

doi: 10.12029/gc20160422

李随民, 韩玉丑, 魏明辉, 等. 张家口高家庄多金属矿床成矿时代厘定及其地质意义[J]. 中国地质, 2016, 43(4): 1385–1392.

Li Suimin, Han Yuchou, Wei Minghui, et al. The metallogenic age of the Gaojiashuang polymetallic deposit in Zhangjiakou area and its geological implications[J]. *Geology in China*, 2016, 43(4): 1385–1392(in Chinese with English abstract).

## 张家口高家庄多金属矿床成矿时代厘定 及其地质意义

李随民<sup>1</sup> 韩玉丑<sup>2</sup> 魏明辉<sup>3</sup> 邢 欢<sup>1</sup> 李森文<sup>3</sup> 李玉红<sup>3</sup>

(1. 河北地质大学, 河北 石家庄 050031; 2. 河北省地矿局, 河北 石家庄 050081;

3. 河北省地矿局第三地质大队, 河北 张家口 075000)

**摘要:**太行山北东向构造-岩浆岩带中发育有多个燕山期酸性岩体, 目前已发现的多金属及贵金属矿床与燕山期岩体有着密切的成因联系。本文对分布于大河南岩体北西侧的高家庄多金属矿床采用硫化物 Rb-Sr 法进行了同位素定年, (144.5±1.4)Ma 等时线测年结果与采用锆石 U-Pb 法确定的大河南岩体形成时代接近; 此外, 矿床硫化物的初始铷同位素比值为 0.7122~0.7123, 显示成矿物质来源以壳源为主。这与大河南岩体主要为陆壳物质部分熔融形成的认识相一致, 即高家庄多金属矿床在成矿物质来源上与大河南岩体的形成与演化之间具有密切的成因联系。大河南岩体的形成时限与区内多金属矿床形成时限与中国东部第二次大规模成矿期一致, 此时区内地球动力学环境正处于主应力场由近南北向转换到近东西向的构造体制大转折时期。在此独特的成矿背景下, 深熔作用形成的花岗质岩浆沿 NNE 向与原 EW 向断裂交汇处侵位。花岗质岩浆高侵位但未发生喷发作用, 使挥发组分和成矿元素得以保存, 从而为大规模成矿作用提供了必须的热、流体、挥发组分和成矿元素。

**关键词:**成矿时代; 大河南岩体; 多金属矿床

中图分类号: P618.4; P597 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2016)04-1385-07

### The metallogenic age of the Gaojiashuang polymetallic deposit in Zhangjiakou area and its geological implications

LI Sui-min<sup>1</sup>, HAN Yu-chou<sup>2</sup>, WEI Ming-hui<sup>3</sup>, XING Huan<sup>1</sup>, LI Seng-wen<sup>3</sup>, LI Yu-hong<sup>3</sup>

1. Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, Hebei, China; 2. Exploration and Development Bureau of Geology and Mineral Resources of Hebei Province, Shijiazhuang 050081, Hebei, China; 3. No. 3 Geological Party, Hebei Bureau of Geological Exploration, Zhangjiakou 075000, Hebei, China)

**Abstract:** There are many Yanshanian acid intrusive bodies located in the northeast structural-magmatic belt of Taihang Mountain. The currently discovered polymetallic deposits and precious metal ore deposits are genetically related to the acid rocks of Yanshanian epoch. This study provides the metallogenic age of the Gaojiashuang polymetallic deposit by means of Rb-Sr isotopic

收稿日期: 2015-05-25; 改回日期: 2015-10-25

基金项目: 河北省国土资源厅基金项目(2012055548, 2013045650)资助。

作者简介: 李随民, 男, 1971 年生, 博士, 教授, 主要从事矿床学方面的教学和研究工作; E-mail: smli71@163.com。

dating. The deposit is located on the northwestern margin of the Dahenan rock mass. Isochron age of  $(144.5 \pm 1.4)$  Ma is close to the formation age of Dahenan rock mass shown by zircon (U-Pb). Initial Sr isotope ratios (0.7122–0.7123), suggesting that the ore materials of the deposit were derived from the rock mass mainly formed by partial melting magma of crust-derived materials. It is shown that the evolution of Dahenan rock mass controlled the formation of polymetallic deposits in the study area. The metallogenic age of the Gaojiashuang polymetallic deposit is consistent with the age of the second large-scale mineralization epoch in eastern China, with the geodynamic setting belonging to the tectonic regime transition period. In this unique metallogenic background, the emplacement of granitic magma took place along the intersection of NNE-striking and EW-trending faults. This process provided the necessary heat, fluid, volatile components and metallogenic elements for large-scale metallogeny.

**Key words:** metallogenic ages; Dahenan rock mass; polymetallic deposit

**About the first author:** LI Sui-min, male, born in 1971, doctor and professor, mainly engages in the study of deposit geology and deposit geochemistry; E-mail: smli71@163.com.

**Fund Support:** Supported by Research Projects of Bureau of Land and Resources of Hebei Province (No. 201205548, No. 2013045650).

