

湘东北七宝山铜多金属矿床成矿时代及成矿物质来源 ——石英脉 Rb-Sr 定年和 S-Pb 同位素组成

胡俊良^{1,2}, 陈娇霞³, 徐德明^{1,2}, 吴昌雄⁴, 张 鯤¹, 刘劲松¹, 刘阿睢¹, 刘重芄¹
HU Junliang^{1,2}, CHEN Jiaoxia³, XU Deming^{1,2}, WU Changxiong⁴, ZHANG Kun¹,
LIU Jinsong^{1,2}, LIU Asui¹, LIU Chongpeng¹

1. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 湖北 武汉 430205;
 2. 中国地质调查局花岗岩成岩成矿地质研究中心, 湖北 武汉 430205;
 3. 湖北省地质调查院, 湖北 武汉 430034;
 4. 湖北省地质局第六地质大队, 湖北 孝感 432000
1. Wuhan center of Geological Survey, CGS, Wuhan 430205, Hubei, China;
2. Research Center for Petrogenesis and Mineralization of Granitoid Rocks, CGS, Wuhan 430205, Hubei, China;
3. Hubei Geological Survey, Wuhan 430034, Hubei, China;
4. No. 6 Geological Party, Hubei Geological Bureau, Xiaogan 432000, Hubei, China

摘要:湘东北七宝山铜多金属矿床位于钦杭成矿带西段,是湘东北规模最大的铜多金属矿床。对七宝山矿床含石英脉中的石英矿物进行 Rb-Sr 同位素年龄测定,获得的 Rb-Sr 等时线年龄为 $153.4 \pm 2.0\text{Ma}$ ($\text{MSWD}=1.8$), $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始值为 0.71849 ± 0.00026 ,与区内石英斑岩形成年龄(153~155Ma)相同,说明七宝山铜多金属矿床成因与石英斑岩体密不可分,成岩成矿年龄均在燕山期。为分析七宝山矿床成矿物质来源,对矿区内的黄铁矿进行了 S、Pb 同位素分析,矿石 $\delta^{34}\text{S}$ 为 3.24‰~4.84‰,平均值为 4.198‰;岩体 $\delta^{34}\text{S}$ 为 2.22‰~3.86‰,平均值为 2.805‰。 $\delta^{34}\text{S}$ 值总体变化较小,岩体 $\delta^{34}\text{S}$ 值较矿石小,更趋近于 0 值,说明岩体中硫极可能源于地幔;而矿床中硫来源于主体地幔硫和少量地壳硫混熔的混合硫源。Pb 同位素变化范围也较小,矿石 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值变化范围为 18.315~18.396,平均值为 18.359; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值变化范围为 15.629~15.737,平均值为 15.675; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值变化范围为 38.376~38.856,平均值为 38.609。矿化岩体数值与之相似,结果显示,七宝山铜多金属矿床的 Pb 同位素组成具有下地壳富钍(铅)贫铀(铅)的特点。据此提出,矿床的成矿物质主要来自与含矿斑岩体有联系的深部岩浆分异演化而析出的含矿气-液流体。含矿斑岩体定位-结晶时,通过对周围受热地下水的对流循环作用,可以从围岩中萃取少量成矿物质加入成矿作用。

关键词:湖南七宝山; Rb-Sr 法测年; S-Pb 同位素组成; 成矿年龄; 成矿物质来源

中图分类号: P597; P618.41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2017)05-0857-10

Hu J L, Chen J X, Xu D M, Wu C X, Zhang K, Liu J S, Liu A S, Liu C P. Age and sources of the ore-forming material for the Qibaoshan Cu-polymetallic deposit in Hu'nan Province: Evidence from quartz vein Rb-Sr isotopic dating and S-Pb isotopes. Geological Bulletin of China, 2017, 36(5):857-866

Abstract: The Qibaoshan Cu-polymetallic deposit, located in the west section of the Qinzhou-Hangzhou metallogenic belt, is the largest Cu-polymetallic deposit in northeastern Hu'nan Province. However, the data of the deposit age are very insufficient. Based on quartz minerals Rb-Sr isotopic dating of the Qibaoshan deposit, the authors tried to obtain the age. The results show that the Rb-

收稿日期: 2016-08-12; 修订日期: 2017-03-17

资助项目: 中国地质调查局项目《钦杭成矿带(西段)重要金属矿床成矿规律及找矿方向研究》(编号: 1212011085405)、《钦杭成矿带西段资源远景调查评价》(编号: 12120113067200)、《湖北木子店-安徽吴家店地区矿产地质调查》(编号: 12120113068000)

作者简介: 胡俊良(1982-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事矿床地球化学研究。E-mail: hjl1982da@163.com

Sr isochron age is 153.4 ± 2.0 Ma (MSWD=1.8), initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.71849 \pm 0.00026$, nearly identical with the quartz porphyry (153Ma to 155Ma) in the ore district in age, which suggests that the genesis of the Qibaoshan deposit was closely related to the quartz porphyry. The diagenesis and mineralization were both in the Yanshan period. The authors analyzed S, Pb isotope data of the pyrite to identify the mineral sources of the Qibaoshan Cu-polymetallic deposit and obtained the following data: $\delta^{34}\text{S}=3.24\text{‰} \sim 4.84\text{‰}$ for the ore, with an average of 4.198‰; $\delta^{34}\text{S}=2.22\text{‰} \sim 3.86\text{‰}$ for the rock, with an average of 2.805‰. The $\delta^{34}\text{S}$ values change overall in a small range, and the $\delta^{34}\text{S}$ values of the rock change even in a smaller range, more close to the value of 0, which suggests that the sulfur in the rock was most possibly derived from the mantle; and the sulfur in the ore came from the main mantle mixed with a small amount of crustal sulfur. The changes of lead isotopes are also in small ranges: $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ change in the range of 18.315~18.396 for the ore, with an average of 18.359; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ change in the range of 15.629~15.737, with an average of 15.675; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ change in the range of 38.376~38.856, with an average of 38.609. The values for the rock change in a similar range. These data show that lead isotope composition of the Qibaoshan Cu-polymetallic deposit has a lower crust (thorium-rich and uranium-depleted) characteristics. A comprehensive analysis of the Sr-S-Pb isotopic system of the Qibaoshan deposit indicates that the ore-forming material was derived from the ore gas-liquid fluid, resulting from the deep magma evolution and differentiation in the same evolution process as the quartz porphyry. At the same time, the host rock might have extracted a small amount of minerals from the wall rock to take part in the mineralization process through the circulating convection effect of heating groundwater, resulting in quartz porphyry intrusion and crystallization.

