https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.547



# 石榴石 U-Pb 定年对山西义兴寨金矿床角砾 岩筒时间的限制和金矿成因的指示

张立中<sup>1,4</sup>,陈 蕾<sup>2</sup>,王国平<sup>1</sup>,邓晓东<sup>3</sup>,李建威<sup>3,4</sup>

1. 紫金矿业集团股份有限公司矿产地质勘查院,福建厦门 361006

2. 中国地质科学院矿产资源研究所自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室,北京 100037

3. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室,湖北武汉 430074

4. 中国地质大学资源学院,湖北武汉 430074

摘 要:山西义兴寨金矿床是五台山一恒山金矿集区内最为典型的金矿床,也是山西省最大的金矿床.矿区产出有4个角砾 岩筒,与金矿的形成具有紧密的联系.然而,有关该矿床角砾岩筒的形成时间和机制的研究十分欠缺,角砾岩筒与金矿化的关 系仍不清楚.通过对角砾岩筒内的砂卡岩角砾中的石榴石和切割角砾岩的石英斑岩中的锆石开展了LA-ICPMS原位U-Pb同 位素分析,结果表明角砾岩和石英斑岩的形成时间分别为140±2 Ma和141±1 Ma,从而精确限制了角砾岩筒的形成时间.以 上研究表明,义兴寨矿区4个角砾岩筒的形成时间与石英斑岩侵位时代和金矿形成时间完全一致,表明角砾岩筒是岩浆分异 的气液流体导致围岩发生隐爆而形成,而金矿化也可能与岩浆释放的热液流体直接相关.

关键词:石榴石U-Pb定年;角砾岩筒;隐爆;义兴寨金矿;岩石学.

**中图分类号:** P611 文章编号: 1000-2383(2020)01-108-10

## **收稿日期:**2018-10-15

## Garnet U-Pb Dating Constraints on the Timing of Breccia Pipes Formation and Genesis of Gold Mineralization in Yixingzhai Gold Deposit, Shanxi Province

Zhang Lizhong<sup>1,4</sup>, Chen Lei<sup>2</sup>, Wang Guoping<sup>1</sup>, Deng Xiaodong<sup>3</sup>, Li Jianwei<sup>3,4</sup>

1. Mineral Exploration Institute, Zijin Mining Group Co., Xiamen 361006, China

- $2.\ MNR\ Key\ Laboratory\ of\ Metallogeny\ and\ Mineral\ Assessment\ ,\ Institute\ of\ Mineral\ Resource\ ,$
- Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China
- 3. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
- 4. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

**Abstract:** Yixingzhai gold deposit, located in Wutaishan-Hengshan gold district, is the most important and largest gold deposit in Shanxi Province. Spatial distribution of the four breccia pipes shows the well relation with gold mineralization in Yixingzhai deposit. However, robust constraints on the timing of the breccia pipes formation in this deposit are lacking. The relationship between the gold mineralization and breccia formation is also ambiguous. In this paper, systematic U-Pb dating of garnet crystals from skarn breccia and zircon grains from the quartz porphyry were carried out by using laser ablation-inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICPMS). The garnet grains yielded the <sup>207</sup>Pb-corrected weighted mean <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U dates of  $140\pm 2$  Ma,

基金项目:国家重点研发计划项目(No. 2016YFC0600104);国家自然科学基金项目(No. 41325007).

作者简介:张立中(1985-),男,工程师,主要从事矿产普查与勘探. ORCID: 0000-0002-1081-4206. E-mail: 71090364@qq.com

**引用格式:**张立中,陈蕾,王国平,等,2020.石榴石U-Pb定年对山西义兴寨金矿床角砾岩筒时间的限制和金矿成因的指示.地球科学,45(1): 108-117.

which is remarkably consistent with U - Pb age of zircon grains  $(141\pm1 \text{ Ma})$  from the quartz porphyry in this deposit. This demonstrates that the formation of breccia pipes was genetically related to the coeval magmatism. Therefore, we proposed that gas and hydrothermal fluid released from magma increase the fluid pressure, causing the formation of breccia pipes by cryptoexplosion of the wall rocks. The age of the breccia pipes is also consistent with the formation time of gold mineralization, suggesting that the hydrothermal gold mineralization may link with the fluids released from magma.

Key words: garnet U-Pb dating; breccia pipes; cryptoexplosion; Yixingzhai gold deposit; petrology.

## 0 引言

石榴石是一种较为常见的造岩矿物,广泛分布 于变质岩(麻粒岩、榴辉岩等)、侵入岩(花岗岩、伟 晶岩、正长岩、煌斑岩等)及火山岩中(Mezger et al., 1989; Barrie, 1990; Chen et al., 2016). 石榴石 通常含有一定量的铀,且具有低的普通Pb含量和高 的封闭温度(>850°C; Mezger et al., 1989),因此 对石榴石的U-Pb同位素分析有可能精确限定变质 和岩浆活动的时间(Barrie, 1990; Burton and O'Nions, 1991). Mezger et al.(1989)首次运用热电 离质谱(TIMS)对麻粒岩中的石榴石进行了U-Pb 同位素测定,获得了精确可靠的年龄,表明石榴石 U-Pb年代学可以广泛应用于变质年代学的研究. 随后,石榴石U-Pb年代学被应用于区域变质年龄 的精确限定(Burton and O'Nions, 1991, 1992; Vance and Holland, 1993; Burton et al., 1995; Jung and Mezger, 2003). 另外, Barrie(1990)对加拿 大安大略省煌斑岩中的石榴石开展了 U-Pb 同位 素分析,结果表明石榴石U-Pb年代学可以精确地 限定煌斑岩的形成时代.尽管如此,前人认为石 榴石U-Pb定年的方法可能存在重要的缺陷,主要 是石榴石中的U含量非常低(<1×10<sup>-6</sup>),且U主 要赋存于包裹的富U矿物相(锆石、独居石等)中, 导致该方法后来并未被广泛地应用(Dewolf et al., 1996; Vance et al., 1998; Lima et al., 2012; Baxter and Scherer, 2013).

