

五台山绿岩带主要金矿类型及构造控矿规律探讨^{*}

姜峰贤

(山西省地质调查院晋南地质调查分院, 山西 临汾 041000)

摘 要 依据构造控矿为成矿主因、矿源层是物质基础,将五台山绿岩带金矿划分为3种主要类型:与次级褶皱有关的条带状铁建造型金矿床、与剪切变形有关的变质中酸性火山沉积岩型金矿床、与剪切变形有关的变质砾岩型金矿床。这些不同类型的金矿床构造控矿特征明显。五台山绿岩带的区域性倒转复式向斜构造制约了含矿带呈NEE向展布,大型紧闭褶皱转折端控制了矿床的定位,与紧闭褶皱伴生的剪切变形及次级褶皱控制着矿体的规模、形态和产状,剪切裂隙控制着金矿脉的分布和金矿化的局部富集。紧闭褶皱倒转翼部(近转折端)的剪切变形是五台山绿岩带金矿构造控矿的普遍规律。矿源层是物质基础,而经历了紧闭褶皱及伴生的剪切变形带叠加改造的矿源层才是最佳的成矿和找矿靶区。文章以构造控矿理论为指导,重点剖析了典型矿床的构造控矿特征,深入探讨了控矿构造对矿床定位、规模大小、矿体形态、富集程度的制约,认为褶皱与剪切变形不仅在于控矿,而且其本身就是一种重要的成矿作用,进而总结了五台山绿岩带金矿构造控矿的普遍规律。

关键词 地质学 五台山绿岩带 主要金矿类型 构造控矿 山西省

中图分类号: P618.51

文献标志码: A

A tentative discussion on structural ore-controlling regularity and main types of gold deposits in Wutai Mountain greenstone belt

JIANG FengXian

(South Shanxi Branch of Shanxi Institute of Geological Survey, Linfen 041000, Shanxi, China)

Abstract

Based on the hypothesis that structural ore-control is the major ore-forming factor and the ore source bed constitutes the foundation of ore-forming materials, the author has divided the gold deposits in the Wutai Mountain greenstone belt into three main types, namely banded iron formation (BIF) related to secondary folds, metamorphic intermediate-acid volcanic-sedimentary type related to shear deformation, and metamorphic conglomerate type related to shear deformation. Gold deposits of these types are obviously controlled by structures. The regional overturned compound syncline of the Wutai Mountain controls the ore-forming belt of the NEE-trending regional distribution pattern, the large tight fold hinge belt controls the positions of gold deposits, the shear deformation associated with tight folds and secondary folds control sizes, shapes and attitudes of ore bodies, and the shearing fissures control the distribution and local enrichment of gold veins. Shear deformation on the overturned limb (near the hinge zone) of the tight fold constitutes the structural ore-controlling regularity for gold deposits of the Wutai Mountain greenstone belt. The ore source bed is the foundation of ore-forming materials, and ore-bearing strata reformed by superimposed tight fold and shear deformation are the best target areas for metallogenesis and ore prospecting. Based on the structural ore-controlling theory, this paper has made an emphatic analysis of the ore-controlling structural features of typical ore deposits, probed deeply into the effects

^{*} 第一作者简介 姜峰贤,男,1968年生,工程师,长期从事地质调查及资源评价工作。Email: jiangfengxian01@sina.com

收稿日期 2009-11-22; 改回日期 2010-03-20。许德煊编辑。

of ore-control structures on the positions, sizes, shapes and enrichment of gold deposits, and pointed out that folds and shear deformations not only are ore-control structures but also serve as main mineralization themselves. The structural ore-controlling regularity of gold deposits in the Wutai Mountain greenstone belt is also summed up.

Key words: geology, Wutai Mountain greenstone belt, main types of gold deposits, structural ore-controlling regularity, Shanxi Province

发育于山西省东北部的五台山绿岩带,是在地壳早期薄弱的硅铝质基底上发展起来的、以“五台群”为代表的花岗岩-绿岩地体,是目前中国保存较完整和较典型的绿岩带之一,具有与世界典型太古宙绿岩带相似的形成环境和金矿成矿作用(田永清, 1991 陈平等, 1996 王安建等, 1996)。该绿岩带内蕴藏着丰富的金矿资源,各种类型的金矿床(点)星罗棋布,含矿层位多,矿化分布广,矿床类型齐全,成矿地质条件优越。迄今,已发现殿头、东腰庄、康家沟、狐狸山、代银掌、西山、小板峪、小中咀、刘家坪、张仙堡、大西沟等 20 余处金矿床(点),主要分布在五台山中央韧性剪切带一侧,具有太古宙绿岩带金矿的典型地质特征。自 20 世纪 90 年代以来,不少地质工作者曾在地质特征、矿床类型、成矿作用、成矿系列、成矿模式及成矿时代等方面对该绿岩带的金矿进行过大量深入细致的研究和探讨(田永清, 1991 徐俊, 1993 陈平等, 1996 王安建等, 1996 谌辉等, 1999 杨言辰等, 2001)。但是,前人的工作大多侧重于以赋矿建造为主的矿床类型、成矿系列等方面的研究,而有关绿岩带金矿构造控矿规律的研究则相对涉及较少。为此,本文在前人成果的基础上,结合多年野外工作实践,确定矿源层是成矿物质基础,构造变形是最主要的控矿因素,对金最终成矿起着至关重要的作用,依据构造控矿为成矿主因、矿源层是物质基础,将五台山绿岩带金矿划分为 3 种主要类型:与次级褶皱有关的条带状铁建造型金矿床、与剪切变形有关的变质中酸性火山沉积岩型金矿床、与剪切变形有关的变质砾岩型金矿床。同时,运用构造控矿理论,重点剖析了典型矿床的构造控矿特征,总结了五台山绿岩带金矿构造控矿的普遍规律。

依据构造控矿划分的 3 种不同类型的金矿床,其矿床特征不尽相同,具有各自独特的成矿和控矿机制。但从这些不同类型金矿的时空分布、地质特征和赋存的构造部位来看,它们都明显地与褶皱及

剪切变形(韧性的或脆性的)所产生的构造热液活化作用有关,均具有显著的构造控矿的地质特征。尤其是,该区内许多不同类型的金矿床多产在与紧闭褶皱倒转翼部伴生的剪切变形带内,并受其控制,从而构成了五台山绿岩带金矿较为普遍的构造控矿特征。在诸控矿因素中,构造是最关键性的控制因素。深入研究其构造控矿机制,对该区金矿普查及已知矿区深部、边部和外围找矿都具有重要意义。

1 成矿地质背景

五台山绿岩带地处华北陆台腹地,是地壳生长初期强烈活动的产物。该绿岩带长约 160 km,宽 10~35 km,呈 NEE 向,大致构成一个向 SW 撒开的狭长楔形展布于恒山-五台山地区(图 1)。绿岩层以五台群变质火山-沉积岩系为代表,总厚度大于 6 500 m。它以阜平群或恒山杂岩作为基底,自下而上可分为 3 个亚群。下部为石咀亚群,主要由多个基性-中酸性火山-沉积旋回组成,具双峰式火山岩的特点,经受了绿帘角闪岩相或角闪岩相变质,其下部的金岗库组是由海底火山喷气-沉积形成的条带状铁建造,是五台群自下而上的第 1 个条带状铁建造金矿化层位。中部为台怀亚群,是一套以绿片岩相为主的变质火山-沉积岩组合,其内的柏枝岩组的条带状铁建造不仅是著名的五台山沉积变质铁矿层位(李树勋等, 1982),而且也是五台山区第 2 个条带状铁建造金矿化层位;鸿门岩组总体上以中基性火山岩为主,其下部的长英质火山-沉积岩为五台山变质中酸性火山沉积岩型(类似赫姆洛型)金矿化层位,也是五台山区第 3 个含金层位。上部为高凡亚群,是次绿片岩相的千枚岩夹多层石英岩、变粉砂岩及薄层基性火山岩的浊流沉积建造。五台群之上的古元古宙滹沱群主要为次绿片岩相浅变质碎屑岩、碳酸盐岩建造,其底部的四集庄组砾岩层是五台群金矿、矿源层(岩)或金丰度较高的岩层经风化剥蚀后的异

