

文章编号: 1000-4734(2016)01-0025-09

江西德兴银山矿床辉绿岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其地质意义

张明记^{1,2}, 李晓峰^{1*}, 韦星林³, 毛伟^{1,2}, 张志辉⁴, 唐燕文¹

(1. 中国科学院 地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550081;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 江西有色地质勘查局, 江西 南昌 330025;

4. 江西铜业集团 银山矿业有限责任公司, 江西 德兴 334201)

摘要: 江西德兴银山矿床是一个与陆相火山-次火山作用有关的中-浅成热液铜铅锌金银矿床。前人对该矿床岩浆岩的活动时代研究主要集中在中酸性火山岩和次火山岩上, 而对矿区内出露的脉状辉绿岩缺乏关注。本文在前人研究的基础上, 运用 LA-ICP-MS 对矿区内脉状辉绿岩进行了锆石 U-Pb 同位素定年, 获得了 3 组 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和年龄, 其年龄值分别为 152 ± 10 Ma、 346.6 ± 5.3 Ma 和 426 ± 46 Ma。结合锆石的成因以及野外辉绿岩脉切穿黄铜矿脉的交切关系, 将辉绿岩的结晶年龄确定为 152 ± 10 Ma, 表明其形成于晚侏罗世。而后 2 个较老的年龄是从围岩捕获的捕虏锆石的结晶年龄, 基性岩浆在上升到地表的的过程中可能与古生代地壳物质发生混染。辉绿岩的年龄表明银山矿区内不仅存在早、中侏罗世的中酸性岩浆活动, 而且有晚侏罗世的基性岩浆活动。该地区在晚侏罗世可能处于局部伸展构造环境。

关键词: 银山; 辉绿岩; 锆石; LA-ICP-MS U-Pb 定年

中图分类号: P579; P597.3

文献标识码: A

doi: 10.16461/j.cnki.1000-4734.2016.01.005

作者简介: 张明记, 男, 1989 年生, 硕士研究生, 地质工程专业. E-mail: zhangmingji11@126.com

Zircon LA-ICP-MS U-Pb Ages of diabase from Yinshan Deposit and Its Geological Significance, Dexing, Jiangxi Province, South China

ZHANG Ming-ji^{1,2}, LI Xiao-feng¹, WEI Xing-lin³, Mao Wei^{1,2}, ZHANG Zhi-hui⁴, TANG Yan-wen¹

(1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;

3. Jiangxi Nonferrous Metals Geological Exploration Bureau, Nanchang 330025, China;

4. Yinshan Mining Limited Liability Company of Jiangxi Copper Corporation, Dexing 334201, China)

Abstract: Yinshan deposit in Dexing District of Jiangxi Province, China, is a middle-shallow hydrothermal Cu-Pb-Zn-Au-Ag deposit closely related to continental volcanism-subvolcanism. Many studies have been conducted on the ages of felsic-intermediate volcanic-subvolcanic activities, while little attention has been paid to the diabase exposed in this mine. Based on the previous study, zircon LA-ICP-MS U-Pb dating has been conducted on the vein-like diabase in order to get the ages of mafic magmatic activity of the studied area. Results yield three groups of weighted average $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages, 152 ± 10 Ma, 346.6 ± 5.3 Ma and 426 ± 46 Ma. Consistent with the origin of zircons and the intercalated relationship between ore veins and the diabase, 157.4 ± 1.7 Ma is considered to be the formation age of the diabase, which demonstrates that Late Jurassic mafic magmatism presented beside the felsic-intermediate magmatism in the Early-Middle Jurassic in this area. The other two older ages might be produced by the xenoliths zircons captured from wall rock, and it is

收稿日期: 2014-08-08

基金项目: 国家基础研究重点规划项目 (2012CB416705); 国家自然科学基金项目 (41272112); 中国科学院“百人计划”项目

* 通讯作者, E-mail: x-f-li@hotmail.com

possible for the mafic magma to be contaminated by the Paleozoic crust material during ascending. The diabase is likely distributed in stretch environment; therefore, this area might be in a regional stretch tectonic setting in the Late Jurassic.