钙榴石(grandite)是热液矿床中最为常见的矿物之一,主要以钙铝榴石(Ca<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>Si<sub>3</sub>O<sub>12</sub>)一钙铁榴石(Ca<sub>3</sub>Fe<sub>2</sub>Si<sub>3</sub>O<sub>12</sub>)的固溶体形式产出,其化学成分变化常用来指示热液流体的物理化学条件演化(赵斌等,1982; Jamtveit and Hervig, 1994; Meinert *et al.*, 2005; Ding *et al.*, 2016). 钙榴石中大量的Fe<sup>3+</sup>占据其八面体位置有利于U<sup>4+</sup>进入十二面体位置,导致富铁钙榴石中U含量可高达2700×10<sup>-6</sup> (Kwak and Abeysinghe, 1987; Smith *et al.*,

2004; Deng et al., 2017). 另外, Dewolf et al. (1996)对钙榴石裂变径迹的分析显示U十分均 匀地分布于该类型石榴石中,表明U主要赋存于 钙榴石的晶格中.最近, Deng et al. (2017)和 Seman et al. (2017)对砂卡岩和碱性岩中的钙榴 石开展了LA-ICPMS 原位U-Pb 同位素分析,实 现了对钙榴石形成时间的精确限定.

义兴寨金矿床是五台山一恒山金矿集区内最 为典型的金矿床.据不完全统计,该矿床开采的 金已超过50t,是山西省内最大的金矿床.义兴寨 金矿区构造和岩浆活动十分强烈,与之伴随有4 个角砾岩筒和十余条金矿脉产出.角砾岩筒内的 断裂控制了金矿脉的分布,辉钼矿 Re-Os 年龄结 果表明以上金矿脉的形成时间为141±4 Ma (Zhang et al., 2017).然而,一直以来缺乏对角砾 岩筒形成时间的限定,进而导致角砾岩筒和金矿 化之间的成因关系不明.本文选取义兴寨金矿区 的铁塘硐角砾岩筒为研究对象,通过对砂卡岩角 砾中的石榴石和切割角砾岩的石英斑岩中的锆石 进行了U-Pb同位素定年,以此限定了角砾岩筒的 形成时间,在此基础上探讨该矿区角砾岩筒的形 成机制及其与金矿化的成因联系.

## 1 地质背景

义兴寨金矿床位于山西省繁峙县砂河镇义兴 寨村,大地构造位置属于华北克拉通大兴安岭-太 行山重力梯度中部(图1),山西断隆-五台隆起西 北侧.矿区主要出露一套太古宙五台群、石咀群和 庄旺群变质岩,岩性为变闪长岩体、斜长片麻岩、变 基性岩和变粒岩.区内出露的岩浆岩主要为酸性次 火山岩和孙庄闪长杂岩体,岩体的分布主要受北东 东向基底断裂和北北西向断裂的控制(Shao et al., 2008).孙庄闪长杂岩体主要位于矿区南部,由辉石 闪长岩、石英二长闪长岩和花岗岩组成,其锆石 U-Pb年龄为134±1 Ma(Li et al., 2014).酸性次火山 岩主要分布在河湾、铁塘硐、南门山和金鸡岭,主要 为石英斑岩和霏细岩,其侵位时间为142±2 Ma (Zhang et al., 2015).另外,矿区内脉岩也极为发 育,主要有辉绿岩脉、闪长玢岩脉、闪斜煌斑岩脉 等.这些岩脉通常切割金矿脉或被金矿脉切割(图 1),表明它们和金矿化近于同时形成.

义兴寨矿床的金矿体主要受近南北向和北西 向两组断裂的控制(图1),呈脉状、透镜状、板状产 出.其中近南北向金矿体间距约200m,规模较大, 分布连续,多为近直立产出,为矿区最为重要的金 矿体;北西向金矿体的间距大概在320~370m左 右,其发育规模及连续性较近南北向金矿体差, 倾角为70°~85°.金矿相关的围岩蚀变类型主要 有硅化、绢云母化、黄铁矿化、碳酸岩化(山西省 地质矿产局,1985,山西繁峙县义兴寨金矿床成 矿地质条件及成矿规律的研究).矿石类型主要 为金银多金属矿石,金平均品位为11.5g/t,银平 均品位为95.13g/t,铜铅锌分别为0.37%、 0.32%、22%(贾永山和戈全厚,1994).矿石主要 金属矿物有银金矿、自然金、角银矿、含银方铅 矿、黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿等.

