

doi:10.3969/j.issn.1007-3701.2015.03.002

湖南七宝山矿床石英斑岩锆石 U-Pb 定年及 Hf 同位素地球化学

胡俊良^{1,2}, 徐德明^{1,2}, 张 鲲¹
HU Jun-Liang^{1,2}, XU De-Ming^{1,2}, ZHANG Kun¹

(1. 中国地质调查局武汉地质调查中心; 2. 中国地质调查局花岗岩成岩成矿地质研究中心, 武汉 430205)

(1. Wuhan Center of China Geological Survey;

2. Research Center of Granitic Diagenesis and Mineralization, China Geological Survey, Wuhan, 430205)

摘要: 湖南浏阳七宝山铜多金属矿床位于钦杭成矿带西南段, 是湘东北规模最大的铜多金属矿床, 矿区内的石英斑岩对成矿贡献非常大。石英斑岩内锆石具有典型岩浆期锆石特征, LA-ICP-MS U-Pb 定年结果为 154.8 ± 1.8 Ma, 代表其形成年龄, 属晚侏罗世岩浆活动产物。岩浆期锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.282120 \sim 0.282539$, 对应的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均为负值, 集中在 $-19.8 \sim -4.9$, 计算的亏损地幔模式年龄 (t_{DM1}) 集中在 $1001 \sim 1596$ Ma, 平均地壳模式年龄 (t_{DM2}) 集中于 $1519 \sim 2450$ Ma, 表明石英斑岩的岩浆源区具有明显壳源特征, 来自于元古代至中元古代地壳的部分熔融。结合岩石学研究, 七宝山矿区内石英斑岩体成因可能是在华南地块受到伊泽奈奇 (Izanagi) 板块向西北俯冲的影响下, 元古代至中元古代地壳部分熔融形成岩浆, 而后岩石圈拆沉和软流圈物质上涌进入岩浆发生不均匀混合在晚侏罗世上侵形成的。

关键词: 石英斑岩; 锆石 U-Pb 年龄; Hf 同位素; 成因机制; 湖南七宝山

中图分类号: P588.13+2; P597

文献标识码: A

文章编号: 1007-3701(2015)03-236-10

Hu J L, Xu D M and Zhang K. Zircon U-Pb dating, Hf isotope of magmatic rocks from Qibaoshan Cu polymetallic deposit, Hunan Province. *Geology and Mineral Resources of South China*, 2015, 31(3): 236 -245.

Abstract: The Qibaoshan Cu-polymetallic deposit in Liuyang is belong to the west section of Qinzhou-Hangzhou metallogenic belt, and it is the largest Cu-polymetallic deposit in northeastern Hunan Province. The quartz-porphyry is on a great contribution of the mineralization of the Qibaoshan Cu-polymetallic deposit. The zircons from quartz-porphyry are typical magmatic zircons. LA-ICP-MS U-Pb dating of the zircons shows the age of 154.8 ± 1.8 Ma, which represents the crystallization age of quartz-porphyry, and indicate it was Late Mesozoic intrusion. The new born zircons have intermediate $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ of $0.282120 \sim 0.282539$, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ of $-19.8 \sim -4.9$, model age of crust t_{DM2} from 1519 to 2450 Ma, indicating that the rock was formed by the partial melting of the Paleoproterozoic to Mesoproterozoic crust. Through the comprehensive study of crystallization age and Hf isotope model age of the zircons, the crustal magma formed the quartz-porphyry was from a mixed magma from the crust source and the mantle source or form a mixed magma with the characteristics of the depleted mantle, which may containing the very old continental crust (the Hadean crust). In $175 \sim 145$ Ma, an extensive rocks related to the porphyry and skarn copper deposit intruded of

收稿日期: 2014-12-24; 修回日期: 2015-03-06.

基金项目: 中国地调局地质矿产调查评价专项项目 (编号: 12120113068000、1212011085405、1212011120956).

第一作者: 胡俊良 (1982—), 男, 助理研究员, 目前从事矿床地球化学研究, E-mail: hjl1982da@163.com.

Qinzhong-hangzhou metallogenic belt. And these rocks were the product of the heyday of the system of temperature increasing and pressure depressing after the Izanagi Plate subducting toward northwest into the South China Block. The study of the geochemical characteristics of the quartz-porphyry before shows that the magma also having the the mantle source. All these data suggest the magma from the partial melting material of Paleoproterozoic to Mesoproterozoic crust or even much older crust was in the magma chamber already, the asthenospheric mantle fluid upwelling into the magma chamber and they mixed inhomogenously by the effects of the delamination of lithosphere and asthenosphere upwelling. And then the magma intruded upward to form the quartz porphyry.

Key words: quartz-porphyry; zircon U-Pb dating; Hf isotopes; petrogenesis; Qibaoshan Cu-polymetallic deposit

钦杭成矿带是在钦杭结合带的基础上提出的。钦杭结合带是指扬子与华夏两大古陆块于晋宁期碰撞拼贴形成的巨型板块结合带。水涛^[1-2]、杨明桂等^[3-4]和徐德明等^[5-6]对钦杭结合带进行了较系统的阐述和研究,明确了“钦州湾至杭州湾为扬子古板块与华夏古板块的结合带(简称钦杭结合带)”的认识。它从西南端广西钦州湾,经湘东和赣中延伸到东北端浙江杭州湾地区,全长近 2000 km,宽 100 ~ 150 km,总体呈反 S 状弧形展布。中国地质调查局资源评价部等^①将其列为全国重点成矿带之一,并划分为两段:东段和西段。东段大体相当于江山-绍兴带分布区域,西段包括南岭及其以南地区。钦杭成矿带西段及其旁侧是华南地区最为重要的 Cu-Pb-Zn-Au 和 W-Sn-Mo-Bi 多金属成矿带,分布着一大批特大型铜金铅锌钽铀矿床^[7-11]。