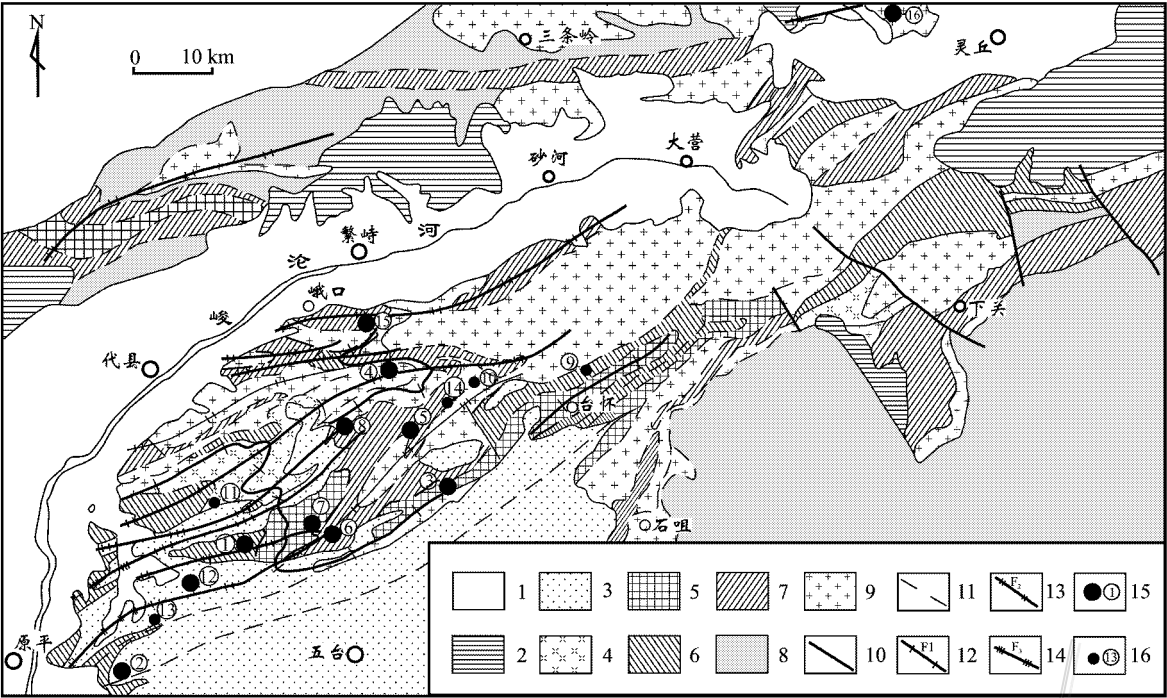


图 1 五台山绿岩带构造纲要及主要金矿床分布略图

1—第四系；2—后长城系；3—滹沱群；4—五台群上亚群变质沉积岩系；5—五台群中、下亚群火山、沉积岩系（包括鸿门岩组）；6—五台群中下亚群含铁岩系（柏枝岩组）；7—五台群下亚群含铁岩系（金岗库组）；8—阜平（岩）群；9—花岗岩类（包括 TTG 杂岩）；10—晚期断层；11—剪切变形带；12— F_1 褶皱（五台早、中期）轴迹；13— F_2 褶皱（五台晚期）轴迹；14— F_3 褶皱（吕梁期）轴迹；15—金矿床及编号；16—金矿点及编号。金矿床（点）编号及名称：①—殷头；②—狐狸山；③—东腰庄；④—小板峪；⑤—康家沟；⑥—代银掌；⑦—上杨花；⑧—一小中咀；⑨—柏枝岩；⑩—大西沟；⑪—张仙堡；⑫—西山；⑬—西山底；⑭—刘家坪；⑮—磨峪沟；⑯—鹿沟

Fig. 1 Sketch structural outline map showing the distribution of major gold deposits in the Wutai Mountain greenstone belt
1—Quaternary；2—Post-Changcheng System；3—Hutuo Group；4—Upper Subgroup meta-sedimentary rocks of Wutai Group；5—Middle-Lower Subgroup meta-volcanic-sedimentary rocks (including Hongmenyan Formation) of Wutai Group；6—Middle Subgroup iron-bearing rocks (Baizhiyan Formation) of Wutai Group；7—Lower Subgroup iron-bearing rocks (Jingangku Formation) of Wutai Group；8—Fuping Group；9—Granitoid (including TTG complex)；10—Late fault；11 Shear deformation zone；12— F_1 fold (early and middle Wutai period) axis trace；13— F_2 fold (late Wutai period) axis trace；14— F_3 fold (Luliang period) axis trace；15—Gold deposit and its serial number；16—Gold ore spot and its serial number. Serial number of gold deposit (ore spot) and its name：①—Diantou；②—Hulishan；③—Dongyaozhuang；④—Xiaobanyu；⑤—Kangjiagou；⑥—Daiyinzhang；⑦—Shangyanghua；⑧—Xiaozhongzui；⑨—Baizhiyan；⑩—Daxigou；⑪—Zhangxianpu；⑫—Xishan；⑬—Xishandi；⑭—Iujiaping；⑮—Moyugou；⑯—Lugou

地产物,从而形成五台山变质砾岩型金矿(与南非的维特瓦特斯兰德金矿相当),这也是五台山区第 4 个含金层位。

通过对五台群一系列测年数据的统计,它主要经受了(2 600~2 500) Ma、2 300 Ma $\pm$ 、1 800 Ma $\pm$ 等 3 个构造热事件的再造(陈平等,1996),既经历过五台期以复杂褶皱(F_1 、 F_2)和韧性剪切为主的强烈变形,又经历过吕梁期以褶皱(F_3)为主的韧性剪切变形的叠加改造(李树勋等,1982),故形成了一个 NEE 向延伸的‘之’字型展布的多级且多期次褶皱与断裂组合的大型倒转复式向斜(田永清,1991)(图

1)。该构造样式是绿岩层经受了至少 2 期断裂作用和 3 期褶皱变形的结果。早期褶皱(五台早、中期 F_1 和五台晚期 F_2)及断裂由于受到伸展作用和岩浆底辟作用的影响而使褶皱的方位和形态复杂化,现存的 NEE 向褶皱(吕梁期 F_3)格局则是吕梁运动的产物。绝大多数的岩石地层单位(亚群或部分组)是被若干整合断层-韧性剪切带、逆冲断层、拆离断层等分割肢解开来的许多绿岩构造片岩体,这些片岩体是紧闭的‘无根’褶皱或由逆冲推覆形成的构造席体和断块,呈现出复杂的、有时为不连续的带状分布。尤其是,该地区内韧性变形带特别发育,不同性质、

不同时代和不同规模的韧-脆性变形带相互交织、分枝复合,构成一套近 EW 向展布的错综复杂的韧性变形带网络(王安建等,1996)。绿岩层中富含的分散的金便是在这一构造背景下遭受构造-变质热液活化而聚集成金矿的。因此,这些构造共同控制着绿岩带的形态、地层的分布以及岩石的变形变质改造,同时,也制约着金矿带总体上呈 NEE 向展布的特征,以及矿体的规模、形态、产状和矿化的局部富集,并为绿岩带内众多矿源层中初始聚集的成矿物质的活化、迁移和聚集提供了驱动力、通道及储集场所,对成矿提供了十分有利的区域成矿构造背景。

