

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2019.25.S1.003

# 辽宁白云金矿床成矿构造与成矿结构面特征浅析

李德东, 王玉往, 张志超, 田野, 周国超, 解洪晶, 石煜  
(北京矿产地质研究院, 北京 100012)

**摘要:** 白云金矿是辽宁省青城子矿集区大型金矿床之一, 文章根据矿山资料及野外详细调查, 主要对矿区的成矿构造与成矿结构面进行了梳理。成矿构造主要为成矿期活动的断裂和褶皱, 利用侵入其中的含矿岩脉(石英斑岩、花岗斑岩、闪长玢岩和煌斑岩)确定成矿期断裂主要为近东西向、北西向和北东向断裂, 成矿期的褶皱主要为姚家岭—天桥岭—李家堡子倒转向斜, 该倒转向斜是青城子一带印支期岩浆活动形成的推覆构造形成; 成矿结构面主要分为四种, 即侵入岩与围岩接触面、层间断裂面或接触面、围岩断裂或裂隙面和水压致裂结构面, 并从力学角度分析了这四种结构面的产生机制。最后, 讨论了在强烈的由南向北挤压应力作用下, 含矿热液沿不同的张性裂隙侵位形成不同矿体样式。

**关键词:** 成矿构造; 成矿结构面; 白云金矿; 辽宁青城子

**中图分类号:** P618.51

**文献标识码:** A

## CHARACTERISTICS OF METALLOTECTONICS AND ORE-FORMING STRUCTURAL PLANE IN BAIYUN GOLD DEPOSIT, LIAONING

LI Dedong, WANG Yuwang, ZHANG Zhichao, TIAN Ye, ZHOU Guochao, XIE Hongjing, SHI Yu  
(Beijing Institute of Geology for Mineral Resources, Beijing 100012, China)

**Abstract:** The Baiyun gold deposit is one of the largest ore deposits in the Qingchengzi ore concentrated area, Liaoning. Characteristics of metallotectonics and ore-forming structural planes have been studied comprehensively, based on mineral exploration data and field investigation. Active fractures and folds in ore-forming period become the metalotectonic structures. Fractures can be divided into EW-, NW- and NE-ward fractures based on the injected dikes (such as quartz porphyry, granite porphyry, diorite porphyrite and lamprophyre), and fold is the Yaojialing-Tianqiaoling-Lijiapuzi inverted syncline formed by the thrust derived from Indosinian magmatic activities in Qingchengzi area. Ore-forming structural planes can be divided into four types, namely the contact interface between intrusive rock and surrounding rock, interlayer fracture and lithologic contact interface in the stratum, rock fracture or fissure planes and hydraulic fracturing structure planes. Moreover, formation mechanism of these structural planes was discussed. Finally, it is summarized that ore-bearing hydrothermal fluids flowed along different tensile fracture and formed different ore body patterns under the intense pressure from the south to the north.

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2018YFC0603804); 中国地质调查局地质调查项目(12120115034001)

**作者简介:** 李德东(1975-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事矿床学及找矿预测研究工作。E-mail: lidedong2005@126.com

**引用格式:** 李德东, 王玉往, 张志超, 等. 辽宁白云金矿床成矿构造与成矿结构面特征浅析 [J]. 地质力学学报, 2019, 25 (S1): 010-012 DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2019.25.S1.003

LI Dedong, WANG Yuwang, ZHANG Zhichao, et al. Characteristics of metallotectonics and ore-forming structural plane in Baiyun gold deposit, Liaoning [J]. Journal of Geomechanics, 2019, 25 (S1): 010-012 DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2019.25.S1.003

**Key words:** metallotectonics; ore-forming structural plane; Baiyun gold deposit; Qingchengzi in Liaoning province

辽宁省白云金矿床是青城子矿集区大型金矿床之一, 金矿的矿化类型主要为硅钾蚀变岩型、破碎带型、热液角砾型和石英脉型, 矿床的成因类型主要以岩浆热液型为主<sup>[1-2]</sup>。据相关学者对白云金矿床的构造研究, 认为推覆构造或推覆作用控制了矿体的分布<sup>[3]</sup>, 但这种推覆作用的力源并不明确。白云矿区内没有发现规模较大的成矿期岩体, 与成矿作用同期的大规模岩浆活动主要出现在青城子一带, 推测这种推覆作用的力源可能来自于青城子地区强烈的岩浆活动(如已有研究青城子推覆距离可达 10 km 以上<sup>[4]</sup>)。这种推覆作用可以使规模较大的块体沿断裂构造产生横向滑动, 并且可以使地层沿层间滑动面产生韧性剪切, 这种韧性剪切作用对白云矿床/矿体的空间分布起了控制作用<sup>[5-6]</sup>。韧性剪切带可划分为早期塑性流变、中期韧性剪切和后期脆性断裂, 而脆

性断裂是直接的控矿构造<sup>[7]</sup>。剪切带的控矿作用可能主要是韧性剪切带中的液压扩容作用<sup>[8]</sup>。尽管相关学者对白云金矿的控矿构造进行了研究, 但对成矿构造和成矿结构面没有进行系统研究, 以及两者之间的关系没有分析, 无法精确指导下一步找矿方向。文章主要通过白云矿区的成矿构造和成矿结构面特征进行梳理, 探讨构造对成矿的控制作用。

## 1 区域构造背景

辽宁白云金矿床位于青城子铅锌-金-银多金属矿集区的北部, 大地构造位置属于华北地台东北部(图 1a), 郯庐断裂带东侧, 狼林地块和龙岗地块之间的辽东裂谷带的中段(图 1b), 营口—宽甸隆起的北部, 营口—草河口复背斜的南翼(图 1)。

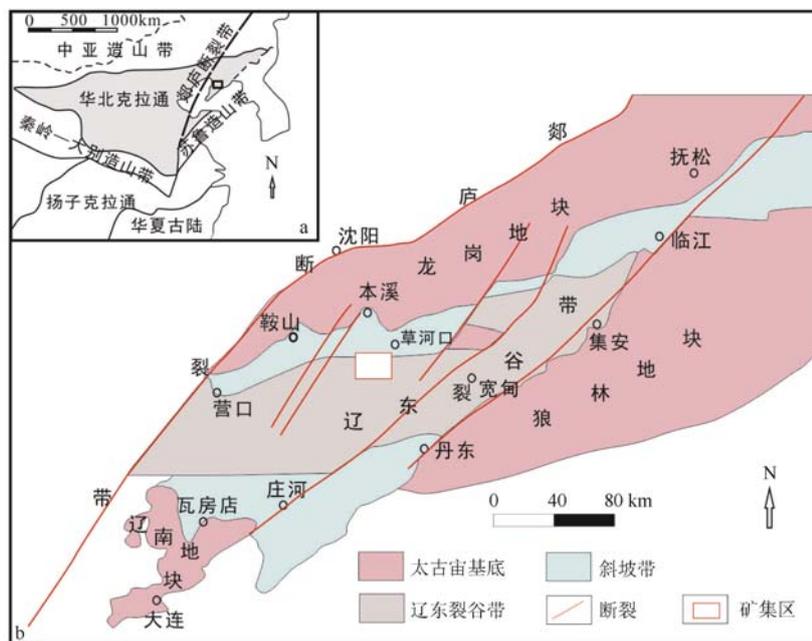


图 1 辽宁东部区域构造地质简图(据文献[9]修改)

