# 新疆奇台地区双泉金矿床的成矿时代

徐 斌[1,2],路彦明[3],顾雪祥[1],章文忠[4]
XU Bin[1,2], LU Yan-ming[3], GU Xue-xiang[1], ZHANG Wen-zhong[4]

1. 中国地质大学地球科学与资源学院,北京 100083; 2. 武警黄金第一总队,黑龙江 哈尔滨 150086;
3. 武警黄金地质研究所,河北 廊坊 065000; 4. 武警黄金第八支队,新疆 乌鲁木齐 830057
1. *School of Earth Sciences and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing* 100083, *China*;
2. *No.*1 *General Gold Geological Party of Chinese People's Armed Police Force, Harbin* 150086, *Heilongjiang, China*;
3. *Gold Geological Institute of Armed Police Force, Langfang* 065000, *Hebei, China*;
4. *No.*8 *Gold Geological Party of Chinese People's Armed Police Force, Urumehi* 830057, *Xinjiang, China*

**摘要**:新疆奇台县双泉金矿床位于东准噶尔地区,成矿带划分属卡拉麦里-达尔布特成矿带(Ⅲ级成矿带)之卡拉麦里-莫钦乌拉成矿带(Ⅳ级成矿带),是新疆重要的金-多金属成矿带。对双泉金矿蚀变矿物绢云母、含金石英脉进行了激光(单颗粒全熔样法)显微探针 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 同位素研究,3 个绢云母样品等时线年龄分别为 269Ma±9Ma、265Ma±2Ma、260 Ma±4Ma;石英样品等时线年龄为 269Ma±8Ma。这些结果表明双泉金矿主成矿期成矿时代为 269Ma±9Ma~260Ma±4Ma。东准噶尔地区早石炭世初至晚二叠世大规模陆陆碰撞造山及其后的伸展张弛构造运动期间,发生了 2 次大规模的构造流体热事件,同位素年龄记录的时间分别约为 310Ma 和 260~270Ma。前者代表早期韧性构造变形期间产生变质流体并初始富集 Au 元素的时间,地球动力学背景为碰撞造山后期的挤压推覆体系;后者代表本区金矿主成矿期成矿作用发生的时间,是控矿断裂构造脆性变形的时间,地球动力学背景为碰撞造山期后的伸展张弛体系。

**关键词**:Ar-Ar 同位素年龄;成矿时代;双泉金矿;新疆
**中图分类号**:P618.51;P597⁺.3 **文献标志码**:A **文章编号**:1671-2552(2009)12-1871-14

**Xu B, Lu Y M, Gu X X, Zhang W Z. Metallogenic epoch of the Shuangquan gold deposit in Qitai area, Xinjiang, China. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28(12):1871–1884**

**Abstract:** The Shuangquan gold deposit in Qitai County, Xinjiang, is located in east Junggar, which belongs to the Karamaili-Moqinwula mineralization belt (Ⅳ-grade metallogenic belt) of the Karamaili-Daerbute gold metallogenic belt (Ⅲ-grade metallogenic belt). In this paper, the laser microprobe $^{40}Ar/^{39}Ar$ isotopic dating was carried out on the alteration minerals of sericite and gold-bearing quartz veins in the Shuangquan gold deposit. The isochronic ages of three sericite samples are 269Ma±9Ma, 265Ma±2Ma and 260Ma±4Ma. A quartz sample returns an isochron age of 269Ma±8Ma. These results suggest that the main mineralization age of the Shuangquan gold deposit varies between 269Ma±9Ma and 260Ma±4Ma. During the large-scale continent-continent collision and the subsequent extensional tectonic movement in the early Carboniferous to late Permian, the east Junggar area underwent two large-scale fluid-thermal events which were recorded by isotopic ages of 310Ma and 260~270Ma, respectively. The former one represents an early ductile deformation and associated initial accumulation of metamorphic fluids, and its geodynamic background possibly belongs to post-collisional orogenic thrusting system. While the latter represents the main gold mineralization epoch and the formation of ore-controlling faults by brittle deformation, and its geodynamic background possibly belongs to post-collisional extension system.

**Key words:** Ar-Ar isotopic age; metallogenic epoch; Shuangquan gold deposit; Xinjiang

**收稿日期**:2009-10-09;**修订日期**:2009-10-21
**科技项目**:国家重点基础研究发展计划项目(编号:2009CB421003-01)、长江学者和创新团队发展计划项目、高等学校学科创新引智计划项目(编号:B0711)资助
**作者简介**:徐斌(1966- ),男,在读博士,从事地质勘查及科研管理工作。E-mail: 931009x@sohu.com

## 1 区域成矿地质背景

研究区位于西伯利亚板块与哈萨克斯坦-准噶尔板块两大板块的缝合带卡拉麦里-达尔布特蛇绿岩带东段强应变构造带内。前寒武纪以来经历了长期而复杂的构造运动，晚古生代是该区最重要的板块碰撞、陆内造山运动时期，伴随大规模强烈的碰撞造山，形成了多种多样独具特色的金属成矿作用。

早古生代新疆北部的古亚洲大洋完成第一次开合旋回的演化后形成统一的陆壳，早泥盆世地壳开始下沉，中泥盆世地壳迅速扩张，海侵范围扩大，形成准噶尔洋槽一系列微型陆块和小洋盆[1]。中泥盆世后期准噶尔洋壳开始消减，洋槽基本闭合，沉积卡拉麦里组($D_2k$)浅海碎屑岩。晚泥盆世准噶尔北部进入陆表海或陆相沉积环境，沉积塔木岗组($D_3t$)滨海相砂岩、砂砾岩、砾岩等碎屑岩。从塔尔巴哈台山南北缘至东准噶尔北塔山一带形成以中酸性为主的大陆边缘火山岩带。在泥盆纪准噶尔洋闭合消亡的同时，在岛弧带上除大量火山岩喷发沉积外，还伴随着造山早期的花岗岩侵入。在卡麦里岛弧带内众多基性—超基性岩沿构造侵位，并与周围辉绿岩、枕状玄武岩、放射虫硅质岩等构成非序型蛇绿岩套[2]。早石炭世晚期，阿尔泰和准噶尔北部全面褶皱隆起，海水大规模退出，形成南明水组($C_1n$)浅海相碎屑岩及火山碎屑岩，特别是巴塔玛依内山组($C_2b$)的陆相火山岩出现，广泛发育基性—中基性—酸性火山熔岩及火山碎屑岩，形成火山喷发-沉积型矿床，如哈图—清水一带的玄武岩含金[1]，并伴随发生大规模造山期的岩浆侵入活动，在准噶尔北部只在布尔津和额尔齐斯挤压带上还有残留海，沉积了浅海相火山岩和碎屑岩。二叠纪处于大规模造山运动的末期，形成火山磨拉石建造，地壳处于由强烈活动逐渐

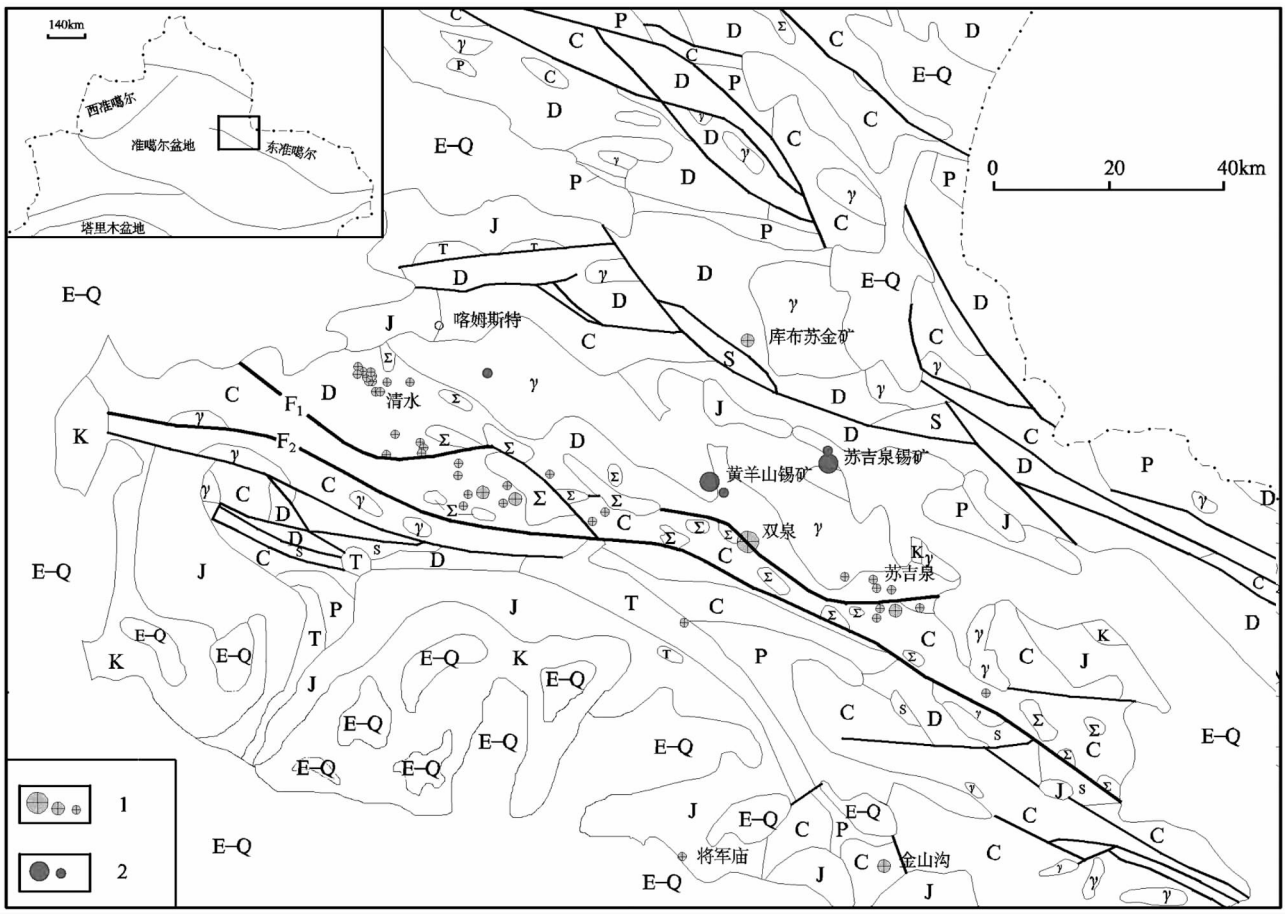



图 1 东准噶尔地区区域地质简图(底图参照路彦明[4],2008)