Keywords: Yinshan; diabase; zircon; LA-ICP-MS U-Pb age

银山矿床位于著名的德兴铜金多金属成矿区, 是一个大型-超大型铜铅锌金银多金属矿床。前人对该矿床做了大量的研究工作, 取得了一系列重要的成果。叶庆同^[1]、郝正平^[2]和莫测辉等^[3]对矿床蚀变和矿化分带进行了研究; 华仁民等^[4]、张理刚等^[5]、张文淮等^[6]、Zhang 等^[7]和 Wang 等^[8]研究了矿床成矿物质和成矿流体的特征及来源; 而沈渭洲等^[9]、江西银山多金属矿床编写组^[10]、李晓峰等^[11]、Li 等^[12]和 Wang 等^[13]测试分析了矿床的成岩成矿年龄; Li 等^[14]研究了银山矿床的蚀变矿物的年龄。银山矿床为陆相火山-次火山作用有关的岩浆期后中-浅成热液矿床已受到普遍认同^[15-22]。

前人对银山矿床成岩时代的研究多集中在矿区内中酸性火山岩、次火山岩(石英斑岩、英安斑岩、安山玢岩和石英闪长岩)。研究结果显示中酸性岩浆活动发生在早、中侏罗世阶段^[12,13,23]。前人对矿区内基性岩浆活动的研究程度较低, 未见有辉绿岩出露情况的报道, 更缺乏辉绿岩形成时代的资料。而辉绿岩及其成岩时代的研究对完善本区岩浆活动演化系统, 探讨成岩成矿的关系有重要意义^[24-26]。对辉绿岩的地球化学特征和岩石成因分析也有助于探讨区域内构造演化的动力学过程^[27-30]。

本次研究在矿区内发现了辉绿岩脉, 证明本区存在基性岩浆活动。本文拟在银山矿床中酸性火山岩、次火山岩成岩年龄和成矿时代的研究基础上, 对银山矿区内出露的小型辉绿岩脉进行岩相学研究和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学分析, 以期获得辉绿岩的形成时代, 揭示其地质意义以及与中酸性次火山岩和成矿的关系, 以期进一步丰富对银山矿床岩浆活动演化规律的认识。

1 区域地质背景和矿床地质特征

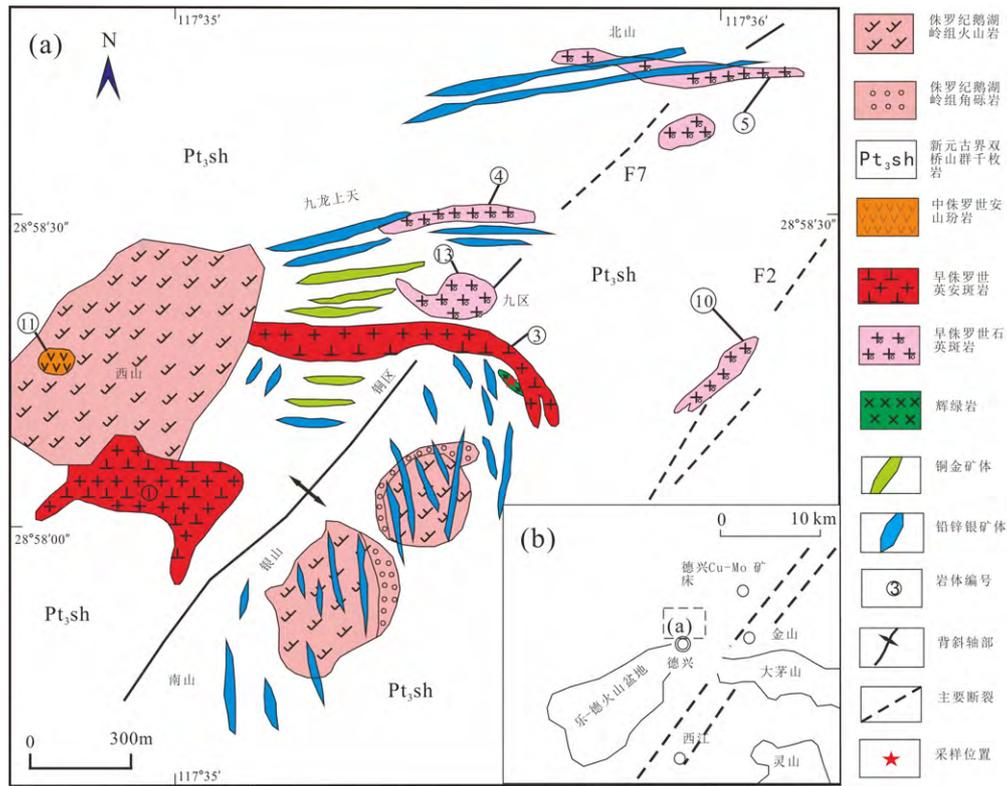
银山铜铅锌金银多金属矿床位于江西省德兴市以北约 1.5 km 处, 在大地构造上处于江南造山带东段, 其北西是扬子板块, 南西是华南褶皱系, 东面则是江南造山带的江(山)绍(兴)地区^[11](图 1)。该矿床位于赣东北深大断裂与乐安江深断裂带之间, 乐华-德兴中生代火山-沉积盆地北东缘^[15]。矿区出露的地层有新元古界双桥山群下亚群浅变质岩

