

文章编号: 0258-7106(2007)05-0519-08

# 青海滩间山金矿的复合金成矿作用

——来自流体包裹体方面的证据\*

张德全<sup>1</sup>, 张 慧<sup>2</sup>, 丰成友<sup>1</sup>, 余宏全<sup>1</sup>, 李进文<sup>1</sup>, 李大新<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; <sup>2</sup> 内蒙古自治区地质矿产勘查开发局, 内蒙古 呼和浩特 010020)

**摘 要** 流体包裹体研究表明, 滩间山矿区的金矿体是2次热液-矿化事件的叠加产物。第一次热液-矿化作用与区域上加里东碰撞造山作用有关, 形成的流体属于中低温(186~250℃)、低盐度( $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ )1.4%~7.9%的 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{CH}_4-\text{NaCl}$ 体系, 压力变化于 $(4\ 900\sim1\ 800)\times 10^5\text{Pa}$ 之间, 其主要沿NW向剪切带迁移和沉淀形成金矿化。第二次热液-矿化作用与晚古生代—早中生代碰撞造山作用密切相关, 产生两种不混溶流体。第一种不混溶流体属于高温的 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 体系, 可能与岩浆侵入活动有关, 第二种不混溶流体为温度274~289℃, 盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 1.8%~7.9%,  $x(\text{CO}_2)=0.19\sim0.27$ ,  $x(\text{H}_2\text{O})=0.81\sim0.73$ , 压力为 $(2\ 300\sim1\ 100)\times 10^5\text{Pa}$ 的 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{NaCl}$ 体系的流体, 其沿NW向剪切带内的近NS向褶皱两翼的层间破碎带流动和沉淀, 并最终导致滩间山矿床内金矿体的定位。按岩压估算, 第一次热液-矿化事件发生于上地壳下部, 第二次热液-矿化事件发生于浅成环境, 这也进一步证实了滩间山矿床的金成矿于区域晚华力西时期的隆升造山过程中。与晚加里东碰撞造山期间相比, 本区晚华力西期-印支期碰撞造山过程中的最大隆升幅度达9 km左右。

**关键词** 地质学; 流体包裹体; 滩间山金矿床; 造山型金矿床; 柴北缘-东昆仑地区

中图分类号: P618.51

文献标识码: A

## Multiple gold mineralization in Tanjianshan gold deposit: Evidence from fluid inclusions

ZHANG DeQuan<sup>1</sup>, ZHANG Hui<sup>2</sup>, FENG ChengYou<sup>1</sup>, SHE HongQuan<sup>1</sup>, LI JinWen<sup>1</sup> and LI DaXin<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; <sup>2</sup> Inner Mongolia Bureau of Geology for Mineral Exploration and Exploitation, Hohhot 010020, Inner Mongolia, China)

### Abstract

Petrographic observations and microthermometric data of fluid inclusions in combination with ore-forming generation and ore-forming chronology indicate that gold ore bodies in the Tanjianshan gold deposit are products of multiple gold mineralization in two hydrothermal and ore-forming events. The first hydrothermal and ore-forming event occurred during the Caledonian collision of this region, and formed fluids dominated by an intermediate to low temperature (186~250℃), low-salinity (1.4 to 7.9 wt. % NaCl equivalent)  $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{CH}_4-\text{NaCl}$  system with a pressure range of 4 900~1 800 bar. They moved along the NW-trending shear zone and were responsible for the first gold mineralization in the deposit. The second hydrothermal and ore-forming event was related to the Late Paleozoic-Early Mesozoic collision of this region, and formed two kinds of immiscible flu-

\* 本文受国家自然科学基金面上项目(项目批准号: 40372051)和国家科技攻关计划(课题任务书编号: 2003BA612A-07)的共同资助

第一作者简介: 张德全, 1946年生, 研究员, 博士生导师, 从事矿床地质、地球化学研究。

收稿日期: 2006-11-17; 改回日期: 2007-07-20。张绮玲编辑。

ids, i. e.,  $H_2O-NaCl$  fluids and  $H_2O-CO_2-NaCl$  fluids; the former were probably formed by post-magmatism at temperatures of  $381\sim 449^\circ C$  and salinities of  $1.6\sim 10.8$  wt% NaCl equivalent, whereas the latter were genetically produced by the evolution of the former immiscible fluids under the conditions of  $274\sim 289^\circ C$ ,  $1.8\sim 7.9$  wt% NaCl equivalent and  $2.3\sim 1.1$  kbar. The latter immiscible fluids moved and precipitated along the interbedded faults in the limbs of NS-trending folds developed in the NW-striding shear zone, which resulted eventually in the localization of gold ore bodies in the deposit.

**Key words:** geology, fluid inclusion, Tanjianshan gold deposit, orogenic gold deposit, northern Qaidam margin-eastern Kunlun

滩间山金矿床位于青海省西北部大柴旦镇西北70 km处,是中国西部的大型造山型金矿床之一,也是柴北缘-东昆仑多旋回造山带中复合金成矿作用的实例之一(于凤池等,1998;张德全等,2001;2005)。本文对采自滩间山矿床金矿化带的27个含石英和碳酸盐样品(蚀变糜棱片岩和蚀变脉岩样品)进行了岩相学观察和显微测温,旨在通过对该金矿床中流体包裹体的研究,提供该矿床两期流体复合