义兴寨金矿区分布有4个角砾岩筒:从北西向 南东依次为河湾、南门山、铁塘硐、金鸡岭(图1).以 上4个角砾岩筒的产出控制了矿区南部金矿脉和酸 性侵入岩的分布,与金矿的形成具有紧密的联系. 基于角砾和胶结物特征,该矿床内的角砾岩筒可分 为两种类型(Shao et al., 2008):一种是河湾和南门 山角砾岩筒,其角砾和胶结物以燕山期超浅层相石 英斑岩为主,规模不大,产于岩筒的边部和顶部;另 一类是铁塘硐和金鸡岭角砾岩筒,其角砾主要为砂 卡岩和残留灰岩, 而胶结物以蚀变岩屑为主. 4个角 砾岩筒中以铁塘硐角砾岩筒最为典型,主要出露于 矿区东北部,位于太古代片麻岩中,其边界主要受 控于 NE 和 NNW 向断裂, 平面似菱形(图1), 面积 约0.05 km<sup>2</sup>. 角砾岩筒内的酸性岩脉和煌斑岩脉切 割早期角砾,表明是晚阶段岩浆活动的产物(图 2a). 酸性岩脉主要是石英斑岩, 产状直立, 石英斑



据山西省地质矿产局,1985.山西繁峙县义兴寨金矿床成矿地质条件及成矿规律的研究



图2 铁塘硐直立的石英斑岩切割砂卡岩角砾(a);石英斑岩脉中包裹砂卡岩角砾(b);2号含金石英脉矿体切割铁塘硐中角砾 岩(c);黑色自形的石榴石赋存于砂卡岩角砾中(d)

Fig.2 Photographs showing the quartz porphyries cut through (a) and contain skarn breccias (b) at the Tietangdong; No. 2 goldbearing quartz vein cut through the breccias (c); black and idiomorphic garnet in skarn breccia (d)

岩的边缘包裹或胶结少量的砂卡岩角砾(图 2b). 矿区的含金石英脉矿体切割角砾岩,表明金矿脉 的形成略晚于角砾岩筒的形成(图 2c).铁塘硐角 砾岩筒中的角砾成分十分复杂,主要为角砾状砂 卡岩(矿物组成为透辉石、石榴石、方柱石、透闪 石一阳起石、斜长石、绿帘石、绿泥石、方解石、微 量符山石等;图 2b~2d).另外还有少量其他角砾, 包括磁铁矿一赤铁矿化的砂卡岩、斜长片麻岩、变 基性岩、变粒岩、硅质岩、灰岩、泥页岩等角砾.角 砾的直径从几毫米至 100余厘米不等,形态不规 则,但边界不清.胶结物主要为岩屑胶结,并具有 强烈的热液蚀变交代特征.

## 2 样品和分析方法

对角砾岩筒中砂卡岩角砾和石英斑岩的定年 不仅可以精确限定角砾岩筒的形成时间,而且可以 为角砾岩筒、岩浆岩和金矿之间的联系提供重要信 息.本次研究的样品采于矿区铁塘硐角砾岩筒内 (图1).样品TTD11为砂卡岩角砾,其中石榴石角 砾被绿帘石砂卡岩胶结.石榴石呈黑色,粒径在 0.2~1.0 cm(图2d).样品TTD19采自切割角砾岩 的石英斑岩,灰白色,斑状结构,斑晶为斜长石 (5%~10%,体积含量,后同)和石英(5%~15%), 基质主要为隐晶质的石英和长石.首先对TTD11 和 TTD19样品进行粉碎,经浮选和磁选后在双目 镜下挑选清晰、自形、无裂隙的锆石和石榴石颗粒. TTD11选取了4颗直径在3~10 mm的石榴石, TTD19选取了约100颗锆石,然后粘在环氧树脂上 面打磨抛光.所有样品均在透射光和反射光下先观 察、拍照,然后样品喷碳用Quanta 200环境扫描电 镜(ESEM)和JXA-8230电子探针(EPMA)分别进 行BSE、CL和主量元素分析.

石榴石微量元素和U-Pb同位素分析在中国地 质科学院矿产资源研究所自然资源部成矿作用与 资源评价重点实验室利用飞秒激光剥蚀系统高分 辨电感耦合等离子体质谱仪(fs-LA-HR-ICP-MS) 分析完成. 飞秒激光剥蚀系统为 Applied Spectra 公 司的J200,由激光器、飞秒激光光学传输系统、观察 系统和剥蚀池等组成.激光输出波长为343 nm,激 光脉冲宽度为小于480 fs. 分析石榴石的激光能量 设定为50%, 束斑为60 µm, 频率为8 Hz. 电感耦合 等离子质谱仪为 Thermo Element XR. 飞秒激光剥 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.每个点测试的时间包括大约15~20s的空白信 号和 50 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 ICPMSDataCal(Liu et al., 2010)完成. 本文采用锆石标准 91500 作为外标对石榴石同位 素进行分馏校正.Deng et al.(2017)采用锆石作 为外标分析石榴石同位素比值,结果表明两个矿 物的 U-Th-Pb 同位素分馏不存在基体不匹配效 应.微量元素含量处理采用玻璃标准物质 NIST 610 作外标进行同位素和微量元素分馏校正.每 分析 5 个样品点就分析 2次 91500 和 NIST 610 标 样.锆石标准 91500 的 U-Th-Pb 同位素比值推荐 值据 Wiedenbeck et al.(1995).