2 典型矿床构造控矿地质特征

2.1 与次级褶皱有关的条带状铁建造型金矿床

该类型金矿床位于五台山绿岩带的中-下部,赋存于五台群金岗库组和柏枝岩组海底火山“喷气”成因条带状铁建造(BIF)的特定层位。BIF 既是矿源层,也是容矿的重要层位,金的最终成矿主要与紧闭褶皱及伴生的次级褶皱有关,故本文称之为“与次级褶皱有关的条带状铁建造型金矿床”。该类金矿床在五台山绿岩带中发育较为普遍,是该区重要的金矿类型之一。目前已发现殿头、康家沟、小板峪、磨峪沟、鹿沟等一大批金矿床和数十处金矿点,其中,

殿头金矿较为典型,故以其为例论述该类金矿的构造控矿特征。

殿头金矿位于五台山绿岩带的西南部,构造上处在北台-智存沟复式背斜西端的南翼。该复式背斜的主构造线呈 NEE 向,由一系列紧密排列的次级褶皱组成,并伴有强烈的剪切变形。该矿床是殿头-柏枝岩 NEE 向金矿成矿带的组成部分,并与该复式背斜北翼的康家沟、刘家坪金矿相对应。该区段是五台山区柏枝岩组 BIF 型金矿化的主要集中地段,具有十分优越的区域构造成矿条件。

殿头矿区出露的主要地层为柏枝岩组,其下部为绿泥片岩、绢云绿泥片岩及条带状磁铁矿石岩,厚 255 m,是该矿区的主体,是金矿的主要赋存层位;该组的上部为绢英片岩和绢云长石片岩,普遍含菱铁矿,厚 135 m。所有这些岩层或因褶皱而加厚,或因拉断而变薄,此等构造变形现象十分普遍(图 2)。

金矿体主要赋存在柏枝岩组下部的 BIF 中,磁铁矿石岩和含黄铁矿绿泥片岩为容矿岩石,褶皱及韧性剪切带为容矿构造。BIF 是矿源层,也是重要的容矿层。矿源层的金或初始富集的金借助于构造变形变质热流体与围岩相互作用,促使成矿物质活化、迁移,并聚集在构造变形作用所造成的 BIF 岩石渗流通道内,从而形成工业矿体。故此,顺层的褶皱、剪切变形带对金的成矿起着重要作用,又是十分

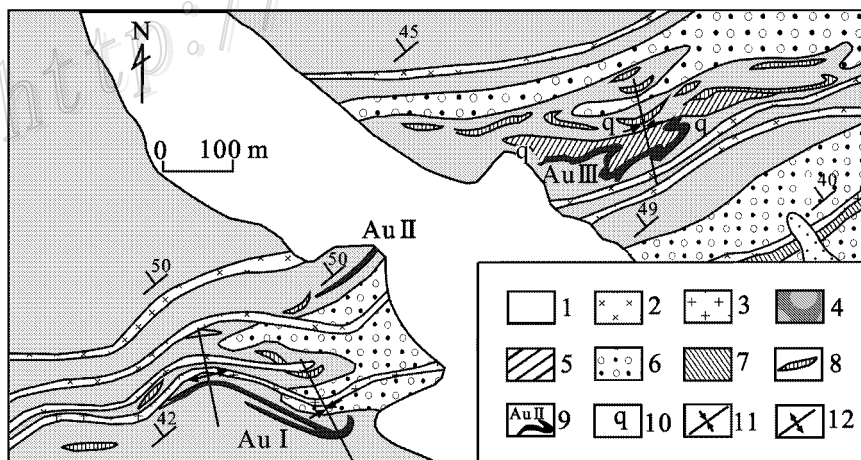


图 2 殿头金矿区地质图

1—第四系;2—变辉绿岩脉;3—花岗岩斑岩;4—柏枝岩组下段岩层;5—蚀变的绿泥绢英片岩;6—变质砾岩;7—韧性剪切带;8—条带状铁建造;9—金矿体及编号;10—石英脉;11—向斜轴线;12—背斜轴线

Fig. 2 Geological map of the Diantou gold ore district

1—Quaternary; 2—Metamorphic diabase vein; 3—Granite porphyry; 4—Lower member bed of Baizhiyan Formation; 5—Altered chlorite sericite quartz schist; 6—Metamorphic conglomerate; 7—Ductile shear zone; 8—Banded iron formation; 9—Gold ore body and its serial number; 10—Quartz vein; 11—Synclinal axis; 12—Anticlinal axis

良好的赋矿场所。金的工业矿体常常产在背斜轴部,以及由次级褶皱、剪切变形所形成的扩容带内,尤其是在一些次级褶皱的鼻部形成富矿柱。富矿柱的产状与褶皱枢纽一致,延深往往大于延长,沿倾向可能出现矿体的尖灭再现,具有与霍姆斯塔克金矿相似的产状特征。这也说明这些富矿柱是在剪切变形变质阶段形成的。

金矿体的形态受次级褶皱及剪切变形带的控制,呈似层状和透镜状,因强烈的韧性剪切和构造置换,时常呈无根褶皱、钩状褶皱及鞍状矿体,往深部延伸则呈杆状或柱状交代体,与容矿岩层产状基本一致,走向 67~70°,倾向 NW,倾角 35~65°。矿体规模大小不一,悬殊较大,长 80~285 m,厚 1.23~2.20 m,富矿柱最厚超过 8.5 m。 $w(\text{Au})$ 为 $(4.93\sim 25.00)\times 10^{-6}$ 。富矿柱常集中分布于磁铁石英(角闪)岩的顶、底板及其倾竖的褶皱核部,褶皱转折端的矿化比平直的翼部的矿化好,品位高。富矿处均为岩层能干性差异大且易发生顺层剪切及强烈褶皱的构造扩容的部位(图 3)。

矿化以星点浸染状或细脉浸染状为主,金矿石就是富金的组成铁建造的岩石或贫铁矿石。矿石类型较简单,主要为黄铁矿化或碳酸盐化含金磁铁石英(角闪)岩,其次是浸染状矿化(绢云)绿泥片岩或云英片岩及含金石英脉。含金石英脉型矿石多发育在变质程度较深的金岗库组层位或后期受岩浆热事

件明显叠加改造的矿床之中。矿石具粒状变晶结构,以块状构造为主,其次为条(纹)带状、杆状、片状等构造。

矿石由磁铁矿(35%~40%)、黄铁矿、菱铁矿、磁黄铁矿、铁白云石、褐铁矿及少量黄铜矿和自然金组成。脉石矿物以石英为主(50%~60%),有少量绢云母、绿泥石、钠长石等。金矿物主要为自然金,大多以包体形式存在,少数为粒间金,主要为粒状,其次为针状、树枝状和不规则状,粒径 0.003~0.03 mm,金的成色平均为 969。黄铁矿(褐铁矿)是金的主要载体。

围岩蚀变主要有碳酸盐化、硅化、黄铁矿化和绢云母化,以碳酸盐化和黄铁矿化最为普遍且强烈,与金矿化关系最为密切。

骆辉等(1999)为确定殿头矿床的成矿时代,对该矿区的矿石进行了 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素年龄测定,获得其等时线年龄为 $(2\,416\pm 64)\text{ Ma}$,与前述宏观地质特征和区域热事件等地质事实基本吻合。