湖南浏阳七宝山铜多金属矿床位于钦杭成矿带西南段,是湘东北规模较大的铜硫多金属矿床,对其进行详细地研究,对弄清钦杭成矿带西南段矿床成因机制以及类似矿床的对比工作具有十分重要的意义。矿区内发育有较大面积石英斑岩侵入体,据研究,该岩体具有很高的成矿元素含量,与矿产成因关系密切^[12-13]。沈瑞锦和陆玉梅^[14]测得石英斑岩中磷灰石 U-Pb 年龄为 227 Ma,胡祥昭等^[12]所做的全岩 Rb-Sr 等时线年龄为 195 Ma,由于受当时实验条件的限制以及方法本身的局限性,造成同位素年龄可信度较低。本文对矿区内的石英斑岩进行锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年和微区原位(in situ) Hf 同位素分析,不仅能更精确地确定该石英斑岩的年龄,同时也能探讨该岩体的岩石成因、岩浆来源及岩浆演化过程,进而对七宝山铜多金属矿床的成矿时代及矿床成因也能提供进一步分析依据。

1 矿区地质背景及岩体特征

七宝山矿床至今已有五十多年勘探研究历史,从最初认为的铁矿到后来详细勘探的以 S、Cu、Pb、Zn 为主,并伴有 Au、Ag、Ga、In、Te、Cd、Mo、Bi 和 U 等有用元素的大型多金属矿床。

矿区内出露地层简单,由老至新依次为前震旦系冷家溪群(Ptm)、震旦系莲沱组(Z₁l)、下石炭统大塘阶(C₁d),以及中上石炭统壶天群(C_{2,3}ht),如图 1。冷家溪群为一套灰绿色、紫红色千枚状板岩和千枚岩等组成的绿片岩相浅变质岩系,分布在矿区的南北两侧;莲沱组分布在矿区北侧边缘,由灰绿色、浅红色变质砂质板岩及含砾石英砂岩组成,与下伏冷家溪群呈角度不整合接触。大塘阶为一套紫红色、浅红色页岩、粉砂岩、石英砾岩,零星分布于矿区北侧;壶天群为灰白色厚层状泥晶灰岩、白云质灰岩、白云岩,广布于矿区的中部及西部,石炭纪底层与下伏地层呈明显的角度不整合接触。

矿区构造复杂,总体构造为一倒转向斜,该向斜西部开阔,东部狭窄,轴向近东西,往南倾,北翼倾角约 30°,南翼倾角约 60°。向斜轴部由中上石炭统壶天群白云质灰岩组成,两翼分别由震旦系莲沱组及冷家溪群组成。矿区断裂构造发育,其中古港-横山断裂从矿区中南部通过,该断裂东西走向,往南倾,是一多期活动的区域性大断裂。

近矿围岩蚀变主要为矽卡岩化,次为硅化、碳酸盐化、绿泥石化和铁锰碳酸盐化。

矿区岩浆活动频繁,时间持续长,其活动期次明显地分为三期:雪峰期、加里东期和印支-燕山期,其中以雪峰期岩体的规模最大。而与矿床成因

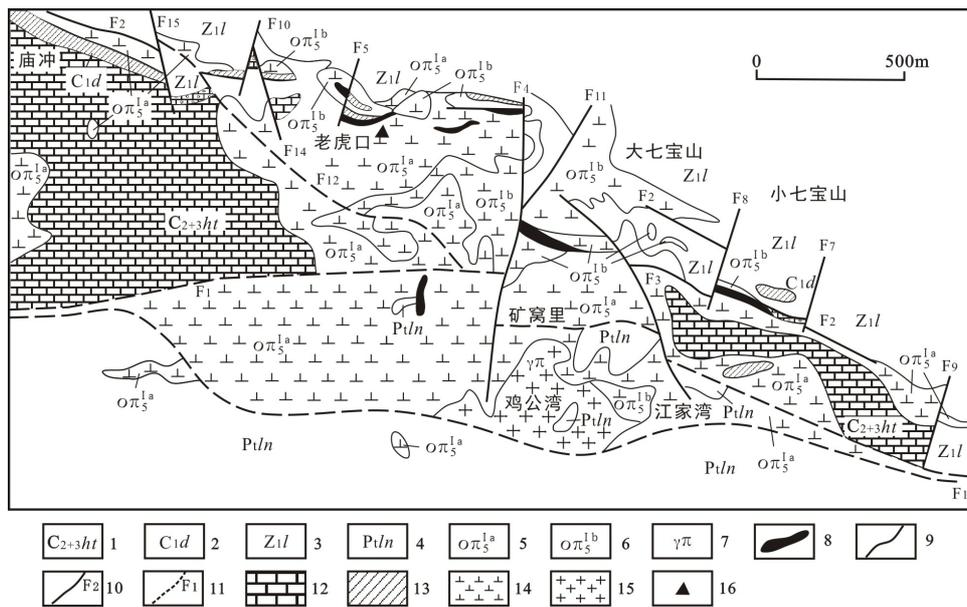


图1 七宝山矿区地质简图

Fig. 1 Geological sketch map of the Qibaoshan Cu polymetallic deposit

1.中上石炭统壶天群;2.下石炭统大塘阶;3.震旦系莲沱组;4.前震旦系冷家溪群;5.燕山早期第一次侵入石英斑岩;6.燕山早期第二次侵入石英斑岩;7.花岗斑岩;8.矿体;9.地质界线10.断层及编号;11.推测隐伏断层及编号;12.白云质灰岩/灰岩;13.石英砾岩;14.石英斑岩;15.花岗斑岩;16.采样位置。

密切相关的石英斑岩侵入体,出露于矿区中部,早期研究^[15]认为石英斑岩属印支-燕山早期侵入体(如图1,包含图中 $O\pi_5^{1a}$ 和 $O\pi_5^{1b}$)。该期岩体为一个多次侵入的复式岩体,其中,燕山早期第一次侵入石英斑岩($O\pi_5^{1a}$)以高岭土化蚀变为主要特征,而燕山早期第二次侵入石英斑岩($O\pi_5^{1b}$)以绿泥石化蚀变为主要特征,侵入于中、上石炭统及元古代地层中,受构造控制明显,呈岩枝状产出。另外南部鸡公湾附近出露小面积的花岗斑岩。