Fig. 1 Regional geological sketch map of the east Junggar

E-Q—新生界;K—白垩系;J—侏罗系;T—三叠系;P—二叠系;C—石炭系;D—泥盆系;S—志留系;γ—石炭纪花岗岩;Σ—石炭纪超镁铁质岩;1—金矿床、矿(化)点;2—锡矿床(点);$F_1$—清水-苏吉泉大断裂;$F_2$—卡拉麦里深断裂

转为稳定的过渡时期。

卡拉麦里深断裂形成于早古生代，强烈活动于晚古生代,具有明显的复活性。卡拉麦里构造变形带(图 1)包括卡拉麦里深大断裂($F_2$)、清水-苏吉泉大断裂($F_1$)等规模不等的一系列断裂构造(深断裂、大断裂、一般断裂)。该断裂对本区地层、侵入岩、矿产和构造起着重要的控制作用,是侵入岩侵入的主要通道,与其有关的次一级断层和裂隙则构成其良好的赋存空间。清水-南明水褶皱束位于卡拉麦里断裂与清水-苏吉泉大断裂之间的狭长地带内，由一蚀变破碎带组成。沿该带有大量的超基性岩脉、岩株分布。双泉金矿位于其次一级构造单元南明水向斜内。

东准噶尔陆相火山作用形成安山—英安质火山喷溢、喷发岩建造和中性—中酸性次火山岩建造,2 类成矿岩浆建造在成岩与成矿时间上紧密联系,金、铜成矿是岩浆成岩作用的继续和发展,2 类成矿岩浆建造均以金-铜-铁矿化组合为主,证实了二者不可分割的成因联系[3]。侵入岩主要分布于卡拉麦里深断裂以北,主要有辉长岩类、超基性岩类(Σ)、钠铁闪石花岗岩、偏碱性的花岗岩、花岗斑岩类(γ)。其中偏碱性的花岗岩侵入期为区内主要内生矿产形成时期之一，目前发现与斑状黑云母花岗岩密切相关的主要是伟晶岩型及与伟晶岩有关的钍、铀矿化异常,还有少量含金石英脉和石英脉型锡矿。

## 2　矿床地质特征

双泉金矿床产于下石炭统南明水组中，目前共发现 1、2、3、4、5 号 5 条含金矿脉①,以 1、2 号矿脉为主,矿脉控制最长 1430m,最大控制斜深 540m。矿床规模为中型,1、2 号矿脉提交(333)金资源量约为 10 t,矿石类型为破碎蚀变岩型夹石英脉型,矿脉主要受北西向清水-苏吉泉断裂的控制。

矿体与围岩界线不明显，均为褐黄色蚀变千枚岩。蚀变类型主要为绢云母化、硅化、碳酸盐化,其次为绿泥石化、高岭土化。围岩为构造千枚岩、凝灰岩、凝灰岩夹凝灰质砂岩,具有片理化、糜棱岩化。

矿石结构主要为碎裂结构、出溶或溶蚀边结构、自形—半自形结构、他形粒状结构、镶边结构、包含结构、糜棱结构。矿石构造有星散浸染状构造、细脉浸染状构造、条带状构造、塑性流动构造、拖尾构造等。

矿石中金矿物主要以显微金(0.2mm~0.2μm)和次显微金(<0.2μm)的形式存在(图 2)。金属矿物有自然金、银金矿、黄铁矿(1%)、毒砂(2%)、黄铜矿、黝铜矿及少量磁黄铁矿和孔雀石；脉石矿物有石英(70%)、绿泥石(20%)、方解石(5%)、绢云母(2%)及少量高岭土、斜长石、磷灰石、白云石、玉髓等。

## 3　激光显微探针 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 同位素定年

关于双泉地区成矿时代的研究没有专门的文献进行论述，前人多从区域构造演化的角度分析该区大致的成矿时代,缺少精确的成矿时代的定年成果。仅在双泉地区西北部的卡拉麦里西段清水 48 号金矿有成矿年龄的报道[5],该矿床为小型石英脉型金矿床,测试对象和方法为石英脉流体包裹体 Rb-Sr 等时线法，未见测试数据，定年结果为 311Ma±

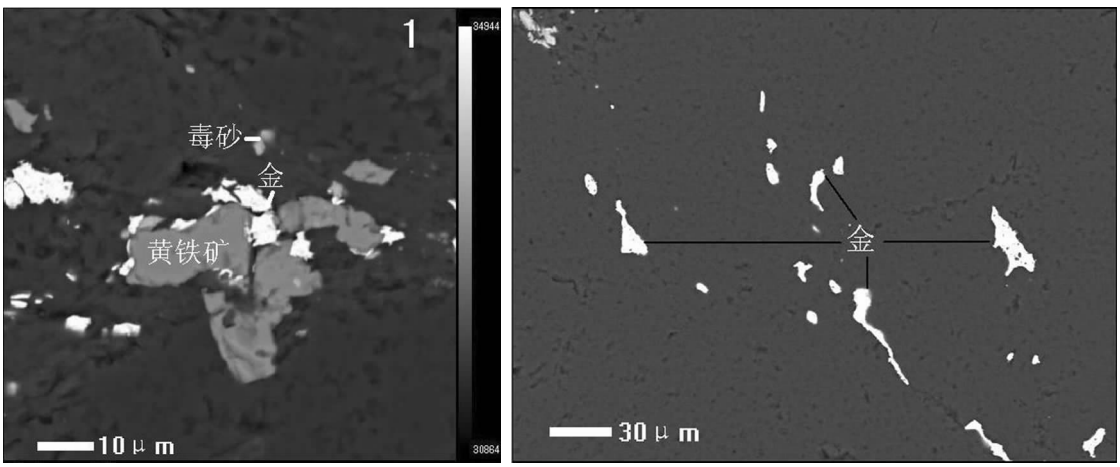



图 2　矿石中金矿物的形态

Fig. 2　Gold morphology in the ores

46Ma。从测试结果看,误差在 46Ma 左右,数据可靠性低,该矿床与双泉金矿床地质特征不同,没有类比性。因此,精确厘定双泉金矿这一东准噶尔卡拉麦里地区规模最大的金矿床的成矿时代,对于深入研究双泉地区及卡拉麦里成矿带的金矿成矿规律具有重要意义。

### 3.1 样品制备

测定金矿成矿时代能否达到预期目的,测试样品的制备是关键。鉴于双泉金矿金属矿物含量较少,定年所需的样品只能考虑与成矿关系密切的蚀变矿物。可用于同位素定年的矿物主要是成矿期的蚀变矿物绢云母(矿区普遍发育)及与成矿有关的石英。前人众多的同位素定年实验结果[6-9]证实,采用成矿期的绢云母、石英开展同位素定年是研究成矿时代行之有效的方案。由此,本次同位素定年实验采用绢云母、石英 2 种矿物进行测试。

同位素定年测试所需的样品采自双泉矿区 2 号矿脉的中段(图 3)。06B22 样采自 2 号脉矿体内部一宽约 10cm 的石英脉(06B22-Q),石英脉中肉眼未见金属矿物,但裂隙铁染现象明显,同时在石英脉两侧紧贴石英脉壁采集了一个蚀变绢云母样品(06B22-Ser)。06B24 样同样采自 2 号矿脉矿体内部,岩石表面呈褐黄色,为蚀变劈理化千枚岩。06B25-1 样品采自 2 号矿脉北侧约 10m 的下石炭统南明水组下亚组($C_1n^a$)蚀变围岩,岩性为浅黄绿色弱蚀变凝灰质千枚岩。

野外采集的样品,室内加工到 60 目(石英)和 80 目(绢云母)以下,用双目镜挑出矿物颗粒。石英新鲜、纯净透明、镜下晶体形态棱角分明,纯度在 98%以上,绢云母纯度在 92%以上。

### 3.2 测试方法和流程

初步制备的绢云母、石英样品由北京大学地球与空间科学学院"造山带与地壳演化教育部重点实验室"测定,测试方法为全自动激光探针定年系统,测试流程如下。

将前述挑选出的单矿物样品用高纯铝罐包装,封闭于石英玻璃瓶中,并置于中国原子能科学研究院 49-2 反应堆 B8 孔道进行中子照射,照射时间为 24h,快中子通量为 $5.443\times10^{17}n(cm^2)s^{-1}$。用于中子通量监测的样品是中国周口店 K-Ar 标准黑云母(ZBH-25,年龄为 132Ma)和瑞士 Brione 地区白云母标样(BERN-4M,年龄为 18.6Ma)。同时对纯物质 $CaF_2$ 和 $K_2SO_4$ 进行同步照射,得出的校正因子参见表 1。

