

doi:10.3969/j.issn.1007-3701.2018.02.005

山西省繁峙义兴寨金矿新发现蚀变斑岩型金矿体的 地质地球化学特征与成矿时代

张立中

ZHANG Li-Zhong

(紫金矿业集团股份有限公司矿产地质勘查院,福建厦门 361006)

(Zijin Mining Group Co. Mineral Exploration Institute, Xiamen 361006, Fujian, China)

摘要:山西义兴寨金矿是五台山—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。近年来,在矿区河湾斑岩体的深部探矿过程中发现了一个大型蚀变斑岩型金矿体(>20 t Au)。然而,关于该蚀变斑岩型金矿体的成因还缺乏相关的研究,因而制约了对该矿床深部及外围勘探工作的开展。本文通过对蚀变斑岩的锆石开展了 LA-ICPMS 原位的 U-Pb 同位素分析,结果表明蚀变石英斑岩的侵位时间为 141 ± 1 Ma,从而限定了蚀变斑岩型金矿化的时间在 131-141 Ma 之间。对硫化物石英脉和蚀变斑岩型金矿系统的元素地球化学分析结果表明两种类型矿石具有相似的特征,进而提出蚀变斑岩型金矿化与脉状金矿是同期成矿流体作用的结果。

关键词:蚀变斑岩型金矿;锆石 U-Pb 定年;元素地球化学;义兴寨金矿

中图分类号:P618.51

文献标识码:A

文章编号:1007-3701(2018)02-0134-008

Zhang L Z. Element geochemistry and age of the altered-porphyry gold mineralization in Yixingzhai gold deposit, Fanshi city, Shanxi Province. *Geology and Mineral Resources of South China*, 2018, 34(2): 134-141.

Abstract: Yixingzhai gold deposit in the Wutaishan - Hengshan gold district is the most important and largest gold deposit in Shanxi Province. Recently, new altered-porphyry gold orebody (>20t Au) has been found in the Hewan quartz porphyry. However, genesis and timing constraints on the altered-porphyry gold mineralization in this deposit are lacking. This fact severely hinders the gold exploration in deep and surround areas of the Yixingzhai deposit. In this paper, U - Pb dating of zircon grains from the altered-porphyry was carried out by using laser ablation - inductively coupled plasma mass spectrometry (LA - ICPMS). The zircon grains yielded the weighted mean $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ dates of 141 ± 1 Ma, which is used to constrain the timing of altered-porphyry gold mineralization ranging from 131-141 Ma. Geochemical characteristics of the altered-porphyry gold ores are consistent with vein-type gold ores, indicating that the formation of altered-porphyry gold mineralization was genetically related to the vein-type gold mineralization. Therefore, we proposed that both two type gold mineralization origin from the same hydrothermal fluid event.

Key words: altered-porphyry gold mineralization; zircon U - Pb dating; element geochemistry; Yixingzhai gold deposit

收稿日期:2018-2-5;修回日期:2018-3-31

基金项目:国家重点研发计划(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,E-mail: 71090364@qq.com.

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内大兴安岭-太行山重力梯度中部,山西断隆-五台隆起西北侧(图 1)^[1-2]。该矿床是山西省唯一的大型金矿床,矿体主要以脉状形式产于太古代片麻岩中,受 NW 和 NNW 向断裂的控制。矿体的空间分布显示金矿化与燕山期岩浆活动存在较为密切的成因联系,长期以来是地质学者研究的热点。目前,大量的研究主要集中在对义兴寨金矿床内脉状金矿体的地球化学、成矿流体、控矿因素、及矿床成因等方面^[1-7],以上研究结果均表明脉状金矿的形成与早白垩纪岩浆活动具有直接的联系。最近两年,在矿区河湾斑岩体深部探矿过程中发现了规模较大的蚀变斑岩型金矿体(>20 t Au),引起了矿山企业的高度关注。然而,关于义兴寨金矿床深部蚀变斑岩金矿体的成因还缺乏相关的研究,因而极大制约了对该矿床深部及外围勘探工作的深入开展。本文在详细的野外地质观察基础上,对义兴寨金矿床深部蚀变斑岩开

展了锆石 U-Pb 定年和不同类型金矿石的元素地球化学分析,认为蚀变斑岩型矿体与脉状金矿体具有成因联系,获得的认识有助于指导下一步矿区深部和边部的找矿工作。

1 地质背景

义兴寨金矿区主要出露基底为恒山杂岩,主要岩性为变闪长岩、黑云斜长片麻岩和长英质片麻岩^[1]。该区盖层有上元古界长城系砂岩、条带状灰岩和古生界寒武系砂岩、泥质灰岩,以上地层主要残留于南门山隐爆角砾岩筒附近。第四系自下更新统至全新统皆有出露,主要为湖盆沉积物或风成堆积物,分布于矿区南东方向的低山丘陵区,厚度达 184 m,其不整合于下伏地层之上。