成矿的证据。

## 1 矿区地质

滩间山金矿区主要由分布于西南侧的滩间山岩体和几乎遍及全矿区的中元古界万洞沟群变沉积岩组成(图1)。

万洞沟群变沉积岩由下部大理岩夹石英绢云片

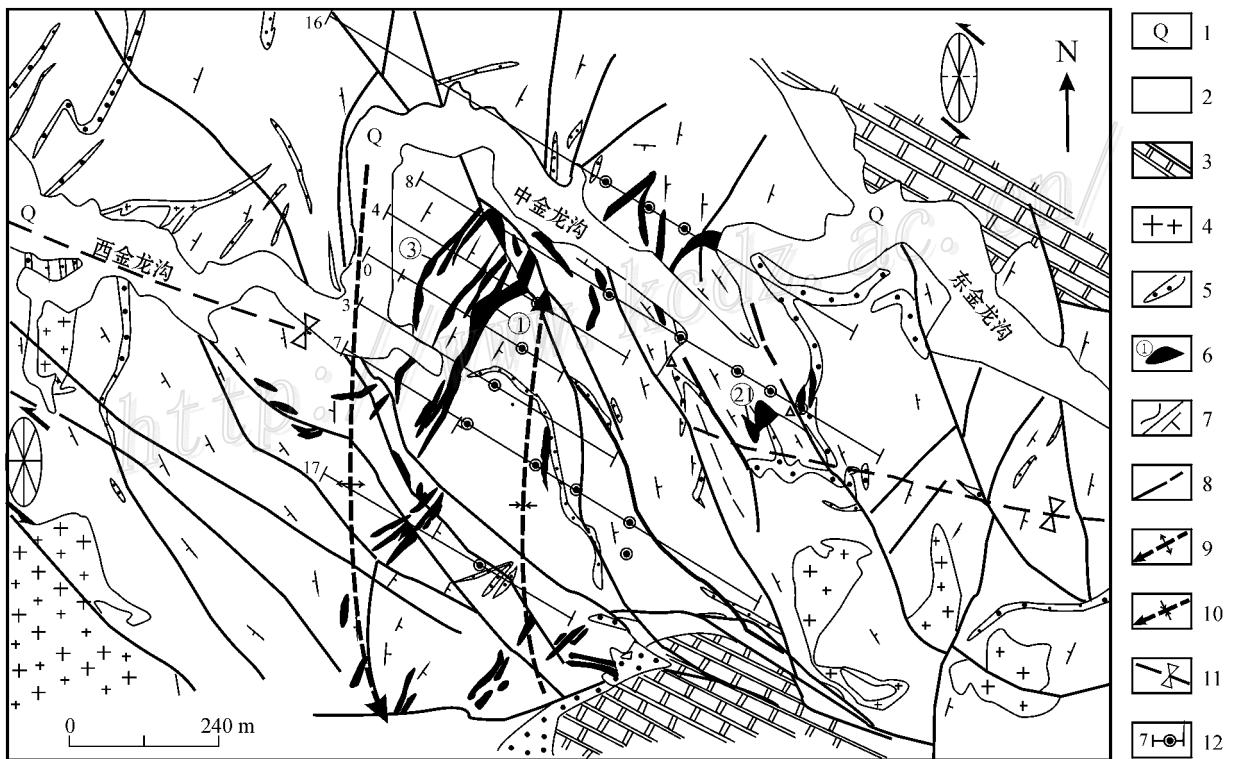


图1 滩间山金矿区地质图(应力椭圆表示南北向褶皱是NW向剪切带左旋滑移引起的)

1—第四系 2—碳质糜棱片岩 3—大理岩 4—滩间山奥长花岗斑岩体 5—岩墙 6—矿体及其编号 7—地质界线/面理产状 8—断裂;  
9—背斜轴;10—向斜轴;11—早期褶皱;12—勘探线及钻孔

Fig. 1 Schematic geological map of Tanjianshan gold ore district (Strain ellipses show a sinistral rotation of NW-trending shear zone resulting in SN-trending folds)

1—Quaternary 2—Carbonaceous mylonite schist 3—Marble 4—Trondhjemite porphyry 5—Dyke 6—Ore body and its serial number;  
7—Geological boundary and attitude of foliation 8—Fault; 9—Anticlinal axis; 10—Synclinal axis; 11—Early fold; 12—Drill hole and exploration line

岩及上部碳质石英绢云片岩夹钙质片岩组成。其中,上部碳质石英绢云片岩位于矿区中部,是金矿体的主要围岩。滩间山矿区内的碳质石英绢云片岩由于遭受强烈变形已成为碳质糜棱片岩,并发生了强烈蚀变。

滩间山奥长花岗斑岩为呈 NW 向展布、面积  $4 \times (1 \sim 2) \text{ km}^2$  的岩株,位于矿区的西南侧,侵入于碳质石英绢云片岩和大理岩中,其全岩 Rb-Sr 等时线年龄为  $(330.0 \pm 24.3) \text{ Ma}$ ,全岩 K-Ar 年龄为  $(309.87 \pm 4.77) \text{ Ma}$ (张德全等 2001)。

碳质石英绢云片岩中有大量岩墙侵入,这些岩墙明显地分为 NW 向和 NNW 向 2 组,主要有闪长玢岩、斜长花岗斑岩、细晶岩和煌斑岩脉,一般长数十米,宽数厘米至数十厘米。在矿区西部,偶尔可以见到闪长玢岩和细晶岩脉被斜长花岗斑岩脉穿切。国家辉等(1997)<sup>①</sup>获得的矿区内斜长细晶岩全岩 K-Ar 年龄为  $(309.0 \pm 4.8) \text{ Ma}$ ,该数据与滩间山奥长花岗斑岩的全岩 K-Ar 年龄数据一致。奥长花岗斑岩岩墙向矿区西南明显增多,有些已与滩间山奥长花岗斑岩体相接,说明两者为同时代的产物。矿区的金矿带内,所有的岩墙都遭受了强烈变形和蚀变,且含金,说明金成矿在岩墙侵入之后。