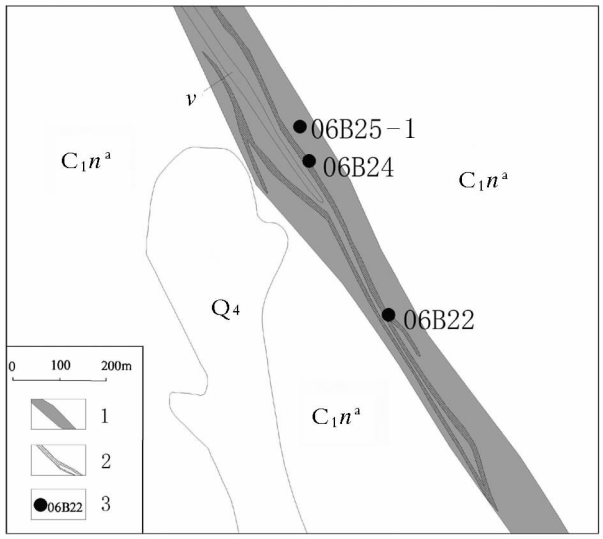



图 3 同位素定年样品采样位置图

Fig. 3 Diagram showing sampling location for isotopic dating

$Q_4$—第四系;$C_1n^a$—下石炭统南明水组下亚组;$v$—细粒辉长岩脉;1—蚀变带;2—矿脉;3—采样点位及编号

照射后的样品冷置后,在显微镜下,以每个样品仓5~10(绢云母)颗及 10~20(石英)颗不等量的颗粒数分别转移到 22 个样品仓中,密封去气之后,装入全自动高精度高灵敏度激光 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 定年系统。测定采用聚焦激光对单颗粒或多颗粒的矿物岩石样品进行一次性熔融。激光能量为 1.0~3.5W,激光束斑直径为 0.5mm,激光在 5s 内逐渐升温到 1.0~3.5W,升温后熔样释气时间持续 40s。系统分 2 个阶段使用 2 个锆铝泵对释出气体进行纯化,第一阶段纯化时间 180s,第二阶段 60s。系统通过测量已知摩尔数的空气对 5 个 Ar 同位素($^{40}Ar$、$^{39}Ar$、$^{38}Ar$、$^{37}Ar$、$^{36}Ar$)质量歧视进行日常监测、校正,$D$ 值为 1.00355±0.00002。基准线和 5 个 Ar 同位素均使用电子倍增器进行 13 个循环测量。信号强度的测量采用电流强度测量法,信号强度以纳安(nA)为单位记录。测量已知摩尔数的空气的 Ar 同位素信号强度,获得系统在电子倍增器单位增益下的绝对灵敏度为 $2.394\times10^{-18}$moles/nA。通过绝对灵敏度可以将 Ar 同位素信号强度由纳安(nA)换算为摩尔。电子倍增器增益(与法拉第杯测量信号强

度的比值)为 3000~4000 倍。整个设备的平均本底水平为:$^{40}Ar$ =0.00977 ±0.00061,$^{39}Ar$ =0.000021 ±0.000014,$^{38}Ar$=0.0001141±0.0000031,$^{37}Ar$=0.0000693±0.0000076,$^{36}Ar$=0.000331±0.000034。

系统测试过程、原始数据处理、模式年龄和等时线年龄的计算,均采用美国加州大学伯克利地质年代学中心 Alan L. Denio 博士编写的"MASS SPEC (V.7.650)"软件自动控制。

### 3.3 测试结果

样品测试结果见表 1,石英、绢云母全自动激光探针 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 定年结果分别见图 4、图 5。

在 $^{36}Ar/^{40}Ar-^{39}Ar/^{40}Ar$ 图(图 5)中,3 个绢云母样品 (06B22-ser、06B24、06B25-1) 的等时线图的 MSWD 分别为 17、8、2.6,$^{40}Ar/^{36}Ar$ 分别为 306±17、355±17、307±4,表明数据基本可信,等时线年龄可以代表其最终形成年龄。06B22-Q 石英样品的等时线图(图 4)的 $^{40}Ar/^{36}Ar$ 为 337±10、MSWD 为 75,表明其等时线年龄可信度稍低,其形成时代有待结合单颗粒矿物表面年龄和其他资料综合分析。

## 4 讨 论

### 4.1 双泉金矿的成矿时代

上述 3 个绢云母样品的等时线年龄分别为 269 Ma±9Ma、265Ma±2Ma、260Ma±4Ma,是否就能代表成矿时代?从本区的构造演化特点看,在清水-苏吉泉剪切变形构造带的韧性(可能属韧-脆性)剪切变形过程中,有可能形成与构造变形有关的绢云母。但在后期成矿过程中,由于绢云母较低的封闭温度(300℃左右)[10],双泉金矿早期成矿温度可达 340~380℃,即使早期剪切变形过程中有绢云母的出现,较高的成矿温度和大规模成矿流体的参与,其 Ar 同位素组成应几乎完全被改造。另外,绢云母形成更多的是在成矿期,应是大规模成矿流体与围岩发生反应形成的,在矿脉中的矿化蚀变岩石中镜下可见绢云母常穿切早期面理即是佐证。3 个样品的单颗粒表面年龄分布区间比较集中,分别形成明显的累积频率峰值(图 5),表明每个样品中单颗粒绢云母的 Ar 同位素组成是趋同的,是近同期形成的。以上分析表明,本次定年实验的 3 个绢云母样品的等时线年龄可以代表双泉金矿的成矿时代。

06B22-Q 石英样品单颗粒表面年龄分布在 446.2~276.9Ma 之间(图 4),一条石英脉不可能历经如此长的成岩时间。事实上,由于石英并非含钾矿物,对其开展 Ar 同位素测年的测试对象是其中的流体包裹体,流体包裹体一般都含有一定量的钾,随着分析精度的提高,开展流体包裹体的 Ar 同位素组成成为可能。但石英中的包裹体数量多少不一,且钾含量并不高,这使得测试的准确性受到质疑。同时由于石英矿物中还普遍发育次生包裹体,即使测试精度可信,年龄测试结果能否代表石英的形成年龄(反映成矿年龄)同样受到质疑。以往对石英开展的 Ar 同位素定年多采用 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 阶段加热法定年的实验技术[7-8],事实上是对包裹体群体开展的 Ar 同位素测试,即使制样过程中采取众多措施,但仍不能完全避免不同期的包裹体混染对同位素定年结果的影响。此次对石英开展的 Ar 同位素定年采用单颗粒全熔法(SCTF:single-crystal total fusion),测试的石英单颗粒粒径在 60 目以下,对这样的单颗粒进行 Ar 同位素组成测试,仍不能确定哪些颗粒包含原生包裹体或次生包裹体,那么把一个样品中所有的单颗粒测试结果统一处理,所得的等时线年龄将可能出现较大误差,可信度较低,此次实验获得的等时线年龄就是例子。

如果换个角度进行考虑,一个石英样品中的包裹体总存在一定的期次,原生包裹体和石英同期形成,形成时间也最早,之后由于后期构造流体的影响,形成次生包裹体,次生包裹体可能是一期,也可能是多期。如果采用单颗粒全熔法测定单个矿物颗粒,测定的矿物颗粒个数有一定数量保证,单颗粒的 $^{39}Ar/^{40}Ar$ 表面年龄会存在一定的时间集中段,最早的可能代表原生包裹体,之后是各期次生包裹体的形成时间。

06B22-Q 样品石英中既有早期的流体包裹体,也有晚期的流体包裹体(图 6)。结合矿区流体包裹体测温资料[4]:①流体包裹体均一温度范围为 190~319℃,存在 3 个峰值范围,即 160~180℃,200~220℃和 340~380℃。其中主成矿期 200~220℃形成的包裹体最多,其次为成矿早期 340~380℃,晚期 160~180℃形成的包裹体较少;②结合 06B22-Q 样品采样位置石英脉被后期蚀变岩型矿化破坏的特点,该石英脉应为成矿早期的石英脉,其中的原生流体包裹体(或称早期包裹体)应为 340~380℃成矿温度条件下的产物,次生流体包裹体应为 200~220℃或 160~180℃温度条件下的产物,考虑到典型晚期形成

