冀东唐杖子、牛心山花岗岩体锆石SHRIMP U-Pb定年及其地质意义

郭少丰[1,3], 汤中立[2], 罗照华[1], 赵文浩[3]
GUO Shao-feng[1,3], TANG Zhong-li[2], LUO Zhao-hua[1], ZHAO Wen-hao[3]

1. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 2. 长安大学, 陕西 西安 710054;
3. 河北省第二地质队, 河北 唐山 063000
1. *China University of Geosciences(Beijing), Beijing* 100083, *China;*
2. *Chang'an University, Xi'an* 710054, *Shaanxi, China;*
3. *No.* 2 *Geology Unit of Hebei Province, Tangshan* 063000, *Hebei, China*

摘要: 冀东地区是一个金矿聚集区, 但与国内外的矿集区相比, 冀东地区却"只见星星不见月亮或少见月亮", 这可能是因为某些具有地区性特征的找矿标志尚未被人们所认识。本次工作采用 SHRIMP 锆石 U-Pb 法测得唐杖子金矿的花岗斑岩株的形成年龄为 173Ma±2Ma, 牛心山红色花岗岩的年龄为 173Ma±2Ma, 与峪耳崖岩体红色花岗岩的年龄 174Ma±3Ma 相吻合, 同属中生代燕山早中期, 应是同一岩浆活动的产物。如果金矿与该岩浆活动有关, 那么这 3 个矿床就具有成因上的联系, 即它们(也许包括更多的矿点)可能由一个热中心分异矿化形成, 后经多次地壳活动形成目前的格局。

关键词: 冀东; 金矿; 唐杖子; 牛心山; 锆石 SHRIMP U-Pb 定年; 花岗岩
中图分类号: P597+.3 **文献标志码**: A **文章编号**: 1671-2552(2009)10-1458-07

Guo S F, Tang Z L, Luo Z H, Zhao W H. Zircon SHRIMP U-Pb dating and geological significance from granite bodies in Tangzhangzi and Niuxinshan, eastern Hebei Province, China. ***Geological Bulletin of China,*** **2009, 28(10):1458-1464**

Abstract: The eastern Hebei Province is well known for prospective gold deposits, while unlike other famous foreign gold deposits region, not yet any significant Au deposits are discovered, the reason can be that some regional ore exploration indicators have not been recognized so far. Through recent studies, zircon SHRIMP dating from granite rocks related to gold formation in Tangzhangzi and Yuerya granites complex are conducted, the author obtain two U-Pb ages, respectively 173±2Ma for porphyry granite in Tangzhangzi and 173±2Ma for red granite in Niuxinshan, which are in accordance to the result of red granite in Yuerya (174±3Ma), belonging to early or middle Mesozoic Yanshanian. It's estimated that they are formed during the same magmatic activity. If the gold deposits are related to this magmatic event, then all these three deposited are probably formed by mineralization differentiation from same thermal-center and then underwent multi-phase crustal tectonic movement.

Key words: eastern Hebei Province; gold deposit; Tangzhangzi; Niuxinshan; zircon SHRIMP U-Pb dating; granite

冀东地区是中国重要的金矿密集分布区[1-2], 吸引了国内外学者的广泛关注。该区金矿分布较多, 且产出较为集中(图 1), 被认为受控于太古宇、断裂构造和岩浆活动[1-5]。目前, 该区已先后发现金矿床 190 多处, 其中超大型金矿 1 处、大型 3 处、中型 4 处[6], 但探明的资源量不足 200t。与国内外其他矿集区(如胶东 1500t, 甘肃阳山金矿 300~500t, 环太平洋带巴布亚新几内亚利西尔岛 500t、波尔盖拉 420t, 日本菱刈金矿 260t, 美国科罗拉多州的克里普尔克里克矿床 594t)相比, 差距很大。这表明, 冀东金矿聚集区

收稿日期: 2009-03-02; **修订日期**: 2009-08-12
基金项目: 国家自然科学重点基金项目《小岩体岩浆硫化物矿床成矿深部过程》(编号: 40534020)资助
作者简介: 郭少丰(1970-), 男, 高级工程师, 在读博士, 矿物学、岩石学、矿床学专业。E-mail:guosf69@163.com

