

五台山地区韧性剪切带型金矿成因^{*}

刘志宏

(南京大学地球科学系, 南京)

王安建 许 虹

(长春地质学院, 长春)

提 要: 五台山地区韧性剪切带型金矿分布于晚太古代碰撞造山带中, 与世界许多太古宙绿岩带型金矿具有相似的特征。研究表明: 成矿流体的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}} = -2.1\text{‰} \sim 4.9\text{‰}$, $\delta\text{D} = -69\text{‰} \sim -112\text{‰}$, 蚀变碳酸盐矿物的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} = -2.0\text{‰} \sim -1.4\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} = 10.0\text{‰} \sim 20.0\text{‰}$; 载金黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S} = -3.7\text{‰} \sim 5.6\text{‰}$ 。成矿前流体具有中—高盐度, 成矿期流体以富含 CO_2 、近似海水的 $\delta^{18}\text{O}$ 和海相碳酸盐的 $\delta^{13}\text{C}$ 值, 成矿后流体具有较高的盐度及可变的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 值。这种金矿成矿流体很难与某单一流体源相对应, 它反映的多是变质流体与海盆地铁镁质岩石在成岩过程中饱含的热卤水混合的结果。综合有关资料, 提出本区韧性剪切带型金矿形成于太古宙末期汇聚型地球动力学背景下的弧-陆、陆-陆碰撞过程中, 金矿化作用和分布受碰撞构造边界的大规模逆冲型韧性剪切带控制。

主题词: 韧性剪切带型金矿 稳定同位素 成因模式 五台山

近年来发现的许多大型、超大型金矿都受韧性剪切带控制^[1,13,14], 很多人称之为韧性剪切带型金矿。本文所述的五台山地区的金矿也属于韧性剪切带型金矿, 其矿体呈脉状, 矿石成分简单, 以碳酸盐化、硅化、黄铁矿化和绢云母化为特征, 空间上受韧性剪切带及叠加其上的脆性断裂控制。

韧性剪切带型金矿的发现是五台山地区乃至我国其它花岗岩-绿岩分布区金矿找矿勘查领域内的重要突破之一。区内小型金矿床(点)星罗棋布, 但具有一定规模和勘查前景的矿床十分少见。这种满天星星不见月亮的格局一直困扰着众多的地质勘查者。但应该强调, 与国外富含金矿的花岗岩-绿岩带相比, 五台山地区具有良好的成矿条件。首先, 该区发现有完整的绿岩系, 尽管其所谓的下部层位缺少典型的具有鬃刺结构的科马提岩, 但类似成分的火山岩和侵入岩依然存在; 其次, 本区韧性剪切带发育, 不同性质、时代和规模的韧性剪切带交织在一起, 构成了复杂的构造样式; 另外, 不同时期侵位的、具有不同成分和产状的岩浆岩遍及全区。显然, 无论从哪一个角度看, 这一地区都具备了金矿形成的良好条件。

1 地质概况

五台山地区地处华北地台腹地, 是一个晚太古代碰撞造山带, 其中分布着十分复杂的变质岩组合和构造形迹群, 与世界上许多绿岩带相似^[2]。做为一个独立的地质单元, 它以溥沱河

^{*} 地质矿产部定向基金资助项目(项目编号: 直科定 92-04)

刘志宏, 男, 1962 年生, 讲师, 博士后, 从事构造地质学和前寒武纪地质学研究。邮政编码: 210093

1996-09-03 收稿, 1996-12-06 修改回

断陷北侧的韧性剪切带为北部边界与恒山高级变质地体相接，以龙泉关韧性剪切带为南部边界与阜平高级变质地体相连，总体构成一向南西撒开的楔状体^[3]，五台山碰撞造山带由三个构造片体构成，即南部构造片体、中部构造片体和北部构造片体，其间由大型逆冲型韧性剪切带所拼合(图 1)。根据不同构造片体的岩石组合和地球化学特征研究，确定了其形成时的大地构造背景。南部构造片体由陆棚沉积建造(长石石英岩-大理岩组合)、洋壳残片(斜长角闪岩-磁铁石英岩组合)和岛弧型火山岩系(黑云变粒岩-斜长角闪岩组合)及稍晚侵位的石佛岩体

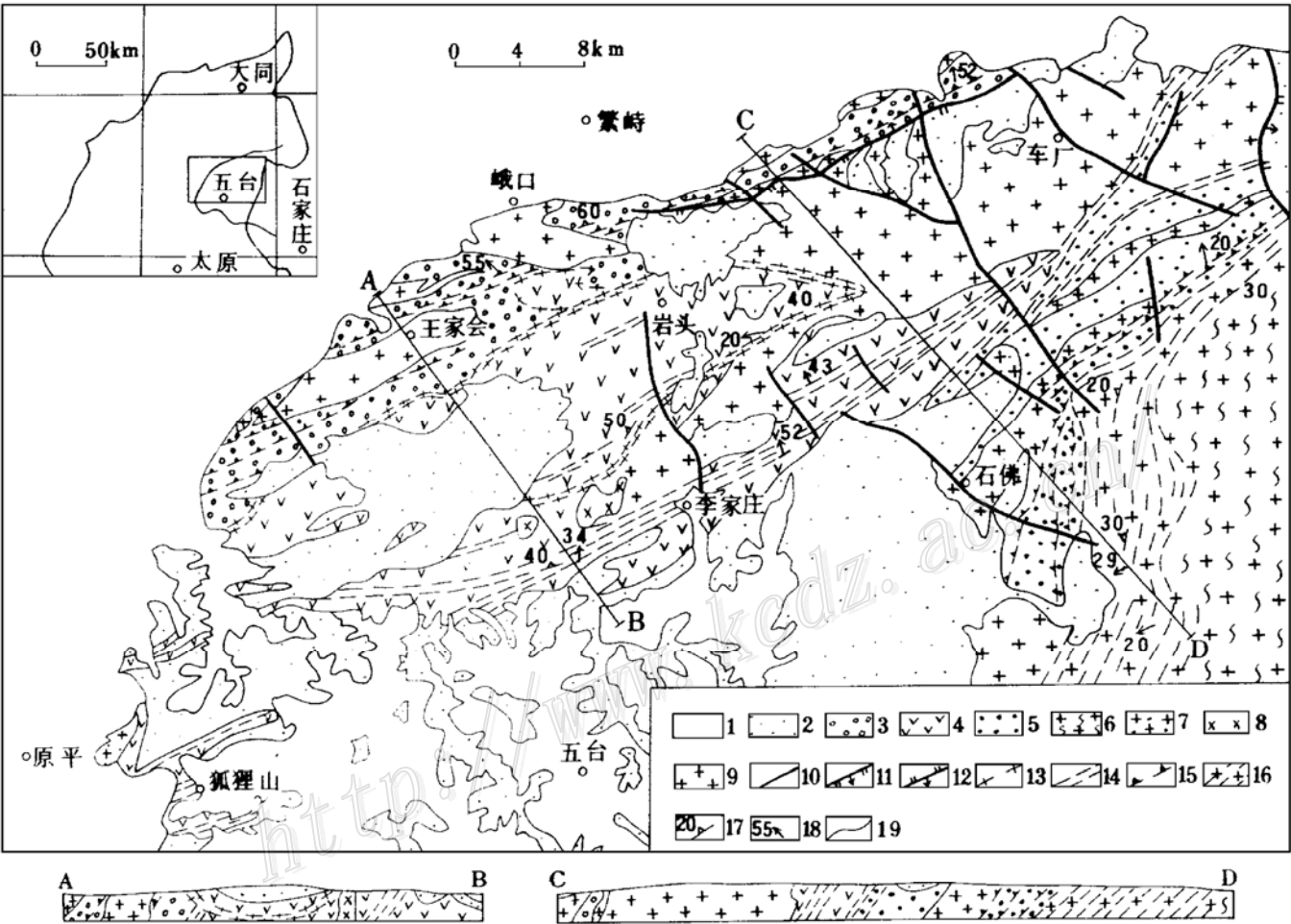


图 1 五台山晚太古代造山带地质图

(据山西省地质矿产局区调队 1 : 5 万地质图编制)

