

曹强, 刘家军, 孙义伟, 等. 秦岭造山带南缘荞麦冲金矿床正长斑岩锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 中国地质, 2015, 42(5): 1303-1323.
Cao Qiang, Liu Jiajun, Sun Yiwei, et al. Zircon U-Pb age of ore-bearing rock in the Qiaomaichong gold deposits on the southern margin of the Qinling orogenic belt and its geological significance[J]. Geology in China, 2015, 42(5): 1303-1323(in Chinese with English abstract).

秦岭造山带南缘荞麦冲金矿床正长斑岩 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义

曹 强^{1,2} 刘家军¹ 李龙吟² 孙义伟¹ 杨明银² 李书涛² 杨尚松¹

(1. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 地球科学与资源学院, 北京 100083;
2. 中国地质矿业总公司, 北京 100029; 3. 湖北地质调查院, 湖北 武汉 430034)

摘要:秦岭造山带南缘存在大片的早古生代基性火山岩, 荞麦冲金矿的正长斑岩脉体呈北西向侵入基性火山岩地层中。本文通过对该正长斑岩脉体中的岩浆岩锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 定年、元素地球化学以及 Hf 同位素研究, 探讨正长斑岩脉体的侵入时代、岩石成因和地球动力学背景。锆石 U-Pb 定年结果: 正长斑岩脉体的侵入时代可以分为 2 期, 相对应的 2 件正长斑岩锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值分别为 $(415\pm 7)\text{Ma}$ 、 $(477\pm 6)\text{Ma}$, 前者属于晚志留世时期, 后者为寒武纪到早奥陶世时期。地球化学特征上显示具有较高的 SiO_2 含量 ($>75\%$), 里特曼指数 $\delta=1.59$, 高 Al 低 Ti 的特点, Eu 和 Sr 具有明显负异常, 为钙碱性脉体。正长斑岩的 Hf 同位素检测结果得到 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 全部为正值, 其变化范围较大 (3.4~11.8), 说明岩浆主要来自亏损地幔, 个别 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 异常, 推断岩浆上侵过程中混入少量地壳物质, 从而显示壳幔混合特征。在基性岩的地球化学表现为稀土总量很高 ($\sum \text{REE}=149.62\times 10^{-6}\sim 321.55\times 10^{-6}$), 轻稀土强烈富集型, 呈现出高度分异的特点。研究表明, 在早古生代时期, 区域上为板内裂解的构造环境, 使软流圈地幔上涌冷凝固形成基性岩地层, 正长斑岩脉体在侵入基性岩形成过程, 从地壳深部的 Au 带入地壳表层, 为地层 Au 的预富集, 后期剪切成矿作用提供了 Au 的物质来源; 正长斑岩脉体形成时代的厘定, 确定了该区金源层形成时代, 对后期金的富集具有重要意义。

关键词:秦岭南缘; 荞麦冲金矿; 锆石 U-Pb; Hf 同位素; 地球化学; 正长斑岩

中图分类号: P 597^{+.3}; P618.51 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2015)05-1303-21

Zircon U-Pb age of ore-bearing rock in the Qiaomaichong gold deposits on the southern margin of the Qinling orogenic belt and its geological significance

CAO Qiang^{1,2}, LIU Jia-jun¹, LI Long-yin², SUN Yi-wei¹,
YANG Ming-yin², LI Shu-tao², YANG Shang-song¹

(1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. China National Geological & Mining Corporation, Beijing 100029, China; 3. Hubei Institute of Geological Survey, Wuhan 430034, Hubei, China)

收稿日期: 2014-11-20; 改回日期: 2015-03-10

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (41030423) 和中国地质调查局地质调查工作项目 (1212011120354) 联合资助。

作者简介: 曹强, 男, 1989 年生, 硕士, 矿物学, 岩石学, 矿床学专业, 主要从事矿床学与矿床地球化学研究; E-mail: cao.qiang1989@163.com。

通讯作者: 刘家军, 男, 1963 年生, 博士, 教授, 从事矿床学研究与教学工作; E-mail: liujiajun@cugb.edu.cn。

Abstract: On the southern margin of the Qinling orogenic belt, there exists a multitude of Early Paleozoic mafic volcanic rocks, and the syenite porphyry veins in the Qiaomaichong gold deposit were intruded in NW direction into mafic volcanic rocks in the study area. By means of studying new zircon LA-ICP-MS U-Pb age and Hf-isotope, whole-rock major and trace elements of syenite porphyry veins in the Qiaomaichong gold deposit and the mafic country rock, the authors tried to constrain the age and petrogenesis and geodynamic background of the siliceous veins. It is revealed that the intrusion of the syenite porphyry can be divided into two phases, and the corresponding two zircon samples of syenite porphyry have $^{206}\text{Pb} / ^{238}\text{U}$ weighted average ages of (415 ± 7) Ma and (477 ± 6) Ma respectively. The former age belongs to the Late Silurian, whereas the latter to the Early Ordovician. Veins have a high SiO_2 ($>75\%$) content, $\sigma=1.59$, and $A/\text{CNK}=1.28$, which suggests peraluminous alkaline siliceous shear veins. The $\varepsilon\text{Hf}(t)$ values are all positive, and vary in a large range (3.4 to 11.8), which suggests that almost all the matter came from the depleted mantle source, exhibiting a crust-mantle mixing feature. The mafic rocks have a high amount of REE ($149.62 \times 10^{-6} - 321.55 \times 10^{-6}$), and are strongly enriched in light rare earth elements, showing a high degree of differentiation. Research shows that this area was within plate tectonic cleavage in the early Paleozoic, so the mantle asthenosphere upwelling of magma formed mafic rocks. Then the veins brought the Au from deep crust into the surface crust in the invasion process, thus providing material of Au sources for pre-concentration of Au and later shear mineralization. The determination of the age of the formation of veins has a great significance for the study of late stage gold enrichment.

Key words: southern margin of Qinling orogenic belt; Qiaomaichong gold deposit; zircon U-Pb geochronology; zircon Hf isotope; geochemistry; syenite porphyry

About the first author: CAO Qiang, male, born in 1989, master, engages in the study of ore deposit geochemistry; E-mail: cao.qiang1989@163.com.

1 引 言

湖北省随州市位于秦岭—大别造山带中段,该造山带夹带于华北克拉通与扬子克拉通之间(图1),发育了早中生代的高压—超高压变质带,是世界上规模最大的变质杂岩带^[1-2],高压—超高压变质带的出现表明造山带是一个巨型克拉通汇聚的构造带。

东秦岭地区,大量发育构造控制的脉状铅锌矿、银矿、铜矿等。它们与造山型金矿产于同一构造单元的断裂构造或褶皱构造内,矿床地质地球化学特征十分相似^[4]。荞麦冲金矿位于随州南东秦岭造山带的南缘,剪切带走向 $290^{\circ} \sim 320^{\circ}$,倾向西南,长约50 km,宽100~1500 m,并且发育有 α 型褶皱、 σ 构造、S-C组构、剪切褶皱糜棱岩等^[5]。

前人在对本区研究集中于地球化学特征、构造特征以及矿床特征,并得到相关方面的成果。在对荞麦冲金矿进行元素地球化学、岩石化学、同位素、包裹体、稀土元素地球化学等方面的研究,发现了燕山期脆—韧性剪切变形变质作用在金矿成矿过程中的主导作用^[6]。杨明银按照H-H同位素计算矿石中Pb同位素的模式年龄,得到两组年龄,其中反映玄武质成岩年龄为400~418 Ma,反映后期的剪切蚀变影响时间为325 Ma,而另外一组模式年龄155 Ma

可能反映矿床的成矿年龄。根据前人在地球动力学方面的研究,湖北荞麦冲金矿形成的地壳演化阶段为被动陆缘裂谷(地槽)期,发育有下志留统、下奥陶统、寒武系^[7];在加里东期玄武岩浆的喷发以及正长斑岩脉的侵入将地壳深部的Au元素带到地壳表层^[5],在后期的剪切、热蚀变等作用富集成矿。

本文在前人研究基础上,采用LA-ICP-MS技术,对随州荞麦冲正长斑岩中的锆石进行了微区原位U-Pb同位素测定,同时结合岩石地球化学、Lu-Hf同位素以及构造背景对该区含矿脉体侵入事件进行初步的探讨,对工作区存在的大量基性岩的成岩构造环境进行探讨。

2 地质背景

秦岭造山带可划分为华北克拉通南缘、北秦岭造山带、南秦岭造山带和扬子克拉通北缘4个构造单元^[8]。研究区位于秦岭造山带东段桐柏山以南的襄广断裂带北侧,构造位置属于南秦岭南部边缘带(图1)。中生代以来,随着勉略洋的闭合,华北与扬子板块发生全面碰撞,引发了秦岭造山带中生代强烈的造山运动,在秦岭地区发生了巨量的大规模的岩浆活动及壳幔相互作用^[9]。该区自北向南可以划分为3个断层、变质变形特征、岩石组合有明显区别

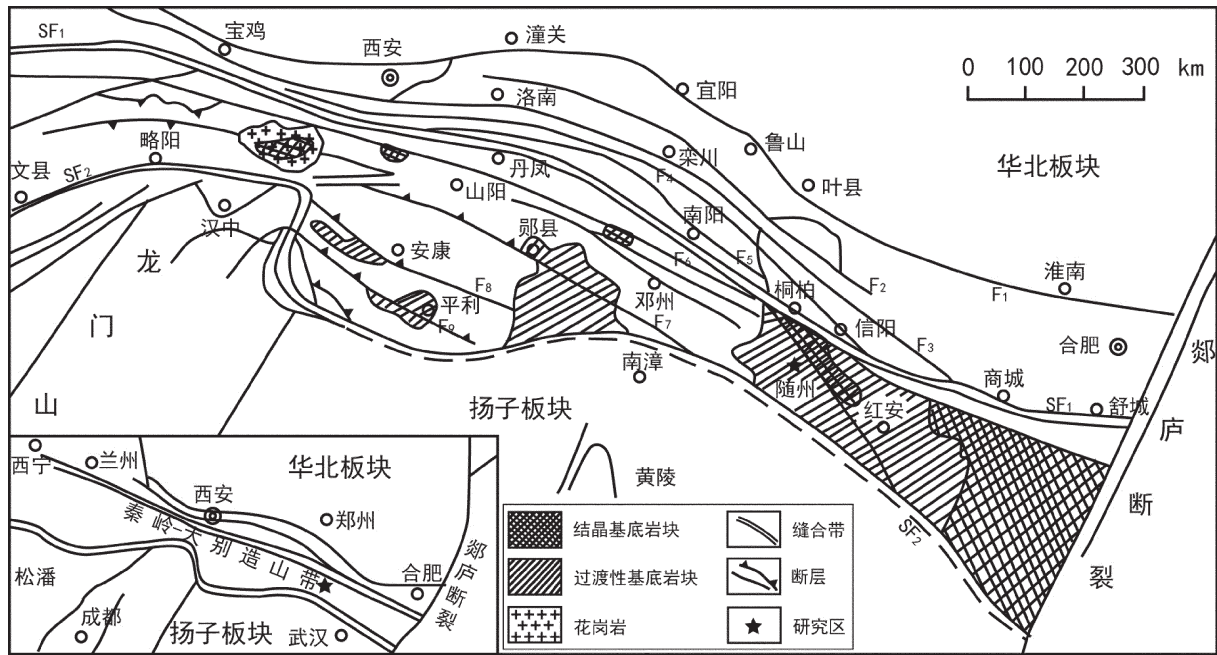


图1 秦岭—大别造山带结构单元划分示意图(据文献[3]修改)

SF₁—商丹缝合带; SF₂—勉略缝合带; F₁—秦岭北界逆冲断层; F₂—石门—马超营逆冲推覆断层; F₃—洛南—淅川逆冲推覆断层; F₄—皇台—瓦穴子推覆带; F₅—商县—夏馆逆冲断层; F₆—山阳—凤县逆冲推覆断层; F₇—十堰断层; F₈—石泉—安康逆冲断层; F₉—红椿坝—平利断层

Fig. 1 Schematic map showing structural units of Qinling - Dabie orogenic belt (modified from references[3])

SF₁—Shangdan suture zone; SF₂—Mianlue suture zone; F₁—North Qinling thrust; F₂—Shimen-Machaoying overthrust fault; F₃—Luonan-Luanchuan overthrust fault; F₄—Huangtai—Waxuezi overthrust belt; F₅—Shangxian—Xiaguan thrust; F₆—Shanyang—Fengxian overthrust fault; F₇—Shiyan fault; F₈—Shiquan-Ankang thrust; F₉—Hongchunba-Pingli fault

的构造单元^[10]。北缘为北淮阳构造带,主要为信阳—舒城断裂带,为中元古代、新元古代变质的碎屑岩组成;中间位于中央隆起带,普遍出露早中生代高压—超高压榴辉岩,在晚中生代时期发生大量的花岗质岩浆活动以及较为少量的基性岩浆侵入;在隆起区的东南部,发育加里东期基性—超基性岩体;在北西方向团风—麻城断裂分布,岩相分带明显,部分地区出露加里东期花岗岩;南缘为随应褶皱带,处于新城—广济断裂带南面,襄阳—广济断裂带北面,出露中元古代、新元古代的随县群,厚度小于1500 m。前人对该层位有不同的认识,李松生^[11]根据岩性组成特征,将其分为上下两个部分:上部为一系列的典型海相沉积碳酸盐建造,包括白云质大理岩、硅质条带白云大理岩等;下部为一套变质火山岩组合,含有凝灰质砾岩、变流纹质酸性凝灰岩、变质流纹状安山凝灰岩、绢云钠长岩、绢云石英片岩、绿泥片岩等。马昌前^[12]认为是一套变质的砂页岩—流纹英安岩建造,上部为变质砂页岩组,中部为变质的凝灰岩组,下部为变质—沉积凝灰岩组。

