

北祁连山西段寒山金矿床成矿时代探讨*

刘永彪¹, 余君鹏^{1,2**}, 孔维琼^{1,3}, 樊新祥¹, 赵吉昌¹, 李省晔³, 王 鹏¹

(1 甘肃省地质矿产勘查开发局第四地质矿产勘查院, 甘肃 酒泉 735000; 2 甘肃省地质调查院, 甘肃 兰州 730000;
3 兰州新区自然资源局, 甘肃 兰州 730000)

摘 要 寒山金矿床位于北祁连造山带西段与阿尔金断裂的交汇部位, 是奥陶系阴沟群火山-沉积岩系中断裂破碎蚀变带控制的金矿床。前人对寒山金矿床的地质特征、成矿时代、矿床地球化学及成因等进行了研究和探讨, 取得了不少研究成果, 结合前人研究, 本次工作获得黄铁绢英岩型金矿石中绢云母 Ar-Ar 坪年龄为 (302.5 ± 1.8) Ma, 获得矿区南部闪长岩体锆石 U-Pb 年龄为 (390.4 ± 9.5) Ma, 并对成矿时代和岩体与成矿关系进行了探讨, 认为主成矿阶段为华力西期, 进一步确定矿区闪长岩体与金成矿有关。成矿作用与 EW 向次级小构造关系密切。

关键词 地球化学; 蚀变岩年龄; 侵入岩年龄; 成矿时代; 寒山金矿床; 北祁连山西段
中图分类号: P618.31 **文献标志码**: A

A study of ore-forming epoch of Hanshan deposit in western North Qilian Mountain

LIU YongBiao¹, YU JunPeng^{1,2}, KONG WeiQiong^{1,3}, FAN XinXiang¹, ZHAO JiChang¹, LI ShengYe³ and
WANG Peng¹

(1 Fourth Institute of Geological and Mineral Exploration of Gansu Bureau of Geology and Mineral Resources, Jiuquan 735000, Gansu, China; 2 Gansu Geological Survey Research Institute, Lanzhou 730000, Gansu, China; 3 Lanzhou New Area County Natural Resource Bureau, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract

Located at the intersection of western North Qilian orogenic belt and Altun fault belt, the Hanshan gold deposit is controlled by broken alteration zone in the volcanic-sedimentary rock of the Ordovician Yingou Group. Previous researchers have made researches and investigation into this ore deposit in such aspects as geological characteristics, ore-forming epoch, geochemistry and genesis, and obtained lots of achievements. In combination with previous research results, the authors detected that the Ar-Ar plateau age of the sericite in beresite is (302.5 ± 1.8) Ma, and the zircon LA-ICP MS dating result of the diorite in southern part is (390.4 ± 9.5) Ma. On such a basis, the authors discussed the ore-forming epoch and the relationship between the rock mass and mineralization. It is held that the ore-forming process took place in Hercynian period, diorite was closely related to gold mineralization, and mineralization was related to EW-trending secondary structures.

Key words: geochemistry, age of altered rock, age of intrusive rocks, ore-forming period, Hanshan gold deposit, North Qilian Mountain

北祁连造山带西段与阿尔金断裂的交汇部位, 构造演化复杂, 成矿地质条件优越, 区内产出鹰嘴山金矿、寒山金矿等一批金矿床, 被称为西北的“金三

角”。寒山金矿自发现以来, 经过了多年的勘查, 取得了较好的找矿效果, 前人对矿床地质特征、成矿时代、矿床地球化学及成因等进行了研究和探讨, 取得

* 本文得到中国地质调查局项目“祁连成矿带肃南一大柴旦地区地质矿产调查(编号: DD20160012)”资助

第一作者简介 刘永彪, 男, 1992年生, 本科, 地矿工程师, 主要从事矿产地质调查工作。Email: 840614630@qq.com

** 通讯作者 余君鹏, 男, 1981年生, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事矿产地质调查研究工作。Email: 33052368@qq.com

收稿日期 2018-10-30; 改回日期 2019-06-24。张绮玲编辑。

了不少研究成果(毛景文等,1998;2000;2003;杨兴吉,1999;2007;李金春,1999;吴茂炳等,1999;杨建国等,2003;夏林圻等,2001;宋忠宝等,2004)。李金春(1999)将寒山金矿和鹰嘴山金矿称为“蚀变火山岩型寒山金矿床”和“蚀变超基性岩型鹰嘴山金矿床”。最近,杨合群等(2017)将这2个矿床均归属于“后生热液脉型-破碎蚀变岩型”,强调热液成矿作用时代晚于含矿建造的形成时代。前人使用的测年方法主要为Rb-Sr法、K-Ar法,认为金矿床主要成矿作用发生在海西期—印支期,对于曾经经历过多期岩浆-变质-构造活动改造的地质体,常规K-Ar法不是一种可靠的定年方法,如果后期受到高温热液的影响,早期的Ar会丢失或增加,获得的年龄相对较小,而Ar-Ar法克服了常规K-Ar法的许多缺点,被广泛利用(赵玉灵等,2002;严宸等,2019)。本文依托地质矿

产调查项目,在通过收集并综合整理矿区勘查资料和前人研究成果,总结寒山金矿成矿地质条件和特征的基础上,对金矿石中的绢云母和矿区闪长岩体进行了同位素年代学研究,对金矿成矿时代进行了探讨。

1 区域地质背景

寒山金矿大地构造位置属北祁连早古生代造山带西段之西端(杨建国等,2003),距离北祁连造山带与阿尔金断裂交汇部位4 km处。区域上,北部除有古元古界敦煌岩群零星分布外,出露地层以古生界为主,主要有寒武系、奥陶系、志留系,其次为石炭系。寒武系由中基性火山岩、火山碎屑岩夹碎屑岩组成,分布于研究区南部;奥陶系以阴沟群为主,由中基性火山碎屑岩、火山熔岩夹陆源碎屑岩组成,为

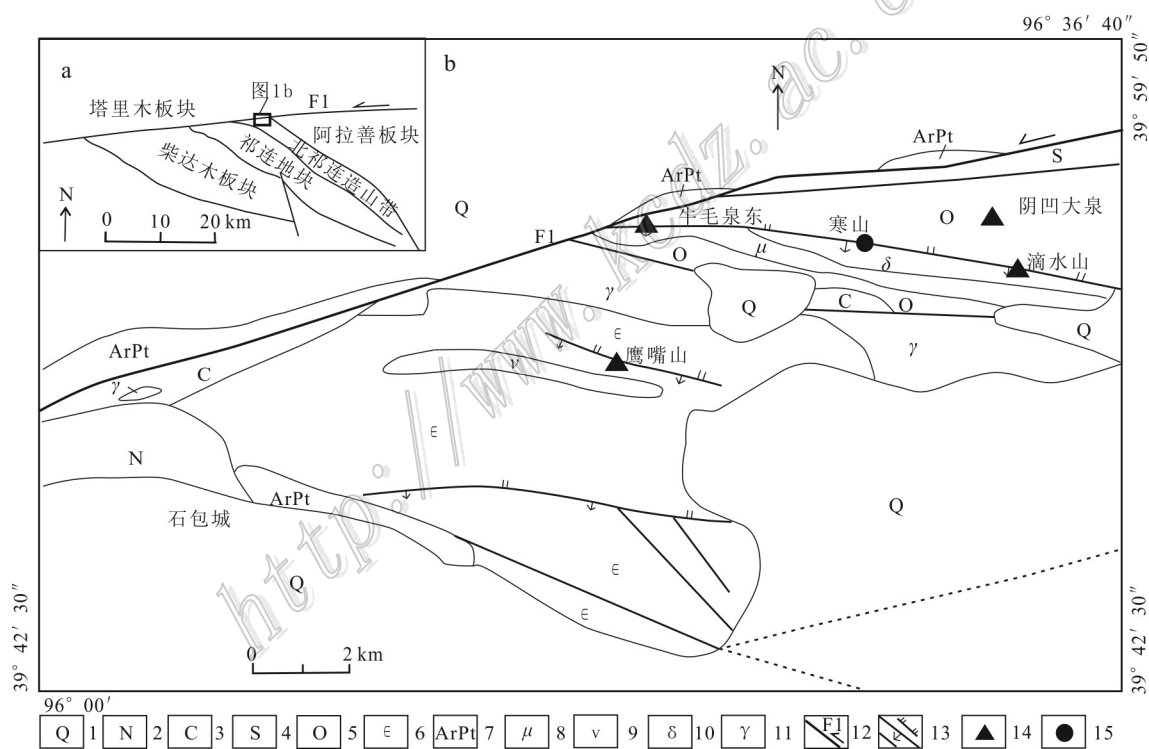


图1 寒山金矿大地构造位置图(a)及研究区金矿床分布简图(b)(据甘肃省地矿局第四地质矿产勘查院,2018修改)