1—第四系；2—高凡群—奥陶系；3—北部构造片体——弧后混杂岩带；4—中部构造片体——岛弧系；5—南部构造片体——弧前混杂岩带；6—阜平变质杂岩；7—元古宙—中生代花岗岩；8—太古宙基性侵入岩；9—太古宙花岗岩；10—断层；11—逆断层；12—正断层；13—伸展型韧性剪切带；14—绿片岩相逆冲型韧性剪切带；15—角闪岩相逆冲型韧性剪切带；16—龙泉关韧性剪切带；17—叶理产状；18—矿物拉伸线理产状；19—地质界线

Fig. 1. Geological map of the Late Archean orogenic belt in Wutai Mountain.

1—Quaternary; 2—Ordovician Gaofan Group; 3—Northern tectonic slice (back-arc melange zone); 4—Central tectonic slice (plateau-island arc); 5—Southern tectonic slice (forearc melange zone); 6—Fuping metamorphic complex; 7—Proterozoic-Mesozoic granite; 8—Archean basic intrusive; 9—Archean granite; 10—Fault; 11—Reversed fault; 12—Normal fault; 13—Extensional ductile shear zone (DSZ); 14—Thrust DSZ of greenschist facies; 15—Thrust DSZ of amphibolite facies; 16—Longquanguan DSZ; 17—Attitude of foliation; 18—Attitude of mineral stretching lineation; 19—Geological boundary.

组成。各种岩石组合之间及内部发育一系列倾向北西的逆冲型韧性剪切带,使该片体内三种岩石组合通过构造作用拼合在一起,并俯冲到地壳一定深度接受角闪岩相变质作用改造,能圆满解释这种拼合的最佳机制是构造混杂。三种不同岩石组合由南向北出现陆棚沉积建造、洋壳残片组合、岛弧型火山岩组合有序排列,明确指示了洋壳消减、弧-陆碰撞过程和弧前混杂的构造环境。石佛岩体的构造环境判别也支持了这一点;中部构造片体由绿岩系和车厂岩体构成。绿岩系主要由钙碱性玄武岩和低钾拉斑玄武岩组成,这套岩系可能为洋壳消亡过程中岛弧火山喷发形成的,与之密切伴生的车厂岩体也显示了岛弧型花岗岩的特点;北部构造片体由具有洋壳特点的斜长角闪岩-磁铁石英岩组合和活动大陆边缘及弧后盆地环境下形成的黑云变粒岩-富铝片麻岩组合发育,其间发育一系列倾向北西的逆冲型韧性剪切带,具备了使该片体中不同构造环境下形成的岩石通过构造混杂在一起、并俯冲到一定深度接受角闪岩相变质作用改造的机制。再有,片体中的峨口岩体、王家会岩体具有大陆碰撞和造山后型双重构造环境下侵位的花岗质岩石的特征,也反映了陆-陆碰撞的特点。在上述研究的基础上,又对本区的变质作用、变形作用和同位素年代学资料进行综合研究,我们认为五台山造山带是在阜平陆块-车厂弧-恒山陆块碰撞过程中形成的,南部构造片体为弧前混杂岩带,中部构造片体为古岛弧系,北部构造片体为弧后混杂岩带^①,其演化过程可简述为两个阶段:① 弧前碰撞-弧后消减阶段。车厂弧南侧洋盆的大洋岩石圈向车厂弧下俯冲,弧地质体与阜平陆块碰撞,使陆棚沉积建造、洋壳残片和部分岛弧火山-沉积岩系拼合在一起,形成弧前混杂岩带。持续的俯冲作用使混杂岩带达到地壳深部接受角闪岩相变质,形成弧前混杂岩带两缘及内部的逆冲型韧性剪切带,最终使车厂弧与阜平陆块焊接在一起,构成统一古陆。在弧前碰撞同时或稍后,弧后盆地的大洋岩石圈向恒山陆块下消减;② 陆-陆碰撞阶段。弧、陆焊接在一起的统一古陆与恒山陆块碰撞,使洋壳残片和弧后盆地环境下形成的岩石组合拼合在一起,构成北部弧后混杂岩带,并且弧-陆焊接古陆向恒山陆块下俯冲,使其发生角闪岩相-绿片岩相变质,同时形成一系列逆冲型韧性剪切带。

2 韧性剪切带型金矿床的地质特征

2.1 韧性剪切带型金矿床的产状

五台山地区所有与韧性剪切带有关的金矿床(点)主要出现在中部构造片体南、北两缘及其附近的韧性剪切带中,并集中分布于中部构造片体南缘的巨型绿片岩相逆冲型韧性剪切带内,空间上呈带状展布(图1,图2)。

五台山地区韧性剪切带型金矿主要产于下列构造部位。

(1) 韧性剪切带的强应变带。已经发现的矿床(点)均分布于韧性剪切带的强应变带(表1),这种分布规律与 Colvine 等(1988)描述的加拿大安大略省苏必利尔构造区太古宙脉状金矿床的分布规律相类似^[15]。

(2) 大型构造透镜体的下盘、韧性剪切带发生转弯的部位。区内代银掌金矿和康家沟金矿属于这种情况(图3,表1)。这种部位具有较好的渗透性,往往又是很好的扩容带。另外,构