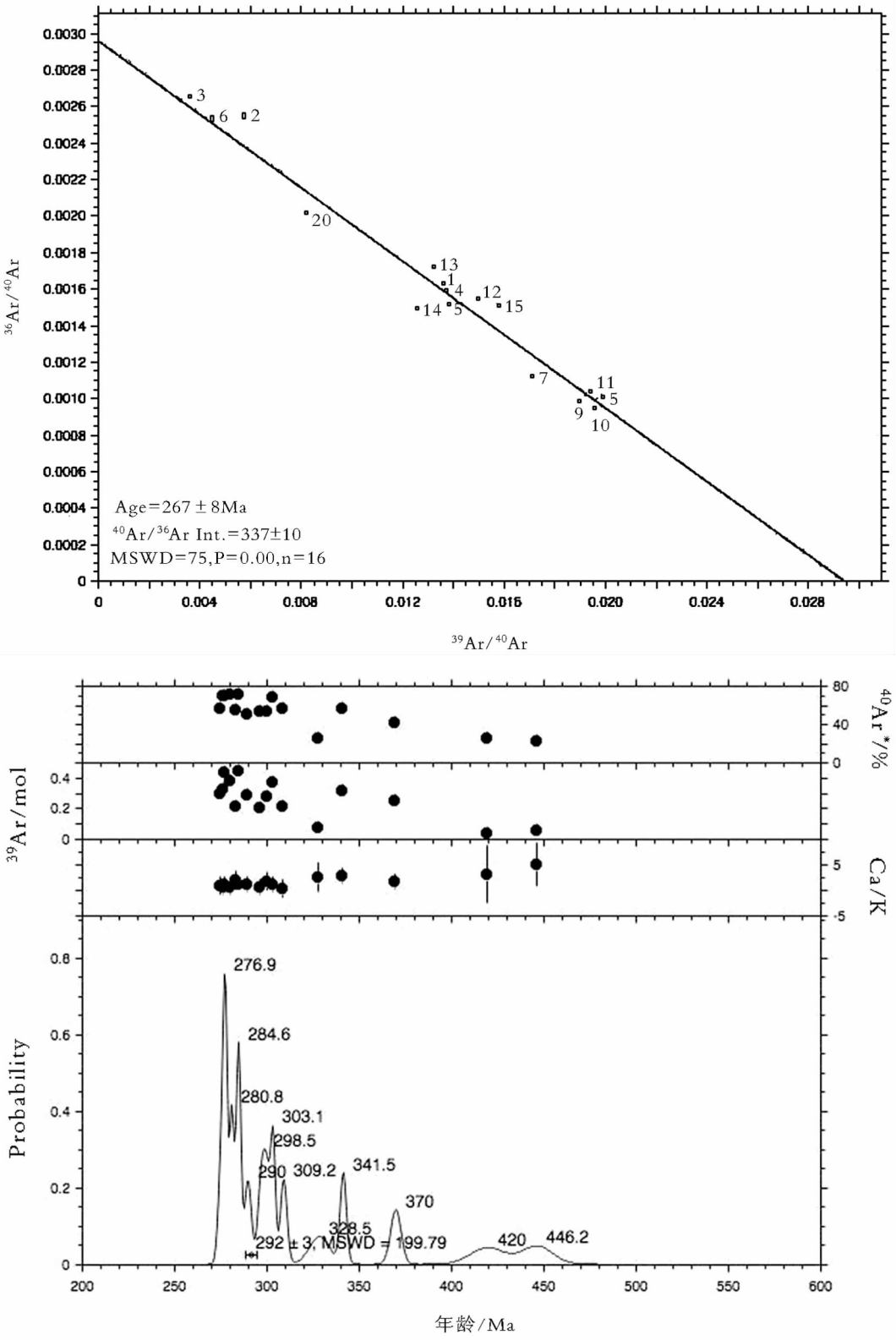



图 4 石英全自动激光探针 $^{39}Ar/^{40}Ar$ 定年结果

(上图和下图分别为 06B22 号样品石英的测年等时线图和年龄谱图)

Fig. 4 Automatic Laser probe $^{39}Ar/^{40}Ar$ dating results for quartz

表 1　矿物全自动激光探针 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 同位素测试结果

**Table 1　Automatic laser-probe $^{40}Ar/^{39}Ar$ analytical results**

| 分析序号 | 样品号 | $^{40}Ar^{*}$/% | 年龄/Ma | ± | $^{39}Ar$/mol | 40 | ± 40 | 39 | ± 39 | 38 | ± 38 | 37 | ± 37 | 36 | ± 36 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1093-01 | 06B22-Q | 51.9 | 296.9 | 3.5 | 1.97E-15 | 1.862 | 0.001 | 0.02534 | 0.00006 | 0.000924 | 0.000026 | 0.0043 | 0.0101 | 0.003035 | 0.000013 |
| 1093-02 | 06B22-Q | 24.6 | 328.4 | 6.5 | 6.74E-16 | 1.528 | 0.001 | 0.00885 | 0.00004 | 0.000894 | 0.000025 | 0.0102 | 0.0099 | 0.003902 | 0.000015 |
| 1093-03 | 06B22-Q | 21.7 | 446.3 | 9.7 | 5.23E-16 | 1.533 | 0.001 | 0.00557 | 0.00004 | 0.000846 | 0.000019 | 0.0138 | 0.0096 | 0.004068 | 0.000014 |
| 1093-04 | 06B22-Q | 53.1 | 300.0 | 3.5 | 2.72E-15 | 2.101 | 0.001 | 0.02892 | 0.00007 | 0.001065 | 0.000023 | 0.0239 | 0.0102 | 0.003348 | 0.000014 |
| 1093-05 | 06B22-Q | 69.4 | 277.7 | 3.0 | 4.34E-15 | 2.363 | 0.001 | 0.04623 | 0.00008 | 0.001138 | 0.000019 | 0.0234 | 0.0101 | 0.002459 | 0.000013 |
| 1093-06 | 06B22-Q | 25.2 | 419.4 | 10.2 | 3.65E-16 | 0.861 | 0.001 | 0.00388 | 0.00004 | 0.000470 | 0.000019 | 0.0056 | 0.0097 | 0.002182 | 0.000013 |
| 1093-07 | 06B22-Q | 66.8 | 303.3 | 3.3 | 3.63E-15 | 2.269 | 0.001 | 0.03885 | 0.00008 | 0.001040 | 0.000020 | 0.0198 | 0.0101 | 0.002558 | 0.000013 |
| 1093-08 | 06B22-Q | 55.2 | 309.0 | 3.6 | 2.07E-15 | 1.800 | 0.001 | 0.02492 | 0.00005 | 0.000882 | 0.000023 | 0.0032 | 0.0099 | 0.002734 | 0.000013 |
| 1093-09 | 06B22-Q | 70.1 | 284.8 | 3.1 | 4.43E-15 | 2.449 | 0.001 | 0.04709 | 0.00009 | 0.001178 | 0.000023 | 0.0215 | 0.0098 | 0.002492 | 0.000013 |
| 1093-10 | 06B22-Q | 69.9 | 280.8 | 3.0 | 3.80E-15 | 2.073 | 0.001 | 0.04036 | 0.00007 | 0.000997 | 0.000021 | 0.0093 | 0.0102 | 0.002120 | 0.000013 |
| 1093-11 | 06B22-Q | 69.6 | 276.9 | 3.0 | 3.24E-15 | 1.751 | 0.001 | 0.03443 | 0.00007 | 0.000857 | 0.000019 | 0.0091 | 0.0098 | 0.001810 | 0.000013 |
| 1093-12 | 06B22-Q | 54.4 | 283.8 | 3.4 | 2.07E-15 | 1.698 | 0.001 | 0.02545 | 0.00006 | 0.000843 | 0.000023 | 0.0235 | 0.0097 | 0.002627 | 0.000013 |
| 1093-13 | 06B22-Q | 49.2 | 289.7 | 3.5 | 2.82E-15 | 2.306 | 0.001 | 0.03057 | 0.00006 | 0.001204 | 0.000022 | 0.0145 | 0.0103 | 0.003971 | 0.000014 |
| 1093-14 | 06B22-Q | 55.9 | 341.3 | 3.8 | 3.14E-15 | 2.703 | 0.001 | 0.03406 | 0.00007 | 0.001260 | 0.000017 | 0.0456 | 0.0101 | 0.004048 | 0.000014 |
| 1093-15 | 06B22-Q | 55.5 | 275.2 | 3.2 | 2.89E-15 | 1.983 | 0.001 | 0.03134 | 0.00008 | 0.000974 | 0.000019 | 0.0123 | 0.0103 | 0.002992 | 0.000014 |
| 1093-16 | 06B22-Q | 68.7 | 391.8 | 4.0 | 5.99E-15 | 4.889 | 0.002 | 0.06493 | 0.00009 | 0.001881 | 0.000025 | 0.0287 | 0.0105 | 0.005196 | 0.000015 |
| 1093-17 | 06B22-Q | 76.9 | 429.2 | 4.3 | 9.20E-15 | 7.425 | 0.002 | 0.09977 | 0.00012 | 0.002547 | 0.000043 | 0.0672 | 0.0107 | 0.005828 | 0.000016 |
| 1093-18 | 06B22-Q | 70.6 | 444.4 | 4.4 | 7.02E-15 | 6.414 | 0.002 | 0.07607 | 0.00010 | 0.002396 | 0.000038 | 0.0435 | 0.0106 | 0.006399 | 0.000016 |
| 1093-19 | 06B22-Q | 57.1 | 419.1 | 4.5 | 2.99E-15 | 3.966 | 0.002 | 0.04070 | 0.00008 | 0.001714 | 0.000018 | 0.1036 | 0.0114 | 0.005789 | 0.000016 |
| 1093-20 | 06B22-Q | 40.3 | 369.8 | 4.7 | 2.44E-15 | 3.178 | 0.001 | 0.02644 | 0.00007 | 0.001609 | 0.000031 | 0.0190 | 0.0105 | 0.006426 | 0.000016 |
| 1093-21 | 06B22-Q | 80.2 | 881.3 | 7.8 | 2.44E-15 | 5.117 | 0.002 | 0.03058 | 0.00006 | 0.001106 | 0.000018 | 0.0282 | 0.0104 | 0.003436 | 0.000015 |
| 1093-22 | 06B22-Q | 72.9 | 908.2 | 8.1 | 3.02E-15 | 6.257 | 0.002 | 0.03272 | 0.00007 | 0.001576 | 0.000023 | 0.0466 | 0.0106 | 0.005754 | 0.000015 |

| J | ± J | 37 Decay | 39 Decay | Irr Ca 39/37 | ± Ca 39/37 | Irr Ca 38/37 | ± Ca 38/37 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.00469 | 5.00E-05 | 8.28E+02 | 1.002407 | 0.0006633 | 0.0003535 | 0.00014 | 0 |
| Irr Ca 36/37 | ± Ca 36/37 | Irr K 38/39 | ± K 38/39 | Irr K 40/39 | ± K 40/39 | P36Cl/38Cl | ± P36Cl/38Cl |
| 0.0002775 | 0.0000253 | 0.01077 | 0 | 0.0039448 | 0.0015421 | 320 | 0 |

