects the mineralization temperature much better than the homogenization temperature obtained from inclusion fluid. The isotopic compositions of oxygen and hydrogen calculated under such average temperature are more accurate when tracing the origin of ore-forming fluids. The narrow variation of hydrogen and oxygen isotope could be resulted from the stage changes of temperature and composition of ore-forming fluids. Application of geological and geochemical data show that Shuangquan gold deposit is a metamorphic hydrothermal gold deposit related to ductile shear zone. Ductile shear zones provid the ore-transmitting structure and ore-depositing structures. The sources of ore-forming material may be originated from volcanic rocks and volcanoclastic rocks in Nanmingshui group formation of Lower Carboniferous.

**Key words:** coexisting minerals; mineralization stage; temperature of mineralization; Shuangquan gold deposit; Kalameily gold metallogenic belt

收稿日期: 2008-01-28 收到, 05-20 改回

基金项目: 中科院“百人计划”项目; 国家自然科学基金资助项目(40573014)

第一作者简介: 聂晓勇(1977—), 男, 硕士研究生, 矿物、岩石、矿床学专业. Email: xiaoyong.nie@163.com.

通讯作者: 宋谢炎(1962—), 男, 博导, 矿床地球化学专业. Email: songxieyan@vip.gyig.ac.cn.

卡拉麦里金矿带位于西伯利亚板块西南缘的东准噶尔古生代造山带<sup>[1]</sup>,是目前东准噶尔地区最重要的金矿带。它与西准噶尔地区安齐金矿带具有许多相似的金成矿地质条件:1)均位于西伯利亚与哈萨克-准噶尔板块间的古生代造山带中,即准噶尔板块的西北缘和东北缘;2)带中多数金矿产于区域浅变质的中、下石炭统地层,与火山碎屑岩、细碎屑岩和火山岩关系密切;3)断裂构造对金矿的分布有控制作用,金矿沿断裂呈带状分布,安齐成矿带中金矿床(点)主要沿安齐断裂分布。矿带中金矿多呈带状分布于卡拉麦里断裂与清水-苏吉泉断裂之间;4)金矿化类型主要为石英脉型或蚀变岩型<sup>[2]</sup>。安齐成矿带已发现了大型金矿床哈图金矿一处、中型金矿床如齐Ⅱ金矿床多处。卡拉麦里金矿带中金矿床(点)众多,分布面广,但大多数为探明储量5 t以下的小型金矿床、金矿点。双泉金矿为卡拉麦里金矿带中部新近发现的中型构造蚀变岩型金矿床,但迄今仅限于地质特征及基本成矿条件的分析,未能解决矿床成因问题。本文通过对主要成矿阶段金的赋存状态、共生矿物特征及蚀变带岩石物质成分变化的研究,结合卡拉麦里金矿带成矿流体的氢氧同位素特征及成矿动力学背景,初步探讨了双泉金矿的成因,为本区同类型的金矿找矿提供一定的指导。

## 1 卡拉麦里金矿带地质概况

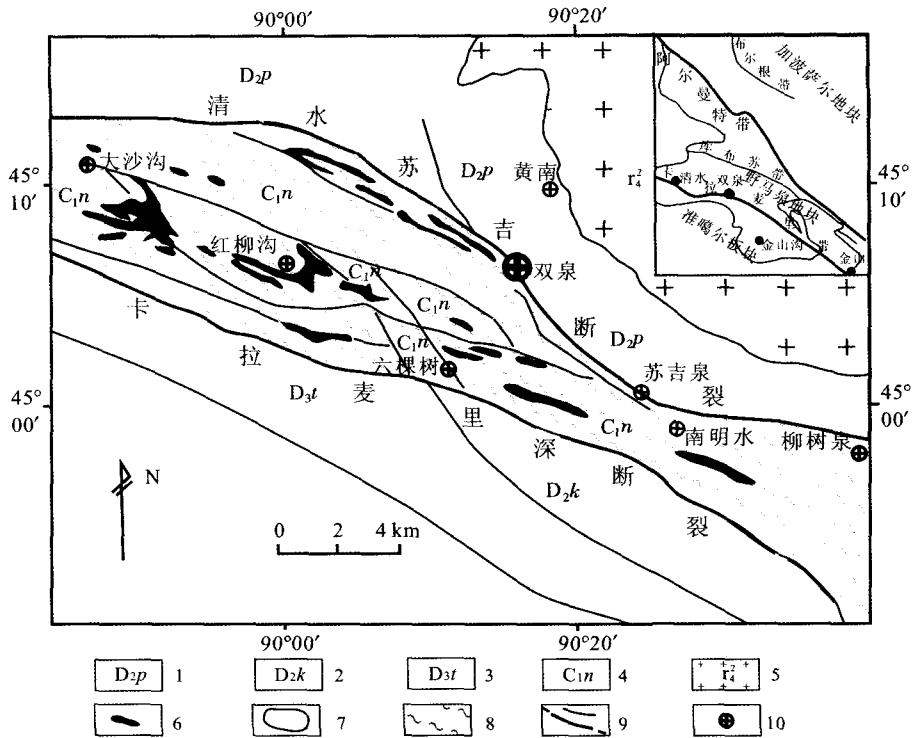
卡拉麦里金矿带处于准噶尔板块与野马泉地块之间的卡拉麦里碰撞缝合带中<sup>[1]</sup>,是东准噶尔众多北西—南东向金矿带(布尔根、阿尔曼特、库布苏、卡拉麦里金矿带)中最南侧的一条<sup>[3]</sup>,该带被卡拉麦里和清水-苏吉泉两个高角度逆冲断裂所夹持,主要由强烈变形的古生代地层和严格受断裂控制的超基性岩体构成,为一蛇绿混杂岩带。区域地质资料表明,泥盆纪时卡拉麦里有限洋盆形成并持续向两侧的陆块俯冲,在陆块边缘产生了陆缘火山弧,蛇绿岩年龄约373 Ma<sup>[4]</sup>,金山沟金矿附近的火山岩K-Ar年龄为326~361 Ma<sup>[3]</sup>;早石炭世末,两侧的陆块相连,卡拉麦里有限洋盆关闭并转变为陆间残余海盆;晚石炭世时碰撞造山作用结束,由被深埋的洋壳和岛弧建造组成的年轻地壳经过部分熔融和结晶分异作用产生大面积分布的富碱花岗岩<sup>[5]</sup>;二叠纪开始进入大陆地壳和陆内山链演化阶段,东准噶尔造山带发生大规模的推覆,在卡拉麦里一带形成强应变构造带(韧-脆性剪切带)。卡拉麦里金矿带分布大致与卡拉麦里韧性剪切带一致。带内出露的下石炭统南明水组(C<sub>1n</sub>)浅海相粉砂岩、砂岩及少量火山碎