- 1—第四系;2—新近系疏勒河组;3—石炭系羊虎沟组;4—志留系泉脑沟山组及早峡组;5—奥陶系阴沟群、中堡群及妖魔山组;
6—寒武系黑茨沟组;7—太古宇—古元古界敦煌岩群;8—辉绿岩体;9—辉长岩体;10—闪长岩体;11—酸性侵入岩体;
12—阿尔金断裂;13—断层;14—金矿及位置;15—寒山金矿

Fig.1 Geotectonic location map of Hanshan gold deposit (a) and regional geological map showing distribution of gold deposits in the study area (b) (after Fourth Institute of Geological and Mineral Exploration of Gansu Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, 2018)

- 1—Quaternary; 2—Shulehe Formation of Neogene; 3—Yanghugou Formation of Carboniferous System; 4—Quannaogoushan Formation and Hanxia Formation of Silurian; 5—Guigou Group, Zhongbao Group and Demon Mountain Group of Ordovician System; 6—Heizigou Formation of Cambrian System; 7—Dunhuang Group of Archean—Paleoproterozoic; 8—Diabase pluton; 9—Gabbro intrusion; 10—Diorite Intrusion; 11—Acid intrusive; 12—Arkin fault; 13—Fault; 14—Gold deposits and its locations; 15—Hanshan gold deposit

研究区主要含矿地层,其次为中堡群火山-碎屑岩建造和妖魔山组灰岩;志留系以陆源碎屑岩为主,分布于研究区北部;石炭系砂岩不整合于寒武系和奥陶系之上。各地层单元之间多为断层接触(图1)。

区域上,侵入岩较为发育,中-酸性侵入体分布于矿区南侧5 km处,以明茆茆沟岩体、青石峡岩体、青山岩体和车路沟岩体为主,分布范围较大,多呈岩珠状分布,展布方向和区域构造线方向一致,呈NW向、NWW向的断续条带状出现。主要岩性有辉绿岩、石英二长花岗岩、花岗闪长岩、英云闪长岩、黑云母花岗岩等。

区域构造以发育NEE向、NWW向、NE向及近EW向断裂构造为特征,其中NEE向阿尔金断裂分布于矿区北西侧,NWW向及近EW向断裂控制了区域及矿区地质体的展布,断裂亦为不同地质体的界线,同时也对成矿具有一定的储矿、导矿作用,NE向断裂多为后期构造,破坏了区内早期地层和构造。

区域上矿产以金矿为主,主要有寒山金矿、鹰嘴山金矿、滴水山金矿、阴凹大泉金矿、车路沟金矿、牛毛泉东金矿等,多为蚀变岩型金矿,其中牛毛泉东金矿、寒山金矿及滴水山金矿受同一断裂带的控制。

2 矿床地质背景

奥陶系阴沟群为寒山金矿区的主要含矿地层,呈NWW向狭长带状展布,与区域构造线方向基本一致。岩层大部分北倾,局部南倾,倾角 $60^{\circ}\sim 85^{\circ}$ 。岩石类型以安山质晶屑凝灰岩、安山质晶屑岩屑凝灰熔岩、安山质角砾凝灰岩、英安质凝灰岩为主(杨兴吉,2007),其次为凝灰质砂岩、岩屑石英杂砂岩等,其中安山质角砾凝灰岩、安山质晶屑凝灰岩为主要的赋矿岩石,岩石蚀变强烈(图2)。

矿区南部有闪长岩体侵入,呈NW—SE向展布,岩体长约10 km左右,宽约1~3 km,岩石主要为细粒

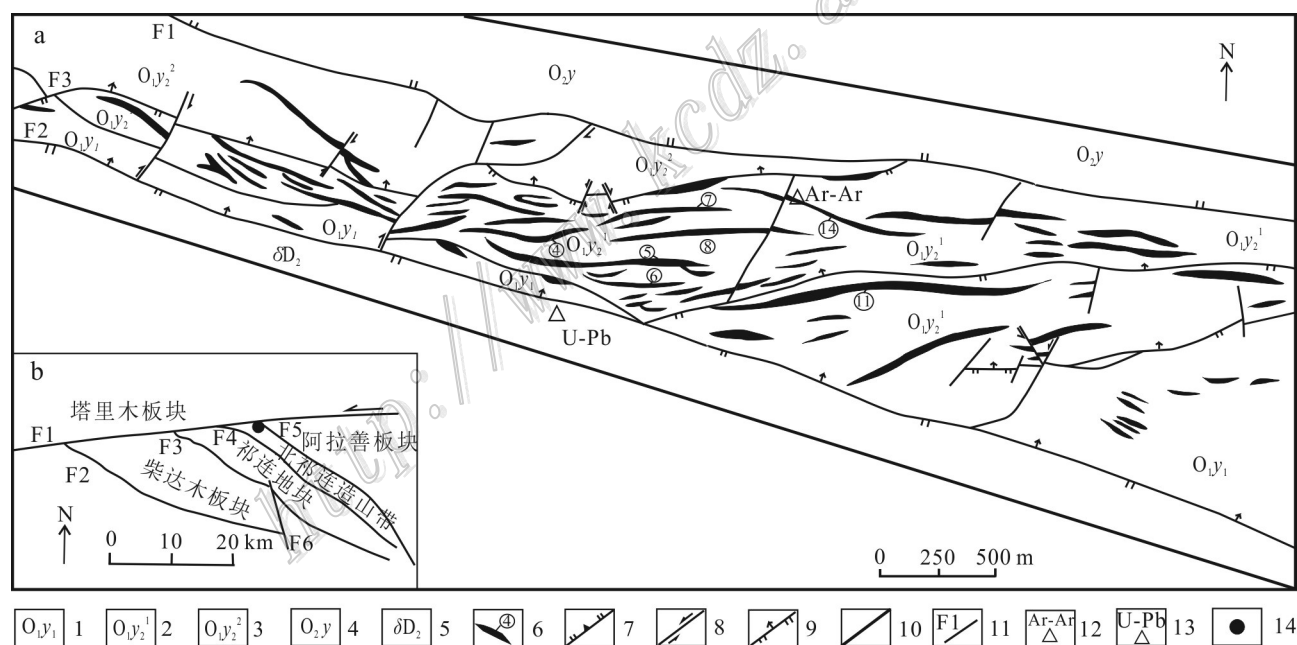


图2 寒山金矿床地质草图(a)及寒山金矿大地构造位置图(b)(据甘肃省地矿局第四地质矿产勘查院,2014)
1—奥陶系阴沟群下组;2—奥陶系阴沟群上组一段;3—奥陶系阴沟群上组二段;4—奥陶系妖魔山组;5—中泥盆世闪长岩;6—主要工业金矿体及编号;7—实测推覆断层;8—实测平移断层;9—实测逆断层;10—实测性质不明断层;11—断裂及编号;12—Ar-Ar测年样品采样位置;
13—U-Pb样品采样位置;14—矿区大地构造位置

