

陈国建, 张伟波, 刘江涛. 福建省泰宁县何宝山金矿床长兴岩体锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 中国地质, 2015, 42(2): 547-555.

Chen Guojian, Zhang Weibo, Liu Jiangtao. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and geological features of Changxing intrusion in the Hebaoshan gold deposit, Taining County, Fujian Province[J]. Geology in China, 2015, 42(2): 547-555(in Chinese with English abstract).

## 福建省泰宁县何宝山金矿床长兴岩体 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及其地质意义

陈国建<sup>1</sup> 张伟波<sup>2</sup> 刘江涛<sup>2</sup>

(1. 福建省闽北地质大队, 福建 福州 350002; 2. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037)

**摘要:** 长兴钾长混合花岗岩体与何宝山金矿床的成矿作用关系密切。何宝山金矿床的成矿作用表现出多期次、多阶段的特点, 加里东晚期长兴岩体的侵入活动促进了金矿床成矿物质早期的迁移和富集, 印支晚期—燕山早期的构造—岩浆活动叠加成矿。文中对区内加里东期主要侵入岩体进行了锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素定年研究, 得出长兴岩体的成岩年龄为(437.1±1.3) Ma, 黑云母石英闪长岩成岩年龄为(436.6±1.1) Ma, 黑云母花岗闪长岩脉成岩年龄为(427.1±1.4) Ma, 从而确定金矿床成矿期上限, 为进一步成矿作用研究提供科学依据。

**关键词:** 何宝山金矿床; 长兴岩体; U-Pb 同位素年代; 成矿时限

中图分类号:P597;P618.51 文献标志码:A 文章编号: 1000-3657(2015)02-0547-09

### LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and geological features of Changxing intrusion in the Hebaoshan gold deposit, Taining County, Fujian Province

CHEN Guo-jian<sup>1</sup>, ZHANG Wei-bo<sup>2</sup>, LIU Jiang-Tao<sup>2</sup>

(1. North Fujian Geological Party, Fuzhou 350002, Fujian, China;

2. Development and Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China)

**Abstract:** The Changxing potash feldspar migmatitic granite is related to the mineralization in the Hebaoshan gold deposit. The mineralization in the Hebaoshan gold deposit shows multi-period and multi-stage characteristics, and the intrusion activities of Changxing potash feldspar migmatitic granite in the late Caledonian promoted the early period migration and enrichment of the ore-forming elements in the gold deposit and the tectonic-magmatic activity of the late Indosinian to early Yanshanian superimposed mineralization. The authors made a detailed chronological study of the main intrusive rocks formed in the Caledonian period. In-situ zircon U-Pb dating was performed with LA-ICP-MS, and reliable  $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$  age data of zircons were obtained. The results yielded concordant age of (437.1±1.3) Ma for potash feldspar migmatitic granite, (436.6±1.1) Ma for biotite quartz diorite and (427.1±1.4) Ma for biotite granite diorite vein. The age data constrain the upper limitation of the metallogenic period, thus having great geological implications for further mineralization research.

收稿日期: 2014-12-23; 改回日期: 2015-01-29

基金项目: 中国地质调查局项目(1212011085534)资助。

作者简介: 陈国建, 男, 1964年生, 本科, 高级工程师, 从事矿业和区域矿产调查工作; E-mail: 297218164@qq.com。

**Key words:** Hebaoshan gold deposit; Changxing intrusion; U-Pb isotopic age; mineralization time limitation

**About the first author:** CHEN Guo-jian, male, born in 1964, senior engineer, mainly engages in mineral exploration and regional geological survey; E-mail: 297218164@qq.com.

## 1 引 言

武夷成矿带是福建省重要的金成矿远景区之一,目前已发现矿产110多种,大中型矿床达数百处<sup>[1]</sup>。何宝山金矿床位于该成矿带中段,中心地理坐标为117°11'35"E, 26°55'07"N,距泰宁县城约3 km。自20世纪60年代发现以来,已累计探明金资源量超过20 t,达到大型金矿床的规模。

前人对何宝山矿床的地质特征、成矿时代、矿床成因及找矿方向等方面进行过大量的研究<sup>[2-11]</sup>,取得丰硕成果。但关于成矿时代这个核心问题不同学者仍存在分歧。部分学者认为何宝山金矿床形成于印支晚期—燕山早期,依据为矿体中的蚀变矿物绢云母K-Ar同位素测年数据180~224.94 Ma<sup>[12]</sup>及含金石英脉<sup>39</sup>Ar-<sup>40</sup>Ar同位素测年数据195.1 Ma<sup>[13]</sup>。另一个观点认为其形成于早震旦世晚期—晚震旦世的裂谷火山活动期,依据主要为基础矿床地质的研究结合矿石中的方铅矿Pb的模式年龄811Ma、820 Ma<sup>[14]</sup>。此外,多数研究者认为何宝山金矿床是多期次成矿作用的产物。可以看出,以往用于限定成矿时代的年龄数据主要以蚀变矿物的K-Ar、Ar-Ar同位素年龄,甚至铅的模式年龄为基础,存在较大的误差。且以上年龄数据都集中在对金矿床主成矿期的限定,对成矿作用的起始年限缺乏有效的约束。

区域上出露的侵入岩体与何宝山金矿床具有密切的成因关系<sup>[5]</sup>,目前还未有准确的测年数据。鉴于上述,本文选取长兴钾长混合花岗岩体、黑云母石英闪长岩体和黑云母花岗闪长岩脉样品,开展了岩体、岩脉锆石LA-ICP-MS U-Pb测年工作,通过精确的年龄测定,更有效地确定岩体、岩脉的形成时代,从而进一步确定金矿床成矿期的上限,为何宝山地区成矿作用的研究提供基础资料和新的思路。

## 2 区域及矿区地质概况

何宝山金矿床位于NE向崇安—石城断裂带与

EW向建宁—建瓯构造带交汇部位,闽西北泰宁—政和近EW向成矿带南西段,属武夷隆起带<sup>[15-16]</sup>西部成矿带三湖—五里亭—何宝山金矿成矿远景区。区域内大面积出露中元古代交溪(岩)组变质岩,混合岩化作用强烈,NE向、近NS向断裂构造发育,加里东期、燕山期侵入岩广泛分布。