2.2 与剪切变形有关的变质中酸性火山沉积岩型金矿

该类金矿床位于五台山绿岩带上部层位——鸿门岩组中下部的变质中酸性火山沉积岩(绢云钠长片岩)中,为层控浸染型金矿床,是上世纪 90 年代在五台山区发现的一种新的金矿类型。东腰庄金矿是该类金矿床的典型代表(姜峰贤,2006),并以其独特的构造控矿特征被公认为是一个较典型的剪切带型金矿床(陈平等,1996;汪安建等,1996)。

东腰庄金矿床位于五台山中南部,构造上处在五台山“之”字型构造西南部的台怀-李家庄同斜倒转复式向斜北翼的近转折端部位,伴随着构造递进变形,在倒转翼同期发育有区域规模的李家庄-大草坪韧性剪切带,东腰庄金矿床即位于该剪切带内。矿区内出露的地层主要为鸿门岩组,因受台怀-李家庄同斜倒转复式向斜的控制,地层呈倒转的单斜产出,产状 $330\sim 350^\circ\angle 40\sim 50^\circ$,自北向南地层由古至新。鸿门岩组的主要岩性为绿泥片岩、绿泥钠长片岩,其原岩为镁铁质(中基性)火山岩,中下部夹有 2~3 层绢云钠长片岩(原岩为长英质中酸性火山沉积岩),金矿化即赋存于绢云钠长片岩夹层内,层控性质非常明显。由于绿泥片岩中含有 3 个绢云钠长片岩夹层,因而发育了 3 个含矿层,即 Au I、Au II、Au III 号含矿层,矿体分布具趋群性。其中,Au I 号含矿层与李家庄-大草坪韧性剪切带的中央部位相

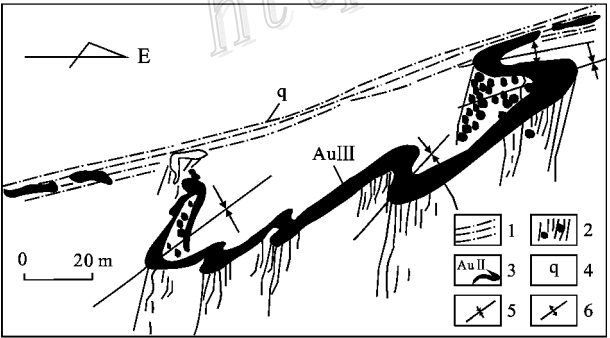


图 3 殿头金矿区 Au III 矿体次级褶皱控矿示意图
1—韧性剪切带;2—条带状铁建造;3—金矿体及编号;
4—石英脉;5—向斜轴线;6—背斜轴线

Fig. 3 Sketch diagram showing ore-controlling secondary folds of Au III ore body in the Diantou gold ore district
1—Ductile shear zone;2—Banded iron formation;3—Gold ore body and its serial number;4—Quartz vein;5—Synclinal axis;6—Anticlinal axis

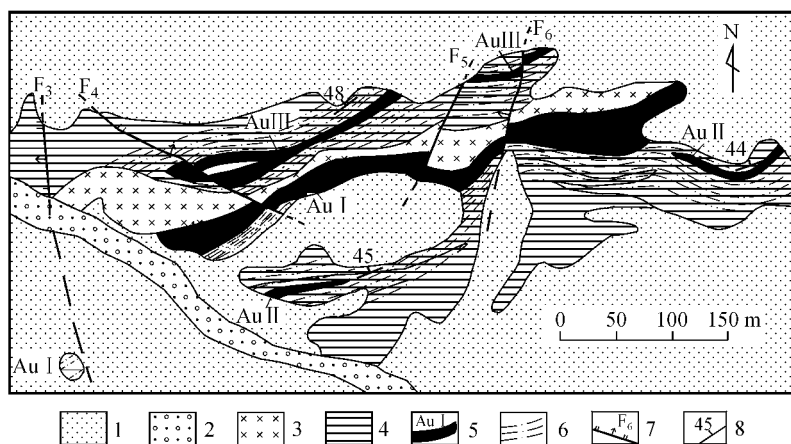


图 4 东腰庄金矿区地质略图

1—第四系；2—变辉绿岩；3—绿泥片岩；4—绢云钠长片岩；5—金含矿层及编号；6—韧性剪切带；7—正断层及编号；8—片理产状

Fig. 4 Geological sketch map of the Dongyaozhuang gold ore district

1—Quaternary；2—Metamorphic diabase；3—Chrolite schist；4—Sericite albite schist；5—Gold ore-bearing bed and its serial number；
6—Ductile shear zone；7—Normal fault and its serial number；8—Attitude of schistose

重合(图 4),剪切带中央部位的剪切变形最强,层中的岩石呈现韧性剪切糜棱岩化构造特征,并发育有较强的黄铁矿化、碳酸盐化和硅化,其矿化最好,厚度较稳定,连续性也好,是该矿区的主要含矿层。而远离李家庄-大草坪韧性剪切带中央部位的 Au III、Au II 号含矿层,其矿化逐渐减弱,连续性变差,含矿层内的矿体也不稳定,因此,它们是该矿区的次要含矿层。可见,矿化的产出与剪切变形关系密切,矿体的展布严格受剪切带的控制,李家庄-大草坪韧性剪切带是最主要的控矿构造,故该矿床是一个较典型的剪切带型金矿床(图 4)。

东腰庄金矿的主矿体赋存于 Au I 号含矿层中,容矿岩石以绢云钠长片岩为主,次为绿泥片岩。矿体呈单斜的层状、似层状,长 507 m,厚 1.23~15.85 m,平均厚度 8.36 m,延深 150~200 m。矿体产状变化不大,与围岩基本一致,走向 40~80°,倾向 NW,倾角 30~55°,平均倾向 340°,平均倾角 45°。矿体内部结构简单,夹石较少,其顶板以绿泥片岩为主,局部为绢云钠长片岩,底板一般为绢云钠长片岩。

矿石类型主要为黄铁矿化碳酸盐化绢云钠长片岩,次为黄铁矿化碳酸盐化绿泥片岩。矿石具粒状变晶结构、鳞片粒状变晶结构,块状或片状构造;均可见由韧性剪切变形作用产生的糜棱结构、碎裂结构、S-C 组构、眼球状构造、压力影构造等(图 5),说明曾经受过较强烈的韧性剪切变形作用。

矿石中主要脉石矿物有钠长石、绢云母、石英、电气石、铁白云石及绿泥石等;金属矿物有黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿、磁铁矿和自然金等,偶见毒砂和辉铜矿。自然金主要以包体、粒间和裂隙金的形式赋存于黄(褐)铁矿、石英和碳酸盐矿物中。金的成色均在 900 以上,金品位 $w(\text{Au})$ 为 $(1.02 \sim 32.76) \times 10^{-6}$,一般为 $(2 \sim 4) \times 10^{-6}$ 。金品位的变化一般与韧性剪切带内部微剪切面(位错、裂隙、破碎晶界等)的分布有关,位于微剪切面及其附近的矿石,品位都较高,反之则较低。

矿化蚀变以黄铁矿化、碳酸盐化和硅化为主,其次是钠化、绢云母化、绿泥石化和电气石化。在该矿区的中部形成了一个 NE—NEE 向延展的蚀变带。金矿化主要与黄铁矿化、碳酸盐化及硅化密切相关,兼有碳酸盐化、黄铁矿化的硅质核往往就是金矿体。

