

阿尔金北缘地区韧性剪切带型金矿床构造控矿解析

陈柏林¹⁾ 陈宣华¹⁾ 王小凤¹⁾ 杨 风²⁾ 桑少杰³⁾ 陈正乐¹⁾

王克卓²⁾ 王亚非³⁾ 杨 屹²⁾ 李学智²⁾

1) 中国地质科学院地质力学研究所, 北京, 100081

2) 新疆地质调查院第一地质调查所, 乌鲁木齐, 830011

3) 新疆地质调查院第二地质调查所, 鄯善, 838200

内容提要 韧性剪切带型金矿是一种成矿机制与控矿因素都与韧性剪切带及其演化密切相关的金矿床类型。阿尔金北缘地区不同层次剪切带发育, 金矿床受韧性剪切带控制明显, 在区域上, 韧性剪切带控制金矿床(点)的分布; 在矿床范围内, 韧性剪切带及其演化过程中形成的韧性剪切带既是唯一的赋(含)矿构造, 也对矿化带、矿体的形态、产状、规模及分布起决定性的控制作用; 压扭性韧性剪切变形特点决定了金矿化类型以蚀变糜棱岩型为主, 交代蚀变作用发育。含矿构造裂隙以P型为主, 少量D型和R型, 个别为R'型和T型; 构造变形所引发的动力分异作用及其形成的动力变质热液是金矿成矿流体的主要来源之一, 这与地球化学和成矿流体包裹体研究显示的大平沟金矿床成矿物质主要来源于变质岩、成矿流体有相当部分来源于变质水的特征相吻合。结合糜棱岩磁组构研究, 发现磁各向异性度P值与金元素含量呈负相关关系, 说明构造变形早于金矿化蚀变作用, 这种时序关系进一步佐证了韧性剪切带型金矿床的成矿模式。即大面积的韧性变形构造动力分异作用形成的含金热液不是就原地矿化, 而是向上迁移并集中到范围比较窄小的韧-脆性或脆性裂隙中才发生金元素富集, 最终形成金矿床。

关键词 构造控矿解析 金矿床 韧性剪切带 阿尔金

几乎在 Sibson(1977)和 Ramsay(1980)最早发表了韧性剪切带经典论著的同时, Boyle(1979)就提出了韧性剪切带型金矿床——一种成矿机制与控矿因素都与韧性剪切带有关的金矿床类型。此后, 对韧性剪切带型金矿床和韧性剪切带控矿机制及韧性剪切变形作用对成矿元素迁移和富集关系的研究均取得了进展, 不仅发现蚀变糜棱岩型金矿与韧性剪切带有关, 而且发现相当数量原划分为石英脉型的金矿床也与韧性剪切带有关, 并依据剪切带理论找到了一批剪切带型金矿床(Hugon, 1985; Kerrich, 1988, 1989, 2000; Robert, 1986; Roberts, 1987; Boulter, 1987; Bonnemaïson, 1990; Sibson, 1988; Boullier, 1992; Goldfarb et al., 1997; 杨敏之等, 1996; 王玉明, 1998; 贾国志等, 2000; 陈柏林, 1999b, 2000a)。其中有代表性的韧性剪切带成矿控矿理论有以下几个方面, Roberts(1987)根据里德尔剪破裂理论建立的韧性剪切带中含石英脉的含矿裂隙系统(R型、R'型、T型、D型和P型), Bonnemaïson

(1990)的从韧性剪切带向脆性剪切带的演化规律与金矿化的关系建立了剪切带金矿化三阶段成矿理论, Sibson(1988)提出、并经 Boullier(1992)进一步补充完善的断层阀模式, 将构造变形过程与成矿作用过程有机地结合起来, 比较系统地阐述了成矿流体的运移机制、成矿物质的析出结晶机制等; 而 Kerrich(1988, 1989)和 杨敏之等(1996)更强调绿岩带或花岗-绿岩地体的形成演化过程中形成的韧性剪切带与金矿床的关系; Goldfarb(1997)则强调变质岩中的韧性剪切带与金矿床形成的关系; 王玉明(1998)提出石英压电性假说, 认为韧性剪切过程中石英普遍产生压电效应, 使石英颗粒一侧表面及其附近出现局部负电荷集中的强还原环境, 并在相邻石英颗粒之间诱生电子发射从而能有效地促使热液中金络合物的还原分解, 释放出的金将就近附着在石英颗粒间和颗粒表面上; 陈柏林(1999b, 2000a)从韧性剪切带时空演化角度建立的韧性剪切带金矿成矿模式; 近年来, 一些学者从全球构造演化与韧性

注: 本文为新一轮国土资源大调查项目(编号 K1.1.2.3) 和国家305项目(编号 96-915-06-01)资助的成果。

收稿日期: 2001-06-20; 改回日期: 2001-09-26; 责任编辑: 章雨旭。

作者简介: 陈柏林, 男, 1962年生。研究员, 主要从事区域构造、矿田构造和成矿预测研究。通讯地址: 100081, 北京市海淀区民族学院南路11号, 中国地质科学院地质力学研究所; 电话: 68486764; E-mail: cblh6299@263.net。

剪切带形成演化条件及其与金矿床的关系出发,将韧性剪切带型金矿床划归到造山带型金矿床的大类之中(Kerrich et al., 2000; 陈柏林, 2001)。

阿尔金北缘地区是阿尔金北东向构造带与北祁连构造带西段的交汇复合部位,北接塔里木地块南缘。阿尔金断裂带和阿尔金地区的区域构造演化已经成为近10 年来的研究热点(新疆维吾尔自治区地质矿产局, 1993; 崔军文等, 1999; 许志琴等, 1999; 周勇等, 1999; 张建新等, 1998; Yin et al., 1999)。该区前中生代区域构造的演化特点与北祁连西段一致,经历了太古宙—古元古代陆核和结晶基底的形成(崔军文等, 1999)、中元古代稳定大陆边缘沉积、新元古代末期—早古生代板块扩张、加里东期板块俯冲-碰撞(许志琴等, 1999; 周勇等, 1999)、晚古生代裂谷扩张及闭合造山作用和岩浆活动;印支期表现伸展作用和碱性岩侵入(Yin et al., 1999);而晚燕山期以来,由于印度板块与欧亚板块碰撞造山的远程效应,阿尔金断裂带发生了大规模的左行走滑,北缘地区作为走滑前缘,更多地表现出挤压体制的变形特点(崔军文等, 1999; 许志琴等, 1999; Yin et al., 1999)。