NW 向剪切带和近 NS 向褶皱组成了滩间山矿区复杂的构造图像(图 1)。

滩间山矿区内 NW 向剪切带宽约 1 km,主要发育在碳质石英绢云片岩中,部分在大理岩中。剪切带内大多数岩石中发育糜棱岩化及由相对较大的石英、堇青石、碳质球粒和黄铁矿组成的多次旋转过的碎斑、S-C 组构等。矿区外围金龙沟东段条带状大理岩中的非对称性次级褶皱说明早期脆韧性变形为右旋逆冲,矿区内糜棱片岩中的堇青石旋转碎斑的非对称性也显示早期剪切为右旋剪切(于风池等,1998)。矿区外侧该剪切带内变质黑云母的  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  年龄为 401 Ma,表明 NW 向剪切带是区域上晚加里东碰撞造山作用的产物(张德全等 2005)。

NW 向剪切带内的碳质石英绢云片岩中发育近 NS 向的复式褶皱,其由西部的背斜(亦可称之为背形构造,以下称“西褶皱”)和东部的向斜(亦可称之为向形构造,以下称“东褶皱”)组成(图 1)。褶皱两翼的层间破碎带控制了绝大部分金矿体的分布。蚀变破碎带中绢云母的  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  年龄值  $(284.04 \pm$

$2.95) \text{ Ma}$ )显示该期构造是区域上晚华力西造山作用的产物(张德全等 2005)。

滩间山金矿床中的金矿体大多呈 NNE 向的似层状或鞍状,集中在东褶皱的枢纽部位。似层状矿体沿东、西褶皱翼部的平行断裂带分布,鞍状矿体集中分布于褶皱枢纽部位(图 1)。单个矿体长几十米至 760 m,平均厚 0.6~18.4 m,平均品位 5~7.58 g/t。已知矿体向下最大延深 340 m。

依据赋矿围岩特征,金矿石可以分为蚀变糜棱片岩型和蚀变脉岩型 2 类。蚀变糜棱片岩型矿石占矿区金矿石总量的 95%,以高应变带内的碳质石英绢云片岩为容矿围岩。其矿石矿物含量占 3%~25%,以黄铁矿为主,少量毒砂,微量自然金、银金矿、闪锌矿、方铅矿、黄铜矿、磁黄铁矿等。脉石矿物主要由绢云母、石英和少量碳酸盐(以铁白云石为主)高岭石、石墨组成。细脉浸染状构造为矿石主要构造。矿石的 Au/Ag 比值平均为 8.9,贱金属 Cu、Pb、Zn 含量很低。

黄铁矿化、硅化、绢云母化和碳酸盐化,以及少量高岭石化和绿泥石化等热液蚀变在 NW 向剪切带和 NS 向褶皱中广泛发育,且向金矿体方向蚀变强度逐渐增大。黄铁矿化和硅化是滩间山矿区重要的找矿标志和矿化强度标志。

矿区中的热液石英总体上可以分为 3 个世代。第一世代石英( $Q_{z1}$ )仅见于 NW 向剪切带内的碳质糜棱片岩中,作为椭圆状的旋转碎斑与早期黄铁矿共生。第二世代石英( $Q_{z2}$ )为交代成因的细粒石英和(或)黄铁矿-石英细脉,在蚀变糜棱片岩型和蚀变脉岩型金矿中广泛分布。第三世代石英( $Q_{z3}$ )产于成矿后的黄铁矿-方解石细脉中。与这 3 个世代石英同期的黄铁矿,其中的 Au 和 As 含量差别大,与第一世代石英( $Q_{z1}$ )共生的黄铁矿( $Py_1$ )Au 和 As 含量中等(电子探针分析 6 件样品平均  $w_{\text{Au}} 0.12\%$ ,  $w_{\text{As}} 0.89\%$ );与第二世代石英( $Q_{z2}$ )共生的黄铁矿( $Py_2$ )Au 和 As 含量最高(电子探针分析 6 件样品平均  $w_{\text{Au}} 0.14\%$ ,  $w_{\text{As}} 2.74\%$ );与第三世代石英( $Q_{z3}$ )共生的黄铁矿( $Py_3$ )Au 和 As 含量很低(电子探针分析 3 件样品平均  $w_{\text{Au}} 0.02\%$ ,  $w_{\text{As}} 0.08\%$ )。根据产状、共生黄铁矿的特征,并结合矿区控矿构造特征,可以认为  $Q_{z1}$  和  $Q_{z2}$  是成矿期的热液石英,它们分别形成于晚加里东期和晚华力西期, $Q_{z3}$  则是成矿

① 国家辉,等. 1997. 青海省大柴旦滩间山—万洞沟地区金矿控矿条件及远景评价. 沈阳地质矿产研究所内部报告.