资料显示,该矿床的形成具有多机制和多期性。主成矿期被确定为五台中期,大约为 $(2\ 600 \sim 2\ 500)$ Ma 左右(姜峰贤,2006)。

2.3 与剪切变形有关的变质砾岩型金矿

五台山地区的该类型金矿床产在滹沱群底部的变质砾岩中,含矿层位是由五台群金矿、矿源层(岩)或金丰度较高的岩层经风化剥蚀后形成的异地产物,矿源来自五台群蚀源区,故其与五台群绿岩带存在着密切的渊源联系,其最终成矿主要与吕梁期 $(1\ 800\ \text{Ma 左右})$ 的紧闭褶皱及剪切变形有关。西山金矿床是该类型金矿的典型代表。

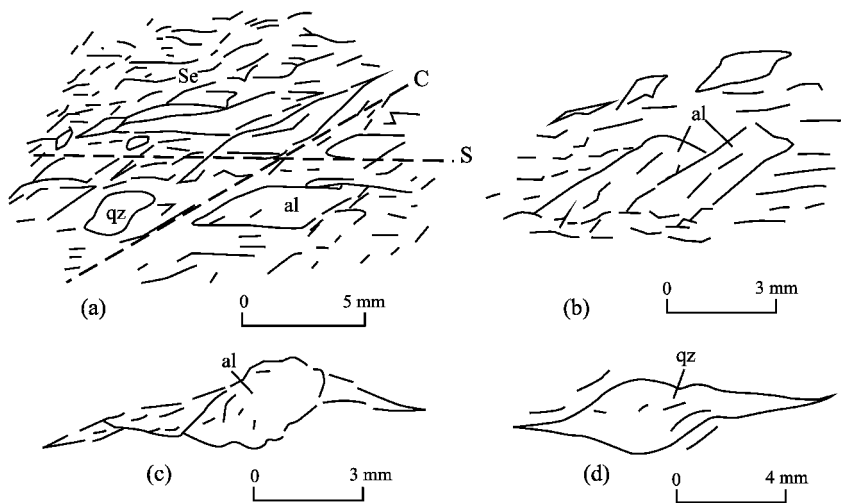


图 5 东腰庄金矿区显微构造素描图

(a). 绢云钠长片岩的 S-C 糜棱构造；(b). 钠长石的书斜构造；(c). 钠长石的压力影构造；(d). 硅化石英集合体的不对称眼球状构造
al—钠长石；qz—石英；Se—绢云母

Fig. 5 Microstructure sketch map of the Dongyaozhuang gold ore district

(a). S-C mylonitic fabric of sericite albite schist ;(b). Books ramp structure of Albite ;(c). Pressure shadow structure of albite ;
(d). Asymmetric augen structure of silicified quartz aggregates
al—albite ; qz—quartz ; Se—sericite

西山金矿床又称七图金矿床,位于五台山绿岩带的西南部。其金矿化严格受四集庄组地层组成的背斜构造及沿背斜核部发育的韧-脆性剪切带的控制,金矿体主要赋存在受韧性剪切作用的溥沱群四集庄组下部变质砾岩与变质镁铁质火山岩之间的变质含砾砂岩中,构造控矿特征明显。

该矿区内出露的地层主要为古元古界溥沱群四集庄组和南台组。四集庄组下部为砂砾岩段,主要岩性为含砾变质砂岩,夹 3~4 层变质砾岩,金矿体主要赋存于该组下部的含砾变质砂岩中(图 6)。

矿区内的构造主要为褶皱和韧-脆性剪切带。褶皱构造为贯穿矿区的 NEE 向同斜倒转背斜,在倒转背斜的核部伴生发育一条宽逾 10 m、长度大于 1.5 km、倾角 330~350°的韧-脆性剪切带,是该区内重要的控矿和导矿构造。该剪切带本身由发生肉红色蚀变的糜棱系列岩石组成,带内发育有不同方向的沿脆性裂隙贯入的石英脉。这些石英脉,与剪切带内肉红色糜棱岩化岩石的局部弱变形地段所形成的浸染状矿石,一起构成了工业矿体。

该矿区内,目前已探明 8 个金矿体。矿体产状与剪切带一致,呈似层状、透镜状,走向上呈脉状、透镜状近 EW 向断续产出,倾向 SE 或近直立,局部倾向 NW。矿体长 16~95 m,厚 0.55~1.21 m,品位

$w(\text{Au}) (5.85 \sim 12.90) \times 10^{-6}$ 。在倾斜方向上,金矿体沿 S 形剪切裂隙面延伸,多具分枝、膨大、尖灭再现等现象。

矿石主要为含石英细脉的长英质糜棱岩(钠长斑岩),其次为含硫化物的石英脉。矿石结构以糜棱状、糖粒状为主,其次为变余斑状,基质为交织结构。矿石构造以浸染状、条带状、条纹状及网脉状为主,其次为块状。矿石矿物为黄铁矿、磁铁矿、菱铁矿、针铁矿、黄铜矿、白钛矿和自然金,次生矿物为褐铁矿。脉石矿物主要为石英、钠长石、方解石、绿泥石和绢(白)云母等。金矿物为自然金,多以裂隙金和包体金形式产出,以中粗粒为主,粒径 0.05~0.4 mm,主要呈粒状、板片状及不规则状。金的成色为 800~940。载金矿物为黄铁矿和石英,以黄铁矿内的包体金为主,其次为石英内的裂隙金。

围岩蚀变十分发育,并具多期性和多样性特点,主要包括硅化、黄铁矿化、绢云母化、钠长石化、绿泥石化、碳酸盐化等。

铅同位素特征(杨言辰等,2001)显示,该金矿床有 2 个年龄,即 2 306 Ma 的沉积成矿年龄,以及 1 829 Ma 的变质变形形成矿年龄。表明该类型金矿床(点)的形成既具沉积特征,又具变质热液叠加改造的特征。其成矿年龄与区域热事件相吻合。