总之,韧性剪切带型金矿床研究已经比较深入,对阿尔金山地区地质构造演化和阿尔金走滑断裂进

行研究的文章也不少,但是报道该区金矿床的文献非常少,而研究阿尔金北缘地区深层次韧性剪切带的成矿控矿作用和控矿机制方面还几乎是空白。近年来在该区金矿的找矿工作也取得突破,陆续发现了大平沟、红柳沟、祥云、盘龙沟等金矿床(点),其中大平沟、红柳沟金矿床与区内韧性剪切带关系密切。本文着重阐述阿尔金北缘地区韧性剪切带对金矿床分布的控制作用、韧性变形过程的动力变质分异作用与金矿成矿流体来源的关系,并通过金矿化糜棱岩中磁各向异性度 P 值与金元素含量呈负相关关系及其所反映的构造变形早于金矿化蚀变作用的关系,进一步论证韧性剪切带型金矿床的成矿模式和控矿机制,即大面积的韧性变形构造动力分异作用形成的含金热液不是就地原位矿化,而是向上迁移并集中到范围比较窄小的韧-脆性或脆性裂隙中才发生金元素富集,最终形成金矿床。

1 阿尔金北缘韧性剪切带基本特征

阿尔金北缘地区韧性剪切带非常发育(图1),西起红柳沟,经祥云、盘龙沟,至大平沟,并向东继续延伸,东西全长近200 km,南北宽2~10 km。韧性剪切带主体沿阿尔金北缘断裂发育,西段沿红柳沟断裂发育宽大的韧性剪切带,主体发育于古元古界马特

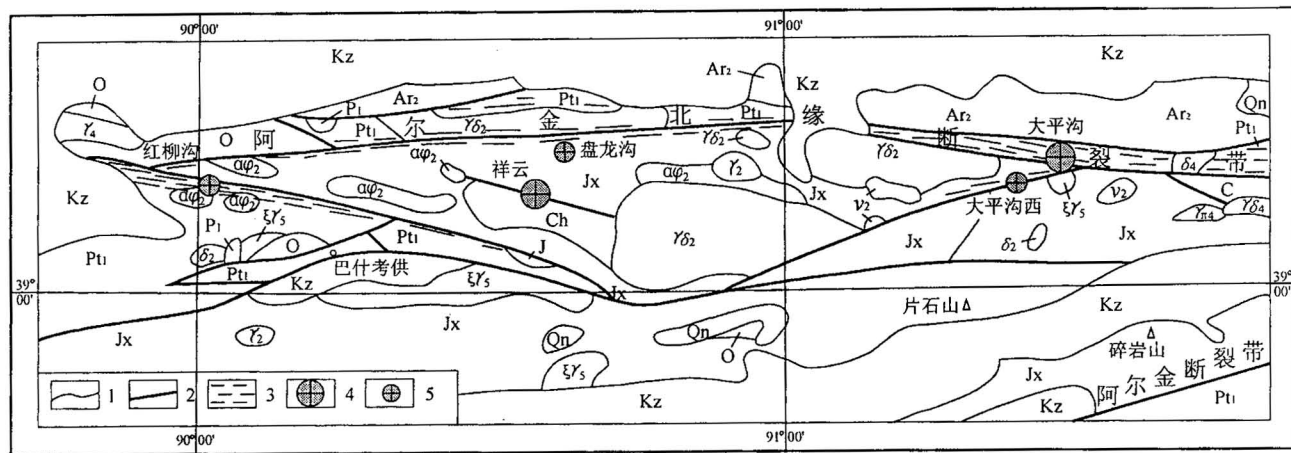


图1 阿尔金北缘地区区域构造及金矿床(点)分布图
(据1:20万茫崖幅、巴什考供幅、索尔库里幅地质图和本文资料编制)

Fig. 1 Tectonic map and distribution of gold deposits in north Altyn area, northwest China

Kz—新生界;J—侏罗系;P—二叠系;C—石炭系;O—奥陶系;Qn—青白口系;Jx—蓟县系;Ch—长城系;Pt₁—古元古界;Ar₂—中太古界; $\xi\gamma_5^1$ —印支期钾长花岗岩; $\gamma\delta_4$ —海西期花岗闪长岩; δ_4 —海西期闪长岩; $\gamma\pi_4$ —海西期花岗斑岩脉;新元古代火成岩; γ_2 —花岗岩; $\gamma\delta_2$ —花岗闪长岩; δ_2 —闪长岩; ν_2 —辉长岩; $\alpha\phi_2$ —超铁镁质岩;1—地质界线;2—断裂;3—韧性剪切带;4—金矿床;5—金矿点

Kz—Cenozoic; J—Jurassic; P—Permian; C—Carboniferous; O—Ordovician; Qn—Qingbaikou System; Jx—Jixian System; Ch—Changcheng System; Pt₁—Paleoproterozoic; Ar₂—Meso-Archaean; $\xi\gamma_5^1$ —Indosinian moyite; $\gamma\delta_4$ —Hercynian granodiorite; δ_4 —Hercynian diorite; $\gamma\pi_4$ —Hercynian granite-prophyry; Neoproterozoic igneous rocks; γ_2 —granite, $\gamma\delta_2$ —granodiorite, δ_2 —diorite, ν_2 —gabbro, $\alpha\phi_2$ —ultra-ferromagnetic rock; 1—line of geological limitation; 2—fault; 3—ductile shear zone; 4—gold deposit; 5—gold ore spot

克布拉克组变质砂岩之中,同时被卷入韧性变形的岩石还有元古宇超铁镁质岩石、变质流纹岩、似斑状钾长花岗岩等;东段大平沟地区发育于中太古界达格拉格布拉克群(*Ar₂dg*)的褐灰—褐红色钾长变粒岩、灰绿色变粒岩夹片岩、灰绿色片岩夹变粒岩中(图1)。

韧性剪切带内的岩石面理构造和线理构造非常发育,且大多数面理走向近东西向。西段红柳沟地区平均片理产状 $165^{\circ}\sim 175^{\circ}\angle 70^{\circ}\sim 85^{\circ}$,线理产状均以近水平为主,最大侧伏角 35° ,平均为向东侧伏 6° ,说明变形以近水平剪切为主;东段大平沟地区平均面理产状 $205^{\circ}\angle 65^{\circ}\sim 86^{\circ}$;线理以向西侧伏为主,侧伏角 $35^{\circ}\sim 40^{\circ}$,反映出左行逆冲的变形特点。