Fig. 1 Regional tectonic diagram in eastern Liaoning (modified from [9])

青城子矿集区的主要构造为辽东裂谷发展过程中形成的断裂和褶皱构造, 形成了断裂与褶皱共同组成的错综复杂的构造体系。断裂的形成是在早元古宙华北克拉通化基底上发展起来的<sup>[10]</sup>, 形成了近东西向和北东向的深大断

裂, 构成具有菱形格状断裂构造体系<sup>[11]</sup>。与成矿密切相关的断裂主要有北东向断裂(二道沟断裂)、北东东方向断裂(朱(家堡子)—罗(圈背)断裂)、北西向断裂(于上沟断裂)和尖山子断裂(图 2)。



图2 辽宁青城子地区矿产地质简图 (据文献 [1] 修改)

Fig.2 Mineral geological structure map in Qingchengzi ore concentrated area (modified from [1])

青城子矿集区的褶皱主要是东西向的区域性褶皱和一系列北西西向的褶皱<sup>[12]</sup>以及一系列北北东向褶皱<sup>[13]</sup>。从北至南有白云山背斜、古洞沟背斜、新岭背斜、榛子沟背斜、石湖沟—青城子向斜、西青台峪—青城子向斜、王家堡子向斜等。与成矿密切相关的褶皱主要有新岭背斜、尖山子向斜和榛子沟背斜 (图2)。

从矿床的分布位置来看,青城子地区的铅锌矿床主要分布在双顶沟岩体和新岭岩体之间,金银矿床主要集中于岩体(双顶沟—新岭)与尖山子断裂之间,特别靠近尖山子断裂,矿床种类具有由西向东的分带特征,即铅(锌)矿→锌(铅)矿→银(铅锌金)矿→金矿。从构造上,矿床主要集中分布在北西向尖山子断裂和北东向二道沟

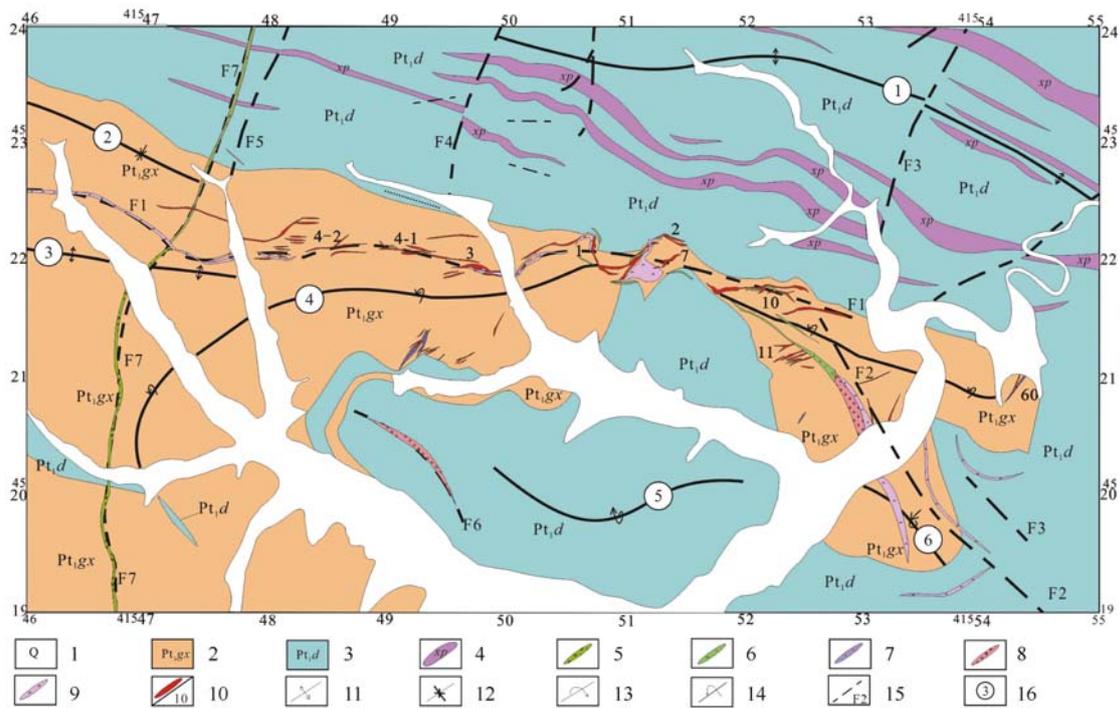
断裂与南部北东东向朱(家堡子)一罗(圈背)断裂之间, 铅锌矿多集中于北西向青城子断裂(于上沟断裂)与头道沟向斜、榛子沟背斜的交汇处, 并具有沿背/向斜的轴部集中分布特征, 而金银矿床多分布在背/向斜与大断裂的交汇处, 如大部分矿床主要沿尖山子断裂与各背/向斜的交汇地区分布, 比如小佟家堡子金矿、杨树金矿就位于北西向尖山子断裂与近东西向榛子沟背斜的交汇部位, 白云金矿床就位于北西向尖山子断裂与近东西向白云山背斜(南翼)的交汇部位(图2)。

## 2 矿区成矿构造

白云矿区的构造同样经历了复杂的变化过程, 形成了一系列的褶皱和断裂。矿区内主体构造以

近东西向为主, 发育一系列的褶皱和韧-脆性推覆构造, 另外, 还发育有北西、北东、南北向的断裂构造等。

矿区的成矿构造主要是在早期构造基础上发展起来的构造, 这些早期构造主要是一些背斜和向斜, 如白云山背斜、姚家沟一天桥沟一李家堡子向斜、苏家堡子背斜等。这些褶皱在成矿期由于南北向的挤压应力使这些近东西向的褶皱发生了翻卷甚至倒转。明显发生倒转的姚家沟一天桥沟一李家堡子倒转向斜是矿区最明显的一条成矿构造, 这条倒转向斜西端与阳沟里向斜和阳沟一石湖沟背斜相接, 东端与顾家堡子倒转向斜、苏家堡子倒转背斜相接, 形成一条近东西向的推覆构造带, 矿区的重要矿体均位于这条推覆构造带中(图3)。