系, 包括绢云母千枚岩、砂质板岩和凝灰质千枚岩。矿区内也出露有中生界上侏罗统鹅湖岭组流纹质-英安质火山碎屑岩, 不整合覆盖于双桥山群剥蚀面上。其底部主要为千枚质角砾岩, 中部为流纹质集块角砾岩和角山流纹熔岩, 上部为凝灰角砾岩和英安质熔岩。下白垩统石溪组主要是一套棕红色砂岩, 不整合覆盖于老地层之上^[11]。

区域内岩浆岩分布不甚广泛, 除火山岩呈带状覆盖在区域中部外, 侵入岩多呈小岩株、岩脉零星散布于全区。晋宁期有超基性岩侵入和基性-中性岩海底火山喷发; 加里东期有小规模的基性-中基性-中性-中酸性岩侵入; 海西-印支期有地台型基性海底火山喷发; 燕山期则有影响范围较大的中酸性-酸性岩陆相火山喷发和次火山岩侵入。区内以晋宁期和燕山期岩浆活动为显著^[10]。

银山矿区的赋矿围岩是双桥山群下亚群和鹅湖岭组岩石; 构造的主体是由基底浅变质岩系构成的银山背斜。该背斜两翼陡峻, 核部紧闭, 枢纽走向 NE-NNE, 向 NE 方向倾伏, 背斜两翼次级褶曲发育, 构成一系列的背斜、向斜。银山矿床的主干断裂 F7 为银山背斜轴部断裂, 该断裂带是由少数主断面组成的脆-韧性剪切带, 简称背斜轴部剪切带。银山矿床另一重要的构造是西山火山机构, 平面上呈 NE 向延伸的椭圆形, 剖面上呈漏斗状, 向 SE 倾斜。火山口周边环状、放射状的断裂系统组成重要的控矿构造^[11]。

矿区内中生代中-酸性火山活动分为 3 个喷发旋回, 以第 1、2 旋回为主要火山活动期。第 1 旋回火山活动为流纹英安质-流纹质岩石的裂隙式喷发, 分布在矿区北东侧和东侧, 主要沿着近东西向构造和北东向构造的交汇部位发生。其稍后的次火山岩-石英斑岩则在偏北部的九龙上天-北山一带, 呈近东西向的不规则脉岩侵入于双桥山群中, 如 4、5、13 号岩体。第 2 旋回的火山活动为英安质次火山岩-英安斑岩, 主要分布在西山及其周围, 如 1、3 号岩体。在喷发形式上, 本旋回火山活动已从裂隙式逐渐向中心式转化, 并逐渐形成西山的中心式火山机构。第 3 旋回仅有少量安山质熔岩喷溢, 且局限于西山火山机构内(11 号岩体)^[15,11](图 1)。



a-银山矿区地质简图; b-银山矿床在德兴地区的位置图

图 1 银山矿床地质简图(据文献[12], 有修改)

Fig. 1. Geological sketch map for Yinshan deposit (after literature No.12) .

银山多金属矿床的成矿作用与燕山早期的火山-次火山热液活动密切相关。江西银山多金属矿床编写组^[10]认为, 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。铜金矿体产于九区和西山的铜硫矿带, 以及 3 号英安斑岩体的南北接触带、爆破角砾岩、千枚岩、蚀变石英斑岩体内。矿带走向 EW 到 SEE, 矿体规模大, 为形态完整的板状、厚板状。矿石类型主要有铜硫金矿石和硫金矿石。主要矿石矿物为黄铁矿、黄铜矿、砷黝铜矿、硫砷铜矿、黝铜矿、方铅矿和闪锌矿等。脉状铅锌银矿体主要分布于北山、九区和银山区, 前两者的矿体走向近 EW 向, 倾向 N 或 S; 银山区矿体走向为 NW, 倾向 SW 或 SE。矿脉长度一般为 300~600 m, 最长达 1050 m, 厚 1~5 m。矿体呈脉状, 与围岩接触关系清楚^[10,11]。