Key words: Rb-Sr dating; S-Pb isotopic compositions; age of mineralization; sources of the ore-forming material; Qibaoshan Cu-polymetallic deposit; Hu'nan Province

钦杭成矿带是在钦杭结合带的基础上提出的,是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。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2000km,宽100~150km,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。钦杭成矿带西段及其旁侧是华南地区最重要的铜、铅、锌、金和钨、锡、钼、铋多金属成矿带,分布一大批特大型铜金铅锌钨铀矿床^[1-3]。

钦杭成矿带内与斑岩相关的铜矿(斑岩-矽卡岩型)经常与钼、金等多金属矿共生,在整个带内均有产出,其东段以德兴铜矿和永平铜矿最典型。其中德兴斑岩铜矿的区域岩浆岩主要为燕山期I型花岗岩,成矿岩体主体为燕山早期第二阶段的花岗闪长斑岩,成矿岩体呈小岩株状产出,岩浆分异程度高。西段包括铜山岭铜矿、宝山铜多金属矿、水口山铜多金属矿,以及七宝山铜多金属矿,产于湘东南中生代花岗闪长质岩浆岩带中^[4]。近年的地质调查结果显示,在南部也同样发现了斑岩型铜矿,主要代表为圆珠顶大型铜钼矿和南和铜(钼)矿。这一成矿带中其他矿床研究程度较高,七宝山铜多金属矿床研究程度较低。本文对七宝山铜多金属矿床进行研究,讨论其成矿年龄、矿床类型及成因,为整个成矿带上区域矿床类型分布情况、区域成矿地质构造背景分析,以及区域矿床成因对比分析提供

基础资料。本次研究对该成矿带的整体分析研究、下一步找矿方向等具有重要意义。

七宝山矿床至今已有50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、U等有用元素的大型多金属矿床。许多学者在此做过较多工作^[5-9],但矿床的同位素年代学数据很少,仅胡祥昭等^[7]按照Stacey时间模式和Holmes-Houtermans模式(H-H法)求得的铅模式年龄约为195Ma。该年龄由于方法的局限性,并不能代表矿床形成的年龄。矿床成因方面,大多数学者认为^[5-10],矿床的形成与区内出露的石英斑岩体具有成因联系。针对石英斑岩体的研究也很多,但是由于对矿床方面的研究较少,所以支持这一结论的论据也相对薄弱。

目前武汉地质矿产研究所同位素实验室的MAT-261可调多接受固体质谱计采用全溶方法和流体包裹体淋滤法先后对新疆准噶尔地区不同类型金矿床^[11]、雪峰山地区金矿^[12]、湘南新田岭白钨矿床^[13]、粤北和尚田钨锡多金属矿^[14]和川滇黔地区的跑马铅锌矿床^[15]进行了Rb-Sr同位素测定,并取得理想的测试结果。同位素地球化学是示踪成矿流体和物质来源、确定矿床成因的重要依据^[16]。

本次采用成矿期石英脉中的石英矿物Rb-Sr法对矿床进行同位素定年,同时对矿石中的黄铁

矿进行了S、Pb同位素地球化学分析,对七宝山铜多金属矿床的成矿时代和成矿物质来源进行探讨。

1 矿区地质背景及矿床地质特征

1.1 矿区地质

七宝山铜多金属矿床位于新华夏构造体系第二隆起带南部西侧湘东隆起的浏阳-衡东凸起与扬子江东西向构造带的复合地段,即湘东醴陵-浏阳S型构造的次级北西向永和-横山向斜的东端。区内地层出露较全,断裂褶皱发育,岩浆活动频繁,非金属及有色金属矿产均非常丰富。

矿区内出露地层简单,由老至新依次为前震旦系冷家溪群(Ptn)、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(C₂₊₃ht)(图1)。矿区构造复杂,总体为一倒转向斜。矿区断裂构造发育,其中古港-横山断裂从矿区中南部通过,该断裂呈东西走向,向南倾,为多期活动的区域性大断裂。矿区岩浆活动频繁,时间持续长,活动期次明显可分为3期:雪峰期、加里东期和燕山期,其中以雪峰期岩体的规模最大。与矿床成因密切相关的石英斑岩侵入体出露于矿区中部,属燕山中期侵入体^[7]。

1.2 矿床地质特征

七宝山铜多金属矿床成因类型为矽卡岩型+斑岩型,以矽卡岩型为主。斑岩型主矿体中浅部较大矿体产于石英斑岩体中,局部呈细脉浸染状矿体;而矽卡岩型矿体赋存于岩体与中上石炭统壶天群灰岩-白云质灰岩围岩的接触带中。岩体与围岩底层的接触构造包括捕虏体接触、舌状体接触、平缓超覆接触、穿插接触等,这些接触构造使捕虏体与围岩接触面积最大化,为矿体的形成提供了更有利的条件。

七宝山矿床由200多个矿体组成,其中大部分为隐伏矿体。由于围岩、构造等条件的不同,各矿体特征差异较大,但所有矿体均以岩体为中心分布,在平面上可见个别矿体呈椭圆形分布。综合矿体产出的位置特征,将矿床分为大七宝山矿段、小七宝山、老虎口矿段、鸡公湾矿段、江家湾矿段^[8](图1)。