Fig. 2 Geological sketch map of the Hanshan gold deposit (a) and geotectonic location map of the Hanshan gold deposit (b) (after Fourth Institute of Geological and Mineral Exploration of Gansu Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, 2014)
1—Lower Formation of Ordovician Yingou Group; 2—1st Member of Upper Formation of Ordovician Yingou Group; 3—2ed Member of Upper Formation of Ordovician Yingou Group; 4—Ordovician Yaomoshan Group; 5—Middle Devonian diorite; 6—Gold ore spot and its serial number;
7—Nappe fault; 8—Slip fault; 9—Reverse fault; 10—Unknown fault; 11—Fault and its serial number; 12—Location of Ar-Ar sampling;
13—Location of U-Pb sampling; 14—Tectonic location of deposit

闪长岩、细粒辉长闪长岩,局部可见闪长玢岩,前人认为其为成矿提供了热源(夏林圪等,2001;宋忠宝等,2004)。脉岩主要有闪长岩脉、石英脉、辉长闪长岩脉及辉长岩脉等,脉体规模均较小,岩脉走向与构造线方向一致,辉长岩脉及辉长闪长岩脉多见于南部闪长岩体内,部分石英脉为含矿脉体,是矿区的直接找矿标志。

矿床受控于由阿尔金大断裂影响下的NWW向韧性剪切带,与阿尔金大断裂呈“入”字型锐角相交,与剪切带中的近EW向次级断层共同构成容矿构造。根据多年的地质勘查资料,矿区围岩及矿体具明显的韧性剪切变形特征,且韧性剪切变形作用经历了3期:第一期韧性剪切变形作用,形成千枚状糜棱岩和糜棱岩化岩石以及一些面状、线状构造,岩石剪切面理主要由白云母和绿泥石等矿物组成,矿区岩石具明显的拉伸线理、布丁构造、石香肠构造等,在火山碎屑岩中表现尤为明显,拉伸线理在矿体围岩中由石英和火山角砾构成,在矿石中由绢云母、石英、长石和黄铁矿构成。石香肠构造多发育在含金石英脉中。多处剪切片理反映其产状为 $340^{\circ}\sim 355^{\circ}\angle 40^{\circ}$,线理走向多集中在 $210^{\circ}\sim 240^{\circ}$ 之间,说明剪切带的运移变形以南西向侧斜滑移为主(李生栋,2011);第二期脆性变形作用,表现为稍后一期脆性变形作用产生的破裂面的出现,沿破裂面有富矿石英脉贯入,并且在矿化带中呈斜列尖灭再现排列,矿脉和石英脉等脉体多与早期的韧性剪切面斜交或穿插,且具明显的剪切特征,而含矿黄铁矿多发育压力影(图3),说明矿脉形成后矿区又发生了强烈的剪切作用,根据压力影组合特征,结合构造面特征分析,初步认为剪切带的运移方向以垂直方向的运动为主;第三期为重力韧性变形作用,与成矿作用关系不大。NE向断层不含矿,对矿体具破坏作用(杨兴吉,2007)。区内劈理构造较为发育,常见有板劈理、破劈理。

3 矿床地质特征

3.1 矿化带特征

矿带东西长约6000 m,南北宽约400 m,矿体均赋存在奥陶系阴沟群二组中,赋矿岩石为安山质角砾凝灰岩、安山质晶屑凝灰岩,部分安山岩、凝灰熔岩等亦见矿化。矿体明显受脆韧性剪切带控制,矿带产状与剪切带产状基本一致,走向近EWW,倾向

NE,倾角 $55^{\circ}\sim 85^{\circ}$,钻探证明矿体向深部延伸,产状近于直立。

矿化带在地表多以黄钾铁矾化和“铁帽”为特征,与围岩形成鲜明的对比(图4)。经过多年地质勘查,共圈定矿化蚀变带72条,它们长40~1500 m,宽1~20 m,规模悬殊较大。矿化与黄铁绢英岩化、硅化及多金属硫化物化关系密切,尤其在叠加方铅矿、闪



图3 黄铁矿的压力影

Fig. 3 Pressure shadow of pyrite



图4 地表蚀变岩(具黄钾铁矾化)照片

Fig. 4 Photographs of surface alteration rocks (Jarosite)



图5 糜棱岩化金矿石岩芯照片

Fig. 5 Core image of mylonite gold ore

锌矿、毒砂等硫化物的地方,往往形成富矿体。岩石变形程度越强,尤其是在糜棱岩化发育地段,蚀变越发育,则金矿化程度也越强(张素云等,2015),糜棱岩化金矿石岩芯照片见图5。

3.2 矿体特征

全区共圈定金矿体42个。矿体严格受脆韧性剪切带控制,多产于近EW向次级断裂带中。宏观上,矿体形态以似层状、条带状为主,具有品位低且变化大的特征,高品位工业矿体为厚度不一的透镜体、瘤状体及巢状体等。矿体的厚度和品位多沿走向表现出波浪式的或跳跃式的变化,这与近东西向次级断裂的展布和岩石的碎裂化程度关系密切。就单个矿体而言,其内部结构的变化程度远远大于矿体外部形态的变化,在走向上总体呈中间较宽,两边较窄且逐渐尖灭的脉状、透镜状特征,而矿体内部又具有分枝复合,尖灭再现的现象(李生栋,2011)。

Au8、Au11 规模最大,与 Au4、Au5、Au6、Au7、Au14 号矿体一起构成了矿区的主要工业矿体。主矿体特征与全区矿体总体特征基本相似,现将主矿体中的 Au11 矿体、Au8 矿体特征简述如下。

Au11 矿体位于矿区南侧,长 1052 m,厚 1.24~14.07 m,品位 $(1.5\sim5.06)\times 10^{-6}$ 。矿体总体走向 80° ,倾向向南,变化较大,地表倾角一般在 50° 左右,但到深部转变为 70° 左右的陡倾,局部呈近直立状。赋矿岩石主要为强蚀变安山质凝灰岩或安山质角砾凝灰岩,部分地段穿插石英脉。在地表顶、底板岩性为安山质角砾凝灰岩,向深部顶板岩性变为安山质凝灰岩,底板为凝灰质板岩、安山质凝灰岩等(图6)(李生栋,2011)。

Au8 矿体位于矿区中部,矿体长度 742 m,厚度 0.87~12.08 m,品位 $(1.72\sim9.52)\times 10^{-6}$ 。矿体围岩蚀变非常强烈,破碎蚀变带最宽处达 30 多米,矿体平均品位 3.49×10^{-6} ,局部分布有自然金,品位极高。

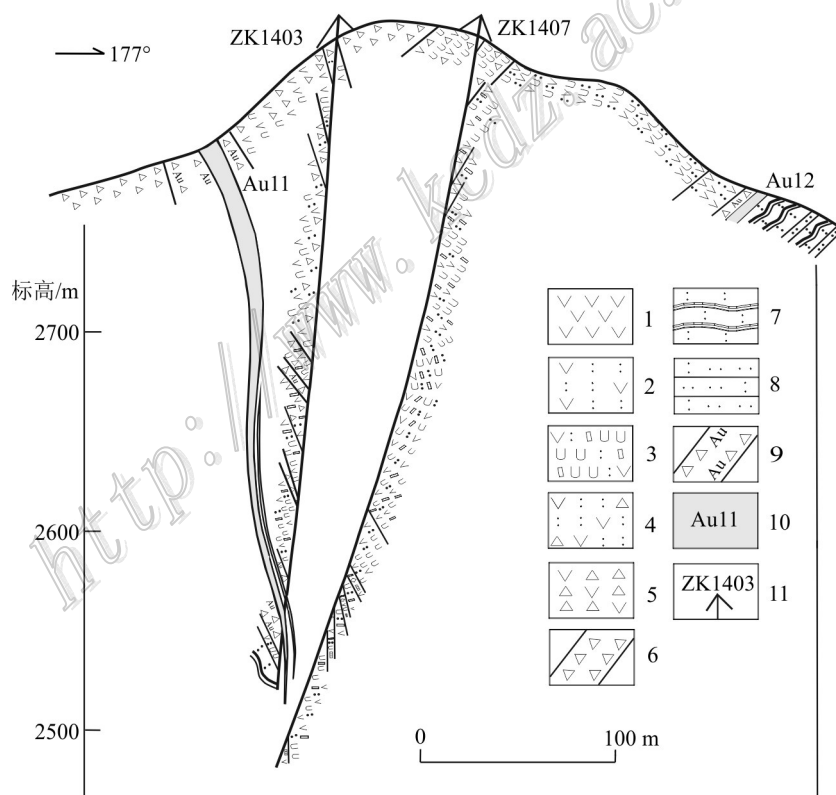


图6 寒山金矿床140线勘探线剖面图

1—安山岩;2—安山质凝灰岩;3—安山质晶屑凝灰岩;4—安山质角砾凝灰岩;5—火山角砾岩;6—构造角砾岩;7—凝灰质板岩;
8—凝灰质粉砂岩;9—含金蚀变带;10—金矿体及编号;11—钻孔及编号