锆石的U-Pb同位素分析在武汉上谱分析科技 有限公司利用LA-ICP-MS完成. 仪器的详细参数 和分析流程见Zong et al. (2017). GeolasPro 激光剥 蚀系统由 COMPexPro 102 ArF 193 nm 准分子激光 器和 MicroLas 光学系统组成, ICP-MS 型号为 Agilent 7700e. 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,激光剥蚀系统配置有信号平滑 装置(Hu et al., 2015). 本次分析的激光束斑和频率 分别为32 μm 和 6 Hz. U-Pb 同位素定年和微量元素 含量处理中采用锆石标准 91500 和玻璃标准物质 NIST610作外标分别进行同位素和微量元素分馏 校正.每个点测试的时间包括大约20~30s空白信 号和 50 s 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-Pb同位素比值和年龄计算)采用软 件 ICPMSDataCal (Liu et al., 2008, 2010)完成. 所 有样品的U-Pb年龄谐和图绘制和年龄加权平均计 算采用 Isoplot/Ex\_ver3 (Ludwig, 2003) 完成.

#### 3 结果

#### 3.1 石榴石矿物学特征

铁塘硐砂卡岩角砾中的石榴石呈深黑色,五角 十二面体(图 2d),背散射(BSE)图像显示石榴石具 有较为均匀的结构(图 3a).石榴石中包裹的主要矿 物有透辉石、方解石、赤铁矿、黄铁矿等(图 3a).电 子探针分析结果表明石榴石主要为钙铁榴石和少 量的钙铝榴石,成分为Ad<sub>99.90</sub>Gs<sub>0.00</sub>~Ad<sub>99.12</sub>Gs<sub>0.45</sub>(图 3b),另外含少量的锰铝榴石、铁铝石榴石、镁铝石 榴石端元成分(附表1).石榴石中含有丰富的流体 包裹体,其大小为4~25 μm,呈椭圆形或不规则状. 流体包裹体主要为富液两相包裹体,通常具有小一 中等大小的气泡(图 3c),部分流体包裹体含 NaCl 子晶(图 3d).

#### 3.2 微量元素分析结果

石榴石的LA-ICPMS微量元素分析数据列于 附表2.铁塘硐砂卡岩角砾中石榴石的稀土含量为 17.4×10<sup>-6</sup>~85.4×10<sup>-6</sup>,球粒陨石标准化配分模式 主要表现为轻稀土富集、重稀土亏损,LREE/ HREE比值为29~1400,具明显的Eu正异常(Eu\*/ Eu=2.7~25.7)(图4a).角砾中石榴石具有较高的 U含量(7.10×10<sup>-6</sup>~34.60×10<sup>-6</sup>),与变质和岩浆 成因石榴石的U含量(通常<1×10<sup>-6</sup>)具有显著的 差别.石榴石中U和REE含量具有很好的正相关 性(图4b),表明这些元素在石榴石中具有相似的替 代机制.激光剥蚀的U元素信号十分平坦,说明U 均匀地分布于石榴石中(图4c).



图 3 BSE 图像显示角砾岩中石榴石结构较为均匀,且包裹有透辉石(Di)和赤铁矿(Hem)(a);石榴石中钙铁榴石(Ad)和钙铝 榴石(Gs)成分相关性(b);石榴石中气液两相流体包裹体(c);石榴石中含 NaCl子晶的流体包裹体(d)

Fig.3 BSE image showing the homogenous garnet includes diopside (Di) and hematite (Hem) (a); the diagram of the correlation between andradite (Ad) and grossular (Gs) (b); microphotographs showing garnet includes vapor-liquid (c) and vapor-liquid-salt fluid (d) inclusions





Fig.4 Chondrite-normalized REE patterns of garnet (a); the diagram of the correlation between uranium and total REE contents (b); representative time-resolved signals by depth profile analysis (c) of garnets from the Yixingzhai deposit

#### 3.3 U-Pb同位素分析结果

石榴石和锆石的 U-Pb 同位素及 Th 和 U含量分析结果列于附表 3.本次研究对 TTD11 样品中4颗石榴石分析了 14个点,石榴石中U含量为7.99×10<sup>-6</sup>~60.10×10<sup>-6</sup>.U-Pb 同位素分析结果在 Tera-Wasserburg U-Pb 谐和图上显示所有分析点含有不同程度的普通 Pb,其下交点年龄为139±4 Ma(图 5a).另外,通过采用矿区硫化物的Pb 同位素组成(Li *et al.*, 2014)对石榴石的普通Pb 进行校正,获得<sup>207</sup>Pb 校正的<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 的加权

平均年龄为140±2 Ma(MSWD=0.4;图 5b),与 下交点年龄在误差范围内一致.

石英斑岩样品 TTD19中锆石大小在 50~150  $\mu$ m,CL图片显示其具有很好的岩浆振荡环带(图 5c). 锆石的U、Th含量分别为173×10<sup>-6</sup>~2018× 10<sup>-6</sup>和207×10<sup>-6</sup>~2984×10<sup>-6</sup>,相应的Th/U比值 为0.3~2.9.本次研究分析了30颗锆石,所有点给出 了谐和或近似谐和的<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U和<sup>207</sup>Pb/<sup>235</sup>U年龄 (图 5c),其中1颗锆石的<sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb年龄为 1781 Ma,显然为继承锆石;另外两个点年龄较为年 轻,可能存在Pb的丢失,因此没有计入加权平均;剩 余 27个点的<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U年龄加权平均值为141± 1 Ma(MSWD=0.4;图5d).