仍然有很大的找矿潜力，只是因为该区特有的一些找矿标志没有得到正确的认识，在一定程度上滞后了区域成矿预测工作。

综合分析表明，成矿作用时间的确定对于区域成矿预测具有重要的意义。然而,由于缺乏直接有效的测年方法，金矿床形成年龄的确定至今仍是困扰矿床学界的难题[7-8]。因此,大部分学者都采用间接方法获取金矿的形成年龄，如测定含金石英脉中的热液锆石的年龄[8]。为此,必须建立标志性地质体与成矿作用的内在联系[7]。根据透岩浆流体成矿理论,成矿流体体系与岩浆体系是一对紧密相关的地质体系[9],它们因耦合而同时侵位,因解耦而分别发生成矿作用与成岩作用。这种解释有效地阐明了大规模成矿作用往往与小岩体有关[10]的深层原因。据此,可以利用相关火成岩的定年数据阐明成矿作用的准确年龄。

本文选择冀东唐杖子和牛心山 2 个与金成矿作用有关的侵入体作为测年对象，结合前人的研究成果，试图阐明冀东地区早燕山期金成矿作用的准确年龄,为进一步的区域成矿预测提供年代学约束。

1　地质概况

冀东金矿主要产于古老的变质岩中，总体沿着马兰峪复背斜展布，因而许多学者认为金成矿作用与古老变质岩系密切相关[2,5]。但是,绝大多数金矿床(矿点)的附近都有火成岩产出(如唐杖子金矿、金厂峪金矿),或者矿体直接产于火成岩中(如峪耳崖金矿、牛心山金矿),可见小体积的火成岩是一个重要的控矿因素。因此,本文选择马兰峪复背斜北缘的唐杖子金矿和腹部的牛心山金矿，试图通过火成岩年代学研究阐明其成矿年龄。

唐杖子金矿:该矿位于河北省宽城县县城附近,燕山造山带马兰峪复背斜的北缘，宽城中生代断陷盆地的东南缘(图 1)。区内出露地层简单,主要是中元古界长城系常州沟组厚层状石英砂岩、石英岩和串岭沟组薄层含铁细砂岩、泥质粉砂岩、页岩,岩层呈单斜产出。金矿化带产于北东东向构造破碎带和角砾岩带中,长约 3000m,宽约 25m。按矿体产出特征分 2 种类型:一是产在构造破碎带内,二是赋存在隐爆角砾岩筒中。区内岩浆活动发育,从基性至酸性均有出露,但主要为花岗斑岩,呈岩株、岩脉状产出。本次工作样品(T-1)采自该矿花岗斑岩岩株。

牛心山金矿：牛心山金矿床是冀东地区一个重要的矿床,属中型金矿。该矿分 4 个矿段:牛心山矿段、马尾沟矿段、铍尖矿段和水泉沟矿段,以牛心山矿段为主[6],矿区面积约 35km^2。矿区位于峪耳崖金矿南西 20km 左右，马兰峪复背斜的东部,喜峰口-下板城东西向构造带与北西向冷口-铍尖构造断裂带交会区的遵化深变质绿岩带内。区内出露的地层主要为遵化岩群的斜长角闪岩、斜长角闪片麻岩、含辉石斜长角闪岩等,在矿区西部有中元古界长城系出露。区内岩浆活动强烈,以燕山期酸性侵入体为多,并出露有一系列脉岩,包括辉绿岩脉、微粒闪长岩脉、花岗闪长斑岩脉、石英斑岩脉、闪长玢岩脉、煌斑岩脉等[6]。

牛心山矿段花岗岩体出露面积为 0.35km^2,呈椭圆形,长轴呈北东向,与区域构造线方向一致。花岗岩体由中细粒白色黑云母花岗岩(白色花岗岩)和中粗粒似斑状浅红色黑云母花岗岩(红色花岗岩)组成复式岩体。该岩体与峪耳崖岩体相似。罗镇宽等[11]采用 SHRIMP 锆石 U-Pb 法测得铍尖村附近中细粒黑云母花岗岩岩体的年龄为 172Ma±2Ma，宋瑞先等[12]采用 Rb-Sr 同位素法测得白色花岗岩的年龄为 160 Ma,红色花岗岩为 190Ma。这些测试结果与罗镇宽等[11]采用锆石 SHRIMP U-Pb 法测得的峪耳崖岩体形成年龄(白色花岗岩为 175Ma±1Ma,红色花岗岩 174Ma±3Ma)有明显的差距。

由此可见，对这 2 个金矿床的成矿年龄还有争议,有必要进行进一步的探讨。

2　样品加工及测试方法

本次共测试 3 件样品(T-1、HB-1、HH-1)。T-1 采自唐杖子金矿花岗斑岩岩株,为新鲜基岩。岩石呈灰白色,块状构造,斑状结构,斑晶以石英、钾长石为主,其次为黑云母和斜长石,基质由微细石英和长石类矿物组成。HB-1 和 HH-1 均采自牛心山后怀的牛心山岩体，其中 HB-1 为白色花岗岩,HH-1 为红色花岗岩。二者主要由奥长石、条纹长石、石英、黑云母等组成，区别在于白色花岗岩中除黑云母外还有少量白云母，而红色花岗岩中黑云母含量少于白色花岗岩,条纹长石比白色花岗岩略多。室内将野外采集的样品破碎至 80~120 目，用水淘洗去粉尘后,先用磁铁除去磁铁矿等矿物,再经过电磁方法分离出锆石,最后在双目镜下挑纯。将锆石样品和实验