屑岩地层,被一系列不同级别北西—南东走向、倾角60~80°的次级断裂和走向北西—南东的清水-南明水复向斜切割和挤压,岩石多破碎、片理化,断层附近更是千枚岩化和糜棱岩化。岩浆岩以偏碱性的花岗岩为主,主要侵位于清水-苏吉泉断裂以北,中基性岩脉在卡拉麦里带中甚少出露。卡拉麦里金矿带热液活动强烈,形成大量北西—南东向规模不等的石英脉、石英碳酸盐脉和硅化蚀变岩带。所有金矿床、矿点均沿北西—南东向分布(图1)。

## 2 双泉金矿地质特征

双泉金矿处于卡拉麦里金矿带中段,即卡拉麦里韧性剪切带中部清水-苏吉泉断裂上、清水-南明水褶皱束中。赋矿地层下石炭统南明水组下亚组(C<sub>1n</sub>)主要为粉砂岩和炭质粉砂岩,夹砾岩、长石砂岩、凝灰砂岩和凝灰岩,向上沉积粒度由细变粗、凝灰质增多(图2)。岩石强烈破碎、片理化,包括三种构造变形:与韧性剪切带形成有成因联系的前阶段韧性剪切和后阶段脆性变形,前者中可见糜棱岩,后者以碎裂岩及构造节理发育为特征,石英及金属硫化物沿构造贯入或以胶结物形式出现;晚于韧性剪切带形成的脆性变形,早期形成的石英及金属硫化物如黄铁矿等呈角砾状,有时呈碎裂状。

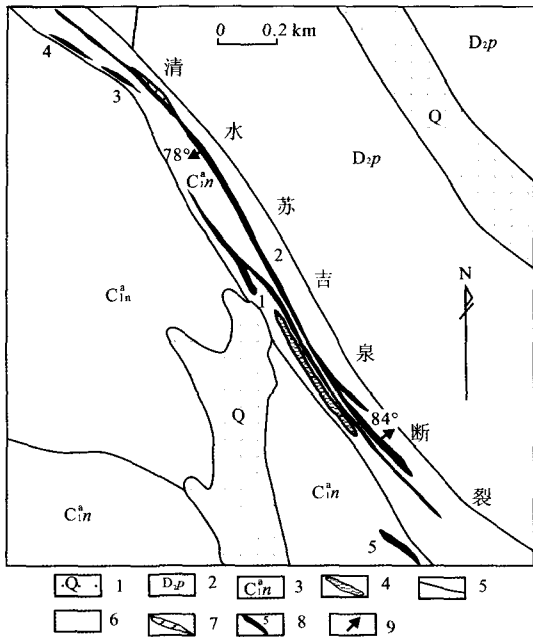
双泉金矿自2003年发现以来,共发现1、2、3、4、5号等5条富金矿脉,矿脉呈雁列阵状赋存于韧性剪切带的次级剪切构造和R剪裂隙中<sup>[6]</sup>,或呈网脉状赋存于韧性剪切带后阶段的脆性裂隙中。以2号脉规模最大,地表出露长约3 km,总体走向233°,倾向近直立,平均品位为2.7 g/t。含金石英细脉和细脉浸染状矿体常呈透镜状、板片状顺沿糜棱面理,或者与糜棱面理和C面呈一定的几何关系,细脉浸染状矿体常位于含金石英细脉边缘。蚀变围岩主要沿清水-苏吉泉韧性剪切带分布,蚀变带宽一般为50~500 m。围岩蚀变类型主要有绿泥石化、红化、硅化、黄铁矿化、毒砂化和绢云母化等。绿泥石化和红化与韧性剪切作用有关。硅化、黄铁矿化、毒砂化和绢云母化属晚期热液蚀变产物,以石英脉为中心,向两侧依次为黄铁矿化-毒砂化带和绢云母化带。这种热液蚀变带是双泉金矿主矿体赋存的场所,叠加于早期绿泥石化带和红化带上。矿石类型主要为蚀变岩型,含少量石英脉。矿石中非金属矿物除石英外,还有较多的钾长石、斜长石等造岩矿物,蚀变矿物绿泥石、绢云母也常见;金属矿物有自然金、银金矿、黄铁矿、毒砂、黄铜矿和黝铜矿等。