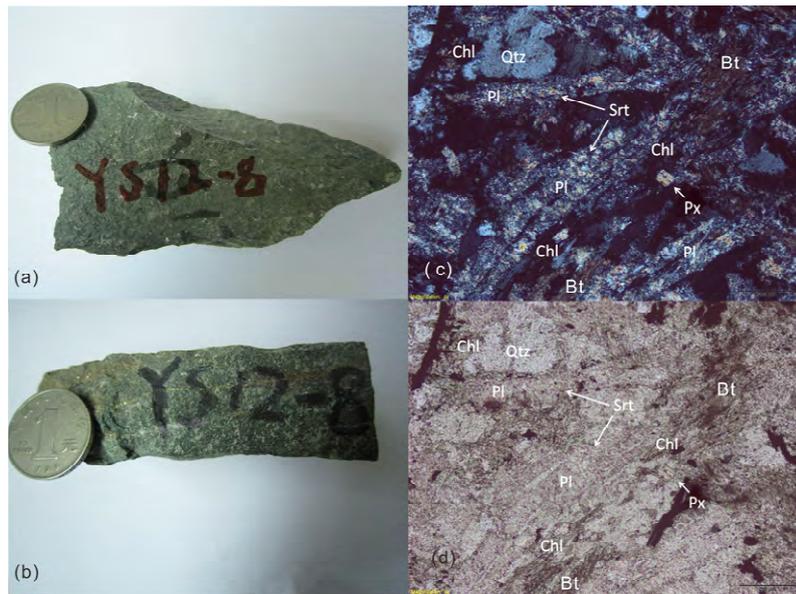
本次研究野外所见到的辉绿岩出露于 3#英安斑岩体的南东部位, 呈近直立状脉体侵位于英安斑岩体中, 倾向为 SW, 岩脉露头表面宽约 2~3 m, 岩脉长度未知。野外可见黄铜矿脉被辉绿岩脉切割, 同时在辉绿岩中也发现有数条黄铁矿微细脉。

2 采样和测试方法

本文所研究的辉绿岩样品 (YS12-8) 采自银山矿床露天坑内-24 m 平台上 (图 1), GPS 坐标: N28°58'14", E117°35'37"。样品的破碎和锆石的挑选由廊坊市科大岩石矿物分选技术服务有限公司完成, 具体流程是将部分样品破碎、碾磨、过筛、磁选、重液分离, 之后在双目镜下挑选出晶型较好、透明、均匀、无裂隙的锆石。部分样品切割成小块后磨制成光薄片。

2.1 样品描述

据野外和手标本观察, 岩石及其样品 (YS12-8) 呈灰绿色, 致密块状构造 (图 2a、b)。显微镜下观察岩石为辉绿结构, 含有斜长石 (40%~45%)、辉石和黑云母 (45%~50%), 少量石英, 副矿物有锆石、磷灰石等。辉石不规则分布于斜长石之间, 辉石普遍蚀变为绿泥石、角闪石、黑云母等矿物, 而角闪石、黑云母也受蚀变析出其铁质成分, 黑云母多发生扭曲变形, 其边缘部分多发生绿泥石化 (图 2c、d)。斜长石呈半自形长条状, 部分发生绢云母



a-无矿化的辉绿岩手标本照片； b-含黄铁矿微细脉的辉绿岩手标本照片； c-辉绿岩的镜下照片（正交偏光）； d-辉绿岩的镜下照片（单偏光）； Chl-绿泥石； Bt-黑云母； Pl-斜长石； Px-辉石； Qtz-石英； Srt-绢云母

图 2 银山辉绿岩标本和光薄片照片

Fig. 2. Photographs for the specimens and polished thin sections of the diabase from Yinshan deposit.