太行山岩浆岩位于华北中生代岩浆岩带的西端,岩浆岩带的北段受控于北北东向上黄旗—乌沟深断裂,该深大断裂由北而南分布有中生代形成的大海陀、大河南、王安镇等岩基。近年来在上述岩基及其周边发现了数个多金属及贵金属矿床及矿化点。已有的研究资料显示,区内已发现的多金属矿及贵金属矿床在成因上与岩体有着密切的联系<sup>[1-6]</sup>,但较为遗憾的是一直缺少矿床年代学方面的数据,无法建立矿床与岩体之间在时间上的耦合关系。

以前由于同位素测试仪器的灵敏度低,误差大,难以找到适合的直接定年的矿物,对矿床的定年只能采用一些间接的方法。如含钾的热液蚀变矿物的K-Ar、Ar-Ar同位素定年、一些含铀副矿物的U-Pb和Pb-Pb同位素定年、一些脉石矿物(萤石、电气石、方解石)的Rb-Sr、Sm-Nd同位素定年。这些间接的定年方法具有一些缺点,如定年测试的矿物如果用的是热液蚀变矿物,则只能代表热液蚀变事件的年龄,但在很多矿床热液蚀变事件并不一定与成矿事件同时。脉石矿物往往形成期次很多,也不一定与矿石矿物是同时形成的。随着新一代高精度、高灵敏度的同位素测试仪器的开发和利用,使得矿床成矿时代的确定从间接法向直接定年法成为可能<sup>[7-20]</sup>。所谓的直接定年,是相对于上面的一些间接定年方法而言的,它是指直接对矿石矿物或者成矿流体进行同位素年代的确定,这样得到的就是直接的成矿年龄。矿床成矿时代的精确厘定为分析岩体与矿床形成之间的耦合关系提供了可能。本文以赋存于大河南岩体西北侧的高家庄多

金属矿床为例,利用Rb-Sr法同位素定年结果,分析了大河南岩体演化对多金属矿床形成的控制,为区内多金属矿床形成过程分析提供了理论依据。

## 1 区域地质

高家庄铅锌多金属矿床位于大河南岩体北西缘外接触带(图1)。大河南岩体沿北东向上黄旗—乌沟深断裂呈线性多次侵入。航磁异常显示大河南岩体边部有隐伏岩体或岩枝<sup>[3]</sup>。区域出露地层主要有中—新元古代坳拉槽的碳酸盐岩、局部碳酸盐岩形成时代为寒武纪—奥陶纪;侏罗纪的含煤碎屑岩、火山岩、火山碎屑岩。中元古代白云岩地层中可见燕山期酸性小岩体分布,中酸性岩体出露面积较小,岩性以黑云石英二长岩、花岗斑岩为主,由于中酸性岩体的侵入,致使部分地段发育矽卡岩型多金属矿化。区内构造以北东向、北西向断裂为主。

## 2 矿区地质

矿区覆盖严重,矿化带呈隐伏状态赋存于大河南岩体北西缘外接触带的中新元古界碳酸盐岩地层中(图2),含矿地层主要为雾迷山组和铁岭组。雾迷山组总体为一套以白云岩为主间夹燧石条带岩石,富含叠层石;铁岭组分布在矿区中南部,出露范围较雾迷山组小,与下伏雾迷山组呈平行不整合接触,岩性以白云岩为主。区内有中侏罗世潜流纹岩、潜安山岩、花岗斑岩和黑云石英二长岩出露。矿区构造以断裂为主。断裂构造带走向北西,倾向北东,倾角45°左右。构造带内岩石破碎强烈,形成