区内出露的岩浆岩主要为酸性次火山岩和辛庄闪长杂岩体,岩体的分布主要受 NNW 向基底断裂和 NNE 向走滑断裂控制^[8]。辛庄闪长杂岩体主要

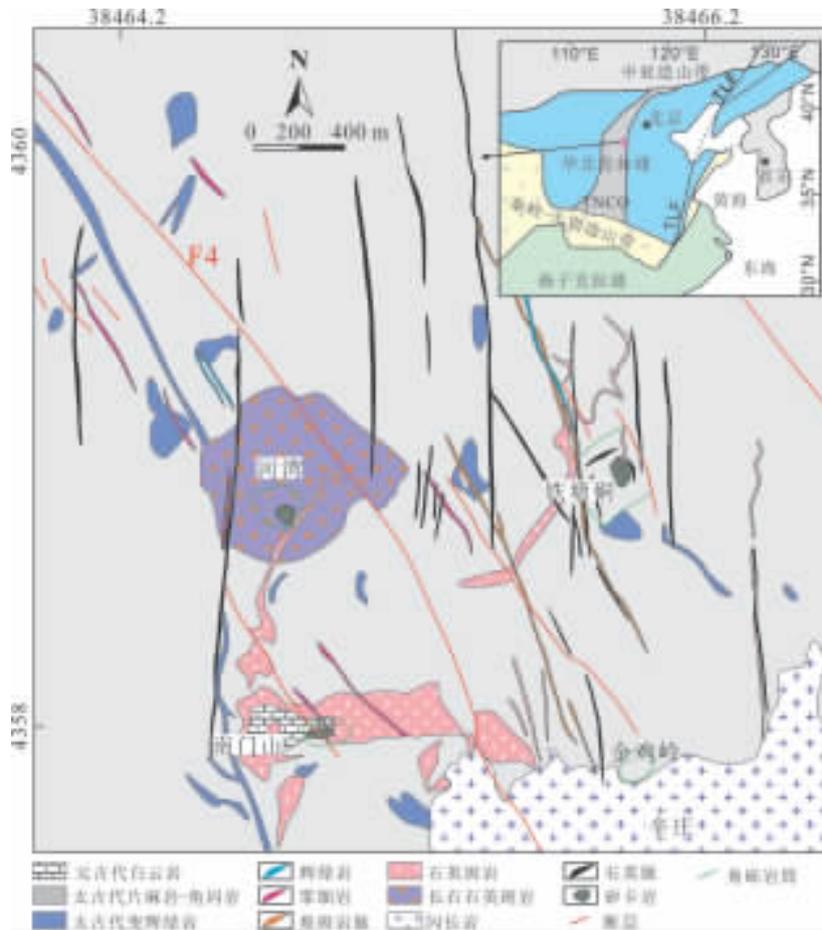


图 1 义兴寨矿区地质图(据文献[1]改编^[1])

Fig. 1 Geological map of the Yixingzhai gold deposit (modified from Ref.[1])

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,对石英二长闪长岩中锆石 U-Pb 定年结果表明其形成时代为 $134 \pm 1 \text{ Ma}$ ^[2]。酸性次火山岩主要分布在义兴寨矿区的四个角,分别为河湾、铁塘碛、南门山和金鸡岭(图 1),主要为石英斑岩和霏细岩,其中石英斑岩 U-Pb 定年结果表明其侵位时代为 $142 \pm 2 \text{ Ma}$ ^[7]。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。其中大多数辉绿岩呈不规则脉状、囊状沿层间破碎面贯入,多呈北东-北东东、北西向展布,为五台-吕梁期岩浆岩;部分辉绿岩切割石英斑岩,其时间为早白垩世(图 1)。

矿区构造类型总体以断裂构造为主,断裂构造明显具有多期次活动的特征,主要包括 NEE、NW、SN 向三组断裂构造,其中 NW 向断裂构成矿区构造的基本骨架,其次级 SN 向断裂具体控制了矿区金矿脉的产出(图 1)。NEE 向断裂为基底断裂,早期为压扭性断裂构造,分布于在河湾与南门山角砾岩筒之间,断裂构造带内充填有透镜状伟晶岩脉和细晶岩脉。NW 向断裂构成区域构造的基本格架,