阿尔金北缘韧性剪切带中发育各类糜棱岩类岩石。西段红柳沟地区发育长英质糜棱岩、黑云斜长质糜棱岩、绢云(白云)片状糜棱岩,其中似斑状钾长花岗岩发生强烈韧性变形,钾长石斑晶变形后构成典型的不对称残碎斑晶构造;东段大平沟地区发育长英质糜棱岩、石英质糜棱岩、角闪斜长质糜棱岩等。

有限应变测量结果显示强变形糜棱岩的最大应变轴比 $a/c(Kxz)$ 为 $5\sim 10$ 。磁组构磁各向异性度 P 值为 $1.09\sim 2.21$;由磁组构磁各向异性度 P 值估算的糜棱岩类岩石应变轴比 Kxz 一般 $2.1\sim 4.8$,部分样品达到 $45\sim 55$,个别达到 118 ,表明本区构造变形非常强烈。在东段大平沟地区宏观构造和微观组构反映的剪切运动方向是左行逆冲;依据 Twiss (1977)的公式,由动态重结晶石英颗粒的粒径估算的构造差应力为 $59.62\sim 61.63$ MPa。

在西段,红柳沟韧性剪切带内发育典型的糜棱岩和各种变形组构。韧性剪切带总体延伸 $75^{\circ}\sim 90^{\circ}$,糜棱岩面理走向 $65^{\circ}\sim 85^{\circ}$,均以近直立或向南陡倾为主。从韧性剪切带延伸方向与糜棱岩面理产状之间的锐夹角关系、金矿化石英脉方向、韧性剪切带内残碎斑晶排列特点、不对称微褶皱倒向等标志,反映出韧性剪切带的运动方向是右行剪切。

90年代中期以来,在阿尔金北缘地区韧性剪切带中发现了金矿床(点),研究表明韧性剪切带型金矿床主要与在深层次韧性变形基础上叠加韧-脆性变形的继承性剪切带有关(图1)。

2 韧性剪切带宏观控矿作用

2.1 韧性剪切带控制金矿床(点)的分布

阿尔金北缘地区金矿床和金矿点明显受韧性剪切带控制,西段红柳沟韧性剪切带控制红柳沟金矿

床,中西段(贝壳滩地区)韧性剪切带南侧上盘为韧脆性断裂构造控制的祥云金矿床和盘龙沟金矿点,东段大平沟地区韧性剪切带控制大平沟金矿床和大平沟西金矿点(图1)。此外,沿阿尔金北缘断裂带,还具有比较好的化探异常,预示着阿尔金北缘地区具有良好的金矿找矿前景。

2.2 韧性剪切带控制金矿体的产出

大平沟金矿是阿尔金北缘地区近年发现的金矿床,韧性剪切带的控矿作用明显。

2.2.1 韧性剪切带及其演化过程中形成的韧-脆性剪切带是唯一的赋矿构造

在韧性变形基础上叠加偏脆性的断裂构造是成矿物质聚集的重要场所,是重要的含矿(储矿)构造;而韧性部分的构造变形带起到了构造动力分异和成矿物质活化作用。区内偏脆性的控矿构造带,走向为 290° 左右,一般呈小角度斜切变质岩面理、韧性变形糜棱岩片理构造。沿主构造带旁侧(数米或十几米)常发育次级小的韧-脆性变形带,同样有金矿化体或金矿体产出;从目前有规模、有工业意义的矿脉(矿体)的产状来看,绝大多数为沿北西向西向脆性-韧脆性构造变形带产出,而变质岩构造中虽然也有石英脉发育,但是仅有极少量构成有意义的金矿化,晚期脆性断裂一般没有金矿化发育(图2)。

2.2.2 控矿构造对矿化带形态、产状、规模及分布的控制

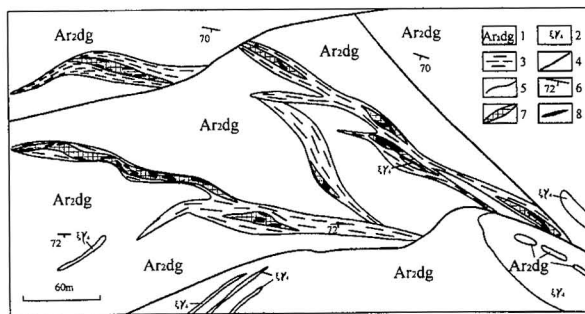


图2 大平沟金矿平面地质图
(据新疆地质调查院第一地质调查所大平沟金矿地质草图和本项目资料编制)

Fig. 2 Geological map of Dapinggou gold deposit, northwest China

1—中太古界达格拉格布拉克群;2—钾长花岗岩;3—韧性剪切带;4—晚期脆性断裂;5—地质界线;6—产状;7—蚀变糜棱岩型金矿(化)体;8—钾长石石英脉型富矿体

1—Meso-Archaeozoic Dagelagbulake Group; 2—moyite; 3—ductile shear zone; 4—late brittle fault; 5—line of geological limitation; 6—attitude; 7—altered mylonite type gold ore-body; 8—K-feldspar quartz vein type gold ore-body

大平沟金矿区内控矿构造群体组合形态呈现弧形带状,且北带向北凸出,南带向南凸出,东西两端逐渐接近,南北两带共同包绕一个透镜状岩块,因而受其控制的矿化带组合形态也表现出同样的形态特征;而单条控矿构造常表现为舒缓波状或分支复合特征,其控制的矿化带也表现为舒缓波状延伸并出现分支复合现象(图2)。

矿区内控矿构造带产状总体呈 WNW 走向,倾向 SSW 向为主,倾角普遍较陡($65^{\circ}\sim 85^{\circ}$ 居多),其控制的矿化带产状与其相一致(图2)。

矿区内南、北两个控矿构造密集带中,北带延伸比较长,断续延伸400余米,东段中部(D₇点附近)宽度最大,达到20余米;而南带延伸比较短,断续延伸仅200 m 左右,受这些控矿构造所控制的 I、II 号矿化带的规模也表现出同样的差异(图2)。

矿区内控矿构造为北西西向,并呈南、北两带弧形延伸,其具体表现为,南带东段近东西向、西段 WNW 向,北带之东段 WNW 向、西段近东西向。共同构成了构造透镜体的包络线。这种分布规律决定了本区矿化带及矿体具同样的分布规律(图2)。