1. 中泥盆统平顶山组滨海相火山碎屑岩和碎屑岩; 2. 中泥盆统卡拉麦里组浅海相碎屑岩; 3. 上泥盆统塔木岗组滨海相砂岩、砾岩; 4. 下石炭统南明水组浅海相碎屑岩及火山碎屑岩; 5. 海西中期碱性花岗岩; 6. 超镁铁质岩; 7. 地层界线; 8. 剪切带; 9. 断层; 10. 金矿(点); 据文献[1,6]修编  
modified after references [1, 6]

图1 卡拉麦金矿带区域地质简图

Fig. 1 Sketch Geological map of Kalameily gold metallogenic belt



1. 第四系; 2. 中泥盆统平顶山组; 3. 下石炭统南明水组下亚组; 4. 超基性岩; 5. 断裂; 6. 剪切带; 7. 石英碳酸盐脉; 8. 矿脉及编号; 9. 倾向及倾角

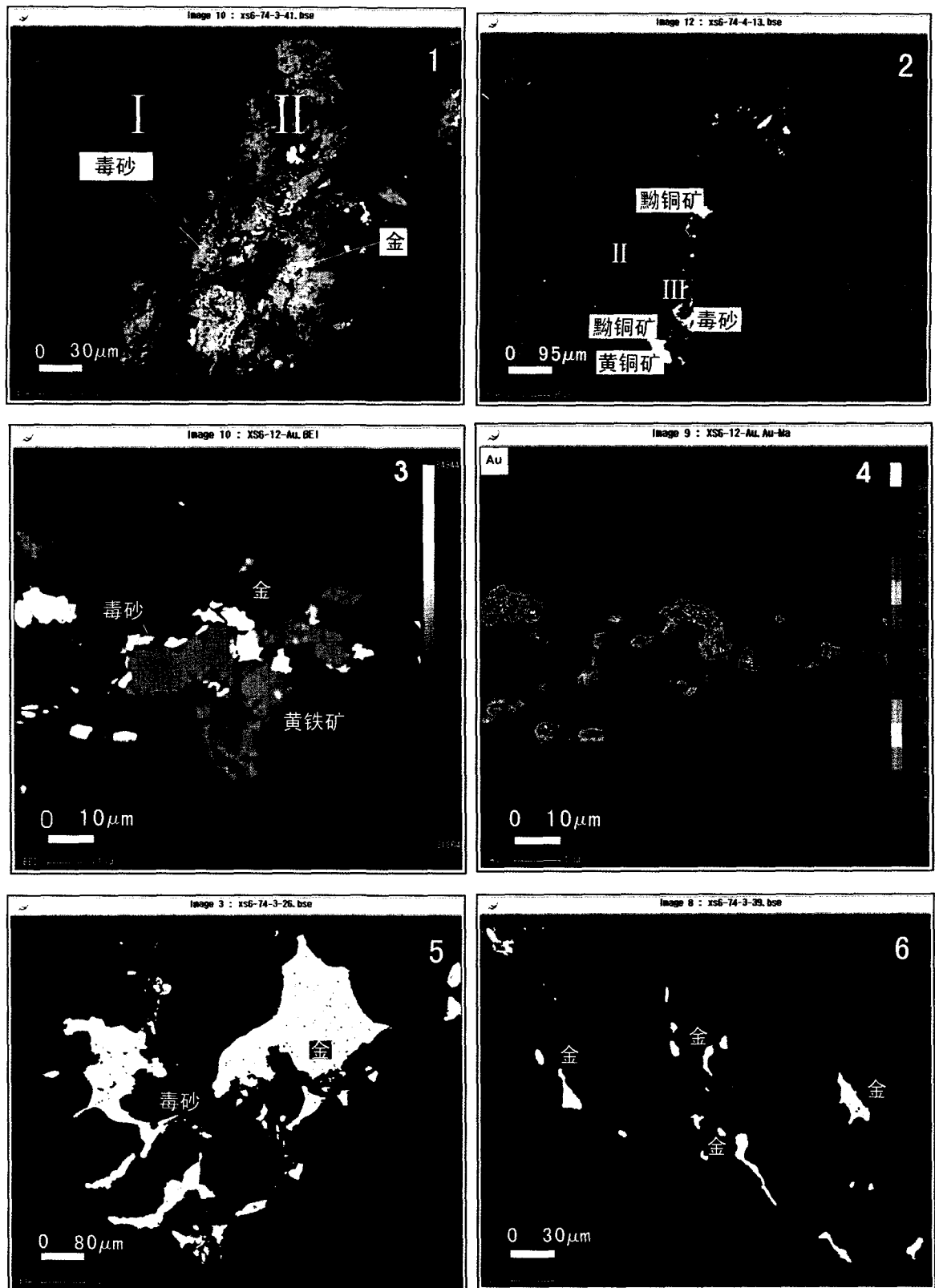
图2 双泉金矿床地质简图

Fig. 2 Sketch geological map of Shuangquan gold deposit

根据野外热液脉体穿插关系及镜下矿物结晶顺序,矿化阶段可划分为三个阶段:第I为黄铁矿-毒砂阶段,第II为金-石英-毒砂-黄铁矿阶段,第III为石英-多金属硫化物阶段(黄铜矿和黝铜矿)。第I阶段表现为较粗粒(粒径0.1~2 mm)、破碎的黄铁矿、毒砂呈稀疏星散浸染于蚀变带。第II阶段细粒(小于0.2 mm)黄铁矿、毒砂呈密集浸染条带状分布于硅化带中或两侧,这种细硅化带穿插于早期毒砂-黄铁矿蚀变带。第III阶段以含黝铜矿、黄铜矿等的细石英脉的出现为特征,黄铁矿与毒砂极少,细石英脉穿插于第二期硅化带。第I阶段形成的蚀变岩型矿石虽然金品位相对较低,但规模较大;第II阶段的硅化带中含有大量的金矿物,矿石品位较高;第III阶段中石英脉中未见金矿物,金品位也较低。第I、II阶段为主要矿化阶段(图3-1~3-3)。