中元古代交溪(岩)组(P<sub>tj</sub>)由灰—深灰色厚层黑云斜长变粒岩,二长变粒岩夹深灰色薄层黑云石英片岩、黑云变粒岩等组成,原岩主要为中酸性火山凝灰岩夹凝灰质泥砂岩和凝灰质泥岩。矿区内交溪组地层普遍发生区域变质作用和混合岩化作用。地层中金元素平均值达 $16.98 \times 10^{-9}$ ,远高于克拉克值,是本区金的矿源层,也是福建省含金层位之一。

区内自加里东期以来,经历了多期次的构造活动,形成了以断裂构造为主,褶皱构造为辅的构造格局。断裂构造以NE向与NNE向为主,分别属泰宁—三湖NE向断裂带的组成部分或次级断裂和长兴—何宝山断裂带的组成部分或次级断裂。EW向较少,局部出现EW向构造,基本上反映了以变质岩基底为主体的地壳多次活动、叠加与改造的地质特征。

区内岩浆岩广泛分布,加里东期岩浆侵入活动较强烈,燕山期较弱。岩性主要为酸性的花岗岩,少见中性岩类,各期侵入岩与区域构造关系密切,有志留纪横坑单元钾长混合花岗岩和黄坑单元黑云母石英闪长岩,均侵入于交溪(岩)组变质岩之中(图1)。闽西北地区加里东期混合花岗岩金丰度值比区内其他各类侵入岩金的丰度高出数倍,可达 $7.5 \times 10^{-9}$ ,其中长兴钾长混合花岗岩体12件样品金平均含量达到 $23.6 \times 10^{-9}$ <sup>[17]</sup>,较矿区内其他侵入岩体明显偏高。区域上大量的金矿床和矿(化)点分布在长兴岩体内外接触带上,这与岩体中存在的高丰度值的金存在密切关系。长兴岩体稀土元素总量为 $102.65 \times 10^{-6} \sim 191.35 \times 10^{-6}$ ,轻重稀土强烈分馏,稀土组成模式为V形明显右倾曲线,具地壳硅铝层重熔形成的花岗岩类的稀土模式。区内脉岩发育,分布

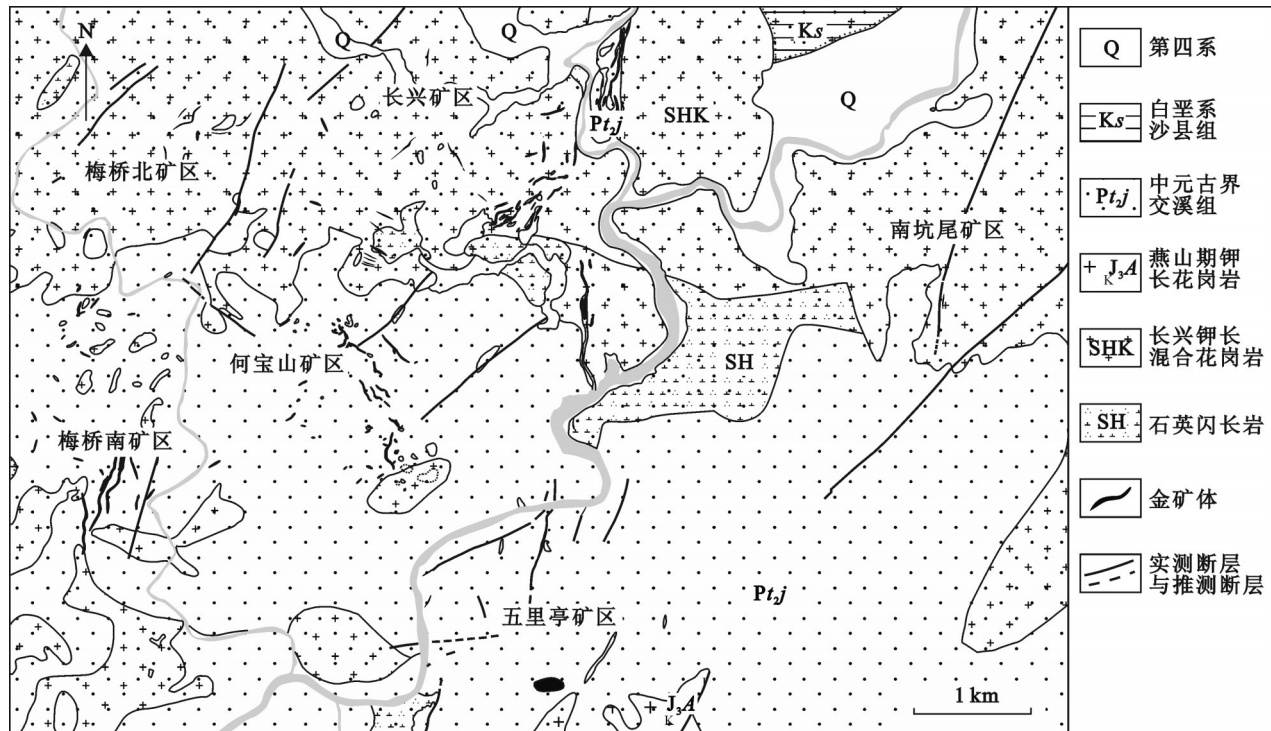


图1 泰宁县何宝山金矿床地质简图

Fig.1 Sketch geological map of the Hebaoshan gold deposit, Taining, Fujian

较广, 主要分布于变质岩和钾长混合花岗岩中, 岩性主要为伟晶岩、花岗伟晶岩、酸性脉岩和石英脉, 局部见有闪长岩、闪长玢岩, 脉宽数十厘米至数米, 展布方向以NE向为主。

