

德兴矿集区花岗闪长斑岩锆石 U-Pb 年龄、 Hf 同位素特征及其意义

水新芳¹ 赵元艺² 郭 硕¹ 吴德新¹ 朱小云³ 王增科³

(1. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 2. 中国地质科学院矿产资源研究所 国土资源部成矿作用与矿产资源评价
重点实验室, 北京 100037; 3. 江铜集团德兴铜矿, 江西 德兴 334200)

摘要: 德兴矿集区位于赣东北地区, 是中国东部中生代钦杭成矿带中的大型铜金铅锌矿集区之一, 集中了铜厂、富家坞和朱砂红斑岩铜钼(金)矿、银山银铜铅锌多金属矿和金山金矿等大型、超大型矿床。本文在系统的野外地质调查与样品采集的基础上, 对铜厂、富家坞、朱砂红及银山花岗闪长斑岩进行了 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年和原位 Hf 同位素分析。德兴矿集区花岗闪长斑岩的 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 的 4 组年龄分别为: (171±1.2)Ma (铜厂)、(172±0.68)Ma (富家坞)、(173±1.3)Ma (朱砂红)、(176±1.5)Ma (银山), 表明这些岩体均为中侏罗世的产物。样品 Hf 两阶段模式年龄平均值分别为 861 Ma、876 Ma、904 Ma 和 941 Ma, 正的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 平均值在 4.34~5.54, Zr/Hf 比值接近于上地幔的 Zr/Hf 比值。锆石 Hf 同位素组成显示, 岩浆源区主要来源于亏损地幔组分, 但在岩浆演化中遭受了古老地壳物质的混染, 幔源物质在德兴矿集区花岗闪长斑岩的形成过程中发挥了重要作用。德兴矿集区 4 个矿床成岩成矿的最重要时期在 170~175 Ma, 该矿集区岩浆热液系统持续活动可能是该大型矿集区形成的重要原因。

中图分类号: P588.12; P597 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2012)06-1543-19

1 引言

德兴矿集区位于赣东北地区, 是中国东部中生代成矿带中的大型铜金铅锌矿集区之一, 也是环太平洋成矿带的一个重要组成部分。在长约 20 km, 宽约 15 km, 面积约 300 km² 内集中了铜厂、富家坞和朱砂红斑岩铜钼(金)矿、银山银铜铅锌多金属矿和金山金矿等大型、超大型矿床(图 1), 是与钙碱性火山-侵入(花岗质)岩浆活动有关的“斑岩-浅成热液金-铜成矿系统”中的典型矿集区^[1], 是中国有色金属和贵金属资源的重要基地。它又处在中国东南部钦杭成矿带中段^[2], 该地区已逐渐成为认识中国东南部大地构造及岩石圈演化的关键部位, 日益受到

国内地质学界的重视。因此, 对德兴地区成岩成矿背景乃至华南地区中生代大规模成矿作用的动力学背景研究有着极为重要的意义。

从 20 世纪 70 年代起, 对该地区地质勘查工作不断扩大和深入, 有关矿床的科学研究逐渐开展并取得丰硕的成果, 主要包括年代学、岩石学及地球化学等各个方面。其中在对矿集区年代学方面取得颇多的资料, 早先主要用全岩 K-Ar 和 Rb-Sr 方法测试, 给出的年龄范围较大, 精度较低^[3-7]。最近, 一些学者利用高精度测试技术, 精确厘定了德兴矿集区的成岩年龄及其成矿年龄, 如铜厂和富家坞花岗闪长斑岩的锆石 U-Pb 年龄为 171 Ma^[8]; 铜厂、富家坞和朱砂红辉钼矿的 Re-Os 同位素年龄为 169~173

收稿日期: 2012-11-05; 改回日期: 2012-11-12

基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项“江西德兴斑岩铜矿科学基地研究”(200911007-01)、“德兴铜矿集区地球化学环境累积效应与预警方法研究”(201111020-05)以及中国地质调查局地质矿产调查项目“钦杭成矿带中生代岩浆-热液多金属成矿与靶区优选”(1212011085408)共同资助。

作者简介: 水新芳, 女, 1989 年生, 硕士生, 矿物学、岩石学、矿床学专业; E-mail: shui.xinfang@163.com。

通讯作者: 赵元艺, 男, 1966 年生, 研究员, 矿床学、地球化学研究, E-mail: yuanyizhao2@sina.com。

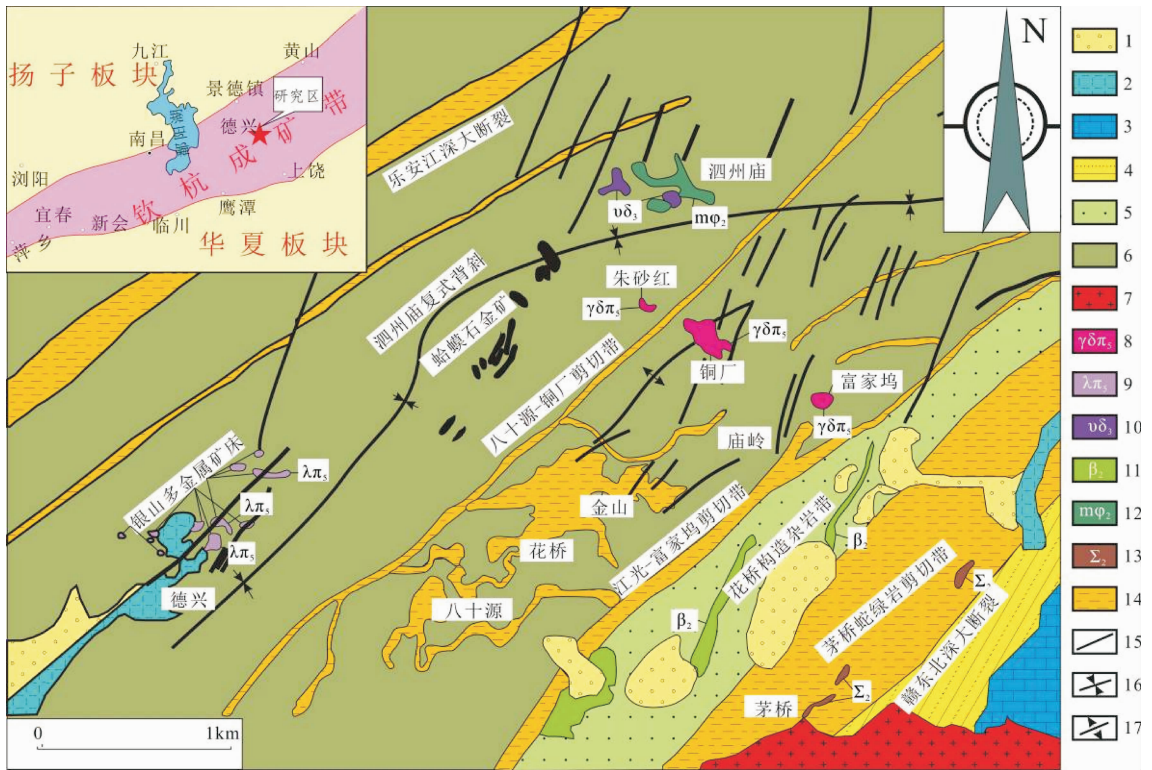


图1 德兴矿集区地质简图(改编自 Mao Jingwen et al,2011^[21])

1—白垩系石溪组红层;2—下侏罗统鹅湖岭组火山岩;3—寒武系荷塘组白云质灰岩;4—震旦系碎屑岩;5—新元古界登山群砂板岩;6—中元古界双桥山群千枚岩;7—中侏罗世花岗岩;8—中侏罗世花岗岩闪长斑岩;9—中侏罗世石英斑岩;10—加里东期辉石闪长岩;11—新元古代变细碧—角斑岩;12—新元古代变角闪辉石岩;13—新元古代超镁铁质岩;14—剪切带;15—断层;16—背斜;17—向斜

Fig.1 Geological sketch map of the Dexing ore concentration area

1— Red bed of Cretaceous Shixi Formation; 2— Intermediate-acid volcanic rocks of Lower Jurassic Ehuling Formation; 3— Dolomitic limestone of Cambrian Hetang Formation; 4— Sinian calstic rocks; 5— Neoproterozoic sandy slate of Dengshan Formation; 6— Phyllite of Mesoproterozoic Shuangqiaoshan Formation; 7— Middle Jurassic granitoid; 8— Middle Jurassic dacite porphyry; 9— Neoproterozoic spilite-keratophyre; 10— Middle Jurassic granodiorite; 11— Caledonian (Early Paleozoic) meta-spilite-keratophyre; 12— Neoproterozoic amphibole pyroxenite; 13— Neoproterozoic ultramafic rocks; 14— Shear zone 15— Fault; 16— Syncline; 17— Anticline

Ma^[9-11];银山与成矿有关的岩体的锆石 U-Pb 年龄为 166~176 Ma^[12], 银山蚀变绢云母 Ar-Ar 年龄为 175~180 Ma^[13], 其中朱砂红斑岩铜矿的研究程度相对较浅, 且不系统。以上成果主要是单一矿床的独立研究, 对区域上直接与成矿有关的岩体测年工作还不系统。近年来, 很多学者通过对岩体中锆石 Hf 同位素分析, 在判别岩浆物源、演化方面取得了丰硕成果^[14-19]。本文在详细观察该地区铜厂、富家坞、朱砂红和银山 4 个矿床的地质特征基础上, 选择与成矿关系密切的花岗闪长斑岩为研究对象, 通过对花岗闪长斑岩岩体中的锆石进行 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素分析, 获得精确的岩体年龄, 并通过对铜厂、富家坞、朱砂红和银山 4 个矿

床花岗岩类的年代学对比研究, 探讨成岩成矿之间的关系, 为进一步了解该区域大规模成矿作用的时限以及地球动力学过程提供详实的数据。

2 区域地质背景

江西德兴矿集区位于江南造山带东段, 其东南是华南板块, 西北是扬子板块。被 NE 向乐安江、赣东北深大断裂夹持(图 1)。区域上出露的地层主要为中元古界双桥山群下亚群浅变质岩系, 以及中生界上侏罗统鹅湖岭组流纹质-英安质火山碎屑岩。中元古界双桥山群出露面积广泛, 约占全区面积的 70%。双桥山群由一套浅变质的火山碎屑沉积岩夹变质火山熔岩组成, 又进一步分为上、下 2 个亚

群。侏罗纪鹅湖岭组为陆相火山岩建造,其底部为千枚质砾岩,中部为流纹质集块角砾岩和角闪流纹熔岩,上部为英安质集块岩和英安质熔岩。这一地带的区域构造特征是由 NE、NNE、NW 和 EW 向 4 组断裂系统组成区域构造格架。这些断裂切割了双桥山群、震旦系、寒武系和侏罗系。在赣东北深大断裂和乐安江断裂之间发育着次一级的北北东向的八源头—铜厂韧性剪切带和江光—富家坞韧性剪切带。在区域上,早侏罗世—白垩纪岩浆活动频繁,不仅发育有大量的陆壳重熔型花岗岩体、壳幔混源型浅成侵入岩,还发育大量的火山喷发岩和次火山岩。区内的主要典型矿床是各主要成矿地质体(地层、变质岩、构造、岩浆岩)经多期、多阶段、多成因成矿地质作用形成的。

3 矿床地质特征

德兴铜矿包括铜厂、富家坞、朱砂红 3 个铜钼(金)矿床,3 个斑岩体出露面积之比为 10:4:1,相应这 3 个矿床的铜储量之比约为 10:5:1。铜矿体主要分布在花岗闪长斑岩体内外接触带,主要矿体(大约 2/3 矿体)赋存于外接触带的围岩中^[9]。矿化垂深达 1 200 m,主矿体规模巨大、形态规整、产状稳定,已探明 Cu 储量为 832 Mt,平均品位为 0.45%;Mo 储量为 28.7 Mt,平均品位为 0.01%^[20]。矿化类型在斑岩体中以浸染型为主,接触带两侧强蚀变带内以细脉浸染型为主,外接触带围岩中多为细脉型及脉型矿化。区内出露的地层为蓟县系双桥山群千枚岩。双桥山群地层总体上为含火山质泥砂质复理石建造,下部夹火山碎屑岩及变中基性熔岩,大致呈北东向展布。主岩体受东西向褶皱构造带中的北西或北西西向张断裂构造控制。区域上深断裂带构造线方向为北东向,矿床内北西向、北东向和东西向 3 组构造都比较发育,北东向和北西西向断裂控制了 3 个花岗闪长斑岩体的分布。矿石结构按其成因可分为 4 类:结晶结构、交代结构、固溶体分离结构和压力结构,结晶结构和交代结构是最主要的结构类型。矿石中金属硫化物以黄铁矿和黄铜矿为主,辉钼矿次之,再次为砷黝铜矿和斑铜矿等。脉石矿物以石英,水白云母(伊利石)、绿泥石等为主。矿石构造以细脉状、浸染状构造为主,其中以两者复合的细脉—浸染状构造为矿石的典型代表,其次是浸染状构造和各类脉状构造。此外局部可见团块状、块状、条带状、角砾状