1—第四系砂砾岩; 2—盖县组片岩; 3—大石桥组大理岩; 4—斜长角闪岩; 5—辉长岩; 6—闪长玢岩; 7—煌斑岩; 8—花岗斑岩; 9—石英斑岩; 10—矿体及编号; 11—背斜; 12—向斜; 13—倒转背斜; 14—倒转向斜; 15—断层及编号; 16—褶皱编号  
褶皱: ①—白云山背斜; ②—阳沟里向斜; ③—阳沟—石湖沟背斜;  
④—姚家沟一天桥沟一李家堡子倒转向斜; ⑤—苏家堡子倒转背斜; ⑥—顾家堡子倒转向斜  
断裂: F1—荒甸子—白云—于家堡子断裂; F2—尖山子断裂; F3—王家堡子—车头岭断裂;  
F4—五羊沟断裂; F5—阳沟断裂; F6—云山断裂; F7—牛圈子—青城子断裂

图3 辽宁省白云金矿床构造地质图(据文献[14]修改)

Fig. 3 Tectonic geological map of the Baiyun gold mine (modified from [14])

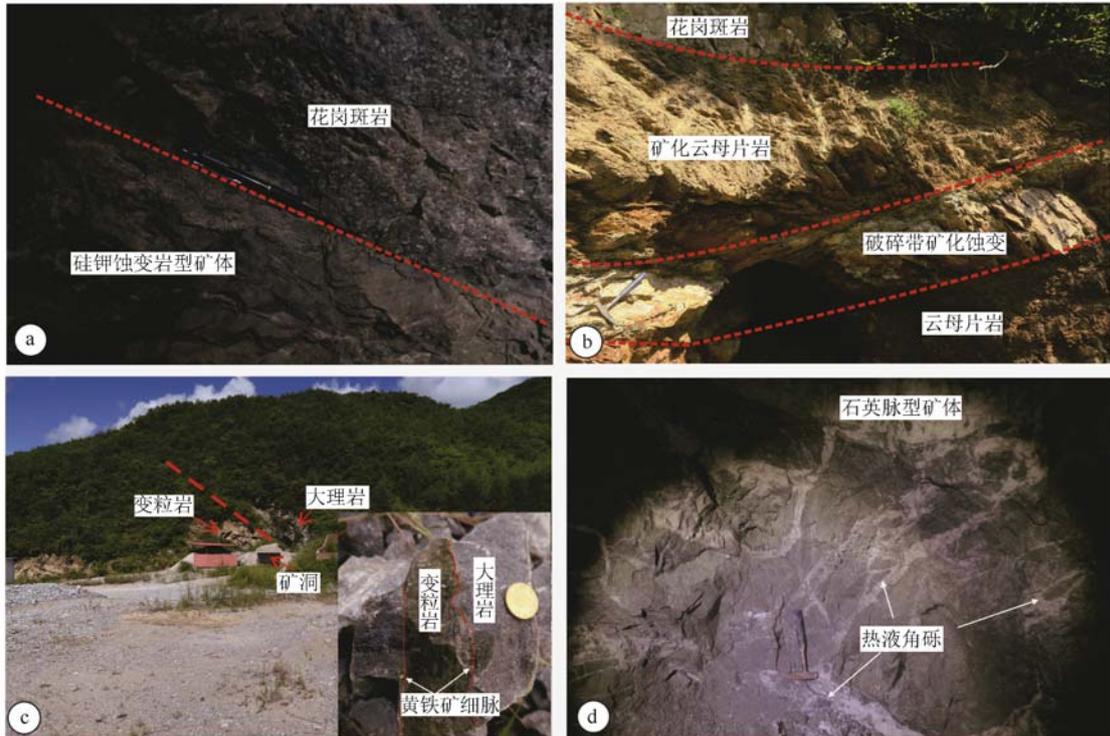
此外, 矿区的成矿构造还包括一些断裂构造, 但这些断裂构造的影响范围均受控于这条推覆构造带, 并且这些断裂多被宽成分谱系岩脉充填,

主要为石英斑岩、花岗斑岩、闪长玢岩和煌斑岩等, 最明显的特征是这些岩脉大多已发生矿化蚀变。

### 3 成矿结构面特征

金矿床矿体样式主要可分为破碎带型、硅钾

蚀变岩型、石英脉型、热液角砾岩型。其主要成矿结构面也有四种,即侵入岩与地层接触面(可包括侵入岩引起的破碎带控制面)、围岩层间断裂(界面)结构面、围岩断裂或裂隙结构面、水压致裂结构面(图4)。



a—硅钾蚀变岩型矿体的花岗斑岩与片岩接触面; b—构造破碎带型矿体的花岗斑岩与片岩接触面;  
c—围岩地层大理岩与变粒岩接触面; d—石英脉岩型矿体的围岩中的热液脉和角砾型结构面

图4 白云矿区矿体成矿结构面类型野外照片

Fig. 4 Field photos of orebodies and metallogenic structural planes

侵入岩与围岩地层接触面。在白云矿区,各类脉岩与矿体有着密切的空间关系,矿体往往产于岩脉与围岩接触面处,若岩脉侵入后围岩没有产生明显破碎,那么成矿流体贯入这种结构面往往形成硅钾蚀变岩型,如白云—荒甸子坑道内可见大量的花岗斑岩,并且花岗斑岩的下盘往往就是硅钾蚀变型(原岩为云母片岩)矿化体(图4a)。若岩脉侵入后围岩形成破碎,则可形成破碎带型矿体,如顾家堡子矿区见花岗斑岩与围岩片岩接触带处有矿化蚀变及破碎带矿化现象(图4b)。此外,在钻孔中也发现这类结构面,如ZK074-29孔中煌斑岩与围岩的接触面也可成为矿体的成矿结构面(图5a),ZK050-17孔中金矿体产于花岗斑岩与围岩接触面(图5b)等。

层间断裂(界面)结构面。主要为大石桥组

和盖县组的层间断裂面或岩性界面,形成硅钾蚀变岩型矿体,如在苏家堡子矿区发现矿体产于大理岩与变粒岩的接触面处,可见变粒岩与大理岩接触界面处的黄铁矿细脉(图4c)。此外,在钻孔中也发现此类结构面,如ZK064-3中矿化发生在大理岩和片岩的接触面(图5c)。

围岩断裂或裂隙结构面。这样的结构面比较复杂,局部往往没有规律性,整体上是受区域应力场控制,它可以是区域断裂产生的次级断裂,也可以是围岩地层由于区域构造应力作用产生的脆性破裂,还可以是由于岩浆岩体(或岩脉)侵入造成的围岩裂隙或岩体与围岩的接触面。另外,还有一种情况是成矿流体自身由于内压力使围岩破裂产生的裂隙。这些裂隙均可以作为成矿流体贯入的成矿空间,往往形成石英脉型矿体,或规