2 样品及分析方法

用于Rb-Sr测年的样品采自老虎口矿段54m中段3~5线之间,黄铁矿化石英脉。在同一条脉中

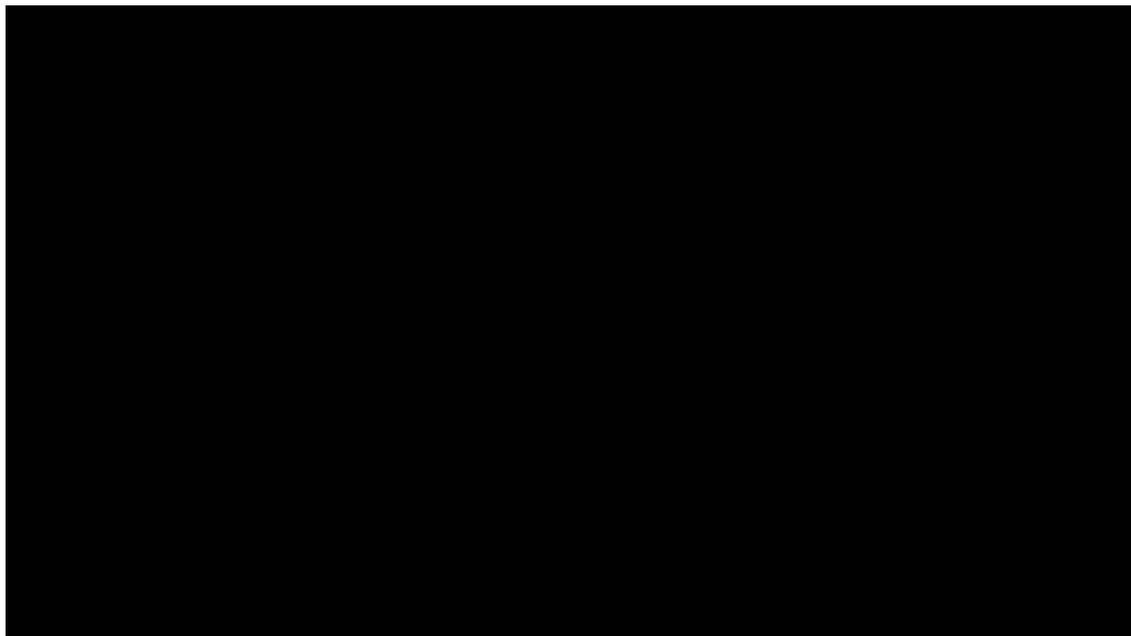


图1 七宝山铜多金属矿矿区地质简图

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

1—矿体;2—地质界线;3—断层及编号;4—推测隐伏断层及编号;5—白云质灰岩/灰岩;
6—石英砾岩;7—石英斑岩;8—花岗斑岩;C₂₊₃ht—中上石炭统壶天群;C₁d—下石炭统
大塘阶;Z₁l—震旦系莲沱组;Ptn—前震旦系冷家溪群;Oπ^{1s}—燕山早期第一次
侵入石英斑岩;Oπ^{1b}—燕山早期第二次侵入石英斑岩;γπ—花岗斑岩

分散取碎裂石英9件,编号为QB22-1~QB22-9(表1)。用于S、Pb同位素测试的样品采自老虎口矿段、小七宝山矿段及鸡公湾矿段,主要为矿石,少量为黄铁矿化石英斑岩(表2),样品新鲜。矿石编号为QB-2、QB-4、QB-6、QB-8、QB-9、QB-12、QB-19,矿化石英斑岩编号为QB-1、QB-17、QB-20。

2.1 石英矿物Rb-Sr法

石英矿物Rb-Sr法在武汉地质矿产研究所同位素测试中心完成。分别用一定浓度的超纯盐酸、硝酸和纯水加热清洗挑纯的石英单矿物,烤干;将石英样品置于烘箱内,在120~180℃爆裂,去除次生包裹体;在超纯水中用超声波机清洗样品3~5遍,烘干备用;称取适量石英样品,加入 $^{85}\text{Rb} + ^{84}\text{Sr}$ 混合稀释剂,用氢氟酸和高氯酸溶解样品,采用阳离子树脂(Dowex50×8)交换法分离和纯化铷、锶;用热电离质谱仪MAT261分析Rb、Sr同位素组成,用同位素稀释法计算试样中的Rb、Sr含量及Sr同位素比值。在整个同位素分析过程中,用GBW04411、NBS607和NBS987标准物质分别对分析流程和仪器进行监控。NBS987的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位素组成测定值为 $0.71022 \pm 0.00005 (2\sigma)$,与证书值 $0.71024 \pm 0.00026 (2\sigma)$ 在误差范围内一致;与样品平行测定多次的国际标准NBS607平均值分别为: $\text{Rb} = 523.30 \times 10^{-6}$, $\text{Sr} = 65.57 \times 10^{-6}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 1.20039 \pm 0.00002 (2\sigma)$,与其证书值(523.90 ± 1.01 , 65.485 ± 0.30 , 1.20039 ± 0.00020 ,

表1 七宝山铜多金属矿床含矿石英脉中的石英矿物Rb-Sr同位素测定结果

Table 1 Rb-Sr isotopic data of fluid inclusions in quartz mineral of the Qibaoshan Cu-polymetallic deposit

样号	样品名称	Rb/10 ⁻⁶	Sr/10 ⁻⁶	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	2σ	(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) _i
QB22-1	石英	1.335	0.4996	7.724	0.73554	0.00020	0.71863
QB22-2	石英	0.622	0.3968	4.524	0.72829	0.00006	0.71839
QB22-3	石英	1.004	0.4501	6.450	0.73254	0.00018	0.71842
QB22-4	石英	1.143	0.3416	9.674	0.73945	0.00010	0.71827
QB22-5	石英	2.408	0.4854	14.360	0.74981	0.00016	0.71837

2σ)在测定误差范围内一致;测定GBW04411的Rb、Sr含量与 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值分别为 248.9×10^{-6} 、 158.9×10^{-6} 和 $0.75992 \pm 0.00001 (2\sigma)$,亦与其证书值(249.47 ± 1.04 , 158.92 ± 0.70 , $0.75999 \pm 0.00020 (2\sigma)$)在误差范围内一致。同位素分析样品制备的全过程均在超净化实验室内完成,全流程Rb、Sr空白分别为 $0.2 \times 10^{-9}\text{g}$ 和 $0.5 \times 10^{-9}\text{g}$ 。具体分析流程见参考文献[18-19]。

2.2 S、Pb同位素

S、Pb同位素均在中国地质调查局武汉地质调查中心同位素地球化学研究室完成。S同位素分析步骤为:将选取的样品经手工进行逐级破碎、过筛,在双目镜下挑选40~60目、纯度大于99%的单矿物样品5g以上。将挑纯后的单矿物样品在玛瑙钵里

表2 七宝山铜多金属矿床硫化物的S同位素组成

Table 2 Sulfur isotopic composition of pyrite from the Qibaoshan Cu-polymetallic deposit