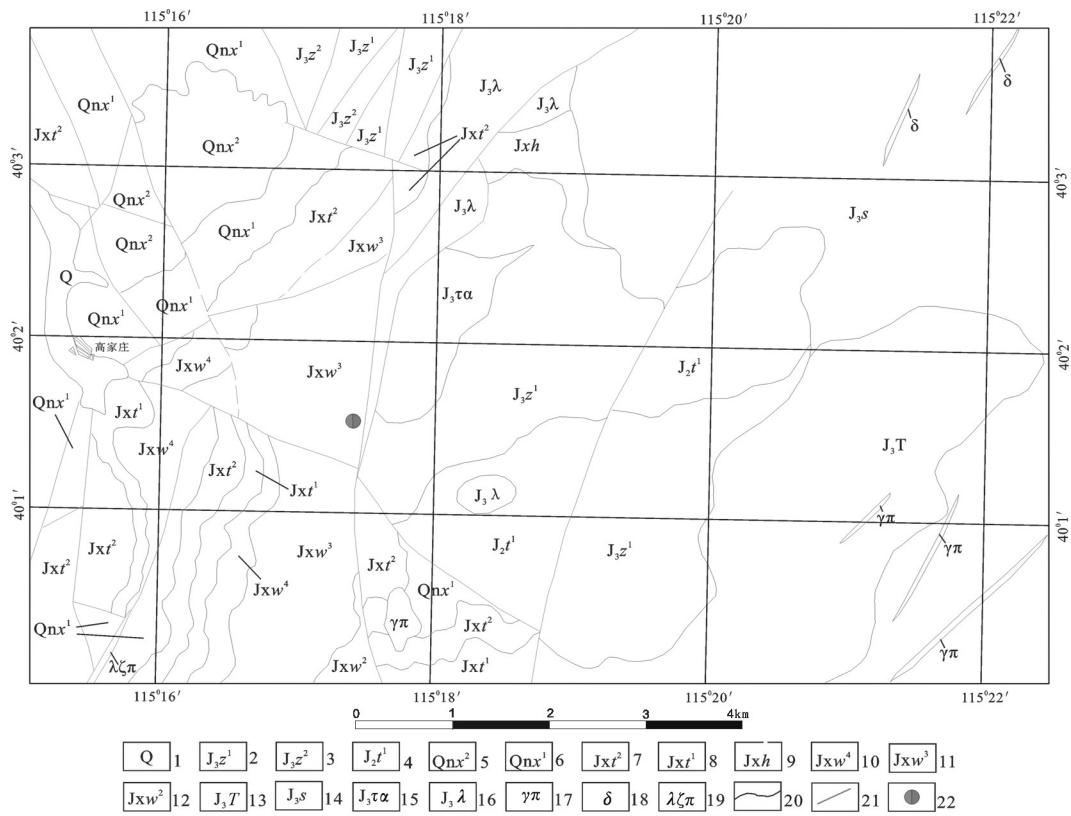


图1 研究区区域地质图(据1:5万图幅修编)

1—第四系;2—张家口组一段;3—张家口组二段;4—髫髻山组一段;5—下马岭组二段;6—下马岭组一段;7—铁岭组二段;8—铁岭组一段;9—洪水庄组;10—雾迷山组四段;11—雾迷山组三段;12—雾迷山组二段;13—塔尔洼单元中粒多斑黑云石英二长岩;14—水关口单元中粒二长花岗岩;15—粗安岩;16—流纹岩;17—花岗斑岩;18—闪长岩脉;19—石英正长斑岩脉;20—地层界线;21—断层;22—多金属矿床

Fig. 1 Regional geological map of the Gaojiashuang ore district (modified after 1:50000 geological map)

1—Quaternary; 2—1<sup>st</sup> member of Zhangjiakou Formation; 3—2<sup>nd</sup> member of Zhangjiakou Formation; 4—1<sup>st</sup> member of Tiaojishan Formation; 5—2<sup>nd</sup> member of Xiamaling Formation of Qingbaikou System; 6—1<sup>st</sup> member of Xiamaling Formation of Qingbaikou System; 7—2<sup>nd</sup> member of Tielingzu Formation of Jixian System; 8—1<sup>st</sup> member of Tielingzu Formation of Wumishan System; 9—Hongshuizhuang Formation of Jixian System; 10—4<sup>th</sup> member of Wumishan Formation of Jixian System; 11—3<sup>rd</sup> member of Wumishan Formation of Jixian System; 12—2<sup>nd</sup> member of Wumishan Formation of Jixian System; 13—Biotite adamellite of Taerwa unit; 14—Monzonitic granite of Shuiguangkou unit; 15—Trachyandesite; 16—Rhyolite; 17—Granite porphyry; 18—Diorite vein; 19—Quartz orthophyre vein; 20—Stratigraphic boundary; 21—Fault; 22—Polymetallic deposit

碎裂岩、碎粉岩,蚀变有硅化、碳酸盐化、褐铁矿化。区内断层切割雾迷山组三段和四段、寒武系张夏组、侏罗系髫髻山组及张家口组等地层,属燕山期断层。矿石呈自形-半自形粒状结构、交代结构,蜂窝状、团块状构造及浸染状构造。

矿石矿物成分有方铅矿、黄铁矿、褐铁矿、软锰矿、少量黄铜矿和闪锌矿(图3);脉石矿物有石英、方解石、白云石等。矿石呈自形-半自形粒状结构、交代结构,团块状及浸染状构造。氧化矿石多呈蜂窝状。围岩蚀变常见大理岩化、硅化、绿泥石化、碳酸盐化等。

### 3 成矿时代厘定

#### 3.1 测试样品特征

用于Rb-Sr等时线年龄测定的样品采于团块状及浸染状铅锌矿石,硫化物包括共生矿物组合闪锌矿与方铅矿、闪锌矿与黄铁矿以及单矿物闪锌矿等,均为未风化的新鲜岩石样品。测试样品以方铅矿、闪锌矿、黄铁矿为主(图3)。镜下观察可见,方铅矿呈半自形-自形粒状,粒径1~5 mm,呈星散状分布,多数沿脉石裂隙脉状分布,局部可见尖角状,呈浸染状不均匀分布,或沿黄铁矿或闪锌矿边部交代,使