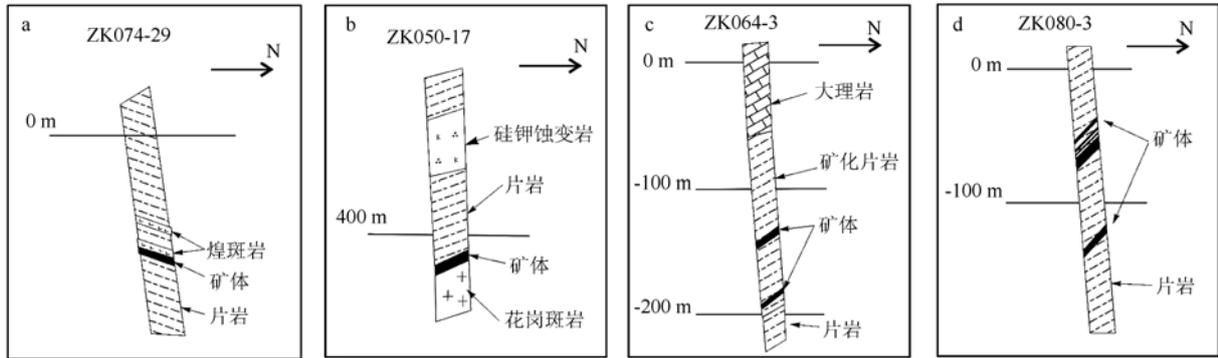
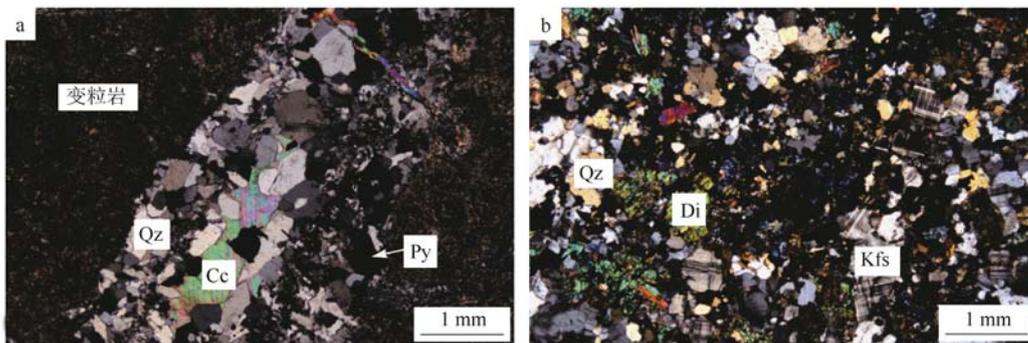


图 5 白云金矿矿区矿体成矿结构面钻孔简图  
Fig. 5 Metallogenic structural plane maps of drill holes

模较大的网脉状矿体。如在白云—荒甸子矿区坑道内发现石英脉型金矿体以及围岩破裂中形成的矿体 (图 6d), 在钻孔中也发现了这样的结构面, 如白云荒甸子矿区 084 线 71 号、72 号、73 号矿体

和 080 线 60-1 号、60-2 号、60-3 号矿体 (图 5d) 侵入围岩裂隙中。这种结构面的矿体往往充填有大量的石英、方解石和硫化物 (主要为黄铁矿) (图 6a), 并且可使围岩发生明显的硅钾蚀变 (图 6b)。



Qz—石英; Cc—方解石; Py—黄铁矿; Kfs—钾长石; Di—透辉石

图 6 白云矿区围岩裂隙矿化和硅钾蚀变岩显微特征

Fig. 6 Fractal mineralization in surrounding rocks and silicon-potassium altered features in the Baiyun mine

水压致裂型结构面。这种结构面是成矿流体因内压力较大使围岩产生破裂所致, 大多数角砾具有可拼合性, 这里也包括成矿流体在较大的内压力作用下侵入破碎的断裂带形成的破碎角砾矿化, 更强调了这种流体内压作用的强度, 由于巨大的流体内压作用于围岩, 使围岩产生放射状裂隙和破碎, 产生热液角砾状矿化现象, 并且胶结物为成矿热液 (图 4d)。

## 4 讨论

### 4.1 矿区控岩构造与控矿构造关系

在白云矿区, 大规模的岩体没有出露, 但发

育众多的各类岩脉, 主要有石英斑岩、花岗斑岩、闪长玢岩、辉长岩、煌斑岩等组成一套基性—中性—酸性的宽成分谱系岩脉群, 控制这些岩脉产出的构造主要是断裂。由于白云金矿的载金矿物黄铁矿的 Re-Os 等时线年龄 (225.3 Ma ± 7.0 Ma) 为印支期<sup>[15]</sup>, 因此印支期形成的构造以及印支期活动的构造可能为成矿构造。目前, 通过高精度定年确定为印支期的主要有石英斑岩和花岗斑岩<sup>[16-17]</sup>。通过野外详细调查岩脉的穿插关系, 推测岩脉侵位的先后顺序为花岗斑岩—石英斑岩—闪长玢岩—煌斑岩—二长斑岩, 这些岩脉为同期不同阶段产物<sup>[14]</sup>。张朋等<sup>[18]</sup>对青城子地区煌斑岩脉进行了定年, 获得 226 ~ 227 Ma 的年龄, 由于白

云矿区的煌斑岩与他们测试的榛子沟煌斑岩从矿物组成、结构和成分均相似，故推测它们是同期形成的。从野外可以明显观察到煌斑岩和闪长玢岩至少可分为成矿前和成矿后两期，而花岗斑岩和石英斑岩均不同程度受到矿化蚀变，因此控制花岗斑岩和石英斑岩的成岩构造也是成矿构造。

花岗斑岩在矿区主要出露于顾家堡子—荒甸子一带，走向北西，推测岩浆侵入北西向尖山子断裂的次级断裂形成，因此北西向的断裂特别是与花岗斑岩近平行的断裂也是重要的控矿构造。

石英斑岩在矿区出露规模较大，走向近东西向，基本上侵入于近东西向的韧性剪切带内，矿区内的矿体也主要分布在东西向的这条韧性剪切带内，并且石英斑岩往往成为矿体的上下盘围岩，因此东西向的韧性剪切带既是控岩构造也是重要的控矿构造。