荞麦冲金矿床位于随州柳林镇地区,该区地处随应褶皱带,根据三分法的划分^[13]得知柳林地区为随州中段地层。主要出露为中上寒武统六合湾组,浅变质含炭质页岩—碳酸岩盐建造;奥陶—志留系兰家畈群组,变质流纹质火山碎屑岩及少量中—基性熔岩及碳酸岩盐建造。主要岩性为玄武岩、变玄武岩、枕状玄武岩、泥质板岩、绿泥阳起石片岩、大理岩等,同时该区存在古生代基性岩墙出露。后期有正长斑岩呈细脉状、岩枝状、瘤状侵入,总体呈北西向产出,在北西向的断裂带或不整合的接触面中分布较为密集(图2)。

3 样品与分析方法

3.1 样品描述

本次用于挑选锆石样品采集于后期侵入的正长斑岩脉体中,编号为13QMC-011和13QMC-013,分别采集于5号剪切脉体和13号剪切脉体中(图3-a);其余样品采自上寒武统六合湾组与奥陶—志留系兰家畈组。正长斑岩新鲜面呈淡黄色,氧

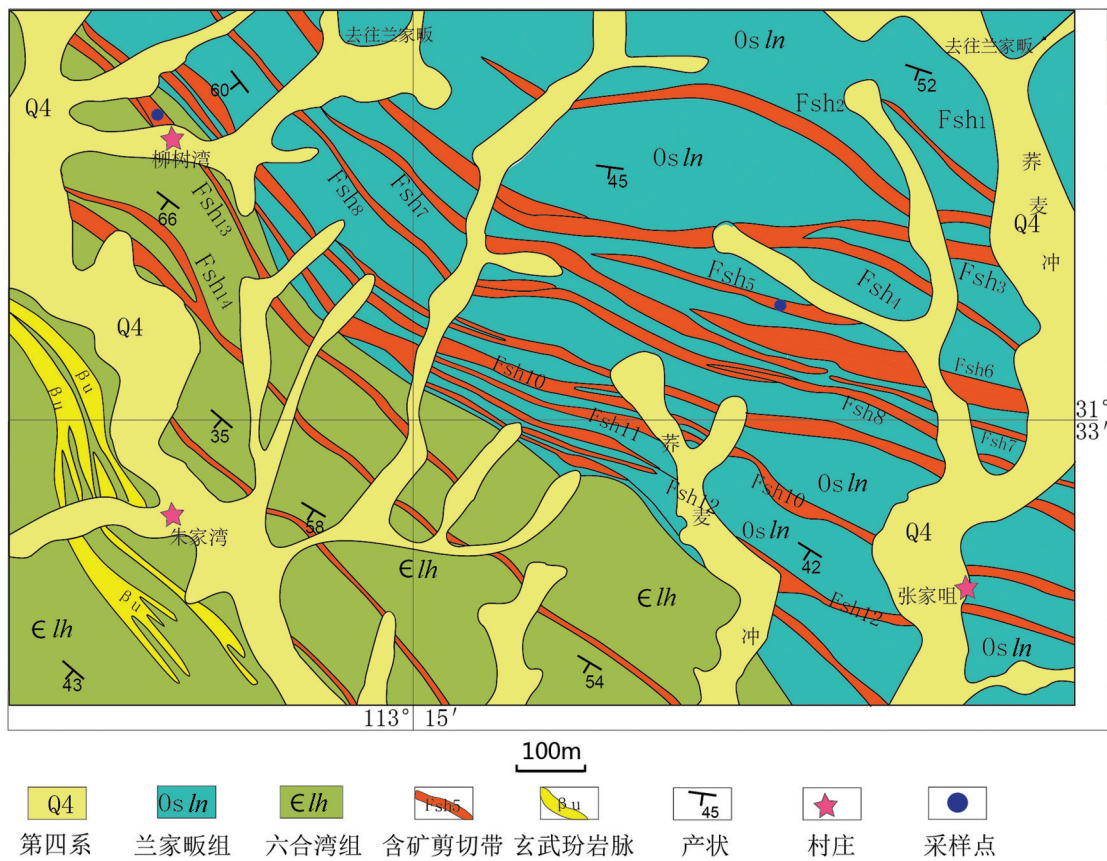


图2 随州荞麦冲矿区荞麦冲矿段地质平面图
Fig.2 Geological plan view of Qiaomaichong ore block in Suizhou

化面呈土黄色,斑状结构,岩石表面可见斑晶,大小颗粒不等,块状构造,可见长石颗粒大小为2~3 mm,细小的辉石颗粒,整体可见石英细脉和细小的斑晶,含铁质矿物。其余样品野外观察初步确定为玄武岩(图3-b)、蚀变玄武岩、灰岩、泥质板岩等;其中玄武岩表面灰绿色,氧化面褐色,具有斑状结构,块状构造,气孔状构造明显,辉石颗粒0.5~1 mm,可见角闪石、黑云母等暗色矿物,含有磁铁矿,微小的方解石颗粒,风化面有褐铁矿化,局部岩体可见碳酸盐化、绢云母化、硅化等;泥质板岩新鲜面土黄色,表面氧化成黄褐色,丝绸光泽,隐晶质结构,板状构造,节理发育,可见挠曲构造,含有铁质。

矿石(图3-c)的镜下显示,可见到黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、辰砂等,黄铁矿呈粒状、细脉状、浸染状产出(图3-d, g), 偶见黄铜矿与黄铁矿伴生(图3-e), 闪锌矿呈网状解理(图3-h), 辰砂呈网脉状(图3-f)。

3.2 分析方法

将新鲜的原岩样品破碎成能够通过50~80目筛网的粉末,在清水中淘洗,保留重砂部分,再经过电磁选者重砂中分选出锆石,在双目镜下根据锆石颜色、自形程度、形态等特征进行初步分类,挑选较好的锆石。将挑选出的锆石粘帖制成环氧树脂样品靶,打磨并抛光,然后对锆石进行透射光、反射光和阴极发光(CL)照相,以便在测定时能够选取合适的分析部位,以及在测定完成后为数据提供依据。锆石U-Pb同位素定年在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室利用LA-ICP-MS完成;激光剥蚀系统为GeoLas2005,电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)为Agilent7700x。在等离子体中心气流(Ar+He)中加入少量氮气目的是提高仪器灵敏度、降低检出限并且改善分析精密度^[14]。剥蚀锆石的激光束斑直径为32 μm。在定年过程中使用91500作为标样进行同位素分馏校正,每测定8个未

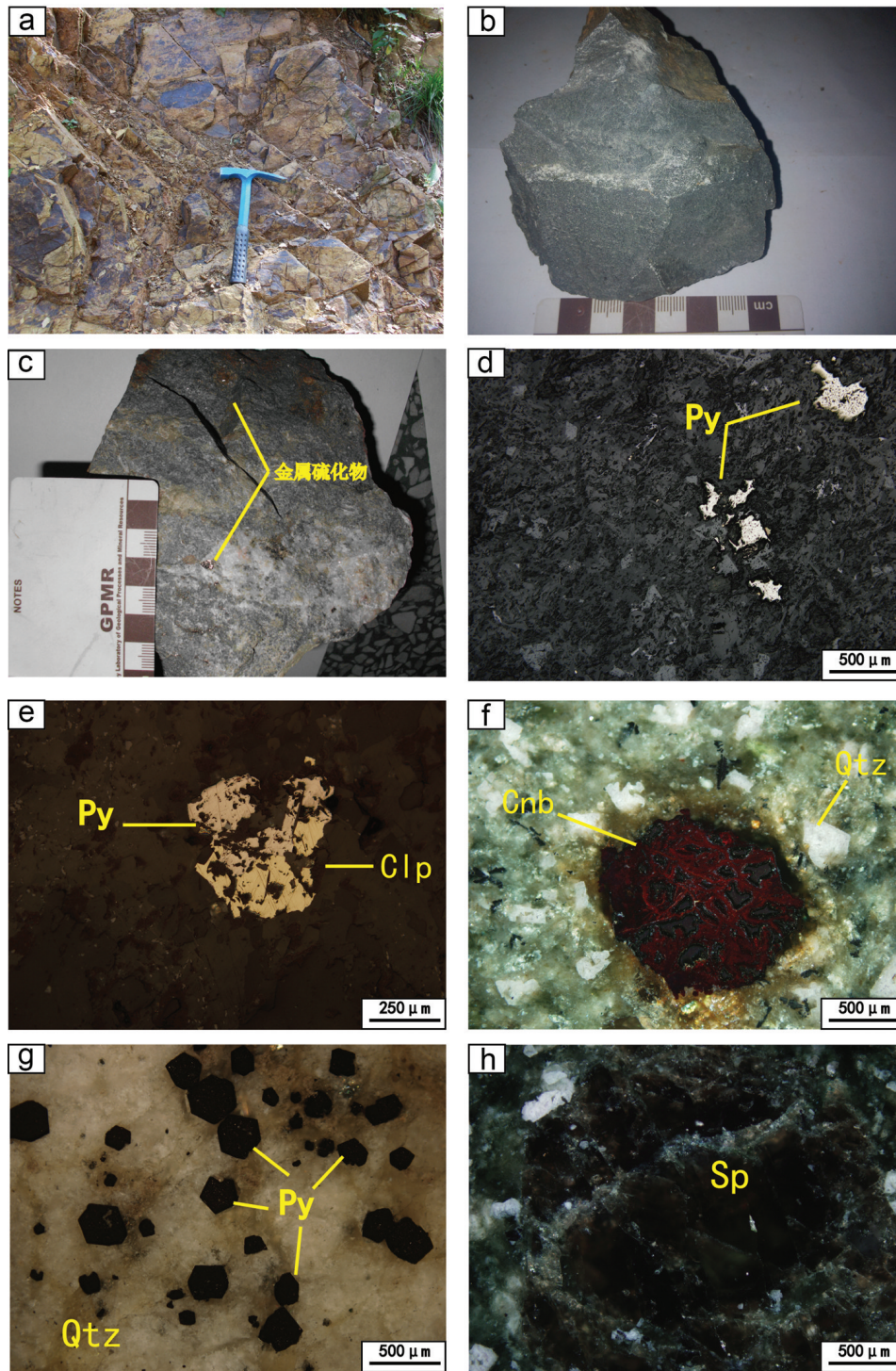


图3 样品宏观照片(a, b, c)和镜下显微照片(d, e, f, g, h)

a—采样点照片; b—玄武岩手标本; c—矿石手标本; d, e, g—黄铁矿产出形态; f—辰砂产出形态; h—闪锌矿产出形态; Py—黄铁矿; Clp—黄铜矿; Cnb—辰砂; Qtz—石英; Sp—闪锌矿

Fig. 3 Macrophotographs (a, b, c) and microphotographs (d, e, f, g, h) of samples

a—Sampling site; b—Basalt hand specimen; c—Ore hand specimen; d, e, g—Occurrence form of pyrite; f—Occurrence form of cinnabar; h—Occurrence form of sphalerite; Py—Pyrite; Clp—Chalcopyrite; Cnb—Cinnabar; Qtz—Quartz; Sp—Sphalerite

知样品数据后测定2个标准样品91500数据,在数据处理时用标准样品的值来校正未知样品。锆石的微量元素含量测定利用NIST SRM610作为外标、Si²⁹作为内标进行定量校正^[15]。分析处理数据,元素含量及U-Th-Pb同位素比值和年龄计算均采用中国地质大学(武汉)刘永胜的ICPMDDataCaL9.0软件完成。具体的仪器操作条件和实验步骤以及数据处理方法参考Liu et al.(2008;2010)。最后实验所测数据需要采用Andersen^[16]进行普通铅校正,有关计算及锆石U-Pb谐和图的绘制采用Ludwig^[17]博士的编写的Isoplot 4.0。测试结果见表1和图4。

锆石的原位Lu-Hf同位素分析是在中国地质科学院矿产资源研究所国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室,采用Newwave UP213紫外激光剥蚀系统(LA-MC-ICP-MS)和Neptune多接受电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICPMS)进行测定。实验过程中采用He作为剥蚀物质载气体,由于在U-Pb原位进行激光剥蚀,所以剥蚀直径采用固定的40 μm,激光脉冲频率为8 Hz,实验采用锆石标准GJ-1为参考标样,相关仪器操作条件及详细分析流程见侯可军等^[18]。本次实验标样GJ-1的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf测试加权平均值为0.282014±0.000015(2σ, n=5),与文献[18-20]所给参考值在误差范围内一致。在计算ε_{Hf}和(¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf)的值时,¹⁷⁶Lu的衰变常数为