化，但仍保留其长条状晶形，粒径在 0.1~0.5 mm 之间，其格架状杂乱分布特征仍可显示辉绿岩特征的辉绿结构。岩石已遭受强烈的低温蚀变作用，大部分暗色矿物被绿泥石矿物取代，斜长石则蚀变为绢云母和其他粘土矿物。在暗色矿物和斜长石的矿物间隙中还有少量它形石英和浸染状黄铁矿。

2.2 锆石 U-Pb 分析

锆石样品靶的制作和锆石阴极发光照相在北京离子探针中心完成。将辉绿岩样品中挑选出的锆石颗粒粘在双面胶上，然后用无色透明的环氧树脂固定，待环氧树脂充分固化后进行抛光至锆石露出一个平面，不镀金，制成样品靶。然后对样品靶进行锆石的透射光、背散射图像（BSE）和阴极发光图像（CL）照相（图 3），以观察锆石的晶体形态和内部结构。锆石 U-Pb 定年测试在中国地质科学院矿产资源研究所成矿作用与资源评价重点实验室完成，所用仪器为 Finnigan Neptune 型 MC-ICP-MS 及配套的 New wave UP213 激光剥蚀系统，详细的实验原理和分析流程见文献[31]。

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-Ar 混合气体为载体。LA-MC-ICP-MS 激光剥蚀采用单点剥蚀的方式，数据分析前用锆石 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^[32]) 为外标进行校正。原始的测量数据采用

ICPMSDataCal 程序离线处理完成^[33]。锆石年龄计算、谐和图绘制和加权平均年龄绘制用 Isoplot 程序完成^[34]。



图 3 银山矿区辉绿岩 (YS12-8) 中锆石的阴极发光图像

Fig. 3. Cathodoluminescent images for zircon in diabase (YS12-8) from Yinshan deposit.

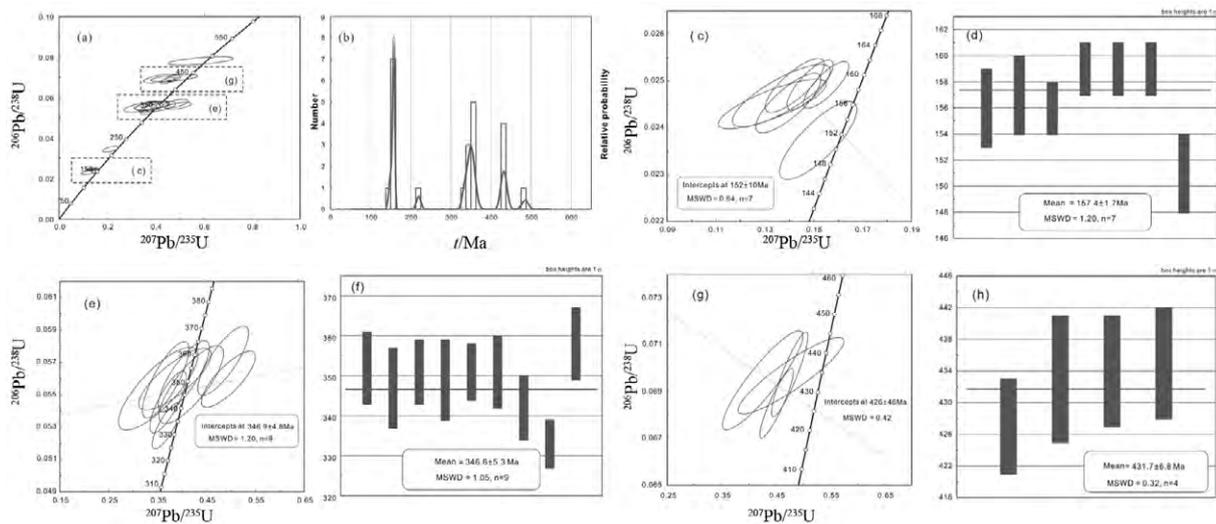
3 分析结果

从样品 (YS12-8) 中挑选了 23 颗锆石进行 LA-ICP-MS 法测试，共对锆石进行了 23 个分析点的年龄测定，U-Pb 同位素分析结果列于表 1。测试的 23 个锆石 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄数据范围比较宽泛，如图 4b，从 148 Ma 变化到 485 Ma。若不考虑孤立的 2 个年龄数据（8 号和 12 号，分别为 485 Ma 和 220 Ma），本次测试的年龄数据大致分为 3 组，分别为第一组 148~159 Ma；第二组 333~358 Ma；以及第三组 427~435 Ma，如图 4a。

表 1 银山辉绿岩 (YS12-8) 锆石 LA-ICP-MS 法 U-Pb 同位素测试结果
Table 1. Zircon LA-ICP-MS U-Pb isotope test results of diabase (YS12-8) from Yinshan deposit

Table with 19 columns: 测试号, wB/10^6 (PbT, PbC, Th, U, Th/U), 比值 (207Pb/235U, 206Pb/238U), 年龄/Ma (207Pb/235U, 206Pb/238U), 谐和度. Rows list 23 samples (YS12-8-1 to YS12-8-23) with their respective isotopic data and concordance percentages.