Fig. 6 Geological line along No.140 exploration line of the Hanshan gold deposit

1—Andesite; 2—Andesitic tuff; 3—Andesite crystal tuff lava; 4—Andesite breccia tufflava; 5—Volcanic breccia; 6—Tectonic breccia;
7—Tuffaceous slate; 8—Tuffaceous siltstone; 9—Au-bearing alteration zone; 10—Gold ore body and its serial number;
11—Drill hole and its serial number

3.3 矿石特征

(1) 矿物组成

矿石中已查明矿物有30余种,主要有自然金、自然铜、黄铁矿、毒砂、方铅矿、黄铜矿、闪锌矿、石英、绢云母、阳起石、绿泥石、黄钾铁矾、重晶石、方解石、明矾等,黄铁矿和方铅矿为最普遍的硫化物,金矿化多赋存于其中,黄钾铁矾是地表最直观的找矿标志。矿石中绢云母多呈细小鳞片状集合体,一部分集合体呈条带状、细脉状分布于岩石裂隙两侧,并与黄铁矿等矿物共生,反映出其形成于热液充填过程中,另一部分为细密均匀分布的细小集合体,为岩石中火山灰、长石等蚀变而来,具有明显的定向性。

(2) 矿石结构

矿石结构有包含(裹)结构、嵌晶结构、充填结构、交代结构。矿石构造有浸染状、脉状、网脉状、团块状、蜂窝状构造等(李生栋,2011)。

(3) 矿石类型

原生矿石有黄铁绢云片岩型金矿石、黄铁绢英岩型金矿石、石英脉型金矿石、多金属硫化物石英脉型金矿石、硅质岩型金矿石(李生栋,2011),其中前2种为主要矿石类型。氧化矿石有黄钾铁矾高岭土化石英脉型金矿石、黄钾铁矾高岭土化金矿石、蜂窝状石英脉型金矿石、水绿矾型金矿石(李生栋,2011)。

3.4 围岩蚀变

矿区的围岩蚀变主要分布在脆韧性剪切带内,十分醒目,蚀变强度与岩石的变形、破碎及含矿热液活动强弱有关,矿体两侧岩石一般韧性变形及破碎越强,蚀变越发育,蚀变具有明显的分带性和对称性,该蚀变带整体贯穿于寒山矿区,向东延伸至滴水山金矿,向西延伸至牛毛泉东金矿,蚀变从中心往外依次为:硅化带、黄铁绢英岩化带、“泥化带”(高岭土化带)、铁染带、碳酸盐化带,其中硅化带和黄铁绢英岩化带为主要的含矿蚀变带(杨永春等,2018)。硅化与金矿化关系密切,硅化越强烈的地段,金矿化程度越高。

3.5 矿化期次及成矿阶段

根据区域地质构造环境、矿床形成条件及构造和矿物共生组合,判断矿床的形成与保存经历了热液作用过程原生矿形成期和表生风化作用过程氧化矿形成期2期。

(1) 热液作用过程原生矿形成期 该期可进一步细分为5个阶段:第一阶段为石英-黄铁矿化-金矿化阶段,以大量出现中细粒黄铁矿和石英为主;第二阶段为早期石英-多金属硫化物-金矿化阶段,该阶段

标型矿物主要有黄铜矿、黝铜矿、辉铜矿、磁黄铁矿、铜蓝、辉钼矿等;第三阶段为晚期石英-多金属硫化物-金矿化阶段,主要特点是出现大量方铅矿、毒砂、闪锌矿等矿物,以方铅矿为主要含金矿物;第四阶段黄铁绢英岩化阶段,沿断裂破碎带两侧的岩石大面积出现硅化、绢云母化、黄铁矿化等蚀变,本文研究的正是该阶段的形成时间;第五阶段为石英-碳酸盐化阶段,出现大量的石英脉和碳酸盐脉。

(2) 表生风化作用过程氧化矿形成期 该期成矿发生于新生代,上述原生硫化矿被剥蚀到地表和近地表,硫化物经过长期的物化风化作用下,生成黄钾铁矾、褐铁矿和孔雀石等氧化矿物。剥蚀使矿体变浅利于开采;氧化淋滤可减少矿石中的砷含量,利于提高堆浸效率;形成地表明显的找矿标志。

4 样品采集及测试方法

区内矿石蚀变较强,主要蚀变矿物为黄铁矿、石英、绢云母等,矿石类型以黄铁绢英岩型为主,利用绢云母等蚀变矿物分阶段加热法得到的年龄谱往往反映出矿物的热演化史,即可为成矿热液蚀变过程和时代的确定提供一定的依据,因此,本次工作在Au14矿体中采集了黄铁绢英岩型金矿石(位置见图2),从中挑选出绢云母进行 ^{40}Ar - ^{39}Ar 同位素测年。同时,前人研究认为矿区南部闪长岩岩体与成矿关系密切,为成矿提供了热源和一部分热液(夏林圻等,2001;宋忠宝等,2004),为进一步确定该岩体与成矿之间的联系,本次工作还采集了闪长岩样品(位置见图2),进行铅石U-Pb法测年,对比研究岩体与金矿的成矿时代。

4.1 绢云母Ar-Ar同位素测试方法

样品分选在廊坊诚信地质服务有限公司完成,将岩石样品破碎、磁选、浮选等程序后,再经过显微镜下挑选,得到纯度>98%的绢云母单矿物样品。 ^{40}Ar - ^{39}Ar 定年工作在北京地质研究院分析测试研究中心完成。称取适量的单矿物样品用超声波进行清洗,样品用铝箔包好放置于石英管内,同时将标准物质黑云母ZBH-25放置于石英管不同位置,用于计算中子通量梯度,然后将石英管真空熔封,送至中国核动力设计研究院HFETR反应堆内照射15 h。

照射过的样品送至核工业北京地质研究院,采用Argus VI惰性气体质谱仪对其中的Ar同位素组成进行分析,采用双真空钽片加热炉阶段升温法释放样品中的气体,气体依次经过液氮U-型冷阱,2组

锆—铝吸气剂泵(一组为450℃,一组为室温)对气体进行纯化,最后仅留下惰性气体进入质谱进行Ar同位素组成的测试。

通过辐照纯净的CaF₂和K₂SO₄对样品的Ca和K在辐照过程中产生的干扰进行校正,反应堆内的校正因子分别为 $(^{36}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}}=3.539\times 10^{-4}$, $(^{36}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}}=8.735\times 10^{-4}$ 和 $(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{K}}=7.98\times 10^{-3}$,通过全熔石英管内黑云母ZBH-25获得石英管内的中子通量梯度,进而计算获得不同位置样品的辐照常数(J值),通过测试大气中的氩同位素组成获得质谱的质量歧视校正因子,而衰变常数则采用Steiger等(1977)的推荐值 5.543×10^{-10} 。采用Ar Ar CALC 2.40软件对样品的⁴⁰Ar-³⁹Ar年龄进行计算。