### 3 金的赋存及共生硫化物特征

电子探针分析发现,金主要以晶隙金和裂隙金的形式存在于第I、II阶段的细粒石英、黄铁矿和毒砂等的晶隙或裂隙间(图3-1、3-3、3-5、3-6)。金矿



1,2,3,5,6 为金在黄铁矿、毒砂、石英裂隙、晶隙中的 Bse 图像;4 为 3 中 Au 的分布

图 3 双泉金矿矿石显微结构与金元素分布图

Fig 3 Microstructure and Au element distribution map of gold ores in Shuangquan gold deposit

物以显微金为主,粒度主要为 0.2~200 μm,多为不规则粒状、树杈状、蠕虫状,少数为乳滴状。较难观测到次显微金(小于 0.2 μm),仅见于电子探针面分析图像(图 3-4),不均匀分布于第 I、II 阶段中的黄铁矿、毒砂等载金矿物中,金在这些矿物中可能主要以次显微包体金形式(小于 0.01 μm)存在。金矿物为自然金或少量银金矿,金成色为 771~983 [Au/(Au+Ag)×1000]。第II阶段中的金矿物成色比第I阶段的略低,分别为 771~883 和 865~983。

第 I、II 阶段均有大量毒砂和黄铁矿稳定共生,毒砂多呈短柱状,黄铁矿多为立方体,二者粒度有一定差异。据电子探针波谱分析,第 I 阶段的毒砂中 Fe 含量为 34.17%~34.78%,As 为 43.94%~46.29%,S 为 21.95%~22.99%,毒砂计算分子式

为  $FeAs_{0.94\sim 1.01}S_{1.12\sim 1.16}$ 。黄铁矿中 Fe 为 44.27%~44.71%,As 为 3.46%~6.17%,S 为 49.45%~51.84%(表 1)。黄铁矿计算分子式为  $FeAs_{0.06\sim 0.1}S_{1.95\sim 2.02}$ 。第 II 阶段的毒砂中 Fe 含量为 33.66%~34.51%,As 为 42.16%~45.60%,S 为 22.46%~23.56,毒砂计算分子式为  $FeAs_{0.93\sim 1.00}S_{1.13\sim 1.21}$ 。黄铁矿中 Fe 为 44.58%~45.83%,As 为 1.24%~4.51%,S 为 50.73%~52.87%,计算分子式为  $FeAs_{0.02\sim 0.08}S_{1.98\sim 2.01}$ (表 1)。第 III 阶段中黝铜矿平均质量百分含量:S 为 23.31%,Ag 为 4.00%,Sb 为 27.30%,Cu 为 34.57%,Zn 为 6.1%(为电子探针能谱仪分析结果,测试条件:加速电压 25 kV,束流 5 nA,束斑大小为 1 μm)。

表 1 毒砂和黄铁矿中 S、Fe、As 电子探针分析  
Table 1 S, Fe, As contents in arsenopyrite and pyrite analyzed by EPMA