$1.867 \times 10^{-11} \text{a}^{[21-23]}$;在计算Hf的模式年龄时,亏损地幔的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf、¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf的值分别采用0.28325、0.0384^[24];球粒陨石⁶Hf/¹⁷⁷Hf、¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf的值分别采用0.282772、0.0332^[25];平均地壳¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf的值采用0.015。锆石Hf同位素所测数据见表2。

全岩主量元素测试在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成,微量元素测试在中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所采用ICP-MS法测定完成。主量采用XRF-18001XRF-18001(SHIMADZU SEQUENTIAL X-RAY FLUORESCENCE SPECTROMETER)波长扫描型X射线荧光光谱仪进行样品测定,分析精度优于5%,具体分析条件及流程参考文献[26]。测试结果见表3。

4 分析结果

4.1 锆石特征及U-Pb年龄

4.1.1 锆石特征

样品13QMC-011中的锆石主要为短柱状,锆石颗粒较小,长轴为60~200 μm,短轴为50~80 μm,长宽比为2:1~4:1,大部分锆石的晶型较为完整,棱角分明,少量锆石有破碎,出现溶蚀现象。透反射照片中裂纹不发育,CL图像上可见大部分锆石发育有清晰且密集的振荡环带特征,少量锆石颗粒环带现象较弱,出现斑杂状、流动状分带。样品

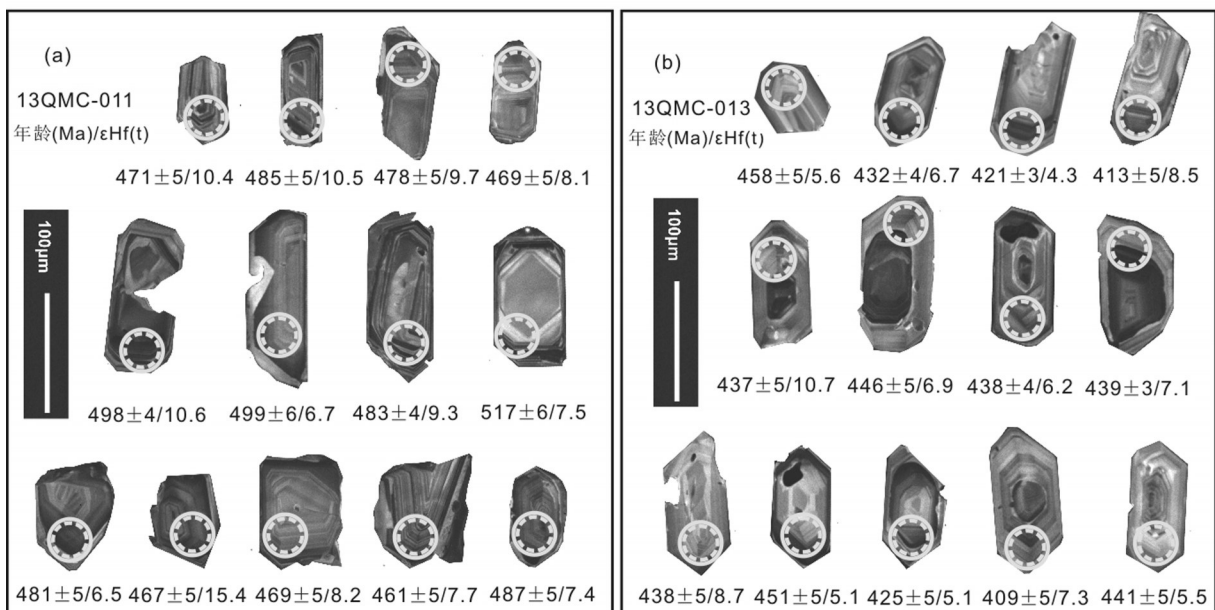


图4 锆石的阴极发光CL图及测点U-Pb年龄

Fig.4 CL images of analyzed zircon grains and U-Pb age of the measuring point

表1 荞麦冲金矿床含矿岩脉LA-ICP-MS锆石U-Pb同位素分析数据
Table 1 U-Pb isotopic composition of zircons in ore-bearing veins of the Qiaomaichong gold deposit as measured by using LA-ICP-MS technique

点编号	同位素比值				年龄/Ma				元素含量/ 10^{-6}							
	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	U	Th	Pb	
13QMC-011																
1	0.067	0.002	0.684	0.017	0.073	0.001	836	38	529	10	456	4	4700	5594	911	
2	0.073	0.008	0.758	0.078	0.076	0.001	1003	218	573	45	470	5	3322	6994	1354	
3	0.058	0.003	0.638	0.031	0.081	0.001	516	84	501	19	499	6	354	424	74	
4	0.057	0.002	0.598	0.022	0.076	0.001	484	60	476	14	471	5	614	475	99	
5	0.060	0.002	0.606	0.016	0.072	0.001	614	42	481	10	450	4	1529	2735	363	
6	0.058	0.002	0.617	0.022	0.078	0.001	514	57	488	14	485	5	574	740	126	
7	0.056	0.002	0.597	0.016	0.077	0.001	456	43	475	10	478	5	1040	1259	210	
8	0.056	0.002	0.613	0.016	0.079	0.001	467	37	485	10	487	5	1667	1882	337	
9	0.055	0.002	0.579	0.020	0.075	0.001	428	58	464	13	469	5	725	786	133	
10	0.058	0.002	0.631	0.016	0.078	0.001	541	39	497	10	483	4	1267	2254	314	
11	0.095	0.002	0.897	0.025	0.068	0.001	1531	33	650	14	421	6	1120	3291	323	
12	0.058	0.002	0.668	0.020	0.083	0.001	521	43	520	12	517	6	961	1011	190	
13	0.056	0.001	0.582	0.014	0.075	0.001	447	36	466	9	465	4	1671	1853	321	
14	0.056	0.002	0.575	0.016	0.074	0.001	438	44	461	10	461	5	913	1265	193	
15	0.056	0.001	0.607	0.015	0.077	0.001	466	38	482	10	481	5	2169	2209	409	
16	0.061	0.002	0.617	0.017	0.072	0.001	645	38	488	10	451	5	1864	3701	478	
17	0.056	0.002	0.581	0.017	0.075	0.001	442	44	465	11	467	5	1414	1526	270	
18	0.057	0.002	0.590	0.023	0.075	0.001	473	67	471	15	469	5	655	676	125	
19	0.061	0.001	0.605	0.015	0.071	0.001	656	35	480	9	439	4	4468	4484	779	
20	0.055	0.002	0.542	0.019	0.071	0.001	421	56	440	12	444	5	592	590	104	
21	0.060	0.002	0.571	0.018	0.068	0.001	614	53	458	12	423	4	1028	926	164	
22	0.059	0.002	0.613	0.016	0.075	0.001	561	39	485	10	467	5	1433	1517	281	
23	0.059	0.002	0.663	0.017	0.080	0.001	583	41	517	11	498	4	1784	3376	516	
24	0.061	0.007	0.565	0.061	0.067	0.001	637	244	455	40	419	5	3354	3190	626	
25	0.056	0.002	0.604	0.019	0.077	0.001	462	46	480	12	480	6	931	706	151	
26	0.056	0.002	0.595	0.015	0.076	0.001	460	42	474	10	474	4	1116	1640	268	

续表 1

点编号	同位素比值				年龄/Ma				元素含量/ 10^6				
	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	U	Th	Pb
13QMC-013													
1	0.057	0.001	0.555	0.011	0.071	0.000	448	7	439	3	1063	753	401
2	0.055	0.002	0.538	0.018	0.070	0.001	437	12	437	5	178	211	101
3	0.056	0.001	0.535	0.012	0.069	0.001	435	8	432	4	423	326	169
4	0.061	0.001	0.574	0.012	0.068	0.001	461	8	421	3	441	338	181
5	0.058	0.004	0.530	0.034	0.066	0.001	432	23	413	5	268	204	109
6	0.057	0.003	0.555	0.028	0.071	0.001	448	18	441	5	97	68	38
7	0.058	0.003	0.584	0.026	0.074	0.001	467	17	458	5	137	105	59
8	0.057	0.002	0.556	0.019	0.072	0.001	449	12	446	5	195	180	93
9	0.058	0.003	0.536	0.024	0.067	0.001	436	16	415	5	151	92	48
10	0.060	0.003	0.588	0.025	0.070	0.001	470	16	438	5	150	129	70
11	0.063	0.002	0.626	0.021	0.072	0.001	494	13	447	5	177	135	78
12	0.078	0.003	0.744	0.027	0.069	0.001	565	16	431	5	169	140	87
13	0.057	0.002	0.573	0.016	0.073	0.001	460	10	451	5	279	242	135
14	0.055	0.002	0.520	0.018	0.068	0.001	425	12	425	5	269	223	108
15	0.057	0.002	0.549	0.017	0.070	0.001	444	11	436	5	201	173	93
16	0.056	0.002	0.531	0.016	0.068	0.001	432	11	426	4	385	379	193
17	0.046	0.005	0.394	0.040	0.062	0.001	337	29	388	5	128	103	76
18	0.060	0.005	0.615	0.050	0.074	0.001	487	32	459	7	159	158	94
19	0.056	0.002	0.535	0.019	0.069	0.001	435	12	427	5	180	188	92
20	0.061	0.002	0.551	0.020	0.065	0.001	445	13	407	4	222	267	123
21	0.060	0.002	0.543	0.021	0.066	0.001	440	14	409	5	205	261	123
22	0.059	0.002	0.579	0.020	0.070	0.001	464	13	438	4	242	201	104
23	0.061	0.002	0.600	0.018	0.071	0.001	477	12	441	4	395	323	173

表2 荞麦冲金矿床含矿岩脉LA-MC-ICP-MS锆石Lu-Hf同位素分析数据
Fig.2 Lu-Hf isotopic composition of zircons in the ore-bearing veins of the Qiaomaichong gold deposit as measured by using LA-MC-ICP-MS technique

点编号	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ (t)	$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	2σ	t_{DM}	$t_{\text{DM}}(\text{Hf}2)$	2σ	$t_{\text{DM}}(\text{Hf})^{\text{C}}$	f_{LuHf}
13QMC-011													
1	0.004017	0.000056	0.282960	0.000025	0.282926	6.6	15.5	0.9	450	444	39	447	-0.88
1-1	0.003608	0.000050	0.282846	0.000022	0.282815	2.6	11.6	0.8	619	800	34	699	-0.89
2	0.001839	0.000028	0.282694	0.000023	0.282678	-2.8	7.0	0.8	808	1220	33	998	-0.94
3	0.002054	0.000031	0.282670	0.000018	0.282650	-3.6	6.7	0.6	848	1269	25	1042	-0.94
4	0.004448	0.000179	0.282812	0.000021	0.282773	1.4	10.4	0.7	687	915	33	784	-0.87
5	0.007010	0.000159	0.282961	0.000020	0.282902	6.7	14.5	0.7	491	528	34	505	-0.79
6	0.004054	0.000028	0.282804	0.000023	0.282767	1.1	10.5	0.8	691	913	35	787	-0.88
7	0.001946	0.000010	0.282765	0.000021	0.282747	-0.3	9.7	0.7	708	987	30	836	-0.94
8	0.004199	0.000140	0.282717	0.000021	0.282678	-2.0	7.4	0.8	829	1196	33	987	-0.87
9	0.002478	0.000038	0.282730	0.000020	0.282709	-1.5	8.1	0.7	769	1123	30	930	-0.93
10	0.002793	0.000038	0.282760	0.000023	0.282735	-0.4	9.3	0.8	731	1020	34	861	-0.92
11	0.001578	0.000025	0.282743	0.000025	0.282731	-1.0	7.8	0.9	732	1116	35	911	-0.95
12	0.002154	0.000037	0.282683	0.000027	0.282662	-3.2	7.5	0.9	832	1210	39	1005	-0.94
13	0.001768	0.000029	0.282675	0.000023	0.282660	-3.4	6.3	0.8	834	1284	33	1042	-0.95
14	0.002953	0.000016	0.282729	0.000028	0.282704	-1.5	7.7	1.0	781	1150	42	946	-0.91
15	0.002634	0.000068	0.282681	0.000024	0.282657	-3.2	6.5	0.8	846	1272	35	1039	-0.92
16	0.003609	0.000016	0.282904	0.000027	0.282873	4.7	13.5	1.0	531	619	42	570	-0.89
17	0.004945	0.000131	0.282960	0.000026	0.282917	6.7	15.4	0.9	462	457	41	460	-0.85
18	0.001786	0.000020	0.282727	0.000026	0.282712	-1.6	8.2	0.9	759	1114	38	923	-0.95
19	0.003473	0.000029	0.282740	0.000027	0.282711	-1.1	7.5	0.9	777	1155	40	943	-0.90
19-1	0.005347	0.000022	0.282790	0.000027	0.282745	0.6	8.8	1.0	741	1039	43	863	-0.84
20	0.002516	0.000025	0.282729	0.000029	0.282708	-1.5	7.5	1.0	773	1159	43	948	-0.92
21	0.001658	0.000026	0.282649	0.000025	0.282636	-4.4	4.5	0.9	870	1418	36	1124	-0.95
22	0.002038	0.000034	0.282742	0.000020	0.282725	-1.0	8.6	0.7	742	1075	29	895	-0.94
23	0.003048	0.000042	0.282790	0.000024	0.282761	0.6	10.6	0.8	693	915	36	792	-0.91
24	0.003547	0.000025	0.282778	0.000022	0.282750	0.2	8.4	0.8	721	1058	34	869	-0.89
25	0.002462	0.000013	0.282718	0.000024	0.282695	-1.9	7.9	0.8	788	1151	35	953	-0.93
26	0.002551	0.000045	0.282691	0.000023	0.282668	-2.9	6.8	0.8	829	1245	34	1017	-0.92