2.2.3 控矿构造变形特点对金矿化类型的控制

韧性剪切带型金矿床的金矿化类型具有蚀变糜棱岩型和含金石英脉型,这已经被广泛接受,并普遍认为在早期韧性变形形成蚀变糜棱岩型、晚期脆性变形形成含金石英脉型(Hugon, 1985; Kerrich, 1988, 1989, 2000; Robert, 1986; Roberts, 1987; Boulter, 1987; Bonnemaison, 1990; Sibson, 1988; Boullier, 1992; Goldfarb et al., 1997; 杨敏之等, 1996),但是本文作者认为,一方面韧性剪切带的演化是时空相统一的,即往往比较深的层次下形成蚀变糜棱岩型金矿化,而比较浅的条件下形成含金石英脉型(陈柏林等,1999b,2000a);另一方面,含金石英脉又可以分为交代成因和充填成因两类,充填成因含金石英脉的形成需要一定断裂空间,往往形成于具有一定张性的脆性断裂中(如典型岩浆热液石英脉型金矿床),其形成深度也更浅,而韧性剪切带在中等层次一般以形成微裂隙为特点,没有形成明显的断裂空间,所以形成交代成因含金石英脉。而且与韧性剪切带有关的不同金矿化类型的地质地球化学特征与其所形成的物理化学条件具有很好的对应关系(陈柏林,2000b)。

大平沟金矿区构造变形的特点是韧性-脆性构造变形,韧性构造变形表现为发育糜棱岩带,随着构造演化,比较深层次的变形带被抬升后,在其上叠

加了偏脆性变形,在糜棱岩中只形成一系列微裂隙,没有形成比较大断裂空间,因此,这种构造变形特点控制的金矿化表现为蚀变糜棱岩型为主,仅在局部交代比较彻底形成少量交代石英脉型;同时,矿化蚀变方式表现为交代蚀变作用。

另一方面,由于原岩成分中钾长石含量比较高的关系,韧性变形构造动力变质作用和构造动力分异作用形成的热流体中钾长石的成分比较高,在矿化蚀变中钾长石化比较明显,在交代比较彻底的脉体中钾长石含量也比较高,即出现钾长石石英脉。

3 韧性剪切带含矿裂隙系统

Roberts(1987)根据里德尔剪破裂理论建立的韧性剪切带含矿裂隙系统有 R、R'、T、D、P 五种主要类型(图3)。

在阿尔金北缘地区,各种含矿裂隙均有发育,但不均匀。在东段大平沟金矿区以青一色的 P 型含矿裂隙为特点,表现为含金石英脉与糜棱岩面理近于平行(图2)。

西段红柳沟地区含金石英脉型富矿体在韧性剪切带糜棱岩之中的分布也表现出脆性-韧性剪切带石英脉型的典型特征。石英脉金矿体的分布主要有与糜棱岩面理呈小角度的 P 型、与剪切带边界平行的 D 型、与剪切带边界呈小角度的 R 型和与糜棱岩面理近于垂直的 T 型(图4)。石英脉的分布特点和变形特点也反映出韧性剪切带的运动学特征是右

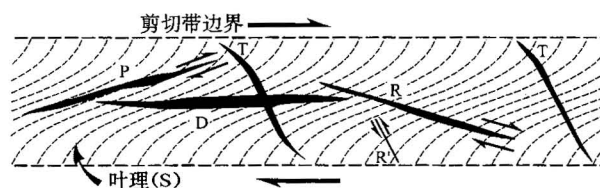


图3 脆-韧性剪切带中裂隙和含金石英脉的方向

Fig. 3 Map showing direction of fractures and Au-bearing quartz veins in a ductile-brittle shear zone

R 型—低角度里德尔剪切裂隙(与剪切带边界成 15° 夹角);R' 型—高角度里德尔剪切裂隙(与剪切带边界成 75° 夹角);P 型—逆向剪切裂隙或压力剪切裂隙(与剪切带边界成 $5^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 夹角);D 型—主剪切裂隙(与剪切带边界平行);T 型—沿应变椭球 YZ 面形成的张裂隙(与 S 叶理垂直)

R—Lower-angle Riedel shear fractures, 15° to shear zone boundary; R'—high-angle Riedel shear zone, 75° to shear zone boundary; P—shear fractures or reverse fractures, $5^{\circ}\sim 10^{\circ}$ to shear zone boundary; D—principal shear fractures, parallel to shear zone boundary; T—extension fractures, form in YZ plane of the strain ellipsoid, perpendicular to the S-foliation

行剪切。

4 构造动力分异作用与金矿成矿流体来源的关系

断层双层结构模式表明大的构造带在地壳深处表现为韧性变形,并发育各自相对应的糜棱岩,这是由于在中深层次的韧性剪切变形域,温度高、压力大、岩石塑性大。Mitra(1986)、Zhou et al. (1989)和周济元等(1995)从理论上探讨并进行计算,认为受韧性剪切变形的影响,使 Au 等成矿元素及 Si、K、Na、H₂O 等组分的化学位升高,且变形越强,化学位越高,并变得越来越不稳定的,将脱离原来的矿物或岩石中的赋存部位,一起被活化分异,形成含金热液(或称动力变质热液)(Mitra, 1986; 周济元等, 1995; 陈柏林, 1999b),这种构造动力分异作用引起了韧性剪切带变形过程的矿物成分和化学成分明显变化(Borges, 1980; Brodie, 1980; 王小凤, 1989; 董法先等, 1993; 陈柏林等, 1999a)。这已经被有关成岩成矿实验(岳石等, 1990, 1991; 周济元等, 1991; 陈柏林等, 1998; Dong et al., 1999)所证明,而且在地质事实方面也是客观存在的(Borges et al., 1980; Brodie, 1980; 王小凤, 1989; 董法先等, 1993; 陈柏林等, 1999a)。

Beach(1980)系统地研究 Lewisian 杂岩地区韧

性剪切带退变质反应的过程,得到花岗质岩石(斜长石含量大于钾长石)的退变质反应方程式为:

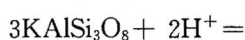


(钾长石) (钠长石)



(绢云母或白云母) (石英)

大平沟金矿床原岩多数为钾长变粒岩,其矿物成分是钾长石80%、斜长石15%,野外和显微镜岩石薄片鉴定表明,在变形形成糜棱岩之后,矿物成分是绢云母30%~50%、钾长石20%~40%、石英10%~30%,钾长石在变形过程中退变质形成了石英和绢云母,其退变质反应的方程式是:



(钾长石)



(绢云母或白云母) (石英)

对于花岗质岩石,未变形的花岗质岩石的矿物成分是钾长石40%、斜长石30%、石英30%,野外和显微镜岩石薄片鉴定表明,在变形形成糜棱岩之后,矿物成分是绢云母20%~30%、长石20%~40%、石英40%~50%。这一结果与我国东部郯庐断裂南段韧性剪切带中糜棱岩的矿物成分变化和组分迁移特点(Yang et al., 1998)是一致的。