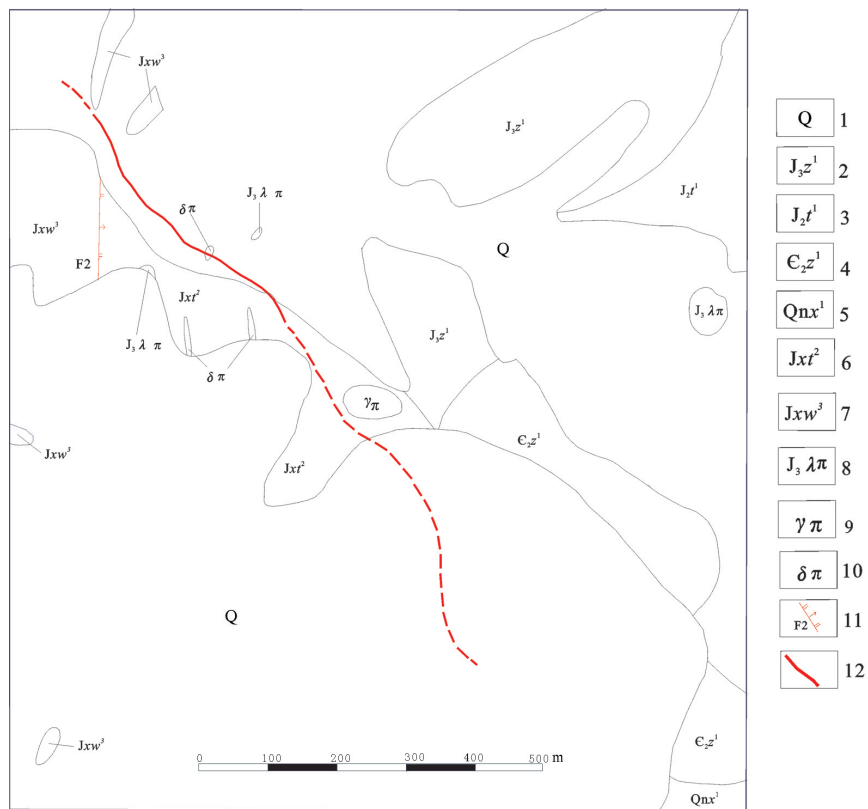


图2 高家庄多金属矿床地质简图

1—第四系;2—张家口组一段;3—髻髻山组一段;4—张夏组一段;5—下马岭组一段;6—铁岭组二段;7—雾迷山组三段;8—潜流纹岩;  
9—花岗斑岩;10—闪长玢岩;11—正断层及编号;12—铅锌矿脉;

Fig. 2 Geological sketch map of the Gaojiazhuang polymetallic ore district

1-Quaternary; 2-1<sup>st</sup> member of Zhangjiakou Formation; 3-1<sup>st</sup> member of Tiaojishan Formation; 4-1<sup>st</sup> member of Zhangxia Formation;  
5-1<sup>st</sup> member of Xiamaling Formation of Qingbaikou System; 6-2<sup>nd</sup> member of Tielingzu Formation of Jixian System; 7- 3<sup>rd</sup> member of Wumishan  
Formation of Jixian System; 8- Sub-rhyolite; 9-Granite porphyry; 10- Diorite porphyrite; 11- Normal fault and its serial number;  
12- Lead and zinc deposit

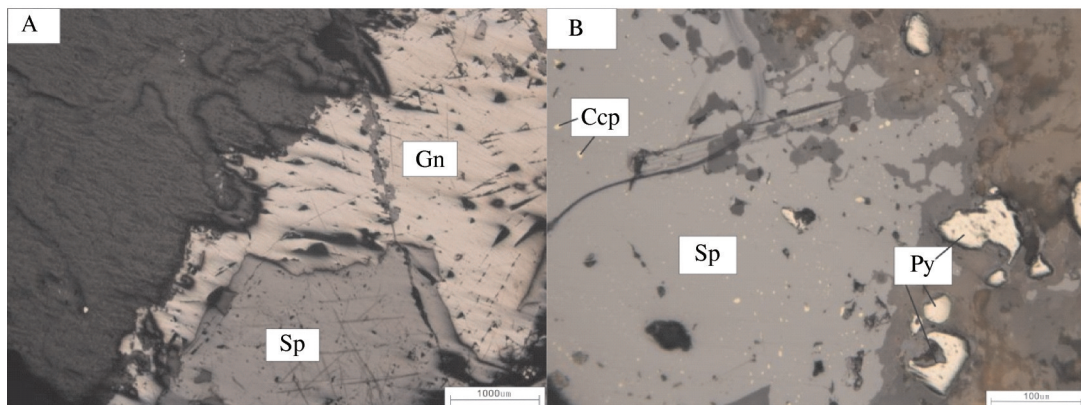


图3 高家庄铅锌多金属矿床矿石矿物样品特征

A—方铅矿(Gn)和闪锌矿(Sph)共生,闪锌矿内见少量乳滴状黄铜矿出溶物;  
B—闪锌矿(Sph)和黄铁矿(Py)共生,黄铁矿呈半自形-他形,闪锌矿内具少量乳滴状黄铜矿出溶物;  
Sph—闪锌矿;Gn—方铅矿;Ccp—黄铜矿;Py—黄铁矿

Fig. 3 Structure diagram of ore minerals in the Gaojiazhuang Pb-Zn polymetallic deposit

A-Galena associated with sphalerite, with a small amount of emulsion droplet of chalcopyrite seen in sphalerite.B-Sphalerite associated with pyrite,  
pyrite exhibiting subhedral and anhedral grains, with a small amount of emulsion droplet of chalcopyrite seen in sphalerite

黄铁矿呈孤岛状残留。闪锌矿呈半自形—他形,粒度0.1~1 mm,有的粒内见黄铜矿固溶体,交代黄铁矿,浸染状分布;有的被方铅矿交代,较大晶体内有方铅矿细脉分布。黄铁矿呈自形—半自形粒状,共边规则、平直,粒度一般0.1~1 mm,有的被方铅矿、闪锌矿、黄铜矿交代浸染状分布、星散状或沿岩石裂隙分布。黄铜矿较少,半自形—他形,粒度细小,一般0.01~0.2 mm,交代闪锌矿等,星散状分布。被测试矿物均来自原生硫化物。