续表2

点编号	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}(t)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	2σ	t_{DM}	$t_{\text{DM}}(\text{Hf}2)$	2σ	$t_{\text{DM}}(\text{Hf})^{\text{C}}$	f_{LuHf}
13QMC-013													
1	0.003119	0.000083	0.282726	0.000019	0.282701	-1.6	7.1	0.7	789	1189	29	967	-0.91
2	0.003792	0.000035	0.282833	0.000025	0.282801	2.1	10.7	0.9	642	868	38	741	-0.89
3	0.005982	0.000122	0.282665	0.000033	0.282616	-3.8	4.0	1.2	958	1467	54	1161	-0.82
3-1	0.002915	0.000066	0.282716	0.000020	0.282692	-2.0	6.7	0.7	801	1225	30	991	-0.91
4	0.003065	0.000044	0.282657	0.000021	0.282633	-4.1	4.3	0.7	892	1430	31	1132	-0.91
5	0.002184	0.000032	0.282773	0.000022	0.282756	0.0	8.5	0.8	700	1045	32	858	-0.93
6	0.002096	0.000015	0.282671	0.000023	0.282653	-3.6	5.5	0.8	848	1337	34	1072	-0.94
7	0.003187	0.000107	0.282673	0.000021	0.282646	-3.5	5.6	0.7	870	1339	32	1079	-0.90
8	0.002114	0.000035	0.282708	0.000024	0.282690	-2.3	6.9	0.9	795	1213	35	987	-0.94
9	0.003114	0.000027	0.282711	0.000025	0.282687	-2.2	6.1	0.9	812	1264	38	1014	-0.91
10	0.005398	0.000046	0.282641	0.000040	0.282597	-4.6	3.4	1.4	979	1521	63	1201	-0.84
10-1	0.002824	0.000145	0.282769	0.000022	0.282746	-0.1	8.7	0.8	719	1045	33	866	-0.91
11	0.001919	0.000055	0.282678	0.000021	0.282662	-3.3	5.9	0.7	834	1303	30	1050	-0.94
12	0.001882	0.000012	0.282645	0.000020	0.282629	-4.5	4.4	0.7	881	1427	29	1133	-0.94
13	0.003305	0.000077	0.282664	0.000021	0.282636	-3.8	5.1	0.7	887	1380	31	1106	-0.90
14	0.003044	0.000093	0.282675	0.000019	0.282651	-3.4	5.1	0.7	864	1366	28	1088	-0.91
15	0.003327	0.000052	0.282634	0.000022	0.282607	-4.9	3.7	0.8	933	1493	33	1181	-0.90
16	0.003710	0.000071	0.282779	0.000030	0.282749	0.2	8.6	1.1	723	1050	46	866	-0.89
17	0.002841	0.000037	0.282633	0.000027	0.282613	-4.9	2.9	1.0	921	1537	40	1198	-0.91
18	0.003395	0.000046	0.282722	0.000021	0.282692	-1.8	7.3	0.7	802	1188	31	973	-0.90
19	0.005468	0.000054	0.282819	0.000032	0.282775	1.7	9.5	1.1	697	966	52	807	-0.84
20	0.003536	0.000043	0.282878	0.000023	0.282851	3.7	11.8	0.8	569	749	34	648	-0.89
21	0.002921	0.000148	0.282747	0.000024	0.282725	-0.9	7.3	0.9	754	1151	36	932	-0.91
22	0.003345	0.000041	0.282702	0.000023	0.282674	-2.5	6.2	0.8	831	1274	35	1027	-0.90
23	0.002905	0.000023	0.282665	0.000021	0.282641	-3.8	5.1	0.8	876	1378	32	1101	-0.91

注: $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = 10000 \times \left\{ \left[\frac{(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} - (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}}{(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Lu})_{\text{S}} \times (e^{\lambda t} - 1)} \right] / \left[\frac{(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} - (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}}{(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Lu})_{\text{CHUR}} \times (e^{\lambda t} - 1)} \right] - 1 \right\}$, $t_{\text{DM}} = 1/\lambda \times \ln \{ 1 + [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} - (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}] / [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} - (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}] \}$, $t_{\text{DM}} = t_{\text{DM}} - (t_{\text{DM}} - t) \times [(f_{\text{sc}} - f) / (f_{\text{sc}} - f_{\text{DM}})]$, $f_{\text{LuHf}} = (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Lu})_{\text{S}} / (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Lu})_{\text{CHUR}} - 1$, 其中: $\lambda = 1.867 \times 10^{-11} / \text{a}$ (据文献[23]); $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Lu})_{\text{S}}$ 和 $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}}$ 为样品测量值; $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} = 0.0332$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} = 0.282772$ (据文献[25]); $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Lu})_{\text{DM}} = 0.0384$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.28325$ (据文献[24]); $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Lu})_{\text{CHUR}}$ 和 $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}}$ 为地壳平均测量值; $0.015; f_{\text{sc}} = [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Lu})_{\text{mean crust}} / (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Lu})_{\text{CHUR}}] - 1$; $f_{\text{DM}} = f_{\text{LuHf}}; f_{\text{DM}} = [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Lu})_{\text{DM}} / (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Lu})_{\text{CHUR}}] - 1$.

表3 荞麦冲金矿床含矿岩体主量元素(%)和微量元素(10^{-6})分析结果Fig.3 Qiaomaichong gold deposit, ore bearing rock major element (%) and trace element (10^{-6}) analysis results

样品号	13QMC-001	13QMC-034	13QMC-035	13QMC-039	13QMC-043	13QMC-033	13QMC-011
岩石类型	亚碱性玄武岩			正长斑岩		安山岩	
主量元素							
SiO ₂	44.7	44.5	44.5	46.0	40.2	75.7	58.1
TiO ₂	3.80	2.19	3.07	3.00	2.24	0.22	0.59
Al ₂ O ₃	14.5	9.92	11.7	12.2	16.7	13.6	17.1
TFe ₂ O ₃	15.2	10.1	12.1	13.1	7.00	1.22	7.90
MnO	0.22	0.15	0.18	0.18	0.11	0.01	0.03
MgO	6.55	9.28	6.45	7.04	2.58	0.41	2.81
CaO	6.90	12.3	9.80	8.58	15.6	0.07	0.18
Na ₂ O	3.72	1.44	2.53	3.08	3.36	4.29	0.11
K ₂ O	0.50	1.30	0.05	1.27	1.78	2.91	5.74
P ₂ O ₅	0.63	0.29	0.63	0.42	0.61	0.02	0.05
烧失量	3.40	8.58	8.90	4.24	9.26	1.62	6.67
总计	100	100	99.8	99.1	99.4	100	99.3
Mg [#]	46.4	64.7	51.6	51.7	42.6	39.9	41.7
K ₂ O+Na ₂ O	4.22	2.75	2.58	4.34	5.14	7.20	5.85
K ₂ O/Na ₂ O	0.14	0.90	0.02	0.41	0.53	0.68	52.7
Mg ²⁺	0.16	0.23	0.16	0.18	0.06	0.01	0.07
Fe ²⁺	0.19	0.13	0.15	0.16	0.09	0.02	0.10
δ	10.6	5.15	4.44	6.26	-9.48	1.59	2.26
A/CNK	0.95	0.48	0.69	0.68	0.58	1.28	1.83
微量元素							
Li	45.2	38.9	42.0	29.6	31.5	37.6	5.04
Bi	0.02	0.04	0.03	0.05	0.15	0.05	0.07
Sc	31.1	36.3	27.8	33.8	13.4	11.0	1.24
V	401	282	327	365	209	98.3	16.5
Cr	126	832	268	184	2.60	81.6	2.20
Co	48.8	43.7	60.9	52.4	8.59	6.13	0.48
Ni	69.5	284	82.7	112	6.47	35.1	2.32
Cu	57.3	119	94.4	156	20.5	37.1	7.60
Zn	134	84.6	120	124	94.1	75.2	11.2
Ga	22.1	15.2	20.9	22.7	37.4	24.3	19.8
Rb	12.0	22.1	1.40	21.1	40.4	135	33.5
Sr	469	180	319	192	1456	12.4	23.8
Y	26.8	24.8	29.4	28.0	22.5	13.2	32.9
Zr	155	121	229	166	96.7	62.2	293
Nb	58.2	30.7	84.5	50.9	48.5	15.5	90.0
Cs	1.48	2.32	0.47	2.40	4.22	5.81	0.72
Ba	157	527	0	941	555	2366	1885
La	41.1	25.5	65.4	35.3	38.4	8.95	7.32
Ce	90.3	57.9	136	80.4	85.4	8.58	16.3
Pr	11.1	7.50	16.3	10.1	10.4	4.41	1.82
Nd	45.5	31.4	62.2	41.5	42.2	18.9	6.09
Sm	9.18	6.57	11.6	8.63	8.3	3.53	1.65
Eu	3.01	2.19	3.6	2.66	2.97	0.73	0.33
Gd	8.73	6.66	10.2	8.54	7.54	3.07	2.77
Tb	1.21	0.96	1.37	1.21	1.01	0.45	0.71
Dy	6.50	5.31	7.38	6.76	5.51	2.9	5.16
Ho	1.10	0.91	1.22	1.17	0.94	0.55	1.08
Er	2.76	2.35	3.13	3.05	2.41	1.68	3.32
Tm	0.38	0.33	0.43	0.42	0.32	0.28	0.57
Yb	1.87	1.80	2.30	2.29	1.67	1.68	3.51
Lu	0.26	0.25	0.31	0.33	0.22	0.26	0.54
Hf	4.57	3.57	5.65	4.30	2.89	2.18	9.63
Ta	3.59	2.01	5.84	3.33	3.19	1.23	6.61
Pb	2.50	2.61	9.98	2.31	9.74	8.17	2.46
Th	4.09	2.93	6.37	3.79	3.85	6.89	6.64
U	0.96	0.61	1.99	0.95	0.87	0.89	1.80
ΣREE	223	150	322	202	207	55.9	51.2
La _N /Yb _N	14.8	9.54	19.2	10.4	15.5	0.11	1.41
δEu	1.01	1.00	0.99	0.94	1.13	0.66	0.48

注: A/CNK=摩尔数 Al₂O₃/(CaO+Na₂O+K₂O), A/NK = 摩尔数 Al₂O₃ / [Na₂O + K₂O], Eu/Eu* = 2Eu_N / (Sm_N + Gd_N)。

13QMC-013中的锆石主要为短柱状,多为半自形到自形结构,长宽比为2:1~3:1,部分锆石含有明显包裹体或者较老的核部,振荡环带明显。两个样品锆石外形大体上具有相似性,根据锆石内部结构特征可分为两类:第一类为有规则韵律环带的岩浆锆

石;第二类为含有较老核部、新外壳的复合型锆石,这种锆石在较老核外部出现新的环带外壳,可认为是在脉体对早期玄武质岩体的侵入过程中,捕获了早期岩体中形成的较老锆石,并且在新的岩浆热液作用下结晶了新的外壳(图4-a,b)。

4.1.2 锆石 U-Pb 年龄

锆石 U-Pb 测年分析结果中(表 1), 样品 13QMC-011 所测的点一共 26 个, 其中有 8 个点明显不在一致线上并且没有相关性(图 5-a), 所以测得的年龄并没有实际的意义。剩余的数据中, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 $(444\pm 5)\text{Ma}$ ~ $(517\pm 6)\text{Ma}$, 其中测点 3、4、6、7、8、9、10、12、13、14、15、17、18、22、23、25、26 得出的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $(477\pm 6)\text{Ma}$ 。这些锆石是具有核边结构的复合型锆石, 震荡环带发育程度不同, 由于激光斑束的剥蚀直径有时超出震荡环带宽度, 使其得到的年龄为混合年龄, 但是从图(5-a)中可以看出锆石年龄分布跨度较大, 可能是由于脉体的结晶时间较长。样品 13QMC-013 一共测 23 个点, 剔除 2 个不谐和数据点, 其他点在谐和线上或附近聚集成两组(图 5-b), 较小年龄锆石为有规则韵律环带的岩浆锆石, 测点 4、5、9、14、20、21 得到的年龄加权平均值 $(415\pm 7)\text{Ma}$; 较大年龄锆石为含有较老核部、新环带外壳的复合型锆石, 测点 1、2、3、6、7、8、10、11、13、15、16、18、19、22、23 得到的年龄加权平均值 $(440\pm 5)\text{Ma}$, 与 13QMC-011 类似较大年龄锆石是脉体侵入过程中捕获了围岩中锆石而形成新的复合型锆石。

4.1.3 锆石稀土元素

样品 13QMC-011 和 13QMC-013 锆石每个测点的稀土含量见表 4, 根据该数据做出稀土的配分模式图(图 6-a,b), 样品 13QMC-011 中锆石有效测