走向一般 $305-335^\circ$,倾向 SW,倾角 $65-85^\circ$,其破碎带宽一般数米至十余米,普遍具高岭土化、褐铁矿化、局部具绢云母化、硅化、金矿化。SN 向断裂是为矿区最主要的含矿构造,断裂活动在时间和空间上与燕山期次火山岩及闪长岩的侵入有着密切的关系。该组断裂总体走向为 $345-355^\circ$,倾角为 $80-90^\circ$,在平面上呈等间距分布,由东向西,依次形成十余条金矿脉(图 1),在走向上矿体有尖灭再现、膨大缩小、分支复合等现象。

2 蚀变斑岩型金矿特征

蚀变斑岩型金矿体是矿山在近年来深部勘探过程中新发现的矿体,该矿体主要分布在 800-500 m 标高,呈透镜状赋存于石英斑岩中。矿体位于 F4 断层的上盘,垂向延伸约 300 m,宽 10 余米(图 2a),金平均品位 2.3×10^{-6} ,储量 $>20 \text{ t Au}$ 。蚀变斑岩裂隙十分发育,并被大量 10 细脉状硫化物-石英脉充填,细脉两侧发生强烈的黄铁绢英岩化(图 2b,c)。硫化物石英脉从单脉到网脉状均有发育,脉宽 2-

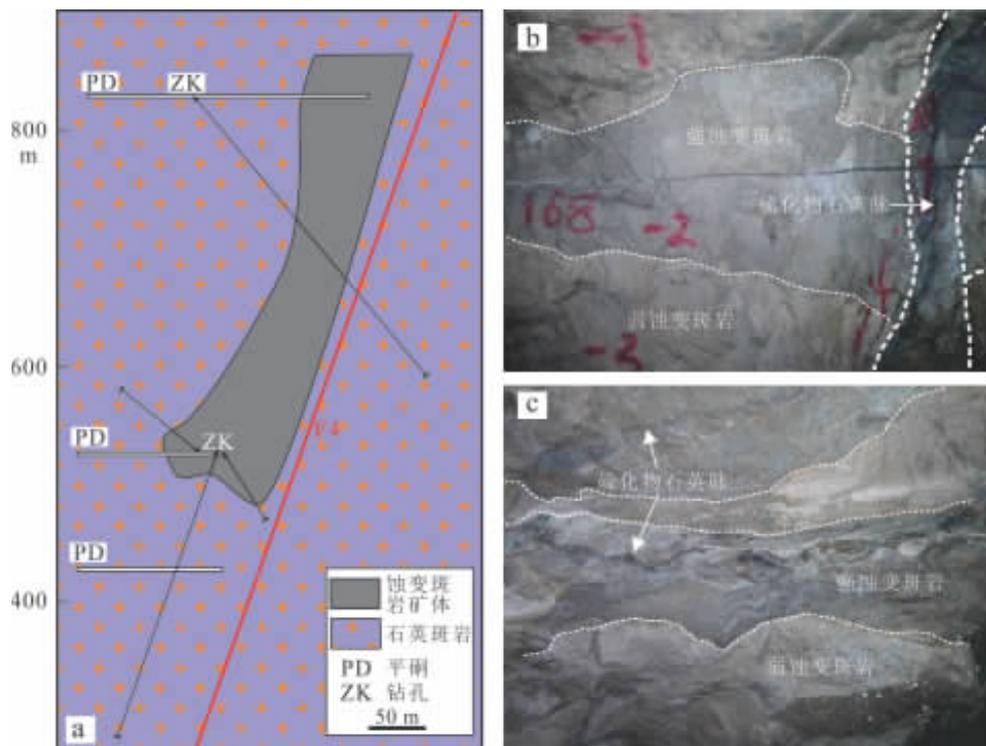


图2 (a)河湾石英斑岩深部蚀变斑岩矿体剖面图;(b-c)强黄铁矿-绢云母化斑岩沿硫化物石英脉分布,远离石英脉蚀变强度减弱

Fig. 2 (a) Geological section of altered-porphyry gold orebody in Hewan quartz porphyry; (b-c) Photographs showing the occurrence of intensely and weakly altered-porphyry Au ores along the sulfide-quartz veins.

5 cm,产状变化较大。黄铁绢英岩化靠近含金石英细脉尤为发育,远离脉体蚀变逐渐减弱(图 2b,c)。

蚀变斑岩和硫化物石英脉型矿石的金含量均达到工业开采品位。硫化物主要呈浸染状分布于蚀变斑岩矿石中,斑岩矿石中斑晶遭受不同程度蚀变,在远离硫化物石英脉的浅色斑岩中,斑晶基本未发生蚀变,而黄铁矿较少,主要呈自形粒状(图 3a);在靠近硫化物石英脉的蚀变斑岩中斑晶发生强烈蚀变,黄铁矿含量显著增加,多呈不规则状,内部裂隙较为发育,常常被黄铜矿、闪锌矿、方铅矿等硫化物呈脉状穿插-交代(图 3b,c),形成粒状结构和网状结构,黄铁矿中可见银金矿包体(图 3d)。