后的热液石英。

## 2 流体包裹体

27个采自滩间山矿床金矿化带中的含石英和碳酸盐样品,被选择用于本次流体包裹体研究。这些样品含金量变化于 $0.5\sim 37\text{ g/t}$ ,由21个蚀变糜棱片岩和6个蚀变脉岩样品组成,其中包含3个世代的石英。根据黄铁矿、石英和金之间的共生关系,可以认为 $Q_{z1}$ 和 $Q_{z2}$ 中的流体包裹体代表了成矿流体,而 $Q_{z3}$ 中的流体包裹体是捕获于成矿后的流体。将样品制作成两面抛光的薄片,用于流体包裹体的岩相学和显微测温。显微测温是在安装于Leitz Ortholux光学显微镜上的法国产Chaixmeca冷热台上完成的,温度在 $30^\circ\text{C}$ 以下测试精度为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ,温度在 $30^\circ\text{C}$ 以上时测试精度为 $\pm 1^\circ\text{C}$ 。测试时,先冷冻后升温,以免包裹体爆裂。

### 2.1 流体包裹体的类型及产状

岩相学观测表明,所选样品中的流体包裹体主要产在石英和碳酸盐(包括菱铁矿和方解石)中,但是只有少数产于石英中的包裹体可以用于显微测温,因为大部分流体包裹体太小( $< 5\ \mu\text{m}$ )。按照室温下相观测和显微热数据,滩间山矿床中金矿化带内的包裹体可以分为3个主要类型:富 $\text{CO}_2$ 型(type1)、含 $\text{CO}_2$ 型(type2)和富水型(type3)。3种类型包裹体的含量为,富水型(type3)多于含 $\text{CO}_2$ 型(type2),含 $\text{CO}_2$ 型(type2)多于富 $\text{CO}_2$ 型(type1)。

总体上,富 $\text{CO}_2$ 型(type1)包裹体的大小变化于 $3\sim 8\ \mu\text{m}$ 之间,室温下由单相或2相(液相 $\text{CO}_2$ +气相 $\text{CO}_2$ )组成,呈等轴或负晶形状,独立或随意分布于 $Q_{z1}$ 和 $Q_{z2}$ 中,表现为原生包裹体成因。

含 $\text{CO}_2$ 型(type2)包裹体的 $\text{CO}_2$ 相体积在 $10\%\sim 80\%$ 之间,属于 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 包裹体,室温下由2相或3相组成。type2包裹体可进一步划分为2个亚型: type2-1和type2-2,其中type2-1为2相(液相 $\text{CO}_2$ 和液相 $\text{H}_2\text{O}$ ),type2-2为3相(液相、富 $\text{CO}_2$ 气泡和水)。type2-1和type1包裹体共存于 $Q_{z1}$ 中,而大部分type2-2和type3共存于 $Q_{z2}$ 内。type2包裹体的形状变化大,大小(长度)变化于 $3\sim 10\ \mu\text{m}$ ,呈独立的单个包裹体或沿愈合的裂隙成串分布,显示它们的成因变化于原生、假次生和次生之间。3种不同世代石英中均有富水型(type3)包裹体产出,其中, $Q_{z3}$ 中的富水包裹体呈孤立状, $Q_{z2}$ 中的富水包裹体

与type2包裹体共存, $Q_{z1}$ 和 $Q_{z2}$ 中的富水包裹体沿愈合的微小裂隙成串分布。上述现象说明富水包裹体既有原生成因(产于 $Q_{z3}$ 和 $Q_{z2}$ 内),也有假次生(产于 $Q_{z2}$ 内)和次生成因(产于 $Q_{z2}$ 和 $Q_{z1}$ 内)。type3包裹体的大小 $2\sim 5\ \mu\text{m}$ ,由于太小(长轴 $< 5\ \mu\text{m}$ ),大部分无法测定。根据室温下的相体积,type3包裹体由2个亚类型组成: type3-1亚型(气相百分数大于 $65\%$ ,均一到气相),仅见于 $Q_{z2}$ 内; type3-2亚型(气相百分数小于 $45\%$ ,均一到液相)。

总之, $Q_{z1}$ 内含有type1、type2-1和次生的type3-2型流体包裹体, $Q_{z2}$ 中含有type1、type2-2、type3-1和次生的type3-2型流体包裹体, $Q_{z3}$ 内仅有type3-2型包裹体。

需要提及的是, $Q_{z1}$ 中的type1类和type2-1类流体包裹体在室温下是很难辨认的,因为它们 $t_{\text{h}}$ ( $\text{CO}_2$ )温度低(低于室温,参见图2d),只有在冷冻的过程中,才能观察并鉴别到其中的 $\text{CO}_2$ 相。

### 2.2 显微测温结果

#### (1) $Q_{z1}$ 内的包裹体

$Q_{z1}$ 内的type2-1包裹体在 $186\sim 250^\circ\text{C}$ 之间完全均一,而type3-2包裹体在 $141\sim 226^\circ\text{C}$ 之间均一(图2a),这与 $Q_{z3}$ 内的type3-2包裹体之均一温度是一致的(见后述)。type1和type2-1包裹体的最终融化温度( $t_{\text{m}}$ )分别为 $-59.3\sim -60.5^\circ\text{C}$ 和 $-59\sim -61.2^\circ\text{C}$ (图2b),表明除 $\text{CO}_2$ 外还含少量 $\text{CH}_4$ (Burruss, 1981)。含碳相均一到液相的温度 $t_{\text{h}}$ ( $\text{CO}_2$ )为: type1型包裹体在 $-6.1\sim -7.3^\circ\text{C}$ 之间, type2-1型包裹体在 $-1.7\sim 9^\circ\text{C}$ 之间(图2d)。type2-1型包裹体的笼形化合物融化温度 $t_{\text{h}}$ (clath)在 $5.7\sim 9.3^\circ\text{C}$ 之间(图2c),表明其盐度低( $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ ) $7.9\%\sim 1.4\%$ )。

