

文章编号: D258-7106(2007)01-0015-18

新疆阿尔泰山南缘托库孜巴依金矿成矿演化:石英脉系、同位素地球化学及其 Ar-Ar 年代学证据*

李光明¹, 沈远超¹, 刘铁兵¹, 申萍¹, 周能武²

(1 中国科学院矿产资源重点实验室, 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; 2 新疆地矿局
第十一大队, 新疆 昌吉 830000)

摘要 托库孜巴依金矿区赋存于玛尔卡库里大型韧性剪切带及其次级构造中, 含矿构造演化经历了5个主要变形阶段: D1 推覆挤压变形与紧闭褶皱, D2 左行走滑韧性剪切带, D3 造山带的抬升与脆-韧性变形, D4 伸展体制下的张性构造, 伴生有多金属硫化物-石英脉充填与闪长岩脉贯入; D5 晚期近东西向及北西向等多组压扭或张扭性次级断裂。相应地, 在构造变形过程中形成一系列形态和矿物组合各异的石英脉, 初步划分出8种脉系、4个主要成矿阶段, 识别出两个主要成矿事件: ①与脆-韧性剪切作用有关的含金黄铁矿-石英脉, ②与走滑-伸展转换体制有关的含金多金属-石英脉。氢、氧同位素研究结果显示从早阶段向晚阶段, 成矿流体由以变质热液为主向以大气降水为主的方向演化, 硫同位素主要为深源硫特征, 铅同位素分析结果显示来源于造山带和上地幔之间, 并向造山带演化, 且与阿舍勒铜矿的围岩和矿石有一定的成因联系, 说明早期的火山作用对成矿有一定的贡献。对构造变形形成的黑云母进行 Ar-Ar 法定年, 获得黑云母的坪年龄为 (269.94 ± 2.54) Ma, 反等时线年龄为 (269.38 ± 2.63) Ma, 结合已发表的年龄数据, 该矿床可能由两个成矿事件形成, 分别为 290 Ma 左右和 270 Ma 左右, 对应于额尔齐斯构造带的两幕变形, 早期主要与其大规模左行走滑有关, 而第二成矿事件可能与后碰撞走滑-伸展转换体制有关。

关键词: 地球化学; 石英脉系; Ar-Ar 年代学; 成矿演化; 托库孜巴依金矿区; 额尔齐斯构造带

中图分类号: P618.51; P597

文献标识码: A

Metallogenic evolution of Tuokuzibayi gold deposit in southern Altay, north Xinjiang: Evidence from characteristics of quartz vein systems, isotopic geochemistry and Ar-Ar chronology

LI GuangMing¹, SHEN YuanChao¹, LIU TieBing¹, SHEN Ping¹ and ZHOU NengWu²

(1 Key Lab. of Mineral Resources, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2 No. 11 Geological Party, Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Changji 830000, Xinjiang, China)

Abstract

The gold ore bodies of the Tuokuzibayi gold field, located in southern Altay, Xinjiang, are hosted by NW-SE trending, steeply NE-dipping and 1000 m wide Ma'erkakuli large-size ductile shear zone (MDSZ) and its secondary structures, which transect Middle and Lower Devonian metamorphic rocks of lower greenschist facies. Studies indicate that tectonic evolution of the ductile shear zone that hosts ore bodies has gone through mainly

* 本研究得到中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-137)和国家“十五”科技攻关新疆305项目(2003BA612A-06-19)的联合资助

第一作者简介: 李光明, 男, 1964年生, 博士, 主要从事金属矿床成矿作用及成矿预测研究。E-mail: liguangming0505@yahoo.com.cn.
收稿日期: 2006-07-31; 改回日期: 2006-12-11。张绮玲编辑。

five deformation stages. D1 event is represented by tight folds, which were generated by compression deformation. But it is quite difficult to recognize these folds because of subsequent deformation. Ductile D2 shearing is associated with a sinistral strike-slip deformation, which formed intense deformation zone. D3 event is characterized by transition of ductile shearing to brittle-ductile shearing in continual development and uplift of the Altay orogen. In the post-collision period, compression was transformed to the extension domain, which formed tension structures and brittle faults filled with polymetallic sulfide-quartz veins and diorite dikes (D4). D5 is associated with superimposing late EW and NE trending brittle faults in the shear zone. Accordingly, at least eight multifacies quartz veins, each with its own characteristic geometry and mineral paragenesis, were formed in the evolution of the Ma'erkakuli ductile shear zone. On the basis of the relationships between various types of quartz veins as well as the characteristics of their mineral composition, gold mineralization of this gold deposit is divided into four stages, and two main ore-forming events are recognized: brittle-ductile deformation-related pyrite-quartz veins and transition of strike-slip deformation to extension domain-related polymetallic quartz veins. Hydrogen and oxygen isotope studies show that ore-forming fluids varied from metamorphic fluids to meteoric water-dominant fluids from early to late stages. $\delta^{34}\text{S}\%$ (CDT) values of sulfides from this gold deposit range from -2.71% to 5.6% , showing a deep source. Pb isotope analyses reveal that ore-forming materials were generated between the orogen and the upper mantle, in the direction of the orogen. This must have had some genetic relations with host rocks and ores in the Ashele massive sulfide Cu-Zn deposit, indicating that early volcanism contributed to gold mineralization in the gold deposit. Ar-Ar dating of biotite from mylonite in the shear zone yields a plateau age of 269.94 ± 2.54 Ma and inverse isochron age of 269.38 ± 2.63 Ma. According to this result in combination with age data available, it is held that the gold deposit must have resulted from two main gold ore-forming events at 290 Ma and 270 Ma, respectively, corresponding to two deformation stages of the Ertix tectonic belt. It is presumed that early gold mineralization was related to large-scale sinistral strike-slip whereas late gold mineralization resulted from post-collisional structural transition.

Key words: geochemistry, quartz vein system, Ar-Ar chronology, metallogenic evolution, Tuokuzibayi gold field, Ertix tectonic belt

阿尔泰山南缘是新疆北部重要的金矿床集中产地,特别是沿额尔齐斯成矿构造带分布有众多大中型金矿床,因而倍受国内外地质学家的关注,其中多纳拉萨依金矿和托库孜巴依金矿作为典型矿床而被深入研究与探讨(朱韶华等,1994;1995;程忠富等,1996;1997;2002;韩宝福等,1999;李华芹等,1998;李志纯,1999;刘悟辉等,1999;董永观,1998;2000)。已有的研究表明,带内金矿床的形成主要与海西期造山作用过程有关,时空分布上严格受额尔齐斯大型剪切带控制,其特征与典型的中温热液金矿床(芮行健等,1993)或造山型金矿床(陈华勇等,2000;Groves et al.,1998;Goldfarb et al.,2001)类似。而最近的研究表明,矿床的形成主要与造山带构造演化的后碰撞伸展构造环境有关(闫升好等,2004)。上述研究均只强调单次成矿事件,而对额尔齐斯构造成矿带上金成矿的不均一性、分段性认识不够,并对该带上的金成矿演化尚缺乏深入研究,因

而制约了对区内成矿地质条件的认识和进一步对勘查选区的部署(沈远超等,2007)。本文选择额尔齐斯成矿带西段玛尔卡库里剪切带中的托库孜巴依金矿为研究对象,通过对其中产出的各阶段石英脉系的野外观察和室内研究,结合同位素地球化学和 Ar-Ar 同位素年代学研究,探讨该地区金成矿演化,从而为区域勘查选区提供理论依据。

1 区域地质背景和矿区地质特征

1.1 区域地质背景

托库孜巴依金矿区位于中亚造山带(陈衍景等,1995)阿尔泰山南缘的额尔齐斯构造成矿域中。额尔齐斯构造域由5个单元构成(芮行健,1993):①扎河坝海沟带;②喀拉通克岛弧带;③克兰弧后盆地;④可可托海大陆深成岩浆活动带;⑤诺尔特板内火山断陷盆地。而额尔齐斯成矿构造带实际上主要是指

受额尔齐斯深大断裂所影响并派生次级构造的一定区域,即相邻的阿尔曼太-萨吾尔岛弧带和克兰弧后盆地的部分地区(秦克章,2000)。额尔齐斯成矿构造带呈狭窄的带状沿北西西向展布,在阿勒泰地区由西部的哈巴河地区,向东至富蕴地区再向东至青河地区,沿走向向西与哈萨克斯坦的矿区阿尔泰的

南阿尔泰构造-岩浆-成矿(多金属-金-银)带相连,而向东延伸到蒙古阿尔泰,长度大于 600 km,在新疆境内宽约数十公里,并表现为向东收敛、向西散开的基本形式,是一条重要的金、铜成矿区带。所研究的托库孜巴依金矿区位于泥盆纪—早石炭世的克兰弧后盆地之西北部(图 1)。区内出露地层主要为奥陶

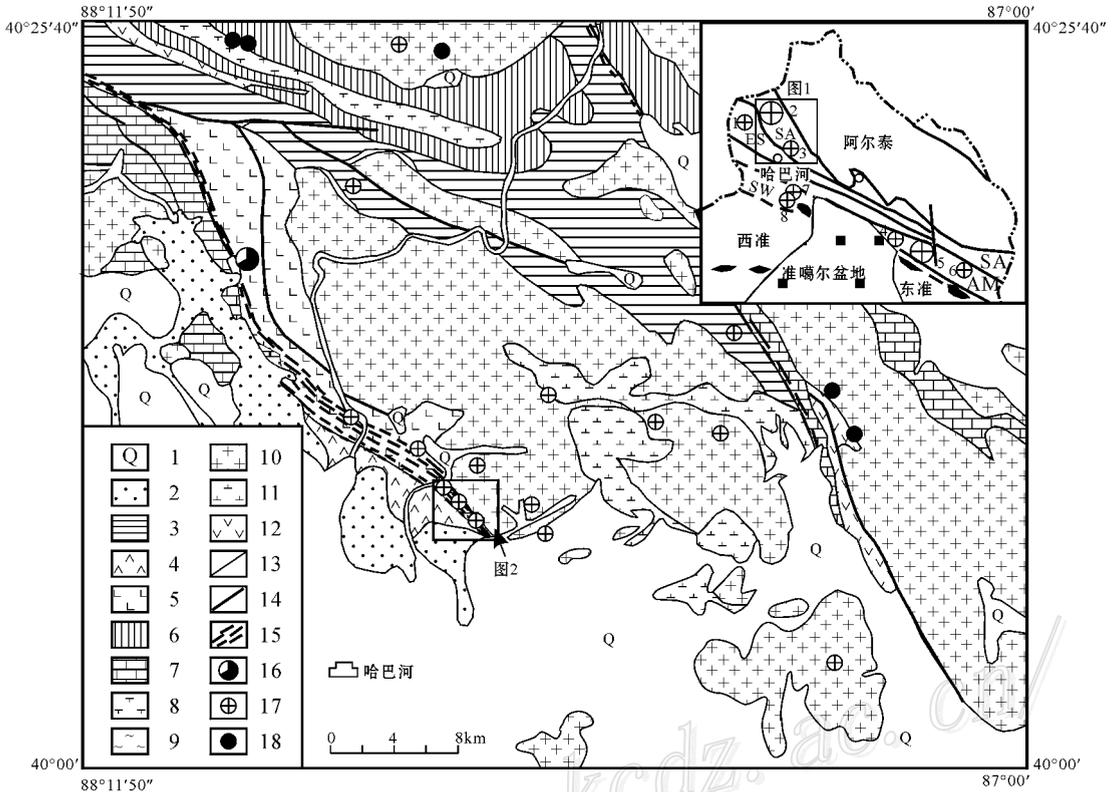


图 1 托库孜巴依金矿区区域地质矿产图(据新疆地矿局十一大队,2004 修改)