① 刘志宏,1996,五台山晚太古宙碰撞造山带及韧性剪切带型金矿成因,长春地质学院博士研究生毕业论文

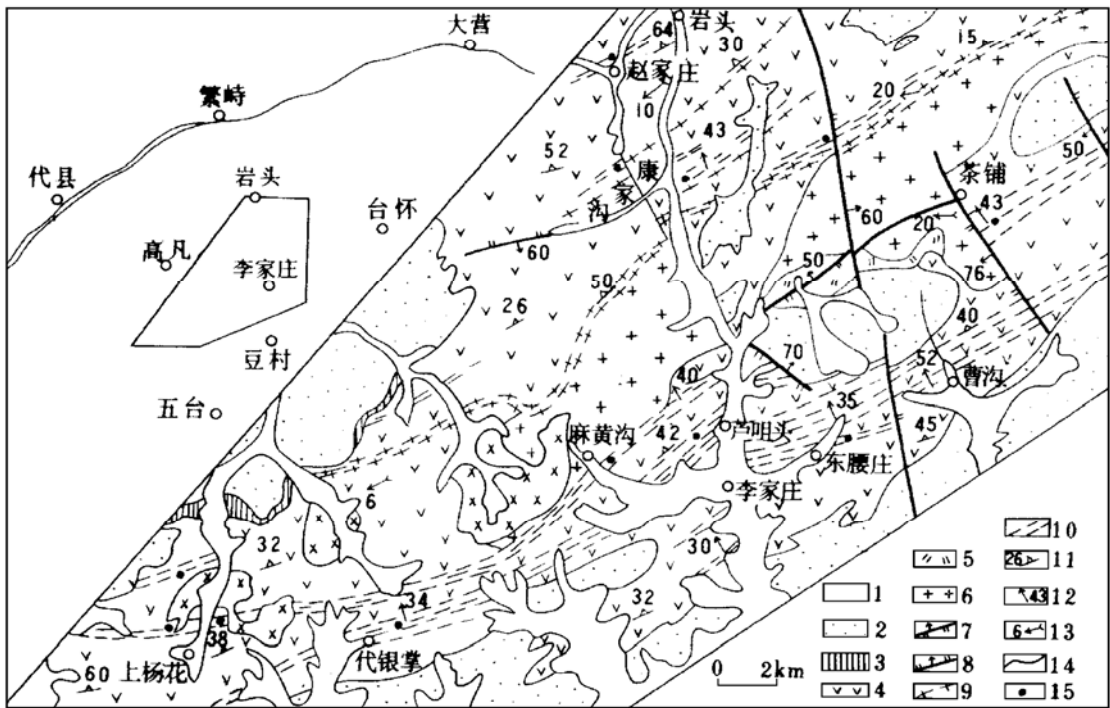


图 2 岩头-李家庄地区金矿分布图

1—寒武系—第四系；2—滹沱群；3—高凡群；4—变质钙碱性火山岩；5—花岗闪长岩-奥长花岗岩；6—英云闪长岩-奥长花岗岩；7—逆断层；8—正断层；9—伸展型韧性剪切带；10—绿片岩相逆冲型韧性剪切带；11—叶理；12—矿物拉伸线理；13—b 线理；14—地质界线；15—金矿床（点）

Fig. 2. Distribution of gold deposits in Yantou-Lijiazhuang area.

1—Cambrian-Quaternary；2—Hutuo Group；3—Gaofan Group；4—Metamorphic calc-alkaline volcanic rock；5—Granodiorite-trondhjemite；6—Tonalite-trondhjemite；7—Reversed fault；8—Normal fault；9—Extensional ductile shear zone (DSZ)；10—Thrust DSZ of greenschist facies；11—Foliation；12—Mineral stretching lineation；13—b lineation；14—Geological boundary；15—Gold deposit (occurrence).

造透镜体下盘、靠近透镜体的部位对流体体系的封闭可能具有较特殊的意义。

(3) 韧性剪切带分叉或交汇部位。这种部位是较理想的扩容带。东腰庄金矿属于这种情况(图 2)。

(4) 韧性剪切带内脆性断裂叠加的部位。与冀东金厂峪金矿^[4,5]和加拿大安大略省某些太古宙金矿床相似^[15]，五台山地区亦见到金矿床分布于整合叠加在韧性剪切带之上的脆性断裂之中的情况。五台山东部的陡岭金矿属于这种类型(图 4)。

研究还发现，韧性剪切带型金矿体(脉)主要产于糜棱叶理、剪切叶理、主剪切裂隙、压剪切裂隙、高角度里德尔剪切裂隙、拉张裂隙、构造透镜体边部和舒缓波状断裂面中。

2.2 容矿岩石组合及含金性

现有资料表明，五台山地区金矿容矿岩石组合与加拿大阿比提比绿岩带的金矿容矿岩石组合比较具有类似的规律，即五台山碰撞造山带内几乎所有岩石类型都具金矿化，并且同一矿床可赋存于几种不同岩性之中(表 1)。事实上，五台山地区几乎所有容矿岩都已经受到了变形作用的改造而形成各种糜棱岩或糜棱片岩，加之变形时开放体系中流体作用和与金矿化有关的蚀变作用已经使原始岩石的面貌皆非，但这并不等于说它们的原岩无法恢复(在那些

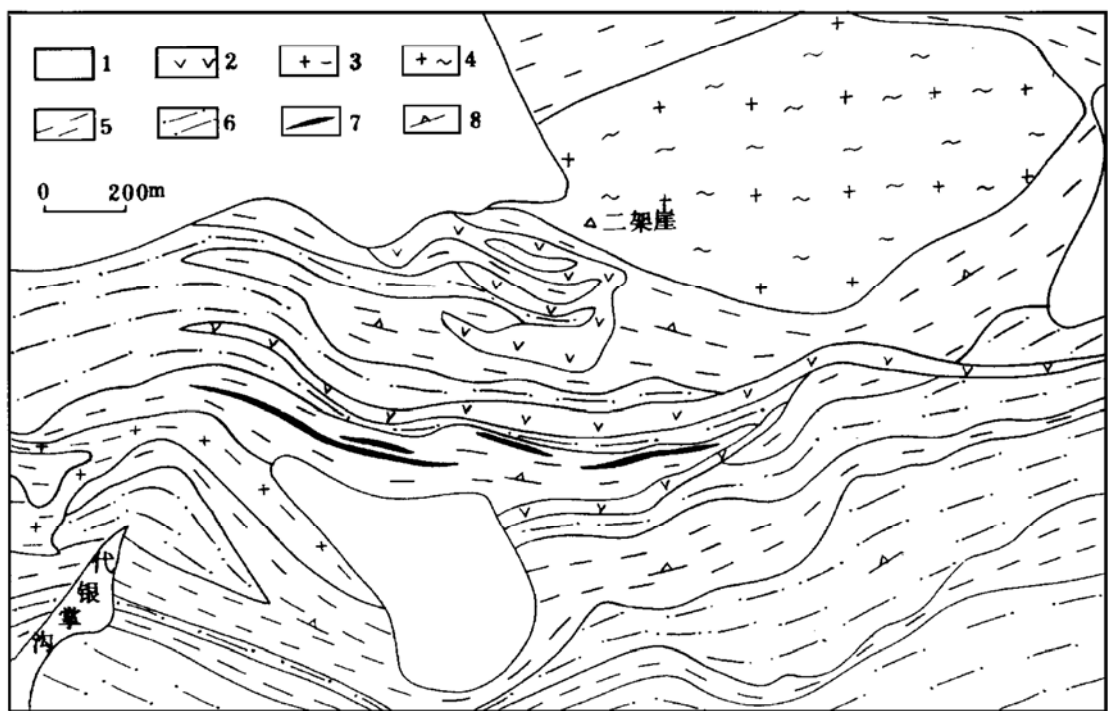


图 3 代银掌金矿地质图

1—第四系；2—变基性岩脉；3—奥长花岗质糜棱岩；4—糜棱岩化奥长花岗岩；5—绢英糜棱片岩；6—绿泥糜棱片岩；7—矿体；8—叶理产状

Fig. 3. Geological map of the Dayinzhang gold deposit.

1—Quaternary; 2—Metamorphic basic vein; 3—Trondjemitic mylonite; 4—Mylonitic trondjemite; 5—Sericite-quartz mylonitic schist; 6—Chlorite mylonitic schist; 7—Orebody; 8—Attitude of foliation.