石英斑岩体地表出露形态十分复杂,总体为一蘑菇状产出的岩株,主岩体东西长6 km,南北宽20~1000 m,出露面积约2 km²。石英斑岩主要矿物成分为正长石、石英、斜长石,有少量黑云母,同时也含有少量磷钇矿-锆石-磷灰石等副矿物。

石英呈斑晶及基质产出。石英斑晶粒径一般为3 mm左右,斑晶普遍受到熔蚀,大多被熔蚀成浑圆状及港湾状,基质石英无色透明,大多为它形粒状,粒径一般小于0.02 mm。正长石呈斑晶及基质产出。斑晶正长石多为半自形,粒径为2~4 mm,卡斯巴双晶发育,基质正长石粒径大多小于0.02 mm,蚀变强烈,大多数蚀变为高岭石等粘土矿物。斜长

石较少,一般为半自形宽板状,粒径一般为0.01 mm,常见聚片双晶,在显微镜下经多种方法测得 $w(An)=22\%$,属更长石,且已基本蚀变为绢云母。黑云母整体较少,大多已蚀变为绿泥石,黑云母中常包裹自形锆石晶体,锆石周围常发育晕色圈。黑云母中 SiO_2 、 FeO 和 Fe_2O_3 含量极高,分别达38.16%及25.26%,而 MgO 及 CaO 含量极低,属铁叶云母。这是由于在岩浆分异过程中黑云母总是向富铁端元演化造成的。

区内研究对象石英斑岩体笔者在前期已撰文论述过其岩石学、地球化学特征^[13],此处不再赘述。主要特征:根据主量、微量、稀土元素的分析,得到该石英斑岩为是一套高钾($K_2O \gg Na_2O$)、富铝、贫硅的亚碱性的粗面安山岩-安山岩-英安岩组合。地球化学上显示了富轻稀土(LREE)、大离子亲石元素(LILE)(Ba, K等)、成矿元素(Cu, Pb, Zn等),以及贫重稀土元素(HREE)特征。

2 样品及分析方法

用以分选锆石的样品均采自七宝山矿区老虎口矿段,岩性为石英斑岩,此次采样1件,编号为

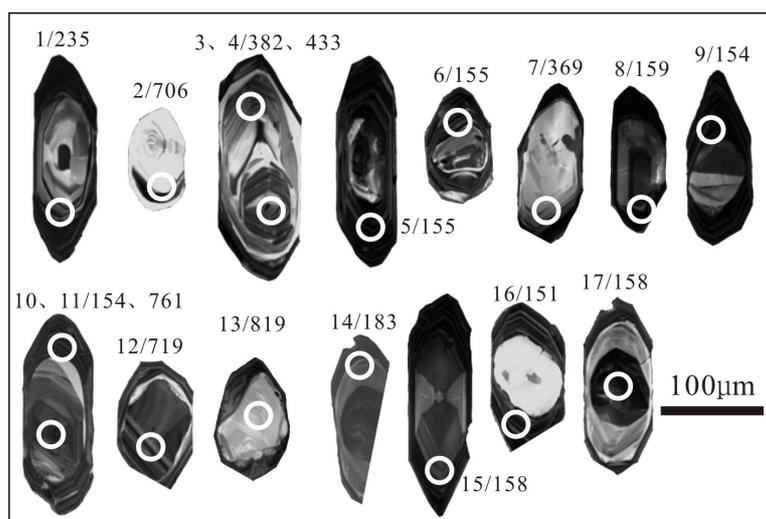


图2 七宝山矿区石英斑岩(QB-27)阴极发光(CL)图

Fig.2 Cathodoluminescence (CL) images of zircon from quartz-porphyrines (QB-27) in the Qibaoshan Cu-polymetallic

QB-27(E113°55'39", N28°17'08")。锆石分选在河北廊坊区域地质调查研究所的实验室用常规方法粉碎后,经淘选和电磁法初步分离并在双目镜下选出。选出的无色透明晶形完好、无明显裂痕少有包裹体的锆石,将选出的锆石粘贴于环氧树脂表面,并打磨至露出锆石表面,然后抛光待测。

阴极发光(CL)图像分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成。锆石的 U-Pb 测年在西北大学大陆动力学国家重点实验室用配有 193 nm 激光器的 Agilen 7500a ICP-MS 进行。测定过程以哈佛锆石 91500 样品做外部标样,用 NIST610 硅玻璃标准优化仪器,激光频率为 10Hz,80 mJ 强度,激光束斑直径 30 μm ,详细的分析方法见袁洪林等^[16]的描述。定年获得的 ^{29}Si , ^{204}Pb , ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb , ^{232}Th 和 ^{238}U 以及 U,Th 和 Pb 的含量,用 ^{29}Si 作为中间校准,NIST610 做参考物计算获得。 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$, $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ 比值用 GLITTER410 程序计算,并用锆石 91500 进行校正。所得数据用 Andersen 的方法^[17]进行普通铅校正后用 ISOPLOT310 获得年龄和协和图。

锆石 LA-ICP-MS 原位 Hf 同位素组成在西北大学大陆动力学国家重点实验室的 Nu Plasma HRMC-ICP-MS 与 GeoLas 2005 受激准分子 ArF 的 193 nm 激光剥蚀系统上进行。分析中使用的激光束斑直径为 40 μm ,激光频率为 10 Hz,脉冲能量为

80 mJ,剥蚀时间为 50 s,用锆石 91500, MON-1 和 GJ-1 作外标。仪器运行条件和详细的分析流程以及数据精度袁洪林等^[16]已有描述。Hf 同位素数据处理方法参见吴福元等^[18],其公式中的特定数值参见全球 Lu-Hf 同位素参考体系数值^[19-23]。