1—第四系 2—第三系杂色粘土及砂砾石层,泥盆系 3—中-上统奇文代衣群的页岩、砂岩、干枚岩、凝灰岩;4—中统托克萨雷组的片岩、砂岩、页岩及灰岩、凝灰岩及砾岩;5—中统阿勒泰组上亚组的凝灰质砂岩夹灰岩、凝灰岩、中酸性火山熔岩火山集块岩;6—中统阿勒泰组下亚组的黑云斜长片麻岩、角砾凝灰岩、凝灰岩;7—中统未分阿勒泰组的页岩、灰岩、砂岩;8—下泥盆统康布铁堡组的黑云斜长片麻岩、凝灰岩、麻粒岩;9—中上奥陶统哈巴河群中亚群的页岩夹粉砂岩,砂岩;10—斜长花岗岩;11—辉石闪长岩、闪长岩、石英闪长岩;12—辉绿岩;13—地质界线;14—断层;15—韧性剪切带;16—阿舍勒铜锌矿;17—金矿床(点);18—铜矿点。右上图中:SA—阿尔泰山南缘,ES—额尔齐斯,AM—阿尔曼太,SW—萨吾尔,1—多纳拉萨依金矿,2—阿舍勒铜锌矿,3—托库孜巴依金矿,4—沙尔布拉克金矿,5—喀拉通克铜镍矿,6—科克萨依金矿,7—布尔克斯岱金矿,8—阔尔真阔隘金矿

Fig. 1 Regional geological map of the Tuokuzibayi gold district, Southern Altay, Xinjiang, showing distribution of ore deposits (Simplified from No. 11 Geological Party, Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, 2004) 1—Quaternary; 2—Tertiary mottled clay and gravel; Devonian: 3—Shale, sandstone, phyllite and tuff of Middle and Upper Devonian Qiwendaiyi Formation; 4—Shist, shale, limestone, tuff and conglomerate of Middle Devonian Tuokesalei Group; 5—Tuffarous sandstone, locally interbedded with carbonate, tuff, intermediate and acidic volcanic lava, volcanic agglomerate of Middle Devonian Upper Altay Group; 6—Biotite-plagioclase gneiss, tuff breccia and tuff of Middle Devonian Lower Altay Group; 7—Shale, limestone and sandstone of undivided Altay Group; 8—Biotite-plagioclase gneiss, tuff and granulite of Lower Devonian Kanbutiepu Group; 9—Shale interbedded with siltstone and sandstone of Middle and Upper Ordovician Habahe Formation; 10—Plagiogranite; 11—Pyroxene diorite, diorite and quartz diorite; 12—Diabase; 13—Geological boundary; 14—Fault; 15—Ductile shear zone; 16—VMS Ashele Cu—Zn deposit; 17—Gold deposit (ore spot). 18—Copper ore spot; Upper right: SA—Southern Altay; ES—Ertix; AM—Almantai; SW—Sawu'er; 1—Duonalasayi gold deposit; 2—VMS Ashele Cu—Zn deposit; 3—Tuokuzibayi gold deposit; 4—Sa'erbulake gold deposit; 5—Kalatongke Cu—Ni sulfide deposit; 6—Kekesayi gold deposit; 7—Bu'erkesidai gold deposit; 8—Kuo'erzhenkuola gold deposit

系哈巴河群中亚群的浅灰色页岩夹灰绿色石英长石砂岩、粉砂岩及片岩、下泥盆统康布铁堡组(D_{1k})晶屑凝灰岩、含角砾流纹岩、凝灰质砂岩、泥质粉砂岩等、中泥盆统阿勒泰组(D_{2a})的火山岩、碎屑岩及碳酸盐岩建造、中上泥盆统奇文代衣群(D_{2-2qw})的灰色砂岩、页岩、千枚岩互层,夹少量钙质砂岩、凝灰岩薄层,另外在矿区南部出露上新统独山子组(N_{2d})的红层沉积。其中,中下泥盆统的岩石普遍遭受强烈动力变质,片理构造发育,已变质成中-浅变质岩,火山岩中含有较多的中基性岩类,或双峰式火山岩(王登红等,1996)。

区域内侵入岩主要为华力西中期酸性侵入岩,以黑云母斜长花岗岩体分布最广。区内脉岩发育,有辉长岩脉、闪长岩脉、花岗斑岩脉、石英斑岩脉、花岗岩脉和石英脉等。

区域构造线主要呈北西向,断裂发育,一级构造是额尔齐斯构造带,该构造带被认为是长期活动的超壳断裂带,它控制了该地区的火山盆地、岩体及其矿床分布(张湘炳等,1996;郭定良,1996)。二级构造是玛尔卡库里断裂,为一条宽约1 km,延伸数百公里的脆韧性剪切带。托库孜巴依金矿区主要产于Ⅱ级构造玛尔卡库里构造带内及其上盘的Ⅲ级构造中,主要的控矿构造体系为脆-韧性剪切带(图1)。

2 矿区地质特征

2.1 含矿围岩及其岩浆作用

区内出露地层主要有中泥盆统阿勒泰组上亚组第二岩性段,托克萨雷组上亚组。中泥盆统阿勒泰组上亚组下部为青灰色变石英砂岩夹薄层绢云石英千枚岩和结晶灰岩,其上部为变晶屑凝灰岩、变流纹质熔结凝灰岩及变流纹岩等,局部夹有薄层结晶灰岩。Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ号矿床的主要赋存在该亚组岩性层中。中泥盆统托克萨雷组上亚组(D_{2t^2})广泛分布于矿区东南部,主要为变砂岩夹绢云石英千枚岩,顶部出露一层变石英粉砂岩。哈巴河斜长花岗岩体是矿区附近最大的岩体,Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ号矿床均产于该岩体的外接触带上。哈巴河岩体内及外接触带中泥盆统阿勒泰组及托克萨雷组内各类脉岩发育,主要有闪长岩脉、花岗斑岩脉、斜长花岗斑岩脉等(图2)。

区内有2期闪长岩脉:①早期闪长岩脉挤压片理化及碎粒岩化较发育。矿物具有明显的定向排列,磁铁矿化、绿泥石化、绿帘石化蚀变较强,含金性

较好,可单独构成规模较大的金矿体;②晚期闪长岩脉多呈鲜绿色、中-粗粒结构、块状构造,岩石未变形,矿化较弱。两者成群混合分布,但未见有明显穿切关系。

矿区主要构造是NW-SE向的玛尔卡库里韧性剪切变形带,带内岩石强烈片理化及糜棱岩化,由数个次一级的剪切构造带组成,构造线呈北西-南东向展布,褶皱多呈紧闭线状小规模褶皱,断裂活动以韧性剪切为主,晚期以压扭及脆性活动为主。

2.2 玛尔卡库里大型韧性剪切带及变形事件

托库孜巴依金矿控矿脆-韧性剪切带的构造演化经历了从早期挤压推覆所形成的韧性变形,到中期的逐步抬升、左行走滑所形成的脆-韧性变形与一系列的剪裂系和区内脉系的形成,晚期有脆性构造的叠加。主要的金成矿与中期的脆-韧性剪切变形有关。

玛尔卡库里构造带内及其次级的托库孜巴依构造带的演化经历了5个主要变形阶段。D1在宏观上见由于推覆挤压而形成的紧闭褶皱,褶皱轴面一般南倾,倾角较陡,达 $75\sim 85^\circ$,褶皱轴向南东倾伏,倾伏角在 $40\sim 60^\circ$ 之间,矿化带或矿体一般发育于褶皱的轴部。为与挤压作用有关的NE-SW向缩短,发育陡立、紧闭的有时为倒转的褶皱,并伴随强烈韧性变形,由于有后期构造的叠加,大部分已被破坏;D2为与左行走滑作用有关的韧性剪切带发育,宏观上韧性剪切带总体走向北西,带内有强带和弱带之分,强带一般宽0.5~15 m,长200~1 000 m,与弱带之间呈渐变过渡关系。具体特征表现为:

(1)宏观上表现为宽达1.5~2.0 km的强烈劈理化,糜棱岩化带,其内S-C面理发育,根据两组面理间所夹锐角指示的剪切方向可以判断为左旋剪切。

(2)韧性剪切带内拉伸线理(a线理)极为发育,在剪切带核部,拉伸线理近于水平,边部发生侧伏,向东南侧伏,侧伏角由 0° 增大到 30° ,个别可达 60° 。

(3)剪切带内可见到轴面与拉伸线理平行的“a”型褶皱,片理化粉砂岩内常见大型杆状构造。

(4)剪切带内石英脉常呈雁行式排列,黄铁矿、石英颗粒被压扁旋转形成压力影。

(5)剪切带内常见褶皱纹理,褐铁矿化变石英砂岩及石英脉常形成拔丝构造。

(6)岩石薄片可见石英颗粒边缘粒化、压扁、拉长、定向排列、波状消光等韧性变形特征。

(7)石英碎斑构造、S-C组构特征显示玛尔卡库

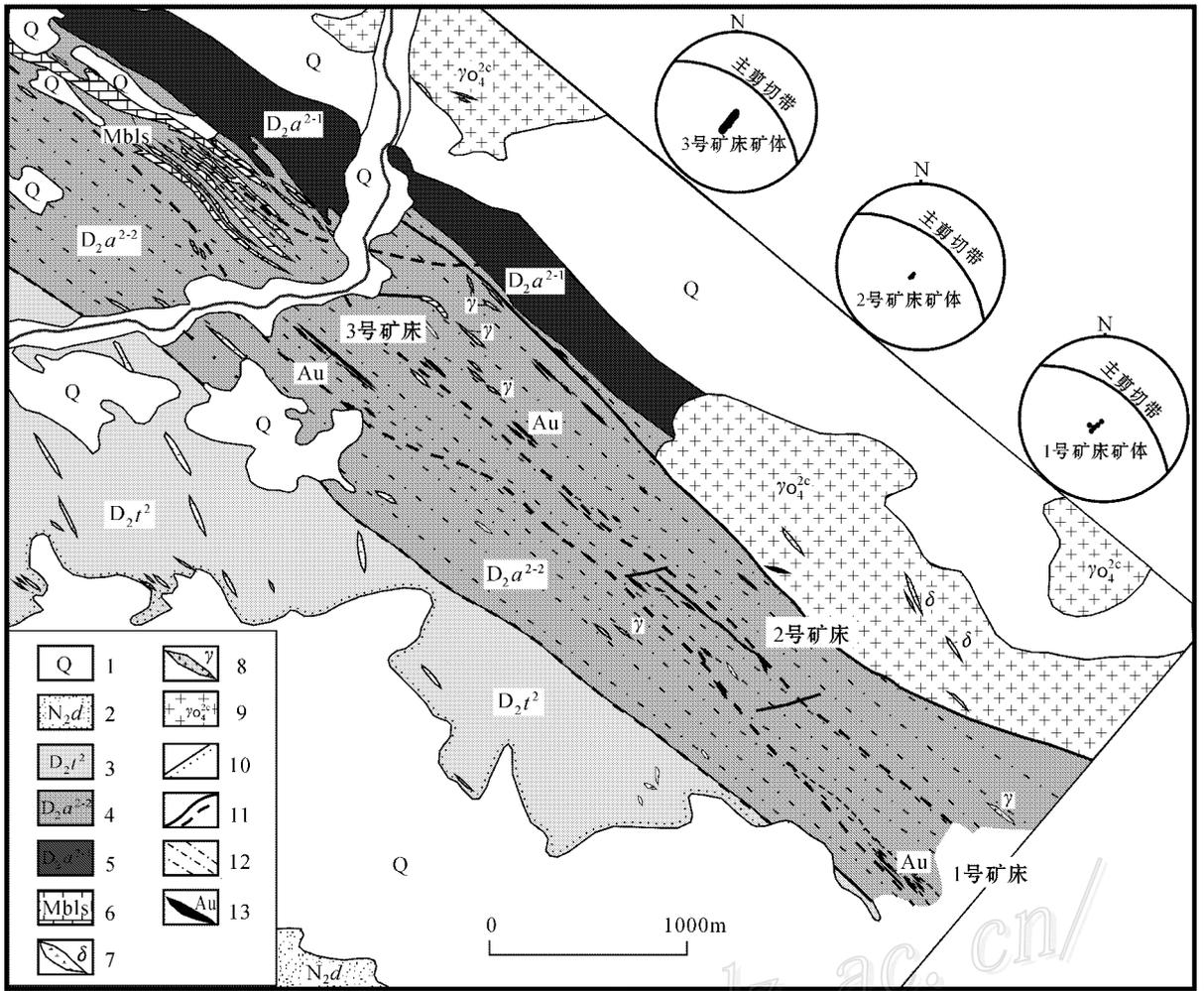


图 2 托库孜巴依金矿区地质图(据新疆地矿局十一地质大队资料,2004 修改)