续表 1-1

| 分析序号 | 样品号 | $^{40}Ar^{*}$/% | 年龄/Ma | ± | $^{39}Ar$/mol | 40 | ± 40 | 39 | ± 39 | 38 | ± 38 | 37 | ± 37 | 36 | ± 36 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1338-01 | 06B22-Ser | 91.8 | 271.8 | 8.7 | 1.63E-14 | 8.135 | 0.002 | 0.21462 | 0.00020 | 0.003060 | 0.000100 | -0.0010 | 0.0115 | 0.002252 | 0.000014 |
| 1338-02 | 06B22-Ser | 90.5 | 270.0 | 8.7 | 5.08E-14 | 20.703 | 0.010 | 0.54173 | 0.00056 | 0.007920 | 0.000027 | 0.0282 | 0.0146 | 0.006711 | 0.000016 |
| 1338-03 | 06B22-Ser | 94.0 | 272.6 | 8.7 | 4.15E-14 | 16.420 | 0.004 | 0.44184 | 0.00043 | 0.006035 | 0.000032 | 0.0248 | 0.0146 | 0.003353 | 0.000014 |
| 1338-04 | 06B22-Ser | 90.6 | 269.0 | 8.7 | 2.68E-14 | 10.844 | 0.002 | 0.28524 | 0.00047 | 0.004120 | 0.000028 | 0.0135 | 0.0133 | 0.003466 | 0.000015 |
| 1338-05 | 06B22-Ser | 93.8 | 276.4 | 8.9 | 5.42E-14 | 21.798 | 0.005 | 0.57697 | 0.00069 | 0.008035 | 0.000036 | 0.0419 | 0.0159 | 0.004582 | 0.000015 |
| 1338-06 | 06B22-Ser | 82.9 | 271.2 | 8.7 | 1.83E-14 | 8.186 | 0.002 | 0.19556 | 0.00015 | 0.003641 | 0.000101 | 0.1396 | 0.0133 | 0.004781 | 0.000015 |
| 1338-07 | 06B22-Ser | 92.6 | 272.1 | 8.7 | 3.90E-14 | 15.639 | 0.004 | 0.41520 | 0.00048 | 0.005849 | 0.000043 | 0.0117 | 0.0134 | 0.003960 | 0.000015 |
| 1338-08 | 06B22-Ser | 92.7 | 271.1 | 8.7 | 6.08E-14 | 24.266 | 0.007 | 0.64790 | 0.00058 | 0.009114 | 0.000035 | 0.0372 | 0.0187 | 0.006033 | 0.000016 |
| 1338-09 | 06B22-Ser | 94.9 | 266.3 | 8.6 | 3.57E-14 | 13.677 | 0.003 | 0.38081 | 0.00057 | 0.005048 | 0.000029 | 0.0201 | 0.0122 | 0.002402 | 0.000014 |
| 1338-10 | 06B22-Ser | 89.2 | 271.5 | 8.7 | 3.89E-14 | 16.154 | 0.004 | 0.41416 | 0.00040 | 0.006198 | 0.000042 | 0.0323 | 0.0134 | 0.005940 | 0.000015 |
| 1338-11 | 06B22-Ser | 90.3 | 272.0 | 8.7 | 6.69E-14 | 27.447 | 0.013 | 0.71162 | 0.00073 | 0.010511 | 0.000051 | 0.0616 | 0.0181 | 0.009013 | 0.000019 |
| 1338-12 | 06B22-Ser | 87.5 | 272.6 | 8.8 | 3.31E-14 | 16.308 | 0.004 | 0.40852 | 0.00052 | 0.006366 | 0.000030 | 0.0288 | 0.0153 | 0.006918 | 0.000017 |
| 1338-13 | 06B22-Ser | 89.2 | 268.9 | 8.6 | 5.37E-14 | 22.073 | 0.007 | 0.57170 | 0.00054 | 0.008530 | 0.000035 | 0.0259 | 0.0167 | 0.008125 | 0.000018 |
| 1338-14 | 06B22-Ser | 86.2 | 261.8 | 8.4 | 5.58E-14 | 23.071 | 0.008 | 0.59476 | 0.00077 | 0.009484 | 0.000036 | 0.0410 | 0.0195 | 0.010802 | 0.000020 |
| 1338-15 | 06B22-Ser | 88.8 | 270.0 | 8.7 | 6.17E-14 | 25.601 | 0.007 | 0.65730 | 0.00073 | 0.010011 | 0.000045 | 0.0597 | 0.0174 | 0.009780 | 0.000019 |
| 1338-16 | 06B22-Ser | 88.3 | 270.0 | 8.7 | 3.34E-14 | 13.935 | 0.003 | 0.35597 | 0.00041 | 0.005393 | 0.000036 | 0.0212 | 0.0161 | 0.005525 | 0.000016 |
| 1338-17 | 06B22-Ser | 92.0 | 270.3 | 8.7 | 5.83E-14 | 23.415 | 0.006 | 0.62210 | 0.00057 | 0.008861 | 0.000032 | 0.0530 | 0.0147 | 0.006396 | 0.000017 |
| 1338-18 | 06B22-Ser | 91.5 | 270.4 | 8.7 | 6.01E-14 | 24.235 | 0.007 | 0.64038 | 0.00066 | 0.009313 | 0.000044 | 0.0346 | 0.0196 | 0.006998 | 0.000017 |
| 1338-19 | 06B22-Ser | 92.4 | 269.4 | 8.7 | 9.14E-14 | 36.363 | 0.014 | 0.97381 | 0.00083 | 0.013635 | 0.000068 | 0.0623 | 0.0240 | 0.009463 | 0.000019 |
| 1338-20 | 06B22-Ser | 90.0 | 267.2 | 8.6 | 5.12E-14 | 20.789 | 0.006 | 0.54715 | 0.00059 | 0.008008 | 0.000036 | 0.0224 | 0.0175 | 0.007076 | 0.000017 |
| 1338-21 | 06B22-Ser | 90.1 | 273.6 | 8.8 | 4.21E-14 | 17.470 | 0.004 | 0.44878 | 0.00053 | 0.006572 | 0.000033 | 0.0353 | 0.0135 | 0.005888 | 0.000015 |
| 1338-22 | 06B22-Ser | 90.7 | 267.3 | 8.6 | 6.83E-14 | 27.453 | 0.009 | 0.72776 | 0.00083 | 0.010598 | 0.000049 | 0.0485 | 0.0175 | 0.008729 | 0.000019 |

| J | ± J | 37 Decay | 39 Decay | Irr Ca 39/37 | ± Ca 39/37 | Irr Ca 38/37 | ± Ca 38/37 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.00467 | 1.60E-04 | 7.93E+02 | 1.002392 | 0.0006633 | 0.0003535 | 0.00014 | 0 |
| Irr Ca 36/37 | ± Ca 36/37 | Irr K 38/39 | ± K 38/39 | Irr K 40/39 | ± K 40/39 | P36Cl/38Cl | ± P36Cl/38Cl |
| 0.0002775 | 0.0000253 | 0.01077 | 0 | 0.0039448 | 0.0015421 | 320 | 0 |