弱变形域内仍然可以找到赖以识别其原岩的组构特征) 或无法做统计工作, 而是强调从统计学角度出发, 在被统计的样品本身可靠性差 (即原岩研究程度低) 的情况下, 统计结果的可信度会受到很大影响, 换句话说, 仅仅根据有限几个位置采集的部分样品的研究, 使用群、组、段的方法把区域内所有类似的岩石恢复为相同原岩的作法不具有统计学意义。目前, 五台山区已经识别出的容矿岩石包括镁铁质岩石 (如拉斑玄武岩、变辉 (长辉) 绿岩、煌斑岩)、长英质岩石 (如英云闪长岩、奥长花岗岩、闪长岩) 和某些典型沉积岩 (如磁铁石英岩)。

容矿岩石的含金量一直被作为金矿原岩的重要判据之一。然而, 随着地球科学的发展, 传统的以岩石中金地球化学丰度值为衡量标准或以地层中金矿产出数量的多寡来判定金矿原岩的方法受到越来越多的挑战。本文采用贵金属钯来判定镁铁质岩石能否作为金矿源岩的方法^[7], 对狐狸山金矿容矿岩石中拉斑玄武岩、辉长辉绿岩类及它们强变形的产物是否是该矿床形成的矿源层问题作了讨论。由表 2 可以看出, 狐狸山矿区内几乎所有岩石原始金的含量都低于其现有分析数据, 易释放金为一负值。说明成矿过程中, 这些岩石不但没有提供金, 反而其本身也在矿化过程中出现了金富集。显然, 把所谓“柏枝岩组”中的镁铁质岩石视为赋存金矿的矿源层是很难令人信服的。另外, 含金韧性剪切带的地球化学研究表明^[8], 金的成矿作用主要与韧性变形后期富金流体的蚀变作用关系密切。成矿物质可能主要来自于地壳深部, 而围岩不为主要矿质来源。

表 1 五台山地区主要韧性剪切带型金矿床（点）的特征

Table 1. Characteristics of main ductile shear type gold deposits in Wutai Mountain area

矿床(点)	构造背景	矿床产出部位	主要容矿构造	容矿岩石
狐狸山	中部构造片体南缘	剪切带强应变带	剪切叶理 主剪切裂隙	镁铁质火山岩，长英质、 镁铁质侵入岩，少量磁铁 石英岩
代银掌	中部构造片体南缘	剪切带强应变带及大型构造透 镜体下盘、剪切带转弯部位	剪切叶理， 主剪切裂隙	奥长花岗岩
上杨花	中部构造片体南缘	剪切带强应变带	剪切叶理，主剪切裂隙	镁铁质火山 岩
下杨花	中部构造片体南缘	剪切带强应变带	剪切叶理，主剪切裂隙	镁铁质火山岩
麻黄沟	中部构造片体南缘	剪切带强应变带	糜裂叶理，剪切叶理，主剪切裂隙	英云闪长岩
芦咀头	中部构造片体南缘	剪切带强应变带	剪切叶理， 主剪切裂隙	镁铁质火山岩， 长英质侵入岩
东腰庄	中部构造片体南缘	剪切带强应变带及剪切带分叉 或交会部位	剪切叶理，主剪切裂隙，压剪切裂 隙，高角度里德尔剪切裂隙	镁铁质火山 岩，少量磁铁 石英岩
西窑	中部构造片体南缘	剪切带强应变带	剪切叶理，主剪切裂隙，压剪切裂 隙，高角度里德尔剪切裂隙	镁铁质火山 岩
曹沟	中部构造片体南缘	剪切带强应变带	剪切叶理，主剪切裂隙，压剪切裂 隙，高角度里德尔剪切裂隙	镁铁质火山 岩
康家沟	中部构造片体内部	剪切带强应变带及大型构造透 镜体下盘、剪切带转弯部位	剪切叶理，主剪切裂隙，压剪切裂 隙，高角度里德尔剪切裂隙	镁铁质火山 岩，磁铁石英 岩
赵家庄	中部构造片体北缘	剪切带强应变带	剪切叶理，主剪切裂隙	镁铁质火山 岩
陡岭	中部构造片体北缘	剪切带被脆性断裂 整合叠加部位	拉张裂隙，构造透镜体边部和舒缓 波状断裂面	镁铁质火山 岩，煌斑岩， 石英闪长岩

2.3 岩石蚀变序列

五台山地区的蚀变产物主要分布在中部构造片体南、北两缘及其附近的逆冲型韧性剪切带中。这些蚀变按其发育的强度和分布的广度依次为碳酸盐化、绢云母化、绿泥石化、钠黝帘石化、绿帘石化、硅化、黄铁矿化，部分地段发育电气石化、钠长石化和黑云母化。该区与金矿化有关的蚀变矿物组合及序次为：① 变形中晚期条带状或脉状硅化、碳酸盐化；② 叠加于石英脉上的晚至后期绿泥石化；③ 变形晚期绢云母化；④ 变形晚至后期条纹状、浸染状或网脉状黄铁矿化。从空间上看，金矿化处于强铁白云石化、细脉-透镜状硅化、绢云母化、绿

泥石化和条纹状、浸染状或网脉状黄铁矿化相互叠加的中心部位。其中碳酸盐化和绢云母化空间分布范围一般较宽，并具有明显的强度分带。硅化分布范围较窄，与条纹状、浸染状或网脉状黄铁矿化多构成矿体的主要部分，是区内找矿的重要标志。

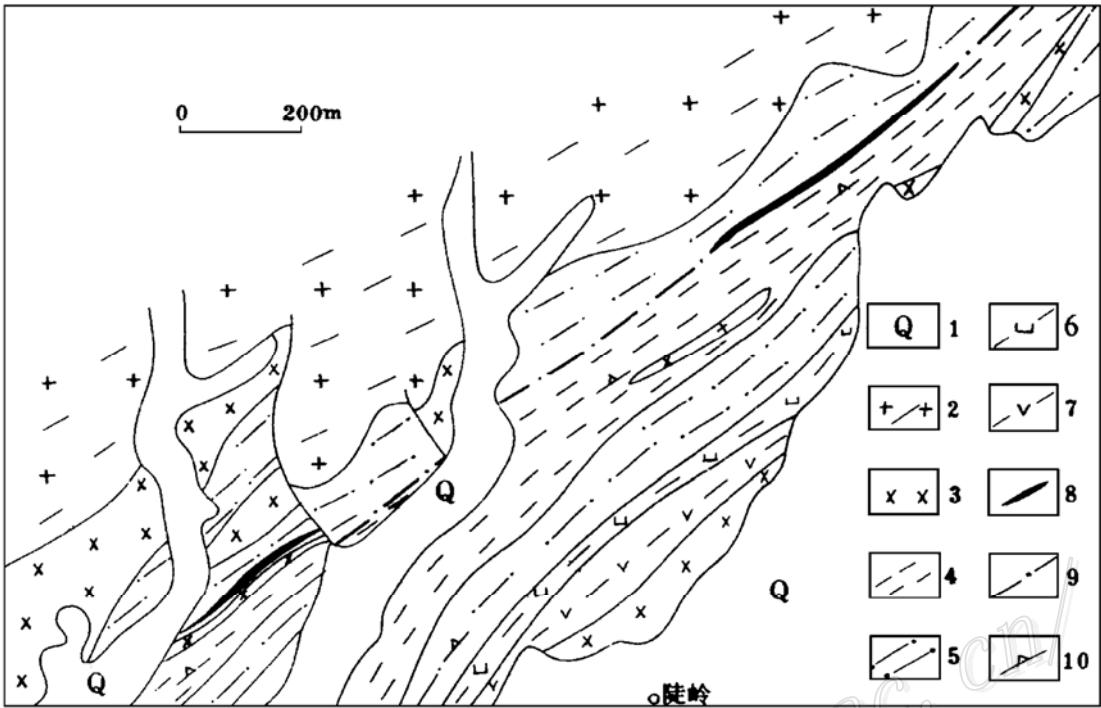


图 4 陡岭金矿地质图

1—第四系；2—糜棱岩化石英闪长岩；3—煌斑岩；4—绢英糜棱片岩；5—绿泥糜棱片岩；6—角闪石岩；7—斜长角闪岩；8—金矿体；9—断层；10—叶理产状

Fig. 4. Geological map of the Douling gold deposit.