1—第四系 2—第三系杂色粘土及砂砾石层 3—中泥盆统托克萨雷组上亚组和下亚组的片岩、砂岩、页岩及灰岩,片岩砂岩、凝灰岩及砾岩 4—中泥盆统阿勒泰组上亚组的凝灰质砂岩夹灰岩、凝灰岩、中酸性火山熔岩火山集块岩 5—中泥盆统阿勒泰组下亚组的黑云斜长片麻岩、含角砾凝灰岩、凝灰岩 6—大理岩 7—闪长岩脉 8—花岗岩脉 9—哈巴河斜长花岗岩 10—不整合界线 11—断层 12—韧性剪切带; 13—金矿体

Fig. 2 Generalized geological map of the Tuokuzibayi gold deposit (simplified from No. 11 Geological Party, Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, 2004)

1—Quaternary; 2—Tertiary mottled clay and gravel; 3—Schist, shale, limestone, tuff and conglomerate of Middle Devonian Tuokesalei Group; 4—Tuffaceous sandstone of Middle Devonian Upper Altay Group, locally interbedded with carbonate, tuff, intermediate and acidic volcanic lava, volcanic agglomerate; 5—Biotite-plagioclase gneiss, tuff breccia and tuff of Middle Devonian Lower Altay Group; 6—Marble 7—Diorite dike;

8—Granite dike; 9—Habahe plagiogranite; 10—Unconformity; 11—Fault; 12—Ductile shear zone; 13—Gold ore body

里韧性剪切带为左行扭动。

D3 随着造山带的不断发展和抬升,韧性变形向脆-韧性变形过渡,除韧性变形特征外,还叠加脆性构造,同时发育一系列剪切裂隙系,并充填石英-硫化物脉。

D4 造山带的晚期阶段,碰撞挤压向伸展体制转换,产生张性构造,可见脆性断裂和多金属硫化物-石英脉的充填,并伴随大量的闪长岩脉的贯入。

D5 晚期叠加近东西向及北西向等多组压扭或张扭性次级断裂,以脆性活动为主。

根据剪切带中 S-C 组构特征,石英脉雁行式排列特征,石英残斑旋转方向等可判断玛尔卡库里韧性剪切带为左行走滑。

韧性剪切带中的糜棱岩有糜棱岩化千枚岩、初糜棱岩及糜棱岩。糜棱岩化岩石主要见到的是糜棱岩化绢云母千枚岩,蚀变弱。初糜棱岩主要为硅化

初糜棱岩,其中见细粒化条带(图3A),而硫化物主要为半自形他形粒状黄铁矿和磁铁矿呈浸染状分布,而灰绿色初糜棱岩含石香肠化的石英-黄铁矿-绿泥石小脉,强烈绿泥石化,含有铁氧化物矿物。糜棱岩具眼球构造,石英细脉石香肠化,S-C组构发育(图3D),长石褶曲,石英、硫化物压扁拉长,围岩中绢云母化强。其矿物组合为石英、硫化物、碳酸盐、金红石和磁铁矿、绿泥石和黑云母,硫化物主要为黄铁矿,少量黄铜矿,主要富集于脉的边部,脉中有稀疏黄铁矿和黄铜矿浸染分布,粗粒黄铁矿常碎裂,裂隙发育,黄铜矿主要呈包裹体分布于黄铁矿中或沿裂隙充填交代黄铁矿,另外偶见毒砂。

2.3 围岩蚀变

在托库孜巴依金矿区可识别出黑云母化、绿泥石化、绢云母化、白云母化、硅化、黄铁矿化、褐铁矿化等蚀变。绢云母化普遍分布于韧性走滑断层两侧,绢云母含量可达70%,绿泥石化主要分布在主矿带的上、下盘,分布广泛,硅化广泛分布,构成强韧性剪切带的核部,伴有黄铁矿化、褐铁矿化,是最直接的矿化标志,硅化有4个阶段:Q1为与细粒黄铁矿共生的压扁拉长的灰黑色石英脉;Q2为粗粒油脂光泽的白色石英脉,常与粗粒黄铁矿共生,有时见辉钼矿;Q3为与多金属硫化物共生的乳白色石英脉;Q4为与碳酸盐、少量黄铁矿共生的石英脉,另外还见面型硅化。而黄铁矿化广泛分布于韧性剪切带两侧及构造角砾岩发育地带,按其产出特征黄铁矿可分为6个阶段,除与石英脉共生的黄铁矿外,另有沉积阶段和变质阶段的黄铁矿。早期形成的贫金石英脉中及其边部常见黑云母化(图3C、3E),呈集合体出现或呈交织状分布于绿泥石化围岩中,岩芯中还观察到金矿化与绿泥石化关系较为密切(图3B、3F),金成矿可能与绿片岩相变质作用具有密切关系或暗示成矿过程中火山物质对金成矿有一定贡献。与金矿化有关的蚀变类型主要有:绿泥石化、绢云母化、硅化、黄铁矿化等。一般来说,围岩蚀变强度与韧性剪切带变形变质强度关系成正比。

2.4 矿脉群特征

托库孜巴依金矿区由I号、II号、III号、IV号矿床组成。其展布与区内控矿构造带协调一致。每个矿床实际上都是由数个到数十个脉体组成,每个矿床即为一个矿脉群(图2)。

I号矿床(矿脉群):由12个矿体(脉体)组成,以12、13、11号矿体规模较大。矿脉群断续长300m以

上,宽12m,上部为碎裂状、角砾状的大型石英脉体,向下则为脉状、网脉状的石英脉体,脉宽一般几至几十厘米。走向约为300~340°SW倾,倾角60~85°。

II号矿床(矿脉群):矿化带长约2km,宽30~80m,控制斜深250~400m。由数十个基本平行于主剪切变形带方向(310°)或与剪切带有10~15°夹角的脉状矿体组成。其中33号矿体地表出露长度为90m,经钻孔和坑道控制,延长可达320m,控制斜深已达300m。矿体形态呈向NW收敛、向SE侧伏的复杂透镜状,产状与剪切构造产状相反,即剪切带为向北陡倾,而33号矿体向SW陡倾,其夹角大致为20°。该矿体实际上由无数个左阶式剪切石英脉体组成。

III号矿床(矿脉群):长1530m,宽1270m,共发现大小金矿体41个。矿体长度一般为30~200m,平均厚度0.30~3.66m,延深10~190m,矿体均呈雁列式产出。

矿脉群的产出总体上严格受韧性剪切带控制,并且主要产于强变形带部位;宏观上矿床产出表现为等间距分段产出、集中成群(矿脉群)的特征;矿体的总体走向与区域构造带的走向基本一致,但单个矿脉的走向与区域构造带有一定的夹角,一般为10~20°,矿脉一般更偏北;剖面上,矿体(矿脉群)表现为多层富集的特点。矿体膨大部位与矿体一致向东南方向侧伏,可能与含矿构造的正向剪切和走滑的双重作用有关。

3 石英脉系特征及矿物组合

3.1 脉系类型及其特征

通过对地表、坑道、钻孔岩芯的详细观察,识别出至少8种石英脉,对应变形期的4个成矿阶段,并对其矿物组成、产状、规模及含金性进行了总结(图4),认为V4、V5、V6、V7为主要的含金脉体,特别是V6和V7为矿体的主要组成部分。脉体产出与脆-韧性剪切带中里德尔剪裂系的裂隙系统大致相对应(Roberts,1987)。根据野外观察结合室内工作,对脉系的基本特征总结如图4。

3.2 矿物组合

各种石英脉类型及其矿物组合总结在表1中,具体描述如下。

V1产于强变形带内的糜棱岩中,与糜棱岩面理平行,主要为烟灰色的结晶较差的石英组成,含有

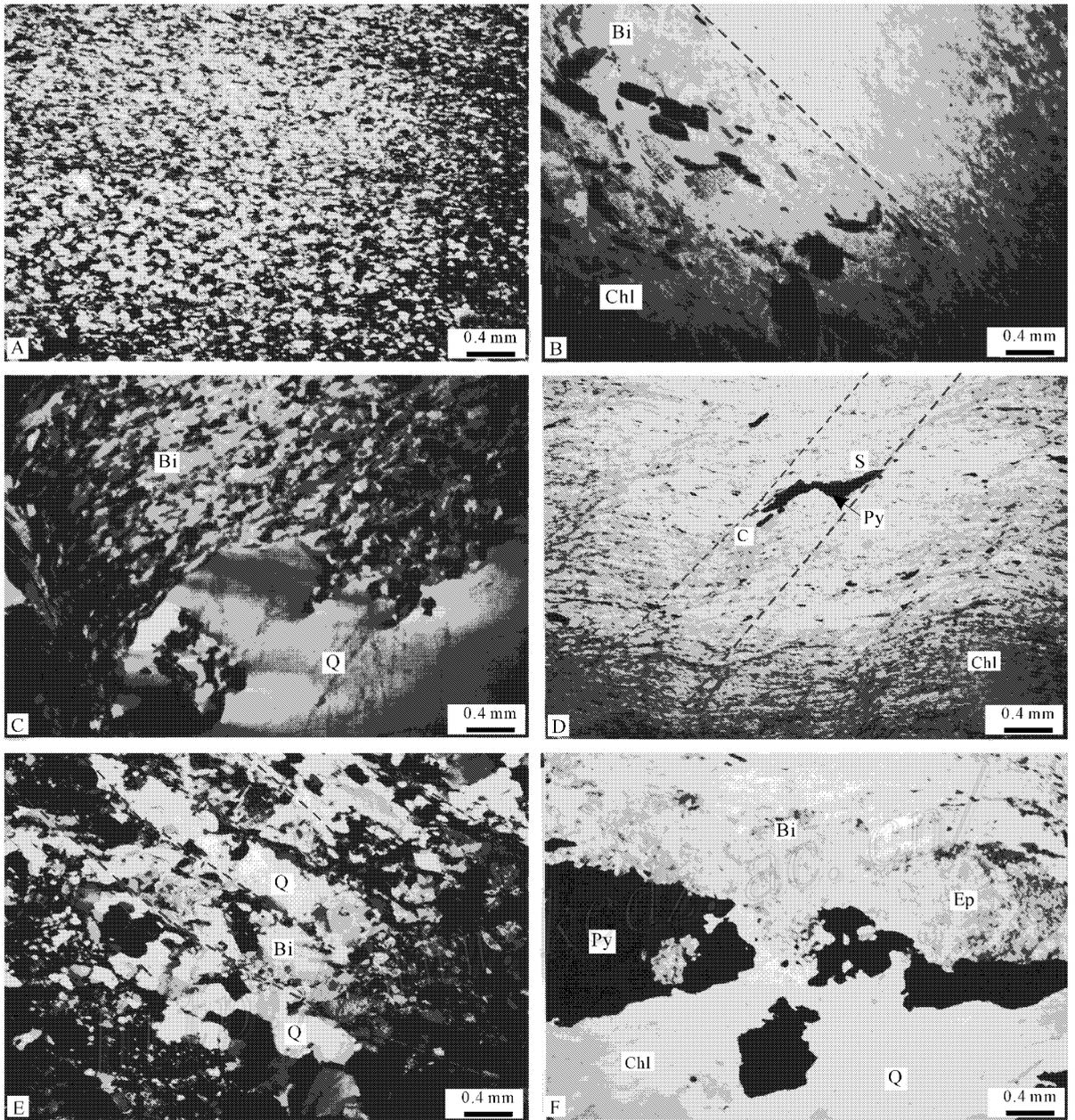


图 3 托库孜巴依金矿区变形及围岩蚀变特征

A—硅化初糜棱岩，正交光；B—糜棱岩中的绿泥石化、黑云母化，单偏光；C—石英脉中的黑云母团块，正交光；D—糜棱岩中变形黄铁矿及其 S-C 组构，单偏光；E—石英和硫化物与黑云母相间构成条带，正交光；F—石英-硫化物脉边部具黑云母化、绿帘石化及绿泥石化，而石英脉中具有较强的绿泥石化，单偏光。Q—石英，Bi—黑云母，Chl—绿泥石，Ep—绿帘石，Py—黄铁矿