### 3.2 测试方法选择

矿床成矿时代的精确厘定对于分析矿床的形成过程、确定矿床成因具有重要的意义。目前,Rb—Sr同位素定年主要有流体包裹体Rb—Sr和直接对矿石矿物Rb—Sr同位素定年两种途径<sup>[7]</sup>。其中,流体包裹体Rb—Sr定年是通过测定石英和闪锌矿中的流体包裹体的Rb—Sr同位素体系来定年。这一方法就是将石英和闪锌矿中包裹的成矿流体淋滤出来,然后测定其Rb—Sr同位素组成,结合残余物的Rb—Sr同位素组成来确定成矿年龄;硫化物的Rb—Sr同位素定年就是直接将硫化物全溶,然后测其Rb—Sr同位素组成来定年。Rb—Sr在硫化物中主要赋存在包裹体或者矿物晶格中,其Rb、Sr含量和Rb/Sr比值会有变化,从而满足定年的条件<sup>[7]</sup>。本次选取高家庄多金属矿床中黄铁矿、闪锌矿和方铅矿矿物组进行Rb—Sr等时线定年。

### 3.3 样品处理及分析方法

被测试矿物均为未风化、未蚀变样品,能够代表矿床的成矿年龄。首先将样品粉碎到40~80目,在双目镜下挑选出单矿物,纯度达99%以上。本次单矿物挑选工作由河北省地矿局廊坊区域地质调

查所实验室完成。硫化物样品的Rb、Sr含量草测均在南京大学现代测试中心完成,在此基础上,挑选含量满足定年的样品在南京大学现代分析中心同位素分析室进行Rb、Sr含量和同位素组成测定。

Rb—Sr同位素分析方法:采用高压密闭熔样和阳离子交换技术分离和提纯,然后用英国产的VG354质谱仪测定,测定方法见文献[16—17]。测定的美国NBS987同位素标样为: $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.1710236\pm 7$ ,Sr的全流程空白为( $5\times 10^{-9}\sim 7\times 10^{-9}$ )g, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位素比值用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}=0.11194$ 进行标准化。 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 的分析误差为 $\pm 1\%$ , $\lambda_{\text{Rb}}=1.42\times 10^{-11}\text{a}^{-1}$ 。等时线年龄用ISOPLOT (Version 2.90, 1994)程序计算。

### 3.4 分析结果

高家庄多金属矿床闪锌矿、方铅矿和黄铁矿的Rb、Sr同位素组成测定结果见表1。利用ISOPLOT软件包计算出闪锌矿Rb—Sr等时线年龄 $t=(144.5\pm 1.4)\text{Ma}$ ,初始锶同位素组成 $I_{\text{Sr}}=0.71227$ (MSWD=0.107)(图4)。测试结果显示,高家庄多金属矿床形成于燕山晚期。

## 4 讨论

### 4.1 岩体与矿床形成时间吻合性

王霞<sup>[21]</sup>对大河南岩体中大牙口(正长花岗岩)、北龙门(石英二长岩)和大庙(石英闪长岩)等地岩石采用锆石U—Pb法定年,结果分别为(139.8 $\pm$ 3.7)Ma、(147.4 $\pm$ 4.1)Ma和(141.3 $\pm$ 3.6)Ma。测试结果表明大河南岩体形成于燕山晚期。大河南岩体锆石U—Pb法定年结果与高家庄多金属矿床同位素定年结果接近,岩体与多金属矿床均形成于140 Ma左右的燕山晚期。

表1 高家庄多金属矿床单矿物Rb—Sr测试结果

Table 1 Rb—Sr isotopic analyses of sulfides from the Gaojiazhuang polymetallic deposit

样号	测试矿物	Rb/ $10^{-6}$	Sr/ $10^{-6}$	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) <sub>i</sub>
GJ1-3	闪锌矿 <sup>a</sup>	0.2371	0.5169	1.357	0.715081 $\pm$ 10	0.71229
GJ1-3	方铅矿 <sup>a</sup>	1.056	0.9642	3.074	0.718542 $\pm$ 8	0.71223
GJ1-4	黄铁矿 <sup>a</sup>	0.5239	0.8108	1.906	0.716186 $\pm$ 9	0.71227
GJ1-6	闪锌矿 <sup>a</sup>	0.5503	0.2496	6.513	0.725603 $\pm$ 9	0.71223
GJ1-6	方铅矿 <sup>a</sup>	0.0315	4.509	0.0204	0.712322 $\pm$ 10	0.71228
GJ2-1	黄铁矿 <sup>a</sup>	0.9507	0.2362	11.87	0.736717 $\pm$ 8	0.71229