1—Quaternary; 2—Mylonitic tonolite; 3—Lamprophyre; 4—Sericite-quartz mylonitic schist; 5—Chlorite mylonitic schist; 6—Hornblendite; 7—Amphibolite; 8—Orebody; 9—Fault; 10—Attitude of foliation.

表 2 狐狸山金矿区镁铁质岩石易释放金计算 (10⁻⁹)

Table 2. Calculations of readily-releasable gold in mafic rocks from the Hulishan gold deposit

样 号	金 类 别 及 数 据			样 号	金 类 别 及 数 据		
	Au _现	Au _原 (Pd · K ^①)	Au _{易释放} (Au _原 -Au _现)		Au _现	Au _原 (Pd · K ^①)	Au _{易释放} (Au _原 -Au _现)
H002	5	1.55	-3.45	H003	4	0.74	-3.26
H004	4	1.44	-2.56	H032	2	0.81	-1.19
H063	2	1.70	-0.30	H010	2	0.74	-1.26
H091	2	2.15	+0.15	H085	2	1.11	-0.89
H026	2	1.26	-0.74	H088	3	0.74	-2.26
H105	13	1.48	-11.52	H036	1	0.81	-0.19
H016	3	0.74	-2.26	H119	3	1.85	-1.15

① K=0.37，样品由长春地质学院分析测试中心测试，资料来源于本项目

3 稳定同位素地球化学

为研究五台山地区韧性剪切带型金矿的流体、矿质来源，分别对该区金矿的石英、碳酸盐矿物及矿体围岩进行了氢、氧、碳、硫同位素测试。

3.1 氢、氧同位素地球化学

对成矿前、成矿期（早、晚）及成矿后石英分别进行了氢、氧同位素测定，同时对该矿床容矿岩石全岩的氧同位素也进行了测试，测试结果表明（表 3），两类岩石四个样品的全岩 $\delta^{18}\text{O}$ 值较稳定，变化范围 $7.3\text{‰}\sim 8.3\text{‰}$ ，脉石英的 $\delta^{18}\text{O}$ 变化较大（ $8.4\text{‰}\sim 14.8\text{‰}$ ）。根据不同矿化阶段石英测温数据和分馏关系 $1000\ln\alpha=3.38\times 10^{-6}T^{-2}-3.4$ （Clayton, 1972）换算的石英的 $\delta^{18}\text{O}$ 变化范围也较大， $-2.1\text{‰}\sim 4.9\text{‰}$ 。石英的 δD 值变化较小， $-69\text{‰}\sim -112\text{‰}$ ，多集中于 $-80\text{‰}\sim -90\text{‰}$ 之间。

表 3 氢、氧同位素测试结果（‰）

Table 3. Analyses of hydrogen, oxygen and oxygen isotopes

序号	样号	测试对象	$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$	δD	产状
1	4-3	石英	8.4	-2.1		成矿后 $T_h=220\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，较高盐度
2	4-4	石英	9.8	1.3	-74	成矿期（晚）， $T_h=260\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，富含 CO_2
3	4-5	石英	9.8	2.1	-90	成矿期（早）， $T_h=280\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，富含 CO_2
4	4-7	石英	11.8	5.6	-69	成矿前， $T_h=320\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，中—高盐度
5	S4	石英	14.8	4.2		成矿后期石英脉， $T_h=220\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，较高盐度
6	B1	英云闪长岩	7.3			
7	B4	英云闪长岩	8.2			
8	H002	拉斑玄武岩	8.0			
9	H004	拉斑玄武岩	8.3			
10	1-9	石英	12.6	2.4	-112	成矿后期石英脉， $T_h=220\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，较高盐度
11	WD-301	石英	10.7	2.4	-90	
12	WD-302	石英	10.0	1.8	-80	
13	WD-309	石英	10.4	2.2	-88	
14	WD-313	石英	10.7	2.5	-88	

注：资料来源，除序号 11~14 号样品源于山西地科所外，其它来源于本项目，由长春地质学院分析测试中心测试

将石英流体的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值投入 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ 图解发现，没有一个点落入典型岩浆水和变质水范围内，与变质水比较，该区成矿流体值明显偏低，与岩浆水比较 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值均小。从 $\delta^{18}\text{O}$ 分布来看，它们更接近于大洋平均值，但 δD 差别较大，这可能与岩石中流体富含 CH_4 成分有一定关系，但也不排除天水的加入。

上述结果反映成矿流体具有较复杂成因：① 成矿过程 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化规律及成矿前流体的 $\delta^{18}\text{O}$ 值接近围岩，反映该矿区成矿前流体温度高（与测温结果相符），同位素分馏系数接近 1，

水、岩比值小,使流体与围岩同位素近于达到平衡;②成矿期,随着矿化不断加强,水、岩比值增大,流体和围岩同位素分馏系数变小,与围岩同位素交换能力下降,此时 $\delta^{18}\text{O}$ 趋向代表原始流体,并集中分布于 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}=1.5\text{‰}\sim 2.5\text{‰}$ 范围内;③成矿后流体不稳定, $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}=-2.1\text{‰}\sim 4.2\text{‰}$,反映有大气降水参与。因此,成矿流体反映的主要是源于镁铁质洋壳岩石或含盐建造(?)脱水及后期一定量天水加入的结果。

3.2 碳酸盐碳、氧同位素地球化学

根据碳酸盐化与矿化的关系分别测试了成矿前、成矿期、成矿后碳酸盐的碳、氧同素,同时对所谓大理岩透镜体即强碳酸盐化的样品也进行了测试(表4)。 $\delta^{13}\text{C}$ 值集中分布于 $-2.0\text{‰}\sim 1.4\text{‰}$ 之间,与海相碳酸盐的 $\delta^{13}\text{C}$ 特征完全相同。这似乎与成矿流体的 $\delta^{18}\text{O}$ 值接近于海水平均值的特点具有某种巧合。但流体中碳的来源需综合分析。值得注意的是,碳酸盐化辉绿岩中的碳酸盐矿物样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 值接近深源碳($\delta^{13}\text{C}=(-7\pm 2)\text{‰}$)的组成。狐狸山矿区内10个碳酸盐的 $\delta^{18}\text{O}$ 变化于 $10.5\text{‰}\sim 20.5\text{‰}$ (均以SMOW为标准讨论),平均 14.4‰ ,该值与海相碳酸盐范围($\delta^{18}\text{O}=20.0\text{‰}\sim 30.0\text{‰}$,以SMOW为标准)不同。根据方解石和水同位素分馏系数计算的碳酸盐流体的 $\delta^{18}\text{O}$ 平均为 6.3‰ ,该值接近镁铁质岩石和超镁铁质岩石的 $\delta^{18}\text{O}$ 范围。