#### 4.2 成矿构造力学分析

从矿区的褶皱构造形迹来看，阳沟里向斜、阳沟—石湖沟背斜、苏家堡子翻卷背斜、顾家堡子翻卷向斜等四个背、向斜规模均较小。其中阳沟里向斜与阳沟—石湖沟背斜应为同一应力作用下的产物，是受北北东或近南北向挤压应力作用形成。苏家堡子倒转背斜同样也是处于近南北向或北西向挤压应力的产物。而顾家堡子倒转向斜，其轴面向北东倾斜，结合钻孔资料揭示深部地层和矿体均向南倾斜，故推测其受力来源应为由南东至北西方向，这个方向力的作用也可以使苏家堡子背斜发生倒转，并且可以使姚家沟—天桥沟—李家堡子倒转向斜在姚家堡子—荒甸子段产生倒转（图7）。以矿区规模最大的姚家岭—天桥岭—李家堡子倒转向斜为例，它的轴线方向与东西向F1韧性剪切带是相平行的，因此推测这条倒转向斜与东西向的韧性剪切带为同一应力作用下的产物。这种推覆作用的力源可能来自于区域上印支期岩浆岩体侵位时产生的由南向北的挤压作用<sup>[19]</sup>，与以往研究青城子推覆构造（包含褶皱推覆+韧性剪切带）作用相似<sup>[4]</sup>，但以往研究的推覆作用力的方向为由北东至南西向，可能印支期的构造变形作用力与古元古代的变形作用力不同，还需要详细研究两者的异同。因为青城子地区印支期岩浆活动比较强烈，形成规模较大的岩体，如双顶沟岩体、新岭岩体和周围一些岩脉<sup>[9,18,20]</sup>，假设印支期的岩浆活动使围岩地层产生较大的推

覆作用力，当这些岩浆岩侵位时由于东南部辽吉花岗岩基的阻挡使围岩地层产生一种向北的挤压应力（反作用力），又因规模较大的先期断裂的存在，如北西向的尖山子断裂，限定了应力传递的范围，致使产生北西向的推覆作用，而大规模岩浆活动的北部（青城子以北）没有较大规模的先期岩体的阻挡，可以较顺利地把这种推覆作用力向北传递，因此白云地区表现出来的推覆构造形迹是来自近南北向和北西向的推覆作用力的双重作用形成。Liu et al.<sup>[21]</sup>利用变质核杂岩中独居石的U-Th-Ub和白云母的Ar-Ar年龄印证了辽东地区存在着印支期的变质变形作用，佐证了以上推测。含矿流体利用推覆作用产生的张性空间（层间断裂）进行侵位，说明矿区近东西向断裂的深部可能是由倒转向斜的轴部或下翼张裂引起（图7a），这与青城子褶皱推覆体构造形成机制<sup>[4]</sup>是相同的。由于从南向北的推覆作用非常强大<sup>[5]</sup>，使向斜轴部产生向南倾的产状，向斜的南北翼发生倾斜甚至倒转，南翼在推覆作用下可以产生沿倾斜面向上逆冲的趋势（图7b）。在这种巨大的动力作用下，在挤压最强烈的构造部位最容易富集成矿<sup>[22]</sup>。不同岩性的地层之间可以产生相对剪切作用形成层

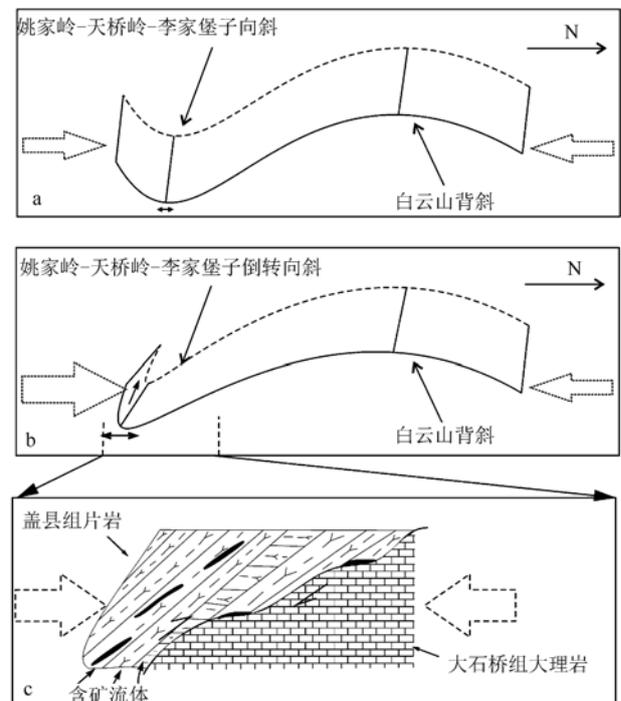


图7 白云矿区构造应力与含矿流体侵位模式图  
Fig. 7 The model of structural stress and ore-bearing fluids intrusion in the Baiyun mine

间断裂(张性空间),含矿流体侵位时利用了这种张性空间<sup>[23-24]</sup>,形成雁列式分布矿体(如矿区 0 线和 060 线中的矿体)。在盖县组片岩与大石桥组大理岩接触界面处,由于剪切作用产生的张剪裂隙也更容易形成界面处的矿体(图 7c)。

此外,由于花岗斑岩、闪长玢岩和石英斑岩的侵入使围岩产生局部裂隙,再加上岩脉侵位后由于自身的冷却体积缩小,产生岩脉与围岩接触面的构造薄弱面(这些结构面的力学性质均为张性),这些张性空间均是成矿流体容易贯入的理想场所,类似于连通管的模型<sup>[25-27]</sup>,形成了上文介绍的不同形式的成矿结构面。

#### 4.3 成矿结构面的力学分析

正如上文所述,白云矿区的成矿结构面主要有四种类型,既侵入岩与围岩接触面、不同岩性层间接触界面、围岩断裂或裂隙结构面和水压致裂结构面,产生这些结构面的力学性质略有不同。

侵入岩与围岩的接触界面。白云矿区印支期的侵入岩主要为一些岩脉,有花岗斑岩、闪长玢岩、煌斑岩、石英斑岩等。这些岩脉与围岩的接触面往往成为含矿流体的通道,它们的力学性质通常为张性。其原因是由于岩脉冷却后体积缩小,使岩脉与围岩之间形成薄弱面<sup>[25]</sup>。此外,如果岩浆侵位时具有较大的内压,可以对围岩产生明显的挤压作用,使围岩形成一些微裂隙(图 8a),这种机制与断层中由于流体压力可以提高渗透率<sup>[28]</sup>是一致的,这些结构面的形成最容易导致形成“真空泵”,在泵吸作用下含矿流体沿岩脉与围岩的接触面进入并大量渗透到含大量微裂隙的围岩中,形成规模较大的硅钾蚀变带。理想状态下,岩脉若垂直侵入围岩裂隙,其两侧围岩形成的微小裂隙几乎是均等的(把围岩视为各向同性体),因此含矿流体可能会形成对称的两个矿化蚀变带。