注: 表中 PbT-铅总含量; PbC-普通铅含量; 207Pb/235U 和 206Pb/238U 由铅总量扣除普通铅含量计算得出, 为放射成因铅; - 为计算出的 207Pb/206Pb 年龄负值数据。



a-银山辉绿岩锆石全部年龄谱和图; b-银山辉绿岩锆石年龄分布频率图; c、e、g-分别对应于 a 图中(c)、(e)、(g)处的锆石年龄谱和图; d、f、h-分别对应于 c、e、g 图的锆石 206Pb/238U 加权平均年龄图

图 4 银山辉绿岩锆石 U-Pb 年龄谱和图

Fig. 4. Zircon LA-ICP-MS U-Pb concordia diagrams for diabase from Yinshan deposit.

对第一组锆石测试数据, 2、4、11、16、20、21 和 22 号锆石测试点的 206Pb/238U 年龄较为一致, 对这些数据获得的 206Pb/238U 加权平均年龄为: 157.4±1.7 Ma (n=7, MSWD=1.2), 这些数据在谐

和图中构成的不一致线与一致曲线的上交点年龄为 152±10 Ma (n=7, MSWD=0.64) (图 4c、d)。7 号锆石测试点年龄偏小, 并且锆石 Th/U 比值和谐和度都较低, 因此予以剔除。

对第二组锆石数据, 3、9、10、13、14、15、17、18 和 19 号锆石测试点的 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 与 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄较为一致, 数据在谐和线上或附近, 如图 4e, 获得的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 346.6 ± 5.3 Ma ($n=9$, MSWD=1.05) (图 4f)。

对第三组锆石数据, 将 1、5、6、23 号锆石数据投影到谐和图中上, 数据点所形成的不一致线与一致曲线的交点年龄为 426 ± 46 Ma ($n=4$, MSWD=0.42), 得到的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为: 431.7 ± 6.8 Ma ($n=4$, MSWD=0.32) (图 4g、h)。

4 讨论

4.1 矿区已有的岩体年龄数据

银山矿区内燕山期的岩浆活动最为显著, 这个时期形成的中酸性岩浆岩(石英斑岩、英安斑岩、安山玢岩、石英闪长岩)已有大量的年龄分析数据(表 2)。叶庆同^[35]测得第 1 旋回火山岩的 K-Ar 同位素年龄为 145 Ma, 第 2 旋回火山岩的 K-Ar 同位素年龄为 142 Ma, 英安斑岩为 138 Ma。林德松等^[36]用锆石 U-Pb 法测得流纹英安斑岩的同位素年龄为 167 Ma。沈渭洲等^[9]对英安斑岩、流纹英安斑岩、安山玢岩及角闪流纹岩进行了全岩 Rb-Sr 等时线年龄测定, 结果为 164 ± 20 Ma。江西银山多金属矿床编写组^[10]报道的流纹英安斑岩全岩 K-Ar 年龄为 159 Ma, 蚀变石英闪长岩全岩 K-Ar 年龄为 392 ± 54 Ma。然而一方面由于技术条件不成熟, 另一方面由于银山各旋回的次火山岩体经历了强烈的热液蚀变

作用, 以上这些由 K-Ar 法、全岩 Rb-Sr 法或锆石 U-Pb 法获得的年龄数据精度和可靠性较低^[11]。

近几年来, Li 等^[12]使用锆石 SHRIMP U-Pb 同位素测得九区 3#英安斑岩的年龄为 183 ± 3 Ma。Wang 等^[13]用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素对银山火山岩和斑岩体进行测试, 得到西山火山岩年龄为 176 ± 1 Ma, 九区石英斑岩年龄为 176 ± 1 Ma, 北山石英斑岩年龄为 172 ± 1 Ma, 九区英安斑岩年龄为 170 ± 1 Ma, 西山安山玢岩年龄为 166 ± 1 Ma。Liu 等^[23]使用锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素测得九区石英斑岩年龄为 172.2 ± 0.4 Ma, 英安斑岩年龄为 171.7 ± 0.5 Ma, 石英闪长岩年龄为 170.9 ± 0.3 Ma。相对于之前的研究, 后三者选择具有较高封闭温度的锆石作为测试对象, 使用 SHRIMP U-Pb 和 LA-ICP-MS U-Pb 同位素测试方法获得了更为精确和可靠的次火山岩年龄数据。