编号	样品描述	采样位置	分析矿物	$\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}/\text{‰}$
QB2	块状黄铁矿矿石	老虎口矿段40m中段之33m分段13线	黄铁矿	4.50
QB4	块状黄铁矿磁铁矿矿石	老虎口矿段40m中段之33m分段93线	黄铁矿	4.11
QB6	块状黄铁矿矿石	老虎口矿段40m中段之33m分段7线	黄铁矿	4.45
QB6	块状黄铁矿矿石	老虎口矿段40m中段之33m分段7线	黄铁矿	4.68
QB8	块状粗粒黄铁矿矿石	老虎口矿段40m中段5线	黄铁矿	4.29
QB9	块状细粒黄铁矿矿石	老虎口矿段40m中段5线	黄铁矿	4.84
QB12	含铜磁铁矿矿石	鸡公湾矿段80m中段12线	黄铁矿	3.24
QB19	含铜黄铁矿矿石	小七宝山矿段146m矿段28线	黄铁矿	3.47
QB1	黄铁矿化石英斑岩	老虎口矿段40m中段之33m分段13线	黄铁矿	2.84
QB17	细脉浸染状黄铁矿化石英斑岩	小七宝山矿段80m矿段26线	黄铁矿	3.86
QB20	闪锌矿化石英斑岩	小七宝山矿段146m矿段28线	黄铁矿	2.22
QB20	闪锌矿化石英斑岩	小七宝山矿段146m矿段28线	黄铁矿	2.30

注:主量元素含量单位为%,微量、稀土元素为10⁻⁶

研磨至 200 目以下,送实验室分析。具体步骤为:将硫化物单矿物与氧化铜粉末混合研磨至 200 目后,真空条件下加热反应生成 SO_2 气体,在稳定同位素质谱仪 MAT-251 上测定 S 同位素组成,结果以相对 V-CDT 值给出。分析过程采用标准样品 LTB-2 和 NBS127 进行质量监控,分析误差范围为 $\pm 0.2\%$ 。详细分析流程见蔡应雄等^[20]。

Pb 同位素分析具体步骤为:称取 50~100mg 粉末样品,在 Teflon 封闭器皿中用 1:1 高纯度 HNO_3 和 HF 的混合酸进行溶解。溶解后转换至 $\text{HBr}+\text{HCl}$ 介质,上层清液用 Bio-Rad AG1×8 阴离子交换树脂进行元素 Pb 的分离和纯化,随后将收集到的 Pb 用 H_3PO_4 和硅胶的发射剂固定在 Re 带上用于质谱分析。Pb 同位素比值采用 MAT-261 TIMS 进行测定。测量的 Pb 同位素比值重复样显示仪器质量分馏小于 $0.1\% \text{amu}^{-1}$ 。实验室获得的 Pb 同位素国际标样 NBS981 测定值为 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}=0.91456 \pm 0.00003 (2\sigma)$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=36.69531 \pm 0.00393 (2\sigma)$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.48839 \pm 0.00224 (2\sigma)$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=16.93569 \pm 0.00216 (2\sigma)$ 。实验全流程 Pb 的平均本底值为 60pg。详细分析流程见 Qiu 等^[21]。

3 测试结果

3.1 Rb-Sr 等时线年龄

采自七宝山含矿石英脉的 9 个样品的 Rb、Sr 同位素分析结果见表 1。石英矿物 Rb 含量为 $0.6215 \times 10^{-6} \sim 2.886 \times 10^{-6}$, Sr 含量为 $0.3416 \times 10^{-6} \sim 0.4996 \times 10^{-6}$, $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 值变化范围较大,在 4.524~14.36 之间, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 0.72829~0.74981。数据处理采用 Ludwig^[22] 的 Isoplot 程序,9 个样品点拟合成一条等时线(图 2),获得等时线年龄为 $153.4 \pm 2.0\text{Ma}$ (MSWD=1.8),初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 0.71849 ± 0.00026 。与矿区内石英斑岩锆石 U-Pb 年龄 (155~153Ma^[23]) 相同,说明七宝山矿床的形成与石英斑岩体基本相同。

Rb、Sr 在石英矿物中主要赋存于流体包裹体中^[18,24-26]。本次测试样品 QB22-1~QB22-9 取自老虎口矿段 54m 中段 3~5 线间,属云英岩期(II)脉型云英岩成矿阶段,为同时、同源、同类型矿石。镜下观察发现,样品中石英较完整,未见明显裂隙,流体包裹体中 Rb-Sr 具有较好的封闭性。为降低

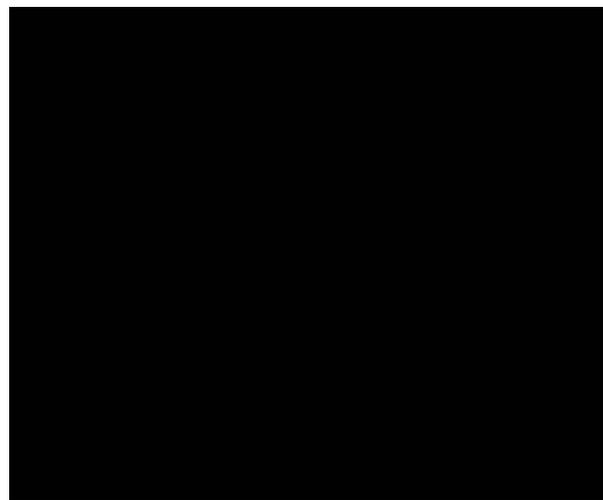


图 2 七宝山铜多金属矿床石英脉中石英矿物 Rb-Sr 等时线年龄

Fig. 2 Rb-Sr isochron ages of fluid inclusions of quartz from the Qibaoshan Cu-polymetallic deposit

次生包裹体对年龄测定的影响,测试中首先将样品加热至 $120 \sim 180^\circ\text{C}$ 进行爆裂,因此所测 Rb、Sr 结果可以代表成矿阶段原生流体包裹体中二者的含量。样品 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 值具有较大的变化范围,满足 Rb-Sr 同位素等时线年龄测试的要求,保证了确定等时线年龄所需要的条件。因此,本次获得的石英流体包裹体 Rb-Sr 同位素等时线年龄为 $153.4 \pm 2.0\text{Ma}$,其 MSWD=1.8,小于 2,说明该年龄可以代表七宝山铜多金属矿床的成矿年龄。同时该年龄与矿床内石英斑岩锆石 U-Pb 年龄 155~153Ma^[23] 在误差范围内一致。

3.2 S 同位素测试结果

对七宝山矿床的研究表明,矿床的形成与矿区内石英斑岩关系密切^[5,8-10]。本次选取 7 个矿石样品的 8 件黄铁矿进行 S 同位素分析,同时选取 3 个黄铁矿化石英斑岩样品的 4 件黄铁矿进行 S 同位素分析,样品描述及 S 同位素组成见表 2。矿石 $\delta^{34}\text{S}$ 值总体为 $3.24\% \sim 4.84\%$ (表 2),极差为 1.60% ,平均值为 4.198% ;矿化石英斑岩 $\delta^{34}\text{S}$ 值总体为 $2.22\% \sim 3.86\%$ (表 2),极差为 1.64% ,平均值为 2.805% 。矿石与岩体的 $\delta^{34}\text{S}$ 变化范围较窄,显示 S 同位素组成均较稳定,矿石的值较岩体中的大。由此说明,七宝山矿床的 S 同位素组成与陨石 S 同位素相近,可能为上地幔来源的产物。