### 3 矿床地质特征

何宝山矿床划分为长兴矿区、何宝山矿区、梅桥北矿区、梅桥南矿区、五里亭矿区、南坑尾矿区等6个矿区(图1)。区内共圈定矿体200余个, 金矿化主要产于长兴混合花岗岩内外接触带, 受断裂构造控制明显, 矿体、矿化蚀变体主要呈大透镜状或扁豆状、脉状产于断裂构造破碎带中, 具尖灭再现、膨大收缩特征。矿体产状变化较大, 走向以NW 330°~300°为主, 部分为NE走向, 倾向NE或NW, 倾角30°~54°, 单矿体长80~560 m, 厚度变化范围为1~10.6 m, 控制倾向斜深43~264 m<sup>[13]</sup>。目前圈定的矿体金品位变化较大, 在 $1 \times 10^{-6}$ ~ $35.20 \times 10^{-6}$ 。

矿石类型主要分为4种: (1)黄铁矿-黄铜矿-石英细脉网脉状型, 矿化较好, 金矿物颗粒出现于石英内、黄铁矿裂隙内, 或与黄铜矿连生; (2)黄铁矿-

方解石-石英-黄铜矿型, 以脉状、团块状产出, 金见于方解石、石英及黄铁矿裂隙内; (3)块状黄铁矿-黄铜矿-(石英)型, 金分布于黄铁矿裂隙内, 或与黄铜矿连生; (4)细脉-浸染状黄铁矿-石英-绢云母型, 金矿化不强, 主要出现于黄铁矿裂隙内。矿石矿物主要有黄铁矿、黄铜矿, 次为磁铁矿、赤铁矿、磁黄铜矿、闪锌矿、方铅矿、斑铜矿、辉铜矿、铜蓝、针硫铋铅矿等, 脉石矿物主要为石英、绢云母、条纹长石、微斜长石、钠长石、黑云母、白云母、绿泥石、方解石等。矿石结构主要有他形粒状结构、自形一半自形粒状结构、不规则粒状结构、粒状结构、碎裂结构、包含结构, 次为交代假象结构、交代镶边结构、针状结构等。构造主要有斑点-斑杂状构造、块状构造、不规则脉状、团块状构造、脉状-网脉状构造、浸染状构造、细脉浸染状构造, 少数为角砾状构造。

矿体顶底板围岩以钾长混合花岗岩、混合质黑云斜长变粒岩为主, 局部地段为碎裂岩和伟晶岩。矿体对围岩的选择不十分明显, 但与控矿构造及裂隙带关系密切, 所有的矿体都赋存于构造破碎带或其次级裂隙带中。围岩蚀变主要有2期, 早期以绢云母化为

主,伴有黄铁矿化和金矿化,构成金矿化和蚀变的基础;后期主要有绿泥石化、硅化、绢云母化、碳酸盐化、黄铁矿化、黄铜矿化,并伴有强烈金矿化<sup>[4]</sup>。

#### 4 样品采集与分析方法

本次研究用于锆石定年的钾长混合花岗岩样品(HWH1)取自长兴岩体边部,地理坐标为117°13'58.88" E, 26°56'47.84" N。长兴岩体呈浅灰白色—浅肉红色,其中基体具中细粒鳞片花岗变晶结构特征,具明显交代蚕食结构、交代蠕英结构等,块状构造。成分以钾长石为主(35%~50%),斜长石(5%~15%)、石英(20%~35%)、云母(10%~15%)为次。从钾长花岗岩样品中分选出的锆石多呈等轴状—长柱状,晶形较为完整,晶面比较干净,粒度中等,在80~150  $\mu\text{m}$ ,大部分在120  $\mu\text{m}$ 左右,发育韵律环带结

构,具有明显的岩浆锆石特点(图2-a)。

黑云母石英闪长岩样品(HZK2)取自猛坑大桥河中间ZK1钻孔35 m处。黑云母石英闪长岩岩体在矿区内呈岩瘤状不规则产出。岩石呈灰白—浅灰色,矿物粒径1~6 mm,中细粒—中粗粒粒状结构,块状构造,主要由斜长石(50%~55%)、石英(15%~20%)、黑云母(15%~20%)及少量角闪石、钾长石(<10%)组成。锆石样品多呈等轴状—长柱状,晶形较为完整,晶面比较干净,粒度中等,在50~110  $\mu\text{m}$ ,大部分在100  $\mu\text{m}$ 左右,发育韵律环带结构,具有明显的岩浆锆石特点(图3-a)。

黑云母花岗闪长岩脉样品(HZK3)取自ZK13808钻孔282 m处。闪长岩脉穿插在钾长混合花岗岩体内,岩石呈灰色—肉红色,中粗粒花岗结构,块状构造。从黑云母花岗闪长岩样品中分选出

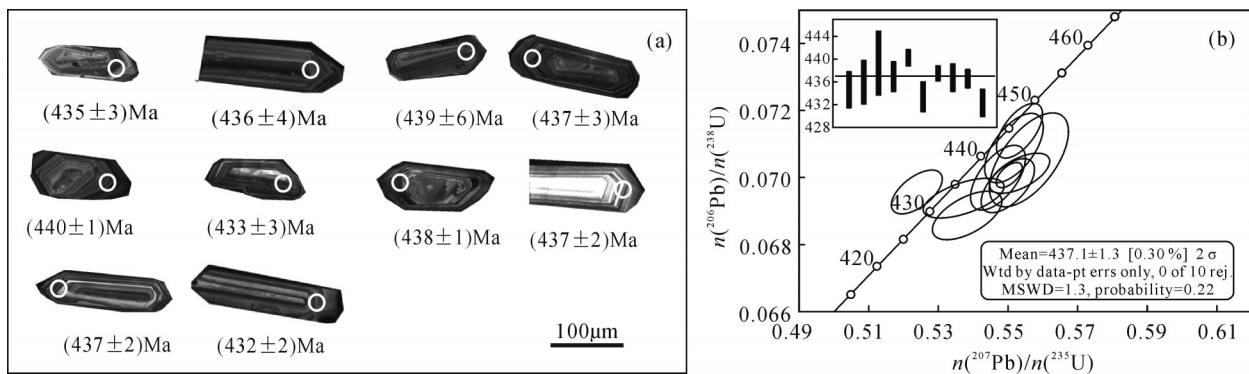


图2 长兴钾长混合花岗岩锆石 CL 图像(a)和 U-Pb 测年谐和图解(b)(HWH1)