Fig. 3 Photomicrographs of deformation and alterations in the Tuokuzibayi gold deposit

A—Silicified initial mylonite, crossed polar; B—Chloritization and biotitization in mylonite, plane-polarized light; C—Biotite in quartz vein, crossed polar; D—Deformed pyrite and S—C fabric in mylonite, plane-polarized light; E—Quartz, sulfide and biotite, showing banded structure, crossed polar; F—Biotitization, epidotization and chloritization on the margin of the quartz-sulfide vein, and intense chloritization in the quartz vein, plane-polarized light; Q—Quartz, Bi—Biotite, Chl—Chlorite, Ep—Epidote, Py—Pyrite

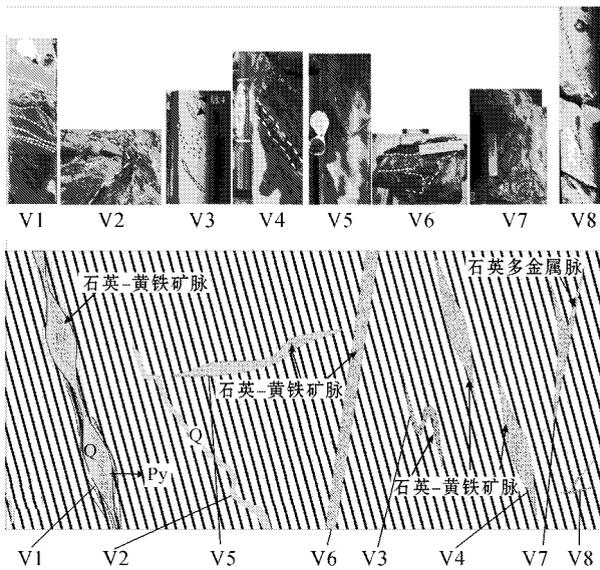


图4 托库孜巴依金矿区石英脉类型及其几何特征示意图

Fig. 4 Photographs of various quartz veins and schematic diagram of geometric characteristics of quartz vein systems in the Tuokuzibayi gold deposit

灰色石英-黄铁矿条带、石香肠化的黄铁矿-石英细脉(宽约5 mm)和磁铁石英脉(主要见于I号和III号

矿床),同时见黄铁矿压力影,浸染状细粒黄铁矿,其中常见黄铜矿或其他矿物包体,还有磁铁矿和针状矿物(铁氧化物),偶见闪锌矿、毒砂,石英脉中矿物黄铁矿为自形、半自形五角十二面体细粒黄铁矿,毒砂呈针状,偶见黄铜矿。黄铁矿裂隙中见黄铜矿,规模较小,含金性较差(图4)。

V2:一般产于强变形的糜棱岩带内,揉皱的石英脉,主要在粗粒石英粒间有钠长石、白云母、绢云母、绿泥石或黑云母与之共生,石英为它形集合体,压扁拉长,波状消光,脉中硫化物主要为黄铜矿,次为黄铁矿,常见黄铜矿交代黄铁矿,或黄铁矿裂隙中充填黄铜矿,形态较复杂,一般产于揉皱的轴部,规模较小,含金性差(图4,图5A)。

V3:揉皱为S形的白色石英脉,其中见细粒浸染状黄铁矿,有时见白云母,揉皱为S形,但其尾部与糜棱岩面理平行,一般规模较小,含金性较差,围岩为糜棱岩。在白色石英脉中常见变形石英、少量绿泥石、黑云母,绢云母较多,硫化物较少,边部还有较多的黑云母。与石英共生的硫化物主要为黄铁矿,黄铁矿常呈剪切条带分布或为碎裂状它形黄铁矿沿裂隙分布,主要表现为碎裂结构,拉长、压扁,偶见黄

表1 石英脉特征及其矿物组合

Table 1 Summary of characteristics of quartz vein systems and mineral assemblage

成矿阶段及石英脉类型	产状	形态	矿物组成	规模	含金性
成矿阶段 I					
V1	与糜棱岩面理平行	条带状、石香肠状	硅化石英、黄铁矿、磁铁矿和铁氧化物,偶见闪锌矿、毒砂	小脉	低品位
V2	一般产于揉皱的轴部	形态较复杂,一般为揉皱的石英脉	石英、钠长石、白云母、绢云母、绿泥石或黑云母与之共生,石英压扁拉长、波状消光,黄铁矿,少量黄铜矿	小脉	低品位
V3	揉皱为S形,但其尾部与糜棱岩面理平行	S形	变形石英、绢云母,少量绿泥石、黑云母,具碎裂结构,拉长、压扁变形黄铁矿	小脉	低品位
成矿阶段 II					
V4	长轴与糜棱岩面理平行或小角度相交	透镜体,	石英、黄铁矿、少量黄铜矿、磁铁矿	大脉	达品位
V5	与糜棱岩面理大角度相交	透镜状	石英、粗粒的黄铁矿、少量闪锌矿	小脉	达品位
V6	小角度与糜棱岩面理相交	脉状	石英、黑云母、绿泥石、少量绢云母、黄铁矿、少量黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、辉钼矿及自然金	大脉	主要矿体
成矿阶段 III					
V7	与糜棱岩面理相交,	脉状	石英,少量绿泥石、黑云母及黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、黄铁矿	大脉	主要矿体
成矿阶段 IV					
V8	为裂隙充填的石英细脉及网脉	脉状、网脉状	石英、方解石及少量黄铁矿	小脉	无品位

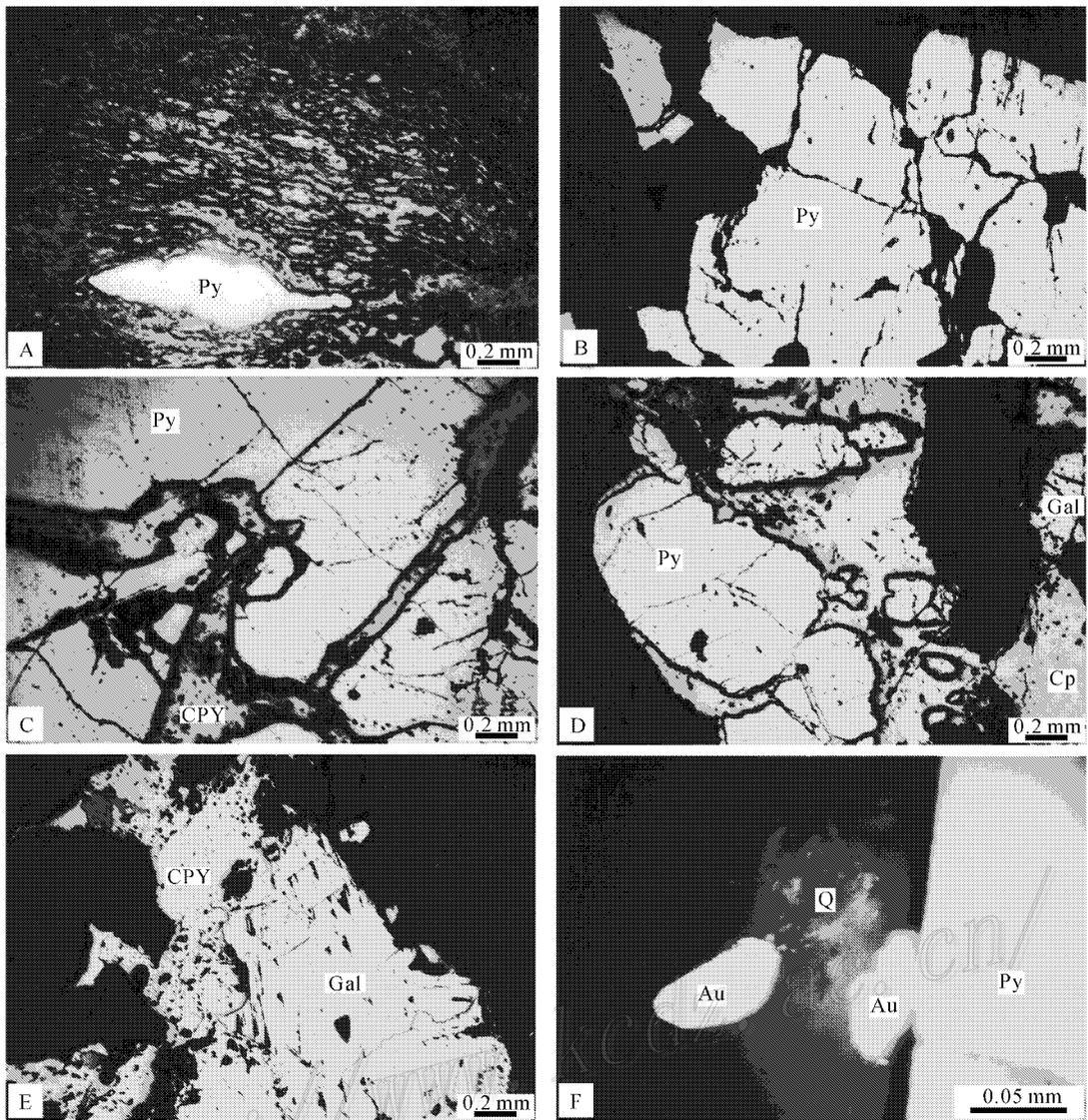


图 5 托库孜巴依金矿区各种脉系及糜棱岩中硫化物特征

A—糜棱岩中变形的黄铁矿 ;B—石英脉中黄铁矿 ,裂隙发育 ;V5 ;C—碎裂黄铁矿裂隙中充填黄铜矿 ,V6 ;D—碎裂黄铁矿被黄铜矿充填交代 ,V7 ;E—石英脉中黄铜矿交代方铅矿 ,V7 ;F—石英黄铁矿脉中的自然金 ,V6 Q—石英 ,Py—黄铁矿 ,Cpy—黄铜矿 ,Gal—方铅矿 ,Au—自然金

Fig. 5 Photomicrographs of various quartz veins and sulfides in mylonite from the Tuokuzibayi gold deposit

A—Deformed pyrite in mylonite ;B—Pyrite in quartz vein ,well developed fissures within pyrite from V5 ;C—Chalcopyrite in fissures of cracked pyrite from V6 ;D—Cracked pyrite replaced by chalcopyrite from V7 ;E—Galena replaced by chalcopyrite in the quartz vein from V7 ;F—Native gold in the quartz—pyrite vein from V6 ;Q—Quartz ;Py—Pyrite ;Cpy—Chalcopyrite ;Gal—Galena ;Au—Native gold

铜矿 ,表明剪切作用强烈 ,而围岩中的黄铁矿具拉丝构造 (图 4)。

V4 乳白色石英脉 ,其中见浸染状黄铁矿 ,为较大的透镜体 ,长轴与糜棱岩面理平行或小角度相交 ,其规模一般较大 ,含金可达边界品位 ,产于硫化黄铁矿化糜棱岩中 (图 4) ,脉中硫化物主要为浸染状黄铁矿 ,见少量黄铜矿 ,黄铁矿主要为他形 ,其中含有黄铜矿或其他矿物的包体 ,黄铁矿裂隙中可见黄铜矿

充填 ,多沿线理分布 ,石英脉边部见较多磁铁矿。

V5 灰白色石英脉中含中粗粒的黄铁矿 ,主要穿插于硅化糜棱岩中 ,其与糜棱岩面理大角度相交产出 ,一般规模较小 ,但含金可达边界品位 ,脉中的硫化物主要为浸染状半自形-自形粗粒黄铁矿 ,常碎裂 ,可见少量闪锌矿 (图 4、图 5B)。