3.3 Pb同位素测试结果

Pb同位素测试的样品与分析矿物与S同位素分析的基本相同,共测试10件Pb同位素,其中6个矿石样品6件分析样,3个黄铁矿化石英斑岩样品4件分析样,样品描述可见表2,Pb同位素分析结果见表3。

矿石的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为18.315~18.396,平均值为18.359; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为15.629~15.737,平均值为15.675, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为38.376~38.856,平均值为38.609。矿化岩体的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为18.318~18.412,平均值为18.373; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为15.652~15.717,平均值为15.697; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为38.569~38.734,平均值为38.651。Pb的各同位素变化范围均较小。

利用H-H单阶段铅演化模式^[27-29],计算得到七宝山矿床硫化物Pb同位素的相关参数(表3)。其中,矿石 μ 值的变化范围为9.53~9.74,平均值为9.617;矿化岩体 μ 值的变化范围为9.58~9.69,平均值为9.666;矿石 ϕ 值的变化范围为0.590~0.600,平均值为0.5945;矿化斑岩 ϕ 值的变化范围为0.595~0.597,平均值为0.596。矿石的Th/U值变化范围为3.77~3.95,平均值为3.85;矿化斑岩的Th/U值变化范围为3.82~3.89,平均值为3.86。

同时, $^{208}\text{Pb}/(^{206}\text{Pb}+^{207}\text{Pb})$ 值是运用Pb同位素组成划分花岗岩成因类型或探讨矿床矿质来源良好的稳定同位素标志^[10]。七宝山矿床矿石的 $^{208}\text{Pb}/(^{206}\text{Pb}+^{207}\text{Pb})$ 值为1.1295~1.1388,平均值为1.1344;矿化斑岩的 $^{208}\text{Pb}/(^{206}\text{Pb}+^{207}\text{Pb})$ 值为1.1311~1.1364,平均值为1.1344。

4 讨论

4.1 成矿年龄

前文提到钦杭成矿带内与斑岩相关的铜矿(斑岩-矽卡岩型),东段以德兴铜矿和永平铜矿最为典型;西段包括铜山岭铜矿、宝山铜多金属矿、水口山铜多金属矿和七宝山铜多金属矿床,以及近年新发现的圆珠顶大型铜钼矿。将前人对钦杭成矿带斑岩型铜矿的成矿时间做过的研究进行统计(表4),成矿带斑岩型铜矿的成岩成矿年龄主要集中于180~150Ma之间,形成于燕山早期。

本文利用七宝山铜多金属矿床中的含矿石英脉进行石英矿物的Rb-Sr法定年,获得的石英流体包裹体Rb-Sr同位素等时线年龄为 $153.4\pm 2.0\text{Ma}$ (MSWD=1.8),其中MSWD<2,说明其可以代表七宝山铜多金属矿床的成矿年龄。矿床形成于晚侏罗世,与矿区内石英斑岩年龄相同^[18],说明该成矿年龄可信度高。这与钦杭成矿带内斑岩-矽卡岩型矿床特征相似,成矿年龄与成岩年龄非常接近,成因关系密切。

同时, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值也是判断成岩成矿物质来源的重要指标,在矿床地质研究中常利用其来示踪成矿物质来源、岩浆流体、深源流体的壳幔混染作用^[39]。为避免放射性 ^{87}Rb 衰变对Sr同位素造成的影响,利用软件GeoKit^[40]将各硫化物的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 测试值换算到154Ma前的初始Sr同位素比值(表1)。由表1可以看出,七宝山矿床石英矿物的Sr同位素初始比值($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)介

表3 七宝山铜多金属矿床硫化物的Pb同位素组成
Table 3 Lead isotopic composition of pyrite from the Qibaoshan Cu-polymetallic deposit

样品号	样品类型	分析矿物	分析结果							
			同位素比值			表面年龄/Ma	ϕ 值	μ 值	Th/U	$^{208}\text{Pb}/(^{206}\text{Pb}+^{207}\text{Pb})$
			$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$					
QB2	黄铁矿	18.384±0.007	15.689±0.007	38.509±0.015	295	0.594	9.64	3.79	1.1302	
QB4	黄铁矿	18.315±0.002	15.661±0.002	38.376±0.005	310	0.596	9.59	3.77	1.1295	
QB6	矿 石	黄铁矿	18.384±0.002	15.737±0.003	38.856±0.007	351	0.600	9.74	3.95	1.1388
QB8		黄铁矿	18.326±0.006	15.665±0.004	38.632±0.015	307	0.596	9.6	3.87	1.1365
QB12		黄铁矿	18.350±0.001	15.629±0.001	38.577±0.004	247	0.590	9.53	3.83	1.1353
QB19		黄铁矿	18.396±0.003	15.666±0.003	38.705±0.008	258	0.591	9.6	3.87	1.1363
QB1	石	黄铁矿	18.390±0.003	15.711±0.001	38.571±0.006	316	0.596	9.69	3.82	1.1311
QB17	英	黄铁矿	18.318±0.004	15.652±0.003	38.569±0.01	297	0.595	9.58	3.85	1.1354
QB20	斑	黄铁矿	18.412±0.006	15.717±0.006	38.734±0.015	308	0.596	9.69	3.88	1.1349
QB20	岩	黄铁矿	18.373±0.007	15.707±0.006	38.728±0.016	324	0.597	9.68	3.89	1.1364

表 4 钦杭结合带主要斑岩相关铜矿床及其成岩成矿年龄
Table 4 Porphyry-related copper deposits and their ages of diagenesis
and mineralization in QHSZ, southern China