## 4 讨论

#### 4.1 石榴石的成因

砂卡岩角砾中石榴石主要包裹有透辉石、方 解石、赤铁矿、黄铁矿等热液蚀变矿物(图 3a),表 明这些石榴石为热液成因,即为接触交代作用的 产物.石榴石中包裹有大量的流体包裹体,且含 有 NaCl 子晶(图 3c、3d),表明其形成于高盐度的 热液流体.石榴石的稀土元素球粒陨石标准化配 分曲线显示 LREE 富集、HREE 亏损,具明显的 Eu 正异常(图4a). 这种稀土配分模式表明这些石榴 石是在外部高温一高盐度岩浆流体的注入时快速 生长形成,即形成于高水/岩比的环境.这种情况 下稀土元素进入石榴石主要受控于表面吸附机 制,导致石榴石的稀土元素的进入主要受控于流 体成分,这也与热液流体中常具有较高的LREE 含量一致 (Jamtveit and Hervig, 1994; Smith et al., 2004; Gaspar et al., 2008; Park et al., 2017), 因此,石榴石具有LREE 富集和HREE 亏损的特 征. 石榴石具有明显的 Eu 正异常, 主要是由于热 液流体与岩浆岩中长石强烈的反应导致其富 Eu (Smith et al., 2004),这也与石英斑岩中的长石大 量被蚀变为绢云母和碳酸盐矿物一致.

镁铝榴石、铁铝榴石、锰铝榴石等 U-Pb 同位素 定年的局限性主要表现为这些石榴石中的 U含量 极低(<1×10<sup>-6</sup>;Lima et al., 2012),导致石榴石中 U主要来源于其包裹的富 U矿物(Baxter and Scherer, 2013),因此,长期以来该方法并未得到广泛的 应用.然而,Dewolf et al.(1996)对不同类型石榴石 裂变径迹和微量元素的分析表明 U 仅在钙榴石中



图 5 砂卡岩角砾中钙榴石 U-Pb 谐和图(a)和<sup>207</sup>Pb 校正的<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 加权平均年龄图(b);石英斑岩中锆石 U-Pb 谐和图(c) 和<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 加权平均年龄图(d)

Fig.5 Concordia plots and weighted average <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U plots of the garnets from the skarn breccia (a, b) and zircon grains from the quartz porphyry (c, d)

分布十分均匀,表明U主要赋存于该类型石榴石的 晶格中.本次研究通过详细的扫描电镜观察,发现 角砾中钙榴石并没有任何富U的矿物包裹体(图 3a),说明钙榴石中U可能赋存于其晶格中.LA-ICPMS分析信号也显示U的信号非常平稳,表明U 均匀分布于钙榴石中(图4c).石榴石中U的含量与 稀土元素含量具有很好的正相关性(图4b),表明钙 榴石中的U含量主要受控于热液流体,即矿物在快 速生长过程中稀土和U等元素受强烈的表面吸附 作用(Jamtveit and Hervig, 1994; Smith et al., 2004). 另外,U和稀土的正相关性也进一步说明钙 榴石中U的替代机制和稀土元素在石榴石中的替 代机制类似,即为[U<sup>4+</sup>]<sub>W</sub>+2[Fe<sup>3+</sup>,Al<sup>3+</sup>]<sub>W</sub>- $[Ca^{2+}]_{\mathbb{N}}$  +2 $[Si^{4+}]_{\mathbb{N}}$ 的双替代机制(Gaspar *et al.*, 2008; Deng et al., 2017),进一步证实了钙榴石中U 主要赋存于矿物晶格中.

#### 4.2 角砾岩的形成时间和成因机制

关于义兴寨矿区4个角砾岩筒的成因和机制问

题,目前人们普遍认为与矿区岩浆侵入和隐爆作用 相关(刘连登等,1999;Shao et al., 2008). 然而,对 于矿区内两种类型的角砾岩筒的形成时间和机制 还存在较大的争议. 部分学者认为两种角砾岩筒的 形成时间和机制有显著的差别(Shao et al., 2008). 其中河湾和南门山角砾岩筒的形成与酸性次火山 岩(石英斑岩)的侵位直接相关,是岩浆运移至近地 表释放的气液流体在顶部和围岩部位产生过压导 致破碎和被岩浆胶结而形成,因此河湾和南门山角 砾岩筒的形成时间应当与石英斑岩的侵位时间一 致,即该类型角砾岩筒的形成时间为142±2 Ma (Zhang et al., 2015). 然而,铁塘硐和金鸡岭角砾岩 筒的形成则被认为是岩浆房释放的含金热液流体 沿断裂运移至浅部后发生引爆,进而导致围岩角砾 化和强烈地蚀变,其形成与矿区内金矿化的时间一 致. 叶荣等(1999)对含金石英脉流体包裹体进行 了<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar定年研究,认为金矿脉形成时间可能为 131±3 Ma,因而认为铁塘硐和金鸡岭角砾岩筒的

形成时间晚于河湾和南门山(Shao et al., 2008). 相反,部分学者则认为义兴寨矿区内角砾岩筒和 石英斑岩在空间分布上十分吻合,因而4个角砾 岩筒的形成应具有同时性(山西省地质矿产局, 1985.山西繁峙县义兴寨金矿床成矿地质条件及 成矿规律的研究).本文通过对铁塘硐砂卡岩角砾 中钙榴石的U-Pb定年,表明角砾的形成时间上限 为140±2 Ma(图5a、5b);进一步对切割角砾岩筒 的石英斑岩中锆石的U-Pb同位素分析则限定了 角砾岩筒形成时间的下限为141±1 Ma(图5c、 5d).以上研究结果表明,铁塘硐角砾岩筒的形成 时间可以被精确限定在140 Ma左右.因此,义兴 寨矿区4个角砾岩筒的形成具有同时性,且与石 英斑岩的侵位有直接的成因联系.