V6 乳白色石英-硫化物脉 ,主要有黄铁矿-石英脉、黄铁矿-辉钼矿-石英脉、石英-自然金-硫化物脉

和角砾状黄铁矿石英脉,石英脉边部有黑云母和绿泥石化,脉中有绢云母细脉穿插,并见浸染状硫化物分布。其中含粗粒他形粒状黄铁矿集合体,黄铁矿碎裂,其边部被黄铜矿交代,另见少量斑铜矿和辉铜矿。黄铁矿,含有较多的矿物包裹体,如黄铜矿+方铅矿集合体、方铅矿和方铅矿+斑铜矿集合体包裹体。石英脉中还可见细粒黄铁矿细脉穿插,黄铜矿中有方铅矿被交代的残余。在石英中可见自然金5粒,大小0.008~0.05 mm,为圆粒状、长粒状。有时见片状辉钼矿集合体分布于石英脉中。该类脉小角度与糜棱岩面理相交,一般规模较大,最厚可达4~5 m,是矿区内的主要含金石英脉型工业矿体(图4,图5C、5F)。

V7:白色石英-多金属硫化物脉,常见的有黄铁矿-黄铜矿-闪锌矿-石英脉、黄铜矿-黄铁矿-石英脉、黄铜矿-方铅矿-闪锌矿-黄铁矿-石英脉、石英-方铅矿-黄铜矿细脉、角砾状乳白色黄铁矿-方铅矿-黄铜矿化石英脉,与糜棱岩面理相交,其规模常较大,构成矿区内的主要矿体。其围岩主要为糜棱岩和变砂岩,为脆性裂隙中充填的石英多金属脉,石英脉主要为石英,少量绿泥石、黑云母及硫化物。脉中的硫化物主要为方铅矿、黄铜矿、黄铁矿、闪锌矿,方铅矿与黄铜矿、闪锌矿常共生,可见方铅矿交代黄铁矿,黄铜矿交代方铅矿,主要沿边部和裂隙交代,粗粒黄铁矿的裂隙极发育,黄铜矿+方铅矿常沿裂隙充填并交代黄铁矿,闪锌矿交代黄铜矿或与之共生,常见黄铜矿交代黄铁矿,黄铁矿裂隙中常充填有黄铜矿,裂隙中可见雁列脉(图4,图5D、5E)。

V8:白色石英脉及灰白色含黄铁矿石英-碳酸盐脉,为裂隙充填,规模较小,不含金,系成矿最晚期的产物,脉中含少量黄铁矿。

3.3 成矿阶段

按矿物建造序列、蚀变组合和穿插关系等一系列地质特征,在托库孜巴依金矿区可以初步划分出6个世代的黄铁矿,2个世代黄铜矿,4个世代的石英脉,相应地,可识别3个成矿期。3个成矿期分别为沉积期、变质期和变形期,而变形变质期又可分为4个阶段(图6)。

4 同位素地球化学

4.1 氢、氧同位素

为了了解成矿演化过程中的流体性质,笔者对

矿物	沉积期	变质期	变形变质期			
			阶段1	阶段2	阶段3	阶段4
石英						
钠长石						
绿泥石						
绿帘石						
黑云母						
白云母						
绢云母						
方解石						
磁铁矿						
金红石						
毒砂						
黄铁矿						
黄铜矿						
方铅矿						
闪锌矿						
自然金						
碲金银矿						

图6 托库孜巴依金矿区成矿阶段及其矿物组合

Fig. 6 Diagram showing mineralogical compositions of sedimentary, metamorphic and hydrothermal assemblages in the Tuokuzibayi gold deposit

托库孜巴依金矿床的H、O同位素进行了研究。样品测试由中科院地质与地球物理研究所岩石圈构造演化国家重点实验室稳定同位素实验室完成,使用质谱型号为Finnigan MT252,石英的氧同位素分析方法用BrF5法(Clayton et al., 1963),氢同位素分析方法用锌还原法(Coleman et al., 1982),分析结果见表2,流体中水的氧同位素根据Clayton等(1972)的分馏方程计算,计算温度采用芮行建(1993)程忠富(1996)的包裹体测温结果。从表中可以看出,成矿流体的 $\delta^{18}O_K$ 变化于 $-0.26\text{‰} \pm 6.12\text{‰}$ 之间,在阶段1,为 $4.99\text{‰} \sim 6.12\text{‰}$,均值为 5.72‰ ,阶段2为 $1.22\text{‰} \sim 2.80\text{‰}$,均值为 2.01‰ ,阶段3为 $0.78\text{‰} \sim 1.41\text{‰}$,均值为 1.11‰ ,阶段4为 $-0.26\text{‰} \sim 1.72\text{‰}$,均值为 0.73‰ (图7、图8)。而石英包裹体水的 δD_K 值变化于 $-78.96\text{‰} \sim -90.48\text{‰}$,大多数集中分布在 $-80\text{‰} \sim -90\text{‰}$ 的范围内,在阶段1的 δD_K 值变化于 $-86.76\text{‰} \sim -90.48\text{‰}$ 之间,均值为 -88.58‰ ,阶段2的 δD_K 值变化于 $-78.96\text{‰} \sim -87.79\text{‰}$ 之间,均值为 -83.92‰ ,阶段3的 δD_K 值变化于 $-85.00\text{‰} \sim -87.86\text{‰}$ 之间,均值为 -87.76‰ ,阶段4的 δD_K 值变化于 $-85.02\text{‰} \sim -89.96\text{‰}$ 之间,均值为 -87.49‰ 。

4.2 硫、铅同位素

表 2 托库孜巴依金矿各种脉系、各成矿阶段成矿流体氢氧同位素测定结果

Table 2 Hydrogen and oxygen isotope determinations of mineral separates and inclusion fluids from various quartz veins and ore-forming stages from the Tuokuzibayi gold deposit

样品编号	脉系	成矿阶段	$\delta^{18}\text{O}_{\text{石英}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{流体}}/\text{‰}$	$\delta\text{D}_{\text{水}}/\text{‰}$
T11ZK1507-136.82	V1	I	12.91	6.12	-90.48
T11ZK306-384.5	V1	I	12.87	6.08	-88.57
T11ZK306-510	V2	I	11.78	4.99	-86.76
T11ZK006-394	V2	I	12.25	5.46	-87.94
T11ZK707-253	V2	I	12.72	5.93	-89.15
T11ZK306-423	V4	II	11.18	1.84	-86.08
T11ZK006-217	V5	II	11.68	2.34	-85.06
T11ZK1507-130.42	V6	II	12.14	2.80	-86.33
T11ZK006-283.6	V6	II	10.56	1.22	-78.96
T11KD-7	V6	II	11.91	2.57	-87.79
T11KD-7(1)	V6	II	10.80	1.46	-79.28
T11ZK006-115	V7	III	12.32	1.41	-87.43
T11KD-6	V7	III	11.69	0.78	-85.00
T11ZK707-262.8	V7	III	12.05	1.14	-87.86
T11ZK708-83	V8	IV	11.01	-0.26	-85.02
T11ZK2304-247	V8	IV	12.99	1.72	-89.96

数据均为相对国际标准 SMOW 之值,使用质谱型号为 MAT-252,中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈构造演化国家重点实验室测试。流体包裹体中氧同位素根据 Clayton(1972)的公式 $1000\ln\alpha = 3.38(10^6/T^2) - 3.4$ 从石英氧同位素计算出来,温度资料据芮行建(1994)程忠富(1996)。

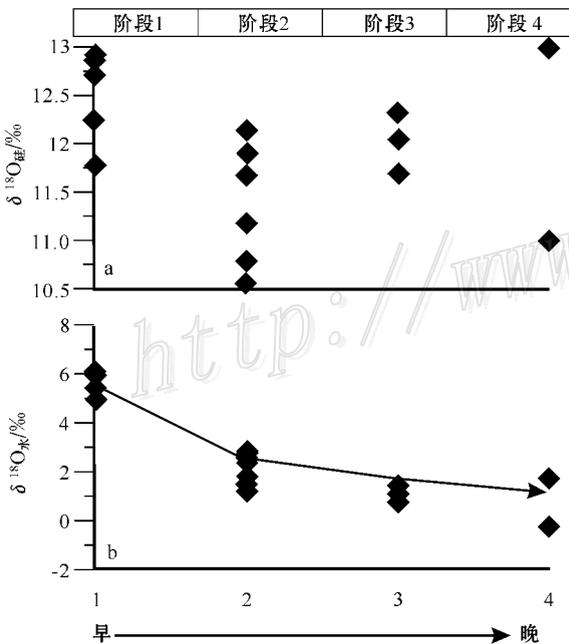


图 7 托库孜巴依金矿各成矿阶段氧同位素变异图

Fig. 7 $\delta^{18}\text{O}$ variation diagram of minerals (a) and calculated equilibrium waters (b) at various ore-forming stages of the Tuokuzibayi gold deposit

虽然前人(芮行建,1993;程忠富,1996)对托库孜巴依金矿进行了硫同位素研究,但为了系统研究托库孜巴依金矿的成矿物质来源,笔者进行了硫、铅

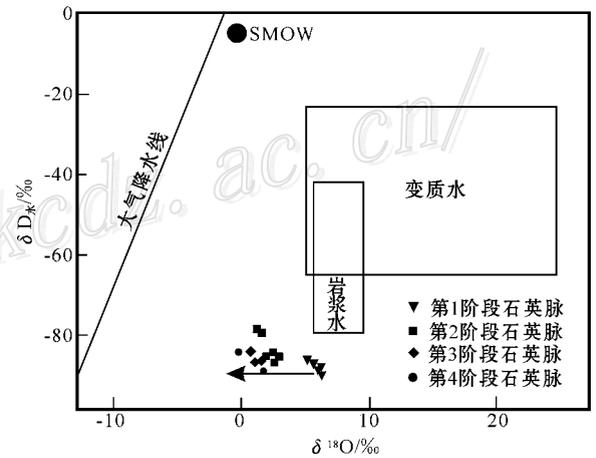


图 8 托库孜巴依金矿区各成矿阶段成矿流体的 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ 同位素组成图解

Fig. 8 $\delta^{18}\text{O}$ versus δD plot of fluids responsible for different ore-forming stages of the Tuokuzibayi gold deposit

同位素测试。金属硫化物的 S 同位素样品分析由中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈构造演化国家重点实验室稳定同位素实验室完成,使用质谱型号为 Delta-S,数据均为相对国际标准 CDT 之值,精度好于 $\pm 0.2\text{‰}$,其结果见表(表 3)。从表中可知,总体上,硫同位素值变化于 $-2.71\text{‰} \sim 5.6\text{‰}$ 之间,均

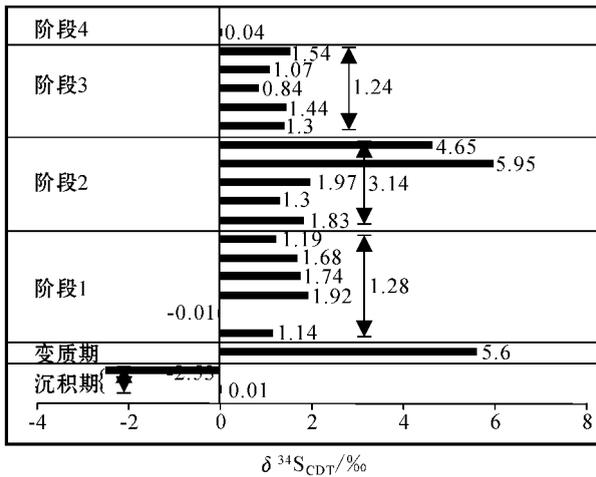


图9 托库孜巴依金矿各成矿阶段硫同位素组成

Fig. 9 Histogram showing $\delta^{34}\text{S}$ values of the Tuokuzibayi gold deposit, showing different ranges at different stages