和晶洞构造等。矿床内蚀变种类较多,主要有钾长石化、硅化、绢云母化等。

银山银铜铅锌矿床位于德兴斑岩铜矿西南方向 15 km,东部相距 10 km 的是产于中元古界双桥山群中的金山金矿。银山银铜铅锌矿床为火山—次火山热液型多金属矿床,位于泗洲庙复向斜西南翼南部。主要矿体分布在侏罗纪鹅湖岭组火山次火山岩(或斑岩)和双桥山群千枚岩和凝灰质千枚岩中。区内断裂构造以北北东、北东和北北西向为主,次为北东、北西和北西西向,再次为南北向。银山矿床的成矿作用主要与第 2 旋回的火山—次火山作用有关,早期以铜硫金矿化为主,晚期以铅锌银矿化为主。矿体主要包含陡倾角(大于 70°)脉状矿体(铜金矿体和铅锌矿体)和缓倾角(小于 30°)似层状银铅锌矿体。陡倾斜脉状及细脉浸染状铜金矿体中的金属矿物以黄铁矿、黄铜矿、硫砷铜矿和砷黝铜矿为主。陡倾斜脉状铅锌矿体的金属矿物有方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、黄铜矿和硫砷铜矿。缓倾斜似层状银铅锌矿体由富含银的方铅矿、闪锌矿细脉组成,呈似层状和不规则透镜状,倾角 15°~20°^[22]。围岩蚀变主要为黄铁绢英岩化、青磐岩化、高岭石化、绿泥石化和碳酸盐化等,由内向外依次划分为石英—绢云母化、石英—绢云母—绿泥石化、绢云母—绿泥石化和绿泥石—碳酸盐化 4 个带^[23]。

4 样品采集与测试

4.1 样品采集与测试方法

样品分别采自铜厂矿床(样号 TC7-5;N29°01.180',E117°43.615'),富家坞矿床(样号 FJW7-8;N28°00.069',E117°45.537'),朱砂红钻孔(样号 ZSHZK2-9-48)和银山银铜铅锌矿床(样号 YS8-21,N28°58.305',E117°42.534')(图 2)。岩性均为花岗闪长斑岩,斑状结构,块状构造。斑晶主要为斜长石、钾长石,石英及蚀变黑云母,基质成分有石英、斜长石、钾长石及金属矿物。斜长石斑晶呈自形板状,聚片双晶发育;钾长石斑晶也呈自形板状,晶体表面常有泥化现象;石英斑晶呈等轴粒状,常具被溶蚀的港湾(图 2-c)。黑云母斑晶已经完全被绿泥石、硬石膏交代,残留呈自形叶片状;早期被绿帘石—绿泥石完全交代,晚期又被硬石膏交代;磷灰石(Ap)斑晶发育完整呈自形短柱状,晶棱平直完整为典型的斑晶特征(图 2-c)。斑晶大小不等,一般在 1~4 mm。基质

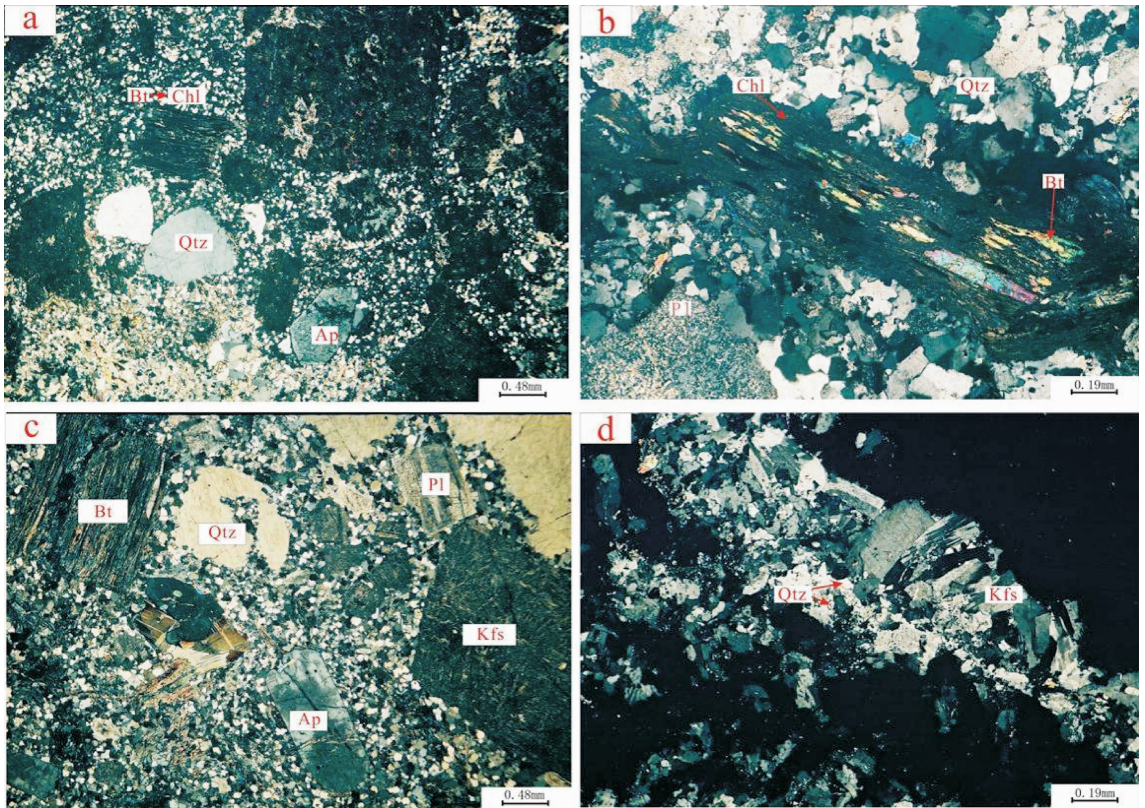


图 2 德兴矿集区典型标本显微照片

a—铜厂钾长石化花岗闪长斑岩(样号 TC-7-8); b—富家坞花岗闪长斑岩(样号 FJW-7-9); c—朱砂红花花岗闪长斑岩(样号 ZSHZK4-3-35); d—银山蚀变花岗闪长斑岩(样号 YS-8-19); Bt—黑云母; Chl—绿泥石; Ap—磷灰石; Qtz—石英; Pl—斜长石; Kfs—钾长石

Fig.2 Microphotographs of the Dexing deposit and typical rock samples

a—K-feldspar granodiorite porphyry (Sample TC-7-8); b—Granodiorite porphyry (Sample FJW-7-9); c—Apatite granodiorite porphyry (Sample ZSHZK4-3-35); d—Altered granodiorite porphyry (Sample YS-8-19); Bt—Biotite; Chl—Chlorite; Ap—Apatite; Qtz—Quartz; Pl—Plagioclase; Kfs—Potash feldspar

矿物均呈他形粒状,粒度一般小于 0.1 mm。

锆石 U—Pb 定年和 Hf 同位素测试分析在中国地质科学院矿产资源研究所 LA—MC—ICP—MS 实验室完成,所用仪器为 Finnigan Neptune 型 MC—ICP—MS 及与之配套的 Newwave UP 213 激光剥蚀系统。

定年激光剥蚀所用斑束直径为 25 μm , 频率为 10 Hz, 能量密度约为 2.5 J/cm², 以 He 为载气。信号较小的 ²⁰⁷Pb, ²⁰⁶Pb, ²⁰⁴Pb(+204Hg), ²⁰²Hg 用离子计数器(multi-ion-counters)接收, ²⁰⁸Pb, ²³²Th, ²³⁸U 信号用法拉第杯接收, 实现了所有目标同位素信号的同时接收并且不同质量数的峰基本上都是平坦的, 进而可以获得高精度的数据。LA—MC—ICP—MS 激光剥蚀采样采用单点剥蚀的方式, 数据分析前用锆石 GJ-1 进行调试仪器, 使之达到最优状态, 锆石 U—

Pb 定年以锆石 GJ-1 为外标, U、Th 含量以锆石 M127(U:923 $\times 10^{-6}$; Th:439 $\times 10^{-6}$; Th/U: 0.475^[24])为外标进行校正。测试过程中在每测定 5~7 个样品前后重复测定 2 个锆石 GJ1 对样品进行校正, 并测量 1 个锆石 Plesovice, 观察仪器的状态以保证测试的精确度。数据处理采用 ICP—MS—DataCal 程序^[25], 测量过程中绝大多数分析点 ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb>1000, 未进行普通铅校正, ²⁰⁴Pb 由离子计数器检测, ²⁰⁴Pb 含量异常高的分析点可能受包体等普通 Pb 的影响, 对 ²⁰⁴Pb 含量异常高的分析点在计算时剔除, 锆石年龄谐和图用 Isoplot 3.0 程序获得。详细实验测试过程可参见[26]。样品分析过程中, Plesovice 标样作为未知样品的分析结果(339.7 ± 1.4)Ma(n=20, 2 σ)与对应的年龄推荐值在误差范围内完全一致。

Hf 同位素测试分析, 激光剥蚀直径根据锆石大

小不同,采用 55 μm 或 40 μm ,测定时使用锆石国际标样 GJ1 作为参考物质,分析点与 U-Pb 定年分析点为同一位置。相关仪器运行条件及详细分析流程见[27]。分析过程中锆石标准 GJ1 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 测试加权平均值分别为 0.282007 ± 0.000007 (2σ , $n=36$),与文献报道值^[27-29]在误差范围内完全一致。

4.2 锆石的 U-Pb 年龄

本文所测试的锆石分别选自 4 个矿区的 4 件样品,每件样品测试 20 粒锆石,共 80 粒锆石(图 3)均为无色透明长柱状或短柱状晶体,晶体自形程度较高(部分锆石残缺),锆石长轴为 200~600 μm ,长短轴之比在 3:2~6:1,所有锆石均有清晰的内部结构,具有典型的岩浆震荡环带,为岩浆结晶的产物。铜厂、富家坞、朱砂红、银山所测试的锆石样品中 Th/U 比值分别为 0.54~1.18、0.49~0.80、0.41~1.03、0.25~0.47(表 1)。岩浆锆石的 Th/U 比大于 0.5,而变质老锆石的 Th/U 比值一般小于 0.1^[29],铜厂、富家坞和朱砂红(朱砂红有 1 个样品为 0.49)Th/U 比均大于 0.5,为岩浆锆石,而银山样品中 Th/U 比明显偏低,但也均大于 0.1,结合其锆石形态及内部结构,其应为岩浆锆石。

在铜厂等 4 件样品的谐和图上所有分析点均在分布在谐和线上或其附近(图 4),显示了很好的谐和性,表明锆石形成后 U-Pb 同位素体系是基本封闭的,没有 U 或 Pb 同位素的明显丢失或加入。测试

结果可信,可以代表其成岩年龄。铜厂(TC7-5)的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $(171 \pm 1.2)\text{Ma}$ ($n=20$, $\text{MSWD}=0.33$),富家坞(FJW7-8)为 $(172 \pm 0.68)\text{Ma}$ ($n=19$, $\text{MSWD}=1.18$),朱砂红(ZSHZK2-9-48)为 $(173 \pm 1.3)\text{Ma}$ ($n=20$, $\text{MSWD}=0.20$),银山(YS8-21)为 $(176 \pm 1.5)\text{Ma}$ ($n=20$, $\text{MSWD}=0.46$),均为中侏罗世岩浆活动的产物。