序号	矿床名称	矿石种类	侵入体类型	侵入体年龄		成矿年龄		资料来源
				测试方法	年龄/Ma	测试方法	年龄/Ma	
1	德兴	Cu-Au-Mo	花岗闪长斑岩	锆石 U-Pb	171±3	辉钼矿 Re-Os	170.4±1.8	[30-31]
2	永平	Cu-W-Mo	石英斑岩	锆石 U-Pb	160±2.3	辉钼矿 Re-Os	156.7±2.8	[32]
					135±7.4		155.7±3.6	[33]
3	村前	Cu多金属	花岗斑岩	锆石 U-Pb	169±1.1			[34]
4	铜山岭	Cu多金属	花岗闪长斑岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	149±4			[35]
5	宝山	Cu-Mo-W	花岗闪长斑岩	锆石 U-Pb	173±1.9	黄铁矿 Rb-Sr	174±7	[4,36]
6	水口山	Cu多金属	花岗闪长斑岩	锆石 U-Pb	172.3±1.6			[4]
7	七宝山	Cu多金属	石英斑岩	锆石 U-Pb	155~153	石英 Rb-Sr	153.4±2.0	[23],本文
8	圆珠顶	Cu-Mo	花岗斑岩	SHRIMP	154±2	辉钼矿 Re-Os	155±5	[37-38]
				锆石 U-Pb	153.4±1.6			

于 0.71827~0.71863 之间,平均值为 0.71842,明显高于地幔 Sr 初始比值(0.704)^[6],与大陆地壳 Sr 初始比值的平均值(0.719)^[41]相当。因此,Rb-Sr 同位素组成表明,七宝山矿床的石英脉来自地壳物质。

4.2 硫的来源

七宝山铜多金属矿床矿石 $\delta^{34}\text{S}$ 值总体变化较小,为 3.24‰~4.84‰(表 2),极差为 1.60‰,平均值为 4.198‰;矿化石英斑岩 $\delta^{34}\text{S}$ 值总体变化也不大,为 2.22‰~3.86‰,极差为 1.64‰,平均值为 2.805‰,其 $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}(\text{‰})$ 频数统计直方图见图 3。矿化石英斑岩 $\delta^{34}\text{S}$ 值较矿石小,更趋近于 0。

通常认为,在 S 同位素分馏达到平衡条件下,共生硫化物(包括硫酸盐)的 $\delta^{34}\text{S}$ 值按硫酸盐→辉钼矿→黄铁矿→磁黄铁矿和闪锌矿→黄铜矿→方铅矿的顺序递减^[27-28]。由于本文只分析了黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值,参考陆玉梅等^[5]和刘姝群等^[42]在本矿床所测的数据,七宝山铜多金属矿床共生矿物组合中硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值表现出 $\delta^{34}\text{S}_{\text{黄铁矿}}$ (平均值 3.72) > $\delta^{34}\text{S}_{\text{黄铜矿}}$ (平均值 3.48) > $\delta^{34}\text{S}_{\text{闪锌矿}}$ (平均值 3.47) > $\delta^{34}\text{S}_{\text{方铅矿}}$ (平均值 1.36) 的趋势,其中黄铜矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值大于闪锌矿的值,表明主成矿期矿床中共生的硫化物 S 同位素分馏并未达到平衡,且平均值为 4.198‰,离散度小(1.60‰),接近陨石 S 同位素组成。

区内石英斑岩体内硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值平均为 2.805‰,极差为 1.64‰,更接近陨石硫的共同特征,说明岩体中硫来源于地幔。而矿石内 S 同位素 $\delta^{34}\text{S}$

值较岩体中的大,说明矿石中的硫在矿床形成过程中受到少量地壳硫(包括硫酸盐硫和生物硫)的混溶,反映了七宝山矿床中硫来源于主体地幔硫和少量地壳硫混溶的混合硫源。

4.3 铅的来源

七宝山铜多金属矿床 Pb 同位素组成较稳定(表 3),比值比较均一($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为 18.315~18.396, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为 15.629~15.737, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为 38.376~38.856),变化范围较小,而石英斑岩变化范围更小。这种特征与湘南宝山等同类矿床的 Pb 同位素组成十分相似,而与南岭层控型铅锌矿床相差较大,主要是因为后者 Pb 同位素组成很不稳定,变化较大。层控矿床 Pb 同位素组成可以是正常铅、异常铅或二者的混合铅,说明该类矿床成矿作用过程(多阶段)和物质来源(多来源)的复杂性。相反,与岩浆活动相关的七宝山矿床的 Pb 同位素组成稳定,变化范围较小,反映该类矿床成矿物质来源比较单一,即主要为岩浆来源。

从 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解(图 4-A)可以看出,所有样品点落在上地壳演化线上及其附近或上地壳与造山带演化线之间,表明 Pb 同位素来自较高成熟度的物源区。在 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图(图 4-B)中,所有 Pb 同位素点均落在造山带与下地壳演化线之间,并靠近造山带演化线,这类现象通常被解释为亏损铀的下地壳与富集铀的上地壳混合或相互作用的产物。七宝山铜多金属矿床的 Th/U 值变



图3 七宝山铜多金属矿床 $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$ 频数统计直方图

Fig. 3 The distribution of $\delta^{34}\text{S}$ values of the Qibaoshan Cu-polymetallic deposit

化范围为3.77~3.95(表3),平均值为3.85,远大于上地壳和地幔的3.33及3.35,而小于下地壳的5.80,说明七宝山矿床Pb同位素来源中下地壳物质贡献较多。根据Zartman等^[43]的铅构造模式,现代海相拉斑玄武岩或一些洋岛火山岩的Pb同位素成分代表了

地幔的主要Pb同位素组成;岛弧(原生弧)到大陆岛弧(成熟弧)环境实际上铅构造模式中的造山带,一些原生岛弧,由于没有或很少有大陆碎屑的混入,其Pb同位素成分接近地幔组成;成熟弧是在靠近大陆地带演化形成的,其主要物质来自地幔(火山岩或深成岩)与大陆地壳(沉积碎屑)的混合物;起源于下地壳古老的深成岩或火山岩的后生矿床或岩石的Pb同位素成分代表了下地壳Pb同位素成分,这些岩石具有铀亏损的麻粒岩相特殊的同位素特征。因此,从七宝山铜多金属矿床Pb同位素成分具有位于下地壳与造山带演化线之间且接近造山带演化线的Pb同位素特征看,矿床不像是地幔来源,而可能是地壳深部(或下地壳)幔质岩石(火山岩、深成岩)和大陆地壳(碎屑沉积岩)深部混熔岩浆分异演化的产物。

刘姝群等^[10]提出, $^{208}\text{Pb}/(^{207}\text{Pb}+^{206}\text{Pb})$ 值是运用Pb同位素组成划分花岗岩成因类型或探讨矿床物质来源时良好的标志,同时认为,作为Th、U元素最终衰变产物的钍铅(^{208}Pb)和铀铅($^{207}\text{Pb}+^{206}\text{Pb}$),其比值在地壳演化成熟过程中必将具有Th/U(或U/Pb)值一致的变化规律:地幔、下地壳和上地壳的 $^{208}\text{Pb}/(^{207}\text{Pb}+^{206}\text{Pb})$ 值分别为1.1237, 1.1754和1.1149,说明下地壳相对富钍铅而贫铀铅;上地壳则相反,富铀铅而贫钍铅。与之相应,反映在 μ 值上,