续表 1-2

| 分析序号 | 样品号 | $^{40}Ar^{*}$/% | 年龄/Ma | ± | $^{39}Ar$/mol | 40 | ± 40 | 39 | ± 39 | 38 | ± 38 | 37 | ± 37 | 36 | ± 36 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1339-01 | 06B-24 | 98.1 | 264.2 | 2.1 | 4.54E-14 | 16.585 | 0.004 | 0.48359 | 0.00059 | 0.006682 | 0.000034 | 0.0218 | 0.0148 | 0.001128 | 0.000013 |
| 1339-02 | 06B-24 | 97.2 | 268.1 | 2.2 | 5.36E-14 | 20.046 | 0.004 | 0.57021 | 0.00053 | 0.008130 | 0.000041 | 0.0353 | 0.0135 | 0.001969 | 0.000013 |
| 1339-03 | 06B-24 | 93.6 | 269.5 | 2.2 | 5.63E-14 | 22.011 | 0.009 | 0.59955 | 0.00053 | 0.009185 | 0.000037 | 0.0410 | 0.0183 | 0.004831 | 0.000016 |
| 1339-04 | 06B-24 | 97.4 | 265.2 | 2.2 | 6.84E-14 | 25.255 | 0.008 | 0.72867 | 0.00071 | 0.010080 | 0.000045 | 0.0435 | 0.0148 | 0.002268 | 0.000014 |
| 1339-05 | 06B-24 | 97.4 | 267.8 | 2.2 | 8.07E-14 | 30.140 | 0.011 | 0.86002 | 0.00075 | 0.012529 | 0.000043 | 0.0329 | 0.0155 | 0.002748 | 0.000015 |
| 1339-06 | 06B-24 | 97.6 | 266.1 | 2.2 | 5.52E-14 | 24.151 | 0.007 | 0.69574 | 0.00054 | 0.010412 | 0.000051 | 0.0502 | 0.0183 | 0.002028 | 0.000014 |
| 1339-07 | 06B-24 | 97.2 | 266.0 | 2.2 | 3.95E-14 | 14.628 | 0.003 | 0.41995 | 0.00046 | 0.005894 | 0.000030 | 0.0489 | 0.0130 | 0.001411 | 0.000013 |
| 1339-08 | 06B-24 | 94.6 | 266.9 | 2.2 | 4.11E-14 | 19.388 | 0.005 | 0.53967 | 0.00058 | 0.008507 | 0.000026 | 0.0420 | 0.0176 | 0.003592 | 0.000014 |
| 1339-09 | 06B-24 | 96.2 | 266.6 | 2.2 | 5.90E-14 | 26.816 | 0.010 | 0.75964 | 0.00083 | 0.011273 | 0.000045 | 0.0439 | 0.0176 | 0.003543 | 0.000014 |
| 1339-10 | 06B-24 | 97.7 | 264.7 | 2.2 | 2.84E-14 | 12.893 | 0.003 | 0.37399 | 0.00051 | 0.005232 | 0.000035 | 0.0374 | 0.0149 | 0.001022 | 0.000013 |
| 1339-11 | 06B-24 | 98.6 | 264.5 | 2.1 | 6.15E-14 | 22.378 | 0.007 | 0.65528 | 0.00063 | 0.009108 | 0.000042 | 0.0382 | 0.0169 | 0.001126 | 0.000013 |
| 1339-12 | 06B-24 | 98.1 | 267.0 | 2.2 | 4.18E-14 | 20.319 | 0.008 | 0.58587 | 0.00070 | 0.008348 | 0.000038 | 0.0649 | 0.0163 | 0.001384 | 0.000013 |
| 1339-13 | 06B-24 | 98.3 | 266.2 | 2.2 | 2.02E-14 | 8.970 | 0.002 | 0.26008 | 0.00037 | 0.003594 | 0.000029 | 0.0167 | 0.0136 | 0.000538 | 0.000012 |
| 1339-14 | 06B-24 | 97.2 | 264.8 | 2.1 | 6.80E-14 | 25.087 | 0.009 | 0.72352 | 0.00062 | 0.011106 | 0.000049 | 0.0496 | 0.0170 | 0.002459 | 0.000014 |
| 1339-15 | 06B-24 | 98.3 | 266.0 | 2.2 | 1.88E-14 | 8.148 | 0.002 | 0.23657 | 0.00037 | 0.003317 | 0.000027 | 0.0274 | 0.0130 | 0.000484 | 0.000013 |
| 1339-16 | 06B-24 | 98.8 | 264.5 | 2.1 | 3.80E-14 | 15.617 | 0.004 | 0.45847 | 0.00054 | 0.006235 | 0.000035 | 0.0395 | 0.0143 | 0.000652 | 0.000013 |
| 1339-17 | 06B-24 | 92.2 | 268.9 | 2.2 | 2.45E-14 | 11.923 | 0.003 | 0.32098 | 0.00044 | 0.004891 | 0.000024 | 0.0270 | 0.0130 | 0.003157 | 0.000015 |
| 1339-18 | 06B-24 | 95.3 | 266.7 | 2.2 | 7.73E-14 | 29.458 | 0.012 | 0.82632 | 0.00076 | 0.012387 | 0.000052 | 0.0756 | 0.0184 | 0.004766 | 0.000017 |
| 1339-19 | 06B-24 | 97.4 | 265.6 | 2.2 | 4.22E-14 | 15.607 | 0.003 | 0.44939 | 0.00050 | 0.006291 | 0.000030 | 0.0080 | 0.0163 | 0.001408 | 0.000013 |
| 1339-20 | 06B-24 | 94.8 | 265.3 | 2.2 | 2.60E-14 | 11.954 | 0.003 | 0.33549 | 0.00039 | 0.004807 | 0.000030 | 0.0202 | 0.0137 | 0.002132 | 0.000014 |
| 1339-21 | 06B-24 | 98.5 | 266.6 | 2.2 | 3.45E-14 | 15.364 | 0.004 | 0.44563 | 0.00050 | 0.006201 | 0.000026 | 0.0125 | 0.0150 | 0.000819 | 0.000013 |
| 1339-22 | 06B-24 | 96.1 | 267.0 | 2.2 | 3.40E-14 | 14.776 | 0.003 | 0.41754 | 0.00055 | 0.005989 | 0.000030 | 0.0391 | 0.0144 | 0.001981 | 0.000014 |

| J | ± J | 37 Decay | 39 Decay | Irr Ca 39/37 | ± Ca 39/37 | Irr Ca 38/37 | ± Ca 38/37 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.00469 | 4.00E-05 | 8.04E+02 | 1.002397 | 0.0006633 | 0.0003535 | 0.00014 | 0 |
| Irr Ca 36/37 | ± Ca 36/37 | Irr K 38/39 | ± K 38/39 | Irr K 40/39 | ± K 40/39 | P36Cl/38Cl | ± P36Cl/38Cl |
| 0.0002775 | 0.0000253 | 0.01077 | 0 | 0.0039448 | 0.0015421 | 320 | 0 |

续表 1-3

| 分析序号 | 样品号 | $^{40}Ar^{*}$/% | 年龄/Ma | ± | $^{39}Ar$/mol | 40 | ± 40 | 39 | ± 39 | 38 | ± 38 | 37 | ± 37 | 36 | ± 36 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1340-01 | 06B25-1 | 75.3 | 265.1 | 3.8 | 1.77E-14 | 10.415 | 0.003 | 0.23275 | 0.00034 | 0.004551 | 0.000037 | 0.0493 | 0.0137 | 0.008740 | 0.000019 |
| 1340-02 | 06B25-1 | 82.9 | 263.1 | 3.7 | 2.57E-14 | 12.450 | 0.003 | 0.30898 | 0.00045 | 0.005230 | 0.000037 | 0.0631 | 0.0137 | 0.007229 | 0.000017 |
| 1340-03 | 06B25-1 | 76.1 | 260.1 | 3.7 | 1.06E-14 | 4.897 | 0.002 | 0.11303 | 0.00013 | 0.002396 | 0.000052 | 0.0483 | 0.0131 | 0.003980 | 0.000014 |
| 1340-04 | 06B25-1 | 85.5 | 262.6 | 3.7 | 5.89E-15 | 3.014 | 0.001 | 0.07734 | 0.00011 | 0.001458 | 0.000041 | 0.0212 | 0.0118 | 0.001491 | 0.000013 |
| 1340-05 | 06B25-1 | 73.5 | 263.3 | 3.8 | 1.13E-14 | 5.468 | 0.002 | 0.12027 | 0.00015 | 0.002677 | 0.000052 | 0.0392 | 0.0125 | 0.004922 | 0.000015 |
| 1340-06 | 06B25-1 | 72.0 | 263.6 | 3.8 | 1.54E-14 | 7.635 | 0.002 | 0.16416 | 0.00017 | 0.003765 | 0.000073 | 0.0837 | 0.0131 | 0.007283 | 0.000016 |
| 1340-07 | 06B25-1 | 78.5 | 262.4 | 3.7 | 1.52E-14 | 7.961 | 0.002 | 0.18765 | 0.00012 | 0.003776 | 0.000092 | 0.0603 | 0.0125 | 0.005829 | 0.000015 |
| 1340-08 | 06B25-1 | 81.6 | 261.4 | 3.7 | 1.43E-14 | 7.460 | 0.002 | 0.18356 | 0.00019 | 0.003537 | 0.000096 | 0.0587 | 0.0126 | 0.004674 | 0.000015 |
| 1340-09 | 06B25-1 | 75.9 | 264.3 | 3.8 | 8.03E-15 | 4.460 | 0.002 | 0.10095 | 0.00013 | 0.002109 | 0.000050 | 0.0533 | 0.0126 | 0.003654 | 0.000015 |
| 1340-10 | 06B25-1 | 81.2 | 263.5 | 3.7 | 1.28E-14 | 6.340 | 0.002 | 0.15379 | 0.00015 | 0.002957 | 0.000075 | 0.0491 | 0.0119 | 0.004068 | 0.000015 |
| 1340-11 | 06B25-1 | 77.6 | 263.5 | 3.8 | 9.57E-15 | 4.385 | 0.002 | 0.10168 | 0.00013 | 0.002140 | 0.000053 | 0.0490 | 0.0138 | 0.003349 | 0.000015 |
| 1340-12 | 06B25-1 | 80.7 | 270.1 | 3.8 | 1.50E-14 | 8.372 | 0.003 | 0.19656 | 0.00020 | 0.003863 | 0.000100 | 0.0712 | 0.0126 | 0.005519 | 0.000016 |
| 1340-13 | 06B25-1 | 63.2 | 272.7 | 4.0 | 9.72E-15 | 6.425 | 0.002 | 0.11701 | 0.00011 | 0.003274 | 0.000062 | 0.0808 | 0.0116 | 0.008037 | 0.000017 |
| 1340-14 | 06B25-1 | 45.9 | 272.1 | 4.2 | 1.07E-14 | 8.589 | 0.002 | 0.11391 | 0.00013 | 0.004665 | 0.000053 | 0.0163 | 0.0120 | 0.015730 | 0.000020 |
| 1340-15 | 06B25-1 | 76.9 | 262.8 | 3.8 | 8.13E-15 | 3.771 | 0.002 | 0.08695 | 0.00012 | 0.001855 | 0.000031 | 0.0317 | 0.0103 | 0.002966 | 0.000014 |
| 1340-16 | 06B25-1 | 78.8 | 263.8 | 3.8 | 7.11E-15 | 3.971 | 0.001 | 0.09335 | 0.00010 | 0.001932 | 0.000034 | 0.0429 | 0.0100 | 0.002876 | 0.000014 |
| 1340-17 | 06B25-1 | 79.4 | 263.1 | 3.8 | 5.13E-15 | 2.863 | 0.002 | 0.06808 | 0.00009 | 0.001347 | 0.000032 | 0.0332 | 0.0094 | 0.002008 | 0.000013 |
| 1340-18 | 06B25-1 | 77.8 | 264.3 | 3.9 | 2.74E-15 | 1.585 | 0.001 | 0.03675 | 0.00007 | 0.000746 | 0.000015 | 0.0142 | 0.0099 | 0.001196 | 0.000012 |
| 1340-19 | 06B25-1 | 82.6 | 260.5 | 3.7 | 7.20E-15 | 3.078 | 0.002 | 0.07691 | 0.00012 | 0.001474 | 0.000031 | 0.0324 | 0.0096 | 0.001832 | 0.000013 |
| 1340-20 | 06B25-1 | 83.2 | 262.3 | 3.7 | 9.63E-15 | 4.098 | 0.001 | 0.10247 | 0.00011 | 0.001945 | 0.000043 | 0.0436 | 0.0105 | 0.002349 | 0.000013 |
| 1340-21 | 06B25-1 | 63.1 | 266.2 | 3.9 | 6.98E-15 | 3.979 | 0.002 | 0.07423 | 0.00011 | 0.002017 | 0.000035 | 0.0235 | 0.0102 | 0.004982 | 0.000015 |
| 1340-22 | 06B25-1 | 70.5 | 264.7 | 3.8 | 5.63E-15 | 2.855 | 0.001 | 0.05986 | 0.00009 | 0.001429 | 0.000030 | 0.0248 | 0.0099 | 0.002866 | 0.000013 |