点的稀土总量在 4151×10^{-6} ~ 8414×10^{-6} , 含量显示高值, Ce 含量在 87×10^{-6} ~ 359×10^{-6} , Eu 含量在 3×10^{-6} ~ 11×10^{-6} 。样品 13QMC-013 的有效锆石稀土总含量在 835×10^{-6} ~ 2332×10^{-6} , Ce 含量在 15×10^{-6} ~ 78×10^{-6} , Eu 含量在 1×10^{-6} ~ 2×10^{-6} , 较 011 号样品比较各项含量明显偏低, 锆石中 Ce 正异常的出现与否及其强弱程度与锆石结晶时流体(熔体)的氧化还原条件有关^[27]; 这与两期脉体侵入的时间和不同地层有直接关系, 所以呈现出稀土含量有显著差异。稀土的配分模式图显示除了个别锆石的配分比不太明显, 推测可能受到其他的流体作用影响, 其余所有测点均表现 Ce 正异常、Eu 负异常, HERR 富集, REE 配分曲线出现左倾特点, 表明这些锆石仍具有典型岩浆锆石特征^[28]。样品 13QMC-011 的 Th、U 含量较高, 变化范围较大(表 4), 在有效测点中 Th 的含量为 424×10^{-6} ~ 2254×10^{-6} , U 的含量为 354×10^{-6} ~ 2169×10^{-6} , Th/U 比值为 0.76~1.89, 除了个别值以外, 其他值基本分布在 1 左右; 样品 13QMC-013 的 Th、U 含量比 13QMC-011 号较低, 有效测点中 Th 含量除了一个最大值 753×10^{-6} , 其余为 68×10^{-6} ~ 338×10^{-6} , U 含量除了一个最大值 1063×10^{-6} , 其余为 97×10^{-6} ~ 395×10^{-6} , Th/U 比值为 0.61~1.28(图 6-c)。

4.2 锆石 Hf 同位素

本次对两件样品中的 49 颗锆石 U-Pb 原位进行 Hf 同位素的微区分析, 样品 13QMC-011 中有 8 个不谐和点, 样品 13QMC-013 中有 2 个不谐和点, 锆

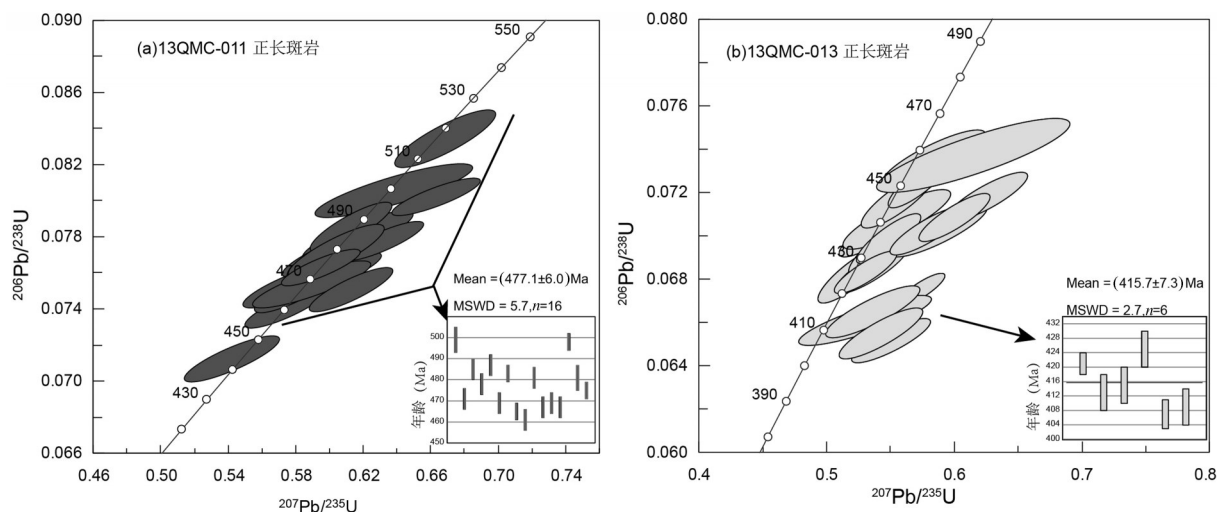


图 5 锆石 U-Pb 谐和线图

Fig.5 U-Pb concordia diagrams of the zircons

表4 锆石稀土元素分析结果(10⁻⁶)
Table 4 REE compositions of zircons from the studied samples (10⁻⁶)

点编号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Th	U	Th/U
13QMC-011																	
1	23.6	521	29.8	225	225	34.6	773	260	2764	998	3654	764	5097	1035	5594	4700	1.19
2	25.1	585	25.5	188	192	41.5	681	216	2067	691	2456	524	3559	753	6994	3322	2.11
3	18.1	131	5.97	33.0	35.5	10.6	148	51.4	573	222	883	201	1490	348	424	354	1.20
4	85.3	278	24.0	120	50.3	3.03	195	64.6	712	274	1052	233	1639	353	475	614	0.77
5	13.2	294	5.51	37.6	56.5	8.60	274	89.3	966	360	1382	303	2209	484	2735	1529	1.79
6	5.37	86.6	3.45	45.6	70.6	16.3	326	102	1058	383	1450	318	2251	507	740	574	1.29
7	10.6	200	3.93	27.2	40.1	2.99	240	81.5	874	330	1252	270	1886	407	1259	1040	1.21
8	25.2	300	8.29	62.7	57.1	4.01	340	124	1352	504	1892	400	2765	579	1882	1667	1.13
9	0.06	139	0.68	16.3	29.5	3.14	179	64.3	710	268	1030	225	1594	346	786	725	1.08
10	14.4	236	5.33	38.9	47.1	7.43	238	79.7	846	306	1170	259	1839	409	2254	1267	1.78
11	18.7	376	37.2	238	267	61.9	640	200	1613	450	1470	302	2007	394	3291	1120	2.94
12	13.7	130	6.24	39.8	33.8	6.00	168	57.1	646	254	991	221	1611	359	1011	961	1.05
13	0.10	263	0.97	16.6	45.7	2.91	292	106	1176	440	1672	354	2471	520	1853	1671	1.11
14	16.2	140	4.60	32.8	30.8	5.96	160	55.4	616	234	930	211	1590	353	1265	913	1.38
15	0.01	229	0.63	14.0	41.4	3.24	299	109	1243	474	1787	385	2622	546	2209	2169	1.02
16	5.38	303	6.44	54.3	87.3	19.5	371	123	1272	463	1746	391	2890	633	3701	1864	1.99
17	36.3	302	11.5	73.0	68.8	3.58	359	121	1325	496	1856	397	2715	579	1526	1414	1.08
18	0.00	121	0.84	13.4	29.1	2.78	169	59.1	648	249	964	213	1521	335	676	655	1.03
19	1.40	353	3.16	38.5	94.2	6.31	607	222	2502	943	3507	740	4998	1014	4484	4468	1.00
20	136	359	39.7	184	65.7	6.61	242	76.4	821	307	1186	264	1917	420	590	592	1.00
21	1.06	93.4	1.43	18.8	32.5	4.15	154	59.6	684	268	1050	243	1750	380	926	1028	0.90
22	12.0	188	4.02	29.7	36.3	3.08	241	83.5	950	362	1383	290	2081	439	1517	1433	1.06
23	1.28	197	2.19	19.6	34.5	7.77	166	61.8	652	248	955	218	1612	358	3376	1784	1.89
24	12.1	320	4.86	36.1	73.4	5.84	464	170	1952	730	2747	584	4000	822	3190	3354	0.95
25	25.3	163	8.18	50.7	40.8	3.58	207	76.0	855	338	1312	288	2119	465	706	931	0.76
26	0.28	199	1.57	24.9	47.4	3.47	289	92.3	958	342	1242	259	1831	398	1640	1116	1.47
13QMC-013																	
1	4.76	47.5	2.53	15.7	12.0	0.58	57.4	22.5	285	111	510	105	986	172	753	1063	0.71
2	0.00	16.7	0.13	2.67	5.63	1.11	32.2	11.0	133	48.8	218	44.8	425	76.2	211	178	1.19
3	0.07	37.1	0.12	3.19	7.51	0.72	46.6	17.8	221	83.3	369	75.3	696	121	326	423	0.77
4	4.96	57.1	1.76	13.0	10.0	0.74	56.5	20.2	251	92.0	412	83.8	765	134	338	441	0.77
5	20.1	77.0	6.49	30.8	10.5	0.69	44.5	14.7	179	66.0	289	58.7	557	96.0	204	268	0.76
6	2.14	14.9	0.76	4.91	5.46	1.07	25.9	8.83	107	39.4	176	36.4	348	64.1	68	97.2	0.70
7	0.87	20.4	0.30	3.21	6.02	0.99	31.8	11.0	134	49.9	220	44.6	417	75.3	105	137	0.77
8	1.35	18.9	0.59	4.20	5.92	0.71	28.5	9.84	121	44.8	204	41.6	395	70.1	180	195	0.93
9	0.01	19.8	0.03	2.07	5.13	0.77	29.7	10.8	135	51.8	234	49.6	466	85.0	92	151	0.61
10	16.6	53.3	4.64	25.0	10.1	1.70	40.8	12.9	152	55.7	245	49.5	464	83.4	129	150	0.86
11	0.00	19.3	0.16	2.87	5.49	0.75	31.0	10.6	133	49.1	218	44.9	416	74.3	135	177	0.76
12	2.20	23.5	0.81	6.05	6.86	1.15	35.4	12.4	150	55.6	242	49.4	465	82.9	140	169	0.83
13	1.32	30.9	0.60	5.55	6.75	1.10	40.2	14.0	173	64.2	287	57.4	535	93.6	242	279	0.87
14	2.04	32.8	0.57	4.75	6.42	0.67	37.2	13.9	171	63.4	280	56.9	537	95.1	223	269	0.83
15	4.30	39.4	1.40	9.35	7.34	0.80	38.7	13.4	161	59.1	263	52.0	484	85.8	173	201	0.86
16	11.4	73.4	3.15	18.6	12.2	0.78	58.0	19.3	229	81.6	355	71.5	663	117	379	385	0.98
17	0.00	13.5	0.13	2.25	4.87	1.17	27.5	9.93	118	42.8	191	39.2	367	67.1	103	128	0.81
18	17.0	50.4	3.26	15.7	9.67	1.58	42.9	14.5	168	61.0	266	52.0	479	85.4	158	159	0.99
19	0.07	15.7	0.24	3.46	6.34	1.12	31.8	11.3	137	51.4	235	49.1	471	84.6	188	180	1.05
20	12.5	47.0	3.60	18.1	10.6	1.28	41.9	15.0	175	64.2	291	59.4	558	100	267	222	1.20
21	12.5	45.5	3.25	17.3	8.66	0.97	35.1	12.5	148	53.3	233	47.9	451	79.4	261	205	1.28
22	0.46	32.7	0.28	2.91	6.52	0.69	40.0	14.2	173	64.2	281	56.6	522	91.4	201	242	0.83
23	12.9	78.0	4.06	21.3	13.1	1.85	61.6	21.4	252	90.6	397	79.9	729	126	323	395	0.82

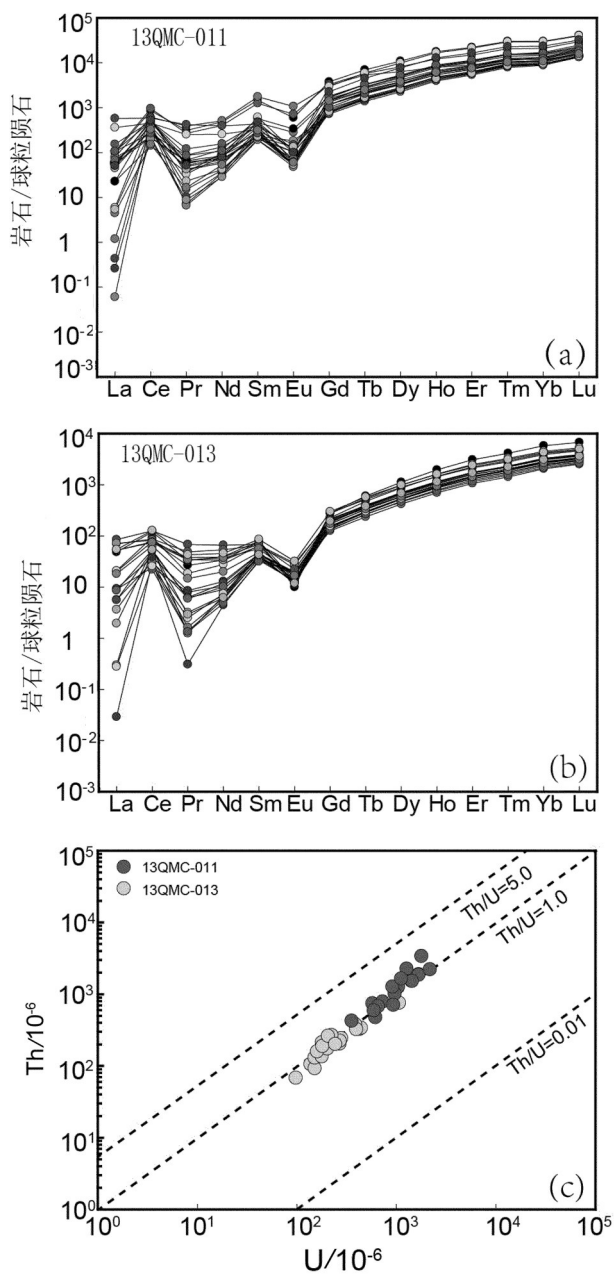


图6 锆石稀土配分模式图(a,b)和锆石的Th/U比值图(c)
Fig.6 Zircon REE patterns (a,b) and Th/U ratios (c)