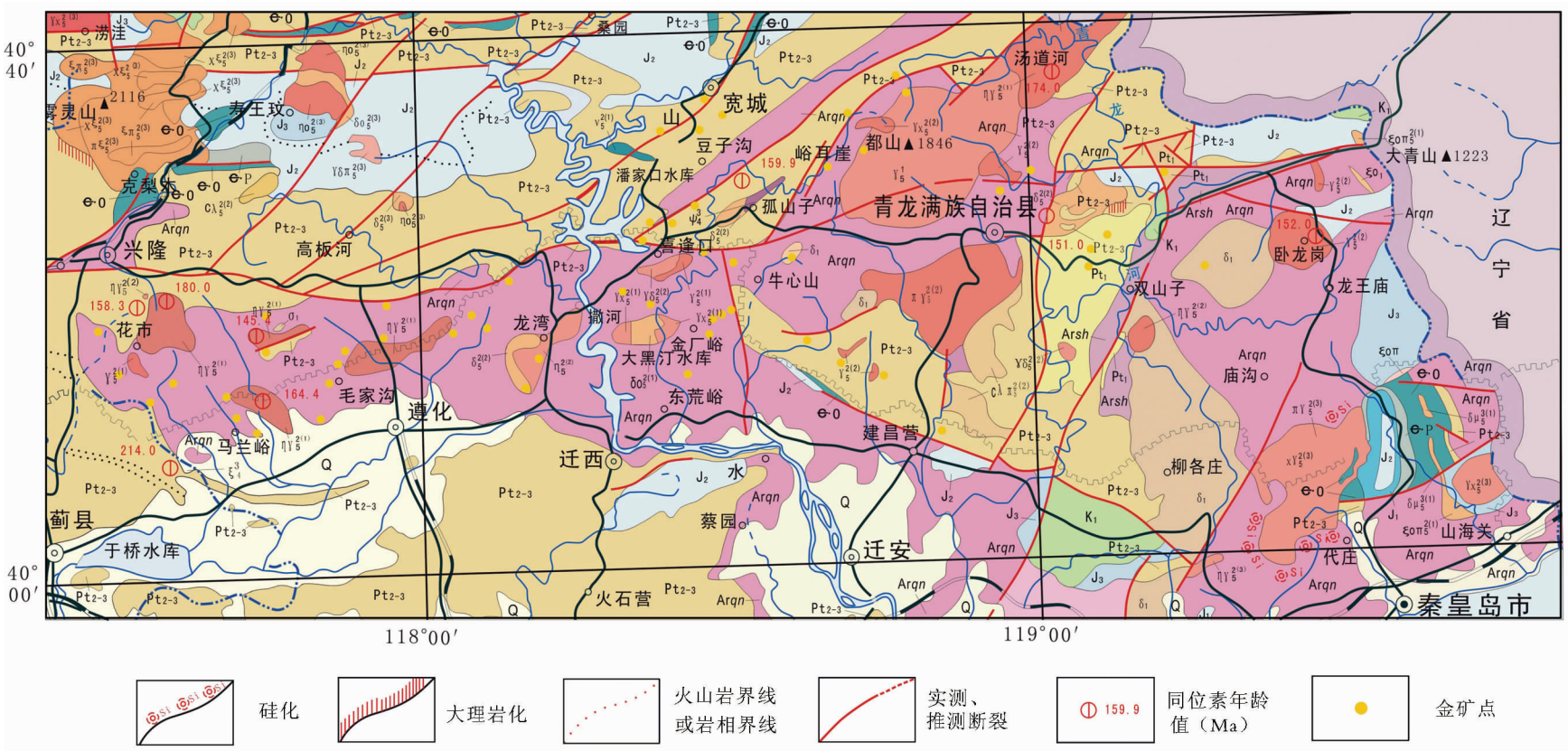


图 1　冀东地区地质图(据《河北省区域地质志》修编)

Fig. 1　Geological map of eastern Hebei Province

Q—第四系;K_1—白垩系下统(滦平群);J_3—侏罗系上统(东岭台群);J_2—侏罗系中统(长山峪群);J_1—侏罗系下统(门头沟群);C-P—古生界石炭系-二叠系;