4.2 闪长岩锆石U-Pb测试方法

锆石分选在廊坊诚信地质服务有限公司完成。锆石的激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)原位U-Pb定年在在中国地质调查局西安地质调查中心国土资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室完成。激光剥蚀系统为GeoLas Pro, ICP-MS为Agilent 7700x。激光剥蚀过程中采用氦气作载气、氩气为补偿气以调节灵敏度,二者在进入ICP之前通过一个T型接头混合。每个时间分辨分析数据包括约10 s的空白信号和40 s的样品信号。对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及U-Th-Pb同位素比值和年龄计算)采用软件Glitter 4.4完成,详细仪器参数和测试过程参见李艳广等(2015)。

U-Pb同位素定年中采用锆石标准91500作为标样进行同位素分馏校正。对于与分析时间有关的U-Th-Pb同位素比值漂移,利用91500的变化采用线性内插

的方式进行了校正。锆石样品的U-Pb年龄谱和图绘制和年龄权重平均计算均采用Isoplot Exver 3完成。

5 测试结果

5.1 Ar-Ar同位素测试结果

通过Ar-Ar同位素年龄测试,获得坪年龄 $(302.5\pm 1.8)\text{Ma}$,正等时线年龄 $(301.5\pm 4.5)\text{Ma}$,两者相差1 Ma(图7)。

从表1中可以看出,具有3个以上相连的一致年龄坪,并具超过50%的³⁹Ar释放量;³⁹Ar析出量超过50%时,获得较好的高温坪,也说明该测试结果较为可靠,形成高温坪代表早期的结晶年龄(刘艳红等,2004),结合成矿期次,认为该坪年龄代表主成矿年龄。

5.2 锆石U-Pb同位素测试结果

阴极发光图像中,锆石形态大致一致,主要呈短柱状,具典型的锆石晶体形状,由于破碎,多呈半截状,锆石长度基本在30~150 μm,长宽比1.5:1~2:1,可见清晰岩浆振荡环带,部分锆石内部有继承核存在,生长纹路清晰(图8),应属岩浆成因。

本次测试谐和性较好的有7个测点,所测锆石Th/U比值为0.14~0.89,平均0.5,具岩浆锆石的特征(表2),表面年龄 $(400\pm 12)\text{Ma}$ ~ $(378\pm 8)\text{Ma}$,获得加权平均年龄 $(390.4\pm 9.5)\text{Ma}$,MSWD=0.36(图9),为中泥盆世。

6 讨论

6.1 成矿时代

前人通过大量的同位素测年工作对寒山金矿成

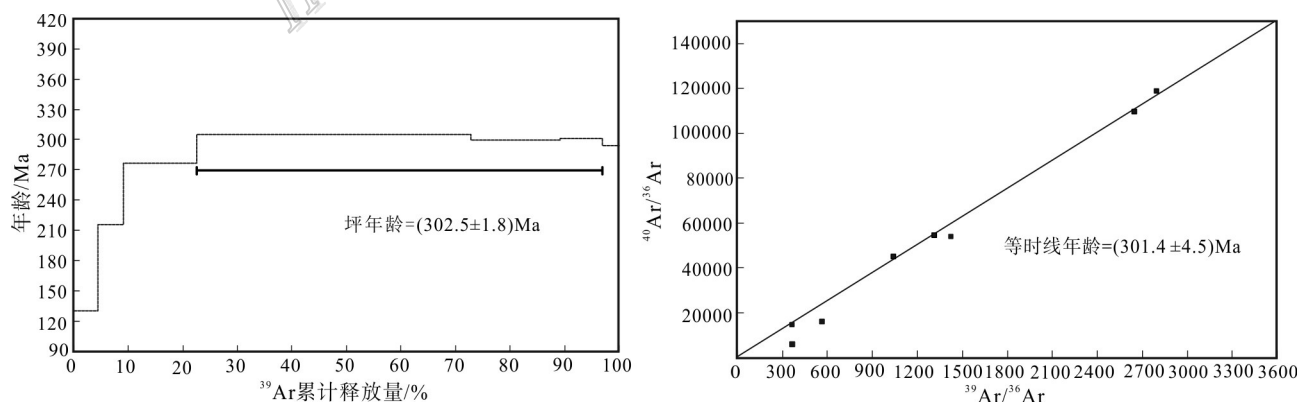


图7 寒山金矿床蚀变绢云母Ar-Ar测年坪年龄(左)和等时线年龄谱和图(右)

Fig. 7 Plateau age (left) and isochron age spectra (right) of Ar-Ar dating for sericite from the Hanshan gold deposit

表 1 寒山金矿床蚀变绢云母 Ar-Ar 分析测试结果

Table 1 Ar-Ar dating of sericite from the Hanshan gold deposit

$\theta/^{\circ}\text{C}$	$(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{m}}$	$(^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{m}}$	$(^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{m}}$	$^{40}\text{Ar}/\%$	$F(^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar})$	$^{39}\text{Ar}/10^{-14}\text{mol}$	$^{39}\text{Ar}_{\text{Cum.}}/\%$	t/Ma	$\pm 1\sigma/\text{Ma}$
600	17.908691	0.002781	0.000005	95.31	17.07	35.78	4.36	129.69	0.21
660	29.668992	0.001791	0.000005	98.15	29.12	64.30	4.73	215.98	0.33
720	38.102114	0.000703	0.000003	99.41	37.88	234.63	13.44	276.17	0.4
780	42.523810	0.000954	0.000003	99.29	42.22	487.91	25.03	305.33	0.45
830	42.261178	0.000357	0.000003	99.71	42.14	489.08	25.25	304.76	0.46
880	41.525190	0.000378	0.000003	99.69	41.39	310.58	16.32	299.81	0.43
930	41.729706	0.000762	0.000004	99.41	41.49	150.26	7.86	300.42	0.44
1000	41.401417	0.002776	0.000012	97.97	40.56	57.35	3.02	294.25	0.47

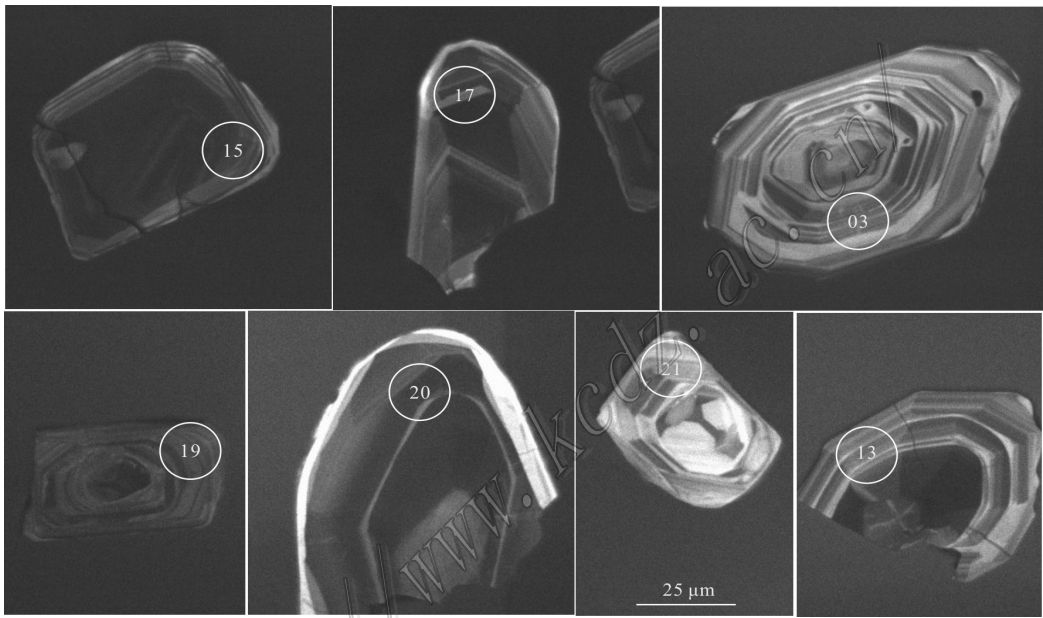


图 8 寒山金矿床闪长岩锆石 CL 图像及 LA ICP-MS 测点位置

Fig.8 The zircon CL image of diorite in southern Hanshan and LA ICP-MS dating location of the Hanshan gold deposit