3 分析结果

3.1 锆石阴极发光图像及 U-Pb 同位素年代学

样品 QB-27 锆石阴极发光图像(如图 2)显示,锆石颜色从无色透明到浅黄色,粒径在 $50 \times 150 \mu\text{m}^2 \sim 100 \times 250 \mu\text{m}^2$ 。锆石形态较简单,以短柱状为主,长宽比值为 1~3。锆石多数呈半自形-自形,柱面、锥面均可见。部分锆石晶形不完整,很可能是锆石破碎过细所致。锆石阴极发光图像显示,大部分锆石为透明的柱状自形晶体,并具有清晰的震荡环带结构或线状分带,为典型的岩浆锆石;而线状分带主要是因为母岩浆具有高温和快速冷却的特征。少数锆石具有继承核和生长环带,可划分为继承锆石相和岩浆相,例如 10、11 号点的锆石。岩浆期锆石或锆石岩浆相具有较高的 Th/U 比值(0.30~0.79),说明该锆石具有典型的岩浆锆石特征。

样品 QB-27 所选各 17 个分析点大部分位于锆石边部,少部分位于锆石核部,测试数据见表 1。在 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} - ^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 图(图 3)上,大多数测点投

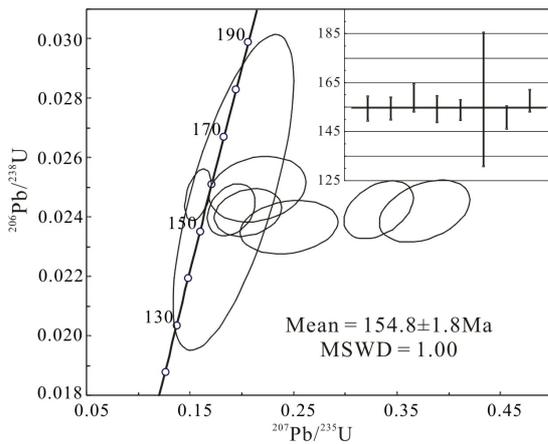


图3 七宝山矿区石英斑岩LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄谱和图
Fig. 3 LA-ICP-MS zircon U-Pb concordant diagrams for quartz-porphyrines in Qibaoshan Cu-polymetallic deposit

影位于谐和曲线上或附近,极少量与谐和线存在一定距离,说明被测锆石同位素体系可能受到后期地质事件的干扰。从测年结果看,锆石可分为三组,第一组含有 2、11、12、13 号四个测点,对应的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表观年龄为 $706 \pm 14 \text{ Ma}$ 、 $761 \pm 9 \text{ Ma}$ 、 $719 \pm 12 \text{ Ma}$ 、 $819 \pm 14 \text{ Ma}$,这些锆石分析点均位于无生长环带的捕获锆石(2、13号点),不具实际地质意义;或锆石继承内核(11、12号点),代表了继承锆石相的时代,对应的是中元古代至新元古代早期华南小洋盆由扩张到消亡,晋宁弧陆碰撞、扬子与华夏古板块拼合时期(约 825 Ma)^[7],说明该锆石继承核形成于扬子与华夏古板块拼合事件中。第二组含有 1、3、4、7 号点给出了 $235 \pm 3 \text{ Ma}$ 、 $382 \pm 7 \text{ Ma}$ 、 $433 \pm 5 \text{ Ma}$ 、 $369 \pm 13 \text{ Ma}$,因其具有锆石震荡环带,且具有较高 Th/U 比值(0.22、0.50、0.65、0.27),测试点也位于锆石边部,说明锆石对加里东期、印支期岩浆活动的记录。第三组包含 8 个锆石测试点均在协和曲线上或附近,表观年龄集中于 151 ~ 159 Ma 之间,加权平均年龄为 $154.8 \pm 1.8 \text{ Ma}$ (置信度 95%,MSWD = 1.00)(图 3),这些锆石均具有岩浆锆石特征,代表取样点岩石的侵位年龄。因此认为,七宝山矿区石英斑岩的形成年龄为 $154.8 \pm 1.8 \text{ Ma}$ ^[24],为晚侏罗世侵入岩。代表了该石英斑岩体的主结晶年龄,属晚侏罗世岩浆活动产物。

3.2 锆石 Hf 同位素特征

本次研究对做过年龄的七宝山矿区石英斑岩测试样品(QB-27)的各 17 个点进行锆石微区原位

Hf 同位素分析(表 2)。分析点与定年点临近且锆石的特征相同,分析结果均列入表 2。结果显示, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值介于 0.000386 ~ 0.001226;均小于 0.002,说明锆石中的 ^{176}Lu 及其衰变而成的质量相对于 ^{177}Hf 的质量要低得多,分析获得的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值可以近似代表锆石的原始 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值。利用所测得的年龄计算的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分布较宽(表 2)。

其中岩浆锆石或锆石岩浆相同位素组成中, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 同位素比值为 0.282120 ~ 0.282539,对应的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均为负值,集中在 -19.8 ~ -4.9,计算的亏损地幔模式年龄(t_{DM1})集中在 1001 ~ 1596 Ma,平均地壳模式年龄(t_{DM2})集中于 1519 ~ 2450 Ma。Hf 同位素数据表明该岩体主要来自于古元古代至中元古代陆壳物质。

岩体的继承锆石相 Hf 同位素中, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 同位素比值为 0.282258 ~ 0.282584,对应的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和两阶段模式年龄具有较大变化范围, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值以正、负值均存在,分布范围较宽($\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = -4.0 \sim 5.3$)。两阶段模式年龄主要集中在中元古代。

4 讨论

4.1 成岩年龄

前人给出的七宝山矿区石英斑岩年龄(227 Ma、195 Ma),由于受当时实验条件的限制以及方法本身的局限性,造成年龄变化大,可信度低。本次工作采用锆石 U-Pb 测年(LA-ICP-MS),通过对锆石形态和内部的研究,在区分不同成因、不同期次锆石微区的基础上,利用高分辨率离子探针测试技术,可以获得锆石不同微区的精确 U-Pb 年龄。锆石的 U-Pb 年龄可近似代表锆石的结晶年龄,也即岩浆岩的成岩年龄^[29]。