表 4 碳、氧同位素测试结果
Table 4. Analyses of carbon and oxygen isotopes

序号	样号	测试对象	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}/\text{‰}$	产状
1	4-4-①	含铁白云岩	-0.87	-13.89	16.54	成矿期脉
2	4-4-②	含铁白云岩	-1.25	-14.62	15.79	成矿晚期脉
3	4-5-②	含铁白云岩	-1.96	-17.09	13.24	成矿早期脉
4	4-2	含铁白云岩	-0.77	-18.88	11.40	共轭型碳酸盐脉(成矿后)
5	4-3	含铁白云岩	-1.09	-13.42	17.03	共轭型碳酸盐脉(成矿后)
6	HG1	含铁白云岩	1.37	-14.25	16.17	成矿期
7	WD-307	白云岩	-3.47	-10.07	20.48	成矿期
8	WD-312	方解石	-0.92	-19.78	10.47	成矿期
9	WD-317-1	铁白云岩	-1.30	-19.27	10.99	成矿期
10	WD-318-1	铁白云岩	-0.42	-18.65	11.63	成矿期
11	康-2-①	含铁白云岩	-4.28	-29.32	10.94	碳酸盐化辉绿岩
12	康-2-②	含铁白云岩	-4.39	-18.65	11.62	碳酸盐化辉绿岩
13	L16	含铁白云岩	0.02	-17.08	13.27	强碳酸盐化(大理岩透镜体)
14	L11	含铁白云岩	-0.99	-18.32	11.99	强碳酸盐化(大理岩透镜体)

注:序号1~10样品采自狐狸山矿区,11~14样品采自康家沟矿区大理岩透镜体中的样品;除序号7~10样品由中科院地化所测试外(收集资料),其它样品由长春地质学院分析测试中心测试,资料来源于本项目

3.3 硫同位素地球化学

对韧性剪切带型金矿9个矿区24个黄铁矿样品同位素分析表明, $\delta^{34}\text{S}$ 变化范围为 $-3.7\text{‰}\sim 9.6\text{‰}$,主要集中于 $0\text{‰}\sim 2.0\text{‰}$ 或 $-2.0\text{‰}\sim 2.0\text{‰}$ 之间,不连续的 9.6‰ 值的出现

可能是形成晚期黄铁矿-石英-碳酸盐脉流体遭受强烈氧化所致。研究还发现 $\delta^{34}\text{S}$ 有一定变化规律,即成矿期→成矿后,黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 变化小,较集中在 0 附近,与镁铁质岩石中的硫化物同位素组成相一致。

综合上述石英及其流体的氢、氧同位素特征及与矿化关系密切的碳酸盐矿物的碳、氧同位素组成,五台山地区金矿流体的来源问题可以得出这样的结论,即流体来源于被海水饱和的、由镁铁质岩石组成的洋壳或含盐建造(?)的脱水和变质作用,流体迁移过程中曾与地壳岩石发生一定程度的同位素交换,同时有一定量大气水的加入,形成一种富含 CO_2 、 CH_4 及中高盐度的特殊流体。

4 关于矿化时代的讨论

五台山地区韧性剪切带型金矿成矿时代的确定意义重大。但是由于样品分离上的困难,迄今为止,本区尚未见有矿石或蚀变围岩的同位素年代学资料发表。在地质背景研究的基础上,这里从不同地质体相互关系方面探讨该类金矿成矿的年龄问题。

(1) 金矿化与容矿岩石的相对时空关系:五台山地区韧性剪切带型金矿发育于碰撞造山带的任何一种太古宙岩石中。古元古界底界的高凡群、滹沱群以角度不整合与含金韧性剪切带接触,推断金矿形成于太古宙末期。

(2) 金矿化与剪切带的时间关系:详细的变质变形作用和矿床研究表明,金矿化发生于剪切变形作用的中晚期或稍后。侵位于五台山变质杂岩、又受到逆冲型韧性剪切带改造的同构造侵入体——石佛岩体的锆石 U-Pb 一致线年龄为 $(2507.2 \pm 16.3/16.2) \times 10^6 \text{ a}^{[9]}$ 、车厂岩体的单颗粒锆石 U-Pb 一致线年龄为 $(2549 \pm 2) \times 10^6 \text{ a}^{[10]}$ 。侵位时间晚于逆冲型韧性剪切带的峨口岩体锆石 U-Pb 一致线年龄为 $(2520 \pm 30) \times 10^6 \text{ a}^{[11]}$ 。可见逆冲型韧性剪切带形成于太古宙末期。

(3) 围岩蚀变与变质作用的关系:五台山地区含金韧性剪切带中的蚀变矿物与区域绿片岩相变质作用的矿物组合具有很好的谐调关系。本区的变质年龄 $(2573 \pm 47.16) \times 10^6 \text{ a}^{[10]}$ 可间接用于判断矿化年龄。

(4) 金矿化与脉岩的关系:狐狸山金矿的矿化带被辉绿岩脉穿切,这一脉岩的 Rb-Sr 全岩等时线年龄为 $(2395.68 \pm 182) \times 10^6 \text{ a}^{\text{①}}$,成矿年代应在太古宙末期,与世界上许多花岗岩-绿岩带中脉状金矿床成矿年龄一致。

5 矿床成因模式

矿床成因模式是矿床形成全部过程的缩影。把矿床形成过程模式化是近代矿床学研究的一个重要特征。经过几十年的不懈努力,地质学家们已经为脉状金矿建立了颇多具有特色的矿床成因模式,大大丰富了热液型金矿床的成矿理论。脉状金矿由于其主要产于太古宙绿岩带内,也被称之为绿岩金矿或太古宙金矿,文献中也称之为“单一金”^[9]、中温热液和脉状金

① 本项目采用 Rb-Sr 法测得的年龄,由长春地质学院分析测试中心测试

矿床^[15,17,18]等。Groves (1991) 基于西澳大利亚的伊尔冈地块和加拿大等地太古宙绿岩带中中温热液脉状金矿综合研究, 认为分布于次绿片岩相-低麻粒岩相区的脉状金矿床具有下列特征^[19]: ① 脉状金矿是受韧-脆性构造控制的后生型金矿, 几乎毫无例外地产生在晚期或改造了的早期剪切(断裂)带中; ② 它们均为具有较高的 Au 富集系数(一般为 $10^3 \sim 10^4$) 的“单一金”矿床; ③ 蚀变组合以富集 CO_2 、S、K (Rb、Ba) 及与成矿有关的金属元素为特征; ④ 含金剪切带的横向蚀变分带是以 $n \times 10^{-2} \sim n \times 10$ m 的规模为特征, 而垂向分带假如存在, 是以 $n \times 10^2$ m 规模。显然, 五台山地区的韧性剪切带型金矿属于脉状金矿床。

脉状金矿床成因模式研究发展较快, 特别是 80 年代中期以来, 伴随着金矿研究资料的大量积累, 新技术、新方法的不断应用和成矿地质背景研究方面的重大突破, 新的成矿模式鳞次栉比^[12]。很明显, 每一模式都成功地解释了某些脉状金矿床形成过程, 但上述模式没有一个能够有效地解释所有脉状金矿床的形成作用。五台山地区的韧性剪切带型金矿的成因能否从现有模式中找到合适的“座位”对号入座, 或者它们具有其独特的成因机制, 这需要全面、综合考察这些矿床的特征。

5.1 金矿床成因模式的制约因素

(1) 地质方面的制约因素: 五台山地区的韧性剪切带型金矿尚未见其与岩浆侵入体具有成因联系。尽管有些金矿床(点)产于 TTG 岩系之中(表 1), 但这些深部层次侵位的岩体均遭受了使金矿得以就位的绿片岩相变质变形作用的改造, 说明金矿化明显晚于这些岩体侵位的时间。金矿与 TTG 岩系在大离子亲石元素、高场强元素和铂族元素分配模型方面的差别, 说明两者缺少成因方面的联系。矿区及其附近很少发育成矿前或同成矿期脉岩是五台山地区韧性剪切带型金矿的特征之一。这很好地说明了金矿化与脉岩的疏远关系。