Fig.2 CL images of zircon and U-Pb concordia diagram, weighted mean model age diagram of Changxing potash feldspar migmatitic granite from the Hebaoshan ore district (sample HWH1)

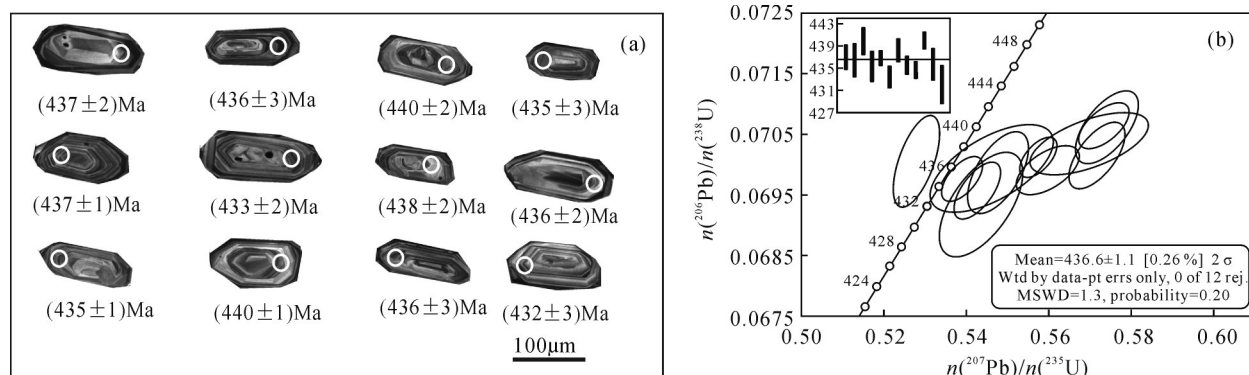


图3 黑云母石英闪长岩锆石 CL 图像(a)和 U-Pb 测年谐和图解(b)(HZK2)

Fig.3 CL images of zircon and U-Pb concordia diagram, weighted mean model age diagram of the biotite quartz diorite from the Hebaoshan ore district (sample HZK2)

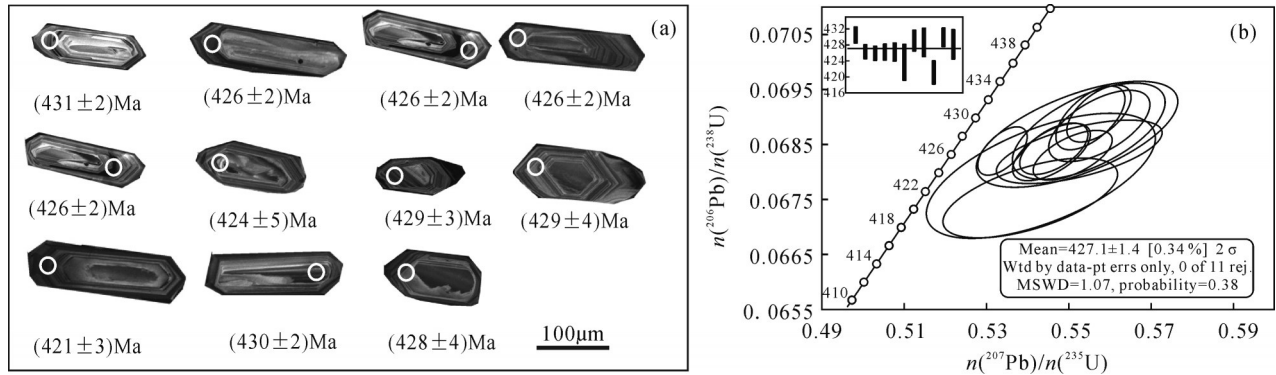


图4 黑云母花岗闪长岩锆石 CL 图像(a)和U-Pb 测年谐和图解(b)(HZK3)

Fig.4 CL images of zircon and U-Pb concordia diagram, weighted mean model age diagram of the biotite granite diorite from the Hebaoshan ore district (sample HZK3)

的锆石多呈等轴状—长柱状,晶形较为完整,晶面比较干净,粒度中等,在60~150 μm,大部分在120 μm左右,发育韵律环带结构,具有明显的岩浆锆石特点(图4-a)。

样品分选采用常规方法进行粉碎,用浮选和电磁选方法进行分选,再在双目镜下挑选出晶形和透明度较好的锆石颗粒作为测定对象。用双面胶将挑选出的锆石粘附,再用无色透明的环氧树脂充分固定,最后磨制抛光使锆石内部得以充分暴露然后进行锆石CL显微图像和LA-ICP-MS分析。

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年测试分析在中国地质科学院矿产资源研究所 MC-ICP-MS 实验室完成,锆石定年分析所用仪器为 Finnigan Neptune 型 MC-ICP-MS 及与之配套的 Newwave UP213 激光剥蚀系统。激光剥蚀所用斑束直径为 25 μm,频率为 10 Hz,能量密度约为 2.5 J/cm<sup>2</sup>,以 He 为载气。均匀锆石颗粒 n(<sup>207</sup>Pb)/n(<sup>206</sup>Pb)、n(<sup>206</sup>Pb)/n(<sup>238</sup>U)、n(<sup>207</sup>Pb)/n(<sup>235</sup>U) 的测试精度(2s)均为 2% 左右,对锆石标准的定年精度和准确度在 1%(2s)左右。锆石 U-Pb 定年以锆石 GJ-1 为外标,U、Th 含量以锆石 M127(U: 923 × 10<sup>-6</sup>, Th: 439 × 10<sup>-6</sup>, Th/U: 0.475)为外标进行校正<sup>[18]</sup>。数据处理采用 ICPMSDataCal4.3 程序<sup>[19]</sup>,测量过程中绝大多数分析点 n(<sup>206</sup>Pb)/n(<sup>204</sup>Pb) > 1000,未进行普通铅校正。锆石年龄谐和图用 Isoplot3.0 程序获得。详细实验测试过程参见文献[20]。