| 矿物           | 矿化阶段 | 样品编号        | 粒径 / μm | S     | Fe %  | As    | S     | Fe at% | As                    | 合计     | 计算分子式                 |
|--------------|------|-------------|---------|-------|-------|-------|-------|--------|-----------------------|--------|-----------------------|
| 毒砂           | I    | XS6-16-4-56 | 450     | 21.95 | 34.17 | 46.29 | 35.77 | 31.96  | 32.27                 | 102.41 | $FeAs_{1.01}S_{1.12}$ |
|              |      | Xs6-12-5-23 | 200     | 22.99 | 34.78 | 43.94 | 37.22 | 32.33  | 30.45                 | 101.70 | $FeAs_{0.94}S_{1.15}$ |
|              |      | Xs6-12-5-24 | 200     | 22.71 | 34.57 | 44.21 | 36.94 | 32.29  | 30.77                 | 101.48 | $FeAs_{0.95}S_{1.14}$ |
|              |      | Xs6-16-5-2  | 120     | 22.21 | 33.25 | 45.32 | 36.59 | 31.45  | 31.96                 | 100.77 | $FeAs_{0.99}S_{1.16}$ |
|              |      | Xs6-12-5-32 | 100     | 22.72 | 34.53 | 44.83 | 36.80 | 32.12  | 31.08                 | 102.08 | $FeAs_{0.97}S_{1.15}$ |
|              |      | Xs6-12-5-30 | 100     | 22.42 | 34.62 | 44.64 | 36.59 | 32.37  | 31.11                 | 101.69 | $FeAs_{0.96}S_{1.13}$ |
|              | II   | Xs6-16-5-7  | 70      | 22.27 | 33.92 | 45.60 | 36.35 | 31.79  | 31.86                 | 101.78 | $FeAs_{1.00}S_{1.14}$ |
|              |      | Xs6-12-5-14 | 30      | 22.96 | 33.94 | 42.83 | 37.78 | 32.06  | 30.16                 | 99.73  | $FeAs_{0.94}S_{1.18}$ |
|              |      | Xs6-12-5-16 | 15      | 23.56 | 34.11 | 43.80 | 38.07 | 31.64  | 30.29                 | 101.47 | $FeAs_{0.96}S_{1.20}$ |
|              |      | Xs6-12-5-12 | 7       | 23.32 | 33.66 | 45.10 | 37.65 | 31.19  | 31.16                 | 102.08 | $FeAs_{1.00}S_{1.21}$ |
| XS06-16-2A-1 | 5    | 22.53       | 33.94   | 42.16 | 37.52 | 32.44 | 30.04 | 98.63  | $FeAs_{0.93}S_{1.16}$ |        |                       |
| XS06-16-2-6  | 4    | 22.46       | 34.51   | 43.65 | 36.85 | 32.50 | 30.64 | 100.62 | $FeAs_{0.94}S_{1.13}$ |        |                       |
| 黄铁矿          | I    | XS6-16-3-38 | 200     | 49.45 | 44.27 | 6.17  | 63.80 | 32.79  | 3.40                  | 99.88  | $FeAs_{0.10}S_{1.95}$ |
|              |      | XS6-16-4-63 | 60      | 50.61 | 44.71 | 4.85  | 64.60 | 32.76  | 2.65                  | 100.18 | $FeAs_{0.08}S_{1.97}$ |
|              |      | XS6-16-4-62 | 50      | 51.84 | 44.70 | 3.46  | 65.63 | 32.49  | 1.88                  | 100.01 | $FeAs_{0.06}S_{2.02}$ |
|              | II   | xs6-12-5-47 | 15      | 52.84 | 45.72 | 1.24  | 66.37 | 32.97  | 0.67                  | 99.80  | $FeAs_{0.02}S_{2.01}$ |
|              |      | xs6-12-5-48 | 15      | 50.73 | 44.66 | 4.51  | 64.80 | 32.74  | 2.46                  | 99.90  | $FeAs_{0.06}S_{1.98}$ |
|              |      | XS6-16-3-22 | 15      | 51.29 | 44.58 | 4.41  | 65.11 | 32.50  | 2.40                  | 100.28 | $FeAs_{0.07}S_{2.00}$ |
|              |      | XS6-12-1-17 | 12      | 52.87 | 45.83 | 1.51  | 66.23 | 32.96  | 0.81                  | 100.20 | $FeAs_{0.02}S_{2.01}$ |
|              |      | XS6-12-1-15 | 10      | 51.21 | 44.61 | 3.92  | 65.24 | 32.63  | 2.14                  | 99.73  | $FeAs_{0.07}S_{2.00}$ |
| xs6-12-5-45  | 10   | 51.69       | 45.17   | 3.33  | 65.39 | 32.81 | 1.80  | 100.19 | $FeAs_{0.05}S_{1.99}$ |        |                       |

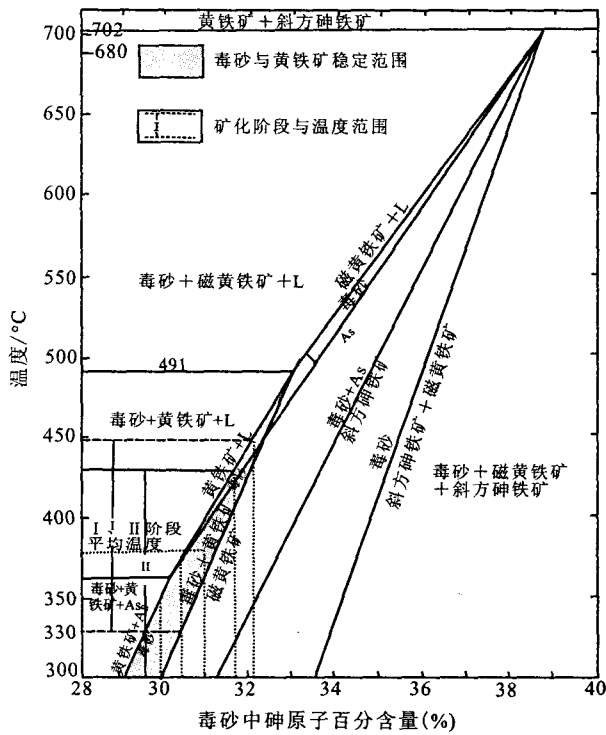
注:WDS 测试条件:加速电压 25kV,束流 10 nA,束斑大小为 10 μm

## 4 讨论与结论

### 4.1 成矿温度

双泉金矿以蚀变岩型金矿为主,含金石英脉中流体包裹体小而少,且大多被后期构造破坏,无法进行流体包裹体研究。故根据第 I、II 矿化阶段中毒砂与黄铁矿稳定共生,不具磁黄铁矿的特征,利用毒砂中 As 原子百分含量,第 I、II 阶段分别为 30.45%~32.27%,30.04%~31.86%,投于毒砂

T-X 相图(图 4)中毒砂与黄铁矿稳定存在区域,得到第 I、II 阶段毒砂与黄铁矿稳定共生的温度分别约为 330~450℃ 和 300~430℃。毒砂和黄铁矿在成矿热液中与金矿物同时沉淀出时,其生成的温度范围也反映了此阶段的成矿温度和成矿热液温度。第 III 阶段石英脉中黄铁矿与毒砂极少,无法用相图读出其成矿温度范围。它的成矿温度范围可以用卡拉麦里一带同类金矿床(点)石英脉中气液包裹体均一温度(132~386℃<sup>[8]</sup>)来表示;可以看出明显低于



据文献[7]修编  
modified after reference [7]  
图4 毒砂与黄铁矿的 T-X 图

Fig 4 The T-X diagram of Asp. and Py.