| J | ± J | 37 Decay | 39 Decay | Irr Ca 39/37 | ± Ca 39/37 | Irr Ca 38/37 | ± Ca 38/37 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.0047 | 7.00E-05 | 8.16E+02 | 1.002402 | 0.0006633 | 0.0003535 | 0.00014 | 0 |
| Irr Ca 36/37 | ± Ca 36/37 | Irr K 38/39 | ± K 38/39 | Irr K 40/39 | ± K 40/39 | P36Cl/38Cl | ± P36Cl/38Cl |
| 0.0002775 | 0.0000253 | 0.01077 | 0 | 0.0039448 | 0.0015421 | 320 | 0 |

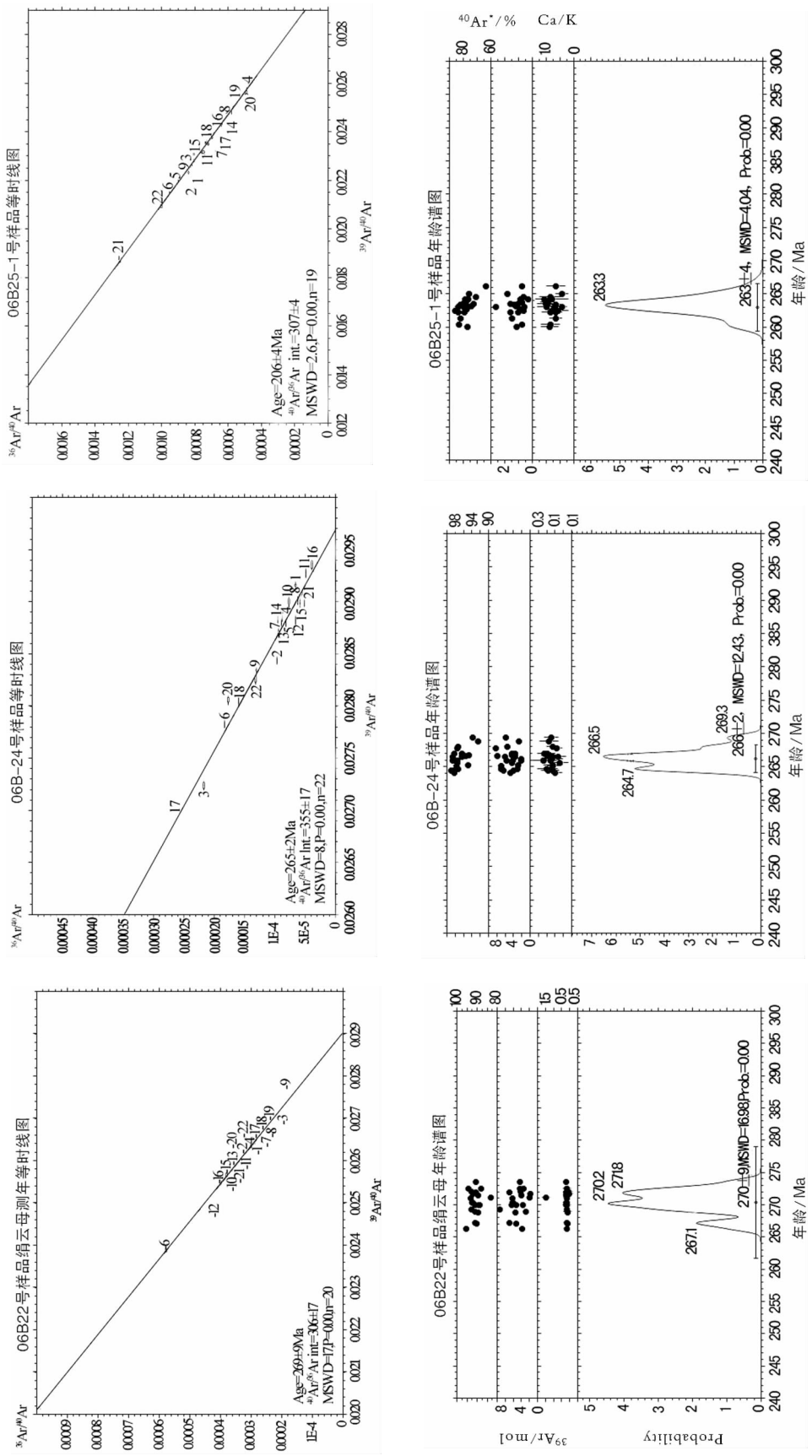
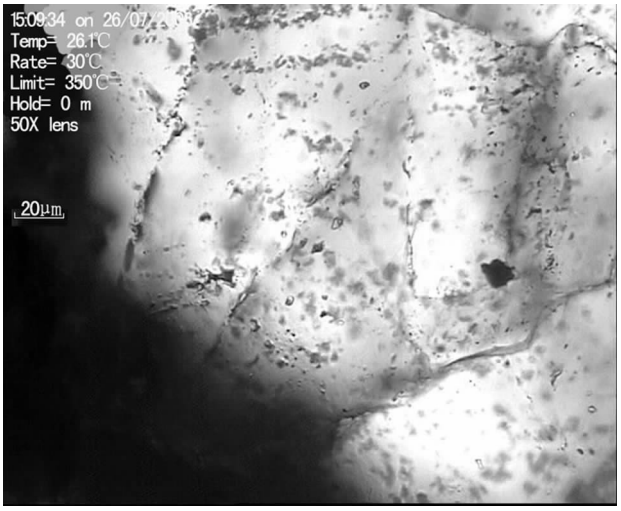
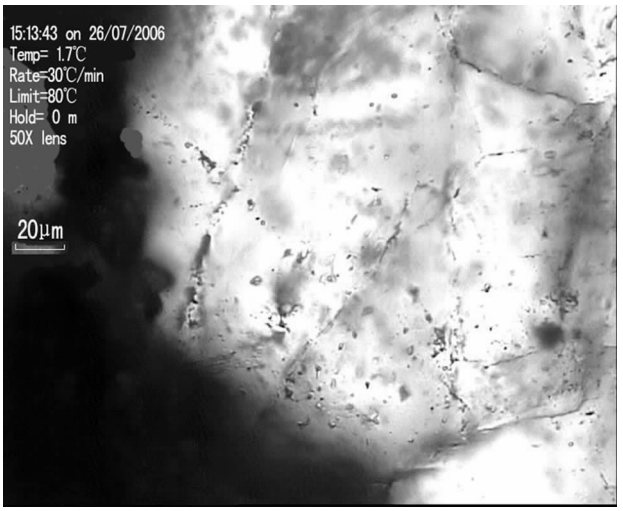
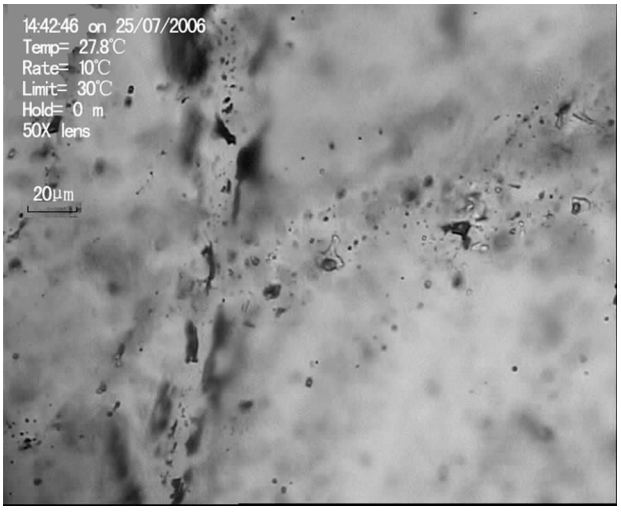