七宝山铜多金属矿床与成矿相关的石英斑岩内岩浆相锆石形态为短柱状,成长环带清晰,其 Th/U 比值均大于 0.1,Th、U 含量呈良好的正相关关系(表 1),与典型的岩浆锆石特征^[30-31]相同。另锆石的稀土元素配分模式为左倾,具明显正 Ce 异常和负 Eu 异常等特征,类似于岩浆锆石和深熔作用成因的锆石特征^[29,31]。样品测试结果(表 1)中 8 个岩浆相点计算得年龄为 $154.8 \pm 1.8 \text{ Ma}$ (置信度 95%,MSWD = 1.00),代表岩石成岩年龄,属晚侏罗世岩浆活动产物。表明七宝山矿区石英斑岩侵入时

表1 七宝山矿区石英斑岩LA-ICP-MS锆石U-Pb定年数据
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb data for the quartz-porphyrries in Qibaoshan Cu-polymetallic deposit

测试点	Pb /10 ⁶	Th /10 ⁶	U /10 ⁶	Th/U	同位素比值						年龄 (Ma)							
					207Pb/206Pb		207Pb/235U		206Pb/238U		207Pb/206Pb		207Pb/235U		206Pb/238U			
					比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	年龄	1σ	年龄	1σ	年龄	1σ
QB-27																		
01	227	780	3484	0.22	0.0493	0.0017	0.0493	0.0017	0.0493	0.0017	0.0493	0.0017	165	81	229	7	235	3
02	161	147	615	0.24	0.0794	0.0041	0.0794	0.0041	0.0794	0.0041	0.0794	0.0041	1181	102	826	29	706	14
03	159	467	936	0.50	0.0508	0.0027	0.0508	0.0027	0.0508	0.0027	0.0508	0.0027	232	122	363	17	382	7
04	358	1025	1575	0.65	0.0513	0.0018	0.0513	0.0018	0.0513	0.0018	0.0513	0.0018	254	88	407	12	433	5
05	464	2113	4742	0.45	0.1006	0.0046	0.1006	0.0046	0.1006	0.0046	0.1006	0.0046	1635	83	291	10	155	3
06	237	1468	4064	0.36	0.0564	0.0027	0.0564	0.0027	0.0564	0.0027	0.0564	0.0027	465	109	176	8	155	2
07	159	360	1356	0.27	0.0613	0.0026	0.0613	0.0026	0.0613	0.0026	0.0613	0.0026	650	93	411	18	369	13
08	142	771	2095	0.37	0.0622	0.0056	0.0622	0.0056	0.0622	0.0056	0.0622	0.0056	680	194	197	16	159	3
09	293	933	3369	0.28	0.1116	0.0050	0.1116	0.0050	0.1116	0.0050	0.1116	0.0050	1826	81	324	13	154	3
10	198	1247	3237	0.39	0.0608	0.0037	0.0608	0.0037	0.0608	0.0037	0.0608	0.0037	632	134	190	11	154	2
11	386	111	3241	0.03	0.0621	0.0017	0.0621	0.0017	0.0621	0.0017	0.0621	0.0017	676	64	742	15	761	9
12	670	737	3866	0.19	0.0638	0.0018	0.0638	0.0018	0.0638	0.0018	0.0638	0.0018	744	60	728	17	719	12
13	111	137	418	0.33	0.0652	0.0030	0.0652	0.0030	0.0652	0.0030	0.0652	0.0030	789	96	803	26	819	24
14	101.3	529	2106	0.25	0.0487	0.0022	0.0487	0.0022	0.0487	0.0022	0.0487	0.0022	200	103	181	8	183	3
15	153	929	2626	0.35	0.0604	0.0077	0.0604	0.0077	0.0604	0.0077	0.0604	0.0077	620	278	178	20	158	14
16	229	1331	3179	0.42	0.0751	0.0063	0.0751	0.0063	0.0751	0.0063	0.0751	0.0063	1070	166	223	16	151	2
17	144.6	251	5972	0.04	0.0456	0.0016	0.0456	0.0016	0.0456	0.0016	0.0456	0.0016	148	5	148	5	158	2

表2 七宝山矿区石英斑岩锆石Hf同位素数据

Table 2 Zircon Hf isotopic compositions of the quartz-porphyrries in Qibaoshan Cu-polymetallic deposit

测试点	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	2σ	年龄 (Ma)	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	t_{DM1} (Ma)	t_{DM2} (Ma)	2σ	$f_{\text{Lu/Hf}}$
QB-27													
01	0.282584	0.000019	0.001027	0.000014	0.024316	0.000328	235	-6.7	-1.7	950	1378	25	-0.9691
02	0.282496	0.000024	0.001005	0.000017	0.024969	0.000407	706	-9.8	5.3	1073	1298	31	-0.9697
03	0.282529	0.000024	0.000435	0.000012	0.011198	0.000253	382	-8.7	-0.4	1012	1408	31	-0.9869
04	0.282561	0.000022	0.000930	0.000008	0.022751	0.000166	433	-7.5	1.7	979	1313	28	-0.9720
05	0.282539	0.000015	0.001141	0.000005	0.031544	0.000142	155	-8.3	-5.0	1016	1523	18	-0.9656
06	0.282456	0.000023	0.001226	0.000005	0.032979	0.000151	155	-11.3	-8.0	1137	1711	30	-0.9631
07	0.282557	0.000021	0.000835	0.000009	0.018264	0.000234	369	-7.7	0.3	982	1357	26	-0.9749
08	0.282539	0.000053	0.000560	0.000017	0.014618	0.000526	159	-8.3	-4.9	1001	1519	71	-0.9831
09	0.282120	0.000035	0.000928	0.000016	0.024446	0.000470	154	-23.1	-19.8	1596	2450	46	-0.9720
10	0.282300	0.000034	0.000386	0.000020	0.010733	0.000550	154	-16.8	-13.4	1326	2051	44	-0.9884
11	0.282339	0.000051	0.000639	0.000048	0.018106	0.001353	761	-15.4	1.1	1281	1609	68	-0.9807
12	0.282258	0.000030	0.001113	0.000046	0.029271	0.001469	719	-18.2	-2.9	1410	1831	39	-0.9665
13	0.282421	0.000016	0.000687	0.000003	0.018195	0.000119	819	-12.5	5.2	1168	1389	19	-0.9793
14	0.282550	0.000019	0.000690	0.000016	0.018277	0.000451	183	-7.9	-4.0	989	1481	24	-0.9792
15	0.282523	0.000028	0.001014	0.000016	0.026045	0.000372	158	-8.9	-5.5	1035	1556	36	-0.9695
16	0.282436	0.000023	0.001011	0.000010	0.026386	0.000284	151	-11.9	-8.7	1157	1755	29	-0.9695
17	0.282485	0.000212	0.000890	0.000003	0.018508	0.000069	158	-10.2	-6.8	1085	1640	294	-0.9732