#### (2) $Q_{z2}$ 内的包裹体

$Q_{z2}$ 石英中type3-2包裹体的完全均一温度 $t_{\text{h}}$ (total)变化范围宽( $121\sim 449^\circ\text{C}$ ),而type3-1包裹体的 $t_{\text{h}}$ (total)值在 $381\sim 437^\circ\text{C}$ 之间(图2e)。由于在完全均一之前就发生了爆裂,所以 $Q_{z2}$ 石英中的type2-2型包裹体只获得5个 $t_{\text{h}}$ (total)值,它们变化于 $274\sim 289^\circ\text{C}$ 之间(图2e)。 $t_{\text{m}}$ 值的变化范围分别为: type1包裹体 $-56.8\sim -57.9^\circ\text{C}$ , type2-2包裹体 $-56.9\sim -58.3^\circ\text{C}$ (图2f),这些温度值大多与纯 $\text{CO}_2$ 的3相点( $-56.6^\circ\text{C}$ )比较接近。type1和type2-2型包裹体的均一温度分别为 $16.1\sim 17.3^\circ\text{C}$ 和 $17.8\sim 30.2^\circ\text{C}$ (图2g)。type2-2包裹体的 $t_{\text{h}}$ (clath)变化

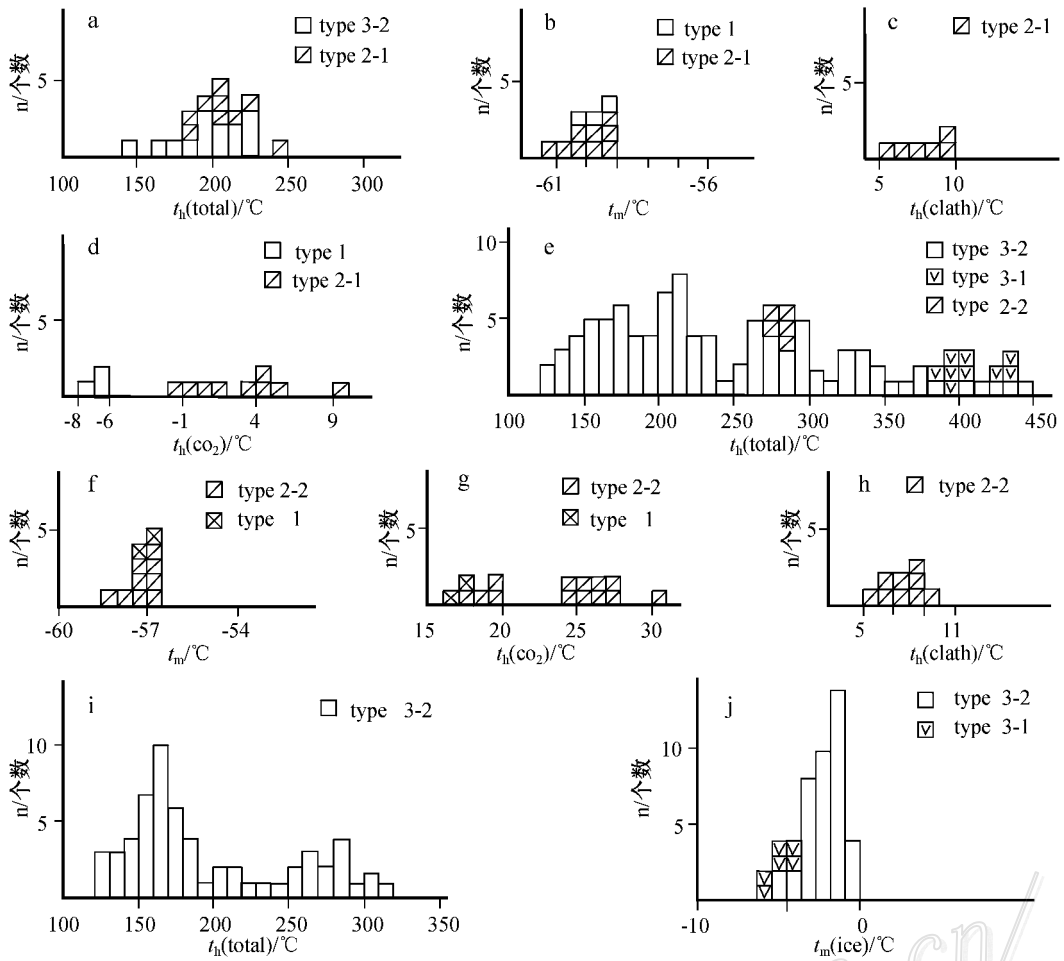


图 2 滩间山金矿床石英中流体包裹体的显微测温数据

a—d. Qz1 石英中包裹体的数据；e—h. Qz2 石英中包裹体的数据；i. Qz3 中包裹体的数据；j. 3 个世代石英中富水包裹体冰晶消失温度。  
 $t_h(\text{total})$ —总均一温度  $t_m$ —含碳相的最终融化温度  $t_h(\text{CO}_2)$ —含碳相均一到液相的温度  $t_h(\text{clath})$ —笼形化合物融化温度  $t_h(\text{ice})$ —富水包裹体冰晶消失温度

Fig. 2 Microthermometric data of fluid inclusions in quartz from Tanjianshan gold deposit

a-d. Data of inclusions in Qz 1 ; e-h. data of inclusions in Qz 2 ; i. Data of inclusions in Qz 3 ; j. Th-Ice data of aqueous inclusions in quartz of three generations.  $t_h(\text{total})$ —Total homogenization temperature ;  $t_m$ —Final melting temperature of carbonic phases ;  $t_h(\text{CO}_2)$ —Temperature of homogenization of carbonic phases into carbonic liquid ;  $t_h(\text{clath})$ —Clathrate-melting temperature ;  $t_h(\text{ice})$ —Final ice-melting temperature of aqueous inclusions