第 I、II 阶段的温度范围。由于第 I、II 矿化阶段在本矿区为主要矿化阶段,在没有其他更可靠的成矿温度数据时,只能用其温度(300~450℃)大致反映成矿温度。

4.2 蚀变带岩石物质组分变化

研究蚀变带岩石中物质组分变化的核心问题是蚀变过程中主要元素和成矿元素的进出,这首先要确定成矿元素组合和不活动组分。化探数据相关分析得到双泉金矿的成矿相关元素组合为 Au-Ag-As-Sb。研究证明<sup>[9]</sup>,围岩蚀变过程中不活动组分是 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、TiO<sub>2</sub>、Hf、V、Th,它们在蚀变过程中质量得失率均较小,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 TiO<sub>2</sub> 在很多热液矿床蚀变过程中作为惰性组分具有普遍意义,鉴于各样品中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 变化最小,本次研究选取 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为不活动组分。利用蚀变带成分变化的质量平衡方程<sup>[10]</sup>,探讨地球化学过程:

$$C_i^A = (M^0/M^A) \times (C_i^0 + \Delta C_i) \tag{1}$$

式中, C<sub>i</sub><sup>0</sup>、C<sub>i</sub><sup>A</sup> 为原岩、蚀变岩中第 i 种元素的含量, M<sup>0</sup>、M<sup>A</sup> 分别为原岩和蚀变岩的质量,对于不活动元素来说,在围岩蚀变过程中基本上没有发生元素迁移,因此可认为 ΔC<sub>i</sub>=0,则公式(1)可简化为:

$$C_i^A = (M^0/M^A) \times C_i^0 \tag{2}$$

$K = M^0/M^A$ , 确定一种元素为不活动组分后,有  $K = M^0/M^A = C_i^A/C_i^0$ , 则  $\Delta C_i = C_i^A/K - C_i^0$ 。

根据上式可以求出蚀变岩中元素进出变化,“正”为带入,“负”为带出。由表 2 可见,弱蚀变粉砂岩和强蚀变粉砂岩(蚀变岩型矿石)中主要元素(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+FeO)、K<sub>2</sub>O、MgO 均为带入组分,而 SiO<sub>2</sub>、CaO 为带出组分;成矿元素 Au、As、Sb 均有不同程度的带入,Cu、Pb、Zn 等低温元素组分则有不同程度的带出,Ag 变化较小。这也说明蚀变过程中成矿流体组分的变化,造成不同矿化阶段沉淀出不同的矿物组合,第 I 阶段以较粗粒毒砂、黄铁矿和成色较高的金矿物为主,第 II 阶段为较细粒的毒砂、黄铁矿和成色较低的金矿物和石英,第 III 阶段主要沉淀石英和含 Ag、Cu、Zn 为主的黝铜矿、黄铜矿等。结合上述各阶段温度的变化,说明不同阶段温度变化与成矿流体组分有相互对应的关系。

表 2 蚀变岩中主要元素及微量元素的进出

Table 2 Gain-loss of major and trace elements of altered rocks

| 样号                             | FQD-22<br>粉砂岩 | FQD-60<br>弱蚀变<br>粉砂岩 | FQD-63<br>强蚀变粉<br>砂岩(矿石) | K=1.23<br>粉砂岩-弱<br>蚀变粉砂岩 | K=1.13<br>粉砂岩-强<br>蚀变粉砂岩 |
|--------------------------------|---------------|----------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 71.8          | 62.1                 | 68.7                     | -21.2                    | -11.2                    |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 11.2          | 13.7                 | 12.7                     | 0.0                      | 0.0                      |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.4           | 3.0                  | 3.9                      | 2.0                      | 3.0                      |
| FeO                            | 2.6           | 2.3                  | 1.7                      | -0.7                     | -1.0                     |
| MgO                            | 0.9           | 1.9                  | 0.9                      | 0.7                      | -0.1                     |
| CaO                            | 3.2           | 3.2                  | 1.1                      | -0.6                     | -2.2                     |
| Na <sub>2</sub> O              | 3.6           | 0.4                  | 0.2                      | -3.3                     | -3.5                     |
| K <sub>2</sub> O               | 2.8           | 3.8                  | 3.5                      | 0.2                      | 0.3                      |
| MnO                            | 0.1           | 0.1                  | 0.0                      | 0.0                      | -0.1                     |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.1           | 0.1                  | 0.1                      | 0.0                      | 0.0                      |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.4           | 0.6                  | 0.6                      | 0.1                      | 0.1                      |
| LOI                            | 3.02          | 8.15                 | 5.61                     |                          |                          |
| Total                          | 100.14        | 99.34                | 99.14                    |                          |                          |
| Au                             | 10.0          | 2.7                  | 4.5                      | 2.2                      | 3.9                      |
| Ag                             | 0.1           | 0.2                  | 0.4                      | 0.1                      | 0.3                      |
| Cu                             | 35.7          | 10.6                 | 14.5                     | -27.1                    | -22.9                    |
| Pb                             | 14.0          | 8.3                  | 11.0                     | -7.2                     | -4.3                     |
| Zn                             | 45.9          | 20.0                 | 47.2                     | -29.6                    | -4.3                     |
| As                             | 13.0          | 560.0                | 593.0                    | 443.8                    | 509.5                    |
| Sb                             | 2.9           | 13.9                 | 16.3                     | 8.4                      | 11.5                     |
| Bi                             | 0.2           | 0.2                  | 0.4                      | -0.1                     | 0.1                      |