上述退变质化学反应形成的 Na⁺、K⁺ 和 SiO₂ 等

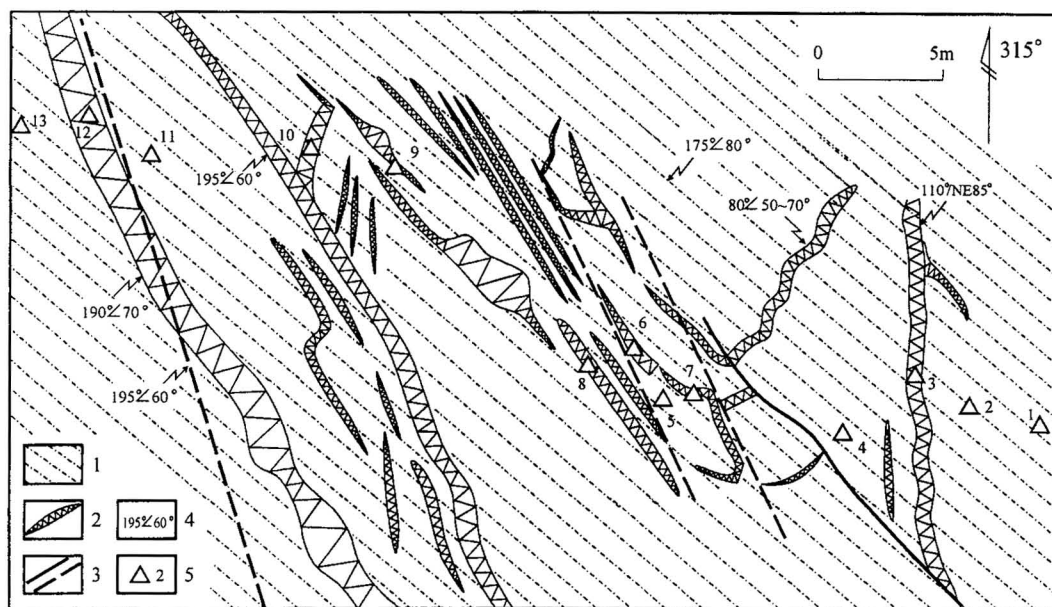


图4 红柳沟地区糜棱岩带及与其中含金石英脉的关系

Fig. 4 Relation between Au-bearing quartz vein and mylonite schistosity

1—糜棱岩; 2—含金石英脉; 3—晚期脆性小断面; 4—产状; 5—采样位置

1—mylonite; 2—Au-bearing quartz vein; 3—late brittle fault; 4—occurrence; 5—sample spot

是成矿过程不可缺少的活性组分,是成矿流体的重要成分之一,是金元素活化迁移和成矿作用的重要介质。由此可见,构造变形及其引发的动力分异作用是金矿成矿流体的来源之一。

所以,构造动力分异作用——钾长变粒岩的动力退变质作用形成的矿物组合与热液蚀变的矿物组合中具有比较多的钾长石的特点非常相似。这种相似并不是偶然的,反映出构造变形及其引发的动力分异作用是本区金矿床成矿流体的形成途径之一。

同时,地球化学和成矿流体包裹体研究显示,大平沟金矿床成矿物质主要来源于变质岩,成矿流体以(动力)变质水为主,这从成矿流体来源角度证明了这种构造动力分异作用和动力变质热液对金矿床

成矿作用的贡献及其重要性。

5 韧性变形与金矿化的时序关系

韧性剪切带的成矿机制一直争议比较大,如对于构造变形与金矿成矿的关系一些学者认为韧性剪切变形越强、构造差应力越大,Au 元素丰度越高(刘劲鸿,1991;杨开渠,1990;许顺山等,1997);而另一些学者则认为韧性剪切作用本身导致成矿的可能性不大,在强烈韧性变形的条件下,Au 元素内能升高,是不稳定的,因而不会富集成矿,并且是岩石变形越强,Au 元素含量越低(邵世才等1994,1996)。其中韧性变形与金矿化的时序关系的确定是解决成矿机制的重要问题之一。对阿尔金北缘地区韧性剪切带型金矿床中宏观和显微变形组构非常相似的不同程度矿化的糜棱岩,进行 Au 元素含量与磁组构各向异性度 P 值的对比研究发现,弱矿化部位金元素含量低,但磁各向异性度 P 值较高;而在强矿化部位金元素含量高,但 P 值较低(表1),即磁各向异性度 P 值与金元素品位呈现负相关关系(图5、6)。

由于磁各向异性度 P 值可以代表岩石的变形强度,而热事件是导致磁组构各向异性弱化(均一化)的主要因素,所以上述关系说明糜棱岩韧性变形早于蚀变矿化,成矿后没有强烈的韧性变形,弱矿化糜棱岩中的磁各向异性是成矿前形成的磁各向异性的残留。这种变形与矿化关系说明韧性剪切带型金矿床深层次韧性变形形成的动力变质热液并不是就地原位矿化,而是运移至相对比较浅的部位(韧-脆性变形带中)发生金矿化,变形越强,Au 元素动力分

表1 不同矿化强度糜棱岩的磁组构 P 值和 Au 品位对比表

Table 1 Comparison of the susceptibility anisotropy and gold abundance between the mineralized and non-mineralized mylonite

序号	样品号	岩性	P 值	Au 品位 ($\times 10^{-6}$)
1	D5-1	蚀变变粒岩	1.0613	0.48
2	D6-1	弱变形变粒岩	1.1945	0.0239
3	D6-2	强变形变粒岩	1.2045	0.0052
4	D6-5	矿化石英脉	1.1158	0.28
5	D6-6	蚀变糜棱岩	1.0348	2.16
6	D6-7	矿化石英脉	1.0343	0.25
7	D6-8	变粒岩	1.0522	0.0088
8	D7-1	变形变粒岩	1.2360	0.0186
9	D7-2	糜棱岩	1.9534	0.0117
10	D7-3	糜棱岩	1.2407	0.0114
11	D7-4	糜棱岩	2.2148	1.0275
12	D7-5	强矿化石英脉	1.0800	30.00
13	D7-6	片理化变粒岩	1.1323	0.0516
14	D7-7	变形变粒岩	1.3002	0.0247
15	D7-8	弱矿化变粒岩	1.1251	0.30
16	D7-9	断层泥	—	3.74
17	D7-10	强矿化糜棱岩	1.0555	1.48
18	D7-11	钾长石石英脉	—	0.84
19	D7-12	糜棱岩	1.8870	0.0154
20	D7-13	弱矿化变粒岩	1.0268	0.59
21	D7-14	烟灰色石英脉	—	0.0365
22	D7-15	纯白色石英脉	—	0.0121
23	D7-16	钾长石石英脉	—	0.19
24	D7-17	变粒岩	1.0515	0.0434
25	D7-18	钾长变粒岩	1.0275	0.0072
26	D7-19	蚀变变粒岩	1.1340	0.13
27	D7-20	矿化蚀变岩	1.0392	2.14
28	D7-21	变形变粒岩	1.2186	0.0455