石测点Lu-Hf同位素数据见表2。Hf同位素演化见图7-a,b。样品13QMC-011的有效数据一共18个, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}(t)$ 的值范围为0.282650~0.282971, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值除了一个点为15.4外,其余值在6.3~10.6之间(图7-c),Hf的同位素的亏损地幔模式年龄 t_{DM} 值为除了一个较小值462 Ma,其余值为687~848 Ma,二阶段Hf同位素亏损地幔模式年龄除去掉最小值457

Ma,其余值为913~1284 Ma,Hf同位素地壳模式年龄 t_{DM}^c 值去掉一个较小值460 Ma,其余值在784~1042 Ma,锆石的 $f_{\text{Lu/Hf}}$ 值为-0.94~-0.85;样品13QMC-013的效数据一共23个, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}(t)$ 的变化范围在0.282597~0.282851, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值在3.4~11.8之间(图7-d),Hf的同位素的亏损地幔模式年龄 t_{DM} 值集中在569~979 Ma,二阶段Hf同位素亏损地幔模式年龄值为749~1521 Ma,Hf同位素地壳模式年龄 t_{DM}^c 值为648~1201 Ma之间, $f_{\text{Lu/Hf}}$ 值为-0.94~-0.82。

4.3 全岩地球化学

研究区脉体的围岩为兰家畷铁镁质岩石,本次采集的5件围岩样品中均发生了不同程度的蚀变,其烧失量为3.4%~9.3%。岩石全岩地球化学分析结果见表3,侵入的脉体岩性为正长斑岩^[6,29]。选取锆石的2件样品表现出富硅特性, SiO_2 含量75%以上;其余样品 SiO_2 的含量变化于40.21%~58.11%。根据样品 SiO_2 含量,将其划分为三组,第一组为高 SiO_2 ,属于酸性端元;第二组为低 SiO_2 ,属于基性端元,第三组 SiO_2 含量为58.11%,属于中性端元。在高场强元素分类图解中,三者落在不同的范围内,高 SiO_2 含量的样品落入粗面岩和流纹岩区域内,中、低 SiO_2 含量的样品落入碱性玄武岩和安山岩区域内(图8-a,b)。脉体的 TiO_2 含量为0.22%, MgO 含量0.41%, Al_2O_3 的含量为13.61%。铁镁质围岩 TiO_2 含量在2.19%~3.80%, Al_2O_3 (9.92%~16.65%)、 CaO (6.90%~15.64%)的含量均较高。具有变化的 $\text{Mg}^\#$ 值43~65。

球粒陨石标准化稀土元素组成表明(图8-c),碱性玄武岩的稀土总量很高($\sum \text{REE}=149.62 \times 10^{-6} \sim 321.55 \times 10^{-6}$),轻稀土强烈富集型,稀土分配模式强烈右倾,(La/Yb)_N比值为9.54~19.20,呈现出高度分异的特点。基本无铕异常($\delta \text{Eu}=0.94 \sim 1.13$),可能是铁镁质岩浆演化过程中斜长石分离结晶受到限制。通常情况下,这种稀土分配模式出现在大陆拉斑玄武岩中,与N-MORB和E-MORB相比时,碱性玄武岩一般不出现REE平坦型或者亏损的分配模式,但是这种富集型轻稀土分配模式可见于富集型MORB和洋岛型玄武岩(OIB)中。在原始地幔标准化微量元素蜘蛛图上(图8-d),样品的大离子亲石元素和高场强元素都较MORB富集,显示类似OIB的特征。样品13QMC-035中,出现Rb和Ba等亲流体元素的异常,结合镜下观察,该样品矿物出

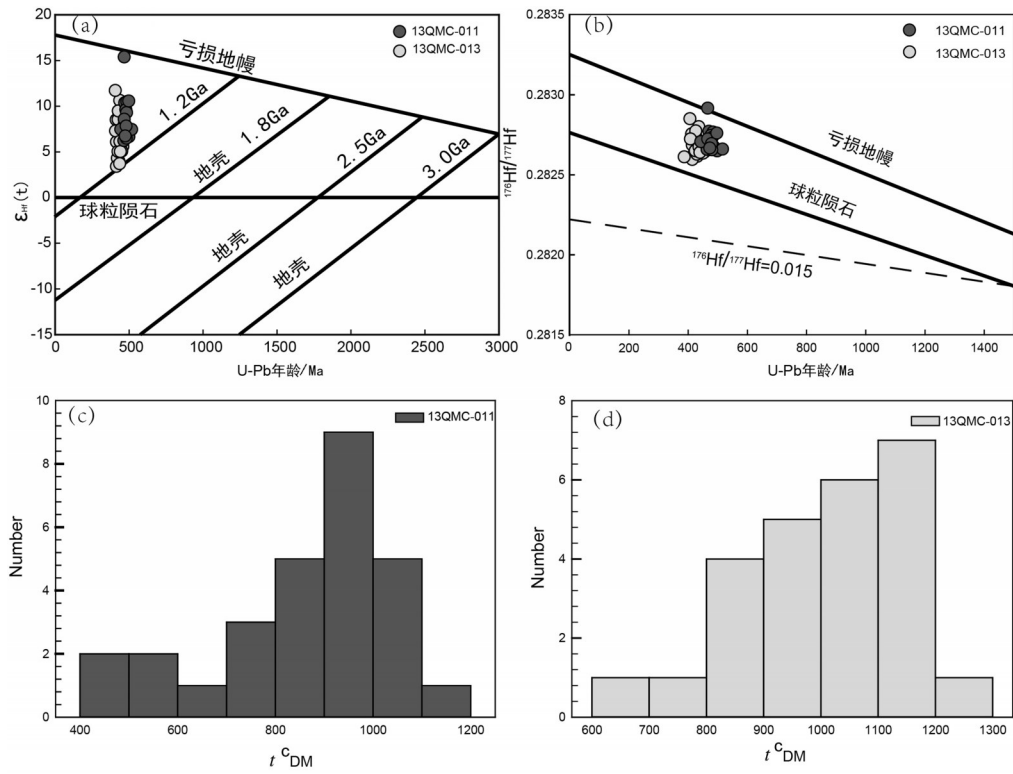


图7 $t-\epsilon_{Hf}(t)$ 图解(a,b)据[19], $\epsilon_{Hf}(t)$ 频率直方图(c,d)
 Fig. 7 $t-\epsilon_{Hf}(t)$ diagram (a,b) [19], histograms of zircon $\epsilon_{Hf}(t)$ (c, d)

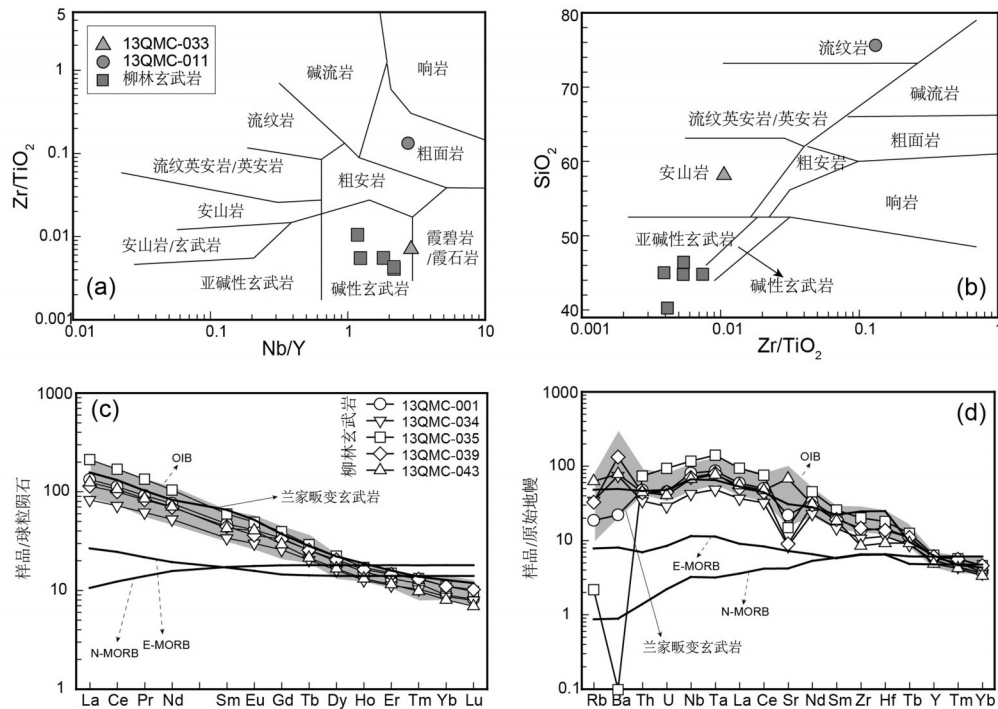


图8 荞麦冲地区岩浆岩分类、稀土元素球粒陨石标准化曲线(据文献[30-31])(球粒陨石值据文献[30],原始地幔值据文献[31])
 Fig. 8 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle-normalized trace element patterns for the magmatic rocks in Qiaomaichong (chondrite values after Boynton, 1984; primitive mantle values after McDonough and Sun, 1995)

现蚀变特征,岩石可能经历较强的蚀变作用。

5 讨 论

5.1 脉体时代

样品 13QMC-011 的 18 个有效测点结果得到两组年龄, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 最小年龄 $(444\pm 5)\text{Ma}$ (晚奥陶世), 另一组的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $(477\pm 6)\text{Ma}$ (早奥陶世), Th/U 值 0.76~1.89; 样品 13QMC-013 的 21 个有效测点中, 两组 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄分别为 $(415\pm 7)\text{Ma}$ (晚志留世)、 $(440\pm 5)\text{Ma}$ (晚奥陶—早志留世), Th/U 比值为 0.61~1.28。研究表明, 不同成因的锆石有不同的 Th 、 U 含量及比值, Hoskin^[28] 指出岩浆成因锆石 Th/U 比值大于 0.3, 也有学者指出一般 Th/U 大于 0.4 为岩浆锆石, 小于 0.1 为变质锆石^[32-33], 吴元保^[34] 指出: 除了某些组成特殊的岩浆结晶的岩浆锆石具有异常的 Th/U 比值, 通常岩浆锆石的 Th/U 比值接近 1。本文所测锆石 Th/U 比值基本集中在 1 附近 (图 5-c), 结合稀土特征, 典型的 Ce 正异常、Eu 负异常, 重稀土富集, 可推测本次试验锆石为岩浆锆石, 本次所测的锆石年龄可以代表脉体侵入地层的时间。

以上 2 件锆石样品所得到的年龄有明显的年代跨度, 这与本次采样位置以及脉体侵入的地层有直接关系。脉体侵入伴随整个加里东时期构造运动所产生^[11], 不同的脉体侵入地层时期也不同。样品 13QMC-011 采于 5 号脉体中, 该脉体侵入于中上寒武统六合湾群 (组) 的玄武岩、安山岩、中基性侵入岩、火山碎屑岩、板岩等; 脉体最新年龄为 $(444\pm 5)\text{Ma}$, 最老年龄为 $(517\pm 6)\text{Ma}$, 加权平均值为 $(477\pm 6)\text{Ma}$, $\text{MSWD}=5.7$, 属于早奥陶世时期, 年龄跨度和误差均较大, 可能表示岩浆在形成、上升、分凝或结晶过程中经历了较长时间。样品 13QMC-013 采于 11 号脉体中, 该脉体侵入奥陶—志留系兰家畈群 (组) 地层中, 锆石测年得到较小一组年龄加权平均值为 $(415\pm 7)\text{Ma}$, 为脉体的形成时间, 属于晚志留世时期, 该时期加里东运动基本结束。较大一组锆石年龄加权平均值为 $(440\pm 5)\text{Ma}$, 属于晚奥陶世—早志留世时期, 代表脉体早期具有岩浆活动。