## 5 分析结果

对长兴钾长花岗岩样品(HWH1)中的10粒锆石进行了LA-ICP-MS U-Pb同位素测年,每粒锆石1

个点,锆石中铀、钍含量变化较大,铀为 46 × 10<sup>-6</sup>~563 × 10<sup>-6</sup>,平均 250 × 10<sup>-6</sup>,钍为 48 × 10<sup>-6</sup>~355 × 10<sup>-6</sup>,平均 161 × 10<sup>-6</sup>,Th/U 比值为 0.11~1.57,平均 0.83,多数大于 0.5,具有岩浆锆石的特点(表1),10个测点可以组成很好的一组年龄数据,其 n(<sup>206</sup>Pb)/n(<sup>238</sup>U) 年龄加权平均值为(437.1 ± 1.3) Ma(MSWD=1.3)(图2-b),代表钾长混合花岗岩的结晶年龄。

对黑云母石英闪长岩样品(HZK2)中的12粒锆石进行了LA-ICP-MS U-Pb同位素测年,每粒锆石1个点,锆石中铀、钍含量变化较大,铀为 39 × 10<sup>-6</sup>~285 × 10<sup>-6</sup>,平均 136 × 10<sup>-6</sup>,钍为 39 × 10<sup>-6</sup>~279 × 10<sup>-6</sup>,平均 136 × 10<sup>-6</sup>,Th/U 比值为 0.71~1.30,平均 0.99,全部大于 0.5,具有岩浆锆石的特点(表1),12个测点可以组成很好的一组年龄数据,其 n(<sup>206</sup>Pb)/n(<sup>238</sup>U) 年龄加权平均值为(436.6 ± 1.1) Ma(MSWD=1.3)(图3-b),代表黑云母石英闪长岩的结晶年龄。

对黑云母花岗闪长岩样品(HZK3)中的11粒锆石进行了LA-ICP-MS U-Pb同位素测年,每粒锆石1个点,锆石中铀、钍含量变化较大,铀为 47 × 10<sup>-6</sup>~134 × 10<sup>-6</sup>,平均 92 × 10<sup>-6</sup>,钍为 46 × 10<sup>-6</sup>~101 × 10<sup>-6</sup>,平均 71 × 10<sup>-6</sup>,Th/U 比值为 0.50~1.43,平均 0.83,多数大于 0.5,具有岩浆锆石的特点(表1),11个测点可以组成很好的一组年龄数据,其 n(<sup>206</sup>Pb)/n(<sup>238</sup>U) 年龄加权平均值为(427.1 ± 1.4) Ma (MSWD=1.07)(图4-b),代表黑云母花岗闪长岩的结晶年龄。

## 6 讨论

### 6.1 成矿作用时间上限

前人通过不同角度对何宝山金矿床进行研究,多

表1 泰宁县何宝山金矿床长兴铜长混合花岗岩(HWH1)黑云母石英闪长岩(HZK2)和黑云母花岗岩长岩(KZK3)锆石LA-ICP-MS U-Pb分析结果  
 Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb analytical data of Changxing potash feldspar migmatitic granite (HWH1), biotite quartz diorite (HZK2) and biotite granite diorite (HZK3) from the Hebaoshan ore district

样品及点号	含量/ $10^6$		Th/U	同位素比值				表面年龄/Ma							
	Pb	$^{232}\text{Th}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$				
												测值	$\pm 1\sigma$	测值	$\pm 1\sigma$
长兴铜长混合花岗岩 (HWH1)															
HWH1-1	100	90	0.83	0.0572	0.0003	0.5500	0.0050	0.069760	0.000547	498	11	445	3	435	3
HWH1-2	223	211	0.96	0.0567	0.0002	0.5471	0.0052	0.069981	0.000643	480	7	443	3	436	4
HWH1-3	358	332	0.61	0.0572	0.0002	0.5561	0.0075	0.070517	0.000937	498	6	449	5	439	6
HWH1-4	390	355	0.63	0.0578	0.0003	0.5590	0.0044	0.070147	0.000449	520	5	451	3	437	3
HWH1-5	147	118	0.61	0.0590	0.0005	0.5740	0.0042	0.070685	0.000236	569	17	461	3	440	1
HWH1-6	195	171	1.57	0.0546	0.0004	0.5239	0.0048	0.069554	0.000440	398	12	428	3	433	3
HWH1-7	202	175	0.98	0.0572	0.0003	0.5539	0.0028	0.070248	0.000221	498	5	448	2	438	1
HWH1-8	61	53	1.14	0.0574	0.0006	0.5535	0.0057	0.070098	0.000396	506	22	447	4	437	2
HWH1-9	89	48	0.11	0.0570	0.0002	0.5503	0.0024	0.070065	0.000256	500	7	445	2	437	2
HWH1-10	76	65	0.84	0.0561	0.0007	0.5373	0.0077	0.069372	0.000397	457	26	437	5	432	2
黑云母石英闪长岩 (HZK2)															
HZK2-1	399	198	0.96	0.0592	0.0004	0.5718	0.0044	0.070145	0.000368	572	12	459	3	437	2
HZK2-2	341	196	1.06	0.0547	0.0003	0.5278	0.0038	0.070053	0.000493	398	15	430	3	436	3
HZK2-3	501	279	0.98	0.0591	0.0006	0.5742	0.0049	0.070623	0.000400	572	22	461	3	440	2
HZK2-4	120	70	0.87	0.0568	0.0004	0.5477	0.0050	0.069873	0.000448	487	13	443	3	435	3
HZK2-5	164	121	0.79	0.0577	0.0003	0.5574	0.0030	0.070114	0.000219	517	11	450	2	437	1
HZK2-6	171	147	1.25	0.0566	0.0003	0.5427	0.0037	0.069559	0.000320	476	11	440	2	433	2
HZK2-7	92	82	0.71	0.0587	0.0009	0.5699	0.0096	0.070347	0.000339	567	33	458	6	438	2
HZK2-8	75	69	0.84	0.0581	0.0005	0.5598	0.0050	0.069904	0.000268	532	14	451	3	436	2
HZK2-9	294	269	1.25	0.0560	0.0003	0.5389	0.0033	0.069761	0.000246	454	11	438	2	435	1
HZK2-10	95	72	0.84	0.0589	0.0004	0.5734	0.0040	0.070642	0.000247	561	13	460	3	440	1
HZK2-11	46	39	1.01	0.0566	0.0009	0.5463	0.0099	0.069931	0.000472	476	40	443	7	436	3
HZK2-12	169	100	1.30	0.0569	0.0006	0.5436	0.0067	0.069331	0.000563	487	22	441	4	432	3
黑云母花岗岩长岩 (HZK3)															
HZK3-1	125	59	0.60	0.0586	0.0005	0.5574	0.0051	0.069067	0.000340	550	19	450	3	431	2
HZK3-2	121	62	0.50	0.0566	0.0003	0.5339	0.0040	0.068372	0.000296	476	18	434	3	426	2
HZK3-3	112	63	0.78	0.0585	0.0006	0.5509	0.0064	0.068305	0.000295	546	24	446	4	426	2
HZK3-4	178	101	1.35	0.0579	0.0006	0.5459	0.0062	0.068355	0.000340	528	24	442	4	426	2
HZK3-5	123	53	0.78	0.0586	0.0014	0.5526	0.0133	0.068361	0.000378	554	52	447	9	426	2
HZK3-6	91	46	0.89	0.0580	0.0018	0.5434	0.0184	0.067938	0.000746	528	69	441	12	424	5
HZK3-7	125	86	0.70	0.0587	0.0008	0.5574	0.0081	0.068835	0.000438	567	30	450	5	429	3
HZK3-8	149	91	1.23	0.0586	0.0012	0.5563	0.0133	0.068760	0.000598	554	44	449	9	429	4
HZK3-9	103	65	0.71	0.0580	0.0014	0.5406	0.0140	0.067514	0.000485	532	51	439	9	421	3
HZK3-10	151	92	0.69	0.0584	0.0005	0.5553	0.0055	0.068971	0.000389	543	17	448	4	430	2
HZK3-11	86	67	1.43	0.0581	0.0015	0.5506	0.0152	0.068679	0.000619	600	56	445	10	428	4