然而,这种理想状态现实中很难发现,多数情况岩脉侵位是缓倾斜状,那么它对其下盘围岩的作用力较上盘大一些,因此下盘围岩形成的微裂隙密度大(图 8a),并且岩脉在冷却过程中其热的传递方向也因浅部温度梯度大而偏向上盘,类似于倾斜断层上盘热流值非常高的模拟结果<sup>[29]</sup>,故岩脉与下盘围岩之间形成的冷却裂隙(接触界面)较早,含矿流体就会沿下盘接触界面(通道)贯入,并大量渗透到下盘高密度裂隙的围岩中,形成宽度较大的矿化蚀变带,有的下盘围岩产生了破碎。当规模较大的岩脉侵入围岩并完全冷却后,含矿流体也可以侵位于其上盘与围岩的接触界面处。因此,这类成矿结构面的力学性质当岩脉侵位时由于岩浆内压使结构面具有压性,冷却后结构面具有张性,而形成围岩中的微裂隙是具有不同方向的张性空间,被热液充填后这些接触面又具有挤压性质(图 8a),这与高建伟等<sup>[30]</sup>在山东金翅岭金矿测量控矿断裂经历了成矿前挤压—成矿期拉张—成矿后挤压应力方向的转换是相一致的。

不同岩性层间接触界面。白云矿区这类接触界面主要为盖县组片岩与大石桥组大理岩之间的接触界面。因岩性不同,两者之间的接触界面应属于物理界面,其力学性质主要为压性或压剪性。若岩层为水平状态,那么上覆岩层对下伏岩层只具有压实作用,其接触面附近常发育有较多的垂直于接触面的原生裂隙<sup>[31]</sup>,接触界面的力学性质为压性;但若岩层发生了倾斜,那么岩层之间的接触界面就存在着压剪性(图 8b)。因此,其下盘岩层可能会产生较多的微小裂隙。相对于大理岩层来说,片岩或变粒岩层具有较弱的物理性质<sup>[32]</sup>,因此下盘为片岩或变粒岩层时,更容易产生剪切裂隙<sup>[33]</sup>,这与单轴实验受压的软弱岩石通常表现为剪切破坏,硬岩则以拉张破坏为主<sup>[34]</sup>相一致,

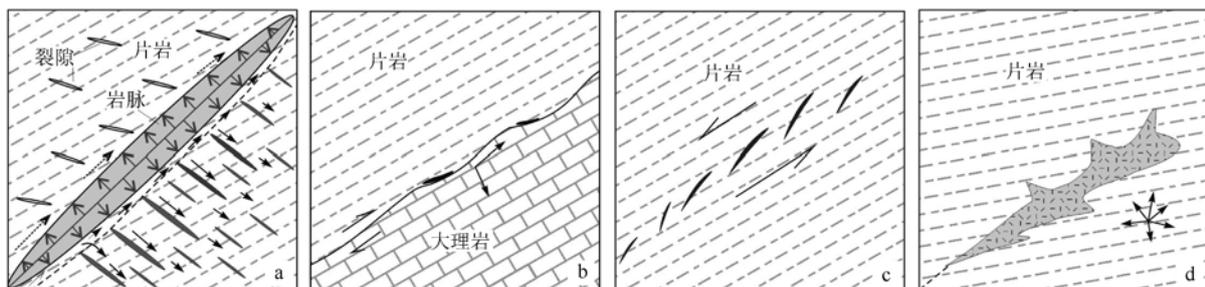


图 8 成矿结构面力学分析简图

Fig. 8 Mechanical analysis of metallogenic structural planes in the Baiyun mine

含矿流体更容易对其进行蚀变,因此这种结构面具有压剪性质。

围岩断裂或裂隙结构面。这类结构面主要因围岩形成后由于后期构造作用形成的裂隙,这些裂隙多为压扭性<sup>[33]</sup>,含矿流体贯入这样的裂隙形成雁列式矿脉或透镜状矿体(图8c)。这样的结构面单位面积内出现越多,则矿化程度越好,因此可以利用断裂或裂隙的密度大小来预测矿化的强弱<sup>[35]</sup>。

水压致裂型结构面。这类结构面归因于含矿流体的内压力较大,或由于含矿流体中具有大量挥发分,当贯入围岩裂隙时因压力突然降低,流体中的挥发分由于压力降低迅速达到过饱和释放出来,形成巨大的扩容作用,使围岩碎裂(图8d)。除此之外,水压致裂实验研究<sup>[36-37]</sup>发现,水压致裂容易发生在物理性质较弱的岩石中,并且这些裂隙主要为剪切破裂。片岩和变粒岩相比大理岩具有物理性质较弱的特性<sup>[32]</sup>,因此这种结构面最容易发生在这些岩层中,含矿流体胶结这些碎裂围岩,形成水压致裂结构面。这种结构面的力学性质为近场应力作用,没有固定方向性,离开这个区域就恢复为远场应力作用环境。

## 5 结论

综上所述,白云矿区的成矿构造主要以印支期断裂构造为主,控岩构造与成矿构造既有联系又有区别。矿区内印支期的控岩构造主要为近东西向和北西向的断裂,由于花岗斑岩和石英斑岩与矿体空间关系密切,因此它们的控岩构造也是成矿构造。在南部(青城子一带)大规模岩浆活动产生的强大推覆作用下,在盖县组片岩与大石桥组大理岩之间形成的构造滑动界面以及岩体(主要是岩脉)侵位形成的围岩裂隙和与围岩接触处的张性空间都是矿体赋存的理想场所,形成了不同类型的成矿结构面。

**致谢:**野外工作得到白云金矿齐恩波高工、李太阳科长和李安工程师的帮助,辽宁有色地质局一〇三队刘福兴总工、孙国强教授级高工和李生辉高工提供了大量的矿床勘查资料,以及两位审稿人的建设性建议,在此一并表示感谢!

### 参考文献/References

[1] 王玉往,解洪晶,李德东,等. 矿集区找矿预测研究——以

辽东青城子铅锌-金-银矿集区为例[J]. 矿床地质, 2017, 36(1): 1-24.

WANG Yuwang, XIE Hongjing, LI Dedong, et al. Prospecting prediction of ore concentration area exemplified by Qingchengzi Pb-Zn-Au-Ag ore concentration area, eastern Liaoning Province [J]. Mineral Deposits, 2017, 36(1): 1-24. (in Chinese with English abstract)

[2] 郝立波,赵昕,赵玉岩. 辽宁白云金矿床稳定同位素地球化学特征及矿床成因[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2017, 47(2): 442-451.