注:磁组构测试工作由中国地质大学(北京)古地磁实验室完成,测试仪器为 KLY-1型卡帕桥测定仪;Au 含量测定由国家地质测试中心完成。其中8~28号为 D7剖面样品。—为未测定。

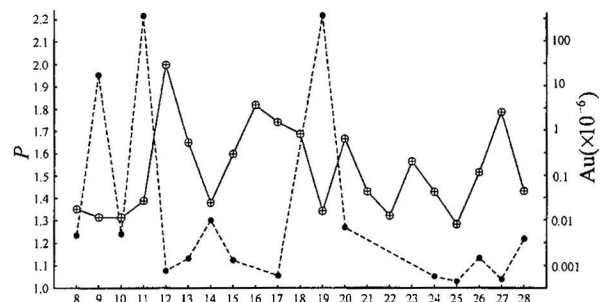


图5 大平沟金矿床 D7剖面矿化糜棱岩磁组构 P 值与 Au 含量变化曲线图(序号同表1)

Fig. 5 Curve showing the relation between the susceptibility anisotropy and gold abundance of mineralized mylonites from Dapinggou gold deposit

⊕—Au 元素含量曲线; ●—磁各向异性度 P 值曲线
⊕—Gold grade curve; ●—susceptibility anisotropy curve

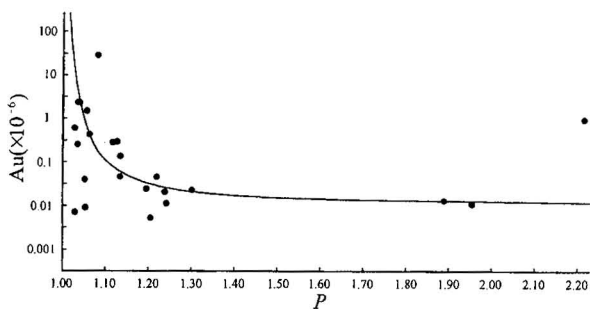
图6 P 值与 Au 含量相关图

Fig. 6 Curve showing the relation between the susceptibility anisotropy and gold abundance of mineralized mylonite

异作用越强烈,含量也越低。大面积的韧性变形动力分异作用形成的含金热液集中到范围比较窄小的韧-脆性或脆性裂隙中才发生金元素富集,并最终形成金矿床(陈柏林,1999b、2000a)。

6 结论和讨论

阿尔金北缘地区不同层次剪切带发育,金矿床受韧性剪切带控制明显,在区域上,韧性剪切带控制金矿床(点)的分布;在矿床范围内,韧性剪切带及其演化过程中形成的韧脆性剪切带既是唯一的赋(含)矿构造,也对矿化带、矿体的形态、产状、规模及分布起决定性的控制作用;压扭性韧性剪切变形特点决定了金矿化类型以蚀变糜棱岩型为主,蚀变以交代作用为特色。含矿构造裂隙以 P 型为主,少量 D 型和 R 型,个别为 R' 型和 T 型;构造变形所引发的动力分异作用及形成动力变质热液是金矿成矿流体的主要来源之一,这与地球化学和成矿流体包裹体研究显示的大平沟金矿床成矿物质主要来源于变质岩、成矿流体有相当部分来源于变质水的特征相吻合。结合糜棱岩磁组构研究,发现磁各向异性度 P 值与金元素含量呈负相关关系,说明构造变形早于金矿化蚀变作用,这种时序关系进一步佐证了韧性剪切带型金矿床的成矿模式(陈柏林,1999)。即大面积的韧性变形构造动力分异作用形成的含金热液不是就地原位矿化,而是向上迁移并集中到范围比较窄小的韧-脆性或脆性裂隙中才发生金元素富集,最终形成金矿床。

参 考 文 献

博伊尔 R W. 1984. 金的地球化学及金矿床. 马万均,王立文,罗永国,秦国兴译. 北京:地质出版社(原著1979).

陈柏林,董法先,李中坚. 1998. 矿物中元素迁移变化的高温高压

- 实验研究. 地质力学学报,4(1):72~77.
- 陈柏林,董法先,李中坚. 1999b. 韧性剪切带型金矿床成矿模式,地质论评,45(2):186~192.
- 陈柏林,董法先. 1999a. 江西大背坞地区韧性剪切带中岩石变形与矿物变化的关系. 矿物岩石,19(1):29~32.
- 陈柏林. 2000a. 糜棱岩型金矿床金元素丰度与构造变形的关系,矿床地质,19(1):17~25.
- 陈柏林. 2000b. 与韧性剪切带有关的不同金矿化类型地质地球化学特征对比研究. 地质地球化学,28(3):24~30.
- 陈柏林. 2001. 金矿床和金矿成矿作用研究进展. 地质论评,47(1):111~112.
- 崔军文,唐哲民,邓晋福,等. 1999. 阿尔金断裂系. 北京:地质出版社,1~249.
- 董法先,陈柏林,李秀珍,刘迅,蔡本俊. 1993. 安徽界岭金矿及其外围成矿构造与找矿方向. 北京:地质出版社.
- 贾国志,梁海军. 2000. 韧性剪切构造造成岩成矿作用及对金矿化的控制——以内蒙古武川县后石花金矿为例. 地质论评,46(2):131~140.
- 刘劲鸿. 1991. 论太右宙含金剪切带的成矿机制. 长春地质学院学报,21(2):157~166.
- 邵世才. 1996. 试论韧性剪切作用与金的成矿. 贵金属地质,5(2):142~145.
- 邵世才,汪东坡. 1994. 河南熊耳山蚀变断层岩型金矿床成因的地质地球化学特征,地质论评,40(6):520~525.
- 王小凤,王岩国,康振川,赵阿兴. 1989. 构造动力作用下矿物的形变与相变. 地质力学文集(9). 北京:地质出版社,187~201.
- 王玉明. 1998. 韧性剪切过程中金沉淀富集的新机制. 地质论评,44(6):643~648.
- 新疆维吾尔自治区地质矿产局. 1993. 新疆维吾尔自治区地质志. 北京:地质出版社,1~941.
- 许顺山,杨农,孙青. 1997. 山东文登金矿成矿动力学研究. 矿床地质,16(3):272~277.
- 许志琴,杨经绥,张建新,姜枚,李海兵,崔军文. 1999. 阿尔金断裂两侧构造单元的对比如及岩石圈剪切机制. 地质学报,73(3):193~205.
- 杨开渠. 1990. 构造古应力估算与金的富集. 广东地质,5(1):31~41.
- 杨敏之,吕古贤. 1996. 胶东绿岩带金矿地质地球化学. 北京:地质出版社.
- 岳石,马瑞. 1990. 实验岩石变形与构造成岩成矿. 长春:吉林大学出版社.
- 岳石. 1991. 粤西河台金矿床构造与成岩成矿关系研究. 中国地质科学院院报(23). 北京:地质出版社,85~97.
- 张建新,许志琴,崔军文. 1998. 一个韧性转换挤压带的变形分解作用——以阿尔金断裂带东段为例. 地质论评,44(4):348~356.
- 周济元,崔炳芳,陆彦. 1991. 广西金牙金矿床构造动力成矿高温高压实验及其研究意义. 矿物岩石,11(3):88~98.
- 周济元,崔炳芳,陆彦. 1995. 论构造动力成矿作用. 地质力学文集(10). 北京:地质出版社,69~75.
- 周济元,余祖成,毛玉元,陆彦. 1989. 动力驱动矿液运移的若干问题与成矿预测. 地质力学所文集(9). 北京:地质出版社,47~58.
- 周勇,潘裕生. 1999. 阿尔金断裂早期走滑运动方向及其活动时间探讨. 地质论评,45(1):1~9.