数认为其成矿作用具多期次成矿的特点,早期成矿物质的富集与加里东期的混合岩化作用有关<sup>[4, 17, 21-25]</sup>。流体包裹体数据显示矿床形成环境为中低温弱酸性;硫同位素组成特征显示其既有深源特征,又有浅源特征;矿脉中的石英H-O同位素分析数据则表明成矿溶液介质主要属岩浆水,同时有大量下降水(地下水)参与<sup>[13, 26]</sup>。此外,何宝山金矿床内的大量矿脉就赋存在钾长混合花岗岩内,而赋存在交溪组变质岩地层中的矿脉在空间上距离钾长混合花岗岩体距离0.5~2 km,密切的空间关系表明了长兴岩体与早期成矿作用具有密切联系。

本次测得的钾长混合花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为(437.1±1.3) Ma,基本代表了钾长混合花岗岩的成岩年龄,该年龄数据接近或略早于早期成矿物质初步富集年龄。黑云母石英闪长岩年龄为(436.6±1.1) Ma,而穿插在钾长混合花岗岩体内的黑云母花岗闪长岩脉年龄为(427.1±1.4) Ma。这3组年龄数据表明区内加里东晚期曾爆发了大规模的岩浆活动,形成了区内广泛分布的各类岩体和岩脉。

## 6.2 金成矿作用及演化

结合区域上岩浆-构造演化历史<sup>[27-34]</sup>,何宝山金矿床的成矿物质初步富集开始于距今437 Ma的加里东晚期。加里东期,区域上发生隆起造山活动从而引发大规模的区域变质作用<sup>[21-22]</sup>。强烈的混合岩化作用产生的变质热液初步活化并萃取了交溪组地层中金元素,形成含矿热液,矿区NE向、近SW向、NW向断裂构造为含矿热液迁移、沉淀提供了有利通道和场所,金运移并在适宜的构造部位初步富集。在印支末期-燕山早期,区域上开始发生频繁的构造-岩浆活动,形成区内广泛发育的深成中酸性侵入岩,这些活动提供的热源和流体为地层和变质岩中金等早期沉淀富集的成矿物质再次活化、迁移与成矿提供了必要的热动力条件,含矿热液沿构造断裂向地壳浅部持续运移,在该过程中同时萃取地层与围岩中的金等成矿物质,使热液中的成矿物质含量进一步升高。含矿热液最终进入构造破碎带的有利部位富集成矿,热液沿断裂迁移过程中与围岩发生交代作用,形成了何宝山构造蚀变岩型金矿床。

## 7 结论

(1) 长兴岩体钾长混合花岗岩的锆石 LA-

ICP-MS U-Pb 年龄为(437.1±1.3) Ma(MSWD=1.3),基本代表了钾长混合花岗岩的成岩年龄,该年龄数据为何宝山金矿床成矿期上限。

(2) 黑云母石英闪长岩成岩年龄为(436.6±1.1) Ma (MSWD=1.3),穿插在钾长混合花岗岩体内的黑云母花岗闪长岩脉成岩年龄为(427.1±1.4) Ma (MSWD=1.07)。说明区域上大规模的岩浆侵入活动在加里东晚期爆发。

(3) 何宝山金矿床的成矿作用具有多期次、多阶段的特点。早期(加里东晚期)岩浆活动使成矿物质初步活化和富集,晚期(印支晚期-燕山早期)构造岩浆活动使金元素再次全面活化、迁移和富集,从而叠加成矿。