HAO Libo, ZHAO Xin, ZHAO Yuyan. Stable isotope characteristics and ore genesis of the Baiyun gold deposit, Liaoning Province [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2017, 47(2): 442-451. (in Chinese with English abstract)

[3] 郎福全,陈贺,刘恒刚. 辽宁凤城白云金矿床地质特征及找矿方向[J]. 黄金, 2007, 28(11): 16-20.

LANG Fuquan, CHEN He, LIU Henggang. Geologic characteristics and ore prospecting orientation of Baiyun gold deposit in Liaoning Province [J]. Gold, 2007, 28(11): 16-20. (in Chinese with English abstract)

[4] 杨振升,刘俊来. 辽东早元古宙变质岩系中的一个推覆构造——青城子褶皱推覆构造[J]. 长春地质学院学报, 1989, 19(2): 121-129.

YANG Zhensheng, LIU Junlai. Nappe tectonics in the Proterozoic complexes in Liaodong Peninsula, China——An example of fold-nappe from Qingchengzi [J]. Journal of Changchun University of Earth Science, 1989, 19(2): 121-129. (in Chinese with English abstract)

[5] 张宝华,屈奋雄,张鹏程,等. 论韧性剪切带对金矿的控制规律——以辽宁省白云金矿为例[J]. 地质找矿论丛, 1996, 11(1): 8-17.

ZHANG Baohua, QU Fenxiong, ZHANG Pengcheng, et al. The control of ductile shear zones on gold mineralization——an example from Baiyun gold deposit, Liaoning Province [J]. Contribution to Geology and Mineral Resources Research, 1996, 11(1): 8-17. (in Chinese with English abstract)

[6] 杨新库. 对辽宁白云金矿床地质特征及深部找矿的新认识[J]. 地质与资源, 2011, 20(2): 111-114.

YANG Xinku. The new understanding to the geologic characteristics and deep exploration of the Baiyun gold deposit in Liaoning Province [J]. Geology and Resources, 2011, 20(2): 111-114. (in Chinese with English abstract)

[7] 王富春. 辽宁白云金矿床的控矿构造特征[J]. 黄金, 2002, 23(5): 4-7.

WANG Fuchun. The tectonic characteristics of Baiyun gold deposit, Liaoning Province [J]. Gold, 2002, 23(5): 4-7. (in Chinese with English abstract)

[8] 刘俊来. 韧性剪切带中含石英英脉的就位机制[J]. 吉林地质, 1993, 12(3): 16-23.

LIU Junlai. The emplacement mechanism of auriferous quartz in the ductile shear zones [J]. Jilin Geology, 1993, 12(3):

- 16–23. (in Chinese with English abstract)
- [ 9 ] YU G, CHEN J F, XUE C J, et al. Geochronological framework and Pb, Sr isotope geochemistry of the Qingchengzi Pb–Zn–Ag–Au orefield, Northeastern China [ J ]. *Ore Geology Reviews*, 2009, 35 ( 3–4 ): 367–382.
- [ 10 ] 陈荣度. 辽东裂谷的地质构造演化 [ J ]. *中国区域地质*, 1990, ( 4 ): 306–316.  
CHEN Rongdu. The tectonic evolution of the Liaodong rift [ J ]. *Regional Geology of China*, 1990, ( 4 ): 306–316. (in Chinese with English abstract)
- [ 11 ] 骆辉, 李俊建. 辽东裂谷 Au、Ag、Pb、Zn、Cu、Co 金属矿床地质特征和成矿条件 [ J ]. *前寒武纪研究进展*, 2002, 25 ( 3–4 ): 240–245.  
LUO Hui, LI Junjian. Geological features of Au, Ag, Pb, Zn, Cu and Co ore deposits and its forming conditions in the Eastern region of Liaoning Province, China [ J ]. *Progress in Precambrian Research*, 2002, 25 ( 3–4 ): 240–245. (in Chinese with English abstract)
- [ 12 ] CHEN Y J, GUO G J, LI X. Metallogenic geodynamic background of Mesozoic gold deposits in granite–greenstone terrains of North China Craton [ J ]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 1998, 41 ( 2 ): 113–120.
- [ 13 ] 李三忠, 刘建忠, 赵国春, 等. 华北克拉通东部地块中生代变形的关键时限及其对构造的制约——以胶辽地区为例 [ J ]. *岩石学报*, 2004, 20 ( 3 ): 633–646.  
LI Sanzhong, LIU Jianzhong, ZHAO Guochun, et al. Key geochronology of Mesozoic deformation in the eastern block of the North China Craton and its constraints on regional tectonics: a case of Jiaodong and Liaodong Peninsula [ J ]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20 ( 3 ): 633–646. (in Chinese with English abstract)
- [ 14 ] 李德东, 王玉往, 周国超, 等. 辽宁白云金矿区岩脉与成矿作用浅谈 [ J ]. *矿产勘查*, 2016, 7 ( 1 ): 113–119.  
LI Dedong, WANG Yuwang, ZHOU Guochao, et al. Preliminary analysis of the relationship between dikes and gold mineralization in Baiyun gold deposit, Liaoning [ J ]. *Mineral Exploration*, 2016, 7 ( 1 ): 113–119. (in Chinese with English abstract)
- [ 15 ] 张朋, 李斌, 李杰, 等. 辽东裂谷白云金矿载金黄铁矿 Re–Os 定年及其地质意义 [ J ]. *大地构造与成矿学*, 2016, 40 ( 4 ): 731–738.  
ZHANG Peng, LI Bin, LI Jie, et al. Re–Os isotopic dating and its geological implication of gold bearing pyrite from the Baiyun gold deposit in Liaodong rift [ J ]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2016, 40 ( 4 ): 731–738. (in Chinese with English abstract)
- [ 16 ] 周国超, 王玉往, 李德东, 等. 辽东白云金矿区脉岩锆石的 U–Pb 年代学研究 [ J ]. *矿物岩石地球化学通报*, 2017, 36 ( 4 ): 620–627.  
ZHOU Guochao, WANG Yuwang, LI Dedong, et al. LA-ICP-MS zircon U–Pb dating of dykes from the Baiyun gold deposit in Eastern Liaoning [ J ]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2017, 36 ( 4 ): 620–627. (in Chinese with English abstract)
- [ 17 ] LIU J, LIU F X, LI S H, et al. Formation of the Baiyun gold deposit, Liaodong gold province, NE China: Constraints from zircon U–Pb age, fluid inclusion, and C–H–O–Pb–He isotope [ J ]. *Ore Geology Reviews*, 2019, 104: 686–706.
- [ 18 ] 张朋, 赵岩, 寇林林, 等. 辽东青城子矿田煌斑岩锆石 U–Pb 年龄及其地质意义 [ J ]. *东北大学学报 ( 自然科学版 )*, 2016, 37 ( 7 ): 1056–1060.  
ZHANG Peng, ZHAO Yan, KOU Linlin, et al. Zircon U–Pb dating and its geological significance of lamprophyres from Qingchengzi orefield, Liaodong [ J ]. *Journal of Northeastern University ( Natural Science )*, 2016, 37 ( 7 ): 1056–1060. (in Chinese with English abstract)
- [ 19 ] 耿国建, 马宝军, 丛颖, 等. 辽宁青城子逆冲推覆构造变形与金矿控矿作用探讨 [ J ]. *黄金科学技术*, 2016, 24 ( 4 ): 26–31.  
GENG Guojian, MA Baojun, CONG Ying, et al. Discussion on the Thrust Nappe structure deformation of Qingchengzi and gold ore-controlling, Liaoning Province [ J ]. *Gold Science and Technology*, 2016, 24 ( 4 ): 26–31. (in Chinese with English abstract)
- [ 20 ] DUAN X X, ZENG Q D, YANG J H, et al. Geochronology, geochemistry and Hf isotope of Late Triassic magmatic rocks of Qingchengzi district in Liaodong peninsula, Northeast China [ J ]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 91: 107–124.
- [ 21 ] LIU F L, WANG F, LIU J G, et al. Mid–Late Triassic metamorphic event for Changhai meta-sedimentary rocks from the SE Jiao–Liao–Ji Belt, North China Craton: Evidence from monazite U–Th–Pb and muscovite Ar–Ar dating [ J ]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 94: 205–225.
- [ 22 ] 徐英奎. 论辽宁凤城白云金矿床动力成矿作用 [ J ]. *中国地质科学院沈阳地质矿产研究所所刊*, 1991, 23: 79–88.  
XU Yingkui. The origin of gold ore deposits in Fengcheng county, Liaoning Province [ J ]. *Bulletin of Shenyang Institute of Geological and Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences*, 1991, 23: 79–88. (in Chinese with English abstract)
- [ 23 ] MICKLETHWAITE S, SHELDON H A, BAKER T. Active fault and shear processes and their implications for mineral deposit formation and discovery [ J ]. *Journal of Structural Geology*, 2010, 32 ( 2 ): 151–165.
- [ 24 ] KIM Y S, SANDERSON D J. Inferred fluid flow through fault damage zones based on the observation of stalactites in carbonate caves [ J ]. *Journal of Structural Geology*, 2010, 32 ( 9 ): 1305–1316.
- [ 25 ] 李德东, 罗照华, 周久龙, 等. 岩墙厚度对成矿作用的约束: 以石湖金矿为例 [ J ]. *地学前缘*, 2011, 18 ( 1 ): 166–178.  
LI Dedong, LUO Zhaohua, ZHOU Jiulong, et al. Constraints of dike thicknesses on the metallogenesis and its application to the Shihu gold deposit [ J ]. *Earth Science Frontiers*, 2011, 18