注:数据由南京大学现代分析中心同位素分析室分析。

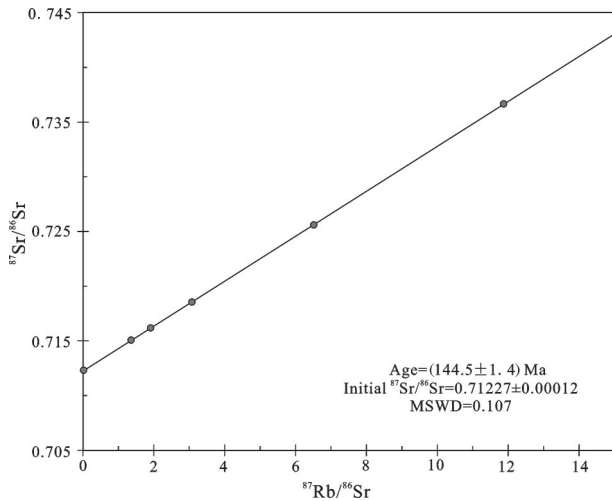


图4 高家庄硫化物Rb-Sr等时线图  
Fig.4 Rb-Sr isochron diagram of sulfides

已有航磁资料显示,大河南岩体边部有隐伏岩体或岩枝存在<sup>[3]</sup>,位于岩体北西缘的高家庄矿区出露的花岗斑岩、黑云石英二长岩也证实了航磁资料的推断结果。即矿区中的酸性岩体属于大河南岩体的岩枝,是大河南岩体的组成部分。岩体的形成与演化控制了区内多金属矿化的形成。

#### 4.2 成矿物质来源

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 是判断成岩成矿物质来源的重要指标,在矿床地质研究中,常利用其来示踪成矿物质来源、岩浆流体、深源流体的壳幔混染作用<sup>[12]</sup>。为避免放射性 $^{87}\text{Rb}$ 衰变对Sr同位素造成显著影响,本次采用软件Geokit软件,将成矿时代按144.5 Ma分别对硫化物进行了初始同位素计算(表1)。从表1可以看出,高家庄矿床硫化物等时线年龄给出的初始同位素比值非常接近,在0.7122~0.7123,硫化物初始锶同位素( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )值显示成矿物质主要来自壳源。

王霞<sup>[21]</sup>结合岩石常量元素、微量元素和稀土元素特征,认为大河南岩体主要为陆壳物质部分熔融形成。高家庄多金属矿床硫化物锶同位素初始值在0.7122~0.7123,成矿物质来源也以壳源为主。暗示着高家庄多金属矿床在成矿物质来源上与大河南岩体的形成与演化之间具有密切的成因联系。

#### 4.3 多金属矿床形成动力学环境探讨

毛景文<sup>[22]</sup>对华北地区典型矿床的同位素年龄和与成矿有关的花岗质岩石的同位素年龄数据研究后,提出中国东部大规模成矿作用出现在200~

160 Ma、140 Ma左右和120 Ma三大成矿期,通过对中生代地球动力学演化的分析研究,认为3大成矿期所对应的地球动力学背景分别为后碰撞造山过程、构造体制大转折和岩石圈大规模拆沉作用。其中140 Ma左右时期成矿表现为与深源花岗质岩石有关的斑岩-矽卡岩矿床。大河南岩体和高家庄多金属矿床在形成时代与中国东部第二次大规模成矿作用时限相吻合。该时期华北地台正处于主应力场由近南北向转换到近东西向的构造体制大转折时期,在此独特的成矿背景下,岩石圈构造体制调整不仅导致火山喷发,而且加剧壳幔相互作用,导致深熔作用形成的花岗质岩浆沿NNE向与原EW向断裂交汇处侵位。这些成矿的花岗质岩浆不仅经历了强烈的分异演化,而且是高侵位但未发生喷发作用,使挥发组分和成矿元素得以保存,从而为大规模成矿作用提供了必须的热、流体、挥发组分和成矿元素<sup>[23-26]</sup>。大河南岩体和高家庄多金属矿床正是在此地球动力学背景下形成的。

毛景文等<sup>[22]</sup>认为120 Ma期间的第三次大规模成矿作用在张家口地区亦有多金属矿床形成。张北县蔡家营铅锌银多金属矿床在成因上与一组石英斑岩脉相伴产出,后者的单颗粒锆石U-Pb年龄为119.1 Ma,认为该矿床是在岩石圈减薄过程的地球动力学环境下形成。

张家口地区已有的多金属及贵金属矿床测年数据显示,上黄旗—乌龙沟北东向岩浆岩带中的矿床形成多集中在140 Ma左右(大海陀岩体北侧万全寺多金属矿床Rb-Sr法测年为(144±4)Ma,另文发表),与中国东部第二次大规模成矿作用时限相吻合;区内也存在着第三次大规模成矿作用形成的多金属矿床(如蔡家营铅锌矿)。该区是否存在第一次大规模成矿作用形成的有工业价值的多金属矿床,有待于区内多金属矿床测年数据的不断出现。

## 5 结 论

(1)赋存于中元古代白云岩地层中的高家庄多金属矿床形成于(144.5±1.4)Ma,其形成时代与大河南岩体形成时代相近;矿床硫化物 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位素初始值非常接近,在0.7122~0.7123。大河南岩体主要为陆壳物质部分熔融形成,岩体与高家庄多金属矿床在成矿物质来源上有密切的成因联系。上述证据显

示区内多金属矿床的形成受大河南酸性岩体,主要是其周边小岩体(枝)的形成与演化控制。

(2)张家口北东向岩浆岩带中的大河南、大海陀岩体及其附近多金属矿床的形成时代与中国东部第二次大规模成矿作用时限相吻合;区内也存在着第三次大规模成矿作用的多金属矿床(如蔡家营铅锌矿)。张家口地区是否存在第一次大规模成矿作用时形成的有工业价值的多金属矿床,有待后续区内多金属矿床测年数据的不断出现。