3 分析方法

3.1 锆石 U-Pb 同位素分析

锆石 U-Pb 同位素定年在武汉上谱分析科技有限责任公司利用 LA-ICPMS 分析完成。详细的仪器参数和分析流程见 Zong et al. (2017)^[9]。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^[10]。本次分析的激光束斑和频率分别为 32 μm 和 6 Hz。U-Pb 同位素定年数据处理采用锆石 91500 作外标进行同位素分馏校正,GJ-1 作为 U-Pb 同位素分析监控标样。每个点分析包括大约 20-30 s 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、及 U-Pb 同位素比值和年龄计算)采用软件 ICPMSDataCal 完成^[11]。锆石样品的 U-Pb 年龄谱和图绘制和年龄加权平均计算采用 Isoplot/Ex_ver3 完成^[12]。

3.2 矿石元素地球化学分析

矿石的主-微量元素分析在澳实(广州)矿物实验室采用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)完成,分析采用的方法代码 ME-MS61。样品先用四酸消解,然后再用 ICP-MS 进行检测。矿石的金含量分析采用火试金方法进行测量,其中金含量 $>10\times 10^{-6}$

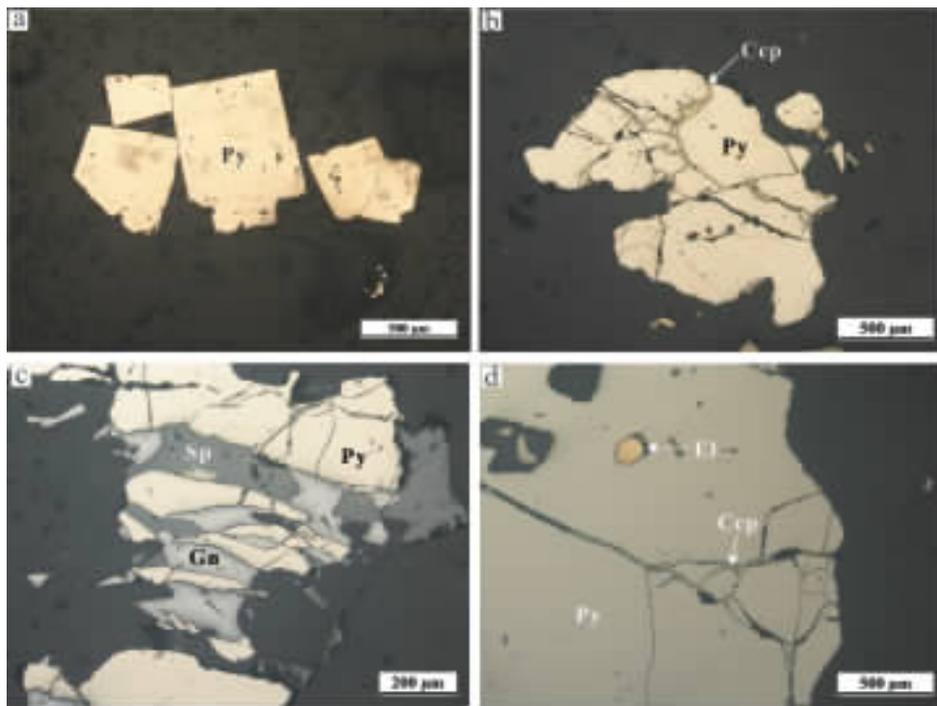


图3 蚀变斑岩金矿石的矿物组成

Fig. 3 Mineralogical association of altered-porphyry gold ores

(a)远离硫化物石英脉的弱蚀变斑岩可见少量自形的黄铁矿;(b)靠近硫化物石英脉的强蚀变斑岩中的黄铁矿裂隙被黄铜矿充填;(c)强蚀变斑岩中黄铁矿被方铅矿、闪锌矿等硫化物穿插-交代;(d)强蚀变斑岩中黄铁矿常含有少量的银金矿。矿物缩写:Py-黄铁矿,Ccp-黄铜矿,Sp-闪锌矿,Gn-方铅矿,El-银金矿。