4.3 锆石的 Hf 同位素

本文对 4 件样品,共 80 颗锆石样品进行了原位 Hf 同位素测试,获得了锆石 Hf 同位素分析数据(表 2,图 5)。样品的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值均小于 0.002,因而由 ^{176}Lu 衰变生成的 ^{176}Hf 非常少。因此,锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值可以代表该锆石形成时的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值。

铜厂(样号 TC7-5) $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.282795~0.282863,平均值为 0.282825, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 4.51~6.85,平均值为 5.54, T_{DM2} (Hf 的两阶段模式年龄) 为 776~927 Ma,平均值为 861 Ma;富家坞(样号 FJW7-8) $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.282783~0.282855,平均值为 0.282819, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 3.98~6.62,平均值为 5.33, T_{DM2} 为 794~958 Ma,平均值为 875 Ma;朱砂红(样号 ZSHZK2-9-48) $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.282714~0.282852,平均值为 0.282806, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 1.57~6.52,平均值为 4.87, T_{DM2} 为 800~1116 Ma,平均值为 904 Ma;银山(样号 YS8-21) $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为

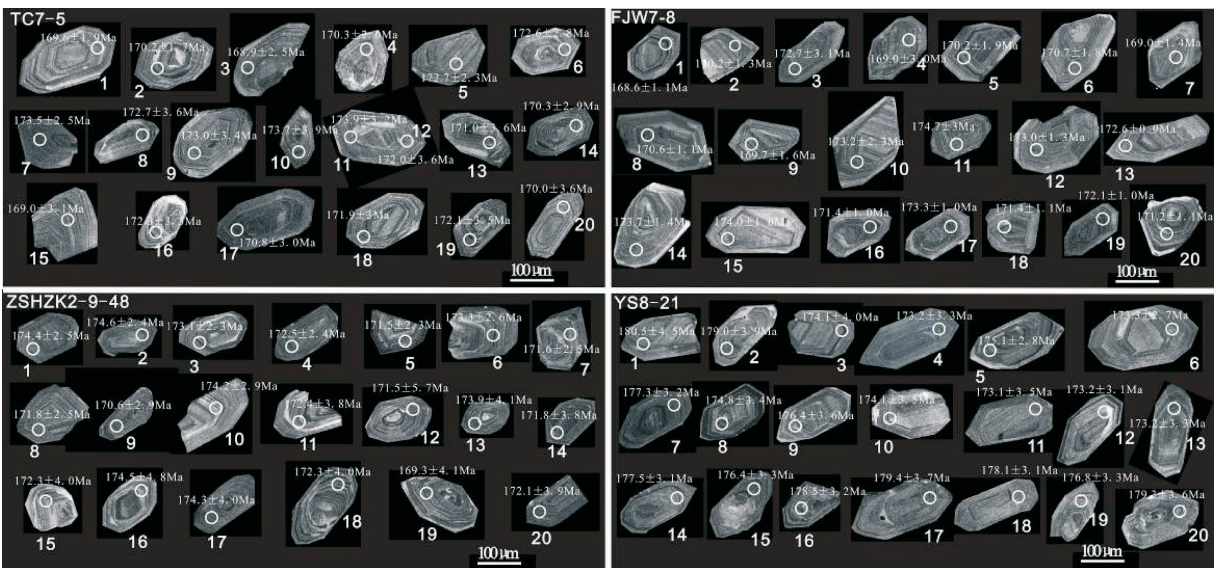


图 3 德兴地区岩浆岩锆石阴极发光图像及测试位置

Fig.3 CL images and test positions of zircons from magmatic rocks in Dexing area

表 1 德兴地区岩浆岩 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 分析数据
Table 1 LA-MC-ICP-MS U-Pb analytical data of zircons from magmatic rocks in Dexing area

序号	样品编号	元素含量/ 10^6				Th/U	同位素比值				年龄/Ma					
		Pb	Th	U	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		
1	TC7-5-1	37.6	897.3	912.2	0.98	0.0499	0.0014	0.1836	0.0055	0.0267	0.0003	190.8	171.1	4.7	169.6	1.9
2	TC7-5-2	13.3	299.6	481.9	0.62	0.0498	0.0006	0.1836	0.0025	0.0268	0.0003	183.4	171.2	2.1	170.2	1.7
3	TC7-5-3	17.3	368.9	634.2	0.58	0.0496	0.0005	0.1813	0.0028	0.0265	0.0004	176	169.1	2.4	168.9	2.5
4	TC7-5-4	16.4	342.7	535	0.64	0.0499	0.0006	0.1841	0.0027	0.0268	0.0003	190.8	171.6	2.3	170.3	2
5	TC7-5-5	16.2	342.9	531.9	0.64	0.0501	0.0006	0.1873	0.0032	0.0272	0.0004	198.2	174.3	2.7	172.7	2.3
6	TC7-5-6	11	254.2	467.4	0.54	0.0498	0.0007	0.186	0.0037	0.0271	0.0004	183.4	173.2	3.1	172.6	2.8
7	TC7-5-7	16.8	390.7	667.5	0.59	0.0497	0.0005	0.1867	0.0031	0.0273	0.0004	189	173.8	2.7	173.5	2.5
8	TC7-5-8	18.7	459.2	665.3	0.69	0.0497	0.0006	0.1857	0.0043	0.0271	0.0006	189	173	3.7	172.7	3.6
9	TC7-5-9	12.8	274	493	0.56	0.0503	0.0008	0.1887	0.0049	0.0272	0.0005	209.3	175.5	4.2	173	3.4
10	TC7-5-10	19.6	446.7	563.9	0.79	0.0496	0.0006	0.1866	0.0048	0.0273	0.0006	176	173.7	4.1	173.7	3.9
11	TC7-5-11	16.8	388.7	518.7	0.75	0.0499	0.0005	0.1879	0.0041	0.0273	0.0005	190.8	174.9	3.5	173.9	3.2
12	TC7-5-12	15	354	470.8	0.75	0.0501	0.0006	0.1861	0.0041	0.027	0.0006	198.2	173.3	3.5	172	3.6
13	TC7-5-13	17.5	370.6	591.2	0.63	0.05	0.0005	0.1851	0.0043	0.0269	0.0006	198.2	172.5	3.7	171	3.6
14	TC7-5-14	17.2	384.3	563.2	0.68	0.0497	0.0005	0.1833	0.0035	0.0268	0.0005	183.4	170.9	3	170.3	2.9
15	TC7-5-15	17.1	386.1	670.2	0.58	0.0495	0.0005	0.1811	0.0037	0.0266	0.0005	172.3	169	3.2	169	3.1
16	TC7-5-16	47.1	1281.3	1097.7	1.17	0.0519	0.0004	0.1937	0.0041	0.0271	0.0005	279.7	179.8	3.5	172.3	3.3
17	TC7-5-17	23.9	534.4	812.7	0.66	0.049	0.0004	0.1813	0.0036	0.0268	0.0005	146.4	169.2	3.1	170.8	3
18	TC7-5-18	36.4	991.3	953.3	1.04	0.0499	0.0004	0.1856	0.0035	0.027	0.0005	190.8	172.9	3	171.9	3
19	TC7-5-19	45.5	1303.7	1105.2	1.18	0.0496	0.0004	0.1849	0.0039	0.0271	0.0006	189	172.3	3.3	172.1	3.5
20	TC7-5-20	14.3	356.9	441.1	0.81	0.0502	0.0007	0.1841	0.0042	0.0267	0.0006	211.2	171.6	3.6	170	3.6
21	FW7-8-1	32.7	745.4	994.6	0.75	0.0497	0.0003	0.1816	0.0016	0.0265	0.0002	189	169.5	1.4	168.6	1.1
22	FW7-8-2	18.5	401.5	738.3	0.54	0.0498	0.0004	0.1843	0.0026	0.0268	0.0002	187.1	171.8	2.2	170.2	1.3
23	FW7-8-3	16.7	337.1	556.9	0.61	0.0498	0.0004	0.1863	0.0038	0.0272	0.0005	183.4	173.5	3.3	172.7	3.1
24	FW7-8-4	12.2	241.4	497.3	0.49	0.0498	0.0005	0.182	0.0036	0.0266	0.0005	187.1	169.8	3.1	169	3

续表 1

序号	样品编号	元素含量/ 10^{-6}				同位素比值				年龄 / Ma							
		Pb	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ				
25	FJW7-8-5	24.1	528.9	781.2	0.68	0.0495	0.0003	0.1827	0.0023	0.0267	0.0003	172.3	8.3	170.4	2	170.2	1.9
26	FJW7-8-6	27.8	654.9	875.4	0.75	0.05	0.0003	0.1851	0.0022	0.0268	0.0003	198.2	13	172.4	1.9	170.7	1.8
27	FJW7-8-7	13.2	269	550.6	0.49	0.0493	0.0003	0.1815	0.0018	0.0267	0.0002	164.9	13	169.4	1.5	169.9	1.4
28	FJW7-8-8	21.4	407.1	783.4	0.52	0.0497	0.0005	0.1837	0.0021	0.0268	0.0002	189	19.4	171.2	1.8	170.6	1.1
29	FJW7-8-9	11.4	246.7	446	0.55	0.0498	0.0006	0.183	0.0028	0.0267	0.0002	183.4	29.6	170.7	2.4	169.7	1.6
30	FJW7-8-10	16.8	358.1	632.5	0.57	0.0499	0.0007	0.1875	0.0039	0.0272	0.0004	187.1	33.3	174.5	3.3	173.2	2.3
31	FJW7-8-11	15	310.5	582.5	0.53	0.05	0.0006	0.1893	0.004	0.0275	0.0005	194.5	25.9	176	3.4	174.7	3
32	FJW7-8-12	16.4	361.5	572	0.63	0.0512	0.0005	0.1918	0.0022	0.0272	0.0002	250.1	19.4	178.2	1.8	173	1.3
33	FJW7-8-13	19.2	411.4	759.3	0.54	0.0497	0.0003	0.1857	0.0013	0.0271	0.0001	189	11.1	173	1.1	172.6	0.9
34	FJW7-8-14	23.6	531.2	804.3	0.66	0.0497	0.0003	0.1877	0.0023	0.0273	0.0002	189	14.8	174.6	2	173.7	1.4
35	FJW7-8-15	17.7	357.4	636.8	0.56	0.0506	0.0003	0.1908	0.0014	0.0274	0.0002	233.4	13	177.4	1.2	174	1
36	FJW7-8-16	40	917.2	1151.6	0.8	0.05	0.0002	0.1859	0.0014	0.027	0.0002	194.5	9.3	173.1	1.2	171.4	1
37	FJW7-8-17	24.6	507.9	954.2	0.53	0.0497	0.0002	0.1867	0.0013	0.0272	0.0002	189	11.1	173.8	1.1	173.3	1
38	FJW7-8-18	7.3	178.7	304	0.59	0.0498	0.0005	0.1849	0.0021	0.0269	0.0002	187.1	24.1	172.3	1.8	171.4	1.1
39	FJW7-8-19	26.6	589.4	992.1	0.59	0.0499	0.0003	0.1862	0.0014	0.0271	0.0002	190.8	11.1	173.4	1.2	172.1	1
40	FJW7-8-20	17.7	356.1	706.7	0.5	0.0496	0.0003	0.1841	0.0015	0.0269	0.0002	189	13	171.6	1.3	171.2	1.1
41	ZSHZK2-9-48-1	28.4	515.4	944.1	0.55	0.0497	0.0006	0.1882	0.0032	0.0274	0.0004	189	27.8	175.1	2.7	174.4	2.5
42	ZSHZK2-9-48-2	26.9	388.9	938.2	0.41	0.0496	0.0008	0.1882	0.0041	0.0275	0.0004	176	37	175.1	3.5	174.6	2.4
43	ZSHZK2-9-48-3	38	984.4	964.7	1.02	0.0498	0.0005	0.187	0.003	0.0272	0.0004	183.4	21.3	174.1	2.5	173.1	2.3
44	ZSHZK2-9-48-4	31.5	677.4	1108.1	0.61	0.0496	0.0006	0.1858	0.0032	0.0271	0.0004	176	30.6	173	2.7	172.5	2.4
45	ZSHZK2-9-48-5	45.4	1128.4	1320.9	0.85	0.0499	0.0006	0.1858	0.0034	0.027	0.0004	190.8	29.6	173	2.9	171.5	2.3
46	ZSHZK2-9-48-6	20.1	415.9	815.2	0.51	0.05	0.0007	0.1879	0.0032	0.0272	0.0004	198.2	31.5	174.8	2.7	173.3	2.6
47	ZSHZK2-9-48-7	26	616.5	1050.4	0.59	0.0496	0.0006	0.1847	0.0031	0.027	0.0004	176	27.8	172.1	2.6	171.6	2.5
48	ZSHZK2-9-48-8	35.8	890	917.5	0.97	0.0495	0.0009	0.1848	0.0044	0.027	0.0004	172.3	40.7	172.2	3.8	171.8	2.5
49	ZSHZK2-9-48-9	24.3	599.6	890.9	0.67	0.0503	0.0006	0.1861	0.0035	0.0268	0.0005	209.3	25.9	173.3	3	170.6	2.9
50	ZSHZK2-9-48-10	25.2	571.9	774.1	0.74	0.0502	0.0007	0.1895	0.0038	0.0274	0.0005	211.2	29.6	176.2	3.3	174.2	2.9