注:表中锆石Hf同位素组成的计算参数为: ^{176}Lu 衰变常数 $\lambda = 1.867 \times 10^{-11} \text{a}^{-1}$;球粒陨石和亏损地幔的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 、 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值分别0.03321、0.282772,0.03842、0.28325^[9,20];平均地壳 $f_{\text{Lu/Hf}} = -0.55$ ^[27]。

间并非印支期-燕山早期,而属燕山中晚期。这一年龄与铜山岭矿区花岗闪长斑岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄 $149 \pm 4 \text{ Ma}$ ^[32]、圆珠顶矿区内花岗斑岩年龄 $150.2 \pm 1.7 \text{ Ma}$ ^[33]相近,说明这一时期侵入体与华

南地区斑岩-矽卡岩型铜矿床成岩成矿关系密切。

4.2 岩浆源区

七宝山矿区石英斑岩内岩浆相锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 同位素比值为 0.282296 ~ 0.282603,对应的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值

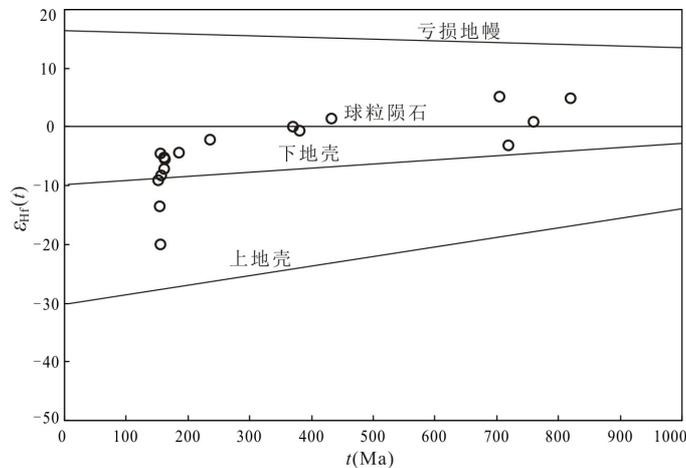


图4 七宝山矿区石英斑岩锆石t-ε_{Hf}(t)图解(底图据[18, 20, 21, 34])

Fig. 4 Plots of zircon $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values vs U-Pb ages for the quartz-porphyrries in the Qibaoshan Cu-polymetallic deposit

为 $-19.8 \sim -4.9$, 在 $t-\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 图(图 4)上, 锆石的岩浆相主要分布在下地壳与球粒陨石两条演化线之间且靠近下地壳, 少部分位于下、上地壳之间。这一特征主要与具有低 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 和 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 的壳源岩浆锆石^[35]相似, 这说明形成石英斑岩的岩浆主要来源于下地壳物质重熔, 但有少量幔源或上地壳物质加入。而平均地壳模式年龄(t_{DM2})集中于 $1377 \sim 2056 \text{ Ma}$, 证明该壳源岩浆主要是古元古代至中元古代地壳部分熔融的产物。

而继承相锆石 Hf 同位素的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值具有较大变化范围, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值以正、负值均存在, 分布范围较宽($\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = -4.0 \sim 5.3$), 其在 $t-\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 图(图 7)上投点也比较分散, 多数点分布在球粒陨石线上, 也有两个点在球粒陨石线与亏损地幔线之间。这说明继承相锆石主要结晶于壳幔混源岩浆或富集地幔来源岩浆, 少量结晶于亏损地幔岩浆源分异出来的新生地壳发生熔融形成的岩浆或幔源岩浆侵位过程中发生地壳混染形成的岩浆^[36], 从而保留了亏损地幔特征。

综上所述, 说明石英斑岩主要来自下地壳物质的熔融, 可能有上地壳熔融物或少量幔源加入; 而发生熔融形成岩浆的地壳物质是源自壳幔混源或具亏损地幔特征的混合岩浆。

4.3 成岩成矿的地球动力学背景

前文所述, 根据锆石 Hf 同位素及 REE 特征, 七宝山矿区内的石英斑岩主要来自于地壳物质的熔融, 平均地壳模式年龄(t_{DM2})集中于 $1377 \sim 2056 \text{ Ma}$, 证明该壳源岩浆主要是古元古代至中元古代地壳部分熔融的产物。其构造环境属于同碰撞造山(类似于 A 型俯冲), 与华南地块受到伊泽奈奇(Izanagi)板块向西北俯冲的影响^[37-39], 在燕山早期经历了一次大规模与岩浆活动有关的、以 Cu-Pb-Zn-Mo-Au-Ag 为主的成矿事件有关。