样品采用的方法代码为 Au-GRA21, 而 <10 g/t 样品的分析代码为 Au-AA23。

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 年龄

本次研究对蚀变石英斑岩锆石开展了 U-Pb 同位素定年。蚀变石英斑岩样品 HW08 中锆石大小 100–300 μm , CL 图片显示具有很好的岩浆震荡环带 (图 4)。锆石的 U、Th 含量分别为 59.5 ~ 1950 $\mu\text{g/g}$ 和 59.8 ~ 2046 $\mu\text{g/g}$, 相应的 U/Th 比值为 0.9 ~ 1.5 (表 1)。样品 HW08 共分析了 13 颗锆石, 其中 11 个点给出了谐和的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄 (图 4), 而 2 颗锆石的数据稍微偏离协和线, 表明存在微量的普通 Pb, 但对 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄影响很小。在 U-Pb 协和图上, 所有分析数据同协和线的交点年龄为 $141 \pm 1 \text{ Ma}$, 该年龄与全部点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄 $141 \pm 1 \text{ Ma}$ (MSWD = 1.5; 图 4) 完全一致, 表明获得的年龄数据十分可靠, 即代表了石英斑岩的侵位年龄。

4.2 元素地球化学

蚀变斑岩内脉状含金硫化物石英脉的金品位为 $(35.2-102) \times 10^{-6}$; 而蚀变斑岩矿石主要发育黄铁矿-绢云母化, 从强蚀变斑岩-弱蚀变斑岩矿石的金品位逐渐降低 (图 5; 表 2)。对斑岩内石英硫化物脉和不同蚀变程度的斑岩矿石的地球化学分析表明,

Au 和 Ag、Bi 具有很好的正相关性 (图 5e, f)。从硫化物石英脉到弱蚀变斑岩, Pb-Zn-Cu-Bi-Ag-As 等元素和 Au 含量变化完全一致, 呈逐渐降低的趋势 (图 5c, d)。

5 讨论

目前, 关于义兴寨矿床内新发现的蚀变斑岩金矿体的成矿时间和成因尚不清楚。本次研究通过对河湾蚀变斑岩矿石中锆石的 U-Pb 定年, 表明斑岩的形成时间为 $141 \pm 1 \text{ Ma}$ (图 4); 显然蚀变斑岩金矿化的时间接近或晚于石英斑岩的侵位。因此, 蚀变石英斑岩的锆石 U-Pb 年龄限定了蚀变斑岩金矿化时间的上限为 $141 \pm 1 \text{ Ma}$ 。前人对含金石英脉流体包裹体 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学分析, 表明含金硫化物石英脉的形成时间为 $131 \pm 3 \text{ Ma}$ 和 $151 \pm 2 \text{ Ma}$ [8]。显然, $151 \pm 2 \text{ Ma}$ 的年龄与地质事实不相吻合, 即金矿脉常切割石英斑岩。因此, 该文认为石英脉 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄可能限定了蚀变斑岩型金矿化的时间下限为 $131 \pm 3 \text{ Ma}$ [8]。最近, Zhang et al. (2017) [13] 通过对河湾石英斑岩中的辉钼矿-石英脉进行了 Re-Os 同位素定年, 结果表明钼矿化的时间为 $141 \pm 4 \text{ Ma}$ 。该年龄与石英斑岩的形成时间在误差范围内完全一致, 表明钼矿化可能与石英斑岩的侵位相关, 而是否能代表蚀变斑岩型金矿化的时间还有待于进一步的深入研究。综合以上结果, 本次研究将义兴寨矿床的蚀变斑岩型金矿化时间限定在 131–141 Ma 之间。

迄今为止, 缺乏对义兴寨蚀变斑岩金矿体成因的研究。本次研究通过对河湾蚀变斑岩金矿体中硫化物石英脉和不同蚀变程度矿石的野外地质观察, 显示蚀变斑岩矿石的分布严格受控于斑岩裂隙和石英脉的分布 (图 2b, c); 矿相学研究表明硫化物的含量从弱蚀变斑岩-强蚀变斑岩-含金石英脉逐渐的增加 (图 3)。以上观察结果表明蚀变斑岩金矿化的形成与硫化物石英脉金矿化紧密相关。另外, 对斑岩中石英硫化物脉和不同蚀变程度斑岩矿石系统的地球化学分析表明, 所有类型金矿石的 Au 和 Ag、Bi 具有很好的正相关性 (图 5e, f), 表明两种类型矿石可能受控于同期热液流体作用。从硫化物石英脉至弱蚀变斑岩, Pb、Zn、Cu、Bi、Ag、As 等元素和 Au 含量变化完全一致, 呈逐渐降低的趋势 (图 5c,