注:主要元素为中国地质科学院地球物理地球化学勘查所 XRF 分析数据;微量元素数据为平面光栅摄谱仪 WPP-2 和原子光谱 AFS2201 分析数据

4.3 成矿流体与成矿物质来源

双泉金矿的含金石英脉中成矿流体的氢同位素组成 δD 为 -86‰~-99‰,石英的 δ<sup>18</sup>O 为 13.3‰

~17.5‰,成矿流体的  $\delta^{18}\text{O}$  为 4.6‰~8.8‰<sup>[6]</sup>。成矿流体的同位素值投影在变质水与岩浆水的左下方,初始流体可能为岩浆水或变质水与一定大气水的混合,不能准确判断初始流体的来源。成矿流体的  $\delta^{18}\text{O}$  可将石英中的  $\delta^{18}\text{O}$  和温度的估计值(T)代入石英-水分馏方程式计算得到。由于文中没有给出具体的温度值,因此本文选定主要矿化阶段的相图平均温度为 375℃,与测定的石英  $\delta^{18}\text{O}$  重新计算成矿流体的氧同位素组成  $\delta^{18}\text{O}$  为 8.7‰~12.9‰,在  $\delta\text{D}$ - $\delta^{18}\text{O}$  关系图(图 5)中可以明显看出投影点相对原来值向右偏移,主要投影于变质水的下方。以测得的石英的  $\delta\text{D}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$  平均值(-93‰,15‰)代替岩石初始值,计算得出开放水-岩体系下各种初始水(岩浆水、变质水、大气水)的水-岩反应模拟曲线(图 5)。从图 5 可以看出氢氧同位素投影点全部落于变质水水-岩反应模拟曲线范围内,小部分落于岩浆水水-岩反应模拟曲线范围内。鉴于测定的成矿流体  $\delta\text{D}$  数据较集中说明受其他流体混合的影响较小,暗示双泉金矿一带的成矿流体来自比较均一的流体库,因此成矿流体最可能为变质水通过水岩反应而来。卡拉麦里带为碰撞造山后陆内逆掩运动环境下的脆-韧性剪切带,岩石片理化、千枚化,甚至糜棱岩化,说明形成变质水是可能的。同一成矿流体氢氧同位素小范围变化还受温度和流体成分变化的影响<sup>[12]</sup>。本区成矿流体在流经破碎岩石间发生矿物质沉淀、围岩蚀变过程中同时发生了温度变化和组分变化,这些变化也影响了氢氧同位素的组分。另外不同部位的流体必存在一定的差异,由平均温度计算出的  $\delta^{18}\text{O}$  也必然影响氧同位素的小范围变化。

双泉金矿矿石样品表现出轻、重稀土无明显富集或亏损,无 Eu 异常,稀土分布模式呈现向右的缓倾斜等特征与下石炭统南明水组地层基本一致,反映了二者有成因联系<sup>[6]</sup>。另据三〇五项目组测得卡拉麦里带南明水组地层中金矿脉中黄铁矿中  $\delta^{34}\text{S}$  为 2.88~4.02<sup>[13]</sup>,全为正值,接近陨硫硫,说明硫来自深源为主,但受到地层的影响。由于本区 Au 与金属硫化物的密切关系,Au 与 S 可能同源,那么成矿物质 Au 也可能主要来自深源,与下石炭统南明水组地层中的火山岩、火山碎屑岩关系密切。综上所述,双泉金矿的成矿流体来自韧性剪切作用过程中形成的变质水,成矿物质主要来源于下石炭统南明水组地层中火山岩、火山碎屑岩。

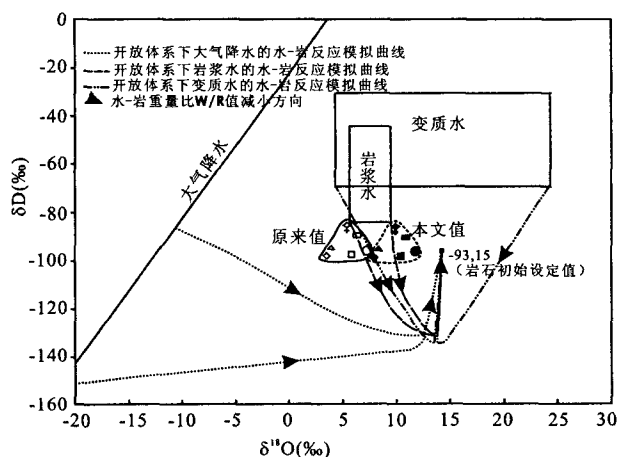
4.4 成因探讨

卡拉麦里一带是在卡拉麦里板块缝合带基础上,经早石炭世末至晚石炭世挤压推覆兼具右行剪切变形的碰撞造山作用和早二叠世开始的陆内逆掩运动,形成的强应变构造带(韧-脆性剪切带)。成矿流体来源于早期韧性剪切阶段片理化、千枚化,甚至糜棱岩化后岩石分泌的变质水。晚期的脆性构造变形在早期韧性剪切构造体系中形成各种张性容矿空间。双泉金矿矿脉呈雁列阵状赋存于韧性剪切带的后期张性裂隙中,在时间和空间上严格受卡拉麦里韧-脆性剪切构造变形带控制。因此双泉金矿为与韧-脆性剪切带有关的变质热液金矿床,韧-脆性剪切带是导矿构造,也是容矿构造。成矿物质来源于下石炭统南明水组地层中火山岩、火山碎屑岩。