∈-O—古生界寒武系、奥陶系;Pt_{2-3}—中新元古界长城系、蓟县系、青白口系;Pt_1—古元古界朱杖子群、甘陶河群、东焦群;Ars*h*—太古宇双山子群;Ar*dn*—太古宇单塔子群;

Ar*qn*—太古宇迁西群;γχ—钾长花岗岩;γ—花岗岩;πγ—斑状花岗岩;ηγ—二长花岗岩;γδ—花岗闪长岩;γδπ—花岗闪长斑岩;η—二长岩;ηο—石英二长岩;ξ—正长岩;

πξ—斑状正长岩;ξπ—正长斑岩;ξοπ—石英正长斑岩;χξ—碱性正长岩;δ—闪长岩;δο—石英闪长岩;δμ—闪长玢岩;ν—辉长岩;ο—橄榄岩;

ψ—辉石岩;Cλ—次流纹岩;Cλπ—次石英斑岩;Cα—次安山岩。岩浆岩下标:$_1$—太古宙;$_2^1$—早元古代;$_2^2$中元古代;$_3$—早古生代;$_4^3$—晚古生代;$_5^1$—中生代早期;

$_5^{2(1)}$—中生代燕山旋回第一期;$_5^{2(2)}$—中生代燕山旋回第二期;$_5^{2(3)}$—中生代燕山旋回第三期;$_5^{2(4)}$—中生代燕山旋回第四期

室标样(TEM)置于环氧树脂内,研磨至锆石露出一半,抛光、清洗,制成样品靶,用于透射光、反射光、阴极发光研究和 SHRIMP U-Pb 法年龄测定。锆石 SHRIMP U-Pb 分析选点以透射、反射和阴极发光图像为依据,原则上选择颗粒较大、自形、环带清晰、无包裹体的锆石。

本文中的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄数据是在北京离子探针中心的网络虚拟实验室,通过SHRIMP 远程共享控制系统(SHRIMP Remote Op -eration System, SROS)远程控制位于澳大利亚Curtin 理工大学 (Curtin University of Techonology)的 SHRIMP Ⅱ仪器而获得的。SHRIMP 远程共享控制系统(SROS)由北京离子探针中心、中国计量科学研究院和吉林大学共同研发,可以实现通过 Internet 公共网络,远程控制 SHRIMP Ⅱ仪器,远程选取样品待测点,实现实时远程实验数据输出打印等功能。

前期制样的详细规范和要求参见简平等[13-14]和宋彪等[15]的文献。样品的分析流程及原理参考Compston 等[16]的文献,对分析数据的处理采用 Ludwig 的 SQUID1.02 和 Isoplot(ver2.49)程序[17-18],测试中元素之间的分馏用来自澳大利亚的 TEMORA 锆石(417Ma)进行校正。

3　锆石的特征

从 200 多粒锆石中挑选出约 60 粒形态较自行、透明、无包裹体和杂质的锆石晶体制靶,进行 SHRIMP U-Pb 年龄测定。

锆石具体形态特征如下:在 T-1 和 HH-1 两个样品的 100 多粒锆石中,有 4 粒具有核边结构,其余均为透明—半透明、柱状、无色或略带浅黄色的自形晶体。在 CL 图上,锆石晶体粒径大小一般为 60~80μm,多具有明显的岩浆振荡环带;个别晶体不规则(可能是变质成因的锆石),有扇形分带的现象(图 2)。据此判断它们应以岩浆成因为主[19]。

大量研究表明,岩浆锆石 Th、U 含量较高,Th/U 比值一般大于 0.1(小于 1),变质成因锆石 Th/U 比值小于 0.1[20],关于这一点目前还存在争议[21-22]。本次测定的 2 个样品的锆石 Th/U 比值除 3 个点的 Th/U 比值介于 1~2 之间外,其余均大于 0.1(小于 1)(表 1),都显示了酸性岩的结晶锆石的特征。