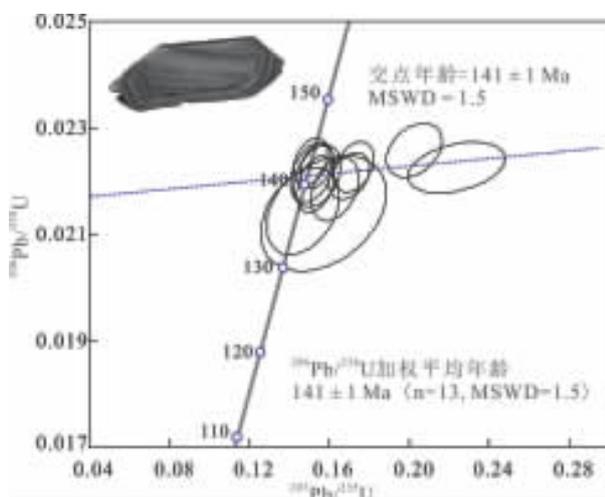


图4 蚀变石英斑岩中锆石U-Pb谐和图

Fig. 4 Concordia U-Pb plot of zircon grains from the altered-quartz porphyry

表1 蚀变斑岩中锆石LA ICPMS原位U Pb同位素分析结果
Table 1 LA ICPMS U Pb isotope data of zircon grains from the altered porphyry

| 分析点 | Th μg/g | U μg/g | U/Th | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ | | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | | $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ | | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ | | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | | | |
|----------|------------|-----------|------|----------------------------------|--------|----------------------------------|--------|-----------------------------------|--------|----------------------------------|-----|----------------------------------|-----|-----|---|
| | | | | 比值 | 1 σ | 比值 | 1 σ | 年龄 (Ma) | 1 σ | 年龄 (Ma) | 1 σ | 年龄 (Ma) | 1 σ | | |
| HW08-001 | 1601 | 1284 | 0.9 | 0.0506 | 0.0013 | 0.1534 | 0.0038 | 0.0219 | 0.0002 | 220 | 57 | 145 | 3 | 140 | 1 |
| HW08-002 | 735 | 667 | 1.0 | 0.0536 | 0.0015 | 0.1629 | 0.0049 | 0.0218 | 0.0002 | 354 | 58 | 153 | 4 | 139 | 2 |
| HW08-003 | 1198 | 999 | 0.9 | 0.0492 | 0.0014 | 0.1515 | 0.0044 | 0.0222 | 0.0002 | 167 | 60 | 143 | 4 | 141 | 1 |
| HW08-004 | 872 | 737 | 0.9 | 0.0503 | 0.0015 | 0.1542 | 0.0048 | 0.0221 | 0.0002 | 209 | 40 | 146 | 4 | 141 | 1 |
| HW08-006 | 1038 | 1390 | 1.5 | 0.0488 | 0.0011 | 0.1510 | 0.0035 | 0.0224 | 0.0002 | 200 | 52 | 143 | 3 | 143 | 1 |
| HW08-007 | 1061 | 1176 | 1.3 | 0.0717 | 0.0030 | 0.2238 | 0.0099 | 0.0223 | 0.0002 | 977 | 81 | 205 | 8 | 142 | 1 |
| HW08-008 | 962 | 1218 | 1.4 | 0.0645 | 0.0016 | 0.2027 | 0.0057 | 0.0226 | 0.0002 | 767 | 54 | 187 | 5 | 144 | 1 |
| HW08-009 | 2046 | 1950 | 1.0 | 0.0560 | 0.0015 | 0.1703 | 0.0042 | 0.0221 | 0.0002 | 454 | 57 | 160 | 4 | 141 | 1 |
| HW08-010 | 191 | 153 | 0.9 | 0.0513 | 0.0029 | 0.1470 | 0.0074 | 0.0214 | 0.0003 | 254 | 136 | 139 | 7 | 137 | 2 |
| HW08-011 | 1075 | 1308 | 1.4 | 0.0565 | 0.0015 | 0.1725 | 0.0041 | 0.0223 | 0.0002 | 478 | 57 | 162 | 4 | 142 | 1 |
| HW08-012 | 1431 | 1882 | 1.5 | 0.0499 | 0.0010 | 0.1538 | 0.0032 | 0.0223 | 0.0002 | 191 | 48 | 145 | 3 | 142 | 1 |
| HW08-013 | 59.8 | 59.5 | 1.1 | 0.0553 | 0.0053 | 0.1572 | 0.0129 | 0.0214 | 0.0004 | 433 | 219 | 148 | 11 | 136 | 3 |