**致谢:** 野外地质工作得到了中国地质科学院矿产资源研究所陈郑辉博士的帮助,审稿专家及编辑部杨艳老师对论文提出了宝贵修改意见,在此一并致以诚挚的谢意!

## 参考文献(References):

- [1] 陈世忠,黄正清,朱筱婷,等. 武夷山成矿带桃溪环形构造区典型矿床成矿背景[J]. 中国地质, 2013, 40(5): 1569-1582.  
Cheng Shizhong, Huang Zhengqing, Zhu Xiaoting, et al. Magmatism and ore-forming background of the main deposits in Taoxi circular structure along the Wuyishan ore belt[J]. Geology in China, 2013, 40(5): 1569-1582(in Chinese with English abstract).
- [2] 林仟同,苏超. 构造动力地球化学及其与金、银富集成矿关系——以崇安-石城构造带中段为例[J]. 福建地质, 1992, 11(3): 204-212.  
Lin Qiantong, Su Chao. Tectono-dynamic geochemistry and its relationship with gold-silver enrichment and mineralization: An example of the middle segment of Chong'an-Shicheng structural belt[J]. Geology of Fujian, 1992, 11(3): 204-212(in Chinese with English abstract).
- [3] 林仟同. 福建何宝山金矿成因探讨[J]. 福建地质, 1993, 12(4): 239-247.  
Lin Qiantong. On the genesis of Hebaoshan gold ores in Fujian Province[J]. Geology of Fujian, 1993, 12(4): 239-247(in Chinese with English abstract).
- [4] 林仟同,魏孝秋,龚萍. 福建何宝山金矿控矿构造地球化学特征及其剥蚀程度初探[J]. 福建地质, 1994, 13(1): 1-10.  
Lin Qiantong, Wei Xiaohui, Gong Ping. On the geochemical characteristics of ore-controlling structures and denudation of the Hebaoshan gold ores in Fujian Province[J]. Geology of Fujian, 1994, 13(1): 1-10(in Chinese with English abstract).
- [5] 林仟同. 闽西北地区混合花岗岩类型划分及其与金成矿关系[J]. 福建地质, 2010, 29(4): 308-314.

- Lin Qiantong. On the division of migmatitic granites in northwest Fujian and its metallogenic relation with gold ores[J]. *Geology of Fujian*, 2010, 29(4): 308–314(in Chinese with English abstract).
- [6] 翁朝峰. 福建省金矿成矿地质条件与成矿远景[J]. *福建地质*, 1994, 17(1): 24–34.
- Weng Chaofeng. Ore-forming geological conditions and metallogenic perspective of the gold ores in Fujian Province[J]. *Geology of Fujian*, 1994, 17(1): 24–34(in Chinese with English abstract).
- [7] 黄庆敏, 龚萍. 福建邵武—泰宁—建宁金银成矿类型及其找矿方向[J]. *福建地质*, 1998, 17(3): 153–158.
- Huang Qingmin, Gong Ping. Metallogenic types and prospecting direction of gold and silver ores from the Shaowu–Taining–Jianning area, Fujian Province[J]. *Geology of Fujian*, 1998, 17(3): 153–158(in Chinese with English abstract).
- [8] 许美辉. 福建省几种主要金异常的评述[J]. *福建地质*, 2000, 19(4): 205–208.
- Xu Meihui. Discussion on some main gold anomalies in Fujian Province[J]. *Geology of Fujian*, 2000, 19(4): 205–208(in Chinese with English abstract).
- [9] 卢汉堤, 敬荣中, 陈远荣, 等. 福建省何宝山金矿床地质物化探综合找矿预测[J]. *地质与勘探*, 2007, 43(6): 70–75.
- Lu Hanti, Jing Rongzhong, Chen Yuanrong et al. Integrated exploration methods of geology, geophysics and geochemistry for Hebaoshan gold deposit in Fujian Province[J]. *Geology and Prospecting*, 2007, 43(6): 70–75(in Chinese with English abstract).
- [10] 卢汉堤, 耿文辉, 敬荣中, 等. 福建省何宝山金矿床成矿地质条件分析与找矿预测[J]. *矿产与地质*, 2011, 25(6): 447–451.
- Lu Hanti, Geng Wenhui, Jing Rongzhong, et al. Metallogeny and ore forecasting for the Hebaoshan gold deposit in Fujian Province[J]. *Mineral Resources and Geology*, 2011, 25(6): 447–451(in Chinese with English abstract).
- [11] 谢春明. 福建泰宁何宝山金矿控矿构造特征及找矿方向[J]. *福建地质*, 2014, 33(2): 87–93.
- Xie Chunming. Characteristics of ore-controlling structure and ore-searching direction of the Hebaoshan gold deposit in Tangning County, Fujian Province[J]. *Geology of Fujian*, 2014, 33(2): 87–93(in Chinese with English abstract).
- [12] 蔡本俊, 陈柏林, 陈洪新. 崇安—石城构造带中段金矿成矿规律研究[M]. 北京: 地震出版社, 1994.
- Cai Benjun, Chen Bailin, Chen Hongxin. Study on Metallogenic Regularity of Gold Deposit in Middle Chongan–Shicheng tectonic Belt[M]. Beijing: Seismological Press, 1994(in Chinese).
- [13] 黄春鹏. 福建省金矿成矿特征和成矿预测研究[D]. 中国地质大学(北京), 2001: 1–135.
- Huang Chunpeng. Research on the Metallogenic Characteristics and Forecast of Gold Deposits in Fujian Province, China[D]. Beijing: China University of Geoscience, 2001: 1–135(in Chinese with English abstract).
- [14] 姜耀辉, 陈鹤年. 闽西北三种新的金矿成因类型及地质特征[J]. *矿产与地质*, 2000, 14(4): 209–214.
- Jiang Yaohui, Chen Henian. Geological characteristics and three new genesis of gold ore deposit in northwest Fujian Province[J]. *Mineral Resources and Geology*, 2000, 14(4): 209–214(in Chinese with English abstract).
- [15] 杨明桂, 黄水保, 楼法生, 等. 中国东南陆区岩石圈结构与大规模成矿作用[J]. *中国地质*, 2009, 36(3): 528–543.
- Yang Minggui, Huang Shuibao, Lou Fasheng, et al. Lithospheric structure and large-scale metallogenic process in Southeast China continental area[J]. *Geology in China*, 2009, 36(3): 528–543(in Chinese with English abstract).
- [16] 王成辉, 王登红, 黄凡, 等. 中国金矿集区及其资源潜力探讨[J]. *中国地质*, 2012, 39(5): 1125–1142.
- Wang Chenghui, Wang Denghong, Huang Fan, et al. The major gold concentration areas in China and their resource potentials[J]. *Geology in China*, 2012, 39(5): 1125–1142(in Chinese with English abstract).
- [17] 张松林. 福建泰宁长兴金矿床地质特征及成因探讨[J]. *福建地质*, 2010, 29(4): 289–295.
- Zhang Songlin. On the geologic characteristics and genesis of the Changxing gold deposit in Taining County, Fujian Province[J]. *Geology of Fujian*, 2010, 29(4): 289–295(in Chinese with English abstract).
- [18] Nasdala L, Norberg N, Schaltegger U, et al. Plesovice zircon: A new natural reference material for U–Pb and Hf isotopic microanalysis[J]. *Chemical Geology*, 2008, 49: 1–35.
- [19] Liu Y S, Hu Z C, Gao S et al. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA–ICP–MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 2008, 57: 34–43.
- [20] 侯可军, 李延河, 田有荣. LA–MC–ICP–MS 锆石微区原位 U–Pb 定年技术[J]. *矿床地质*, 2009, (4): 481–492.
- Hou KeJun, Li Yanhe and Tian Yourong. In situ U–Pb zircon dating using laser ablation–multi ion counting–ICP–MS[J]. *Mineral Deposits*, 2009, (4): 481–492(in Chinese with English abstract).
- [21] 吴淦国, 张达, 彭润民, 等. 东南沿海成矿带矿床形成的时间演化规律研究[J]. *地学前缘*, 2004, 11(1): 237–247.
- Wu Ganguo, Zhang Da, Peng Runmin et al. Study on the evolution regularity of mineralization ages in Southeastern China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2004, 11(1): 237–247(in Chinese with English abstract).
- [22] 张达, 吴淦国, 高天钧, 等. 闽中地区金属矿床成矿作用及区域成矿模式[J]. *矿床地质*, 2006, 25: 387–390.
- Zhang Da, Wu Ganguo, Gao Tianjun, et al. Mineralization process and metallogenic model of metal deposits in central Fujian Province[J]. *Mineral Deposits*, 2006, 25: 387–390(in Chinese with English abstract).