表3 托库孜巴依金矿硫同位素组成测定结果

Table 3 Sulfur isotope compositions of the Tuokuzibayi gold deposit

样品编号	成矿(期)阶段	赋存脉系及围岩	测试矿物	$\delta^{34}\text{S}$ /‰
THZK707-156.5	沉积期	围岩	黄铁矿	-2.71
THZK1507-135.2	沉积期	围岩	黄铁矿	0.01
THZK1507-256.32	沉积期	围岩	黄铜矿	-2.53
TH465-SSCM	变质期	围岩	黄铁矿	5.60
THZK1507-270	I	V1	黄铁矿	1.14
THZK1507-136.82	I	V1	黄铁矿	-0.01
THZK306-510	I	V2	黄铁矿	1.92
THZK707-253	I	V2	黄铁矿	1.74
THZK006-394	I	V2	黄铁矿	1.68
THZK006-208	I	V3	黄铁矿	1.19
THZK306-423	II	V4	黄铁矿	1.83
THZK006-217	II	V5	黄铁矿	1.30
THZK006-283.6	II	V6	黄铁矿	1.97
THKD-7-1	II	V6	黄铁矿	5.95
THKD-7-2	II	V6	黄铜矿	4.65
THKD-6-1	III	V7	黄铁矿	1.30
THKD-6-2	III	V7	黄铜矿	1.44
THKD-6-3	III	V7	方铅矿	0.84
THKD-6-4	III	V7	闪锌矿	1.07
THZK707-262.8	III	V7	黄铁矿	1.54
THZK708-83	IV	V8	黄铁矿	0.04

数据均为相对国际标准 CDT 之值,使用质谱型号:Delta-S,中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈构造演化国家重点实验室稳定同位素实验室测试。

值为 1.43‰;而从各成矿阶段、各世代硫化物的硫同位素值来看(图9),与沉积期有关的硫化物硫同位素值显示 0.01‰ ~ -2.71‰ 的变化范围,均值为

-1.74‰,变质期的硫同位素值迅速增高到 5.60‰,而在变形阶段的硫同位素变化呈幕式变化,阶段1的硫同位素值变化于 -0.01‰ ~ 1.92‰ 之间,均值为 1.28‰,阶段2的硫同位素值为 1.3‰ ~ 5.95‰,均值为 3.14‰,阶段3的硫同位素值为 0.84‰ ~ 1.54‰,均值为 1.24‰,阶段4的硫同位素值为 0.04‰。

金属硫化物及全岩的铅同位素分析由中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈构造演化国家重点实验室稳定同位素实验室完成,使用质谱型号为 MT252,测定结果见表4及图10。

5 Ar-Ar 年代学

为了进一步探讨韧性变形与金成矿的关系,挑选了韧性变形过程中形成的黑云母进行了 Ar-Ar 年

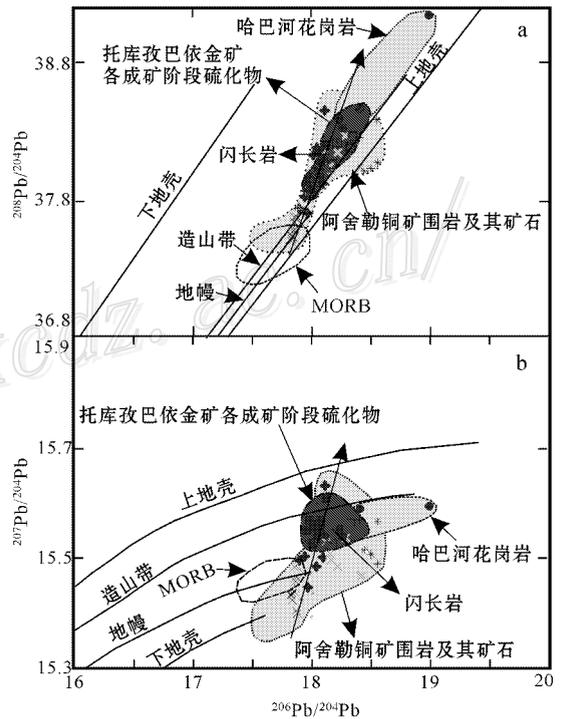


图10 托库孜巴依金矿铅同位素组成(阿舍勒铜矿围岩及矿石数据据李华芹等,1998)

Fig. 10 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs. $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (a) and $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs. $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (b) diagrams showing the relations of the Pb-isotope compositions at the Tuokuzibayi gold deposit and the evolution curves of the upper crust (UC), lower crust (LC), orogene (O) and mantle (M), based on the plumbotectonic model of Zartman and Doe (1981). Data on the VMS Ashele Cu-Zn deposit from Li et al., 1998

表 4 托库孜巴依金矿 Pb 同位素组成测定结果

Table 4 Lead isotope compositions of the Tuokuzibayi gold deposit

样品编号	成矿阶段	岩性或脉系	测试对象	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb
T II ZK707-156.5		糜棱岩(围岩)	黄铁矿	18.0432	15.5626	38.0217
T II ZK1807-256.32		糜棱岩(围岩)	黄铜矿	18.4458	15.5466	38.4515
T II 465-5SCM		糜棱岩(围岩)	黄铁矿	18.1335	15.5242	38.0175
T II ZK1507-270	I	V1	黄铁矿	18.2187	15.5548	38.2137
T II ZK1507-136.82	I	V1	黄铁矿	18.1776	15.5261	38.0589
T II ZK306-384.5	I	V1	黄铁矿	18.0278	15.5547	37.9583
T II ZK306-510	I	V2	黄铁矿	18.3532	15.5380	38.2641
T II ZK707-253	I	V2	黄铁矿	17.9797	15.5234	37.8476
T II ZK006-394	I	V2	黄铁矿	18.0520	15.5356	37.9298
T II ZK006-208	I	V3	黄铁矿	18.3297	15.5629	38.1803
T II ZK306-423	II	V4	黄铁矿	18.0003	15.5266	37.8838
T II ZK006-217	II	V5	黄铁矿	18.0793	15.5691	38.0708
T II ZK006-283.6	II	V6	黄铁矿	18.0595	15.5588	38.0145
T II KD-7-1	II	V6	黄铁矿	18.1236	15.6070	38.1989
T II KD-7-2	II	V6	黄铜矿	18.0751	15.5434	37.9963
T II KD-1-1	III	V7	黄铁矿	17.9804	15.5682	37.9530
T II KD-1-2	III	V7	黄铜矿	17.9666	15.5501	37.8954
T II ZK707-262.8	III	V7	黄铁矿	18.0256	15.5491	37.9450
T II ZK708-83	IV	V8	黄铁矿	18.1558	15.5537	38.1290
SCY5		闪长岩	全岩	18.1611	15.5278	38.0685
HG1		花岗岩	全岩	18.9958	15.5937	39.1451

质谱仪型号: MT252, 中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈构造演化国家重点实验室稳定同位素实验室测试。

龄测定。样品来自 ZK006-394 m 处的含黑云母集合体的白色石英脉,石英脉的边部有大量黑云母,少量绿泥石,偶见绢云母,石英为他形粒状集合体,其中有稀疏硫化物分布。根据脉的矿物组合、石英波状消光、黑云母定向排列等变形特征应归为第二种脉型(V2),第 1 成矿阶段,代表韧性变形的产物。样品

处理及分析方法见有关文献(王非等,2005)。所获得坪年龄为(269.94 ± 2.54)Ma,反等时线年龄为(269.38 ± 2.63)Ma(图 11)。关于金矿的形成时代,前人曾做过较多工作。根据芮行健(1993)、程忠富(1996)对含矿蚀变岩中的黑云母和白云母进行的 K-Ar 法的测年结果为(294.7 ± 3.5)Ma~(316.5 ±

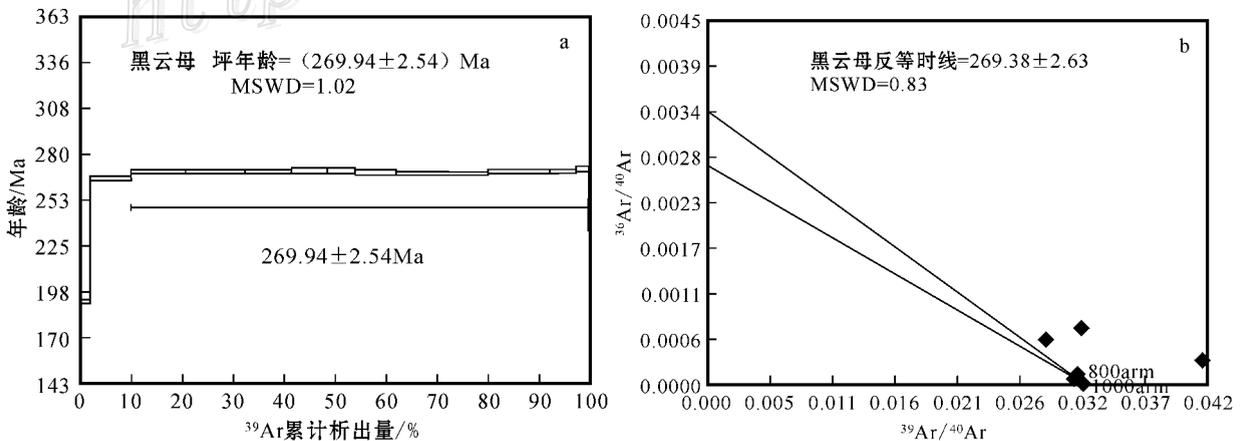


图 11 玛尔卡库里韧性剪切带 Ar-Ar 年龄图

Fig. 11 ⁴⁰Ar/³⁹Ar biotite age spectra, indicating age plateaus (a) and inverse isochron (b) plots for biotite from the Ma'erkakuli ductile shear zone

3.2)Ma,含蚀变闪长岩中白云母 K-Ar 年龄为 $(294.7 \pm 3.5) \text{Ma}$ 。而矿区北部的哈巴河花岗岩(李华芹等,1998)的年龄为 $(282 \pm 18) \text{Ma}$,花岗岩体中含金石英脉年龄为 272 Ma,I 和 II 号矿床中含金石英脉年龄为 296~305 Ma,他们认为托库孜巴依金矿成矿时代应大致为 294~316 Ma,相当于华力西中期。李华芹等(1998)获得产于泥盆系地层中含金石英细脉流体包裹体 Rb-Sr 等时线年龄为 $(294 \pm 14) \text{Ma}$,灰白色含金石英大脉流体包裹体 Rb-Sr 等时线年龄为 $(305.6 \pm 7.0) \text{Ma}$,哈巴河斜长花岗岩体边缘部片理化带中的含金石英脉包裹体 Rb-Sr 等时线年龄为 $(272 \pm 19) \text{Ma}$ 。闫升好等(2004)利用 Ar-Ar 法对多纳拉萨依金矿和托库孜巴依金矿的含金构造岩中云母矿物(白云母和绢云母)进行了年龄测定,结果显示其同位素年龄相应为 289.2 Ma 和 293.1 Ma。而在额尔齐斯成矿构造带东段的科克萨依和阿拉塔斯金矿含金剪切带所获得的绢云母 Ar-Ar 年龄分别为 $(274.5 \pm 2.2) \text{Ma}$ 和 $(282.6 \pm 2.2) \text{Ma}$ (闫升好等,2006)。在境外的哈萨克斯坦,沿额尔齐斯主断裂获得的云母类 Ar-Ar 年代学显示其年龄差异不大,平均为 280 Ma(Vladimirov et al.,1998),Buslov 等认为该年龄反映断裂带左形走滑的变形年龄,Travin 等(2001)所做的变余糜棱岩和片麻岩的黑云母、白云母、角闪石和阳起石 Ar-Ar 年龄揭示有两幕的左行走滑变形,对应于 283~276 Ma 和 273~265 Ma。而从上述结果可以看出,本区内的年龄数据对应于上述两幕变形事件,因此,该矿床的形成可能有两个成矿事件,分别发生在 290 Ma 左右和 270 Ma 左右。

6 讨论

6.1 构造-成矿演化阶段

根据详细的野外地质观察和室内综合研究,变形期可划分为 4 个成矿阶段,其主要特征为:

(1) 韧性变形阶段:在韧性变形阶段,形成 V1 和 V2 及其与之共生的硫化物、绢云母、黑云母和绿泥石,同时还有部分磁铁矿、金红石等,该矿化阶段在各矿床均有表现,但其中的磁铁矿明显早于硫化物,并在一号矿床和三号矿床中分布较广;