矿时代和矿区闪长岩进行了研究。毛景文等(2000; 2003)曾利用石英包裹体 Rb-Sr 等时线法和云母 K-Ar 法分别对矿区含金石英脉及蚀变岩进行测定, 获得含金石英脉 Rb-Sr 等时线年龄为 $(303 \pm 10)\text{Ma}$, 黄铁绢英岩 K-Ar 年龄为 $(224.44 \sim 213.95)\text{Ma}$ 。宋忠宝等(2004)测得寒山金矿床绢英岩 Rb-Sr 同位素等时线年龄为 $(339 \pm 10)\text{Ma}$, 并测得闪长岩年龄 $(347.1 \pm 6.4)\text{Ma}$, 认为寒山金矿的成矿时代应为 $213.95 \text{ Ma} \sim (339 \pm 10) \text{ Ma}$, 成矿与闪长岩体有关。杨建国等(2003)测得早期金-毒砂-黄铁矿-石英脉和绢英岩(蚀变岩)中石英包裹体 Rb-Sr 等时线年龄分别为 372 Ma 和 339 Ma , 并测得寒山矿区南侧的青山花岗闪长岩体 U-Pb 年龄 $(370 \pm 25)\text{Ma}$ 。夏林圻等(2001)获得

的石英包裹体 Rb-Sr 法年龄为 395 Ma (表 3)。前人采集的样品主要有含金石英脉和绢英岩 2 类, 据前文所述金矿成矿期次, 石英脉多形成于成矿作用早期, 绢英岩主要在主成矿期及后期形成, 因此, 前人的结果可分为早期 $(395 \sim 372 \text{ Ma})$, 石英-黄铁矿化-金矿化阶段, 石英-多金属硫化物-金矿化阶段及石英-多金属硫化物-金矿化阶段(夏林圻等, 2001; 杨建国等, 2003)、中期 $((339 \pm 10) \sim (303 \pm 10)\text{Ma})$, 黄铁绢英岩化阶段(毛景文等, 2003; 宋忠宝等, 2004; 杨建国等, 2003)及后期 $(224.44 \sim 213.95)\text{Ma}$ (毛景文等, 2000)3 个阶段, 对于后期, 宋忠宝等(2004)认为可能是更晚期的一次变质作用, 属于蚀变年龄。

Ar-Ar 年龄能够记录到岩石受热事件的时代, 在

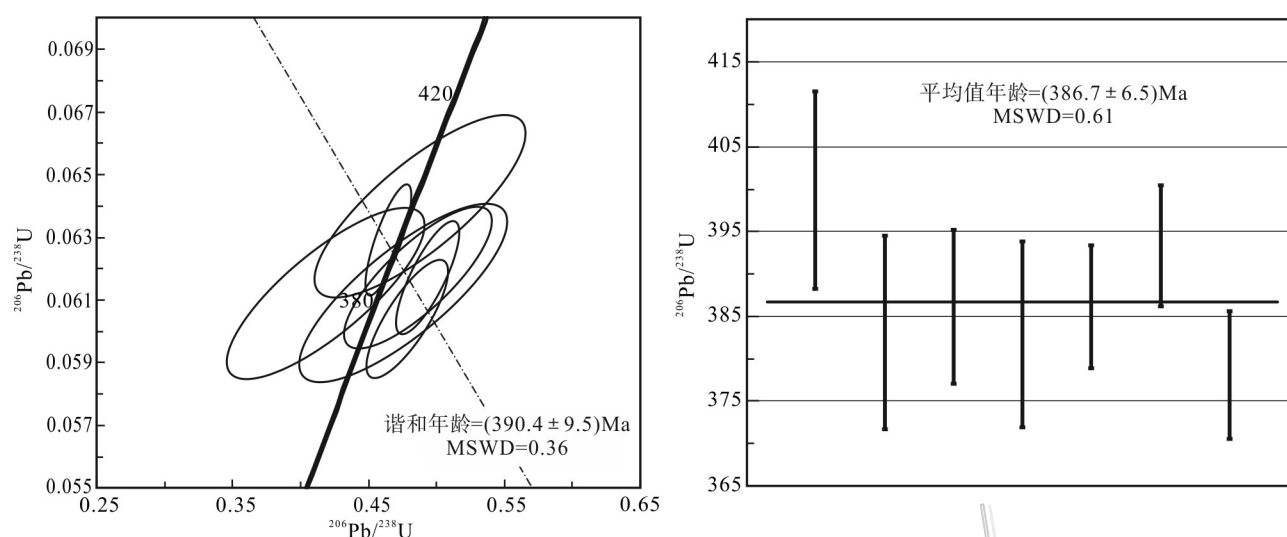


图9 寒山南闪长岩锆石 U-Pb 年龄谐和图(左)及直方图(右)

Fig. 9 Concordia (left) and frequency (right) plots of ages for diorite sample in southern Hanshan deposit

表2 寒山南闪长岩 LA ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测年结果

Table 2 LA ICP-MS zircon U-Pb analyses for diorite sample in southern Hanshan deposit

测点号	$w(B)/10^{-6}$			Th^{232}/U^{238}	同位素比值					
	Pb^{206}	Th^{232}	U^{238}		Pb^{207}/Pb^{206}	1σ	Pb^{206}/U^{238}	1σ	Pb^{207}/U^{235}	1σ
006BM03	158.15	318.24	542.19	0.59	0.05532	0.00594	0.06399	0.00192	0.48814	0.05123
020BM13	237	326.88	701.95	0.47	0.05631	0.00614	0.06124	0.00188	0.47551	0.05071
022BM15	151.76	53.79	550.22	0.10	0.05715	0.0043	0.06173	0.00149	0.48647	0.03575
024BM17	148.74	384.19	522.34	0.74	0.04958	0.00581	0.0612	0.0018	0.41847	0.04821
164BM19	134.81	304.77	524.72	0.58	0.05798	0.0019	0.06172	0.00119	0.49352	0.01543
165BM20	304.6	166.38	1213.57	0.14	0.05355	0.00137	0.06291	0.00117	0.46458	0.01117
166BM21	67.85	241.69	272.29	0.89	0.05743	0.00247	0.0604	0.00124	0.47834	0.01982
测点号	同位素比值		年龄/Ma							
	Pb^{208}/Th^{232}	1σ	Pb^{207}/Pb^{206}	1σ	Pb^{206}/U^{238}	1σ	Pb^{207}/U^{235}	1σ	Pb^{208}/Th^{232}	1σ
006BM03	0.01984	0.0011	425.1	223.07	399.9	11.66	403.6	34.96	397.1	21.89
020BM13	0.01702	0.00116	463.8	225.88	383.1	11.42	395	34.9	341.2	23.01
022BM15	0.02425	0.00217	496.8	158.24	386.1	9.06	402.5	24.42	484.2	42.76
024BM17	0.0226	0.00109	175.5	252.48	382.9	10.93	355	34.51	451.7	21.57
164BM19	0.01754	0.00039	528.7	70.62	386.1	7.25	407.3	10.49	351.5	7.72
165BM20	0.01871	0.00044	352	56.87	393.3	7.12	387.4	7.74	374.6	8.82
166BM21	0.01571	0.00039	507.5	92.25	378.1	7.51	396.9	13.61	315.2	7.77

分阶段加热过程中,最低温度阶段样品释放出的 Ar 来自矿物颗粒的表面,因其表面较易丢失 Ar,此时较低的 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 比值,对应的表面年龄为热事件发生的年代(刘艳红等,2004),从表 1 中可以发现,在加热至 600~720℃时,出现 3 个低温年龄,其中 2 个数据与毛景文等(2003)所测的成矿年龄基本一致,从数据分布来看,分别为华里西晚期、印支期和燕山期,