部分学者认为区内脉状金矿是硅铁建造碳酸盐相环境下金同生沉积再活化的产物, 但此种提法尚需进一步商榷。首先, 区内受变形改造的 BIF 未见有意义的金富集。出现大量 BIF 并遭受变形的地区(如山羊坪铁矿区)或其附近并未见有金矿出现; 其次, 在那些未见 BIF 或其规模很小的地区(表 1), 可见大量金矿床(点)分布。这说明本区 BIF 存在与否并非金矿化的必要条件。因此, 同生沉积模式也缺少足够证据。

从地质条件看, 本区韧性剪切带型金矿可适合于天水模式、变质模式和地壳连续系列模式。

(2) 同位素方面的制约因素: 尽管五台山地区同位素方面的资料尚需进一步积累, 但根据现有数据作一般性讨论仍可说明一些问题。首先, 含金石英流体包裹体 δD 值在一个矿区内大幅度变化, 不同矿区间也缺少可循的规律, 限制了天水模式的使用; 其次, 容矿围岩 Au 与 Pd 的关系及地球化学特征不支持 Au 来自围岩。这对天水模式又是一个限制; 再有, 成矿前、后流体具有中—高盐度, 成矿期流体以富含 CO_2 、接近海水的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 和海相碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 值为特征, 不但否定了天水模式使用的可能性, 而且也表现出与世界上许多太古宙脉状金矿床的差异。显然, 本区韧性剪切带型金矿的形成对经典的变质模式也提出了挑战。

五台山地区与矿化有关的同变形期早期矿化石英脉的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}} = 7.0\% \sim 8.0\%$, 与区域上主要岩石全岩的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{全岩}} = 7.3\% \sim 8.3\%$ 相近, 说明这些流体曾在较高温度条件下与围岩达到过氧同位素平衡, 具变质流体的特征。然而矿化期石英脉 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}} = 1.5\% \sim 2.5\%$, 它们明显偏离了变质流体的范围, 这种流体与围岩未达到同位素平衡, 是水、岩比值较大或很大条件

下的产物,它们反映的多是成矿流体的原始特征。另一方面,伴随金矿化形成的大量碳酸盐蚀变矿物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值提供了十分有用的信息。本区与金矿化密切相关的蚀变碳酸盐矿物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化于 $-2.0\text{‰}\sim 1.4\text{‰}$ 之间,均值为 0.7‰ ,该数据明显高于世界上太古宙脉状金矿而接近于海水。当然,碳酸盐矿物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值是由温度、Eh值、pH值及母溶液中全部溶解碳的同位素组成所决定的。这要求根据沉淀碳酸盐的 $\delta^{13}\text{C}$ 值判定母溶液中碳同位素组成需慎重。事实上,在 $250\sim 400^\circ\text{C}$ 、中—弱酸、绢云母稳定的接近含金流体的物理化学条件下,热液中全溶解碳的计算 $\delta^{13}\text{C}$ 值近似地等于沉淀碳酸盐的 $\delta^{13}\text{C}$ 值^[20]。因此,五台山地区 $\delta^{13}\text{C}\approx -1.0\text{‰}$,可代表成矿流体或确切地说蚀变流体的碳同位素组成。

五台山地区成矿流体的氢、氧、碳同位素组成及其中的盐度和 CO_2 含量资料说明这些流体是在与金有关的蚀变和金沉淀的事件中带来的,它们的产生与矿床的位置无关。这暗示存在一个或一个以上成矿环境之外的巨大流体源。已经积累的资料表明,沉积盆地成岩过程中形成的流体以低温、中高盐度、低 CO_2 含量为特征。本区金矿成矿流体很难与某单一流体源相对应,它反映的多是变质流体与海盆地中的镁铁岩石在成岩过程中所饱含的热卤水混合的结果。

5.2 金矿形成的地球动力学背景

近年来,脉状金矿成因研究的一个重要进展是其形成环境的确定。金矿的形成于遭受挤压作用的地壳缩短机制相联系,与大规模的碰撞造山作用密切相关^[21~24],这是与绝大多数脉状金矿具有的普遍规律。已经积累的资料表明,这种脉状金矿是汇聚型地球动力学背景下造山作用过程中形成于陆—陆或弧—陆构造边界上的产物^[25,26],五台山地区的韧性剪切带型金矿即形成于这种构造环境中。

五台山碰撞造山带是由阜平、恒山陆块间残余的岛弧—海沟体系组成的,是上述两陆块的碰撞构造边界。该构造边界不但控制了古元古代末期和中生代脉状金矿床的产出,目前,本区已经发现的太古宙脉状金矿主要出现在中部构造片体南、北两缘及其附近的韧性剪切带中。实际上,北部构造片体的北缘也具有良好的成矿条件,但由于后期地质作用改造强烈,给金矿的找寻带来困难。构造片体间的韧性剪切带具有规模大、高度汇集流体并使之运移的属性,显然是成矿的良好场所。

5.3 金矿成矿问题

在上述研究的基础上,提出了五台山地区韧性剪切带型金矿的成矿模式(图5):太

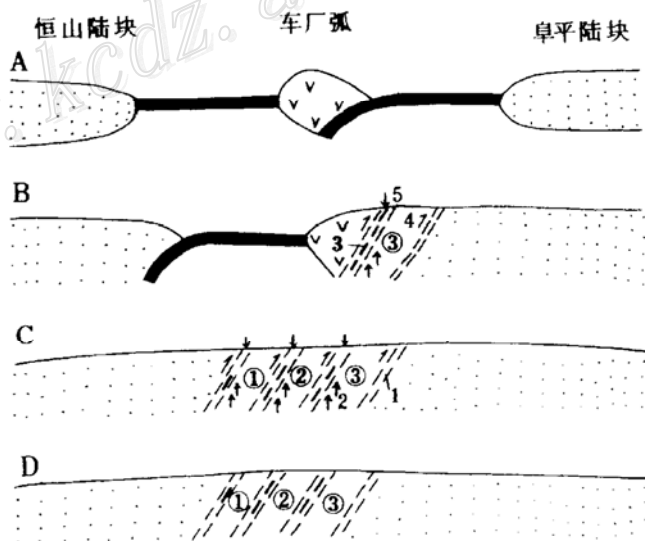


图5 五台山地区韧性剪切带型金矿成矿模式

1—逆冲型韧性剪切带; 2—流体运移方向; 3—金矿体; 4—韧性带的运动方向; 5—大气水加入; ①—北部构造片体; ②—中部构造片体; ③—南部构造片体

Fig. 5. Metallogenic model of ductile shear type gold deposits in Wutai Mountain area.

1—Thrust ductile shear zone; 2—Migration direction of fluids; 3—Gold orebody; 4—Migration direction of ductile shear zone; 5—Participation of meteoric water; ①—Northern tectonic slice; ②—Central tectonic slice; ③—Southern tectonic slice.