### 参考文献(References):

- [1] 朱永峰, 冯克武, 李福民, 等. 上明峪金矿地质特征及其与大河南岩体的关系[J]. 矿床地质, 1999, 18(1): 22-28.  
Zhu Yongfeng, Feng Kewu, Li Fuming, et al. Geological characteristics of the Shangmingyu gold deposit and its relationship to dahenan granite mass[J]. Mineral Deposits, 1999, 18(1): 22-28(in Chinese with English abstract).
- [2] 周利敏, 张德会. 太行山北段王安镇—大河南岩体岩石地球化学特征及成因与成矿关系探讨[J]. 矿床地质, 2006, 25(增刊): 391-394.  
Zhou Limin, Zhang Dehui. Petrological and geochemical characteristics of the Wanganzhen-Dahenan complex in the northern part of Taihang Mountain with reference to its petrogenesis and mineralization[J]. Mineral Deposits, 2006, 25 (supp.): 391-394(in Chinese).
- [3] 任树祥, 张崇山. 河北省大河南矿集区地质特征及找矿[J]. 前寒武纪研究进展, 2002, 25(3/4): 184-188.  
Ren Shuxiang, Zhang Chongshan. The geological features and prospecting in Dahenan metallogenic gathered-area in Hebei, China[J]. Progress in Precambrian Research, 2002, 25(3/4): 184-188(in Chinese with English abstract).
- [4] 马国玺, 陈志宽, 陈立景, 等. 木吉村铜(钼)矿床地质特征[J]. 矿床地质, 2010, 29(6): 1101-1111.  
Ma Guoxi, Chen Zhikuan, Chen Lijing, et al. Geological characteristics of Mujicun copper (molybdenum) deposit[J]. Mineral Deposits, 2010, 29(6): 1101-1111(in Chinese with English abstract).
- [5] 牛树银, 陈路, 许传诗, 等. 太行山区地壳演化及成矿规律[M]. 北京: 地震出版社, 1994.  
Niu Shuyin, Chen Lu, Xu Chuanshi, et al. The Crustal Evolution and Metallogenic Regularity of the Taihangshan Area[M]. Beijing: Seismological Press, 1994(in Chinese).
- [6] 章百明, 赵国良, 马国玺, 等. 河北省主要成矿区带矿床成矿系列及成矿模式[M]. 北京: 石油工业出版社, 1996.  
Zhang Baiming, Zhao Guoliang, Ma Guoxi, et al. The Main Metallogenic Series and Metallogenic Model of the Mining Area in Hebei Province[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996. (in Chinese).
- [7] 赵葵东, 蒋少涌. 金属矿床的同位素直接定年方法[J]. 地学前缘, 2004, 11(2): 425-434.  
Zhao Kuidong, Jiang Shaoyong. Direct isotope dating for metallic ore deposits [J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11(2): 425-434(in Chinese with English abstract).
- [8] Nakai S, Halliday A N, Kesler S E, et al. Rb-Sr dating of sphalerite and genesis of MVT deposits[J]. Nature, 1990, 346: 354-357.
- [9] 田世洪, 杨竹森, 侯增谦, 等. 玉树地区东莫扎拉和莫海拉亨铅锌矿床 Rb-Sr 和 Sm-Nd 等时线年龄及其地质意义[J]. 矿床地质, 2009, 28(6): 747-758.  
Tian Shihong, Yang Zhusen, Hou Zengqian, et al. Rb-Sr and Sm-Nd isochron ages of Dongmozha and Mohailaheng Pb-Zn ore deposits in Yushu area, southern Qinghai and their geological implications[J]. Mineral Deposits, 2009, 28(6): 747-758(in Chinese with English abstract).
- [10] 郑伟, 陈懋弘, 徐林刚, 等. 广东天堂铜铅锌多金属矿床 Rb-Sr 等时线年龄及其地质意义[J]. 矿床地质, 2013, 32(2): 259-272.  
Zheng Wei, Chen Maohong, Xu Lingang, et al. Rb-Sr isochron age of Tiantang Cu-Pb-Zn polymetallic deposit in Guangdong Province and its geological significance[J]. Mineral Deposits, 2013, 32(2): 259-272(in Chinese with English abstract).
- [11] 杨红梅, 蔡红, 段瑞春, 等. 硫化物 Rb-Sr 同位素定年研究进展[J]. 地球科学进展, 2012, 27(4): 379-385.  
Yang Hongmei, Cai Hong, Duan Ruichun, et al. Progress in Rb-Sr isotopic dating of sulfide[J]. Advances in Earth Science, 2012, 27(4): 379-385(in Chinese with English abstract).
- [12] 李志昌, 路远发, 黄圭成. 放射性同位素地质学方法与进展[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2004.  
Li Zhichang, Lu Yuanfa, Huang Guicheng. Geology Method and Progress of Radioactive Isotope [M]. Wuhan: China University of Geoscience Press, 2004(in Chinese).
- [13] 李志昌, 蔡红, 朱家平. 矿石、沉积岩年龄的直接测定[J]. 地质地球化学, 1994, (1): 47-52.  
Li Zhichang, Cai Hong, Zhu Jiaping. Direct isotope dating for ore and sedimentary rock[J]. Geology-Geochemistry, 1994, (1): 47-52.
- [14] 刘建明, 赵善仁, 沈洁, 等. 成矿流体活动的同位素定年方法评述[J]. 地球物理学进展, 1998, 13 (3): 46-55.  
Liu Jianming, Zhao Shanren, Shen Jie, et al. Review on direct isotopic dating of hydrothermal ore-forming processes[J]. Advances in Geophysics, 1998, 13 (3): 46-55 (in Chinese with English abstract).
- [15] 刘建明, 沈洁, 赵善仁, 等. 金属矿床同位素精确定年的方法和意义[J]. 有色金属矿产与勘查, 1998, 7(2): 107-113.  
Liu Jianming, Shen Jie, Zhao Shanren, et al. Isotopic dating for metallic deposits and its significance[J]. Geological Exploration for Non-ferrous Metals, 1998, 7(2): 107-113(in Chinese with English abstract).