在 5.7~9.1℃ 之间,大部分温度值在 6.8~8.7℃ (图 2h)。上述数据对应的盐度  $\omega(\text{NaCl}_{\text{eq}})$  为 7.9%~1.8%,大部分温度值对应的盐度  $\omega(\text{NaCl}_{\text{eq}})$  在 6.1%~2.6%。

(3) Qz3 内的包裹体以及富水包裹体的冰晶最终融化温度

Qz3 中的 type3-2 型包裹体  $t_h(\text{total})$  值变化范围宽(121~319℃),其主要的峰值为 150~180℃,次要的峰值为 260~290℃(图 2i)。这些温度值与 Qz1 和 Qz2 中的 type3-2 型包裹体的  $t_h(\text{total})$  值是一致的(请比较图 2i、图 2e 和图 2a),这与 Qz1 和 Qz2 中大多属 type3-2 型包裹体的次生成因是完全一致的。

type3-1 型包裹体的冰晶最终融化温度变化于 -4.9~-7.3℃ 之间, type3-2 型包裹体的冰晶最终融化温度变化于 -0.9~-5.8℃ 之间,且大多集中于 -1~-4℃ 之间(图 2j)。上述温度对应的盐度  $\omega(\text{NaCl}_{\text{eq}})$  分别为: type3-1 型包裹体 7.7%~10.8%, type3-2 型包裹体 1.6%~8.9%,且大多集中于 1.7%~6.4%。

### 3 讨论和结论

#### 3.1 复合造山作用与滩间山矿床的两次热液-矿化事件

滩间山金矿床所在的柴北缘-东昆仑地区,是一个古生代—早中生代复合造山带,主要经历了晚加里东期和晚华力西期—印支期的碰撞造山作用(陈炳蔚等,1995;殷鸿福等,1998),该地区已发现的金矿主要形成于这两次造山过程中(张德全等,2002;2005)。滩间山矿区发育的NW向剪切带是区域上NW向大型剪切构造带的一部分,是区域古生代—早中生代复合造山作用的产物,也是本地区滩间山金矿、青龙沟金矿和红柳沟金矿的区域控矿构造(于凤池等,1998;张德全等,2001;2007)。现已确认,该剪切带在晚加里东碰撞造山时期发生过右旋逆冲剪切,在晚古生代—早中生代造山时期发生过左旋走滑,矿区内控制矿体的近NS向褶皱是NW向大型剪切带在晚华力西期左旋走滑的产物(张德全等,2001)。

前已述及,滩间山矿区中的热液石英总体上分为3个世代(Qz1、Qz2和Qz3),根据产状、共生黄铁矿的特征,并结合矿区控矿构造特征,可以认为Qz1和Qz2是金成矿期形成的热液石英,而Qz3是金成矿后热液活动的产物。滩间山金矿床内金矿体的结构及不同世代热液石英和黄铁矿的相互关系,表明该矿有2次热液-矿化事件。早期热液-矿化事件形成Qz1+Py1组合,局限在NW向剪切带的碳质糜棱片岩中。Qz1+Py1矿物组合与NW向剪切带早期变形的密切时空关系说明早期热液成矿事件的近似年龄为401Ma(亦即滩间山地区NW向剪切带内变质黑云母的Ar-Ar年龄(张德全等,2005))。这意味着早期热液-矿化事件与区域上加里东碰撞造山作用有关。Qz2+Py2矿物组合记录了滩间山矿区的第二次热液-矿化事件,该期产物叠加于早期产物之上,并对其加以改造,形成金的工业矿体。与第二次事件伴随的热液蚀变和金矿化不但产在蚀变碳质糜棱片岩中,而且也产于侵入岩脉中,它们在构造上受NS向褶皱控制,金矿石中绢云母的Ar-Ar年龄(284.04Ma,张德全等,2005),显示其与晚古生代—早中生代造山作用有密切的时间关系。

### 3.2 与不同热液-矿化事件有关流体的成分及 $p-t$ 条件

流体包裹体岩相学和显微测温资料提供了与不同热液-矿化事件有关流体的成分及  $p-t$  条件方面的重要信息。根据前述流体包裹体的岩相学特征,产于Qz1石英内的type1和type2-1型包裹体可以代表捕获于第一次热液-矿化事件的流体,其理由是:Qz1中发现有3种不同类型的流体包裹体(type1、

type2-1和type3-2),其中只有type1和type2-1是共存于Qz1中的原生或假次生成因包裹体,而type3-2包裹体沿愈合的微裂隙成串分布,属于次生成因,且产于Qz1与Qz3石英内的type3-2包裹体的均一温度是一致的,这也说明type3-2包裹体代表了成矿后的流体。同样,Qz2石英中的type1、type2-2、type3-1包裹体,还有一些type3-2型包裹体则代表了第二次热液-矿化事件的流体。

Qz1内的type1和type2-1包裹体的最终融化温度( $t_m$ )数据表明,第一次热液-矿化事件的流体属于H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>-NaCl体系,根据type2-1型包裹体的 $t_H$ (total)和 $t_H$ (clath)确定的流体温度和盐度 $\omega$ (NaCl<sub>eq</sub>)分别为186~250℃和1.4%~7.9%。根据产于Qz1石英内的type1和type2-1型包裹体的 $t_m$ 和 $t_H$ (clath)值(见图2b和图2c)估算的 $x$ (CH<sub>4</sub>)值约为: type1型包裹体0.1~0.2, type2-1型包裹体0.1~0.25(Burruss,1981)。计算出第一次热液-矿化事件中流体的 $x$ (CO<sub>2</sub>)和 $x$ (H<sub>2</sub>O)近似值分别为0.11~0.59和0.64~0.31,估计的压力范围在(4900~1800)×10<sup>5</sup>Pa。上述估算是依据有关流体包裹体的状态方程(Kerrick et al.,1981;Jacobset al.,1981),以及刘斌等(1999)建立的根据流体包裹体显微测温数据计算流体密度、体积和组分的经验式。