而根据岩石地球化学特征, 特别是具有幔源性质的稀土配分模式和其他部分元素特征^[13], 说明在岩浆熔融的过程中有幔源物质的加入的, 具有混合岩浆特征。这一特征主要是岩石圈拆沉和软流圈上涌的影响, 这也华南中生代岩浆作用形成的主要机制^[40-48]。石英斑岩的锆石 Hf 同位素特征并未记录到幔源岩浆特征, 可能是因为中下地壳物质熔融岩浆已经形成, 软流圈物质进入后并未进行均匀混合, 从而导致了岩石成分的改变, 却并未来得及改变

锆石同位素特征。

由此看来, 七宝山矿区内石英斑岩体成因可能是在华南地块受到伊泽奈奇(Izanagi)板块向西北俯冲的影响下, 古元古代至中元古代地壳部分熔融形成岩浆, 而后岩石圈拆沉和软流圈物质上涌进入岩浆发生不均匀混合在晚侏罗世上侵形成的。

5 结论

通过对七宝山矿区石英斑岩内锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 定年、Hf 同位素和稀土元素分析, 可以得出如下结论:

(1) 石英斑岩的结晶年龄为 $154.8 \pm 1.8 \text{ Ma}$, 比之前报道的年龄($195 \sim 227 \text{ Ma}$)要新, 代表了岩体的主结晶年龄, 属于晚侏罗世岩浆活动产物。

(2) 石英斑岩主要来自下地壳物质的熔融, 可能有上地壳熔融物或少量幔源物质加入; 而发生熔融形成岩浆的地壳物质是源自壳幔混源或具亏损地幔特征的混合岩浆。

(3) 结合岩石学研究, 七宝山矿区内石英斑岩体成因可能是古元古代至中元古代地壳部分熔融形成岩浆, 而后岩石圈拆沉和软流圈物质上涌进入岩浆发生不均匀混合上侵形成的。

审稿人对稿件进行了认真的审阅并提出宝贵的意见, 在此致以衷心的感谢!

注释:

① 中国地质调查局资源评价部, 等. 钦杭成矿带重要矿产勘查部署方案. 2010.

参考文献:

- [1] 水涛. 中国东南边缘大陆古基底构造演化 [J]. 科技通报, 1987, 3(5): 32-34.
- [2] 水涛. 华夏碰撞造山带[J]. 浙江地质, 1995, 11(2):25-32.
- [3] 杨明桂, 梅勇文. 钦-杭古板块结合带与成矿带的主要特征[J]. 华南地质与矿产, 1997, (3): 52-59.
- [4] 杨明桂, 王发宁, 曾勇. 江西北部金属成矿地质[M]. 北京: 中国大地出版社, 2004.
- [5] 徐德明, 蔺志永, 龙文国, 张颢, 王磊, 周岱, 黄皓. 钦杭成矿带的研究历史和现状 [J]. 华南地质与矿产, 2014, 28(4): 277-289.
- [6] 徐德明, 蔺志永, 骆学全, 张颢, 张雪辉, 黄皓. 钦杭成矿带主要金属矿床成矿系列 [J]. 地学前缘, 2015, 22(2):

- 7-24.
- [7] 杨明桂, 黄水保, 楼法生, 唐维新, 毛素斌. 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.
- [8] 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 陈毓川. 南岭地区大规模钨锡多金属成矿作用: 成矿时限及地球动力学背景 [J]. 岩石学报, 2007, 23(10): 2329-2338.
- [9] 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 袁顺达, 程彦博, 陈毓川. 华南地区中生代主要金属矿床时空分布规律和成矿环境 [J]. 高校地质学报, 2008, 14(4): 510-526.
- [10] 毛景文, 张建东, 郭春丽. 斑岩铜矿-浅成低温热液银铅锌远接触带热液金矿床模型: 一个新的矿床模型[J]. 地球科学与环境学报, 2010, 32(1): 1-14.
- [11] 毛景文, 陈懋弘, 袁顺达, 郭春丽. 华南地区钦杭成矿带地质特征和矿床时空分布规律 [J]. 地质学报, 2011, 85(5): 636-658.
- [12] 胡祥昭, 肖宪国, 杨中宝. 七宝山花岗岩斑岩的地质地球化学特征[J]. 中南工业大学学报, 2002, 33(6): 551-554.
- [13] 胡俊良, 徐德明, 张 鲲. 湖南七宝山石英斑岩地球化学特征及其与成矿的关系 [J]. 华南地质与矿产, 2012, 28(4): 298-306.
- [14] 沈瑞锦, 陆玉梅. 湖南七宝山多金属矿床成因模式[C]// 铨家达. 湖南地学新进展[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1996: 29-36.
- [15] 陆玉梅, 殷浩然, 沈瑞锦. 七宝山多金属矿床成因模式[J]. 矿床地质, 1984, 3(4): 53-60.
- [16] 袁洪林, 吴福元, 高山, 柳小明, 徐 平, 孙德有. 东北地区新生代侵入岩的锆石激光探针U-Pb年龄测定与稀土元素成分分析[J]. 科学通报, 2003, 48(14): 1511-1520.
- [17] Anderson T, Griffin W L. Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of zircons from the Storgangen intrusion, Rogaland Intrusive Complex, SW Norway: implications for the composition and evolution of Precambrian lower crust in the Baltic Shield[J]. Lithos, 2004, 73: 271-288.
- [18] 吴福元, 李献华, 郑永飞, 高山. Lu-Hf同位素体系及其岩石学应用[J]. 岩石学报, 2007, 23(2): 185-220.
- [19] Blichert-Toft J, Albarede F. Hf isotopic compositions of the Hawaii Scientific Drilling Project core and the source mineralogy of Hawaiian basalts [J]. Geophysical Research Letters, 1999, 26(7): 935-938.
- [20] Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, Jackson S E, Van Acherbergh E O, Reilly S Y, Shee S R. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2000, 64(1): 133-147.
- [21] Amelin Y, Lee D C, Halliday A N, Pidgeon R T. Nature of the Earth's earliest crust from hafnium isotopes in single detrital zircon[J]. Nature, 1999, 399: 252-255.
- [22] Vervoort J D, Patchett P J. Behavior of hafnium and neodymium isotopes in the crust: Constraints from Precambrian crustally derived granites [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1996, 60(19): 3717-3733.
- [23] Scherer E E, Cameron K L, Johnson C M, Beard B L, Barovich K M, Collerson K D. Lu-Hf geochronology applied to dating Cenozoic events affecting lower crustal xenoliths from Kilbourne Hole, New Mexico [J]. Chemical Geology, 1997, 142: 63-78.
- [24] 胡俊良, 徐德明, 张 鲲. 湖南七宝山矿床石英斑岩锆石U-Pb定年及Hf同位素地球化学 [J]. 矿床地质, 2014, 33(增刊): 201-202.
- [25] Soderlund U, Patchett P J, Vervoort J D, Isachsen C E. The ^{176}Lu constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2004, 219: 311-324.
- [26] Blichert-Toft J, Albarede F. The Lu-Hf geochemistry of chondrites and evolution of the mantle-crust system [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1997, 148 (1/2): 243-258.
- [27] Vervoort J D, Patchett P J, Gehrels G E, Nutman A P. Constraints on early Earth differentiation from hafnium and neodymium isotopes[J]. Nature, 1996, 379: 624-627.
- [28] Watson E B. Some experimentally determined zircon/liquid partition coefficients for the rare earth elements [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1980, 44: 895-897.
- [29] 吴元保, 郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对U-Pb年龄解释的制约[J]. 科学通报, 2004, 49(16): 1589-1604.
- [30] Rubatto D, Gebauer D. Use of cathodoluminescence for U-Pb zircon dating by ion microprobe: Some examples from the western Alps[A]. //In: Cathodoluminescence in Geoscience. Berlin, Heidelberg, Germany: Springer-Verlag, 2000, 373-400.
- [31] Rubatto D. Zircon trace element geochemistry: Partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism[J]. Chemical Geology, 2002, 184: 123-138.
- [32] 魏道芳, 鲍征宇, 付建明. 湖南铜山岭花岗岩体的地球化学特征及锆石SHRIMP定年 [J]. 大地构造与成矿, 2007, 31(4): 482-489.
- [33] 陈懋弘, 李忠阳, 李 菁, 韦子任, 黄宏伟, 张志强, 肖柳阳. 初论广西大瑶山地区多期次花岗岩质浆活动与成矿系列[J]. 地学前缘, 2015, 22(2): 41-53.