尽管矿区内角砾岩筒和金矿脉的分布在空间 上具有紧密联系,但两者之间在成因上是否有联系 仍不清楚.本次研究获得的角砾岩筒形成时间 (140 Ma左右)显著大于金矿脉中石英流体包裹体 的<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar年龄131±3 Ma(叶荣等,1999). 然而, 叶荣等(1999)也对另一含金石英脉样品开展 了  ${}^{40}$ Ar  ${}^{-39}$ Ar 定年,但获得的年龄结果为 151  $\pm 2$  Ma. 显然,该年龄与地质事实不相吻合,即金矿脉常切 割石英斑岩和角砾岩筒(图2c).那么造成含金石 英脉年龄不确定性的原因可能是由于含金石英脉 中流体包裹体的Ar同位素并非均源于流体包裹体 中K的衰变,其中一些包裹体的Ar可能部分来源 于古老的变质岩,因而导致所获样品年龄结果偏老 (151±2 Ma);而石英中部分流体包裹体可能为形 成后的次生包裹体,因此获得了相对年轻的结果 (131±3 Ma). 最近, Zhang et al. (2017) 通过对河湾 角砾岩筒中与金矿化相关的辉钼矿进行了 Re-Os 同位素定年,结果表明金矿化的时间为141± 4 Ma. 该年龄与角砾岩筒形成时间在误差范围内 完全一致,表明义兴寨金矿床中角砾岩筒、金矿脉、 石英斑岩均近乎同时形成.前人对硫化物的硫同 位素和石英流体包裹体氢氧同位素等分析表明成 矿热液流体来源为岩浆热液流体(Li et al., 2014). 因此,义兴寨金矿脉的形成可能与斑岩侵位分异出 的热液成矿流体具有直接的成因联系.

矿区内4个角砾岩筒的分布受构造控制的特征 明显,主要发育在NNW向断裂和NEE向基底断裂 交叉部位.岩浆侵位至浅部后,其顶部和周围聚集 了大量气液组分,然后由于过压发生隐爆作用成岩 (宋保昌等,2002). 另外,造成这两种类型角砾岩筒 差异的原因可能是岩浆侵位深度不同造成的.河 湾和南门山岩浆角砾岩筒地表盖层相对较薄,燕 山期酸性岩浆侵位到浅部或者与围岩接触易于迅 速冷凝,内部岩浆即被屏蔽,大量的高温气液挥发 物等逐渐聚集后必然导致内压剧增,进而引起岩 浆岩和围岩破碎形成角砾, 而铁塘硐和金鸡岭岩 浆岩覆盖相对较厚,深部岩浆侵位分异出的岩浆 气液流体沿断裂向上运移,在近地表大量的地下 水循环加入和气化必然导致内压剧增,导致上覆 岩层的破碎和陷落,伴随环状构造的形成,这些气 液也同围岩发生强烈的交代蚀变,进而形成矽卡 岩化蚀变角砾岩.铁塘硐和金鸡岭矽卡岩角砾岩 筒的形成是深部岩浆流体大量汇聚所致,因此在 其内部及周边断裂发育地段是有利于矿质沉淀的 最佳场所,是未来找矿的重点靶区,

## 5 结论

(1)角砾岩中钙榴石的U以双替代机制的形式主要赋存于矿物晶格中,因此石榴石的U-Pb年龄可以精确限定其形成时间.铁塘硐砂卡岩角砾中钙榴石U-Pb定年结果表明,角砾岩筒的形成时间上限为140±2 Ma;而切割角砾岩的石英斑岩的侵位年龄限定了角砾岩筒形成时间的下限为141±1 Ma.因此,铁塘硐角砾岩筒的形成时间被精确限定在140 Ma左右.

(2)角砾岩筒的形成与斑岩的侵位有着直接的 成因联系,是岩浆侵位到浅部后分异的气液流体导 致围岩发生隐爆而形成.

(3)义兴寨矿区4个角砾岩筒的形成时间与石 英斑岩和金矿化的时间在误差范围内完全一致,表 明该矿床金矿的形成也与斑岩侵位分异出的热液 成矿流体具有直接的成因联系.

致谢:本文在LA-ICPMS和电子探针分析得到 了中国地质大学(武汉)罗涛和王军鹏老师的帮助, 野外工作的开展得到了山西紫金矿业有限公司尹 记文和刘军,中国地质大学(武汉)靳晓野和王宏强 等人的大力协助,另外两位审稿人对本文修改提出 了宝贵的意见,在此表示感谢!

附表见本刊官网(http://www.earth-science.net).