表2 硫化物石英脉和蚀变斑岩型金矿石元素分析结果

Table 2 Geochemical data of the sulfide-quartz veins and altered-porphyry gold ores from the Yixingzhai gold deposit

| 样品号 单位 | 样品描述 | Au μg/g | Ag μg/g | As μg/g | Bi μg/g | Cu μg/g | Pb μg/g | Zn μg/g | S % | Fe % |
|-----------|--------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|--------|---------|
| 510HW-1A | 强蚀变斑岩 | 35.2 | 101 | 303 | 80 | 2191 | 27848 | 102716 | 17.6 | 15.80 |
| 510HW-1B | 硫化物石英脉 | 102.0 | 287 | 152 | 320 | 28568 | 4910 | 7391 | 16.0 | 19.75 |
| 510HW-2a | 弱蚀变斑岩 | 0.096 | 3.39 | 5.1 | 1.94 | 319 | 390 | 524 | 0.43 | 0.78 |
| 510HW-2b | 强蚀变斑岩 | 0.392 | 6.42 | 8.9 | 7.38 | 386 | 641 | 1480 | 1.60 | 1.95 |
| 510HW-3 | 弱蚀变斑岩 | 0.020 | 0.55 | 2.8 | 0.80 | 258 | 64.4 | 116 | 0.17 | 0.45 |
| 510HW-4 | 弱蚀变斑岩 | 0.028 | 0.41 | 2.2 | 0.73 | 60.6 | 42.2 | 127 | 0.58 | 0.73 |
| 510HW-5B | 硫化物石英脉 | 81.8 | 212 | 227 | 310 | 21105 | 15548 | 17253 | 14.9 | 17.80 |
| 510HW-5C | 强蚀变斑岩 | 0.343 | 57.5 | 316 | 4.50 | 1800 | 2850 | 10300 | 1.84 | 1.40 |
| 510HW-6A | 弱蚀变斑岩 | 0.065 | 0.68 | 20.5 | 2.54 | 30.9 | 445 | 546 | 2.82 | 2.90 |
| 510HW-6B | 强蚀变斑岩 | 0.243 | 2.79 | 16.6 | 2.88 | 257 | 112.5 | 324 | 1.71 | 1.94 |

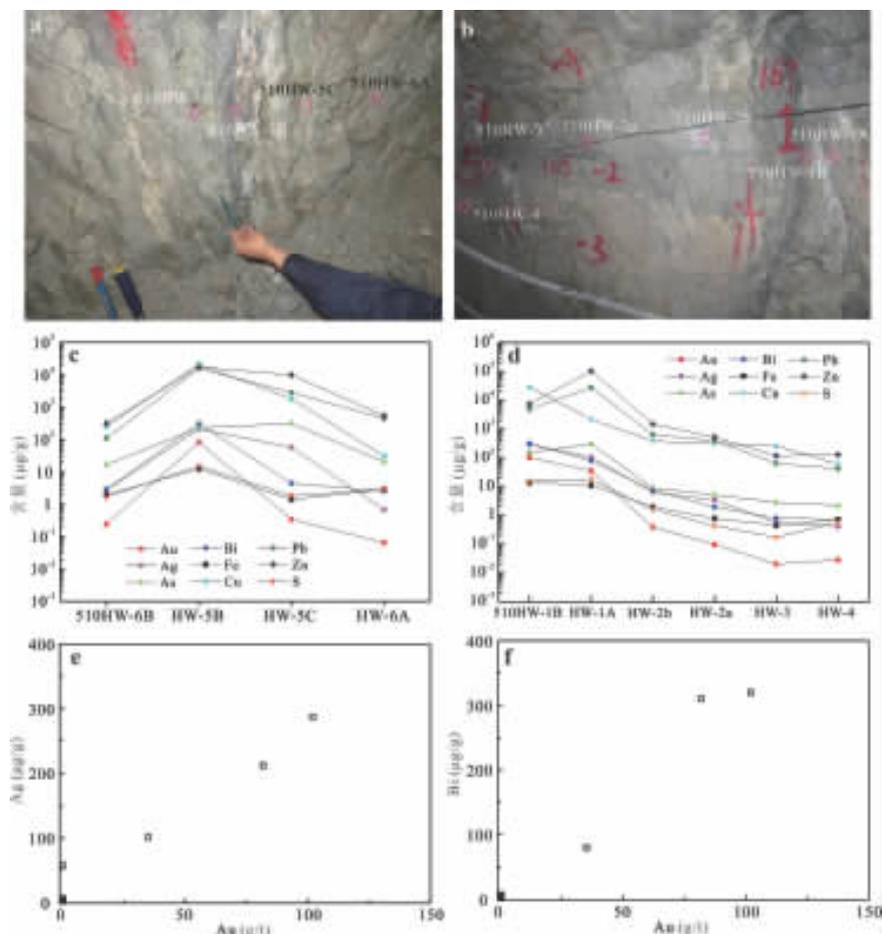


图5 义兴寨金矿床510中段河湾斑岩含金石英脉和蚀变斑岩的地球化学变化特征

Fig. 5 Geochemical characteristics of Au-bearing quartz-sulfide veins and altered-porphyry from 510 m mining level at the Yixingzhai gold deposit