这既与前人研究所得的 3 个阶段相吻合,又与北祁连构造演化相对应,记录了相应的构造热事件。本次工作所获绢云母 Ar-Ar 坪年龄(302.5±1.8)Ma,与毛景文等(2003)获得的含金石英脉年龄和宋忠宝(2004)所测绢英岩的 Rb-Sr 年龄基本一致,而黄铁绢英岩化属于第 4 阶段,属于成矿期内的后半时段,可知成矿时代的起点还要更早,由于 K-Ar 年龄一般存

表3 寒山金矿床成矿时代及有关侵入岩成岩时代统计表

Table 3 Statistical table of metallogenic epoch and related intrusive rock age in the Hanshan gold deposit

矿床名称	成矿时代			侵入岩成岩时代		
	样品类型	年龄/Ma	测试方法	样品位置及岩性	年龄/Ma	测试方法
寒山金矿	11号含金石英脉	395±46 ^①	Rb-Sr等时线法	矿区南约5 km		
	11号含金石英脉	303±10 ^②	Rb-Sr等时线法	青山花岗闪长岩	370±25 ^④	锆石 U-Pb 法
	黄铁绢英岩	339±10 ^③	Rb-Sr等时线法	青山花岗闪长岩	320.40 ^⑤	锆石 U-Pb 法
	黄铁绢英岩	224.44~213.95 ^②	云母 K-Ar 法	矿区南界闪长岩	347.1±6.4 ^③	锆石 U-Pb 法
		372 ^④				
	黄铁绢英岩	302.5±1.8 ^⑥	绢云母 Ar-Ar 法	矿区南闪长岩	390.4±9.5 ^⑥	
14号黄铁绢英岩						

资料来源:①据夏林圻等,2001;②据毛景文等,1999;③据宋忠宝等,2005;④据杨建国等(2003);⑤据甘肃省地矿局第四地质矿产勘查院,1995;⑥本次工作。

在误差较大,可信度较低,结合前人研究划分的2个阶段,笔者认为华力西期为主要成矿期段,成矿时代可以划分为(395~372)Ma和(339±10~302.5±1.8)Ma两个阶段。

热液型矿床的成矿流体和热液的形成和运移应与地质构造环境具有一定的时空耦合关系,寒山金矿是由热液不断萃取周围的火山岩中的成矿物质并富集形成,这需要岩浆活动提供热源和动力驱动。侵入岩体易产生断裂裂隙,有利于水的大规模循环,在大范围内萃取更多的成矿组分(莫测辉等,1997;杨建国等,2003)。前人一致认为矿区南部的闪长岩与成矿有内在的亲缘关系(毛景文等,1998;夏林圻等,2001;宋忠宝等,2004;杨建国等,2003)。毛景文等(1998;2003)研究认为,寒山金矿床的主岩为奥陶纪安山质火山岩类,各成矿阶段都伴随有硅质和碱质的带人,尤其是第一阶段大面积微晶石英绢云母化的出现,说明这些组分并非来自围岩,而可能是来自深部,成矿与地幔流体交代作用有关间接证明了深部岩浆活动的存在。氧、硫同位素表现出成矿流体具大气降水与岩浆水混合的特征(毛景文等,2000;夏林圻等,2001)。本次获得的闪长岩成岩年龄(390.4±9.5)Ma,与前人获得的第一个成矿阶段时代相当,为岩体与成矿作用的关系提供了佐证,笔者亦认为岩体与成矿作用有关,岩体的形成为成矿提供了热源,可能还提供了一部分热液流体。

6.2 矿化富集规律

寒山金矿床受韧性剪切带控制明显,成矿主要与区内近EW向展布的韧性剪切带有关,特别在NWW向和EW向剪切带交汇的部位,矿化强烈富集,剪切带与围岩多呈渐变过渡关系。韧性变

形程度的强弱,一般与矿床的富集程度呈正相关关系。变形程度越强,矿体越富集。矿化分布也具有一定的分带性,由中心向两侧矿化减弱。

根据工程见矿效果对比,矿体的富集程度与岩石蚀变程度相关,氧化矿中若出现强黄钾铁矾化和硅化(包括石英脉),一般金品位较高。原生矿中,若出现强硅化、细粒黄铁矿化或多金属硫化物化,则矿体一般较富。烟灰色石英出现的区域,矿化较好,强烈变形的石英脉叠加绢英岩化,往往具有高品位矿化。

从圈定的矿化蚀变带和矿体来看,矿化蚀变带分布方向主要为NWW向和EW向,矿体主要为EW向,据控矿构造特征和多年的勘查经验,笔者认为含矿热液运移通道主要为EW向断裂带,并不断向NWW向断裂带运移,其次,区内NWW向为区域性断裂构造,EW向断裂多为后期的小型次级断裂,多斜切NWW向断裂带,大的含矿构造由于规模大、渗透性好,成矿流体进入后易分散,不易聚集成矿,一些小的构造,成矿空间小,围岩完整性好,塑形强,屏蔽效果明显(刘灵恩等,2012),因此,含矿表现出差异性,在EW向构造中强烈富集,多形成品质好的矿体,而在NWW向断裂中多形成矿化体。

7 结 论

(1) 获得黄铁绢英岩型矿石中绢云母⁴⁰Ar-³⁹Ar坪年龄(302.5±1.8)Ma,基于该类矿石属于成矿期内第4阶段,属于成矿期内的后半时段,可知成矿时代的起点还要更早,因此认为,成矿时代可以划分为(395~372)Ma和(339±10~302.5±1.8)Ma两个阶段,

华力西期为主要成矿期。

(2) 获得了寒山矿区南侧的闪长岩体中锆石 U-Pb 年龄 (390.4 ± 9.5) Ma, 该岩体为金成矿提供了热源, 可能还提供了岩浆热液。

(3) 奥陶系阴沟群为寒山金矿区主要含矿地层, 呈狭长带状 NWW 向展布, 其中安山质角砾凝灰岩、安山质晶屑凝灰岩为主要赋矿岩石。

(4) 矿体明显受脆韧性剪切带控制, 矿带产状与剪切带产状基本一致, 成矿作用与 EW 向次级小构造关系密切。

(5) 金矿化与围岩蚀变关系密切, 氧化矿中若出现强烈的黄钾铁矾化和硅化, 一般品位较高, 原生矿中若出现强硅化、黄铁矿化或多金属硫化物化, 尤其硅化强烈地段, 金矿化程度高。