#### References

Barrie, C. T., 1990. U-Pb Garnet and Titanite Age for the

Bristol Township Lamprophyre Suite, Western Abitibi Subprovince, Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 27(11): 1451-1456. https://doi.org/10.1139/e90-153

- Baxter, E. F., Scherer, E. E., 2013. Garnet Geochronology: Timekeeper of Tectonometamorphic Processes. *Elements*, 9(6): 433-438. https://doi.org/10.2113/gselements.9.6.433
- Burton, K. W., O'Nions, R. K., 1991. High-Resolution Garnet Chronometry and the Rates of Metamorphic Processes. *Earth and Planetary Science Letters*, 107(3-4): 649-671. https://doi.org/10.1016/0012-821x(91)90109-u
- Burton, K. W., Kohn, M. J., Cohen, A. S., et al., 1995. The Relative Diffusion of Pb, Nd, Sr and O in Garnet. *Earth* and Planetary Science Letters, 133(1-2): 199-211. https://doi.org/10.1016/0012-821x(95)00067-m
- Burton, K. W., O' Nions, R. K., 1992. The Timing of Mineral Growth across a Regional Metamorphic Sequence. *Nature*, 357(6375): 235-238. https://doi.org/ 10.1038/357235a0
- Chen, W., Zhang, W. Q., Simonetti, A., et al., 2016. Mineral Chemistry of Melanite from Calcitic Ijolite, the Oka Carbonatite Complex, Canada: Implications for Multi-Pulse Magma Mixing. *Journal of Earth Science*, 27(4): 599-610. https://doi.org/10.1007/s12583-016-0715-3
- Deng, X. D., Li, J. W., Luo, T., et al., 2017. Dating Magmatic and Hydrothermal Processes Using Andradite -Rich Garnet U - Pb Geochronometry. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 172(9): 71. https://doi.org/ 10.1007/s00410-017-1389-2
- Dewolf, C. P., Zeissler, C. J., Halliday, A. N., et al., 1996.
  The Role of Inclusions in U-Pb and Sm-Nd Garnet Geochronology: Stepwise Dissolution Experiments and Trace Uranium Mapping by Fission Track Analysis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(1): 121-134. https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00367-3
- Ding, Q. F., Yan, W., Zhang, B. L., 2016. Sulfur- and Lead-Isotope Geochemistry of the Balugou Cu-Pb-Zn Skarn Deposit in the Wulonggou Area in the Eastern Kunlun Orogen, NW China. Journal of Earth Science, 27(5): 740-750. https://doi.org/10.1007/s12583-015-0574-3
- Gaspar, M., Knaack, C., Meinert, L. D., et al., 2008. REE in Skarn Systems: A LA-ICP-MS Study of Garnets from the Crown Jewel Gold Deposit. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(1): 185-205. https://doi. org/ 10.1016/j.gca.2007.09.033
- Hu,Z. C., Zhang, W., Liu, Y. S., et al., 2015. "Wave" Signal-Smoothing and Mercury-Removing Device for Laser Ablation Quadrupole and Multiple Collector ICPMS

Analysis: Application to Lead Isotope Analysis. *Analytical Chemistry*, 87(2): 1152–1157. https://doi.org/10.1021/ac503749k

- Jamtveit, B., Hervig, R. L., 1994. Constraints on Transport and Kinetics in Hydrothermal Systems from Zoned Garnet Crystals. *Science*, 263(5146): 505-508. https://doi. org/10.1126/science.263.5146.505
- Jia, Y. S., Ge, Q. H., 1994. Geological Characteristics and Genesis of Yixingzhai Gold Deposit, Shanxi Province. *Gold*, 15(10): 13-16 (in Chinese).
- Jung, S., Mezger, K., 2003. U-Pb Garnet Chronometry in High-Grade Rocks—Case Studies from the Central Damara Orogen (Namibia) and Implications for the Interpretation of Sm-Nd Garnet Ages and the Role of High U - Th Inclusions. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 146(3): 382— 396. https://doi.org/10.1007/s00410-003-0506-6
- Kwak, T. A. P., Abeysinghe, P. B., 1987. Rare Earth and Uranium Minerals Present as Daughter Crystals in Fluid Inclusions, Mary Kathleen U-REE Skarn, Queensland, Australia. *Mineralogical Magazine*, 51(363): 665-670. https://doi.org/10.1180/minmag.1987.051.363.05
- Li, S. R., Santosh, M., Zhang, H. F., et al., 2014. Metallogeny in Response to Lithospheric Thinning and Craton Destruction: Geochemistry and U-Pb Zircon Chronology of the Yixingzhai Gold Deposit, Central North China Craton. Ore Geology Reviews, 56: 457-471. https:// doi.org/10.1016/j.oregeorev.2012.10.008
- Lima, S. M., Corfu, F., Neiva, A. M. R., et al., 2012. U-Pb ID-TIMS Dating Applied to U-Rich Inclusions in Garnet. American Mineralogist, 97(5-6): 800-806. https://doi.org/10.2138/am.2012.3930
- Liu, L. D., Li, Y., Lan, X., 1999. A Discussion on Breccia/ Stockwork-Porphyry Type Gold Deposits. *Mineral Deposits*, 18(1):29-36 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. S., Gao, S., Hu, Z. C., et al., 2010. Continental and Oceanic Crust Recycling-Induced Melt-Peridotite Interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb Dating, Hf Isotopes and Trace Elements in Zircons from Mantle Xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1-2): 537-571. https://doi.org/10.1093/petrology/egp082
- Liu, Y. S., Hu, Z. C., Gao, S., et al., 2008. In Situ Analysis of Major and Trace Elements of Anhydrous Minerals by LA-ICP-MS without Applying an Internal Standard. *Chemical Geology*, 257(1-2): 34-43. https://doi.org/ 10.1016/j.chemgeo.2008.08.004
- Ludwig, K. R., 2003. ISOPLOT 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center, Berkeley.