- [34] Griffin W L, Wang Xiang, Jackson S E, Person N J, O'Reilly S Y, Xu X S, Zhou X M. Zircon chemistry and Magma genesis, SE China: In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and igneous complexes[J]. *Lithos*, 2002, 61: 237-269.
- [35] Peter D K, Roland M. Lu-Hf and Sm-Nd isotope systems in zircon[J]. *Review in Mineralogy and Geochemistry*, 2003, 53 (1): 327-341.
- [36] 郑永飞, 陈仁旭, 张少兵, 唐俊, 赵子福, 吴元保. 大别山超高压榴辉岩和花岗片麻岩中锆石 Lu-Hf 同位素研究[J]. *岩石学报*, 2007, 23(2): 317-330.
- [37] Isozaki Y, Nishimura Y and Fusaki F. Jurassic subduction - accretion complex on Ishigaki Island, southern Ryukyus and its geologic implication to late Mesozoic convergent margin of East Asia [J]. *Memoirs of the Geological Society of Japan*, 1989, 33:259-275.
- [38] Isozaki Y. Jurassic accretion tectonics of Japan [J]. *Island Arc*, 1997, 6: 25-51.
- [39] Shigenori M, Yukio I, Gaku K and Masaru T. Paleogeographic maps of the Japanese Islands: Plate tectonic synthesis from 750 Ma to the present[J]. *Island Arc*, 1997, 6 (1): 121-142.
- [40] 李献华. 诸广山岩体内中基性岩脉的成因初探-Sr、Nd、O 同位素证据[J]. *科学通报*, 1990, 35(16): 1247-1249.
- [41] 李献华, 胡瑞忠, 饶冰. 粤北白垩纪基性岩脉的年代学和地球化学[J]. *地球化学*, 1997, 26(2): 14 - 31.
- [42] 郭峰, 范蔚茗, 林舸, 林源贤. 湖南道县辉长岩包体的年代学研究及成因探讨 [J]. *科学通报*, 1997, 42(15): 1661-1664.
- [43] Li X H, Liang X R, Sun M, Liu Y and Tu X L. Geochronology and geochemistry of single-grain zircons: Simultaneous in-situ analysis of U-Pb age and trace elements by LAM-ICP-MS[J]. *Eur. J. Minera.*, 2000, 12: 1015-1024.
- [44] 赵振华, 包志伟, 张伯友. 湘南中生代玄武岩类地球化学特征[J]. *中国科学(D辑)*, 1998, 28(增刊): 7-14.
- [45] 范蔚茗, 王岳军, 郭峰, 彭头平. 湘赣地区中生代镁铁质岩浆作用与岩石圈伸展 [J]. *地质前缘*, 2003, 10(3): 159-169.
- [46] 付建明, 马昌前, 谢才富, 张业明, 彭松柏. 湖南九嶷山复试花岗岩体 SHRIMP 锆石定年及其地质意义 [J]. *大地构造与成矿学*, 2004, 28(4): 370-378.
- [47] 车勤建, 李金冬, 魏绍六, 武光英. 湖南千里山-骑田岭矿集区形成的构造背景初探[J]. *大地构造与成矿*, 2005, 29 (2): 204-214.
- [48] 江西根, 柏道远, 陈建超, 熊延望, 马铁球, 王先辉. 湘东南宝峰仙地区燕山早期花岗岩地球化学特征及其构造环境[J]. *大地构造与成矿学*, 2006, 30(2): 206-219.