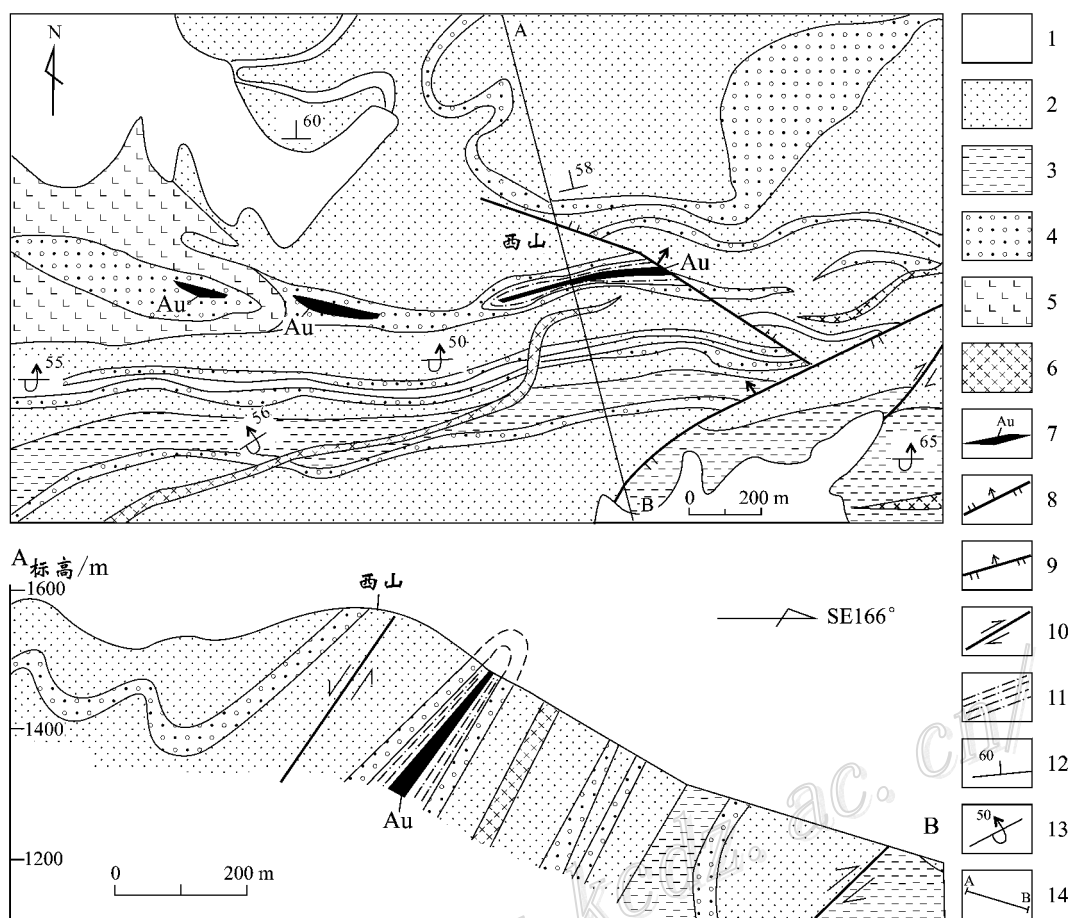


图6 西山金矿区地质图及剖面图

1—第四系；2—板岩；3—含砾变质砂岩；4—变质砾岩；5—镁铁质变火山岩；6—变质辉绿岩；7—金矿体；8—正断层；9—逆断层；10—平移断层；11—韧性剪切带；12—岩层产状；13—倒转岩层产状；14—剖面位置

Fig. 6 Geological map of the Xishan gold ore district

1—Quaternary；2—Slate；3—Gravel-bearing metamorphic sandstone；4—Metamorphic conglomerate；5—Mafic meta-volcanic rocks；6—Metamorphic diabase；7—Gold ore body；8—Normal fault；9—Reverse fault；10—Strike-slip fault；11—Ductile shear zone；12—Stratigraphic attitude；13—Attitude of inverted strata；14—Location of section

3 构造控矿规律探讨

3.1 绿岩带金矿空间分布受控矿构造的控制

3.1.1 区域构造控制着金矿(化)带的空间展布

五台山绿岩带的整体构造轮廓表现为 $60^{\circ} \sim 70^{\circ}$ 方向的多级、多期次褶皱和韧性剪切带叠加组合形成的‘之’字型复式向斜。该区域构造对金矿(化)带的空间展布起着主导作用,制约着区内金矿(化)带总体呈近 EW 向展布的特征。例如,与次级褶皱有关的条带状铁建造型金矿的主要含矿层位柏枝岩组,因受该区域构造的影响而呈‘之’字型展布,长约 100 km,宽 1~3 km,从柏枝岩、大明烟、铜谷里、康家沟到大西沟,往西至木猴沟,顺层均有不同程度的金矿化断续分布,或有明显的金异常显示(图 1),若

有次级有利构造叠加其上,便可导致矿质迁移、富集而形成工业矿体。金矿(化)带的区域空间展布与区域主构造线方向一致,沿区域构造线,矿(化)带的展布与矿床(体)的产出具有区域可比性。

3.1.2 次级构造控制着矿床的定位及矿体的规模、形态、产状和矿化的局部富集

在金矿(化)带内,矿床(体)的分布具不均一性和趋群性,这显示出金矿成矿与所处的特殊构造部位及次级构造发育程度有关,所以说,金矿的空间定位实际上就是构造定位(罗卫等,2007)。一般而言,五台山绿岩带内的金矿床均定位于次级构造叠加的金矿(化)带的有利部位及旁侧伴生的低序次构造中,尤其是一些大-中型紧闭褶皱近转折端的翼部及伴生的韧性剪切带,是许多金矿床(体)产出的优选空间,如殿头、东腰庄、小板峪、狐狸山等金矿几乎

无例外地产生在与褶皱有关的韧-脆性剪切带中。前已述及,殿头金矿处于北台-智存沟复式背斜西端的南翼,矿区地层发育一系列轴线 NEE 向的紧密排列的次级褶皱,并伴随有强烈的剪切变形。其矿体规模、形态、产状受次级褶皱与剪切变形带的控制,矿体呈似层状、透镜状,因受强烈的韧性剪切和构造置换,也时常呈无根褶皱、钩状褶皱及鞍状等形态;富矿处均为岩层能干性差异大而且易发生顺层剪切及强烈褶皱构造扩容的部位。

3.2 紧闭褶皱倒转翼部(近转折端)的剪切变形是五台山绿岩带金矿构造控矿的普遍规律

在五台山绿岩带金矿的诸控矿因素中,褶皱及剪切变形既是一种重要的成矿作用,其所生成的扩容带又是十分良好的赋矿部位(陈平等,1996)。首先,倒转复式褶皱的倒转翼近转折端部位容易产生虚脱和岩层增厚,极易形成“低压虚脱空间”(吴金宣,2009),有利于高压区含金热液向此区域汇聚、集中,是构造膨胀扩容带,并且,其中伴有因递进变形而发育的韧-脆性剪切带,是构造复合所形成的有利空间,是热液活动的良好场所,也是一个热液高渗透带(孙政平,1996),从而使初步富集于转折端的金再进一步迁移、富集在剪切带内。剪切带不仅提供了热液活动的驱动力及最有利的通道和矿液聚集的空间,而且也是成矿作用的一种表现形式;此外,剪切带中的韧-脆性过渡带也是物理化学条件的转变带,对矿液的运移和沉淀有着直接的影响。因此,这对于五台山绿岩带内伴随褶皱发育的剪切变形带在促进成矿和提供储矿空间从而达到构造控矿而言,是一个最重要的方面。

五台山绿岩带内的3种主要类型金矿床都符合这一普遍的构造控矿规律,东腰庄金矿床的构造控矿特征尤为典型。该矿区在区域构造位置上恰好处于复向斜近核部的倒转北翼,其运动学特征表明,控矿剪切带属于逆向剪切,拉伸线理与褶皱岩层的运动 A 轴的方位基本一致,表明剪切带的形成是褶皱作用的结果。该矿床位于台怀-李家庄同斜倒转复式向斜倒转翼近转折端部位,以及该处因褶皱递进变形而伴生发育的李家庄-大草坪韧性剪切带内,矿体的产出和分布严格受褶皱形变及剪切带的控制,该矿区的 Au I 号主要含矿层与剪切变形发育最强烈的李家庄-大草坪韧性剪切带中央部位相重合(图7)。再如西山金矿床,它位于吕梁期背斜褶皱的核部,矿体产在背斜核部的韧-脆性剪切带中,由剪切

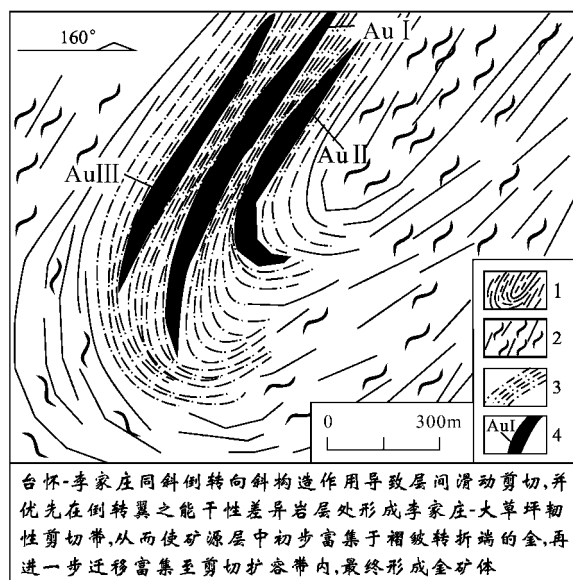


图7 东腰庄金矿床构造控矿剖面示意图

1—同斜倒转向斜;2—绿泥片岩;3—韧性剪切带;
4—金矿体及编号

Fig. 7 Sketch section of ore-controlling structures in the Dongyaozhuang gold deposit