- English abstract).
- [16] 王银喜, 杨杰东, 陶仙聪, 等. 化石、矿物和岩石样品的Sm-Nd同位素实验方法研究及其应用[J]. 南京大学学报(自然科学版)[J]. 1988, 21(2): 297-308.
- Wang Yinxi, Yang Jiedong, Tao Xiancong, et al. A study of the Sm-Nd method for fossil mineral and rock and its applications[J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences Edition), 1988, 24(2):297-308(in Chinese with English abstract)
- [17] 王银喜, 顾连兴, 张遵忠等. 博格达裂谷双峰式火山岩地质年代学与Nd-Sr-Pb同位素地球化学特征[J]. 岩石学报, 2006, 22(5):1215-1224.
- Wang Yinxi, Gu Lianxing, Zhang Zunzhong, et al. Geochronology and Nd-Sr-Pb isotopes of the bimodal volcanic rocks of the Bogda rift[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2006, 22(5): 1215-1224 (in Chinese with English abstract)
- [18] 李随民, 魏明辉, 李森文, 等. 张家口梁家沟铅锌银矿床Rb-Sr和Sm-Nd等时线年龄及其地质意义[J]. 中国地质, 2014, 41(2): 529-539.
- Li Suimin, Wei Minghui, Li Senwen, et al. Rb-Sr and Sm-Nd isochron ages of the Liangjiagou Pb-Zn-Ag ore deposit in Chicheng County of Zhangjiakou City and their geological implications[J]. Geology in China, 2014, 41(2): 529-539(in Chinese with English abstract).
- [19] 李紫焯, 刘晓雨, 李随民, 等. 承德牛圈银金多金属矿床硫化物Rb-Sr年龄和成矿物质来源分析[J]. 中国地质, 2014, 41(3): 951-960.
- Li Ziyue, Liu Xiaoyu, Li Suimin, et al. An analysis of geological age and materials source of the Niujuan Ag-Au polymetallic deposit in Chengde[J]. Geology in China, 2014, 41(3): 951-960 (in Chinese with English abstract).
- [20] 曹亮, 段其发, 周云. 湖北凹子岗锌矿床Rb-Sr同位素测年及其地质意义[J]. 中国地质, 2015, 42(1): 235-247.
- Cao Liang, Duan Qifa, Zhou Yun. Rb-Sr dating of sphalerites from the Aozigang zinc deposit in Hubei Province and its geological significance[J]. Geology in China, 2015, 42(1): 235-247(in Chinese with English abstract).
- [21] 王霞. 太行山北段中生代岩浆作用与成矿[D]. 中国地质大学(北京)硕士学位论文, 2012
- Wang Xia. Mesozoic Magmatism and Related Metallogenesis in Northern Taihang Mountain[D]. China University of Geosciences for Master Degree, 2012(in Chinese with English abstract).
- [22] 毛景文, 谢桂青, 张作衡, 等. 中国北方中生代大规模成矿作用的期次及其地球动力学背景[J]. 岩石学报, 2005, 21(1):169-188.
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Zhang Zuoheng, et al. Mesozoic large scale metallogenic pulses in North China and corresponding geodynamic settings[J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21(1): 169-188(in Chinese with English abstract).
- [23] Hedenquist J W, Lowenstren J B. The role of magma in the formation of hydrothermal ore deposits[J]. Nature, 1994, 370:519-527.
- [24] Hedenquist J W, Arribas Jr A. Evolution of an Intrusion Centered Hydrothermal System: Far Southeast-Lepanto Porphyry and Epithermal Cu-Au Deposits, Philippines[J]. Econ. Geol., 1998, 93: 373-403.
- [25] Sillitoe R H. Characteristics and controls of the largest porphyry copper-gold and epithermal gold deposits in the circum-Pacific region: Australian Journal of Earth Sciences, 1997, 44: 373-388.
- [26] 邓军, 高帮飞, 王庆飞, 等. 成矿流体系统的形成与演化[J]. 地质科技情报, 2005, 24(1):49-54.
- Deng Jun, Gao Bangfei, Wang Qingfei, et al. Formation and evolution of ore-forming fluid system [J]. Geological Science and Technology Information, 2005, 24(1):49-54 (in Chinese with English abstract).