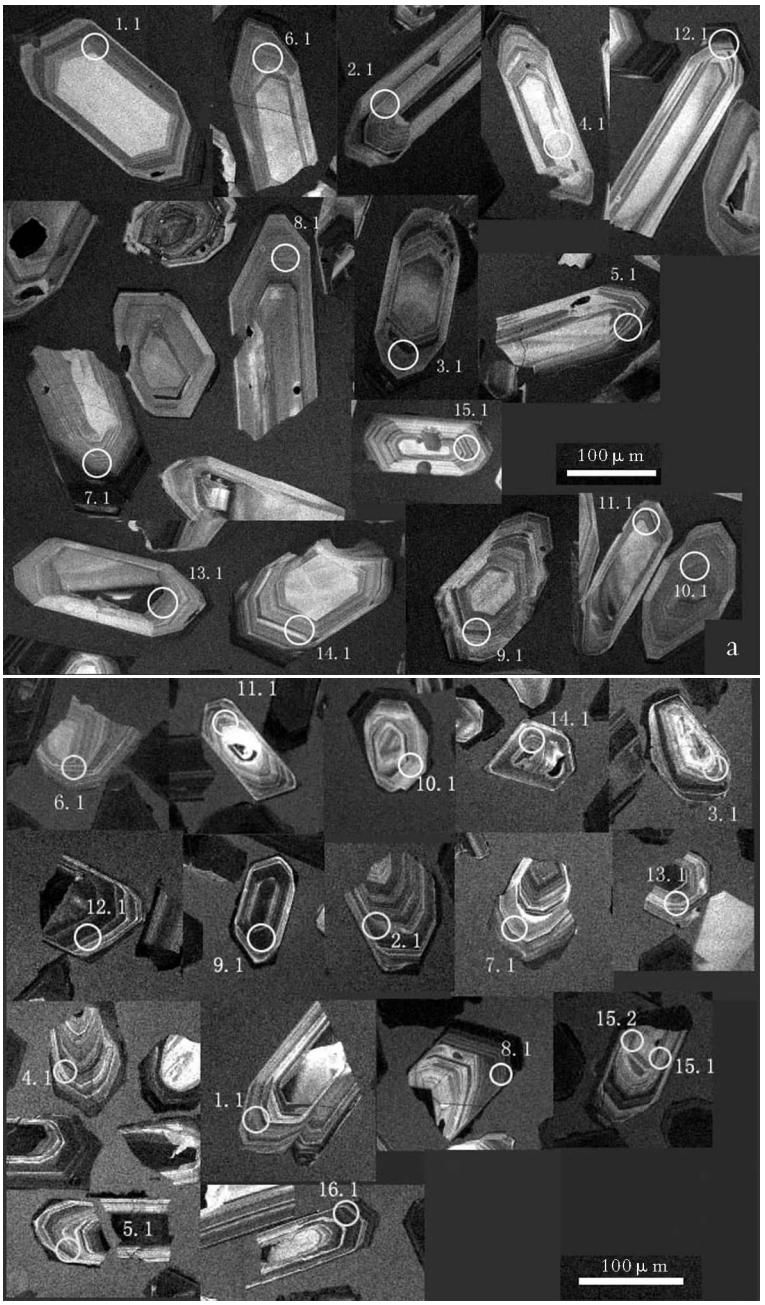


图 2　唐杖子金矿花岗斑岩和牛心山岩体红色花岗岩锆石阴极发光图像

Fig. 2　CL photos of zircons from Tangzhangzi porphyry granite and Niuxinshan red granite from northern Hebei Province