1—Homoclinal reverted syncline; 2—Chlorite schist; 3—Ductile shear zone; 4—Gold ore body and its serial number

带内具糜棱岩化的岩石及发育其中的石英脉共同组成,韧-脆性剪切变形明显,构造控矿特征显著,同样反映了五台山绿岩带金矿构造控矿的普遍规律。

3.3 褶皱与剪切变形是一种重要的成矿作用

褶皱与剪切变形不仅具有导矿、容矿的作用,而且也是重要的造矿因素,在金的成矿作用链中,在导致矿化发生、促进矿化向成矿转化及控制矿体就位等方面,起着极为重要的作用。因此,褶皱与剪切变形本身就是一种重要的成矿作用。目前已普遍注意到,金成矿作用一般总是滞后于剪切作用过程,矿化向成矿转化和矿体就位都发生在韧性变形向脆韧性变形过渡的阶段(刘劲鸿,1991),具有工业意义的金矿床往往产在晚期阶段的韧-脆性变形破碎带中,而早期阶段的韧性剪切带对金元素的聚集起着重要作用。概括起来,剪切带与金成矿作用之间的时间关系大致有2种情况:①在同期剪切构造变形过程中,剪切带在不同的构造层次上同时表现出不同的变形特征,成矿元素从深部韧性(超韧性)剪切变形域中活化迁出,沿剪切带向上迁移到中-浅层次的韧-脆性变形域中沉淀富集,构造热事件与成矿事件属于同一演化过程的产物,只是矿质的沉淀时间要略晚

于深层次的韧性变形;②在不同的构造变形过程中,即早期韧性剪切带经抬升剥蚀后构造层次上移,叠加了后期的韧-脆性、脆性变形,成矿作用也随之发生叠加,从而在同一构造部位出现多种矿化类型组合,其成矿一般主要发生在后期的叠加阶段(路颜明等,2008)。本文所述五台山绿岩带的3种主要类型金矿床都属于前一种情况,即在五台山地区的含金矿源层形成之后,大规模的地壳运动波及该地区,五台运动中期(2 600~2 500 Ma)的探马石运动(五台运动Ⅱ)开始了,区域地热温度迅速升高,条带状铁建造、中酸性-中基性火山沉积岩系等开始发生区域动力热流变形变质作用,以至逐步达到低角闪岩-绿片岩相,并发育韧性褶皱及韧性剪切变形。在较高的温度和压力条件下,褶皱及韧性剪切等构造变形作用不仅提供了热液活动的驱动力,促使含金流体的运移,而且能够引起构造动力分异作用,宜于矿源层中金元素的活化、萃取,从而导致弥散于大面积围岩和下地壳中的动力变质热液大量萃取、吸收矿源层中活化的金元素,形成了金浓度较高的含矿流体,并进入韧性剪切带、褶皱虚脱部位等构造通道中。该阶段对含金流体的形成起着重要作用,通常被认为是褶皱及剪切变形成矿作用。到五台中期末(2 500 Ma左右),探马石运动即将结束,构造应力减弱,区域地热温度下降,剪切带内的化学平衡发生显著变化,大量岩石发生了绿泥石化、碳酸盐化、黄铁矿化等蚀变作用,导致析出 SiO_2 、K、Ca、Au、Ag等化合物和元素,并伴随原含矿热液一并流向构造扩容带(膨胀带)和其他有利构造部位(扭曲和空隙、裂隙处),由于低温、低压和低化学势,导致石英、绢云母、碳酸盐及自然金和金的载体矿物的沉淀和聚集,最终形成了工业矿体。扩容空间主要发育在晚期褶皱轴部虚脱位置、剪切变形所形成的韧-脆性破裂构造中,该阶段通常被认为是褶皱及剪切变形的控矿作用。当然,在早期韧性剪切变形强烈的部位,C面理及其他微裂隙更为发育,亦会影响后期韧-脆性构造裂隙的发育程度,从而使后期更易发生成矿元素的富集。在五台运动晚期(2 300 Ma左右)的金洞梁运动(五台运动Ⅲ)和吕梁运动(1 800 Ma左右)期间,都可发生与探马石运动机理相同的成矿作用。矿床的形成是长期的、多期次和多阶段的。

韧性剪切带的应变,从剪切带的边缘向中心逐渐增强。应变程度在中心部位较高,继续变形总是在中心处发生。因此,韧性剪切带中心部位岩石的

变形作用较两侧的岩石更为强烈,其渗透率也较两侧的岩石高,这些部位更有利于流体的运移和沉淀。这也是金矿化与变形强度存在明显正相关的原因(李晓峰等,2001;路颜明等,2008)。

流体与剪切带的关系也非常密切,流体常常促进剪切带的发展。一方面,水-岩相互作用改变了矿物行为、矿物组合和化学反应速率,提高了岩石的韧性、溶液的迁移能力、矿物的微破裂和重结晶作用,导致岩石变形的加剧;另一方面,变形岩石的劈理化、S-C面理和构造分异作用提高了流体的渠化作用强度,韧性变形变质作用的结果必然导致剪切带内发生岩石面理化、矿物定向化和细粒化(李晓峰等,2001)。由于构造变质作用的总趋势是生成易变形的矿物以抵消构造应力的影响,从而加剧了岩石的变形,因此,对金矿的成矿作用最为有利。

3.4 影响褶皱与剪切变形成矿的主要因素

由上述分析可见,褶皱及剪切变形是五台山绿岩带金矿构造控矿的主导。从构造控矿的角度而言,影响成矿作用的因素主要包括变形强度、变形方式及赋矿主岩的性质等。

(1) 变形强度 变形带内岩石变形的强弱直接影响着金矿体的发育。大量地质资料表明,一般来说,在构造强变形区,流体的流动增强,地球化学异常显著,成矿机率增大(钱建平,2009)。变形强,扩容就强,易于形成有利的构造空间;另外,强烈变形可导致热液活性增强和促进围岩之中金的活化,有利于成矿元素的萃取和搬运,并源源不断地沿着剪切通道向褶皱转折端及剪切带复合部位的扩容带输送,从而使此处矿质达到高度富集,进一步沉淀、聚集而形成矿体(吴堃宏,1992)。

(2) 变形方式决定金矿化类型 变形的韧性或脆性对应于地壳的不同深度,形成不同的金矿类型。韧性变形发生于地壳深部,以星点浸染状矿化为主;而韧-脆性变形则发生于地壳中部,以脉状-细脉浸染状矿化为主,并以发育各种剪切脉系和拉伸脉为特征。韧性剪切带后期的脆性变形活动对金成矿有极为重要的意义(吴堃宏,1992)。

(3) 赋矿主岩的差异能干性 在绿岩带内主岩能干性差异较大的地带,如绿泥片岩夹条带状铁建造,或绢英片岩、绿泥钠长片岩夹条带状铁建造,或绿泥片岩夹绢云钠长片岩,或差异较大的岩性的分界面上,存在有较大的韧性差,构造应力易集中,易发生最强烈的层间滑动剪切应变。这一方面增强了

岩石的渗透性,改善了岩石的化学活性,有利于矿源层中有益元素的活化、萃取及含矿流体的运移;另一方面,在韧性剪切带后期的韧-脆性变形阶段,在所谓的能干层中形成了各种剪切裂隙,它们成为矿质充填的空间。殿头、东腰庄、狐狸山等矿区均具有这一典型特征。