图 5　绢云母全自动激光探针 $^{39}Ar/^{40}Ar$ 定年结果

Fig. 5　Automatic laser probe $^{39}Ar/^{40}Ar$ dating results for sericite



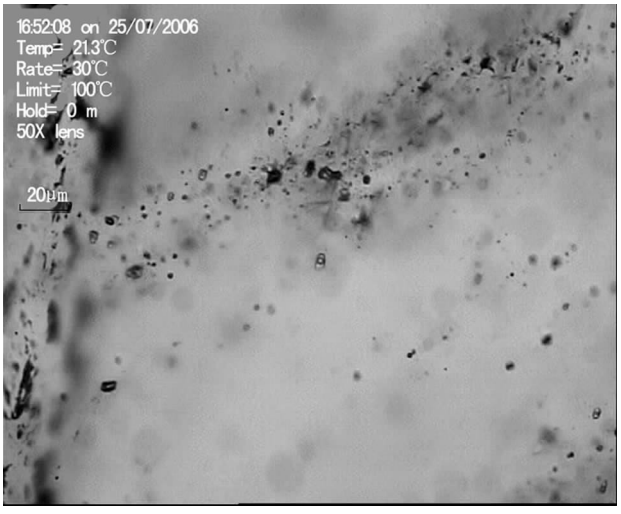



图 6 石英流体包裹体产出特征

Fig. 6 Fluid inclusions in quartz

的石英或硅化主要为隐晶质硅化及石英微细脉,成矿流体温度降低、流体活动强度减弱,构造变形弱,对早期形成的石英脉影响小的特点,06B22-Q 样品石英中的次生流体包裹体应主要是 200~220℃温度

条件下形成的,为主成矿期的产物。

从 06B22-Q 样品测点的概率分布图来看,最终的同位素体系的封闭时间在 270 Ma 左右,之后同位素计时体系开始计时,表明后期已没有热事件能够影响到石英中流体包裹体的封闭系统。06B22-Q 样品的等时线年龄 269Ma±8Ma 是石英晚期流体包裹体的形成时间,而早期流体包裹体的形成应稍早于这一时间。

上述讨论表明,双泉金矿 4 个样品的全自动激光探针 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 同位素测试结果所代表的主成矿期成矿时代为(269±9)~(260±4)Ma。

### 4.2 地质意义

双泉金矿位于卡拉麦里缝合带,该带在早石炭世中期,西伯利亚板块与哈萨克斯坦-准噶尔板块在东准噶尔发生强烈碰撞,晚石炭世东准噶尔地区大规模的陆内挤压达到高潮,早二叠世开始伸展造山,至二叠纪末期伸展作用进入地幔,碰撞造山作用结束[11]。新疆地调院②最近获得清水 16 号超镁铁岩体Sm-Nd 等时线年龄为(510±51)Ma,清水 48 号金矿区玄武玢岩 Rb-Sr 等时线年龄为(315±30)Ma;卡拉麦里蛇绿岩套硅质岩建造中含泥盆纪放射虫[12],可能表明蛇绿岩所代表的洋盆从奥陶纪一直延续到石炭纪。在卡拉麦里、塔克扎勒和黑山头地区,蛇绿岩分别构造侵位于泥盆系和下石炭统[13],说明卡拉麦里蛇绿岩所代表的洋盆最终关闭时间在早石炭世末,也证明板块碰撞由此时开始。缝合带北侧清水-苏吉泉主断裂带在陆内俯冲体制下,受近 SN 向挤压的影响,形成了以由北至南推覆为主,兼具右行走滑的 NWW 向韧—脆性剪切构造体系——韧—脆性剪切带,发生大规模的剪切构造变形,产生与之相关的变质流体。按照韧性剪切构造带的构造变形机制,早期韧性变形,晚期由于向浅部抬升发生脆性变形,或晚期直接叠加于后期脆性变形。在早期大规模韧性剪切变形期间,区域性构造应力环境以挤压为主,该期不会发生大规模的成矿作用,其原因是由于高温不利于金属元素沉淀和挤压环境不易存在容矿空间等因素,另外研究区的这类构造具线性特征,离开构造带,岩石变形变质均较弱,也不足以产生大量的矿质。因此,韧性变形期主要是金的预富集过程,可能形成明显属于变质成因但金含量较低的石英脉,本文开展定年对象的石英(金含量为 $1.74\times10^{-6}$)即为此类。大规模的成矿作用的发生,是在区域性伸展背景体系下,先期韧性剪切变形系统中的各种剪(或张)裂隙发生大规模的脆性构造变形,来自地壳深部的成矿流体沿清水-苏吉泉大型剪切构造带到达地壳浅部,并和变质流体混合,最终在有利部位富集成矿,形成金含量较高的石英细脉(带)和较大范围的蚀变矿化带,本次研究的绢云母同位素年龄(260Ma±4Ma~269Ma±9Ma)代表了此次成矿作用的时代。

卡拉麦里剪切构造体系的形成始于 330Ma 的陆-陆碰撞造山运动,止于挤压至伸展的转换阶段。在整个新疆北部地区,265Ma 前后经历了一次大范围强烈的伸展构造,那么,挤压向伸展环境转化的时间应在此前一定的时期,成矿应在 265Ma 之前。按照碰撞造山体制成矿作用理论,大规模成矿集中爆发于陆-陆碰撞开始的 50Ma 前后,形成环境为挤压向伸展的转换阶段,因此双泉金矿即为该环境下的产物,成矿年龄为 260Ma±4Ma~269Ma±9Ma。

在微观方面,镜下对岩矿石的组构观察发现,矿化的石英脉穿切早期的韧性变形面理,证实成矿发生的时间晚于韧性构造变形的时间,但同时还见到黄铁矿呈碎斑状沿构造面理近定向排列的特征,这表明早期韧性变形期间可能存在弱的金矿化,虽没能形成工业意义的矿体,但却起到了预富集金的作用。

按照剪切带成矿理论,挤压环境形成的剪切带在早期的变形过程中形成一系列剪切裂隙系统,该期表现为高温、挤压环境,在后期由挤压向伸展转换的时期,早期形成的各种裂隙(R、P、T),尤其是 R 剪裂系,易再次活动,发生脆性变形,构成成矿空间,流体温度降低、压力降低,这种环境是流体中矿质沉淀、富集的有利因素。本区金矿与剪切带的关系即印证了上述理论,即金矿在空间上与剪切构造变形形成的各种构造裂隙有关,在时间上,剪切带同时期形成的裂隙受后期伸展环境的影响再次活动,形成有利于成矿的张性空间,金矿即形成于剪切带裂隙再次活动的时期。

## 5 结　论

(1)双泉金矿主成矿期成矿时代为(269±9)~(260±4)Ma。

(2)东准噶尔地区早石炭世初至晚二叠世大规模陆-陆碰撞造山及其后的伸展张弛构造运动期间

发生了 2 次大规模的流体热事件，同位素年龄记录的事件分别为 310Ma 前后[5,14-15]和 260~270Ma。后者可能代表本区金矿主成矿期成矿作用发生的时间，是控矿断裂构造脆性构造变形的时间，地球动力学背景为碰撞造山期后的伸展张弛体系。但相关问题仍有待进一步研究。

致谢：在成文过程中，得到武警黄金指挥部雷时斌同志，武警黄金一总队刘洪利、陈满同志，武警黄金八支队聂晓勇同志等的帮助和支持，在此一并表示诚挚的谢意。

## 参考文献：

[1]新疆维吾尔自治区地质矿产局.新疆维吾尔自治区区域地质志[M].北京：地质出版社，1982:381-384、742-757.

[2]王道永,邓江红.东准噶尔地区板块构造特征演化[J].成都理工学院学报，1995,22(4):38-45.

[3]刘家远.论新疆东准噶尔陆相火山成矿作用[J].大地构造与成矿学，2001,25(4):434-438.

[4]路彦明.新疆东准双泉地区金矿构造控矿规律及勘查找矿方向 [D].北京：中国地质大学博士学位论文，2008.

[5]李华芹, 陈富文. 中国新疆区域成矿作用年代学[M]. 北京: 地质出版社, 2004.

[6]刘弛, 穆治国, 刘如曦, 等.多宝山斑岩铜矿区水热蚀变矿物的激光显微探针 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 定年[J].地质科学, 1995, 30(4): 329-337.

[7]桑海清, 裘冀, 王英兰. 石英 $^{40}Ar-^{39}Ar$ 阶段加热法定年的实验技术改进及意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2001, 20(4): 444-447.

[8]路彦明, 李汉光, 陈勇敢, 等.西秦岭寨上金矿床中石英和绢云母 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 定年[J]. 矿床地质, 2006, 25(5): 60-67.

[9]孙晓明, 熊德信, 王生伟, 等.云南哀牢山金矿带大坪韧性剪切带型金矿 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 定年[J]. 地质学报, 2007, 81(1): 88-92.

[10]McDougall I, Harrison T M. Geochronology and Thermochronology by the $^{40}Ar/^{39}Ar$ Method (2nd ed)[M]. New York: Oxford University Press, 1999: 1-269.

[11]陈衍景.准噶尔造山带碰撞体制的成矿作用及金等矿床分布规律[J].地质学报.1996,70(3): 253-261.

[12]何国琦, 李茂松, 刘德权,等.中国新疆古生代地壳演化及成矿[M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社;香港: 香港文化教育出版社, 1994.

[13]马瑞士, 舒良树, 孙家齐, 等. 东天山构造演化与成矿[M]. 北京: 地质出版社, 1997.

[14]李华芹, 谢才富, 常海亮, 等. 新疆北部有色贵金属矿床成矿作用年代学[M]. 北京: 地质出版社, 1998.

[15]于学元, 白正华, 陈繁荣.新疆北部晚古生代陆相火山岩及其含矿性研究[C]//赵振华, 沈远超, 涂光炽. 新疆金属矿产资源的基础研究. 北京: 科学出版社, 2001：52-74.

① 武警黄金研究所,武警黄金第八支队.新疆奇台县双泉金矿区 1、2 号脉普查报告[R]. 2009:3-18.

② 新疆地调院. 新疆天山成矿带构造演化、主要成矿地质事件及成矿构造环境专题研究报告.2004.