a—样品 T-1:唐杖子金矿花岗斑岩锆石;b—样品 HH-1:牛心山岩体红色花岗岩锆石;圆圈代表 U-Pb 分析点;阴极发光由中国地质科学院电子系统完成

表 1 颗粒锆石 SHRIMP U-Pb 测年分析数据

Table 1 SHRIMP U-Pb dating data of zircon grains

测点	$^{206}Pb_C$ /%	$^{206}Pb^*$ /%	U/10^{-6}	Th/10^{-6}	Th/U	$^{207}Pb/^{235}U$	$^{206}Pb/^{238}U$	$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄/Ma
T-1-1.1	0.19	5.0	220	141	0.64	0.18±0.058	0.0265±0.02	168.5±3.3
T-1-2.1	1.16	3.5	144	80	0.56	0.16±0.082	0.0277±0.021	176.2±3.6
T-1-3.1	0.45	7.3	312	161	0.52	0.17±0.051	0.0272±0.019	173.3±3.3
T-1-4.1	3.54	1.1	46	41	0.88	0.11±0.275	0.0270±0.028	171.7±4.7
T-1-5.1	0.18	8.7	359	233	0.65	0.19±0.031	0.0282±0.019	179.0±3.3
T-1-6.1	0.52	4.1	186	150	0.81	0.1±0.059	0.0255±0.02	162.1±3.2
T-1-7.1	0.32	25.2	1038	473	0.46	0.18±0.029	0.0282±0.018	179.3±3.2
T-1-8.1	0.35	4.7	213	134	0.63	0.17±0.052	0.0254±0.02	161.5±3.1
T-1-9.1	1.37	3.3	148	245	1.65	0.16±0.12	0.0257±0.024	163.8±3.8
T-1-10.1	0.64	5.2	226	137	0.61	0.17±0.047	0.0265±0.023	168.7±3.9
T-1-11.1	0.39	4.8	208	154	0.74	0.18±0.046	0.0269±0.02	171.2±3.4
T-1-12.1	0.34	20.5	871	549	0.63	0.18±0.033	0.0273±0.018	173.8±3.1
T-1-13.1	0.82	3.6	152	100	0.66	0.17±0.072	0.0272±0.021	173.3±3.5
T-1-14.1	0.40	3.1	131	111	0.85	0.18±0.248	0.0272±0.025	173.3±4.3
T-1-15.1	1.07	4.2	185	386	2.09	0.15±0.088	0.0264±0.02	168.0±3.4
HH-1-1.1	0.33	8.4	355	267	0.75	0.18±0.037	0.0275±0.019	174.9±3.2
HH-1-2.1	0.56	15.2	652	255	0.39	0.17±0.029	0.0269±0.018	171.3±3.1
HH-1-3.1	0.64	7.1	294	164	0.56	0.18±0.06	0.0278±0.019	176.9±3.4
HH-1-4.1	0.50	16.6	728	376	0.52	0.16±0.04	0.0264±0.018	167.7±3.0
HH-1-5.1	0.16	19.8	830	438	0.53	0.18±0.027	0.0278±0.018	176.7±3.2
HH-1-6.1	0.32	6.4	269	168	0.63	0.18±0.042	0.0276±0.019	175.6±3.3
HH-1-7.1	0.60	7.3	309	254	0.82	0.17±0.078	0.0272±0.019	172.9±3.3
HH-1-8.1	15.60	15.7	839	416	0.50	0.11±0.0312	0.0183±0.023	117.6±2.7
HH-1-9.1	0.08	53.6	2261	2208	0.98	0.19±0.02	0.0275±0.018	175.2±3.1
HH-1-10.1	0.20	6.4	275	156	0.57	0.18±0.041	0.0270±0.019	171.7±3.3
HH-1-11.1	0.16	14.0	624	433	0.69	0.18±0.035	0.0261±0.018	166.0±3.0
HH-1-12.1	0.11	39.0	1649	676	0.41	0.19±0.022	0.0275±0.018	174.7±3.1
HH-1-13.1	0.81	13.8	562	201	0.36	0.20±0.059	0.0284±0.019	180.3±3.3
HH-1-14.1	0.31	13.1	563	482	0.86	0.18±0.031	0.0269±0.018	171.3±3.1
HH-1-15.2	13.63	7.5	360	246	0.68	0.11±0.0416	0.0209±0.037	134.2±4.9
HH-1-16.1	0.37	29.8	1316	1505	1.14	0.19±0.033	0.0263±0.018	167.3±3.0

注:①$^{206}Pb^*$为扣除普通 Pb 后放射性成因 Pb 同位素含量,误差均为 1δ;②表中 T-1-8.1 与 HH-1-9.1$^{206}Pb/^{238}U$ 表面年龄误差相近是由于后者 U 含量和 ^{206}Pb (扣除普通 Pb) 的丰度均比前者高 10 倍, 这 2 个点的原子比 $^{206}Pb/^{238}U$ 大小相近,由 $^{206}Pb/^{238}U$ 计算出的年龄误差很可能会相近,误差由于绝对数值增大会减小

4 锆石 SHRIMP U-Pb 分析结果

所测锆石的 U、Pb 含量、同位素比值和表面年龄列于表 1。在表面年龄统计时,根据同位素演化特点, 小于 500Ma 的年龄以 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄相对可靠,相应的图谱见图 3 和图 4。

2 组锆石样品的年龄测试点基本都位于谐和线上,$^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均年龄值 T-1 为 173Ma±2Ma (MSWD=1.3),HH-1 为 172.8Ma±1.7Ma(MSWD=1.7)。T-1 表面年龄区间为 161.5~179.0Ma,与平均年龄基本一致,表明不同的锆石并未出现较大差别的年龄值,测试结果是可信的。HH-1 测试点中 HH-1-