References

Beach A. 1980. Retrogressive metamorphic processes in shear zones

- with special reference to the Lewisian complex. *Journal of Structural Geology*, 2(1/2): 257~263.
- Bonnemaison M, Marcoux E. 1990. Auriferous mineralization in some shear zone: A three-stage model of metallogenesis. *Mineral Deposits*, 25(2): 96~104.
- Borges F S, White S. 1980. Micro-structural and chemical studies of sheared anorthosites, Roneval, South Harris. *Journal of Structural Geology*, 2(1/2): 273~280.
- Boullier A M and Robert F. 1992. Palaeoseismic events recorded in Archean gold-quartz vein networks. *Journal of Structural Geology*, 14: 161~179.
- Boulter C A, Fotios M G, Phillips G N. 1987. The Golden Mile. Kalgoorlie, A giant deposit localized in ductile shear zones by structurally induced infiltration of an auriferous metamorphic fluid. *Economic Geology*, 82: 1661~1678.
- Boyle R W, 1979. The geochemistry of gold and its deposits. Ottawa: Geological Survey of Canada, Bulletin, 280.
- Brodie K H. 1980. Variations in mineral chemistry across a shear zones in phlogopite peridotite. *Journal of Structural Geology*, 2(1/2): 265~272.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang Uygur Autonomous Region. 1993. Regional geology of Xinjiang Uygur Autonomous Region. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Chen Bailin. 2000. The relationship between gold abundance and structural deformation in altered mylonite type gold deposits. *Mineral Deposits*, 19(1): 17~25 (in Chinese with English abstract).
- Chen Bailin, Dong Faxian, Li Zhongjian. 1998a. Experimental study on migration and accumulation of ore-forming elements under temperature and pressure. *Journal of Geomechanics*, 4(1): 72~77 (in Chinese with English abstract).
- Chen Bailin, Dong Faxian, Li Zhongjian. 1999. Metallogenic model of the ductile shear zone type of gold deposit. *Geological Review*, 45(2): 186~192 (in Chinese with English abstract).
- Chen Bailin, Dong Faxian. 1999. The relationship between rock deformation and mineral changes in ductile shear zone, Dabiewu, Jiangxi. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 19(1): 29~32 (in Chinese with English abstract).
- Chen Bailin. 2000b. Comparison of geological and geo-chemical characteristics between kinds of gold deposits related to ductile shear zone, *Geology-geochemistry*, 28(3): 24~30 (in Chinese with English abstract).
- Chen Bailin. 2001. Advances of study on gold deposits and mineralization. *Geological Review*, 47(1): 111~112 (in Chinese).
- Cui Junwen, Tang Zheming, Deng Jinfu, Yue Yongjun, Meng Linghun, Yu Qinfan, et al. 1999. Altun fault system. Beijing: Geological Publishing House, 1~249 (in Chinese with English abstract).
- Dong Faxian, Chen Bailin, Li Xiuzhen, Liu Xun, Cai Benjun. 1993. The structural control of gold deposit in Jiuling, Anhui, and vicinity and their further exploration. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Dong Faxian, Li Zhongjian, Chen Bailin, Wang Jianping. 1999. A study of high-temperature and high-pressure experiment of correlativity between deformation system of Au-bearing rocks and element adjustment. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 73(1): 40~46.
- Goldfarb R J, Moller L D, Leach D L. 1997. Gold deposits in metamorphic rocks in Alaska. *Economic Geology Monograph*, 9: 151~190.
- Hugon H. 1985. The Hemlo deposits: Gold mineralization within a dextral shear zone. Summary of field work, Ontario Geol. Survey, Miscellaneous Paper 119: 212~217.
- Jia Guozhi, Liang Haijun. 2000. Diagenetic mineralization in control of gold deposits in the Houshihua ductile shear zones—A case history of the Houshihua gold deposit in Wuchuan county, Inner Mongolia. *Geological Review*, 46(2): 131~140 (in Chinese with English abstract).
- Kerrick R. 1988. The formation of gold deposits with particular reference to Archean greenstone belts and Yellowknife. *Contrib. Geol. NW Territories (Canada)*, 3: 37~62.
- Kerrick R. 1989. Geodynamic setting and hydraulic regimes: Shear zone hosted mesothermal gold deposits. in: Brunell J T, ed. *Mineralization and Shear zones: Geological Association of Canada Short Course Notes* 6. 89~128.
- Kerrick R, Goldfarb R, Groves D, Garwin S, Jia Y. 2000. The characteristics, origins, and geodynamic setting of supergiant gold metallogenic provinces. *Science in China (series D)*, 43 (supplement): 1~68.
- Liu Jinghong. 1991. On the mechanism of mineralization in Archean gold-bearing shear zone. *Journal of Changchun University of Earth Science*, 21(2): 157~166 (in Chinese with English abstract).
- Ramsay J G. 1980. Shear zone geometry: A review. *Structural Geology*, 2: 83~99.
- Robert F, Brown A C. 1986. Archean gold-bearing quartz veins at the Sigma mine, Abitibi greenstone belt, Quebec. *Economic Geology*, 81: 578~616.
- Roberts R G. 1987. Ore deposit model # 11: Archean lode gold deposits. *Geo-science Canada*, 14(1): 37~52.
- Shao Shicai, Wang Dongbo. 1994. Geological and geochemical evidence for the genesis of altered fault rock type gold deposits in the Mount Xiong'er area, Henan. *Geological Review*, 40(6): 520~525 (in Chinese with English abstract).
- Shao Shicai. 1996. Discussion on the relationship between ductile shearing and mineralization of gold. *Journal of Precious Metallic Geology*, 5(2): 142~146 (in Chinese with English abstract).
- Sibson R H, Robert F, Poulsen K H. 1988. High-angle reverse faults, fluids pressure cycling and meso-thermal gold deposits. *Geology*, 16: 551~555.
- Sibson R H. 1977. Fault rocks and fault mechanism. *Geology. Soc. London*, 133: 191~213.
- Twiss R J. 1977. Theory and application of a recrystallized grain-size papeopiezometer. *Pure Appl. Geophys.*, 115: 227~244.
- Wang Xiaofeng, Wang Yanguo, Kang Zhenchung, Zhao Axing. 1989. Deformation and phase change of mineral under tectonic dynamic action. *Selected Papers on Geomechanics* (9). Beijing: Geological Publishing House. 187~201 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yuming. 1998. A new mechanism of gold precipitation and enrichment during ductile shear. *Geological Review*, 44(6): 643~648 (in Chinese with English abstract).
- Xu Shunshan, Yang Nong, Shun Qing. 1997. Metallogenic dynamic studies of the Wendeng gold deposit, Shandong province. *Mineral Deposits*, 16(3): 272~277 (in Chinese with English abstract).

- Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Zhangjianxin, Jiang Mei, Li Haibing, Cui Junwen. 1999. A comparison between the tectonic units on the two sides of the Altun sinistral strike-slip fault and the mechanism of lithospheric shearing. *Acta Geologica Sinica*, 73(3): 193~205 (in Chinese with English abstract).
- Yang Kaiqu. 1990. Estimation of paleotectonic stress and gold enrichment. *Guangdong Geology*. 5(1): 31~41 (in Chinese).
- Yang Mingzhi, Lu Guxian. 1996. The geology and geochemistry of gold deposits of greenstone belt in Jiadong district, China. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Yang Xiaoyong, Liu Deliang, Yang Xueming, Wang Kuiren, Dai Jinxing. 1998. Characteristics of compositional migration in mylonites from the ductile shear zones of the southern Tancheng-Lujiang fault belt, Eastern Anhui province. *Acta Geologica Sinica* (English Edition) 1998, 72(1): 37~50.
- Yin A, Gehrels G, Chen X. 1999. Evidence for 280 km of Cenozoic left slip motion along the eastern segment of the Altyn Tagh fault system, western China. *Eos Trans. AGU*, 80(17), FallMeet. Suppl., F1018.
- Yue Shi, Ma Rui. 1990. Experimental rock deformation and tectonometallization. Changchun: Jilin University Press.
- Yue Shi. 1991. Studies of the relationship between tectonism and petrogenesis and metallization in Hetai gold mine region, west Guangdong. *Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences*(23). Beijing: Geological Publishing House, 85~97 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jianxin, Xu Zhiqin, Cui Junwen. 1998. Deformation partitioning of ductile transpressional zones: an example from the eastern segment of the Altun fault zone. *Geological Review*, 44(4): 348~356 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Jiyuan, Cui Bingfang, Lu Yan. 1991. High *T-P* experiment due to tectonic force mineralization at Jinya gold deposit and its research significance. *Mineralogy and Petrology*, 11(3): 88~98 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Jiyuan, Cui Bingfang, Lu Yan. 1995. On dynamic mineralization. *Selected Papers on Geomechanics* (10). Beijing: Geological Publishing House. 69~75 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Jiyuan, Yu Zucheng, Mao Yuyuan, Lu Yan. 1989. Ore solution migration and prognostication. *Selected Papers on Geomechanics* (9). Beijing: Geological Publishing House. 47~58 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Yong, Pan Yusheng. 1999. The initial shear sense of the Altun fault and its timing. *Geological Review*, 45(1): 1~9 (in Chinese with English abstract).

Analysis of Ore-Controlling Structure of Ductile Shear Zone Type Gold Deposits in the Northern Altun Area, Northwestern China

CHEN Bailin¹⁾, CHEN Xuanhua¹⁾, WANG Xiaofeng¹⁾, YANG Feng²⁾, SANG Shaojie³⁾,
CHEN Zhengle¹⁾, WANG Kezhuo²⁾, WANG Yafei³⁾, YANG Yi²⁾, LI Xuezhai²⁾

1) *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100081*

2) *No. 1 Team of Xinjiang Geological Survey Research Institute, Urumqi, 830011*

3) *No. 2 Team of Xinjiang Geological Survey Research Institute, Shanshan, 838200*

Abstract

The ductile shear zone type gold deposits refer to those whose ore-forming mechanism and ore-controlling factors are closely related to the ductile shear zone and its evolution. Different ductile shear zones are well developed in the northern Altun area. The controls of ductile shear zone on gold deposits are as follows. (1) The regional distribution of gold deposits (and gold spots) is controlled by ductile shear zones. (2) The ductile-brittle shear zones formed in the evolution process of ductile shear zones both are as only ore-bearing structures and control the shape, attitude, scale and distribution of mineralization zones and orebodies. (3) The mechanical property of compression-shear ductile deformation determines that the main kind of gold mineralization is the altered mylonite type and main alteration is metasomatic. (4) Ore-bearing fracture systems are mainly P-type one and secondarily D-type and R-type ones, in addition R'-type and T-type one in one or two cases. (5) Dynamic differentiation and dynamic metamorphic hydrothermal solution resulting from ductile deformation is one of the sources of gold ore-forming fluids. And this is consistent with the idea drawn from the feature of fluid inclusion and geochemical characteristics of the deposit, i. e. ore-forming material resources are mainly from metamorphic rocks and ore-forming fluids are mainly composed of metamorphic water. (6) There is a negative correlation between the gold abundance and susceptibility anisotropy (P) of the altered mylonite samples from the deposits, which shows that the gold mineralization is a little later than the structural deformation. All above further expound the ore-forming model of the ductile shear zone type gold deposits.

Key words: analysis of ore-controlling structure; gold deposit; ductile shear zone; Altun Mountains