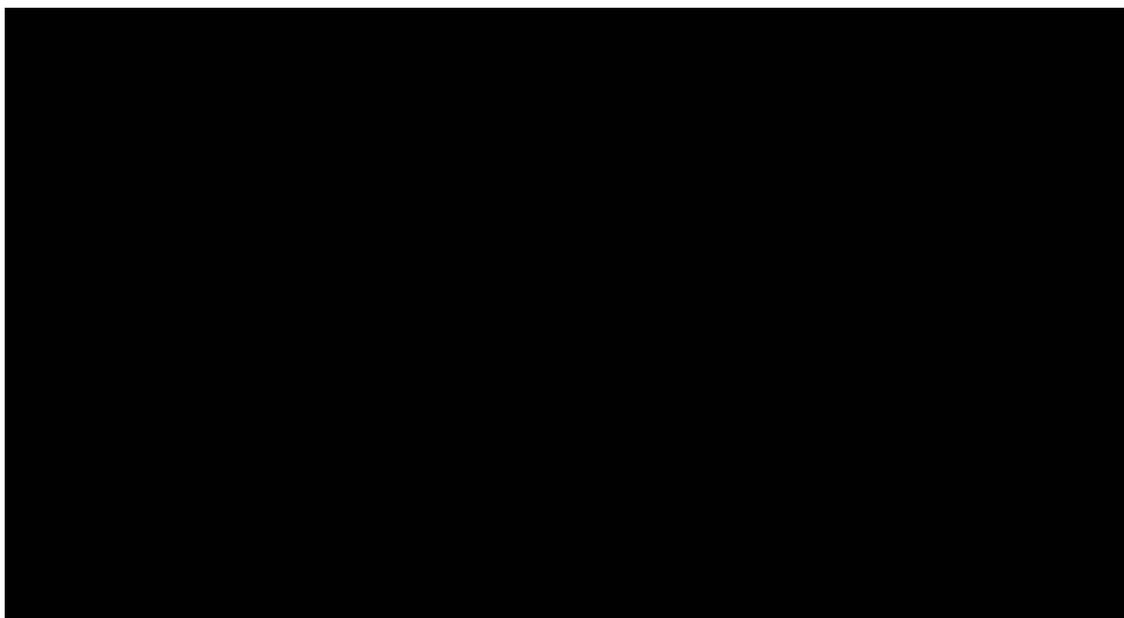


图4 七宝山铜多金属矿床Pb同位素模式图(底图据参考文献[43])

Fig. 4 The Pb isotopic model for the Qibaoshan Cu-polymetallic deposit

地壳岩石中以上地壳最高(13.22)^[10]。从表3列出的矿石及岩体 $^{208}\text{Pb}/(^{207}\text{Pb}+^{206}\text{Pb})$ 值、 μ 值和Th/U值看, $^{208}\text{Pb}/(^{207}\text{Pb}+^{206}\text{Pb})$ 值为1.1295~1.1388,平均值为1.1344;矿化斑岩 $^{208}\text{Pb}/(^{206}\text{Pb}+^{207}\text{Pb})$ 值为1.1311~1.1364,平均值为1.1344,大于上地壳及地幔统一比值;矿石 μ 值为9.53~9.74,平均值为9.617;矿化岩体 μ 值为9.58~9.69,平均值为9.666,明显低于上地壳;Th/U值为3.77~3.95(表3),平均值为3.85,明显大于上地壳和地幔的3.33及3.35。这表明,七宝山铜多金属矿床的Pb同位素组成具有下地壳富钍(铅)贫铀(铅)的特点,显示其成岩成矿物质来源于下地壳或地壳深部。

综上所述,七宝山铜多金属矿床及其邻区的地质背景和矿床地质-地球化学特征的综合研究表明,七宝山矿床的成矿物质主要来自与含矿斑岩体有关的深部岩浆分异演化而析出的含矿气-液流体;与此同时,含矿斑岩体定位-结晶时通过周围受热地下水的对流循环作用,可以从围岩中萃取少量成矿物质加入成矿作用。

5 结 论

(1)采用七宝山铜多金属矿床中含矿石英脉的石英矿物进行Rb-Sr法定年,成矿年龄为 $153.4\pm 2.0\text{Ma}$ (MSWD=1.8),与矿区内石英斑岩年龄相近(153~155Ma),表明成矿年龄与成岩年龄非常接近,成因关系密切。

(2)七宝山铜多金属矿床矿石 $\delta^{34}\text{S}$ 值总体变化较小,平均值为4.198‰;矿化石英斑岩 $\delta^{34}\text{S}$ 值总体变化也不大,平均值为2.805‰。矿化石英斑岩 $\delta^{34}\text{S}$ 值较矿石小,更趋近于0,说明岩体中硫极可能源于地幔。

(3)七宝山铜多金属矿Pb同位素组成较稳定,变化范围较小(0.480),而石英斑岩变化范围更小(0.165)。岩体与矿床数据非常相近,结合岩体成因特征,矿床Pb同位素与石英斑岩体Pb同位素应为同源,矿床的形成与石英斑岩成岩过程密切相关。