综合上述研究成果及本次在研究区发现的辉绿岩脉, 可知银山矿区内存在多种岩性的岩浆活动产物, 既有酸性、中酸性次火山岩, 也有基性岩浆岩。已有的岩体年龄显示, 中酸性岩浆岩结晶时代集中在早、中侏罗世阶段, 从早到晚依次形成石英斑岩、英安斑岩和安山玢岩(石英闪长岩); 而基性的辉绿岩脉则在晚侏罗世侵入。

4.2 辉绿岩锆石年龄的可靠性

由于锆石具有极高的 U-Pb 体系封闭温度 ($900\sim 1100$ °C^[37]), 使其在后期热液蚀变过程中能够很好的保存封闭的同位素体系^[38], 因此锆石 U-Pb

表 2 前人发表的银山矿床成岩成矿年龄统计

Table 2. Previous published ages of igneous rocks and related mineralization of Yinshan deposit

编号	采样位置	矿化类型	岩石	测试矿物	测试方法	年龄/Ma	文献
1	九区	铜硫金	英安斑岩	绢云母	$^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$	179.6 ± 2.9	李晓峰等(2006)
2	九区	铅锌银	石英斑岩	绢云母	$^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$	176.2 ± 5.1	李晓峰等(2006)
3	九区	铅锌银	石英斑岩	绢云母	$^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$	176.6 ± 3.3	李晓峰等(2006)
4	九区	-	英安斑岩	锆石	SHRIMP U-Pb	183 ± 3	Li et al.(2007)
5	-	-	英安斑岩	全岩	K-Ar	159	JGEB(1996)
6	-	-	石英斑岩	锆石	U-Pb	167	林德松(1988)
7	-	-	流纹英安斑岩	全岩	K-Ar	145	叶庆同(1987)
8	北山	铅锌银	石英斑岩	伊利石	K-Ar	135.9 ± 0.8	Li et al.(2005)
9	九区	铅锌银	千枚岩	伊利石	K-Ar	133.9 ± 1.7	Li et al.(2005)
10	九区	铜硫金	英安斑岩	伊利石	K-Ar	124.6 ± 1.5	Li et al.(2005)
11	九区	-	石英斑岩	锆石	LA-ICP-MS U-Pb	176 ± 1	Wang et al. (2012)
12	九区	-	英安斑岩	锆石	LA-ICP-MS U-Pb	170 ± 1	Wang et al. (2012)
13	西山	-	安山玢岩	锆石	LA-ICP-MS U-Pb	166 ± 1	Wang et al. (2012)
14	九区	-	石英斑岩	锆石	LA-ICP-MS U-Pb	172.2 ± 0.4	Liu et al. (2013)
15	九区	-	英安斑岩	锆石	LA-ICP-MS U-Pb	171.7 ± 0.5	Liu et al. (2013)
16	九区	-	石英闪长玢岩	锆石	LA-ICP-MS U-Pb	170.9 ± 0.3	Liu et al. (2013)

同位素定年方法能够较好地获得蚀变岩体的成岩时代。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年是原位微区测试方法结合透射光图像、反射光图像、阴极发光图像和背散射图像, 可以很好地剔除由于裂痕、包裹体和继承核对于 U-Pb 同位素体系造成的影响, 从而获得较为可靠的岩浆锆石形成年龄。

本次用于 LA-ICP-MS 定年测试的辉绿岩锆石总体自形程度较好, 锆石长约 60~180 μm , 长宽比在 1.5:1~3:1 之间, 大多数锆石 CL 图像具有岩浆锆石韵律环带结构 (图 3)。激光剥蚀点位置均选在锆石环带清晰, 无裂隙、无包裹体的部位。

从野外辉绿岩脉与矿化脉体的穿插关系看, 辉绿岩脉切割了矿化脉体, 而辉绿岩中却没有发现黄铜矿、方铅矿等矿化现象, 因此, 辉绿岩的侵位时间应晚于成矿作用时代, 李晓峰等^[11]获得的银山矿床成矿时代在 175~180 Ma 之间, 则该辉绿岩的形成时代不会早于早侏罗世。