(2) 脆-韧性变形阶段:韧性剪切带的进一步发展,使其抬升到脆-韧性变形域,并伴随卡尔玛库里变形带的左行走滑,形成一系列的剪-张裂隙,同时

充填石英脉,形成如 V4、V5、V6 这样的石英-硫化物脉,主要的矿物组合是石英、粗粒黄铁矿、自然金,有时见辉钼矿,这一阶段是金成矿的主要阶段;

(3) 左行走滑向伸展体制转换阶段:在造山带发展的晚期由于由左行走滑向伸展体制转换,伴随大量闪长岩脉沿剪切带的构造薄弱部位侵入,形成石英-多金属脉,主要的矿物组合是黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿和石英等,该阶段的脉系含金较好,构成了本矿床的主要矿体;

(4) 脆性断裂发育阶段:该阶段主要是发育脆性断裂裂隙,其中充填白色石英-碳酸盐脉,含少量硫化物,基本不含金。

6.2 成矿流体演化

芮行建等(1993)、程忠富等(1996)对托库孜巴依金矿进行了流体包裹体的初步研究表明,该矿床包裹体以气液包裹体为主,另有气相、纯液相和含 CO_2 多相包裹体,包裹体大小一般为 4~10 μm 。石英脉中包裹体均一温度在 200~320 $^{\circ}\text{C}$ 之间,平均为 250 $^{\circ}\text{C}$ 左右,属中温热液矿床。成矿流体的盐度 $\omega(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 均小于 10%,其变化范围为 6%~9.34%,平均为 7.62%,为低盐度流体,而且从成矿早阶段到晚阶段盐度依次下降,可能反映了大气水的参与程度增加。氢、氧同位素分析结果表明,在矿化的早阶段,大多数样品 $\delta^{18}\text{O}$ 集中于 5‰~6‰ 的范围内,而在主成矿阶段大多数样品为 1‰~2‰。石英包裹体水的 $\delta\text{D}_{\text{水}}$ 值变化于 -78.96‰~-90.48‰,大多数集中分布在 -80‰~-90‰ 的范围内。在 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ 组成图解(图 8)上,成矿作用中成矿流体从早期的变质水和岩浆水向以大气水为主的方向演化,说明在成矿早期可能以变质水和部分岩浆水为主,而且氧同位素从早期阶段的 5‰~6‰ 突变到中晚期阶段的 1‰~2‰,表明在韧性变形阶段,流体流动以沟渠式流动为主,而在成矿的中晚期阶段由于韧性剪切带的抬升,主要是加热大气水沿剪切带渗透参与了成矿,流体流动以渗透为主。

6.3 成矿过程中的物质来源

托库孜巴依金矿硫同位素值变化于 -2.71‰~-5.6‰ 之间,均值为 1.43‰;其中与沉积期有关的硫化物硫同位素值显示 0~-2.71‰ 的变化范围,均值为 -1.74‰,表明在沉积期硫主要来自硫酸盐的还原作用,而在变质期的硫同位素值迅速增高到 5.60‰,可能与变质过程中的热液活动有关;在变形阶段的硫同位素呈幕式变化,在阶段 1 的硫同位素

值变化于 -0.01% ~ 1.92% 之间,均值为 1.28% ,阶段 2 的硫同位素值为 1.3% ~ 5.95% ,均值为 3.14% ,阶段 3 的硫同位素值为 0.84% ~ 1.54% ,均值为 1.24% ,阶段 4 的硫同位素值为 0.04% (图 9)。上述结果表明在成矿的早期阶段有海水的参与,到变质变形期的成矿其硫主要来自于深源硫。铅同位素分析结果显示源于造山带和上地幔之间,并向造山带演化,且与阿舍勒铜矿的围岩和矿石有一定的成因联系,说明阿舍勒组的火山作用对成矿有一定的贡献(图 10)。氢、氧同位素研究表明,在成矿早期可能以变质水为主,而在成矿的晚期阶段,主要是加热大气水沿剪切带渗透参与了成矿。

6.4 成矿演化序列及其构造背景

综上所述,托库孜巴依金矿的成矿作用可分为以下 3 个主要成矿期:

(1) 沉积期:成矿预富集期,在含火山碎屑物质的杂砂岩建造中形成自形、半自形的浸染状黄铁矿和他形浸染状黄铜矿,在这一时期不形成具工业意义的矿体。

(2) 变质期:该区内围岩经历了绿片岩相的变质作用,在此过程中可形成细粒浸染状的黄铁矿和白色石英脉,但含金性较差。

(3) 变形变质期:主要的金成矿作用与韧性剪切带的进一步发展、抬升到脆-韧性域所形成的脆-韧性变形及造山晚期的走滑向伸展构造体制转换有关:

a 韧性变形阶段,形成 V1 和 V2 及其与之共生的硫化物、绢云母、黑云母和绿泥石,同时还有部分磁铁矿等;

b 韧性剪切带的进一步发展,使其抬升到脆-韧性变形域,并伴随玛尔卡库里变形带的左行走滑,形成一系列的剪-张裂隙,同时充填石英脉,形成如 V4、V5、V6 这样的石英-硫化物脉,主要的矿物组合是石英、粗粒黄铁矿,有时见辉钼矿,这一阶段是金成矿的主要阶段;

c 在造山带发展的晚期由于由走滑向伸展体制转换,伴随大量闪长岩脉沿剪切带的构造薄弱部位侵入,形成石英-多金属脉,主要的矿物组合是黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿和石英等,该阶段的脉系含金较好,构成了本矿床的主要矿体;

d 而到晚期阶段主要是发育脆性断裂裂隙,其中充填白色石英-碳酸盐脉,含少量硫化物,基本不含金。

因此,托库孜巴依金矿的形成经历了复杂的构

造-成矿演化历史,其形成与阿尔泰山造山带的演化密切相关,主要的成矿事件发生在造山期后的左行走滑及其向伸展体制的构造转换期。本区两个主要的成矿事件是:①与脆-韧性剪切作用有关的含金黄铁矿-石英脉,②与走滑-伸展转换体制有关的含金多金属-石英脉。图 12 总结了该矿床的成矿演化序列,并总结了该矿床的成矿演化及其相关地质事件,并与造山作用各阶段相耦合。

6.5 勘查意义

从区域上看,额尔齐斯成矿构造带存在两期金成矿作用:第一期同位素年龄为 $290\sim 300$ Ma 左右,与区域性的正向挤压脆韧性剪切构造活动有关;第二期年龄为 $250\sim 270$ Ma 左右,成矿与左行走滑及其向伸展体制转换和叠加其上的岩浆热液作用有关,如托库孜巴依金矿区闪长岩脉的侵入。从区域岩浆作用看,蚀变矿化闪长岩脉和浅变质碎屑岩(千枚岩+灰岩)一同发生塑变褶曲,说明成矿前有一次以中酸性岩脉为代表的岩浆活动,成矿期或稍后又有一次中酸性岩脉为代表的岩浆侵入作用。从控矿构造演化看,区内金矿床虽然宏观上受深层次韧性剪切带控制,但金矿体主要定位于剪切带内张性断裂、里德尔剪切裂隙、构造破碎带等浅层次脆性构造中(程忠富等,1996;李志纯,1999;刘悟辉等,1999),前者一般形成于 $10\sim 20$ km 的地壳深部,后者形成于 < 5 km 的地壳浅部。而阿尔泰山南缘几乎所有的金矿床成矿深度均小于 2 km(芮行健等,1993)。因此,韧性构造和脆性构造叠加并存于同一构造带内的地质事实说明,成矿-控矿剪切带经历了从深部构造层次到浅部构造层次的抬升过程。因此,在额尔齐斯成矿构造带,韧性剪切变形抬升到脆-韧性剪切变形域可能是形成大型金矿床的必要条件之一。沿额尔齐斯构造带从西到东,几乎都发育大量呈构造透镜体或石香肠状顺片理化带产出的不含矿或含矿较差的石英脉,但其只有矿化显示,不构成具工业意义的矿体,如青河地区,可能正是由于缺乏脆-韧性变形和造山晚期的伸展构造叠加。托库孜巴依金矿区所揭示的成矿-控矿构造演化及其构造-岩浆热事件显示,形成大型金矿的必要条件之一是成矿-控矿构造要有长期复杂的演化史,并且要有岩浆作用的叠加。引伸到分析额尔齐斯成矿构造带的金成矿潜力方面,详细分析成矿构造演化、厘清构造演化的各个阶段是进行成矿预测的关键,对于区域勘查选区具有重要意义。

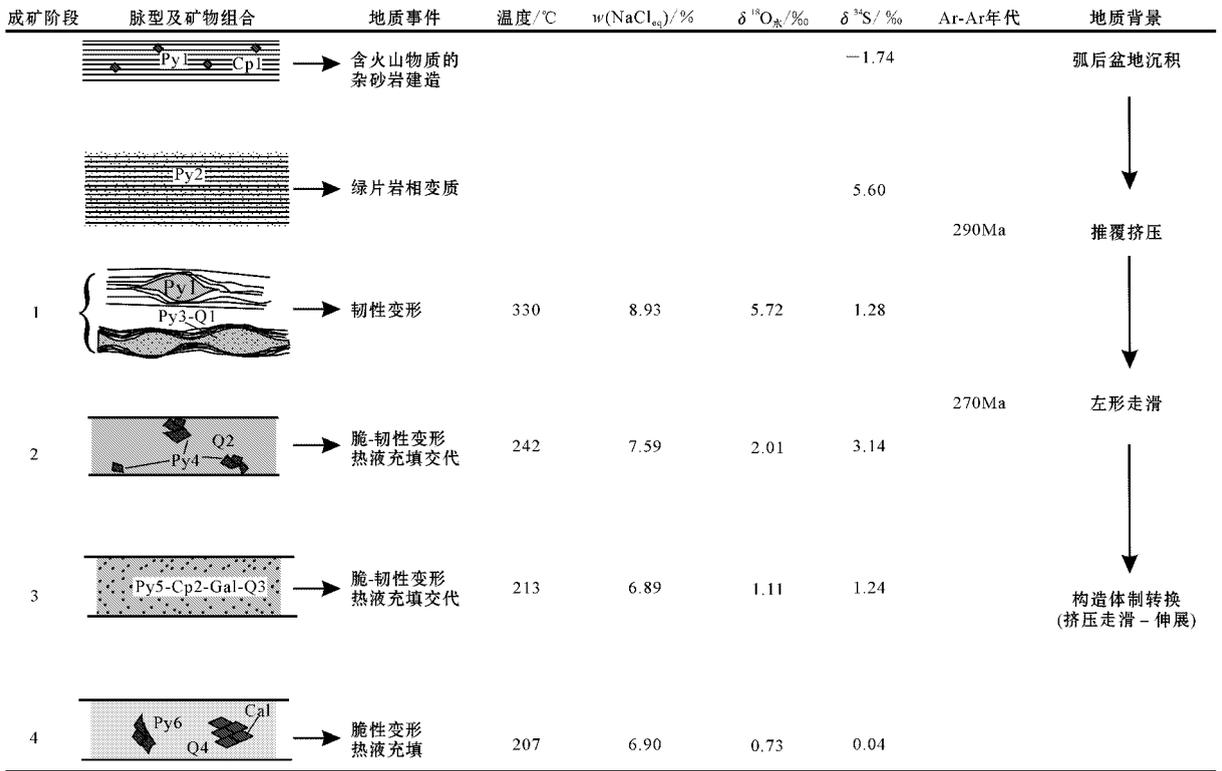


图 12 托库孜巴依金矿成矿演化序列图(温度和盐度数据引自芮行健等,1993;290 Ma 的 Ar-Ar 年龄数据引自闫升好等,2004)

Fig. 12 Diagram of metallogenetic evolution sequences in the Tuokuzibayi gold deposit. Temperature and salinity for every mineralization stage from Rui et al., 1993; Ar-Ar age at 290Ma from Yan et al., 2004

致谢 野外工作期间得到新疆 305 项目办公室王宝林主任、李月臣副主任及潘成泽处长等同志的大力支持和热心帮助,同时还得到了新疆地矿局第十一地质大队的陈祖国队长、郭新成总工等同志的大力协助,深表感谢!还要特别感谢审稿人徐兴旺博士对初稿认真细致的审阅,并提出了许多建设性的修改意见。