(4)综合分析七宝山矿床Sr-S-Pb同位素体系,表明七宝山铜多金属矿床的成矿物质主要来自同含矿斑岩体有联系的深部岩浆分异演化而析出的含矿气-液流体。

致谢:审稿专家对稿件提出了宝贵的修改意

见,在此表示诚挚的谢意。

参考文献

- [1]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.
- [2]毛景文,谢桂青,郭春丽,等.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.
- [3]毛景文,陈懋弘,袁顺达,等.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.
- [4]王岳军,范蔚茗,郭峰,等.湘东南中生代花岗闪长岩锆石U-Pb法定年及其成因指示[J].中国科学(D辑),2001,31(9):745-751.
- [5]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.
- [6]沈瑞锦,陆玉梅.湖南七宝山多金属矿床成因模式[C]//铀家达.湖南地学新进展.长沙:湖南科学技术出版社,1996:29-36.
- [7]胡祥昭,彭恩生,孙振家.湘东北七宝山铜多金属矿床地质特征及成因探讨[J].大地构造与成矿学,2000,24(4):365-370.
- [8]胡祥昭,肖宪国,杨中宝.七宝山花岗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.
- [9]胡俊良,徐德明,张颢.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.
- [10]刘娟群,金维群,张录秀,等.湘东北斑岩型和热液脉型铜矿成矿物质来源探讨[J].华南地质与矿产,2001,17(1):40-47.
- [11]李华芹,陈富文,蔡红.新疆西准噶尔地区不同类型金矿床Rb-Sr同位素年代研究[J].地质学报,2000,74(2):181-192.
- [12]李华芹,王登红,陈富文,等.湖南雪峰山地区铲子坪和大坪金矿成矿作用年代学研究[J].地质学报,2008,82(7):900-905.
- [13]蔡明海,韩凤彬,何龙清,等.湘南新田岭白钨矿床He, Ar同位素特征及Rb-Sr测年[J].地球学报,2008,29(2):167-173.
- [14]付建明,李华芹,马丽艳,等.粤北东昌市和尚田钨锡多金属成矿时代及其地质意义[J].地质学报,2013,87(9):1349-1358.
- [15]蒯志永,王登红,张长青.四川宁南跑马铅锌矿床的成矿时代及其地质意义[J].中国地质,2010,37(2):488-494.
- [16]Faure G. Principle of Isotope Geology(2nd Edition)[M]. New York: John Wiley & Sons, 1986:183-199.
- [17]胡俊良,徐德明,张颢.湖南七宝山矿床石英斑岩锆石U-Pb法定年及Hf同位素地球化学[J].矿床地质,2014,33(增刊):201-202.
- [18]李华芹,刘家齐,魏琳.热液矿床流体包裹体年代学研究及其地质应用[M].北京:地质出版社,1993:1-27.
- [19]李华芹.新疆北部有色金属矿床成矿作用年代学[M].北京:地质出版社,1998.
- [20]蔡应雄,杨红梅,段瑞春,等.湘西-黔东南下寒武统铅锌矿床流体包裹体和硫、铅、碳同位素地球化学特征[J].现代地质,2014,28(1):29-41.
- [21]Qiu X F, Yang H M, Lu S S, et al. Geochronology and geochemistry of Grenville-aged(1063±16Ma) metabasalts in the Shennongjia district, Yangtze block: implications for tectonic evolution of the South China Craton[J]. International Geology Review, 2015,57:76-96.
- [22]Ludwig K R. IsoplotEx v. 2.6[M]. Berkeley Geochronological

- Center Spec Publ. LA. 1999.
- [23]胡俊良,徐德明,张颀,等.湖南七宝山铜多金属矿床石英斑岩时代与成因:锆石U-Pb定年及Hf同位素与稀土元素证据[J].大地构造与成矿学,2016,40(6):1196-1211.
- [24]Norman D Z, Lands G P. Source of mineralizing components in hydrothermal ore fluids as evidenced by $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and stable isotope data from the Pasto Bueno Deposit, Peru[J]. *Economical Geology*, 1983,78: 451-456.
- [25]Rosman G R, Weis D, Wasserburg G J. Rb, Sr, Nd and Sm concentrations in quartz[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1987, 51: 2325-2329.
- [26]Changkakoti A, Gray J, Krstic D, et al. Determinations of radiogenic isotopes (Rb/Sr, Sm/Nd, and Pb/Pb) in fluid inclusion waters: An example from the Bluebell Pb-Zn deposit, British Columbia, Canada[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1988, 52: 961-967.
- [27]张理刚.稳定同位素在地质科学中的应用[M].西安:陕西科学技术出版社,1985:152-185.
- [28]郑永飞,陈江峰.稳定同位素地球化学[M].北京:科学出版社,2000:143-245.
- [29]张长青,李厚民,代军治,等.铅锌矿床中矿石铅同位素研究[J].矿床地质,2006,25(增刊):213-216.
- [30]王强,赵振华,简平,等.德兴花岗闪长斑岩SHRIMP锆石U-Pb年代学和Nd-Sr同位素地球化学[J].岩石学报,2004,20(2):315-324.
- [31]Lu J J, Hua R M, Yao C L. Re-Os age for molybdenite from the Dexing porphyry Cu-Au deposit in Jiangxi province, China[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, 69(Suppl. A):882.
- [32]丁昕,蒋少涌,倪培,等.江西武山和永平铜矿含矿花岗质岩体锆石SIMS U-Pb年代学[J].高校地质学报,2005,11(3):383-389.
- [33]李晓峰, Yasushi W, 华仁民, 等. 华南地区中生代Cu-(Mo)-W-Sn矿床成矿作用于洋岭/转换断层俯冲[J]. 地质学报, 2008,82(5): 625-640.
- [34]王强, 孙燕, 张雪辉, 等. 江西省村前铜多金属矿床斜长花岗斑岩LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄及地质意义[J]. 中国地质, 2012, 39(5): 1143-1150.
- [35]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]. 大地构造与成矿学, 2007,31(4): 482-489.
- [36]姚黎明, 华仁民, 林锦富. 湘南宝山矿床REE、Pb-S同位素地球化学及黄铁矿Rb-Sr同位素定年[J]. 地质学报, 2006,80(7): 1045-1054.
- [37]陈富文, 李华芹, 王登红, 等. 粤西圆珠顶斑岩型铜铅矿床成矿地质特征及成岩成矿作用年代学研究[J]. 地质学报, 2012,86(8): 1298-1305.
- [38]陈懋弘, 李忠阳, 李菁, 等. 初论广西大瑶山地区多期次花岗质岩浆活动与成矿系列[J]. 地学前缘, 2015,22(2): 41-53.
- [39]侯明兰, 蒋少涌, 姜耀辉, 等. 胶东蓬莱金城矿区的S-Pb同位素地球化学和Rb-Sr同位素年代学研究[J]. 岩石学报, 2006,22(10): 2525-2533.
- [40]路远发. GeoKit: 一个用VBA构建的地球化学工具软件包[J]. 地球化学, 2004,33(5):459-464.
- [41]孙省利.西秦岭泥盆系西城矿化集中区烃碱流体成矿系列研究[D].成都理工大学博士学位论文,2001:43-44.
- [42]刘娟群, 杨世义, 张秀兰, 等. 粤北大宝山多金属矿床成因的初步探讨[J]. 地质学报, 1985,61(1): 47-61.
- [43]Zartman R E, Doe B R. Plumbotectonics—the model[J]. *Tectonophysics*, 1981,75: 135-162.
- 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.