古宙末期的弧-陆、陆-陆碰撞作用,使不同环境中形成的岩石通过构造混杂在一起,形成有序排列的弧前混杂带、岛弧体系和弧后混杂岩带。大洋岩石圈及大陆边缘沉积的含盐建造(?)与其它岩石组合一起被俯冲地壳的不同深度遭受变质作用改造,同时发生脱水作用形成大量流体。碰撞作用过程中形成的一系列逆冲型韧性剪切带使地壳迅速增厚,同时也改变了地壳的渗透率。发育于构造边界的大规模韧性剪切带为深部流体提供了运移通道。伴随碰撞造山作用的持续,地壳迅速隆升,使地壳深部的静水压力与静岩压力间的平衡遭到破坏,成矿流体迅速上升,同时伴随着物化条件的改变,在中部、北部构造片体边缘及其附近的韧性剪切带中发生沉淀形成金矿床。

参 考 文 献

- 1 刘喜山,李树勋,刘俊来. 变形变质作用及成矿. 北京:中国科学技术出版社,1992,127~172
- 2 田永清主编. 五台山—恒山绿岩带地质及金的成矿作用. 太原:山西科学技术出版社,1991,1~229
- 3 马杏垣,刘昌,刘国栋. 江苏响水至内蒙古满都拉地学断面说明书. 北京:地质出版社,1991,1~68
- 4 张秋生,杨振升,高德玉等. 冀东金厂峪地区高级变质区地质与金矿床. 北京:地质出版社,1991,324~430
- 5 刘志宏. 冀东金厂峪地区的构造与金矿. 黄金,1995,16(10):2~5
- 6 刘志宏,王安建,刘恩峰等. 五台山西部狐狸山韧性剪切带与金矿. 黄金,1995,16(5):6~9
- 7 王安建. 金矿源岩研究与判定. 地质找矿论丛,1986,1(3):29~39
- 8 刘志宏,王安建,李晓峰等. 五台山西部狐狸山含金剪切带的地球化学研究. 长春地质学院学报,1996,26(1):37~42
- 9 白瑾主编. 五台山早前寒武纪地质. 天津:天津科学技术出版社,1986,198~247
- 10 白瑾,王汝铮,郭进京. 五台山早前寒武纪重大地质事件及其年代. 北京:地质出版社,1992,1~63
- 11 刘敦一,佩吉 R W,康普斯顿 W,伍家善. 太行山—五台山前寒武纪变质岩系同位素地质年代学研究. 中国地质科学院院报,1984,第8号,57~84
- 12 王安建,许虹. 脉状金矿床成矿作用的研究进展. 矿产与地质,1995,9(6):493~498
- 13 Hodgson C J, Love D A, Hamilton J A. Gnat mesothermal gold deposits: descriptive characteristics, genetic model and exploration area criteria. In: Whiting B H, mason R, Hodgson C J ed. giant ore deposits, proceeding of the giant ore deposits workshop. Kingston, Ontario, Canada, Q Min Ex Associates and Queen's University. 1992, 11~13
- 14 Boutler C A. The gold mile Kalgoorlie: a giant deposit localized at ductile shear zones by structural induced infiltration of an auriferous metamorphic fluid. Econ. Geol, 1987, 82: 1661~1678
- 15 Colvine A C, Fyon J A, Heather K B et al. Archaean lode gold deposits in Ontario. Geological Survey, Miscellaneous Paper, 1988, 139~210
- 16 Hodgson C J. A view of the geological characteristics of "gold only" deposits in the Superior Province of the Canadian shield. In: Hodder R W, Petruk W, ed. Geology of Canadian deposits, 1982, CIM Special Volume, 211~229
- 17 Grove D I, Barley M E, Barnicoat A C et al. Subgreenschist to granulite—hosted Archaean lode—gold deposits of the Yilgarn craton: a depositional continuum from deep sourced hydrothermal fluids in crustal—scale plumping systems. Geology Department (Key center) and University Extension, University of Western Australia Publication, 1992, 22: 325~337
- 18 Kerrich R. Perspective on genetic models for gold deposits. Mineral Deposita, 1993, 28: 362~365
- 19 Groves D I, Barley M E, Cassidy K C et al. Archaean lode—gold deposits: the products of a crustal scale hydrothermal system. In: Laderira E A ed. Brazil Gold'91. Balkema, Rotterdam, 1991, 299~305
- 20 Powell R, Will T M, Phillips G N. Metamorphism in Archaean green belt: Calculated fluid compositions and implications for gold mineralization. Journal of Metamorphic Geology, 1991, 9: 141~150

- 21 Wyman D A, Kerrich R. Alkaline magmatism, major structures and gold deposits: implications for greenstone belt gold metallogeny. *Econ. Geol.*, 1988, 83: 451~458
- 22 Kerrich R, Wyman D. Geodynamic setting of mesothermal gold deposits: an association with accretionary tectonic regimes. *Geology*, 1990, 18: 882~885
- 23 Kerrich R, Feng R. Archaean geodynamics and the Abitibi—Pontiac collision, implications for advection of fluid at transpressive collisional boundaries and the origin of giant quartz vein systems. *Earth Science Review* 1992, 32: 33~60
- 24 Davis D W, Smith P M. Archaean gold mineralization in Wabigoun subprovince, a product of crust accretion: evidence from U—Pb geochronology in the lake of the woods area, Superior Province. *Canada Journal of Geology*, 1991, 99: 337~353
- 25 Koons P O, Craw D. Gold mineralization as a consequence of continental collision: an example from Southern Alps, New Zealand. *Earth Planet. Science Letter*, 1991, 103: 1~9
- 26 Barley M E, Eisenlohr B, Groves D I et al. Late Archaean convergent margin tectonics and gold mineralization: a new look at the Norseman-wiluna belt, Western Australia. *Geology*, 1989, 17: 826~829

GENETIC MODEL OF DUCTILE-SHEAR TYPE GOLD DEPOSITS IN WUTAI MOUNTAIN AREA

Liu Zhihong

(*Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093*)

Wang Anjian and Xu Hong

(*Changchun College of Geology, Changchun 130026*)

Key words: ductile-shear type gold deposit, stable isotope, genetic model, Wutai Mountain

Abstract

In this paper, regional geological setting, modes of occurrences, gold potential of host rock associations and their characteristics as well as alteration sequence of ductile-shear type gold deposits are elaborated, with a detailed study of stable isotopes in these deposits. H, O, C, S isotopic analyses of quartz, carbonate minerals and wall rocks show that in ore-forming fluids $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}} = -2.1\text{‰} \sim 4.9\text{‰}$, and $\delta\text{D} = -69\text{‰} \sim -112\text{‰}$, in altered carbonates $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} = -2.0\text{‰} \sim -1.4\text{‰}$, and $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} = 10\text{‰} \sim 20\text{‰}$, and in gold-carrying pyrite $\delta^{34}\text{S} = -3.7\text{‰} \sim 5.6\text{‰}$. The premineral fluids possess medium-high salinity, the fluids of the ore-forming stage are characterized by rich CO_2 , seawater-implying $\delta^{18}\text{O}$ values and marine carbonate $\delta^{13}\text{C}$ values. Studies demonstrate that instead of corresponding with a certain single fluid source, the ore-forming fluids mainly reflect the mixture of metamorphic fluids and saturant thermal brine of mafic rocks formed during diagenesis in the sea basin. Synthesizing the relevant data, the authors have established a genetic model of ductile-shear type gold de-

posits: the rock associations formed in different environments were tectonically juxtaposed during continent-arc and continent-continent collision in Late Archean, giving birth to fore-arc melange, island arc system and back-arc melange. The above rock associations were subducted to different depths of the Earth's crust and then metamorphosed and dewatered to produce a vast amount of fluids. A series of reversal ductile-shear zones formed in the collision process changed the permeability of the crust and provided passageways for fluids which came from the depth of the crust. The crust was uplifted rapidly during the continuous collision, and the balance of hydrostatic and geostatic pressure in the depth of the crust was disrupted. The metallogenic fluids ascended rapidly along the ductile shear zones which occurred in margins of the central and southern tectonic slices and their neighboring areas. Metallogenic fluids precipitated as a result of the change of the physical and chemical environments, forming ductile-shear type gold deposits.

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