- [23] 岳来群, 黄春鹏. 福建省金矿床成矿时代特点[J]. 地质与勘探, 2002, 38(4): 17-21.  
Yue Laiqun, Huang Chunpeng. Discussion on the metallogenic epoch of gold deposits in Fujian Province, Southeast China[J]. Geology and Prospecting, 2002, 38(4): 17-21(in Chinese with English abstract).
- [24] 陈柏林. 论华南地区金矿床的成矿时代——兼与王秀璋等“华南加里东期金矿床的基本特征”一文的讨论[J]. 地质科技情报, 2001, 20(3): 47-52.  
Chen Bailin. Discussion on the metallogenic of gold deposits in south China: A concurrent discussion on the paper of Wang Xiuzhang et al.'s "Main characteristics of Caledonian gold deposits in south China" [J]. Geological Science and Technology Information, 2001, 20(3): 47-52(in Chinese with English abstract).
- [25] 陈柏林. 论中国金矿床成矿时代特点[J]. 地质地球化学, 2002, 30(2): 66-73.  
Chen Bailin. A discussion on the metallogenic epoch of gold deposits in China[J]. Geology Geochemistry, 2002, 30(2): 66-73 (in Chinese with English abstract).
- [26] 陈云钊. 闽北地区变质作用基本特征和成矿元素迁移富集规律[J]. 福建地质, 2008, 27(2): 142-155.  
Chen Yunzhao. Basic features of metamorphism and the migration and enrichment law of ore-forming elements in northern Fujian[J]. Geology of Fujian, 2008, 27(2): 142-155(in Chinese with English abstract).
- [27] 潘桂棠, 肖庆辉, 陆松年, 等. 中国大地构造单元划分[J]. 中国地质, 2009, 36(1): 1-28.  
Pan Guitang, Xiao Qinghui, Lu Songnian, et al. Subdivision of tectonic units in China[J]. Geology in China, 2009, 36(1): 1-28 (in Chinese with English abstract).
- [28] 徐先兵, 张岳桥, 贾东, 等. 华南早中生代大地构造过程[J]. 中国地质, 2009, 36(3): 573-593.  
Xu Xianbing, Zhang Yueqiao, Jia Dong, et al. Early Mesozoic geotectonic processes in South China[J]. Geology in China, 2009, 36(3): 573-593(in Chinese with English abstract).
- [29] 肖庆辉, 刘勇, 冯艳芳, 等. 中国东部中生代岩石圈演化与太平洋板块俯冲消减关系的讨论[J]. 中国地质, 2010, 37(4): 1092-1101.  
Xiao Qinghui, Liu Yong, Feng Yanfang, et al. A preliminary study of the relationship between Mesozoic lithosphere evolution in eastern China and the subduction of the Pacific plate[J]. Geology in China, 2010, 37(4): 1092-1101(in Chinese with English abstract).
- [30] Mao Jingwen, Cheng Yanbo, Chen Maohong, et al. Major types and time-space distribution of Mesozoic ore deposits in South China and their geodynamic settings[J]. Mineralium Deposita, 2013, 48(3): 267-294.
- [31] Sun Weidong, Yang Xiaoyong, Fan Weiming, et al. Mesozoic large scale magmatism and mineralization in South China: preface[J]. Lithos, 2012, 150: 1-5.
- [32] Guo Feng, Fan Weiming, Li Chaowen, et al. Multi-stage crust-mantle interaction in SE China: temporal, thermal and compositional constraints from the Mesozoic felsic volcanic rocks in eastern Guangdong-Fujian provinces[J]. Lithos, 2012, 150: 62-84.
- [33] Hu Ruizhong, Zhou Meifeng. Multiple Mesozoic mineralization events in South China—an introduction to the thematic issue[J]. Mineralium Deposita, 2012, 47(6): 579-588.
- [34] Mao Jingwen, Pirajno F, Cook N. Mesozoic metallogeny in East China and corresponding geodynamic settings—an introduction to the special issue[J]. Ore Geology Reviews, 2011, 43(1): 1-7.