(a, b)硫化物石英脉和蚀变斑岩采样位置;(c, d)Au-Ag-Bi-Pb-Zn-Cu-Fe-S-As元素变化趋势图,Au单位为g/t;(e)Au和Ag相关性图;(f)Au和Bi相关性图。

d),也表明成矿热液流体沿裂隙充填形成硫化物石英脉矿石,而热液流体进一步运移至斑岩则交代斑岩形成蚀变斑岩型金矿。因此,义兴寨矿床中新发现的蚀变斑岩型金矿和硫化物石英脉金矿是同期成矿热液流体作用的结果。目前,蚀变斑岩型金矿体主要赋存于NNE向的F4断裂上盘,进而推断矿区两NNE向断裂可能是该矿床的主要导矿构造(图1),因此有必要在两断裂带附近的南门山斑岩体开展下一步找矿工作。

6. 结论

(1) 义兴寨金矿河湾蚀变斑岩锆石 LA - ICPMS 原位 U - Pb 同位素分析,结果表明蚀变石英斑岩的侵位时间为 141 ± 1 Ma,限定了蚀变斑岩金矿化的时间在 131-141 Ma 之间

(2) 本文对硫化物石英脉和蚀变斑岩型金矿石系统的元素地球化学分析,认为蚀变斑岩型金矿化与脉状金矿是同期成矿流体作用的结果,提出在区域 NNE 两断裂附近内斑岩内有潜力找到类似的蚀变斑岩矿体。

本文在 LA - ICPMS 得到了上谱分析公司相关分析人员的帮助,野外工作的开展得到了山西紫金矿业有限公司尹记文、刘军和中国地质大学(武汉)靳晓野、王宏强等人的大力协助,另外编辑对本文修改提出了宝贵的意见,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] 景淑慧. 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[R]. 1985:1 - 109.
- [2] Li S R, Santosh M, Zhang H F, Luo J Y, Zhang J Q, Li C L, Song J Y, Zhang X B. Metallogeny in response to lithospheric thinning and craton destruction: geochemistry and U - Pb zircon chronology of the Yixingzhai gold deposit, Central North China Craton[J]. *Ore Geology Reviews*, 2014, 56: 457 - 471.
- [3] 叶荣, 赵伦山, 沈铺立. 山西义兴寨金矿床地球化学研究[J]. *现代地质*, 1999, 13: 415 - 418.
- [4] 李成禄, 李胜荣, 罗军燕, 张聚全, 宋继叶. 山西繁峙义兴寨金矿床金矿物特征研究[J]. *中国地质*, 2011, 38(1): 119-128.
- [5] 赵晓霞, 刘忠法, 张普斌, 刘清泉, 张宇, 张建国. 山西辛庄金矿床地质地球化学特征及成因分析[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2012, 43(11): 4374-4380.
- [6] 路英川, 葛良胜, 申维, 王治华, 郭晓东, 王梁, 周传芳. 山西省义兴寨金矿流体包裹体特征及其地质意义[J]. *矿床地质*, 2012, 31(1): 83-93.
- [7] Zhang J Q, Li S R, Santosh M, Li Q, Niu S D, Li Z D, Zhang X G, Jia L B. Timing and origin of Mesozoic magmatism and metallogeny in the Wutai - Hengshan region: implications for destruction of the North China Craton[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 113: 677 - 694.
- [8] Shao Y J, Zhang Y Z, Zhang J D, Ding Z W, Chen X L and Liu Z F. Formation Mechanism of Breccia Pipe Type in Yixingzhai Gold Deposit [J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2008, 15: 89 - 94.
- [9] Zong K Q, Klemd R, Yuan Y, He Z Y, Guo J L, Shi X L, Liu Y S, Hu Z C, Zhang Z M. 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) [J]. *Precambrian Research*, 2017, 290, 32 - 48.
- [10] Hu Z C, Zhang W, Liu Y S, Gao S, Li M, Zong K Q, Chen H H, Hu S H. "Wave" signal smoothing and mercury removing device for laser ablation quadrupole and multiple collector ICP - MS analysis: application to lead isotope analysis[J]. *Analytical Chemistry*, 2015, 87, 1152 - 1157.
- [11] Liu Y S, Gao S, Hu, Z C, Gao C G, Zong K Q, Wang D B. 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 of mantle xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 2010, 51, 537 - 571.
- [12] Ludwig K R. ISOPLOT 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center, California, Berkeley, 2003, 39 pp.
- [13] Zhang J Q, Li S R, Santosh M, Niu S D, Li Q, Lu J. The magmatic - hydrothermal mineralization systems of the Yixingzhai and Xinzhuang gold deposits in the Central North China Craton [J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 88: 416 - 435.