- (1): 166 – 178. (in Chinese with English abstract)
- [26] LI D D, WANG Y W, WANG J B, et al. Minimum critical thickness of dike for ore-bearing fluid injection: A new approach applied to the Shihu gold deposit, Hebei Province, North China [J]. *Geoscience Frontiers*, 2012, 3 (5): 717 – 728.
- [27] 李德东. 利用连通器模型讨论岩脉与成矿作用的初步尝试——以内蒙古大井锡多金属矿床为例 [J]. *矿产勘查*, 2013, 4 (1): 62 – 68.  
LI Dedong. A primary study for connected vessels model of dikes and metallogenic process——A case study on Dajing polymetallic deposit, Inner Mongolia [J]. *Mineral Exploration*, 2013, 4 (1): 62 – 68. (in Chinese with English abstract)
- [28] MICKLETHWAITE S. Mechanisms of faulting and permeability enhancement during epithermal mineralisation: Cracow goldfield, Australia [J]. *Journal of Structural Geology*, 2009, 31 (3): 288 – 300.
- [29] ZHAO C B, HOBBS B E, ORD A, et al. Theoretical and numerical analyses of pore – fluid flow focused heat transfer around geological faults and large cracks [J]. *Computers and Geotechnics*, 2008, 35 (3): 357 – 371.
- [30] 高建伟, 李英康, 赵国春, 等. 山东金翅岭金矿成矿构造及应力场研究 [J]. *地质与勘探*, 2014, 50 (1): 122 – 129.  
GAO Jianwei, LI Yingkang, ZHAO Guochun, et al. Metallogenic structure and tectonic stress field of the Jinchiling gold deposit in Shandong Province [J]. *Geology and Exploration*, 2014, 50 (1): 122 – 129. (in Chinese with English abstract)
- [31] 孟召平, 陆鹏庆, 贺小黑. 沉积结构面及其对岩体力学性质的影响 [J]. *煤田地质与勘探*, 2009, 37 (1): 33 – 37.  
MENG Zhaoping, LU Pengqing, HE Xiaohai. Depositional structure planes and their influence on the mechanical properties of sedimentary rock mass [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2009, 37 (1): 33 – 37. (in Chinese with English abstract)
- [32] 周延军, 耿应春, 王贵宾, 等. 深部地层岩石力学性质测试与分析研究 [J]. *岩土力学*, 2011, 32 (6): 1625 – 1630.  
ZHOU Yanjun, GENG Yingchun, WANG Guibin, et al. Testing and analyzing rock mechanical characteristics for deep formation [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32 (6): 1625 – 1630. (in Chinese with English abstract)
- [33] HAWKINS A B, MCCONNELL B J. Sensitivity of sandstone strength and deformability to changes in moisture content [J]. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 1992, 25 (2): 115 – 130.
- [34] 罗涛, 高永涛, 卢宏建. 不同应力环境下岩石力学属性及破坏模式研究 [J]. *金属矿山*, 2013, (8): 1 – 4.  
LUO Tao, GAO Yongtao, LU Hongjian. Research on mechanical property and failure pattern of rock samples in different stress conditions [J]. *Metal Mine*, 2013, (8): 1 – 4. (in Chinese with English abstract)
- [35] TRIPP G I, VEARNCOMBE J R. Fault/fracture density and mineralization: a contouring method for targeting in gold exploration [J]. *Journal of Structural Geology*, 2004, 26 (6 – 7): 1087 – 1108.
- [36] KHODAVERDIAN M, MCELFFRESH P M. Hydraulic fracturing stimulation in poorly consolidated sand: Mechanisms and consequences [A]. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition [C]*. Dallas, Texas: SPE, 2000.
- [37] BOHLOLI B, DE PATER C J. Experimental study on hydraulic fracturing of soft rocks: Influence of fluid rheology and confining stress [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2006, 53 (1 – 2): 1 – 12.