关于该区域年代学的研究, 前人有采用 H-H 同位素方法计算同位素的模式年龄, 也有对该区利用 U-Pb 获得年龄; 但是很少有对该矿床的成矿脉体

研究。杨明银^[6] 用 H-H 同位素计算得到 3 组不同的矿石模式年龄, 最小的为 155 Ma、其次为 325 Ma、最大为 400~418 Ma, 其中的 400~418 Ma 年龄反映玄武质火山岩成岩的年龄, 表明该时期存在着火山岩浆活动, 与本文采于 11 号脉体的锆石所得的年龄 $(415\pm 7)\text{Ma}$ 一致。据马昌前^[12] 报道, 桐柏—大别山南缘随州黄羊山岩体中石英正长岩的岩浆锆石年龄为 $(439\pm 6)\text{Ma}$, 证明在晚奥陶世时期该区存在一期岩浆的活动, 锆石的 U、Pb 含量, Th/U 比值和本文所得锆石的数据十分接近, 主微量元素特征也相似; 本文研究采于 5 号脉体的锆石所得最新年龄为 $(444\pm 5)\text{Ma}$, 与马昌前^[12] 研究年龄基本属于一个时期, 并且在区域上荞麦冲与黄杨山相距不足 10 km, 可认为同一构造活动范围。秦岭—大别造山带在古生代到中生代时期经历了复杂的构造演化, 王涛^[35]、王晓霞等^[36]、雷敏^[37] 将该区的岩浆活动分为不同的演化时期, 结合本文锆石年代特点, 划分 4 个时期: 第一期为早古生代 (加里东期), 主要分为两个阶段, 第一阶段为晚寒武世—早奥陶世时期 501~471 Ma, 第二阶段为中奥陶世—中志留世 468~422 Ma^[9]; 第二期为早泥盆世, 第三期为三叠—侏罗纪, 第四期为燕山期。在整个加里东时期, 该区存在长期的岩浆活动, 脉体的侵入可划分为两个不同时期, 侵入寒武纪地层的脉体时间较老, 为 $(444\pm 5)\text{Ma}$; 侵入奥陶—志留系的脉体时间较新, 为 $(415\pm 7)\text{Ma}$ 。同时该脉体的侵位完成标志着加里东运动的结束。

5.2 岩浆源区示踪

前人在对该区的研究中, 张成立^[38] 测得扬子北缘早古生代晚期玄武岩成分具有 HIMU、EMII 和少量的 EMI 三组分混合的亏损软流圈上地幔特征。据张成立^[39] 研究指出, 大量的基性岩墙群出现并与其他岩石构成双峰式的火山岩模式, 代表了地壳伸展裂解环境及地幔柱物质的上涌。杨明银^[6] 指出, 研究区主要发育随县群、曜岭河群浅变质的裂谷火山沉积建造和基性岩墙。秦岭随州—枣阳地区新元古代至早古生代时期有双峰式的火山岩发育, 早古生代晚期的脉体和火山杂岩带与地幔柱活动有关^[39]。自新元古代至中生代晚期南秦岭地区的幔源岩浆性质保持一致的稳定, 地幔柱在地幔富集的原因是再循环的大陆地壳物质和大洋地壳物质

进入地幔所形成^[40-41]。

锆石原位Hf同位素分析是揭示地壳演化过程和示踪岩浆源区的重要手段^[42-45],锆石的Hf同位素组成能够精确、有效地判别出花岗岩源区以及是否经历过岩浆混合作用,源区 f_{LwHf} 值显著小于大陆镁铁质地壳 $f_{\text{LwHf}} = -0.34$ ^[46],因此二阶段模式年龄能更真实地反映其源区物质从亏损地幔抽取的时间^[47]。样品13QMC-011和样品13QMC-013的锆石二阶段模式年龄值变化范围分别是913~1284 Ma和749~1521 Ma,为中元古代到新元古代时期。锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化范围分别为4个 ε 单位和8.4个 ε 单位,显示了其壳幔混合的源区特征。表明源岩为中元古代到新元古代亏损地幔物质,有少量地壳物质的混染。

研究区为地幔岩浆的活动,造成了 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 出现较大的正值。在加里东末期(早古生代末期)(410 Ma),幔源岩浆上侵过程又受到少量地壳物质影响,所以使其 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值偏小。锆石微量元素判别图显示(图9),样品13QMC-011基本落在洋壳锆石的区域,13QMC-013号则落在洋壳和陆壳的重叠区域,结合 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值与锆石对应的U-Pb年龄的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}(t)$ 与锆石U-Pb年龄的Hf同位素演化图(6-a,b)可以看出岩石源区具有幔源特征,且混入少量壳源物质。铁镁质围岩具有与OIB相似的微量和稀土元素特征,岩浆源区可能来源于软流圈地幔,或许与地幔柱有关。

5.3 成岩动力学背景与成矿机制简述

新元古代时期扬子克拉通北缘的随(州)一枣(阳)地区处于裂谷环境,早期的岩浆作用表现为双峰式火山喷发,晚期有粗面安山岩和碱性流纹岩的喷发,末期为超镁铁质-镁铁质岩床群的侵入^[13]。说明在新元古代时期,扬子板块北缘处于拉张伸展环境,在早古生代时期,板块进一步的拉伸扩张,形成洋盆环境,同时使其岩浆活动增强,形成北西向的基性岩墙群。在印支期,南北大陆斜向碰撞,南秦岭海盆萎缩,碰撞型花岗岩较发育;在燕山期,陆内构造、岩浆活动活跃;印支-燕山期构造活动为南秦岭金沉积改造成因矿床系列提供了成矿动力学机制^[8]。本文脉体的铁镁质围岩即属于此类岩墙。不相容元素构造判别图解也显示碱性铁镁质岩形成于大陆板内伸展裂谷环境(图10),这与董云鹏^[27]报道的兰家畷变质玄武岩的形成环境一致。董云

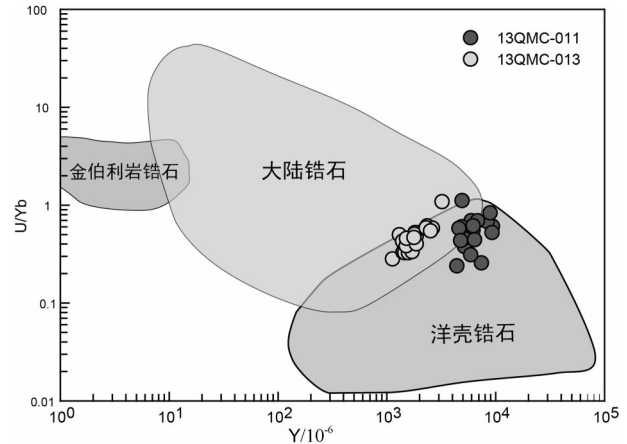


图9 锆石形成环境判别图

Fig. 9 Discrimination diagrams for formation environment of zircon

鹏^[27,48]曾指出,早古生代兰家畷组的基性火山岩地球化学特征显示,稀土总量高,轻稀土强烈富集,早古生代时期扬子板块北缘为伸展-初始裂谷环境。刘忠明^[49]提出桐柏-大别造山带是经历多旋回的复合造山带,加里东期为小洋盆、微古陆以及较多的海岛古地理环境,加里东时期结束了洋壳发展的历史。结合前人研究成果,在加里东时期,该地区属于洋盆环境,这与本文锆石特征相符合(图9)。锆石具有洋壳锆石与大陆锆石的双重特征以及两期脉体的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 特征,指示了该区从大陆裂解构造环境逐步转变为有限洋盆环境。

本研究区在早古生代时期发生两期脉体的侵入事件((415±7) Ma; (444±5) Ma),脉体侵入和岩浆喷发使该区地壳深部的Au带入地壳表层,为后期的成矿带来了物源。在志留纪末期,脉体完成侵入,该区域处于洋盆环境,形成了一些沉积建造。在加里东末期,洋壳发展环境结束,扬子板块再次向北发生俯冲。陈衍景^[50]指出,三叠纪时期,秦岭地区洋陆俯冲和陆陆碰撞同时存在,并逐渐由洋陆俯冲转变为陆陆碰撞体制;230~200 Ma期间古特提斯洋自东向西拉链式缝合,扬子陆块与华北-秦岭联合大陆之间发生碰撞。侏罗纪时期,随着碰撞作用的增强,区内再次发生岩浆热液作用,造山作用强烈,在白垩纪初期结束。在127 Ma之后的岩石圈拉张减薄引起造山后的伸展构造作用,碰撞体制的花岗质岩浆活动和热液成矿作用主要发生于侏罗

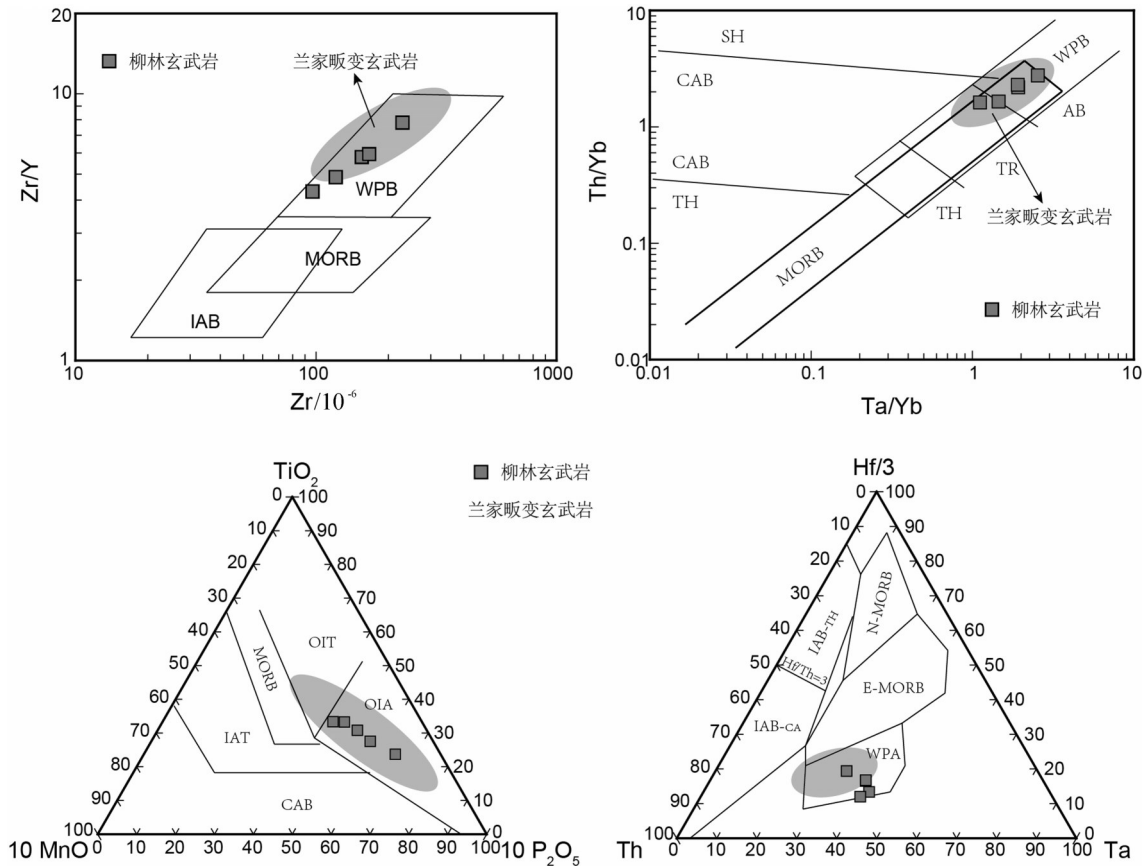


图 10 不相容元素构造判别图解

Fig. 10 Texture discrimination diagrams of incompatible elements

纪—白垩纪之交^[50]。在同时期,襄樊—广济断裂带发生了两次明显的向南逆冲:第一次为中三叠世时期;第二次逆冲发生在中—晚侏罗世,区内的韧性剪切是受到该时期的大型推覆构造所形成。由于硅质脉体为北西向侵入,使其剪切作用沿脉体方向发生,从而使岩体发生糜棱化。剪切作用和岩浆热作用使岩体中 Au 元素发生活化与迁移,岩石的糜棱化进一步促进了 Au 元素的溶解与迁移,从而形成含矿的流体热液。后期在物理化学条件发生改变,沉淀富集形成矿床。

6 结 论

(1)根据测得的锆石 U-Pb 年龄,矿区脉体的侵入分为两个时期,分别为(415±7)Ma(加里东期晚志留世)和(444±5)Ma(加里东期晚奥陶—早志留世)。

(2)根据锆石 Hf 同位素特点, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 出现较大的

正值,个别值较小,推断岩石的来源主要为间接亏损地幔的幔源岩浆的演化,且混入少量壳源物质。

(3)早古生代时期,随州荞麦冲金矿地区正长斑岩脉体形成于大陆地壳伸展裂谷环境。

(4)脉体的侵入为后期矿床的形成带来了最初的 Au 物质来源,为 Au 的预富集提供条件。北西向的侵位是后期韧性剪切带形成的基础,从而为成矿热液的运移与 Au 的富集提供了场所。

参考文献(References):

- [1] Hacker B R, Ratschbacher L, Webb L, et al. U-Pb zircon ages constrain the architecture of the ultrahigh-pressure Qinling-Dabie Orogen[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1998, 161: 215-230.
- [2] Hacker B R, Ratschbacher L, Webb L, et al. Exhumation of ultrahigh pressure continental crust in east central China: Late Triassic-Early Jurassic tectonic unroofing[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105: 13339-13364.