- Meinert, L. D., Dipple, G. M., Nicolescu, S., 2005. World Skarn Deposits. Economic Geology 100th Anniversary Volume, Society of Economic Geologists, Littleton.
- Mezger, K., Hanson, G. N., Bohlen, S. R., 1989. U-Pb Systematics of Garnet: Dating the Growth of Garnet in the Late Archean Pikwitonei Granulite Domain at Cauchon and Natawahunan Lakes, Manitoba, Canada. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 101(2): 136-148. https://doi.org/10.1007/bf00375301
- Park, C., Song, Y., Kang, I. M., et al., 2017. Metasomatic Changes during Periodic Fluid Flux Recorded in Grandite Garnet from the Weondong W - Skarn Deposit, South Korea. *Chemical Geology*, 451: 135-153. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2017.01.011
- Shao, Y. J., Zhang, Y. Z., Zhang, J. D., et al., 2008. Formation Mechanism of Breccia Pipe Type in Yixingzhai Gold Deposit. Journal of Central South University of Technology, 15(1): 89-94. https://doi.org/10.1007/ s11771-008-0018-7
- Seman, S., Stockli, D. F., McLean, N. M., 2017. U-Pb Geochronology of Grossular-Andradite Garnet. *Chemical Ge*ology, 460: 106-116. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2017.04.020
- Smith, M. P., Henderson, P., Jeffries, T. E. R., et al., 2004. The Rare Earth Elements and Uranium in Garnets from the Beinn an Dubhaich Aureole, Skye, Scotland, UK: Constraints on Processes in a Dynamic Hydrothermal System. *Journal of Petrology*, 45(3): 457-484. https:// doi.org/10.1093/petrology/egg087
- Song, B. C., Zhang, B. L., Wang, J., et al., 2002. Discuss on Minerogenesis Mechanism of Crypto - Explosion Type Gold Deposit. *Mineral Deposits*, 21(S1): 662-665 (in Chinese).
- Vance, D., Holland, T., 1993. A Detailed Isotopic and Petrological Study of a Single Garnet from the Gassetts Schist, Vermont. Contributions to Mineralogy and Petrology, 114(1): 101-118. https://doi.org/10.1007/ bf00307868
- Vance, D., Meier, M., Oberli, F., 1998. The Influence of High U-Th Inclusions on the U-Th-Pb Systematics of Almandine-Pyrope Garnet: Results of a Combined Bulk Dissolution, Stepwise-Leaching, and SEM Study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(21-22): 3527-

3540. https://doi.org/10.1016/s0016-7037(98)00252-x

- Wiedenbeck, M., Allé, P., Corfu, F., et al., 1995. Three Natural Zircon Standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, Trace Element and Ree Analyses. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 19(1): 1-23. https://doi.org/10.1111/ j.1751-908x.1995.tb00147.x
- Ye, R., Zhao, L. S., Shen, Y. L., 1999. Geochemistry Features of Yixingzhai Gold Deposit in Shanxi Province. *Geo-science*, 13(4):415-418 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. Q., Li, S. R., Santosh, M., et al., 2015. Timing and Origin of Mesozoic Magmatism and Metallogeny in the Wutai-Hengshan Region: Implications for Destruction of the North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 113: 677-694. https://doi. org/10.1016/j. jseaes.2015.05.004
- Zhang, J. Q., Li, S. R., Santosh, M., et al., 2017. The Magmatic-Hydrothermal Mineralization Systems of the Yixingzhai and Xinzhuang Gold Deposits in the Central North China Craton. Ore Geology Reviews, 88: 416– 435. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.05.030
- Zhao, B., Li, T. J., Li, Z. P., et al., 1982. A Study on Garnet from some Skarn Deposits in China. Acta Mineralogica Sinica, 2(4):296-304 (in Chinese with English abstract).
- Zong, K. Q., Klemd, R., Yuan, Y., et al., 2017. The Assembly of Rodinia: The Correlation of Early Neoproterozoic (ca. 900 Ma) High-Grade Metamorphism and Continental Arc Formation in the Southern Beishan Orogen, Southern Central Asian Orogenic Belt (CAOB). Precambrian Research, 290: 32-48. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2016.12.010

#### 附中文参考文献

- 贾永山, 戈全厚, 1994. 山西省义兴寨金矿床地质特征及成 因探讨. 黄金, 15(10): 13-16.
- 刘连登,李颖,兰翔,1999.论角砾/网脉-斑岩型金矿.矿 床地质,18(1):29-36.
- 宋保昌,张宝林,王杰,等,2002. 隐爆角砾岩型金矿的成矿 机理探讨.矿床地质,21(S1):662-665.
- 叶荣,赵伦山,沈镛立,1999.山西义兴赛金矿床地球化学 研究.现代地质,13(4):415-418.
- 赵斌,李统锦,李昭平,等,1982.我国一些矿区矽卡岩中石 榴石的研究.矿物学报,2(4):296-604.