续表 1

序号	样品编号	元素含量/ 10^6				同位素比值				年龄/Ma						
		Pb	Th	U	Tb/U	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		
51	ZSHZK2-9-48-11	23.6	569.9	791.9	0.72	0.0006	0.1855	0.0044	0.0271	0.0006	189	29.6	172.8	3.8	172.4	3.8
52	ZSHZK2-9-48-12	59.6	1543.7	1496.7	1.03	0.0005	0.1879	0.0062	0.027	0.0009	233.4	22.2	174.9	5.3	171.5	5.7
53	ZSHZK2-9-48-13	58	1429.8	1572	0.91	0.0005	0.1869	0.0046	0.0273	0.0006	176	28.7	174	3.9	173.9	4.1
54	ZSHZK2-9-48-14	37.2	840.7	1210	0.69	0.0005	0.1848	0.0045	0.027	0.0006	189	22.2	172.2	3.8	171.8	3.8
55	ZSHZK2-9-48-15	24.1	609.2	733.8	0.83	0.0007	0.1851	0.0053	0.0271	0.0006	172.3	4.6	172.4	4.6	172.3	4
56	ZSHZK2-9-48-16	25.4	572.4	931	0.61	0.0007	0.1877	0.0057	0.0274	0.0008	189	33.3	174.7	4.9	174.5	4.8
57	ZSHZK2-9-48-17	23.2	618.7	708.9	0.87	0.0007	0.1883	0.0055	0.0274	0.0007	190.8	33.3	175.2	4.7	174.3	4.2
58	ZSHZK2-9-48-18	24	562.6	769.5	0.73	0.0007	0.1858	0.0053	0.027	0.0006	190.8	39.8	173.1	4.6	172	4
59	ZSHZK2-9-48-19	32.8	882.7	991.2	0.89	0.0007	0.1831	0.0055	0.0266	0.0007	190.8	26.8	170.7	4.7	169.3	4.1
60	ZSHZK2-9-48-20	35.9	889.8	1240.9	0.72	0.0008	0.1857	0.005	0.027	0.0006	190.8	37	173	4.3	172.1	3.9
61	YS8-21-1	22.3	300.6	848.9	0.35	0.0005	0.195	0.0051	0.0284	0.0007	187.1	24.1	180.9	4.3	180.5	4.5
62	YS8-21-2	35.1	645.2	1376.4	0.47	0.0006	0.1992	0.0055	0.0277	0.0006	287.1	32.4	184.4	4.6	176	3.9
63	YS8-21-3	21.5	321.4	847.5	0.38	0.0011	0.1911	0.0062	0.0274	0.0006	233.4	51.8	177.5	5.3	174.1	4
64	YS8-21-4	23.5	339.5	985.7	0.34	0.0004	0.1862	0.0038	0.0272	0.0005	176	22.2	173.4	3.3	173.2	3.3
65	YS8-21-5	23.2	285.4	848.9	0.34	0.0005	0.19	0.0035	0.0275	0.0004	198.2	22.2	176.6	3	175.1	2.8
66	YS8-21-6	19.7	339.1	859.5	0.39	0.0004	0.1887	0.0032	0.0272	0.0004	209.3	21.3	175.5	2.8	173.3	2.7
67	YS8-21-7	21.1	290.5	744.4	0.39	0.0005	0.1924	0.0041	0.0279	0.0005	198.2	30.5	178.7	3.5	177.3	3.2
68	YS8-21-8	21.9	352.2	923.6	0.38	0.0004	0.1895	0.004	0.0275	0.0005	198.2	20.4	176.2	3.4	174.8	3.4
69	YS8-21-9	26.8	323.6	881.3	0.37	0.0009	0.1957	0.0053	0.0277	0.0006	255.6	40.7	181.5	4.5	176.4	3.6
70	YS8-21-10	22.3	240.3	775.9	0.31	0.0007	0.1875	0.0044	0.0274	0.0006	183.4	31.5	174.5	3.8	174.1	3.5
71	YS8-21-11	13	143.8	523.3	0.27	0.0005	0.1867	0.0042	0.0272	0.0006	183.4	20.4	173.8	3.6	173.1	3.5
72	YS8-21-12	15.5	148.4	597.5	0.25	0.0004	0.1881	0.0038	0.0272	0.0005	198.2	15.7	175	3.3	173.2	3.1
73	YS8-21-13	31.6	620.8	1422.4	0.44	0.0003	0.1872	0.0036	0.0272	0.0005	194.5	8.3	174.2	3.1	173.2	3.3
74	YS8-21-14	10.7	182.4	570.9	0.32	0.0005	0.1931	0.0039	0.0279	0.0005	205.6	22.2	179.3	3.3	177.5	3.1
75	YS8-21-15	31.4	498.5	1257.6	0.4	0.0003	0.1901	0.0039	0.0277	0.0005	183.4	14.8	176.7	3.4	176.4	3.3
76	YS8-21-16	19.2	363.4	781.1	0.47	0.0004	0.1927	0.0037	0.0281	0.0005	190.8	20.4	179	3.2	178.5	3.2
77	YS8-21-17	17.3	313	974.7	0.32	0.0005	0.1948	0.0045	0.0282	0.0006	211.2	22.2	180.8	3.8	179.4	3.7
78	YS8-21-18	23.3	365.2	1025.4	0.36	0.0004	0.1927	0.0039	0.028	0.0005	190.8	18.5	178.9	3.3	178.1	3.1
79	YS8-21-19	16.4	342.5	893.7	0.38	0.0004	0.1909	0.004	0.0278	0.0005	190.8	18.5	177.4	3.4	176.8	3.3
80	YS8-21-20	20.3	325.8	781.2	0.42	0.0005	0.1937	0.0045	0.0282	0.0006	190.8	25.9	179.8	3.8	179.3	3.6

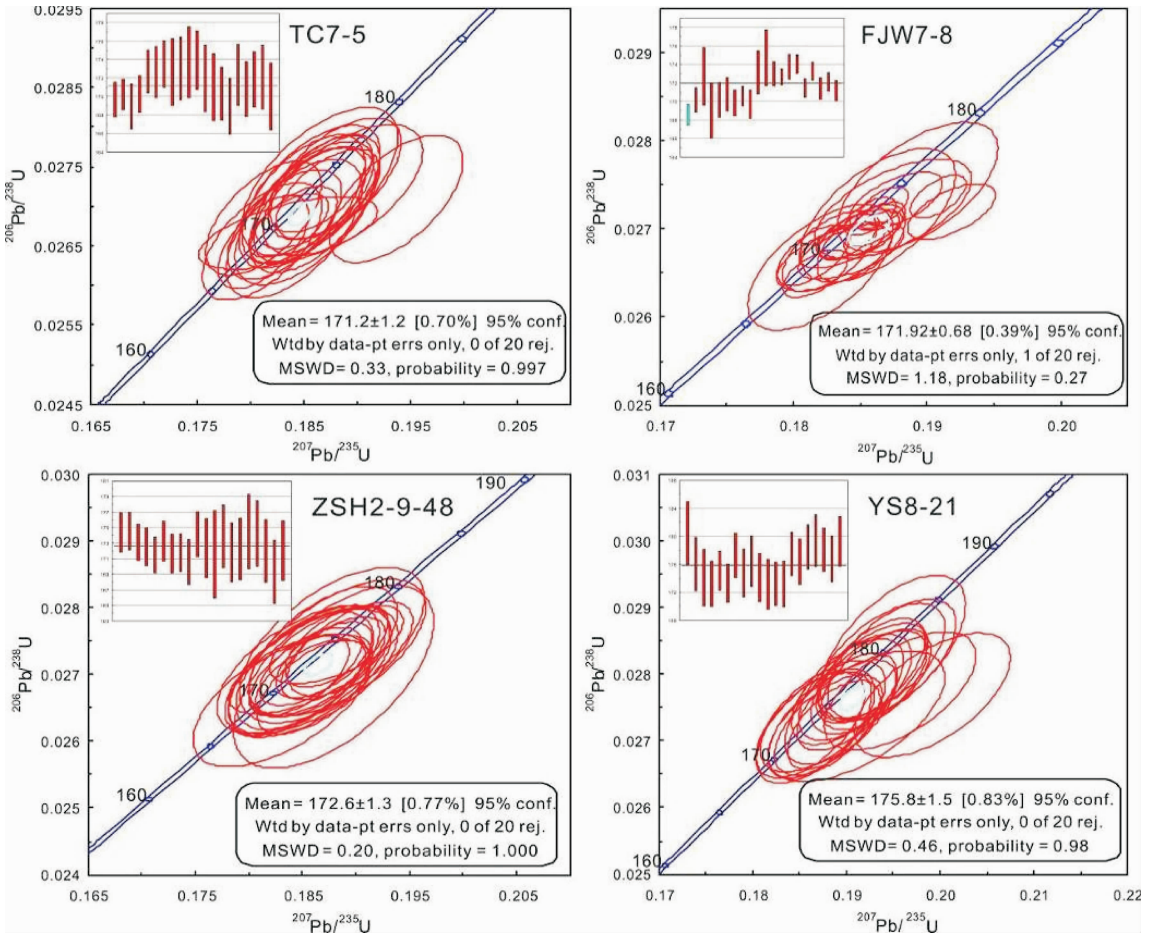


图 4 德兴地区岩浆岩锆石 U-Pb 年龄及谐和图

Fig.4 U-Pb age concordia plots of zircons from magmatic rocks in Dexing area

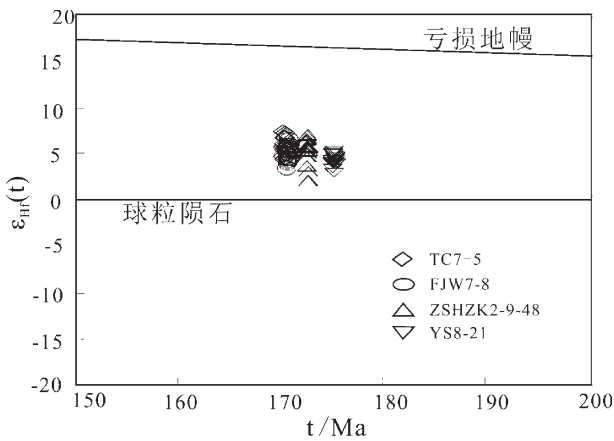


图 5 德兴地区岩浆岩锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ -t 图解图据侯可军和袁顺达^[30]

Fig.5 $\epsilon_{Hf}(t)$ values versus t plot of magmatic rocks in Dexing area

0.282740~0.282819, 平均值为 0.282789, $\epsilon_{Hf}(t)$ 为 2.63~5.44, 平均值为 4.34, T_{DM2} 为 871~1 050 Ma, 平

均值为 941 Ma。

5 讨论

5.1 斑岩体侵位时代与成矿的关系

本文中用于测年的样品——德兴矿集区铜厂、富家坞、朱砂红和银山花岗岩闪长斑岩中的锆石均为典型的岩浆成因锆石(表 1, 图 3), LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为:(171±1.2)Ma (铜厂)、(172±0.68)Ma (富家坞)、(173±1.3)Ma (朱砂红)、(176±1.5)Ma(银山)。这 4 组年龄代表锆石的结晶年龄,即铜厂、富家坞、朱砂红、银山花岗岩闪长斑岩岩体的形成年龄,它们在误差范围内基本一致,表明岩体的形成时代一致,均为中侏罗世的产物。