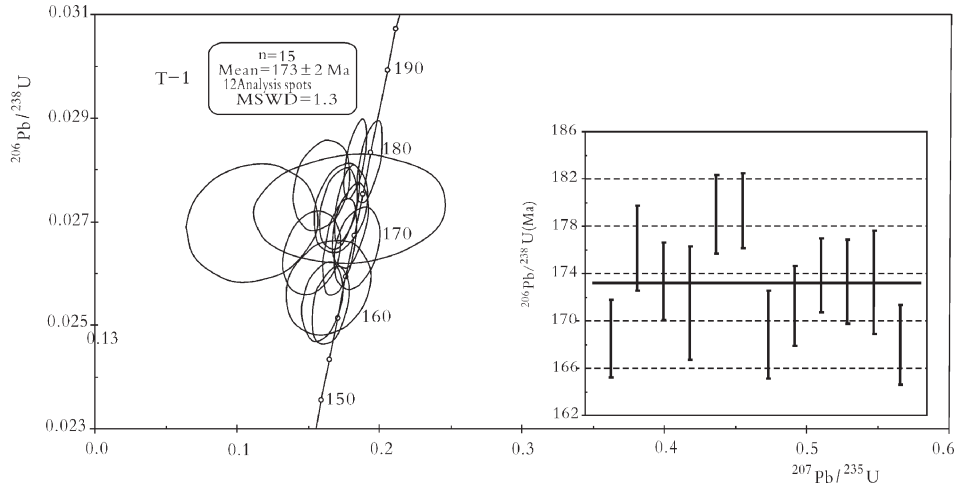


图 3　冀东唐杖子金矿花岗斑岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄图谱

Fig. 3　Zircon SHRIMP U-Pb isotopic age diagram of porphyry granite from Tangzhangzi gold mine, eastern Hebei

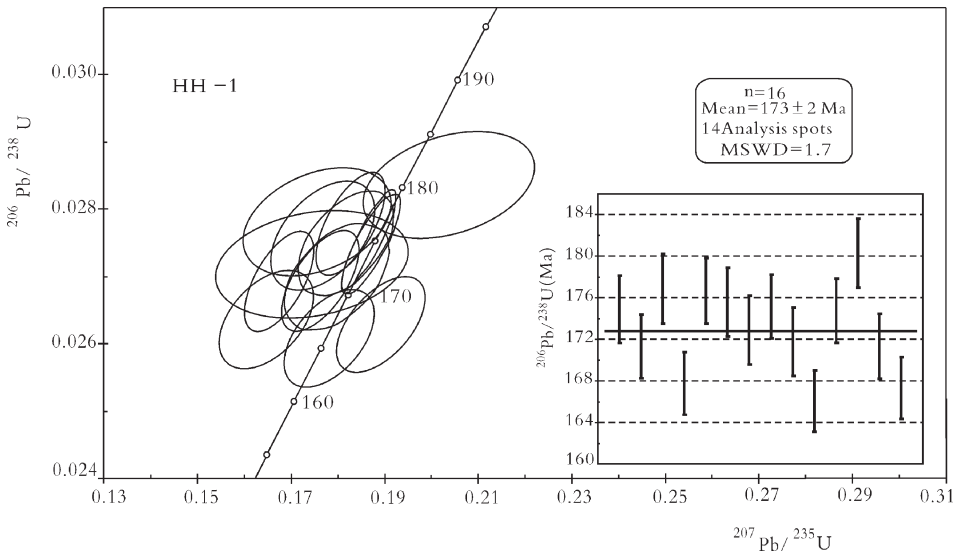


图 4　冀东牛心山岩体红色花岗岩中锆石 SHRIMP U-Pb 年龄图谱

Fig. 4　Zircon SHRIMP U-Pb isotopic age diagram of Niuxinshan red granite, eastern Hebei

8.1 有杂质,HH-1-15.2 较破碎，粒径小造成了测点束斑直径超出了锆石的范围，这些都可能产生 Pb 的丢失,从而使年龄偏小,其他的测试结果都落在谐和线上或附近,与平均值相当,说明结果也是可信的,与前人的结果也是大体吻合的。本文测得的年龄结果可能反映了燕山早期挤压环境下强烈的区域性岩浆侵入和火山活动事件的信息。

5　讨论与结论

冀东地区大地构造上属华北地台北缘东段,经历了相当复杂的地质演化过程，是中国古老地体最早出现的地区之一,地壳演化程度较高,变质岩和花岗质岩类发育,也是中国铁矿、金矿的富集区之一。此次对峪耳崖花岗岩体和牛心山花岗岩体锆石年龄的测定结果表明，岩体侵位时间是中侏罗世燕山运动早中期。本文得出了以下几点初步认识。

(1)本次工作采用 SHRIMP 锆石 U-Pb 法测得唐杖子金矿花岗斑岩岩株的形成年龄为 173 Ma±2Ma(MSWD=1.3),笔者认为这也是隐爆角砾岩形成的时间及唐杖子金矿的形成时间下限。该年龄

与峪耳崖岩体 174Ma±3Ma[6]在误差范围内一致，属燕山早中期，可以认为是同一岩浆活动的产物。

(2)本次工作的第二个目的是厘定牛心山白色花岗岩和红色花岗岩的形成年龄，但遗撼的是 HB-1(白色花岗岩)因 U 含量高未测出可信的结果，但 HH-1(红色花岗岩)测得的年龄 173Ma±2Ma (MSWD=1.7)与峪耳崖红色花岗岩 174Ma±3Ma、牛心山岩体 172Ma±2Ma[11]相吻合，根据野外红色花岗岩穿切白色花岗岩这一地质现象和峪耳崖白色花岗岩(175Ma±1Ma)的年龄值，推断 HB-1(白色花岗岩)的形成时间略早于 HH-1(红色花岗岩)。