按照不混溶流体包裹体的判别准则(Hollister et al.,1979;Roedder,1984),在Qz2石英内的type1、type2-2,可能还有一些type3-1型包裹体,可以认为是代表了由于流体不混溶形成的不混溶流体。此外,Qz2中的type3-1和一些type3-2型包裹体均一温度大体一致,但远高于type2-2包裹体的均一温度(参见后述),它们可能属于另一种不混溶包裹体。这样,就有2种不混溶流体参与到第二次热液-矿化事件中。

Qz2石英内的type1和type2-2型包裹体的 $t_m$ 值大多接近于纯二氧化碳的三相点,其不含或含极低的CH<sub>4</sub>,表明第二次热液-矿化事件的流体属于H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-NaCl体系。Qz2石英中type2-2型包裹体给定的流体温度274~289℃,盐度 $\omega$ (NaCl<sub>eq</sub>)1.8%~7.9%。根据Qz2石英内的type2-2型包裹体的 $t_m$ 和 $t_H$ (clath)值(见图2f和图2h),估算其 $x$ (CO<sub>2</sub>)约为0.19~0.27, $\omega$ (H<sub>2</sub>O)约为0.81~0.73,压力约为(2300~1100)×10<sup>5</sup>Pa。根据CO<sub>2</sub>系统的状态方程,按照type2-2型包裹体的平均均一温度(280℃)和Qz2石英内type2-2型包裹体的 $t_H$ (CO<sub>2</sub>)值,估算

的 Qz2 石英内的 type1 型包裹体的压力值为  $1\ 350 \times 10^5$  Pa。该压力值与 type2-2 型包裹体压力( $2\ 300 \sim 1\ 100$ )  $\times 10^5$  Pa 的平均值大体一致,说明 type1、type2-2 型包裹体是不混溶包裹体。因此,上述数据代表了第二次热液-矿化事件期间的第二种不混溶流体的温度、盐度、压力和组成。

Qz2 石英内的 type3-1 和 type3-2 型包裹体的均一温度为  $381 \sim 437^\circ\text{C}$  和  $121 \sim 449^\circ\text{C}$ , 盐度  $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$  为  $7.7\% \sim 10.8\%$  和  $1.6\% \sim 8.9\%$ , 这些数据大致代表了第二次热液-成矿事件期间的第一种不混溶流体的温度和盐度。结合 Qz2 石英内 type1 型包裹体的压力值( $1\ 350 \times 10^5$  Pa)所代表的深度,可以看出第一种不混溶流体具有很高的热梯度,而碰撞造山不太可能产生这种高热梯度,推断其可能与矿区出露的或矿区深部隐伏的晚华力西期花岗岩类有关。主要导致金成矿的第二种不混溶流体很可能是第一种不混溶流体演化的产物。

上述压力值,按岩压估算的第一次热液-矿化事件对应的深度大致为  $16 \sim 6$  km ( $4\ 900 \sim 1\ 800$ )  $\times 10^5$  Pa, 第二次热液-矿化事件对应的深度大致为  $7 \sim 3.5$  km ( $2\ 300 \sim 1\ 100$ )  $\times 10^5$  Pa。前者的深度吻合于 NW 向剪切带在晚加里东碰撞造山期间发生于上地壳下部的脆-韧性剪切变形,后者的深度表明第二次热液-矿化事件发生在浅成 ( $< 6$  km) 环境,这与该区域晚华力西时期的隆升造山过程是一致的。据此推断,与晚加里东碰撞造山期间不同,本区晚华力西—印支碰撞造山过程中的最大隆升幅度达 9 km 左右。

### 3.3 结论

上述研究表明,滩间山矿区的金矿体是 2 次热液-矿化事件叠加的产物。第一次热液-矿化作用与区域上加里东碰撞造山作用有关,形成的流体属于  $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{CH}_4-\text{NaCl}$  体系,温度和盐度  $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$  分别为  $186 \sim 250^\circ\text{C}$  和  $1.4\% \sim 7.9\%$ , 流体的组成是:  $x(\text{CH}_4) = 0.1 \sim 0.2$ ,  $x(\text{CO}_2) = 0.11 \sim 0.59$ ,  $x(\text{H}_2\text{O}) = 0.64 \sim 0.31$ , 压力变化于  $(4\ 900 \sim 1\ 800) \times 10^5$  Pa 之间,其主要沿 NW 向剪切带迁移和沉淀形成金矿化。第二次热液-矿化作用与晚古生代—早中生代碰撞造山作用密切相关,产生两种不混溶流体。第一种不混溶流体为温度  $381 \sim 449^\circ\text{C}$ 、盐度  $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$   $1.6\% \sim 10.8\%$  的  $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$  体系的流体,可能与岩浆侵入活动有关。第二种不混溶流体为温度  $274 \sim 289^\circ\text{C}$ 、盐度  $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$   $1.8\% \sim$

$7.9\%$ 、 $x(\text{CO}_2) = 0.19 \sim 0.27$ 、 $x(\text{H}_2\text{O}) = 0.81 \sim 0.73$ 、压力  $(2\ 300 \sim 1\ 100) \times 10^5$  Pa 的  $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{NaCl}$  体系的流体,其沿 NW 向剪切带内的近 NS 向褶皱两翼的层间破碎带流动和沉淀,并最终导致滩间山矿床内金矿体的定位。