本文获得的铜厂、富家坞与前人用锆石 U-Pb 法测得的岩体年龄基本一致(表 3)。根据已发表的同位素定年资料, 早先获得铜厂岩体年龄在 165~

表 2 德兴地区岩浆岩 LA-MC-ICP-MS Hf 同位素分析数据
Table 2 LA-MC-ICP-MS Hf isotope analytical data of zircons from magmatic rocks in Dexing area

序号	样号	t/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$f_{\text{Lu/Hf}}$	T_{DM1}/Ma	T_{DM2}/Ma
1	TC7-5-1	169.6	0.025301	0.000832	0.282802	0.000018	1.08	4.71	-0.97	634.3	912.3
2	TC7-5-2	170.2	0.031738	0.001056	0.282808	0.000018	1.26	4.88	-0.97	630.9	902.2
3	TC7-5-3	168.9	0.026179	0.000892	0.282863	0.000017	3.23	6.85	-0.97	549.1	775.7
4	TC7-5-4	170.3	0.027200	0.000904	0.282828	0.000018	1.99	5.62	-0.97	599.2	854.7
5	TC7-5-5	172.7	0.024330	0.000787	0.282797	0.000018	0.88	4.59	-0.98	641.2	922.5
6	TC7-5-6	172.6	0.027609	0.000886	0.282823	0.000017	1.80	5.49	-0.97	606.3	864.8
7	TC7-5-7	173.5	0.030459	0.001001	0.282859	0.000017	3.06	6.76	-0.97	557.6	784.7
8	TC7-5-8	172.7	0.027224	0.000870	0.282853	0.000017	2.86	6.55	-0.97	563.8	797.2
9	TC7-5-9	173.0	0.024498	0.000754	0.282847	0.000019	2.65	6.37	-0.98	570.3	809.4
10	TC7-5-10	173.7	0.030949	0.000944	0.282795	0.000018	0.82	4.53	-0.97	646.5	927.2
11	TC7-5-11	173.9	0.025364	0.000774	0.282822	0.000020	1.78	5.51	-0.98	605.4	864.8
12	TC7-5-12	172.0	0.027358	0.000831	0.282849	0.000021	2.71	6.39	-0.97	569.2	807.0
13	TC7-5-13	171.0	0.025553	0.000776	0.282817	0.000018	1.58	5.24	-0.98	613.5	879.5
14	TC7-5-14	170.3	0.030276	0.000900	0.282808	0.000019	1.28	4.92	-0.97	627.2	899.3
15	TC7-5-15	169.0	0.024716	0.000726	0.282826	0.000020	1.92	5.55	-0.98	599.2	858.6
16	TC7-5-16	172.3	0.029859	0.000963	0.282815	0.000021	1.52	5.20	-0.97	618.8	883.5
17	TC7-5-17	170.8	0.033353	0.000976	0.282797	0.000019	0.87	4.51	-0.97	645.1	926.1
18	TC7-5-18	171.9	0.025902	0.000899	0.282832	0.000022	2.12	5.80	-0.97	593.6	844.9
19	TC7-5-19	172.1	0.035885	0.001243	0.282849	0.000020	2.71	6.35	-0.96	575.4	809.8
20	TC7-5-20	170.0	0.027202	0.000859	0.282811	0.000019	1.38	5.01	-0.97	622.9	893.4
21	FJW7-8-1	168.6	0.033590	0.001060	0.282836	0.000016	2.26	5.85	-0.97	590.7	839.3
22	FJW7-8-2	170.2	0.029217	0.000970	0.282795	0.000019	0.82	4.45	-0.97	646.8	929.2
23	FJW7-8-3	172.7	0.025384	0.000903	0.282823	0.000017	1.81	5.50	-0.97	606.3	864.5
24	FJW7-8-4	169.0	0.027054	0.000903	0.282783	0.000018	0.37	3.98	-0.97	663.7	958.2
25	FJW7-8-5	170.2	0.020683	0.000661	0.282817	0.000017	1.60	5.26	-0.98	610.9	877.9

续表 2

序号	样号	t/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2 σ	$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	f_{Hf}	T_{DM2}/Ma	T_{DM2}/Ma
26	FJW7-8-6	170.7	0.029048	0.000946	0.282807	0.000019	1.24	4.88	-0.97	629.8	902.3
27	FJW7-8-7	169.9	0.031439	0.001005	0.282821	0.000022	1.73	5.35	-0.97	611.1	872.0
28	FJW7-8-8	170.6	0.030380	0.000994	0.282800	0.000018	0.99	4.63	-0.97	640.4	918.3
29	FJW7-8-9	169.7	0.028326	0.000905	0.282821	0.000019	1.75	5.37	-0.97	608.7	870.1
30	FJW7-8-10	173.2	0.034334	0.001105	0.282855	0.000022	2.94	6.62	-0.97	564.2	793.8
31	FJW7-8-11	174.7	0.032038	0.001028	0.282828	0.000019	1.98	5.70	-0.97	601.5	853.4
32	FJW7-8-12	173.0	0.026746	0.000837	0.282826	0.000017	1.92	5.62	-0.97	601.0	857.0
33	FJW7-8-13	172.6	0.031948	0.001002	0.282812	0.000020	1.40	5.08	-0.97	624.2	891.2
34	FJW7-8-14	173.7	0.032666	0.001025	0.282839	0.000019	2.38	6.08	-0.97	585.2	828.1
35	FJW7-8-15	174.0	0.027207	0.000861	0.282805	0.000021	1.15	4.88	-0.97	631.8	905.2
36	FJW7-8-16	171.4	0.031913	0.001007	0.282836	0.000020	2.26	5.91	-0.97	590.0	837.4
37	FJW7-8-17	173.3	0.031995	0.001048	0.282802	0.000019	1.07	4.76	-0.97	638.1	912.0
38	FJW7-8-18	171.4	0.025102	0.000855	0.282807	0.000018	1.23	4.90	-0.97	628.7	902.0
39	FJW7-8-19	172.1	0.032810	0.001159	0.282829	0.000017	2.01	5.66	-0.97	602.3	853.8
40	FJW7-8-20	171.2	0.032195	0.001169	0.282840	0.000019	2.40	6.03	-0.96	586.7	829.4
41	ZSHZK2-9-48-1	174.4	0.037239	0.001225	0.282739	0.000016	-1.16	2.53	-0.96	730.9	1054.7
42	ZSHZK2-9-48-2	174.6	0.030141	0.001058	0.282813	0.000015	1.45	5.16	-0.97	623.3	887.6
43	ZSHZK2-9-48-3	173.1	0.026706	0.001047	0.282817	0.000018	1.60	5.29	-0.97	616.8	878.3
44	ZSHZK2-9-48-4	172.5	0.029488	0.001036	0.282816	0.000016	1.54	5.22	-0.97	619.0	882.4
45	ZSHZK2-9-48-5	171.5	0.021317	0.000759	0.282784	0.000014	0.41	4.09	-0.98	659.5	953.1
46	ZSHZK2-9-48-6	173.3	0.026385	0.000920	0.282852	0.000017	2.82	6.52	-0.97	566.0	799.6
47	ZSHZK2-9-48-7	171.6	0.025551	0.000955	0.282836	0.000019	2.27	5.93	-0.97	588.8	836.3
48	ZSHZK2-9-48-8	171.8	0.024353	0.000878	0.282849	0.000015	2.74	6.41	-0.97	568.8	805.6
49	ZSHZK2-9-48-9	170.6	0.030333	0.001097	0.282839	0.000023	2.38	6.00	-0.97	586.6	831.0
50	ZSHZK2-9-48-10	174.2	0.023582	0.000824	0.282802	0.000015	1.04	4.77	-0.98	635.5	911.7
51	ZSHZK2-9-48-11	172.4	0.021597	0.000733	0.282795	0.000015	0.83	4.53	-0.98	642.5	925.9

续表 2

序号	样号	年龄/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	f_{DMT}	T_{DMT}/Ma	T_{DMT}/Ma
52	ZSHZK2-9-48-12	171.5	0.034224	0.001199	0.282758	0.000019	-0.48	3.15	-0.96	703.2	1013.1
53	ZSHZK2-9-48-13	173.9	0.045749	0.001817	0.282714	0.000025	-2.04	1.57	-0.95	778.8	1115.5
54	ZSHZK2-9-48-14	171.8	0.034490	0.001311	0.282802	0.000071	1.06	4.68	-0.96	643.3	915.9
55	ZSHZK2-9-48-15	172.3	0.025211	0.000921	0.282794	0.000023	0.77	4.44	-0.97	648.3	931.4
56	ZSHZK2-9-48-16	174.5	0.037520	0.001351	0.282814	0.000018	1.50	5.18	-0.96	626.0	886.3
57	ZSHZK2-9-48-17	174.3	0.029289	0.001112	0.282809	0.000019	1.32	5.02	-0.97	629.5	896.5
58	ZSHZK2-9-48-18	172.0	0.020385	0.000673	0.282839	0.000017	2.38	6.08	-0.98	580.0	826.9
59	ZSHZK2-9-48-19	169.3	0.030653	0.001029	0.282835	0.000018	2.22	5.82	-0.97	591.9	841.3
60	ZSHZK2-9-48-20	172.1	0.029120	0.001097	0.282812	0.000017	1.41	5.07	-0.97	625.3	891.5
61	YS8-21-1	180.5	0.031015	0.001126	0.282772	0.000019	0.02	3.85	-0.97	681.8	975.6
62	YS8-21-2	176.0	0.035257	0.001135	0.282810	0.000014	1.34	5.08	-0.97	628.8	894.0
63	YS8-21-3	174.1	0.035124	0.001104	0.282813	0.000015	1.47	5.16	-0.97	623.2	886.9
64	YS8-21-4	173.2	0.038786	0.001178	0.282780	0.000014	0.29	3.96	-0.96	671.8	962.9
65	YS8-21-5	175.1	0.034319	0.001071	0.282775	0.000013	0.10	3.82	-0.97	677.4	973.0
66	YS8-21-6	173.3	0.015095	0.000505	0.282785	0.000013	0.48	4.22	-0.98	652.6	946.1
67	YS8-21-7	177.3	0.031816	0.000989	0.282795	0.000014	0.81	4.59	-0.97	647.6	926.0
68	YS8-21-8	174.8	0.042857	0.001262	0.282819	0.000013	1.64	5.34	-0.96	618.7	876.4
69	YS8-21-9	176.4	0.030431	0.000955	0.282802	0.000014	1.06	4.83	-0.97	637.0	910.3
70	YS8-21-10	174.1	0.036622	0.001177	0.282783	0.000014	0.40	4.09	-0.96	667.3	955.3
71	YS8-21-11	173.1	0.027272	0.000868	0.282810	0.000014	1.36	5.06	-0.97	623.8	892.8
72	YS8-21-12	173.2	0.029608	0.000962	0.282776	0.000015	0.14	3.84	-0.97	673.9	970.8
73	YS8-21-13	173.2	0.042710	0.001360	0.282758	0.000014	-0.50	3.15	-0.96	707.0	1014.5
74	YS8-21-14	177.5	0.027580	0.000916	0.282795	0.000017	0.83	4.62	-0.97	645.7	924.3
75	YS8-21-15	176.4	0.029016	0.000889	0.282740	0.000017	-1.14	2.63	-0.97	723.7	1049.9
76	YS8-21-16	178.5	0.034508	0.001118	0.282789	0.000017	0.60	4.39	-0.97	658.3	939.6
77	YS8-21-17	179.4	0.027301	0.000915	0.282771	0.000016	-0.03	3.80	-0.97	680.0	977.9
78	YS8-21-18	178.1	0.030165	0.001040	0.282798	0.000017	0.93	4.72	-0.97	643.7	918.3
79	YS8-21-19	176.8	0.028350	0.000998	0.282819	0.000015	1.68	5.44	-0.97	613.1	871.2
80	YS8-21-20	179.3	0.036556	0.001216	0.282781	0.000016	0.33	4.13	-0.96	670.7	956.8

注: $\epsilon_{\text{Hf}}(0) = ((^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} / (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} - 1) \times 10000$, $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = ((^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} \times (e^{\lambda t} - 1)) / ((^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} \times (e^{\lambda t} - 1)) \times 10000$, $f_{\text{DMT}} = ((^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} / (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DMT}} - (T_{\text{DMT}} - t)) / ((^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DMT}})$, $T_{\text{DMT}} = T_{\text{DMT}} - (T_{\text{DMT}} - t) \times ((^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} / ((^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DMT}}))$. 其中, $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}}$ 和 $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DMT}}$ 为样品测定值, f_{c} , f_{t} 和 f_{DMT} 分别为大陆地壳、样品和亏损地幔的 $f_{\text{Lu/Hf}}$, $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} = 0.0332$, $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} = 0.282772$, $f_{\text{c}} = -0.55$, $f_{\text{t}} = -0.16$ 为样品形成时间, $\lambda = 1.867 \times 10^{-11} \text{a}^{-1}$ [34].