(3)本次测试结果证明，唐杖子花岗岩岩株、牛心山花岗岩体与峪耳崖岩体同属中生代燕山早中期同一岩浆活动的产物，如果金矿与该活动有关，那么这 3 个矿床就具有成因上的联系，即它们(也许包括更多的矿点)可能由一个热中心分异矿化形成，后经多次地壳活动而形成目前的格局。

(4)根据上述分析，在下一步找矿实践中，应加强研究这些金矿在形成时的构造通道，这些部位将是金矿成矿的有利部位。

致谢：感谢 Curtin 理工大学高昊先生在装载样品和仪器调试、监控方面提供的帮助，感谢北京离子探针中心张维和中国地质科学院地质研究所王军、翟庆国博士在远程实验和数据处理方面给予的帮助。

参考文献

[1]赵海玲，邓晋福，许立权，等.冀东地区中生代花岗岩、深部过程与金矿[J].桂林工学院学报,2001,21(1):20-26.

[2]李俊建,沈保丰,翟安民,等.冀东地区金矿床类型及其地质特征[J].前寒武纪研究进展,2002,5(2):73-79.

[3]曲以秀，刘志国.冀东燕山期花岗岩成因及其与金矿化的关系[J].长春地质学院学报, 1995,4(4): 393-427.

[4]吴珍汉,张景学.冀东宽城-青龙-金厂峪金矿集中区早燕山期构造应力场及其对金矿化的控制作用[J].地质力学学报,1998,(1):51-57.

[5]常全明，孔凡祉.冀东地区内生金矿床成矿特征及找矿方向[J]. 地质找矿论丛,1999,4(1):13-21.

[6]李俊建，沈保丰，翟安民，等.冀东地区金矿地质[M].北京：地质出版社，2004：1-133.

[7]魏俊浩,刘丛强,刘国春.金矿测年方法讨论及定年中存在的问题[J].地学前缘,2003,(2):319-326.

[8]毕诗健,李建威,赵新福.热液锆石 U-Pb 定年与石英脉型金矿成矿时代:评述与展望[J].地质科技情报,2008,(1):69-76.

[9]罗照华,莫宣学,卢欣祥，等.透岩浆流体成矿作用——理论分析与野外证据[J].地学前缘,2007,(3):165-183.

[10]汤中立，李小虎.两类岩浆的小岩体成大矿[J].第八届全国矿床会议论文集，矿床地质，2006,(增刊):35-38.

[11]罗镇宽,裘有守,关康,等.冀东峪耳崖和牛心山花岗岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年及其意义[J].矿物岩石地球化学通报,2001,20(4)：278-285.

[12]宋瑞先，王有志. 河北金矿地质[M].北京：地质出版社，1994:1-406.

[13]简平，刘敦一，孙晓猛.滇西北白马雪山和鲁甸花岗岩基 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义[J].地球学报，2003，24(4)：337-342.

[14]简平，刘敦一，孙晓猛.滇川西部金沙江石炭纪蛇绿岩 SHRIMP 测年：古特提斯洋壳演化的同位素年代学制约[J].地质学报，2003，77(2)：217-228.

[15]宋彪，张玉海，万渝生，等.锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论[J].地质论评，2002，48(增刊)：26-30.

[16]Compston W，Williams I S，Kirschvink J L，et al.Zircon U-Pb ages of early Cambrian time-scale[J]. J. Geh. Soc., 1992, 149：171-184.

[17]Ludwig K R. Using Isoplot/EX, Version 2: A geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkley Geochronological Center Special Publication 1a,1999: 47.

[18]Ludwig K R. Squid 1.02: A user manual[M]. Berkley Geochronological Center Special Publication 2, 2001: 19.

[19]武汉地质学院岩矿教研室. 结晶学与矿物学[M].北京:地质出版社,1979:87-90.

[20]Rubatto D, Gebauer D. Use of cathodoluminescence for U-Pb zircon dating by IOM Microprobe: Some examples from the western Alps. cathodoluminescence in geoscience[M]. Springer-Verleg Berlin Heidelberg, Germany, 2000:373-400.

[21]Belousova E, Suzanne G W, Fisher Y. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of sources rock type[J]. Contrib. Mineral. Petrol., 2002, 143: 602-622.

[22]Hoskin P W O, Ireland T. Rare earth element chemistry of zircon and its use as a provenance indicators[J]. Geology, 28(7): 627-630.