按岩压估算,第一次热液-矿化事件对应的深度大致为  $16 \sim 6$  km, 反映 NW 向剪切带在晚加里东碰撞造山期间的脆-韧性剪切变形发生于上地壳下部;第二次热液-矿化事件对应的深度大致为  $7 \sim 3.5$  km, 表明其发生于浅成 ( $< 6$  km, Groves et al., 1998) 环境,这也进一步证实了金成矿于该区域晚华力西时期的隆升造山过程中。本区晚华力西-印支碰撞造山过程中的最大隆升幅度达 9 km 左右。

### References

- Burrows R C. 1981. Analysis of phase equilibria in C-O-H-S fluid inclusion [M]. Mineralogical Association of Canada Short Course Handbook 6, 39~74.
- Chen B W, Wang Y B and Zuo G C. 1995. Terrain subdivision of the northern Qinghai-Xizang (Tibet) plateau and its tectonic evolution [J]. Acta Geophysica Sinica, 38 (Supp. II) : 98~113 (in Chinese with English abstract).
- Groves D I, Goldfarb R J, Gebre-Mariam M, Hagemann S G and Robert F. 1998. Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types [J]. Ore Geology Reviews, 13 : 7~27.
- Hollister L S, Burruss R C, Henry D L and Hendel E M. 1979. Physical conditions during uplift of metamorphic terranes, as recorded by fluid inclusions [J]. Bull. Minera., 102 : 555~561.
- Jacobs G K and Kerrick D M. 1981. Methane: An equation of state with application to the ternary system  $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{CH}_4$  [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 45 : 607~614.
- Kerrick D M and Jacobs G K. 1981. A modified Redlich-Kwong equation for  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  and  $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$  mixtures at elevated pressures and temperatures [J]. American Journal of Science, 281 : 735~767.
- Liu B and Shen K. 1999. Thermodynamics of fluid inclusions [M]. Beijing Geol. Pub. House. 1~290 (in Chinese with English abstract).
- Roedder E. 1984. Fluid inclusion [J]. Mineralogical Society of America Reviews in Mineralogy, 12 : 644p.
- Yin H F and Zhang K X. 1998. Evolution and characteristics of the central orogenic belt [J]. Journal of China University of Geosciences, 23 (5) : 437~442 (in Chinese with English abstract).
- Yu F C, Ma G L and Wei G F. 1998. Geological characteristics and ore-controlling factors of the Tanjianshan gold deposit, Qinghai Province [J]. Mineral Deposits, 17 (1) : 47~56 (in Chinese with English abstract).
- Zhang D Q, Feng C Y, Li D X, Xu W Y, Yan S H, She H Q, Dong Y J and Cui Y H. 2001. Orogenic gold deposits in the North Qaidam

- and East Kunlun orogen, West China[ J ]. Mineral Deposits, 20(2):137~146( in Chinese with English abstract ).
- Zhang D Q, Zhu H P, Yan S H, Xu W Y and She H Q. 2002. Multiple Paleozoic orogeny and metallogeny[ J ]. Mineral Deposits, 21( Supp ):293~296( in Chinese ).
- Zhang D Q, Dang X Y, She H Q, Li D X, Feng C Y and Li J W. 2005. Ar-Ar dating and its geological significance of orogenic gold deposits in northern margin of Qaidam and East Kunlun[ J ]. Mineral Deposits, 24(2):87~98( in Chinese with English abstract ).
- Zhang D Q, Wang F C, She H Q, Feng C Y, Li D X and Li J W. 2007. Three-order ore-controlling structural system of orogenic gold deposits in the northern Qaidam margin—East Kunlun region[ J ]. Geology in China, 34(1):92~100( in Chinese with English abstract ).
- 陈炳蔚, 王彦斌, 左国朝. 1995. 青藏高原北部地体划分及其构造演化[ J ]. 地球物理学报, 38( 增刊 II ):98~113.
- 刘斌, 沈昆. 1999. 流体包裹体热力学[ M ]. 北京: 地质出版社.
- 殷鸿福, 张克信. 1998. 中央造山带的演化及其特点[ J ]. 地球科学, 23(5):437~442.
- 于凤池, 马国良, 魏刚锋. 1998. 青海滩间山金矿床地质特征和控矿因素分析[ J ]. 矿床地质, 17(1):47~56.
- 张德全, 丰成友, 李大新, 徐文艺, 阎升好, 余宏全, 董英君, 崔艳合. 2001. 柴北缘-东昆仑地区的造山型金矿床[ J ]. 矿床地质, 20(2):137~146.
- 张德全, 朱华平, 阎升好, 徐文艺, 余宏全. 2002. 东昆仑古生代复合造山过程及金属成矿作用[ J ]. 矿床地质, 21( 增刊 ):293~296.
- 张德全, 党兴彦, 余宏全, 李大新, 丰成友, 李进文. 2005. 柴北缘-东昆仑地区造山型金矿床的 Ar-Ar 测年及其地质意义[ J ]. 矿床地质, 24(2):87~98.
- 张德全, 王富春, 余宏全, 丰成友, 李大新, 李进文. 2007. 柴北缘—东昆仑地区造山型金矿床的三级控矿构造系统[ J ]. 中国地质, 34(1):92~100.

#### 附中文参考文献

陈炳蔚, 王彦斌, 左国朝. 1995. 青藏高原北部地体划分及其构造演

<http://www.kcdz.ac.cn/>