- [3] 张国伟, 郭安林, 刘福田, 等. 秦岭造山带三维结构及其动力学分析[J]. 中国科学(D辑), 1996, 26: 1-6.
Zhang Guowei, Guo Anlin, Liu Futian, et al. Qinling orogenic belt three-dimensional structure and dynamics analysis[J]. Science in China(Series D), 1996, 26: 1-6(in Chinese).
- [4] 陈衍景. 造山型矿床、成矿模型及找矿潜力[J]. 中国地质, 2006, 33(6): 1181-1196.
Chen Yanjing. Orogenic-type deposits and their metallogenic model and exploration potential[J]. Geology in China, 2006, 33(6): 1181-1196(in Chinese with English abstract).
- [5] 李书涛. 湖北随南荞麦冲含金剪切带变形特征及成矿机制初探[J]. 前寒武纪研究进展, 1997, 20(1): 27-34.
Li Shutao. A discussion on deformation characteristics and metallogenetic mechanism for gold-bearing shear zones in Qiaomaichong district of southern Suizhou city, Hubei[J]. Progress in Precambrian Research, 1997, 20(1): 27-34 (in Chinese with English abstract).
- [6] 杨明银, 李书涛. 湖北随州荞麦冲金矿地球化学特征[J]. 资源环境与工程, 1998, 12(2): 24-36.
Yang Mingyin, Li Shutao. Geochemical characteristics of Qiaomaichong gold deposit in Suizhou, Hubei[J]. Resources Environment & Engineering, 1998, 12(2): 24-36 (in Chinese with English abstract).
- [7] 涂怀奎. 扬子地台北缘地壳演化与金成矿特征[J]. 地质找矿论丛, 1999, 14(3): 17-24.
Tu Huaikui. Crustal evolution and characteristics of gold mineralizing in north margin of Yangtze platform[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 1999, 14(3): 17-24 (in Chinese with English abstract).
- [8] 王靖华, 张复新, 于在平, 等. 秦岭金属矿床成矿系列与大陆造山带构造动力学背景[J]. 中国地质, 2002, 29(2): 192-196.
Wang Jinghua, Zhang Fuxin, Yu Zaiping, et al. Minerogenetic series of metallic ore deposits in the Qinling Mountains and tectonodynamic background of the continental orogenic belts[J]. Geology in China, 2002, 29(2): 192-196(in Chinese with English abstract).
- [9] 刘春花, 吴才来, 郜源红, 等. 南秦岭麻池河乡和沙河湾花岗岩体锆石 LA-ICP-MSU-Pb 年代学及 Lu-Hf 同位素组成[J]. 地学前缘, 2013, 20(5): 36-56.
Liu Chunhua, Wu Cailai, Hao Yuanhong, et al. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating and Lu-Hf isotopic system of Machihe Country and Shahewan granitoid rock masses, South Qinling belt, central China[J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(5): 36-56 (in Chinese with English abstract).
- [10] 杨巍然, 杨坤光, 刘忠明, 等. 桐柏—大别造山带加里东期构造热事件及其意义[J]. 地学前缘, 1999, 6(4): 247-253.
Yang Weiran, Yang Kunguang, Liu Zhongming, et al. Caledonian tectono thermal event in Tongbai-Dabie orogenic belt and its significance[J]. Earth Science Frontiers, 1999, 6(4): 247-253 (in Chinese with English abstract).
- [11] 李松生. 重新认识鄂东北地区前寒武纪地层[J]. 资源环境与工程, 1989, 3(1): 30-42.
Li Songsheng. Reconsidering the Precambrian strata in northeastern Hubei area[J]. Resources Environment & Engineering, 1989, 3(1): 30-42 (in Chinese with English abstract).
- [12] 马昌前, 余振兵, 许聘, 等. 桐柏—大别山南缘的志留纪 A 型花岗岩类: SHRIMP 锆石年代学和地球化学证据[J]. 中国科学(D辑), 2004, 34(12): 1100-1110.
Ma Changqian, Yu Zhenbing, Xu Ping, et al. Tongbai-Dabie southern edge of the Silurian Period A-type granitoids: SHRIMP zircon age and geochemical evidence [J]. Science in China (Series D), 2004, 34(12): 1100-1110 (in Chinese).
- [13] 薛怀民, 马芳, 宋永勤. 扬子克拉通北缘随(州)—枣(阳)地区新元古代变质岩浆岩的地球化学和 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学研究[J]. 岩石学报, 2011, 27(4): 1116-1130.
Xue Huaimin, Ma Fang, Song Yongqin. Geochemistry and SHRIMP zircon U-Pb data of Neoproterozoic meta-magmatic rocks in the Suizhou-Zaoyang area, northern margin of the Yangtze Craton, Central China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(4): 1116-1130 (in Chinese with English abstract).
- [14] Hu Zhaochu, Gao Shan, Liu Yongsheng, et al. Signal enhancement in laser ablation ICP-MS by addition of nitrogen in the central channel gas[J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2008, 23(8): 1093-1101.
- [15] Liu Yongshen, Gao Shan, Hu Zhaochu, et al. 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(1/2): 5373-571.
- [16] Andersen T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. Chemical Geology, 2002, 192(1/2): 59-79.
- [17] Ludwig KR. User's Manual for Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center, California. 2003.
- [18] 侯可军, 李延河, 邹天人, 等. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用[J]. 岩石学报, 2007, 23(10): 2595-2604.
Hou Kejun, Li Yanhe, Zou Tianren, et al. Laser ablation-MC-ICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(10): 2595-2604 (in Chinese with English abstract).
- [19] Elhlou S, Belousova E, Griffin WL, et al. Trace element and isotopic composition of GJ- red zircon standard by laser

- ablation[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, 70, A158–A158.
- [20] Morel M L A, Nebel O, Nebel–Jacobsen Y J, et al. Hafnium isotope characterization of the GJ–1 zircon reference material by solution and laser–ablation MC–ICPMS[J]. *Chemical Geology*, 2008, 255(1–6): 231–235.
- [21] 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. *岩石学报*, 2007, 23(6): 1217–1238.
Wu Fuyuan, Li Xianhua, Yang Jinhui, et al. Discussions on the petrogenesis of granites[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(6): 1217–1238(in Chinese with English abstract).
- [22] 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. Lu–Hf同位素体系及其岩石学应用[J]. *岩石学报*, 2007, 23(2): 185–220.
Wu Fuyuan, Li Xianhua, Zheng Yongfei, et al. Lu–Hf isotopic systematics and their applications in petrology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(2): 185–220(in Chinese with English abstract).
- [23] Soderlund U, Patchett P J, Vervoort J D, et al. The ^{176}Lu decay constant determined by Lu–Hf and U–Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 219(3/4): 311–324.
- [24] Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, et al. 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.
- [25] Blichert–Toft J, Albarède F. The Lu–Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle–crust system[J]. *Earth and Planetary Science Letter*, 1997, 148(1): 243–258.
- [26] Ma Q, Zheng J P, Griffin W L, Zhang M, et al. Triassic “adakitic” rocks in an extensional setting (North China): melts form the cratonic lower crust[J]. *Lithos*, 2012, 149: 159–173.
- [27] Hancher J M, Rudnick R L. Revealing hidden structures: The application of cathodoluminescence and back–scatter electrical imaging to dating zircons from lower crustal xenoliths[J]. *Lithos*, 1995, 36: 289–303.
- [28] Hoskin PWO, Schaltegger U. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis[J]. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 2003, 53(1): 27–62.
- [29] 董云鹏, 周鼎武, 张国伟, 等. 南岭造山带南缘早古生代基性火山岩地球化学特征及其大地构造意义[J]. *地球化学*, 1998, 27(5): 432–441.
Dong Yunpeng, Zhou Dingwu, Zhang Guowei, et al. Geochemistry of the caledonian basic volcanic rocks in the south margin of Qinling orogenic belt and their tectonic implications[J]. *Geochimica*, 1998, 27(5): 432–441 (in Chinese with English abstract).
- [30] Boynton W V. *Geochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies*[C]//Henderson P (ed.). *Rare Earth Element Geochemistry*. Amsterdam: Elsevier, 1984: 63–114.
- [31] McDonough W F, Sun S. The composition of the Earth[J]. *Chemical Geology*, 1995, 120(3/4): 223–253.
- [32] Rowley D B, Xue F, Tucker R D. Ages of ultrahigh pressure metamorphism and protolith orthogneisses from the eastern Dabie Shan: U–Pb zircon geochronology[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1997, 151: 191–203.
- [33] Mojzsis S J, Harrison T M. Establishment of a 3.83 Ga magmatic age for the Akilia tonalite(southern West Greenland) [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 202: 563–576.
- [34] 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.
Wu Yuanbao, Zhen Yongfei. Mineralogy of the causes of zircon U–Pb ages and their interpretation of the constraints[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(16): 1589–1604 (in Chinese).
- [35] 王涛, 王晓霞, 田伟, 等. 北秦岭古生代花岗岩组合、岩浆时空演变及其对造山作用的启示[J]. *中国科学(D辑)*, 2009, 39(7): 949–971.
Wang Tao, Wang Xiaoxia, Tian Wei, et al. North Qinling Paleozoic granite combined spatial and temporal evolution of magma and its Implications for orogeny[J]. *Science in China (Series D)*, 2009, 39(7): 949–971 (in Chinese).
- [36] 王晓霞, 王涛, 齐秋菊, 等. 秦岭晚中生代花岗岩时空分布、成因演变及其构造意义[J]. *岩石学报*, 2011, 27(6): 1573–1593.
Wang Xiaoxia, Wang Tao, Qi Qiuju, et al. Temporal–spatial variations, origin and their tectonic significance of the Late Mesozoic granites in the Qinling, Central China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(6): 1573–1593 (in Chinese with English abstract).
- [37] 雷敏. 秦岭造山带东部花岗岩成因及其与造山带构造演化关系[D]. 北京:中国地质科学院, 2010.
Lei Min. Causes of granite eastern Qinling orogenic belt and its relationship with Orogen tectonic evolution[D]. Chinese Academy of Geological Sciences, 2010 (in Chinese with English abstract).
- [38] 张成立, 高山, 袁洪林, 等. 南秦岭早古生代地幔性质:来自超镁铁质、镁铁质岩脉及火山岩的Sr–Nd–Pb同位素证据[J]. *中国科学(D辑)*, 2007, 37(7): 857–865.
Zhang Chenli, Gao Shan, Yuan Hongling, et al. South Qinling early Paleozoic mantle nature : Sr–Nd–Pb isotopic evidence from ultramafic , mafic dykes and volcanic rocks[J]. *Science in China (Series D)*, 2007, 37(7): 857–865 (in Chinese with English abstract).
- [39] 张成立, 高山, 张国伟, 等. 南秦岭早古生代碱性岩墙群的地球化学及其地质意义[J]. *中国科学(D辑)*, 2002, 32(10):819–829.

- Zhang Chenli, Gao Shan, Zhang Guowei, et al. Geochemistry and geological significance of early Paleozoic alkaline dykes in South Qinling [J]. *Science in China(Series D)*, 2002, 32(10): 819–829 (in Chinese).
- [40] Hofmann A W. Mantle geochemistry: the message from oceanic volcanism[J]. *Nature*, 1997, 385: 219–229.
- [41] Andreas S, Michael B, Vincent J M S. Recycling oceanic crust[J]. *Quant. Constr.*, 2003, 4(3): 1525–2027.
- [42] 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.
- [43] Scherer E E, Cameron K L, Blichert-Toft J. Lu–Hf garnet geochronology: Closure temperature relative to the Sm–Nd system and the effects of trace mineral inclusions[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64(19): 3413–3432.
- [44] Griffin W L, Wang X, Jackson S E, et al. Zircon chemistry and magma genesis, SE China: In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes[J]. *Lithos*, 2002, 61(3/4): 237–269.
- [45] Zhang D Y, Zhang Z C, Encarnación J, et al. Petrogenesis of the Kekesai composite porphyry intrusion, western Tianshan, NW China: Implications for metallogenesis, tectonic evolution and continental growth during Late Paleozoic time[J]. *Lithos*, 2012, 146–147: 65–79.
- [46] Amelin Y, Lee D C, Halliday A N. Nature of the Earth's earliest crust from hafnium isotopes in single detrital zircons[J]. *Nature*, 1999, 399: 252–255.
- [47] 第五春荣, 孙勇, 林慈鑫, 等. 豫西宜阳地区TTG质片麻岩锆石U-Pb定年和Hf同位素地质学[J]. *岩石学报*, 2007, 23(2): 253–262.
- Di Wuchunrong, Sun Yong, Lin Ciluan, et al. Zircon U–Pb ages and Hf isotopes and their geological significance of Yiyang TTG gneisses from Henan Province, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(2): 253–262 (in Chinese with English abstract).
- [48] 董云鹏, 张国伟, 赖绍聪, 等. 随州花山蛇绿岩构造混杂岩厘定及其大地构造意义[J]. *中国科学(D辑)*, 1999, 29(3): 222–231.
- Dong Yunpeng, Zhang Guowei, Lai Shaocong, et al. Suizhou Huashan ophiolite tectonic melange set and its tectonic significance [J]. *Science in China (Series D)*, 1999, 29(3): 222–231 (in Chinese).
- [49] 刘忠明, 黄国平, 方冬生. 湖北省随州市红石地区金银成矿地质条件研究[J]. *华南地质与矿产*, 2000, (3): 50–57.
- Liu Zhongming, Huang Guoping, Fang Dongsheng. Geological conditions of Au, Ag redstone area Suizhou, Hubei[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 2000, (3): 50–57 (in Chinese with English abstract).
- [50] 陈衍景. 秦岭印支期构造背景、岩浆活动及成矿作用[J]. *中国地质*, 2010, 37(4): 854–865.
- Chen YanJing. Indosinian tectonic setting, magmatism and metallogenesis in Qinling Orogen, central China[J]. *Geology in China*, 2010, 37(4): 854–865(in Chinese with English abstract).