4 结 语

(1) 依据控矿构造,将五台山绿岩带金矿床划分为 3 种主要类型,即与次级褶皱有关的条带状铁建造型金矿床、与剪切变形有关的变质中酸性火山沉积岩型金矿床、与剪切变形有关的变质砾岩型金矿床。它们都具有明显的构造控矿特征。五台山绿岩带的区域构造轮廓制约着含矿带呈 NEE 向区域性展布,大型紧闭褶皱转折端控制着矿床的定位,与紧闭褶皱伴生的剪切变形及次级褶皱控制着矿体的规模、形态和产状,剪切裂隙则控制着金矿脉的分布和金矿化的局部富集。在诸控矿因素中,矿源层是物质基础,构造是必要条件,经过构造叠加改造的矿源层才是最佳的成矿和找矿靶区。

(2) 紧闭褶皱倒转翼部(近转折端)的剪切变形在五台山绿岩带金矿内较为普遍。褶皱及剪切变形既是一种重要的成矿作用,其所生成的扩容带又是十分良好的赋矿空间。褶皱的转折端及伴生的层间剪切变形带是形成五台山绿岩带金矿的主要控矿构造。

(3) 五台山绿岩带内金矿床的成矿年龄相对集中且趋于一致,主要有(2 600~2 500) Ma、2 300 Ma 左右、1 800 Ma 左右 3 个时期。这 3 期构造热事件及变形变质作用对该区绿岩带的金成矿起着一定的促成作用。因此,五台山绿岩带金矿是由多期次、多阶段构造热事件的叠加而生成的,金矿床的形成具有长期性和多期多阶段性。

References

- Chen P and Chen J M. 1996. Metallogenic series and models for mineral deposits in Shanxi's major ore-forming zones, China [M]. Taiyuan: Shanxi Science and Technology Press. 89-161 (in Chinese).
- Jiang F X. 2006. Metallogenic geological characteristics and genesis of Dongyaozhuang gold deposit in Wutai, Shanxi [J]. Geology and Exploration, 42(3): 24-29 (in Chinese with English abstract).
- Li S X, Ji S K, Ma Z H, He G P, Tian Y Q and Yang W K. 1982. Geology of metamorphic sedimentary iron deposits in Wutai Mountain area [M]. Changchun: Jilin Science and Technology Press. 42-92 (in Chinese).
- Li X F, Hua R M and Feng Z H. 2001. Deformation-metamorphism and gold mineralization in ductile shear zone [J]. Journal of Guilin Institute of Technology, 21(3): 207-212 (in Chinese with English abstract).
- Liu J H. 1991. On the mechanism of mineralization in Archaean gold-bearing shear zone [J]. Journal of Changchun University of Earth Science, 21(2): 157-166 (in Chinese with English abstract).
- Lu Y M, Zhang Y J, Zhang D, Fan J J, Pan A J, Zhao J and Dong H F. 2008. Researching progress about the relationship of shear zone and gold mineralization [J]. Gold Science and Technology, 16(5): 1-6 (in Chinese with English abstract).
- Luo H, Chen Z H and Shen B F. 1999. The mineralized age of Archean BIF-hosted gold deposits in Wutai Mountain area [J]. Progress in Precambrian Research, 22(2): 11-17 (in Chinese with English abstract).
- Luo W, Dai T G and You X J. 2007. Metallogenic regularities and predictions of Au deposit in the south-west Hunan Province [J]. Geology and Exploration, 43(6): 42-46 (in Chinese with English abstract).
- Qian J P. 2009. Tectono-geochemical prospecting method and its application in searching for sediment-hosted, disseminated gold deposits [J]. Geology and Exploration, 45(2): 60-67 (in Chinese with English abstract).
- Sun Z P. 1996. The shear zone types and their gold-mineralization in the Mid-Yinshan Mts., Inner Mongolia [J]. Journal of Geology and Mineral Resources of North China, 11(3): 457-462 (in Chinese with English abstract).
- Tian Y Q. 1991. Geology and gold mineralization of Wutaishan-Hengshan greenstone belt [M]. Taiyuan: Shanxi Science and Technology Press. 102-220 (in Chinese).
- Wang A J, Liu Z H, Li X F, Zhou J H, Xu H and Bao J Z. 1996. The Archaean geology and gold deposits of Wutai Mountain area [M]. Changchun: Jilin Science and Technology Press. 52-78 (in Chinese).
- Wu J X. 2009. Key factors controlling deposit and exploration direction of Jinshipo Zn-Cu deposit, southeastern Yunnan Province [J]. Geology and Exploration, 45(5): 524-529 (in Chinese with English abstract).
- Wu Q H. 1992. Some views about the influence of tectonic activity on gold mineralization [J]. Gold, 13(7): 6-11 (in Chinese with English abstract).
- Xu J. 1993. Genetic types and characteristics of lode-gold in the Wutai Mountains [J]. Shanxi Geology, 8(1): 29-36 (in Chinese with English abstract).
- Yang Y C, Wang J and Ma Z H. 2001. Qitushi reworking typed conglomerate gold deposit of sedimentary metamorphism-hydrothermal superimposition in Wutai Prefecture, Shanxi Province [J]. Gold,

22(7):6-9 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈平,陈俊明.1996.山西主要成矿区带成矿系列及成矿模式[M].太原:山西科技出版社.89-161.
- 姜峰贤.2006.山西五台县东腰庄金矿成矿地质特征及矿床成因[J].地质与勘探,42(3):24-29.
- 李树勋,冀树楷,马志宏,贺高品,田永清,杨文魁.1982.五台山区变质沉积铁矿地质[M].长春:吉林科技出版社.42-92.
- 李晓峰,华仁民,冯佐海.2001.韧性剪切带变形变质作用与金的矿化富集[J].桂林工学院学报,21(3):207-212.
- 刘劲鸿.1991.论太古宙含金剪切带的成矿机制[J].长春地质学院学报,21(2):157-166.
- 路彦明,张玉杰,张栋,范俊杰,潘爱军,赵军,董华芳.2008.剪切带与金矿成矿研究进展[J].黄金科学技术,16(5):1-6.
- 骆辉,陈志宏,沈保丰.1999.五台山区太古宙铁建造型金矿的成矿年龄[J].前寒武纪研究进展,22(2):11-17.

- 罗卫,戴塔根,游先军.2007.湘西南金矿成矿规律与成矿预测研究[J].地质与勘探,43(6):42-46.
- 钱建平.2009.构造地球化学找矿方法及其在微细浸染型金矿中的应用[J].地质与勘探,45(2):60-67.
- 孙政平.1996.阴山中段剪切带类型及金矿化[J].华北地质矿产杂志,11(3):457-462.
- 田永清.1991.五台山—恒山绿岩带地质及金的成矿作用[M].太原:山西科技出版社.102-220.
- 王安建,刘志宏,李晓峰,周继华,许虹,包继忠.1996.五台山太古宙地质与金矿床[M].长春:吉林科技出版社.52-78.
- 吴金宣.2009.滇东南金石坡锌铜矿床控矿特征及找矿方向[J].地质与勘探,45(5):524-529.
- 吴堃虹.1992.构造活动对金成矿影响的几点认识[J].黄金,13(7):6-11.
- 徐俊.1993.五台山区岩金成因类型及特征[J].山西地质,8(1):29-36.
- 杨言辰,王建,马志红.2001.山西五台七图式沉积变质-热液叠加改造型砾岩金矿床[J].黄金,22(7):6-9.

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