184 Ma, 银山矿床火山岩年龄范围较大, 在 138~181 Ma, 这些测年方法多为传统的 K-Ar 方法, 所得年龄多数较为年轻, 应解释为火山岩冷却至 Ar 封闭温度年龄。近期, 王强等(2004)^[8]获得的铜厂和富家坞含矿斑岩锆石 U-Pb 年龄均为 171 Ma; Wang(2012)^[12]测得银山矿区与成矿有关的各斑岩体年龄为 166~176 Ma(表 3), 与本文所测得的 4 个矿区的花岗闪长斑岩体锆石 U-Pb 高精度定年结果几乎在仪器分析误差范围内相同, 由此可以看出, 德兴矿集区岩浆活动持续时间较长, 岩体是中侏罗世时期的花岗质岩

浆侵入形成的。

铜厂、富家坞和朱砂红辉钼矿 Re-Os 年龄分别为 171 Ma、171 Ma 和 169 Ma, 均为中侏罗世产物^[9-11](表 3)。银山矿床与铜金有关的成矿作用的年龄为 175~180 Ma, 与铅锌银矿化有关的成矿作用则发生在 175 Ma 左右, 后者晚于前者, 也是中侏罗世的产物^[13]。4 个矿区的成矿年龄在误差范围内一致, 表明铜厂、富家坞、朱砂红铜钼金矿床和银山银铜铅锌矿床应是同一期成矿作用形成, 属于中侏罗世产物。这些成矿年龄数据与本文所获得的岩体侵位年

表 3 德兴矿集区主要年龄数据对比

Table 3 Comparison of main ages in the Dexing ore concentration area

序号	矿区	测定对象	方法	年龄/Ma	资料来源
1	铜厂	含矿斑岩/全岩	K-Ar 法	168	[3]
2	铜厂	含矿斑岩/全岩	Rb-Sr 等时线	172	[3]
3	铜厂	含矿斑岩/全岩	Rb-Sr 等时线	179	[4]
4	铜厂	含矿斑岩/全岩	Rb-Sr 等时线	184	[5]
5	铜厂	含矿斑岩/全岩	Rb-Sr 等时线	165	[6]
6	铜厂	含矿斑岩/锆石	SHRIMP 锆石 U-Pb	171	[8]
7	铜厂	花岗闪长斑岩/锆石	LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb	171	本文
8	铜厂	花岗闪长斑岩/锆石	LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb	171	[18]
9	铜厂	辉钼矿/矿石/辉钼矿	Re-Os 等时线	173	[10]
10	铜厂	辉钼矿/矿石/辉钼矿	Re-Os 等时线	171	[9]
11	富家坞	含矿斑岩/锆石	SHRIMP 锆石 U-Pb	171	[8]
12	富家坞	辉钼矿/矿石/辉钼矿	Re-Os 等时线	171	[9]
13	富家坞	花岗闪长斑岩/锆石	LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb	172	本文
14	富家坞	花岗闪长斑岩/锆石	LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb	170	[18]
15	富家坞	辉钼矿/矿石/辉钼矿	Re-Os 等时线	171	[18]
16	朱砂红	辉钼矿/矿石/辉钼矿	Re-Os 等时线	169	[9]
17	朱砂红	花岗闪长斑岩/锆石	LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb	173	本文
18	朱砂红	花岗闪长斑岩/锆石	LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb	170	[18]
19	银山	绢云母	³⁹ Ar/ ⁴⁰ Ar	175~180	[13]
20	银山	火山-次火山岩	全岩 Rb-Sr	164	[23]
21	银山	安山斑岩/伊利石	K-Ar	104.0	[7]
22	银山	千枚岩/伊利石	K-Ar	130.3~133.4	[7]
23	银山	英安斑岩/伊利石	K-Ar	122.4~124.8	[7]
24	银山	花岗闪长斑岩/锆石	LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb	176	本文
25	银山	英安斑岩/锆石	LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb	170	[12]
26	银山	石英斑岩/锆石	LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb	172	[12]
27	银山	安山斑岩/锆石	LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb	166	[12]
28	银山	火山岩/锆石	LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb	176	[12]

龄(171~176 Ma)在误差范围内一致,充分说明了岩体的侵位与矿床形成的同时性。德兴矿集区各矿床的主成矿作用与斑岩体侵位基本同时,均发生在中侏罗世早期阶段。

5.2 物质来源

锆石极强的稳定性使其 Hf 同位素组成较少受到后期地质事件的影响,极低的 Lu 含量可以获得锆石形成时准确的 Hf 同位素组成。这些特性使锆石的 Hf 同位素成为目前探讨地壳演化和示踪岩石源区的重要工具^[34]。当锆石初始 ε_{Hf} 值为正值,说明岩体在形成时有较多幔源或是新生地壳物质的加入,而初始值 ε_{Hf} 偏负值,说明岩体形成时壳源物质成分占主导地位^[35]。通常高的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值是较多幔源组分参与成岩的标志,显示在成岩过程中有地幔组分的参与,且锆石具有较高的 Hf 含量, Lu 含量却极低,反应了壳幔分异、地壳形成的时代^[36]。

本文 4 件样品的 $f_{\text{Lu/Hf}}$ 值在 -0.95~-0.98, 明显小于镁铁质地壳的 $f_{\text{Lu/Hf}}$ (-0.34) 和硅铝质地壳的 $f_{\text{Lu/Hf}}$ (-0.72)^[37], 故二阶段模式年龄更能反映其源区物质从亏损地幔被抽取的时间 (或其源区物质在地壳的平均存留年龄)。分析结果显示, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 的平均比值变化范围小 (0.282 789~0.282 825), 表明所测样品锆石中的 Hf 同位素分布很均一, 指示单一岩浆源区; 所有分析点具有正的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 (平均值在 4.34~5.54), 二阶段模式年龄平均值介于 861~941 Ma。在 $t-\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 图解(图 5)中, 4 个矿区的数据点均落在球粒陨石与亏损地幔之间, 介于幔、壳两种端员组分之间, 具有幔源 Hf 同位素组成的特征, 表明花岗闪长斑岩的成岩源区具亏损岩浆源区的特征。因此, 德兴矿集区的花岗闪长斑岩的岩浆源区主要来源于亏损地幔的组分, 但在岩浆侵位过程中遭受了古老地壳物质的混染。同时, 该矿集区锆石的 Nb/Ta 比值为 12.28~17.60, 平均值为 14.68, Zr/Hf 比值变化范围为 33.26~39.77, 平均值为 37.06, 接近于上地幔的 Zr/Hf 比值, 也表明德兴矿集区花岗闪长斑岩可能是由较多的幔源物质加入。

对德兴铜矿床区域地质、矿床地质、地球化学、Rb-Sr 等时线法定年以及 S、O 等稳定同位素的研究, 认为岩浆岩的形成与古太平洋板块俯冲有关, 来源于上地幔的熔融, 之后被地壳物质所混染^[3-4]。元素地球化学数据显示, 铜厂和富家坞花岗闪长斑岩物源相同, 主要来自富集大离子亲石元素的原始地

幔, 并且德兴矿集区的中酸性岩体是深部岩浆结晶分异作用的结果。深部岩浆的结晶分异作用可能是德兴岩浆岩的主要成因^[38]。斑岩体的 Nd 同位素相对稳定, 初始 ε_{Nd} 变化在 -0.76~-3.60, 岩浆系壳-幔混合来源^[6], 芮宗瑶等^[39]认为德兴斑岩铜矿岩浆主要来源上地幔或者下地壳。银山斑岩体系是壳-幔源过渡型同熔岩浆。另外, 稀土地球化学研究表明, 银山岩体是地幔的深部岩浆同化混染了部分硅铝壳物质形成的混源岩浆的产物^[40]。此外, 成矿母岩(英安斑岩)的稀土模式、初始 Sr 同位素比值和化学成分表明, 该岩浆主要来自上地幔或下地壳, 为大陆拉斑玄武岩岩浆系列演化分异的产物^[41]。德兴岩体的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值小于 0.7060, 成矿岩体的源区为壳幔混合源, 不同于壳源的酸性岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} > 0.7060$ ^[3]。银山地区 Sr 同位素初始比值变化比较大 (0.7043~0.7113), 可以解释为带状岩浆房不同成分分带所致, 而斑岩中磷灰石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为 0.7046 反映原始岩浆仍具有低初始比值的特点^[23], 表明其可能是亏损地幔部分熔融的产物。

结合已有的同位素年代学和地球化学资料可以看出, 幔源物质在德兴矿集区花岗质岩体的形成过程中发挥了重要作用。

德兴铜矿成矿物质主要来源于母岩岩浆也被众多学者所接受和证实^[3,4,6,8,42]。对铜厂和富家坞矿区样品中 C、Si、Cu 等同位素的分析研究表明德兴铜矿成矿物质主要来自花岗闪长斑岩岩体, 可能少部分来自围岩^[43]。银山矿床铅同位素组成及其演化是复杂的, 成矿物质直接来源有火成岩和地层共同的贡献, 初始物质来源是地幔来源和结晶基底来源^[44-45]。H、O、C、S、Pb 和 Sr 同位素表明, 其成矿流体和成矿物质主要来自于岩浆^[45]。

此外, 德兴铜矿成岩和成矿时代的一致性, 或许也暗示成矿物质主要来源于岩体, 即成矿物质来源于上地幔或壳幔熔融体。

5.3 区域岩浆活动与成矿作用

成矿作用在时间上和空间上与岩浆活动密切相关, 成矿好的岩体往往是岩浆多次活动侵入的岩体, 同时成矿作用与深部岩浆作用密切相关。德兴矿集区的成矿作用与燕山期构造-岩浆活动有着成因上的密切联系。铜厂、富家坞、朱砂和银山的花岗闪长斑岩等次火山岩都是燕山期岩浆活动的产物, 德兴地区的铜厂、富家坞等斑岩铜铅金矿及银山银铜铅

锌多金属矿床与岩浆活动的密切关系,已经是矿床学界的共识。德兴斑岩铜矿是由岩浆晚期-期后热流体多次成矿作用叠加而形成的浅成热液铜钼金矿床,是典型的岩浆期后浅成中温热液矿床^[3-4]。关于银山银铜铅锌矿床的成因和成矿作用,长期以来比较流行的观点认为矿床属于火山-岩浆热液成因,并且成矿与英安斑岩有关^[46-48]。银山多金属矿床被很多研究者认为是相当于德兴斑岩铜矿体系的浅部的产物^[23]。总体上讲,燕山期的含矿岩浆活动是德兴矿集区内生金属成矿最基本的地质条件。

区域上,整个中国东部地区在中生代尤其是燕山期发生了大规模的金属成矿作用,形成了一大批重要矿床^[49-52],成矿作用在时间上可以分为晚三叠世、中晚侏罗世和白垩纪 3 个成矿高峰^[52-54]。毛景文等(2012)在总结大量前人资料和野外观察的基础上,提出华南地区中生代金属矿床年龄分为 3 个时期,分别是晚三叠世(230~210 Ma)、中晚侏罗世(170~150 Ma)和早白垩世(120~80 Ma)。德兴矿集区成矿时代在 170~175 Ma,是这 3 次成矿作用中的第 2 次成矿作用的产物。