5 结 论

双泉金矿的矿化阶段分为 3 个阶段:黄铁矿-毒砂阶段、金-石英-毒砂-黄铁矿阶段和石英-多金属硫化物阶段。前两阶段为主要矿化阶段。成矿温度为 330~450℃ 和 300~430℃。利用主要矿化阶段的平均温度 375℃ 修正成矿流体的氧同位素,利用水-岩反应判定成矿流体为变质水,成矿流体可能来源于韧性剪切带中构造作用。韧性剪切带既是导矿构造,也是容矿构造。成矿物质沉淀和围岩蚀变过程也造成了成矿流体温度和组分的变化。成矿物质主要来源于下石炭统南明水组地层中的火山岩和火山碎屑岩。

致谢:矿床地球化学国家重点实验室苏文超、彭建堂老师和电子探针室老师在研究过程中给予指导,在此表示衷心感谢!



据文献[6,11]修编

modified after references [6,11]

图 5 成矿流体的  $\delta\text{D}$ - $\delta^{18}\text{O}$  关系图

Fig. 5 The  $\delta\text{D}$ - $\delta^{18}\text{O}$  diagram for ore fluids of Shuangquan gold deposit

## 参考文献 (References):

- [1] 肖序常, 等. 新疆北部及其邻区大地构造[M]. 北京: 地质出版社, 1992: 1-171.  
Xiao Xvchang, *et al.* Tectonic evolution of the Northern Xinjiang and its adjacent regions[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992: 1-171. (in Chinese)
- [2] 沈远超, 等. 新疆北部古板块构造格局与金成矿规律[A]. 中国金矿研究新进展, 第一卷(下篇) [M]. 北京: 地震出版社, 1994: 1-29.  
Shen Yuanchao, *et al.* The structural framework of paleo-plates and mineralization regulation of gold deposits in Northern Xinjiang[A]. New development of gold deposits in china, first volume( part two) [M]. Beijing: Earthquake Publishing House, 1994: 1-29. (in Chinese)
- [3] 陈仁义. 新疆东噶尔铜金矿床类型及其时空分布[J]. 矿床地质, 1995, 14(3): 228-234.  
Chen Renyi. Types and space-time distribution of copper-gold deposits in East Junggar, Xinjiang [J]. Mineral Deposits, 1995, 14(3): 228-234. (in Chinese with English abstract)
- [4] 唐红峰, 苏玉平, 刘丛强, 侯广顺, 王彦斌. 新疆北部卡拉麦里斜长花岗岩的锆石 U-Pb 年龄及其构造意义[J]. 大地构造与成矿学, 2007, 31(1): 110-117.  
Tang Hongfeng, Su Yuping, Liu Congqiang, Hou Guangshun, Wang Yanbin. Zircon U-Pb age of the plagiogranite in Kalamaili belt, Northern Xinjiang and its tectonic implications [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2007, 31(1): 110-117. (in Chinese with English abstract)
- [5] 苏玉平, 唐红峰, 刘丛强, 侯广顺, 梁莉莉. 新疆东准噶尔苏吉泉铝质 A 型花岗岩的确立及其初步研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2006, 25(3): 175-184.  
Su Yuping, Tang Hongfeng, Liu Gongqiang, Hou Guangshun, Liang Lili. The determination and a preliminary study of Sujiquan aluminous A-type granites in East Junggar, Xinjiang [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2006, 25(3): 175-184. (in Chinese with English abstract)
- [6] 路彦明, 赵军, 陈祥, 张栋. 东准噶尔双泉地区韧-脆性剪切带与金矿成矿[J]. 新疆地质, 2007, 25(2): 164-168.  
Lu Yanming, Zhao Jun, Chen Xiang, Zhang Dong. The relationship between ductile-brittle shear zones and mineralization of gold deposits in Shuangouan area, Eastern Junggar[J]. Xinjiang Geology, 2007, 25(2): 164-168. (in Chinese with English abstract)
- [7] Ship Z D. Restudy of arsenopyrite thermometry: The application on pressure and of nature [J]. Canadian Mineralogist, 1982, 23(4): 517-534.
- [8] 杨富全, 吴海. 新疆东准噶尔金矿成因类型及地质特征[J]. 地质找矿论丛, 2000, 15(1): 39-45.  
Yang Fuquan, Wu Hai. Genetic types and geological features of Au deposits in East Junggar region[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2000, 15(1): 39-45. (in Chinese with English abstract)
- [9] O'Hara K, Blackburn W H. Volume-loss model for trace element enrichment in mylonites[J]. Geology, 1989, 17: 524-527.
- [10] Grant J A. The isocon diagram a simple solution to Gresens's equation for metasomatic alteration[J]. Econ. Geol., 1986, 81: 1976-1982.
- [11] Taylor H P. The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydrothermal alteration and ore deposition[J]. Econ. Geol., 1974, 69: 843-883.
- [12] Kerrich R. Geochemic setting and hydraulic regimes; Shear zone hosted mesothermal gold deposits[A]. Bursnall J T. Mineralization and shear zones[M]. Geological Association of Canada, Short Course Notes, 1989, 6: 89-128.
- [13] 三 O 五项目组. 新疆东准卡拉麦里一带金矿成矿条件与靶区综合评价研究报告[R]. 1994.  
'305' Project. Report for evaluation of gold mineralization in the Kalamaili area, eastern Junggar, Xinjiang[R]. 1994. (in Chinese)