References

- Fourth Institute of Geological and Mineral Exploration of Gansu Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources. 1995. The report of Xihu 1:5 regional geological survey[R]. (in Chinese).
- Fourth Institute of Geological and Mineral Exploration of Gansu Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources. 2014. The detailed investigation report of Hanshan gold deposit in Guazhou County, Gansu[R]. (in Chinese).
- Fourth Institute of Geological and Mineral Exploration of Gansu Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources. 2018. Geological survey of mineral resources in Changma area, Yumen City, Gansu Province[R]. (in Chinese).
- Li J C. 1999. Gold metallogenic factors and gold deposit distribution in the west part of north Qilian area within Gansu Province[J]. *Acta Geologica Gansu*, (Supp.): 25-31 (in Chinese with English abstract).
- Li S D. 2011. Geological features and genesis of Hanshan gold deposit in North Qilian mountains[J]. *Gansu Science and Technology*, 27 (7): 45-48 (in Chinese with English abstract).
- Li Y G, Wang S S, Liu M W, Meng E, Wei X Y, Zhao H B and Jin M Q. 2015. U-Pb dating Study of Baddeleyite by LA-ICP-MS technique and application[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(12): 2400-2418.
- Liu L E, Zhai D X, Xu H S and Li H C. 2012. Characteristics of Tieluping Ag-Pb deposit in western Henan and its prospecting potential[J]. *Mineral Resource and Geology*, 26(4): 319-322 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y H and Liu Y J. 2004. ^{40}Ar - ^{39}Ar isotopic dating[J]. *Global Geology*, 23(3): 245-251 (in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Yang J M, Zhang Z C, Wu M B, Wang Z L, Zhang Z H, Ye D J and Zuo G C. 1998. Geology, geochemistry and genesis of the Hanshan ductile-brittle shear zone[J]. *Mineral Deposits*, 17(1): 2-14 (in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Zhang Z H, Yang J M, Wang Z L and Zhang Z C. 2000. Fluid inclusions of shear zone type gold deposits in the western part of north Qilian mountain[J]. *Mineral Deposits*, 19(1): 9-16 (in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Zhang Z C, Yang J M, Zuo G C, Zhang Z H, Ye D J, Wang Z L, Ren F S, Zhang Y J, Peng C, Liu Y Z and Jiang M. 2003. The metallogenic series and prospecting assessment of copper, gold, iron and tungsten polymetallic ore deposits in the west sector of the northern Qilian Mountains[M]. Beijing: Geological Publishing House. (in Chinese).
- Mo C H and Wang X Z. 1997. Some problems about the genesis of gold deposits in intrusives[J]. *Geological Review*, 43(2): 139-147 (in Chinese with English abstract).
- Song Z B, Ren Y X, Li Z P, Yang J G and Zhang J H. 2004. The petrogenic age of Hanshan gabbro, North Qilian Mountains[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 23(3): 253-256 (in Chinese with English abstract).
- Steiger R H and Jager E. 1977. Subcommittee on geochronology: Convention on the use of decay constants in geo- and cosmochemistry[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 36: 359-362.
- Wu M B, Mao J W, Yang J M, Zhang Z C and Zuo G C. 1999. Deformation of the Hanshan shear zone and its relationship to gold mineralization in west part of north Qilianshan[J]. *Geology and Prospecting*, 35(4): 12-14 (in Chinese with English abstract).
- Xia L Q, Xia Z C, Xu X Y. 2001. Tectonic, magmatic and metallogenic dynamics in North Qilian Mountains[M]. Beijing: China Earth Press. 231-264 (in Chinese).
- Yan C, Zhao H J, Zhao P L and Yuan S D. 2019. Muscovite Ar-Ar isotopic dating of Zhenkou quartz vein type wolframite deposit in southern Hunan Province and its significance for regional exploration[J]. *Mineral Deposits*, 38(5): 1147-1158 (in Chinese with English abstract).
- Yang H Q, Jang H B, Tan W J, Zhao G B, Yang L T, Li W Y and Wang Y H. 2017. Introduction to important mineral resources in northwestern area[M]. China University of Geosciences Press. (in Chinese).
- Yang J G, Huang Z Q, Ren Y X, Li Z P and Song Z B. 2003. The ore-controlling conditions and metallogenic model of Hanshan gold deposit in North Qilian Mts[J]. *Northeastern Geology*, 36(1): 41-51 (in Chinese with English abstract).
- Yang X J. 1999. Geological characteristics of tectonoaltered rock-type gold deposit occurred in Hanshan shear zone in Anxi County[J]. *Acta Geologica Gansu*, 17(1): 42-48 (in Chinese with English abstract).
- Yang X J. 2007. Ore-forming conditions and prospecting direction of Hanshan gold deposit in the Anxi County, Gansu[J]. *Geology and Prospecting*, 43(1): 49-53 (in Chinese with English abstract).
- Yang Y C, Liu J J, Wang X Y, Chen J, Xue X W, Zhang C and Ren X. 2018. Geochemical characteristics and structural ore-control

mechanism about different structural-lithofacies zones of the Dishuishan gold deposit in Gansu Province[J]. Northwestern Geology, 51(1): 88-103(in Chinese with English abstract).

Zhang S Y and Liu D F. 2015. Initial analysis on mineralization enrichment feature of Hanshan gold deposit[J]. Gansu Science and Technology, 31(15):16-18(in Chinese with English abstract).

Zhao Y I, Yang J Z and Shen Y C. 2002. A review of Isotope geochemistry dating methods[J]. Geology and Prospecting, 38(2): 63-67 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

甘肃省地矿局第四地质矿产勘查院. 1995. 西湖幅 1:5 万区域地质调查报告[R].

甘肃省地矿局第四地质矿产勘查院. 2014. 甘肃省瓜州县寒山金矿详查报告[R].

甘肃省地矿局第四地质矿产勘查院. 2018. 甘肃省玉门市昌马一带矿产地质调查报告[R].

李金春. 1999. 甘肃北祁连山西段金矿成矿地质条件及分布规律[J]. 甘肃地质, (S1): 25-31.

李生栋. 2011. 北祁连山寒山金矿床地质特征及成因[J]. 甘肃科技, 27(7): 45-48.

李艳广, 汪双双, 刘民武, 孟恩, 魏小燕, 赵慧博, 靳梦琪. 2015. 斜锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年方法及应用[J]. 地质学报, 89(12): 2400-2418.

刘灵恩, 翟东兴, 徐厚生, 李红超. 2012. 豫西铁炉坪银铅矿床特征及找矿前景[J]. 矿产与地质, 26(4): 319-322.

刘艳红, 刘永江. 2004. ^{40}Ar - ^{39}Ar 同位素测年方法及其应用[J]. 世界地质, 23(3): 245-251.

毛景文, 杨建民, 张招崇, 吴茂炳, 王志良, 张左衡, 叶得金, 左国超. 1998. 甘肃寒山剪切带型金矿床地质、地球化学和成因[J]. 矿床地质, 17(1): 2-14.

毛景文, 张作衡, 杨建民, 王志良, 张招崇. 2000. 北祁连山西段剪切带型金矿床成矿流体特征[J]. 矿床地质, 19(1): 9-16.

毛景文, 张招崇, 杨建民, 左国超, 张左衡, 叶得金, 王志良, 任丰寿, 张玉君, 彭聪, 刘煜洲, 姜枚. 2003. 北祁连山西段铜金铁钨多金属矿床成矿系列和找矿评价[M]. 北京: 地质出版社.

莫测辉, 王秀璋. 1997. 关于侵入岩体中金矿床成因研究若干问题的讨论[J]. 地质论评, 43(2): 139-147.

宋忠宝, 任有祥, 李智佩, 杨建国, 张江华. 2004. 北祁连山寒山辉长岩成岩时代的确定[J]. 岩石矿物学杂志, 23(3): 253-256.

吴茂炳, 毛景文, 杨建民, 张招崇, 左国超. 1999. 北祁连山西段寒山剪切带的变形作用及其与金矿化的关系[J]. 地质与勘探, 35(4): 12-14.

夏林圻, 夏祖春, 徐学义. 2001. 北祁连山构造-火山岩浆-成矿动力学[M]. 北京: 中国大地出版社. 231-264.

严宸, 赵海杰, 赵盼盼, 袁顺达. 2019. 湘南圳口石英脉型黑钨矿床白云母 Ar-Ar 同位素测年及其对区域找矿勘查的指示[J]. 矿床地质, 38(5): 1147-1158.

杨合群, 姜寒冰, 谭文娟, 赵国斌, 杨东田, 李文渊, 王永和. 2017. 西北地区重要矿产概论[M]. 中国地质大学出版社.

杨建国, 黄振泉, 任有祥, 李智佩, 宋忠宝. 2003. 甘肃北祁连山寒山金矿床控矿条件与成矿模式[J]. 西北地质, 36(1): 41-51.

杨兴吉. 1999. 安西县寒山剪切带构造蚀变岩型金矿床地质特征[J]. 甘肃地质学报, 17(1): 42-48.

杨兴吉. 2007. 甘肃安西县寒山金矿床控矿因素及找矿方向[J]. 地质与勘探, 43(1): 49-53.

杨永春, 刘家军, 王学银, 陈杰, 薛小文, 张聪, 任锡. 2018. 甘肃滴水山金矿不同构造-岩相带岩石地球化学特征及构造控矿机理探讨[J]. 西北地质, 51(1): 88-103.

张素云, 刘东风. 2015. 浅析甘肃寒山金矿矿化富集规律[J]. 甘肃科技, 31(15): 16-18.

赵玉灵, 杨金中, 沈远超. 2002. 同位素地质学定年方法评述[J]. 地质与勘探, 38(2): 63-67.