在 180~170 Ma 时,华南地区处于局部伸展环境^[13,56],板内岩浆作用和岛弧岩浆作用的结合是华南燕山期活动大陆边缘伸展增生造山的最重要特点。伸展应力体制贯穿于整个晚中生代,全部燕山期花岗质岩石都在伸展构造环境中形成^[57]。华南地区中、新生代各种类型的花岗质岩浆活动都是壳-幔相互作用的产物,其形成的构造动力学环境不是以挤压为主,而是不同程度的伸展、拉张。正是由于地幔物质在不同程度上、不同形式的参与,才引起华南地区中、新生代大规模的岩浆活动,并促成了该地区丰富多彩的大规模金属成矿作用^[1]。此时,德兴地区在局部伸展环境下,来自深源高氧化度的高钾钙碱质花岗岩侵入^[58],形成了斑岩铜金钼矿-浅成低温热液型银铜铅锌多金属矿床。

6 结 论

(1) 德兴矿集区花岗闪长斑岩的 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 的 4 组年龄分别为:(171±1.2)Ma(铜厂)、(172±0.68)Ma(富家坞)、(173±1.3)Ma(朱砂红)、(176±1.5)Ma(银山),代表锆石的结晶年龄,对应铜厂、富家坞、朱砂红、银山花岗闪长斑岩岩体的形成年龄。4 个矿区岩体侵位年龄在误差范围

内基本一致,表明侵入体的形成时代一致,均为中侏罗世产物。德兴矿集区 4 个矿床成岩成矿在同一时期发生,为同一构造事件的产物。

(2) 锆石 Hf 同位素组成显示,德兴矿集区 4 个矿床的花岗闪长斑岩岩体的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 的平均比值为 0.282 789~0.282 825, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 平均值为 4.34~5.54,与亏损地幔地球化学储库的 Hf 同位素特征较为相似,表明本区花岗闪长斑岩的源区可能具亏损地幔特征,幔源物质对于该区成岩成矿具有重要作用。

(3) 德兴地区在局部伸展环境下,来自深源高氧化度的钙碱质花岗岩侵入,形成了斑岩铜金钼矿-浅成低温热液型银铜铅锌多金属矿床。

致谢:野外工作期间,得到江西地矿局黄水保处长、德兴黄金矿管局裔刚局长、曾智勇副局长、江铜集团的程乐晃总工程师的鼓励与支持;资料收集、镜下鉴定及作图过程中得到了刘妍副研究员、王强和王彩同学的帮助;成文过程中得到毛景文研究员、袁顺达副研究员及张东阳博士的指导;两位审稿专家对本文初稿进行了细致认真地审阅,并提出了相当中肯、有益的建议,在此一并表示衷心的感谢。

参考文献(References):

- [1] 华仁民,陈培荣,张文兰,等. 华南中、新生代与花岗岩类有关的成矿系统[J]. 中国科学(D 辑), 2003, 33:335-343.
Hua Renmin, Chen Peirong, Zhang Wenlan, et al. Metallogenic systems related to Mesozoic and Cenozoic granitoids in South China [J]. Science in China(Series D), 2003, 33:335-343(in Chinese).
- [2] 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.
Mao Jingwen, Chen Mihong, Yuan Shunda, et al. South China and spatial-temporal distribution regularity of mineral deposits [J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85 (5):636-658 (in Chinese with English abstract).
- [3] 朱训,黄崇柯,芮宗瑶,等. 德兴斑岩铜矿[M]. 北京:地质出版社, 1983:1-336.
Zhu Xun, Huang Chongke, Rui Zongyao, et al. Dexing Porphyry Cu Deposits[M]. Beijing:Geological Publishing House, 1983:1-336 (in Chinese).
- [4] 芮宗瑶,黄崇柯,齐国明,等. 中国斑岩铜(钼)矿床[M]. 北京:地质出版社, 1984:1-350.
Rui Zongyao, Huang Chongke, Qi Guoming, et al. Porphyry Copper (molybdenum) Deposits of China [M]. Beijing:Geological Publishing House, 1984:1-350(in Chinese).
- [5] 华仁民,李晓峰,陆建军,等. 德兴大型铜金矿集区构造环境和成矿流体研究进展[J]. 地球科学进展, 2000, 15(5):525-533.
Hua Renmin, Li Xiaofeng, Lu Jianjun, et al. Study on the tectonic

- setting and ore-forming fluids of Dexing large ore-concentrating area, northeast Jiangxi Province[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2000, 15(5):525-533(in Chinese with English abstract).
- [6] 金章东, 朱金初, 李福春. 德兴斑岩铜矿成矿过程的氧、锶、钕同位素证据[J]. *矿床地质*, 2002, 21(4):341-349.
- Jin Zhangdong, Zhu Jingchu, Li Fuchun. O, Sr and Nd isotopic tracing of ore-forming process in Dexing porphyry copper deposit, Jiangxi Province [J]. *Mineral Deposits*, 2002, 21 (4):341-349 (in Chinese with English abstract).
- [7] Li Xiaofeng, Wang Chunzeng, Mao Jingwen, et al. Kübler index and K-Ar ages of illite in the Yinshan polymetallic deposit, Jiangxi Province, South China: Analyses and implications [J]. *Resour. Geol.*, 2005, 55(4):397-404.
- [8] 王强, 赵振华, 简平, 等. 德兴花岗岩闪长斑岩 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.
- Wang Qiang, Zhao Zhenhua, Jian Ping, et al. SHRIMP zircon geochronology and Nd-Sr isotopic geochemistry of the Dexing granodiorite porphyries [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20 (2): 315-324(in Chinese with English abstract).
- [9] Guo Shuo, Zhao Yuanyi, Qu Huanchun, et al. Geological Characteristics and Ore-forming Time of the Dexing Porphyry Copper Ore Mine in Jiangxi Province [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(3):691-699.
- [10] 毛景文, 胡瑞忠, 陈毓川, 等. 大规模成矿作用与大型矿集区[M]. 北京: 地质出版社, 2006:560-570.
- Mao Jingwen, Hui Ruizhong, Chen Yuchuan, et al. Large Scale Metallogenesis and Large Ore Concentration Area [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006:560-570(in Chinese).
- [11] Lu Jianjun, Hua Renmin and Yao Chunliang. Re-Os age for molybdenite from the Dexing porphyry Cu-Au deposit of Jiangxi Province, China[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta(S)*, 2005, 69(10): 882.
- [12] Wang Guoguang, Ni Pei, Zhao Kuidong, et al. Petrogenesis of the Middle Jurassic Yinshan volcanic-intrusive complex, SE China: Implications for tectonic evolution and Cu-Au mineralization [J]. *Lithos*, 2012, 150:135-154.
- [13] 李晓峰, 陈文, 毛景文, 等. 江西银山多金属矿床蚀变绢云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄及其地质意义[J]. *矿床地质*, 2006, 26(1):1-10.
- Li Xiaofeng, Chen Wen, Mao Jingwen, et al. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of sericite from altered dacite porphyry and quartz porphyry in Yinshan polymetallic deposit of Jiangxi Province and its geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 2006, 26(1):1-10(in Chinese with English abstract).
- [14] 王彦斌, 韩娟, 曾普胜, 等. 云南德钦羊拉大型铜矿区花岗岩闪长岩的锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及其地质意义 [J]. *岩石学报*, 2010, 26(6):1833-1844.
- Wang Yanbin, Han Juan, Zeng Pusheng, et al. U-Pb dating and Hf isotopic characteristics of zircons from granodiorite in Yangla copper deposit, Deqin County, Yunnan, Southwest China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26 (6):1833-1844 (in Chinese with English abstract).
- [15] 祁昌实, 邓希光, 李武显, 等. 桂东南大容山-十万大山 S 型花岗岩带的成因: 地球化学及 Sr-Nd-Hf 同位素制约 [J]. *岩石学报*, 2007, 23(2):403-412.
- Qi Changshi, Deng Xiguang, Li Wuxian, et al. Origin of the Darongshan-Shiwandashan S-type granitoid belt from southeastern Guangxi: geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(2):403-412 (in Chinese with English abstract).
- [16] 刘敏, 赵志丹, 管琪, 等. 西藏聂荣微陆块早侏罗世中期花岗岩及其包体的岩浆混合成因: 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年和 Hf 同位素证据 [J]. *岩石学报*, 2011, 27(7):1931-37.
- Liu Min, Zhao Zhidan, Guan Qi, et al. Tracing magma mixing genesis of the middle Early-Jurassic host granites and enclaves in Nyainrong microcontinent, Tibet from zircon LA-ICP-MS U-Pb dating and Hf isotopes [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(7): 1931-1937(in Chinese with English abstract).
- [17] 吴祥珂, 孟繁聪, 许虹, 等. 青海祁漫塔格玛尔东大坂晚三叠世花岗岩年代学、地球化学及 Nd-Hf 同位素组成 [J]. *岩石学报*, 2011, 27(11):3380-3394.
- Wu Xiangke, Meng Fanchong, Xu Hong, et al. Zircon U-Pb dating geochemistry and Nd-Hf isotopic compositions of the Mxingdaban Late Triassic granitic pluton from Qimantag in the eastern Kunlun [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(11):3380-3394 (in Chinese with English abstract).
- [18] 周清. 德兴斑岩铜矿含矿斑岩成因及成矿机制(学位论文)[D]. 南京: 南京大学, 2011.
- Zhou Qing. Petrogenesis and metallogeny for the Dexing porphyry copper deposit (Degree of Doctor of Philosophy) [D]. Nanjing: Nanjing University, 2011(in Chinese with English abstract).
- [19] 张松, 王永彬, 褚少雄. 华北克拉通北缘东段海沟岩体的锆石 U-Pb 年龄、Sr-Nd-Hf 同位素组成及其动力学背景 [J]. *岩石学报*, 2012, 28(2):0544-0556.
- Zhang Song, Wang Yongbin, Chu Shaoxiong. Zircon U-Pb ages and Sr-Nd-Hf isotopic composition of the Haigou granitoids at the northeastern margin of North China Craton: Implications for geodynamic setting [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(2):0544-0556(in Chinese with English abstract).
- [20] 王翠云, 李晓峰, 肖荣, 等. 德兴铜厂斑岩铜矿脉体类型、分布规律及其对成矿的指示意义 [J]. *矿床地质*, 2012, 31(1):94-110.
- Wang Cuiyun, Li Xiaofeng, Xiao Rong, et al. Types and distribution of veins in Tongchang porphyry copper deposit, Dexing, Jiangxi Province [J]. *Mineral Deposits*, 2012, 31 (1):94-110.
- [21] Mao Jingwen, Zhang Jiandong, Pirajno F, et al. Porphyry Cu-Au-Mo-epithermal Ag-Pb-Zn-distal hydrothermal Au deposits in the Dexing area, Jiangxi Province, East China-A linked ore system [J]. *Ore Geology Review*, 2011, 43(1):203-216.
- [22] 黄定堂. 江西银山铜多金属矿床地质特征及其成因分析 [J]. *江西*