References

- Buslova M M, Watanabe T, Fujiwarab Y, Iwatab K, Smirnovaa L V, Safonovaa I Y, Semakova N N and Kiryanovaa AP. 2004. Late Paleozoic faults of the Altai region, Central Asia: tectonic pattern and model of formation[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23: 655~671.
- Chen H Y, Chen Y J and Liu Y L. 2000. Metallogeny of the Ertys gold mineralization belt and its relation to the Central Asia orogeny [J]. *Science in China (Series D)*, 30(Supp.): 38~44 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Z F and Rui X J. 1996. Minerogenetic characteristics of Saidu gold deposit in Habahe county[J]. *Xinjiang Geology*, 14(3): 247~254 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Z F and Rui X J. 1997. Ore-forming geochemical environments of saidu gold deposit in Habahe, Xinjiang[J]. *Volcanology & Mineral Resource*, 18: 27~36 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Z F, Dong Y G and Rui X J. 2002. Geological and geochemical characteristics of the main gold deposits in Xinjiang[J]. *Volcanology & Mineral Resource* 23(1): 41~51 (in Chinese with English abstract).
- Chen Y J, Fu S G, Wu D H, Wu X D and Jing J. 1995. The coupling of the gold mineralization with the collisional orogenesis and the distribution of gold deposits, northern Xinjiang[J]. *Gold Geology*, 1(3): 8~16 (in Chinese with English abstract).
- Clayton R N and Mayeda T K. 1963. The use of bromine pentafluoride in the extraction of oxygen from oxide and silicates for isotopic analysis[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 27: 43~52.
- Clayton R N, O'Neil J R and Mayeda T K. 1972. Oxygen isotope exchange between quartz and water[J]. *Journal of Geophysical Research*, 77: 3057~3067.
- Dong Y G. 1998. Study on the relationships between the characteristics of wall rock alterations and the structures and mineralization fluids of primary gold deposits in Altay, Xinjiang[J]. *Volcanology & Mineral Resources*, 19: 105~112 (in Chinese with English abstract).
- Dong Y G. 2000. Distribution of gold deposits related to fault structures

- in Altay, Xinjiang [J]. *Volcanology & Mineral Resources*, 21: 41~46 (in Chinese with English abstract).
- Goldfarb R J, Groves D I, Gardoll S. 2001. Orogenic gold and geologic time: A global synthesis [J]. *Ore Geology Reviews*, 18: 1~75.
- 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.
- Guo D L. 1996. Contributions of the Irtysh deep large-scale fault to gold mineralization [J]. *Geology and Geochemistry*, (1): 52~55.
- Han B F, He G Q and Wand S G. 1999. Postcollisional mantle-derived magmatism, underplating and implications for basement of the Junggar Basin [J]. *Science in China (Series D)*, 29(1): 16~21 (in Chinese).
- Li H Q, Xie C F, Chang H L, Cai H, Zhu J P and Zhou S. 1998. Study on metallogenetic chronology of nonferrous and precious metallic ore deposits in North Xinjiang [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 26~133 (in Chinese with English abstract).
- Li Z C. 1999. Two tectonometallogenic types of Au deposits and their metallogenic models in the southern Altay Mountains [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 23(1): 16~28 (in Chinese with English abstract).
- Liu W H, Liao Q L, Dai P G and Zhao X X. 1999. Preliminary analyses on metallogenetic characteristics of gold deposits related to ductile shear zone in southern margin area of Altay [J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 14(3): 42~49 (in Chinese with English abstract).
- Qin K Z. 2000. Metallogenesis in relation to Central-Asia style Orogeny of Northern Xinjiang [R]. Post-doctor research report. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences. 195p (in Chinese with English abstract).
- Roberts R G. 1987. Ore deposit models Archean lode gold deposits [J]. *J. Geoscience Canada*, 14(1): 37~52.
- Rui X J, Zhu S H and Liu K J. 1993. The main characteristics and regional metallogenic model of Altay primary gold deposits in Xinjiang [J]. *Geological Review*, 39(2): 138~148 (in Chinese with English abstract).
- Shen Y C, Shen P, Li G M, Zeng Q D and Liu T B. 2007. Structural ore-control regularities of Ertix gold belt in north Xinjiang [J]. *Mineral Deposits*, 26(14): 33~42 (in Chinese with English abstract).
- Travin A V, Boven A, Plotnikov A V, Vladimirov V G, Theunissen K, Vladimirov A G, Melnikov A I and Titov A V. 2001. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of ductile deformation in the Irtysh shear zone (Eastern Kazakhstan) [J]. *Geochemistry*, 12: 1347~1350.
- Vladimirov A, Melnikov A, Travin A, Plotnikov A, Smirnova L and Theunissen K. 1998. The Irtysh shear zone in NE Kazakhstan: kinematics and preliminary data on metamorphic conditions and Ar/Ar geochronology [A]. In: Active tectonic continental basin [C]. International Conference, Gent, April 30, May 2, p105.
- Wang D H. 1996. Devonian bimodal volcanic rocks and metallogenic environment of the ashele copper district in Xinjiang [J]. *Geological Review*, 42(1): 45~53 (in Chinese with English abstract).
- Wang F, He H Y, Zhu R X, Sang H Q, Wang Y L and Yang L K. 2005. Intercalibration of international and domestic $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating standard [J]. *Science in China (Series D)*, 35(7): 617~626 (in Chinese).
- Wang J B and Xu X. 2006. Postcollisional Tectonic Evolution and Metallogenesis in Northern Xinjiang, China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(1): 23~31 (in Chinese with English abstract).
- Wang Y L and Cheng S D. 2001. Crust evolution and mineralization of Xinjiang Uygur Autonomous Region [J]. *Chinese J. Geology*, 36(2): 129~143 (in Chinese with English abstract).
- Xiao X C, Tang Y Q, Feng Y M, Zhu B Q, Li J Y and Zhao M. 1992. The tectonics in the Northern Xinjiang and its adjacent area [M]. Beijing: Geol. Pub. House (in Chinese with English abstract).
- Yan S H, Chen W, Wang Y T, Zhang Z H and Chen B L. 2004. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Dating and Its Significance of the Ertix Gold Metallogenic Belt in the Altay Orogen, Xinjiang [J]. *Acta Geologica Sinica*, 78(4): 500~506 (in Chinese with English abstract).
- Yan S H, Teng R L, Wang Y T, Chen W, Zhang Z C and Chen B L. 2006. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the Bu'ergeren gold-bearing shear zone on the southern margin of the Altay Mountains, Xinjiang, and its significance [J]. *Geology in China*, 33(3): 648~655 (in Chinese with English abstract).
- Ye Q T and Fu X J. 1998. Metallogenic series of ore deposits in Altay orogenic belt, Xinjiang, China [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 19(11): 31~39 (in Chinese with English abstract).
- Zartman R E and Doe B R. 1981. Plumbotectonics--the model [J]. *Tectonophysics*, 75: 135~162.
- Zhang X B, Sui J X, Li Z C. 1996. Tectonic evolution of the Irtysh and the metallogenic series [M]. Beijing: Sciences Press (in Chinese with English abstract).
- Zhu S H and Dong Y G. 1994a. Research on the source of metallogenic material for the primary gold deposits in Altay [J]. *contributions to geology and mineral resources research*, 9(1): 8~17 (in Chinese with English abstract).
- Zhu S H, Dong Y G and Xiao H L. 1994. Geochemical characteristics of metallogeny of primary gold deposits occurring in Altay area, Xinjiang [J]. *Geochimica*, 23(Supp.): 58~67 (in Chinese with English abstract).
- Zhu S H and Dong Y G. 1995. Study on the ore-forming mechanism of gold deposits in Altai, Xinjiang [J]. *Volcanology & Mineral Resources*, 16(1): 19~34 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈华勇, 陈衍景, 刘玉琳. 2000. 新疆额尔齐斯金矿带的成矿作用及其与中亚型造山作用的关系 [J]. *中国科学 (D 辑)*, 30(增刊): 38~44.
- 陈衍景, 富士谷, 吴德华, 吴锡丹, 靖军. 1995. 新疆北部金矿化与碰撞造山作用的耦合及金等矿床的分布规律 [J]. *黄金地质*,

- (3) 8~16.
- 程忠富, 芮行健. 1996. 哈巴河县赛都金矿成矿特征[J]. 新疆地质, 14(3): 247~254.
- 程忠富, 芮行健. 1997. 赛度金矿成矿地球化学环境[J]. 火山岩地质与矿产, 18(1): 27~36.
- 程忠富, 董永观, 芮行健. 2002. 新疆主要金矿床地质和地球化学特征[J]. 资源调查与环境, 23(1): 41~51.
- 董永观. 1998. 新疆阿尔泰原生金矿围岩蚀变特征与构造及流体关系研究[J]. 火山地质与矿产, 19(2): 105~112.
- 董永观. 2000. 新疆阿尔泰金矿断裂构造控矿规律研究[J]. 火山地质与矿产, 21: 41~46.
- 郭定良. 1996. 额尔齐斯深(大)断裂对金成矿的贡献[J]. 地质地球化学(1): 52~55.
- 韩宝福, 何国琦, 王式洸. 1999. 后碰撞幔源岩浆活动、底垫作用及准格尔盆地基底的性质[J]. 中国科学(D辑), 29(1): 16~21.
- 李华芹, 谢才富, 常海亮, 等. 1998. 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. 26~133.
- 李志纯. 1999. 阿尔泰南缘两类构造成矿类型金矿床及其成矿模式[J]. 大地构造与成矿学, 23(1): 16~28.
- 刘悟辉, 廖启林, 戴塔根. 1999. 阿尔泰南缘与韧性剪切带有关金矿床成矿特征浅析[J]. 地质找矿论丛, 14(3): 42~49.
- 秦克章. 2000. 新疆北部古生代中亚型造山与成矿作用[R]. 中国科学院地质与地球物理所博士后科研工作报告. 195p.
- 芮行健, 朱韶华, 刘抗娟. 1993. 新疆阿尔泰原生金矿基本特征及区域成矿模式[J]. 地质论评, 39(2): 138~148.
- 沈远超, 申萍, 李光明, 曾庆栋, 刘铁兵. 2007. 新疆额尔齐斯金矿带构造控矿规律研究[J]. 矿床地质, 26(1): 33~42.
- 王登红. 1996. 新疆阿舍勒铜矿区双峰式火山岩与成矿背景的初步研究[J]. 地质论评, 42(1): 45~53.
- 王非, 贺怀宇, 朱日祥, 桑海清, 王英兰, 杨列坤. 2005. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学国际国内标样的对比标定[J]. 中国科学(D辑), 7: 617~626.
- 王京彬, 徐新. 2006. 新疆北部后碰撞构造演化与成矿[J]. 地质学报, 80(1): 23~31.
- 王元龙, 成守德. 2001. 新疆地壳演化与成矿[J]. 地质科学, 36(2): 129~143.
- 肖序常, 汤耀庆, 冯益民, 朱宝清, 李锦轶, 赵民. 1992. 新疆北部及其邻区大地构造[M]. 北京: 地质出版社.
- 闫升好, 陈文, 王义天, 张招崇, 陈柏林. 2004. 新疆额尔齐斯金成矿带的 Ar/Ar 年龄及其地质意义[J]. 地质学报, 78(4): 500~506.
- 闫升好, 腾容丽, 王义天, 陈文, 张招崇, 陈柏林. 2006. 新疆布尔根含金剪切带的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄及其地质意义[J]. 中国地质, 33(4): 648~655.
- 叶庆同, 傅旭杰. 1998. 新疆阿尔泰山带矿床成矿系列[J]. 地球学报, 19(11): 31~39.
- 张湘炳, 隋静霞, 李志纯, 等. 1996. 额尔齐斯构造带构造演化与成矿系列[M]. 北京: 科学出版社.
- 朱韶华, 董永观, 肖惠良. 1994. 阿尔泰原生金矿成矿地球化学特征[J]. 地球化学, 23(增刊): 58~67.
- 朱韶华, 董永观. 1995. 阿尔泰区岩金矿的成矿机理[J]. 火山地质与矿产, 16(1): 19~34.