- 地质, 2001, 15(2):102-105.
- Huang Dingtang. Geological Characteristics and Genesis of the Yinshan Copper-polymetal Deposit of Jiangxi [J]. *Jiangxi Geology*, 2001, 15(2):102-105(in Chinese with English abstract).
- [23] 江西银山铜铅锌金银矿床编写组. 江西银山铜铅锌金银矿床[M]. 北京:地质出版社, 1996, 1-380.
- The Compiling Group of Cu, Pb, Zn Au and Ag deposits in Yinshan Jiangxi. The Cu, Pb, Zn Au and Ag Deposits in Yinshan Jiangxi [M]. Beijing:Geological Publishing House, 1996:1-380(in Chinese).
- [24] Nasdala L, Norberg N, S chaltegger U, et al. Zircon M 257: A homogeneous natural reference material for the ion microprobe U-Pb analysis of zircon [J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 2008, 32:247-265.
- [25] Liu M, Zhao Z D, Guan Q, et al. Tracing magma mixing genesis of the middle Early-Jurassic host granites and enclaves in Nyainrong microcontinent, Tibet from zircon LA-ICP-MS U-Pb dating and Hf isotopes [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(7): 1931-1937.
- [26] 侯可军, 李延河, 田有荣. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术[J]. *矿床地质*, 2009, 28(4):481-492.
- Hou Kejun, Li Yanhe, Tian Yourong. In situ U-Pb zircon dating using laser ablation-multi ion counting-ICP-MS [J]. *Mineral Deposits*, 2009, 28(4):481-492(in Chinese with English abstract).
- [27] 侯可军, 李延河, 邹天人, 等. LA-MS-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析法及其地质应用[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).
- [28] 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: 231-23.
- [29] Hoskin P W O, Black L P. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolithigneous zircon [J]. *J. Metamorph. Geo.*, 2000, 18:423-439.
- [30] 侯可军, 袁顺达. 宁芜盆地火山-次火山岩的锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及其地质意义 [J]. *岩石学报*, 2010, 26 (3):888-902.
- Hou Kejun, Yuan Sunda. Zircon U-Pb age and Hf isotopic composition of the volcanic and sub-volcanic rocks in the Ningwu basin and their geological implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(3):888-902(in Chinese with English abstract).
- [31] Blichert-Toft J, Albarede F. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1997, 148:243-258.
- [32] 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, 61:237-269.
- [33] Griffin WL, Pearson NJ, Belousova, E, et al. The isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. *Geochim [J]. Cosmochim. Acta*, 2000:133-147.
- [34] Soderlund U, Patehett 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 Planet. Sci.*, 2004, 219: 311-324.
- [35] Kinny P D, Mass R. Lu-Hf and Sm-Nd isotope systems in zircon [C]//Hanchar J M, Hanchar J M, Hoskin P W O (eds.). *Zircon. Rev. Mineral. Geochem.*, 2003, 53:327-341.
- [36] 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. Lu-Hf isotope systematics and their applications in petrology [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(2):185-220(in Chinese with English abstract).
- [37] Amelin Y, Lee D C, Halliday, et al. Nature of the Earth's earliest crust from Hafnium isotopes in single detrital zircons [J]. *Nature*, 1999, 399:252-255.
- [38] 钱鹏, 陆建军. 德兴铜矿花岗闪长斑岩物质来源的微量元素研究 [J]. *地质找矿论丛*, 2005, 20 (2):75-79.
- Qian Peng, Lu Jianjun. The material resources of granodiorite porphyry in the copper ore district: a study on trace elements [J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 2005, 20(2):75-79(in Chinese with English abstract).
- [39] 芮宗瑶, 张立生, 陈振宇. 斑岩铜矿的源岩或源区探讨 [J]. *岩石学报*, 2004, 20(2):229-238.
- Rui Zongyao, Zhang Lisheng, Chen Zhengyu, et al. Approach on source rock or source region of porphyry copper deposits [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20 (2):229-238 (in Chinese with English abstract).
- [40] 林德松, 杨斌. 江西银山矿床岩石稀土地球化学研究 [J]. *矿产与地质*, 1991, 5(5):349-355.
- Lin Desong, Yang Bin. Study on the REE at litho-geochemistry of the Yinshan deposit at Dexing, Jiangxi Province [J]. *Mineral Resources and Geology*, 1991, 5 (5):349-355 (in Chinese with English abstract).
- [41] 蒋兴焯. 江西银山多金属矿床的成矿物质来源 [J]. *桂林冶金地质学院学报*, 1992, 12(1):41-49.
- Jiang Xingxuan. On the origin Yinshan polymetallic deposit, Jiangxi [J]. *Journal of Guilin College of Geology*, 1992, 12(1):41-49(in Chinese with English abstract).
- [42] 钱鹏, 陆建军, 姚春亮. 德兴斑岩铜矿成矿流体演化与来源的流体包裹体研究 [J]. *南京大学学报(自然科学版)*, 2003, 39(3):319-326.
- Qian Peng, Lu Jianjun, Yao Chunliang. Origin and evolution of ore-forming fluids of the Dexing porphyry copper deposit, Eastern China: fluid inclusion study [J]. *Journal of Nanjing University (Natural sciences)*, 2003, 39(3):319-326(in Chinese with English abstract).

- [43] 钱鹏, 陆建军, 刘凤香. 江西德兴斑岩铜矿成矿物质来源同位素示踪[J]. 世界地质, 2006, 25(2):135-140.
Qian Peng, Lu Jianjun, Liu Fengxiang. Isotopic tracing of ore-forming source materials in the porphyry copper deposit of Dexing, Jiangxi Province [J]. Global Geology, 2006, 25 (2):135-140 (in Chinese with English abstract).
- [44] 沈渭洲, 陈繁荣, 刘昌实, 等. 江西银山多金属矿床的稳定同位素研究[J]. 南京大学学报(地球科学), 1991, 2:186-193.
Shen Weizhou, Chen Fanrong, Liu Changshi, et al. A study on stable isotopic feature of Yinshan multi-metallic deposit, Jiangxi Province [J]. Journal of Nanjing University (Earth Science), 1991, 2:186-193 (in Chinese with English abstract).
- [45] 杨子江. 江西银山火山-次火山-斑岩成矿体系稀土元素地球化学[J]. 有色金属矿产与勘查, 1994, 3(5):257-264.
Yang Zijiang. The Ree Geochemistry of the Volcano-subvolcano-porphyry Mineralization System in the Yinshan Ore Deposit [J]. Geological Exploration for Non-ferrous Metals, 1994, 3 (5):257-264(in Chinese with English abstract).
- [46] 华仁民. 江西银山铅锌铜矿化机制讨论 [J]. 矿床地质, 1987, 6(2):90-96.
Hua Renmin. A discussion on the mechanism of lead,zinc and copper metallogenesis in Yinshan,Jiangxi Province [J]. Mineral Deposits, 1987, 6(2):90-96(in Chinese with English abstract).
- [47] 李晓峰, 华仁民, 韦星林, 等. 江西德兴金山金矿[M]. 北京:地质出版社, 2011, 13-14.
Li Xiaofeng, Hua Renmin, Wei Xinglin, et al. The Gold Deposit in Jinshan at Dexing,Jiangxi Province [M]. Beijing:Geological Publishing House, 2011, 13-14(in Chinese).
- [48] 陈光荣, 杜杨松. 论银山铅锌铜矿与德兴铜矿的关系及其找矿方向[J]. 地质与勘查, 1988, 01:9-13.
Chen Guangrong, Du Yangsong. The Yinshan Pb-Zn-Cu DePosit:Its Similarities with the Dexing Cu Deposit and Exploration Guides[J].Geology and Exploration, 1988, 01:9-13(in Chinese with English abstract).
- [49] 华仁民, 毛景文. 试论中国东部中生代成矿大爆发[J]. 矿床地质, 1999, 18(4):300-307.
Hua Renmin, Mao Jingwen. A preliminary discussion on the Mesozoic metallogenic explosion in east China[J]. Mineral Deposits, 1999, 18(4): 300-307(in Chinese with English abstract).
- [50] 毛景文, 华仁民, 李晓波. 浅议大规模成矿作用与大型矿集区[J]. 矿床地质, 1999, 18(4):291-299.
Mao Jinwen, Hua Renmin, Li Xiaobo. A preliminary study of large-scale metallogenesis and large clusters of mineral deposit [J]. Mineral Deposit, 1999, 18(4):291-299(in Chinese with English abstract).
- [51] 毛景文, 张作衡, 余金杰, 等. 华北及邻区中生代大规模成矿的地球动力学背景: 从金属矿床年龄精测得到启示 [J]. 中国科学(D 辑), 2003, 33(4):289-299.
Mao Jingwen, Zhang Zuoheng, Yu Jinjie, et al. Geodynamic settings of Mesozoic large scale mineralization in the South China and adjacent areas:implications for metallogenic ages of metal deposits [J]. China Science (Ser. D), 2003, 33 (4):289-299 (in Chinese with English abstract).
- [52] 毛景文, 谢桂青, 李晓峰, 等. 华南地区中生代大规模成矿作用与岩石圈多阶段伸展[J]. 地学前缘, 2004, 11(1):46-55.
Mao Jingwen, Xie Guiqing, Li Xiaofeng, et al. Mesozoic large scale mineralization and multiple lithospheric extension in southern China [J].Earth Science Frontiers, 2004, 11 (1): 46-55(inChinese with English abstract).
- [53] 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 等. 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.
Mao Jingwen, Xie Guiqing, Guo Chunli, et al. Large-scale tungsten-tin mineralization in the Nanling region, South China: Metallogenic ages and corresponding geodynamic processes[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23 (10):2329-2338 (in Chinese with English abstract).
- [54] 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, 14:510-526.
Mao Jingwen, Xie Guiqing, Guo Chunli, et al. Spatial-temporal distribution of Mesozoic ore deposits in South China and their metallogenic settings [J]. Geological Journal of China Universitie, 2008, 14:510-526(in Chinese with English abstract).
- [55] Mao Jingwen, Cheng Yanbo, Chen Maohong, et al. Major types and time-space distribution of Mesozoic ore deposits in South China and their geodynamic settings [J]. Mineralium Deposita, 2012, DOI 10.1007/s00126-012-0446-z.
- [56] 谢桂青, 毛景文, 胡瑞忠, 等. 中国东南部中-新生代地球动力学背景若干问题的探讨[J]. 地质论评, 2005, 51(6):613-620
Xie Guiqing, Mao Jingwen, Hu Ruizhong. Discussion on some problems of Mesozoic and Cenozoic geodynamics of Southeast China [J]. Geological Review, 2005, 51 (6):613-620 (in Chinese with English abstract).
- [57] 周新民. 对华南花岗岩研究的若干思考[J]. 高校地质学报, 2003, 9(4):554-565.
Zhou Xinmin. My thinking about granite geneses of South China [J]. Geological Journal of China Universities, 2003, 9 (4):554-565 (in Chinese with English abstract).
- [58] 毛景文, 张建新, 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-以德兴地区为例 [J]. 地球科学与环境学报, 2010, 01(32): 1-14.
Mao Jingwen, Zhang Jiandong, Guo Chunli. Porphyry Cu, epithermal Ag-Pb-Zn, distal hydrothermal Au deposits :a new model of mineral deposit-taking the Dexing area as an example[J]. Chinese Academy of Geological Sciences, 2010, 01 (32):1-14(in Chinese with English abstract).

U-Pb dating and Hf isotopic characteristics of zircons from granodiorite in the Dexing ore concentration area

SHUI Xin-fang¹, ZHAO Yuan-yi², GUO Shuo¹,
WU De-xin¹, ZHU Xiao-yun³, WANG Zeng-ke³

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. Dexing Mine of Jiangxi Copper Corporation, Dexing 334200, Jiangxi, China)

Abstract: The Dexing ore concentration area located at the juncture between Qiantang body and Jiangnan body is one of the large ore concentration areas along the Qinhang metallogenic belt of eastern China. It includes Tongchang, Fujiawu and Zhushahong porphyry Cu-Mo-Au deposits, Yinshan Ag-Cu-Pb-Zn polymetallic deposit, Jinshan gold deposit and other large and superlarge ore deposits. Based on systematic field geological survey and sample acquisition, this paper presents in situ zircon U-Pb and Hf-isotopic data of Tongchang, Fujiawu, Zhushahong and Yinshan deposits: 171 ± 1.2 Ma for Tongchang, 172 ± 0.68 Ma for Fujiawu, 173 ± 1.3 Ma for Zhushahong, and 176 ± 1.5 Ma for Yinshan. These data show that all the granodiorite-porphyry bodies were formed in the Early-Middle Jurassic period. Zircon in-situ analysis of four samples gives the average $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values of (4.34~5.54) with limited variation and Hf crustal model ages of 861 Ma, 876 Ma, 904 Ma and 941 Ma. The Zr/Hf ratios are close to the Zr/Hf ratio of the upper mantle. Zircon Hf isotopic composition suggests that the parental magmas of the rock bodies were mainly derived from a young mantle and partly mixed with old continental crust rock during the evolution. Mantle material in the Dexing ore concentration area played an important role in the formation of the granodiorite porphyry. The most important rock-forming and ore-forming period of the four deposits should be in 170 ~ 175 Ma. The continual magmatic hydrothermal activation might have been the important factor responsible for the formation of the Dexing ore district.

Key words: LA-ICP-MS zircon U-Pb dating; Hf isotope; Dexing; Jiangxi

About the first author: SHUI Xin-fang, female, born in 1989, master, majors in mineralogy, petrology and mineral deposit geology; E-mail: shui.xinfang@163.com.