本次锆石定年测试获得的第一组年龄 (148~159 Ma) 数据的有 2、4、7、11、16、20、21、22 号锆石测试点。这些锆石自形程度好, 多数为长柱状, 具有较好的柱面和锥面, 长宽比为 2:1~3:1, 长 75~180 μm 。CL 图像较暗, 表明其 U 或 REE 含量较高。从 CL 图中可以看出这些锆石均具有清晰规则的韵律环带结构, 显示出岩浆成因锆石的特征。锆石的 Th/U 比值除 7 号为 0.08 外, 其余锆石的 Th/U 比值在 0.16~0.30 之间, 远高于变质锆石的 Th/U 比值范围 (<0.07; Rubatto^[39])。综上认为 2、4、11、16、20、21、22 号锆石为岩浆成因锆石, 这些锆石年龄数据多数偏离一致线落在其上方 (图 4c)。这种情况可能由以下因素引起: (1) 由于锆石颗粒中母体 U 丢失造成的结果, 则 3 个表面年龄关系表现为 $t_{207/206} < t_{207/1235} < t_{206/1238}$; (2) 由于某种原因造成子体 Pb 获得的结果。然而地质上锆石发生铅获得的可能性极小, 即使铅获得是现在或者在实验过程中发生的, 3 个表面年龄也无规律, 因此在这里排除第 2 种因素。造成本组锆石 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄小于 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄的原因可能是这些锆石中 U、Th 含量较高而使锆石发生蜕晶化作用^[40], 内部结构稳定性降低, 受后期流体作用而丢失其中部分铀含量。锆石发生 U 丢失则导致根据年龄数据所获得的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 157.4 \pm 1.7 Ma (图 4d) 可能偏大。这 8 个年龄数据在谐和图 (图 4c) 中所构成的不一致线与一致曲线的上交点年龄为 152 \pm 10 Ma (MSWD=0.64), 我们认为这个年龄代表锆石的结晶年龄, 同时也代表辉绿岩的形成时代。7 号锆石 Th/U 比值较低, 可能受后期热液或变质作用强

烈, 且谐和度较低, 因此予以剔除。

锆石定年测试获得的第二组年龄 (333~358 Ma) 数据的有 3、9、10、13、14、15、17、18、19 号锆石测试点。这些锆石的形态多样, 既有自形程度较好的长柱状、柱状 (如 3、14、18、19 号锆石, 长宽比为 3:1~1.5:1), 也有椭圆或浑圆状晶型 (如 9、10、15、17 号锆石)。13 号锆石可能由于碎样原因, 晶体不完整。锆石的 CL 图像整体较亮, 表明其 U 或 REE 含量较低, 从 CL 图中反映出的锆石内部结构较复杂, 有的具有清楚的内核和外环结构 (如 3、14、18 号锆石), 内核为暗灰色, 结晶环带规则、细而密集, 显示出岩浆锆石的结构特征; 有的虽具有结晶条带, 但结晶条带未显示出规则的同心环带结构 (如 9、10、15 号锆石)。锆石的 Th/U 比值在 0.44~0.86 之间, 在岩浆成因锆石的 Th/U 比值范围中 (>0.5; Hoskin 和 Schaltegger^[41])。综上, 这些锆石应为捕虏锆石, 所获得的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 346.6 \pm 5.3 Ma ($n=9$, MSWD=1.05), 这一年龄可能代表较老的岩浆活动时代。

锆石定年测试获得的第三组年龄 (427~435 Ma) 数据的仅有 1、5、6 和 23 号锆石测试点, 其形态也均呈长柱状, CL 图像显示出内核和外环结构, 锆石的 Th/U 比值除 1 号为 0.27 外, 其余三个在 0.56~0.61 之间变化。这些锆石也应为捕虏锆石, 可能是基性岩浆在上升过程中从周围地壳物质中捕获的。这组锆石 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄也小于 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄, 使得年龄数据落在一致线上方 (图 4g)。这反映了这些锆石发生了铀丢失, 其原因同样可能是锆石中较高的 U、Th 含量导致其发生蜕晶化作用, 在岩浆热作用下丢失部分铀含量。所形成的不一致线与一致曲线的交点年龄为 426 \pm 46 Ma ($n=4$, MSWD=0.42), 可能代表更早一期的岩浆活动时代或更老的地壳年龄。

综上所述, 我们选用第一组数据的年龄 152 \pm 10 Ma 作为银山辉绿岩脉的结晶年龄, 是晚侏罗世镁铁质岩浆活动的产物, 并认为该年龄较为可靠。本次测试由捕虏锆石所获得的 2 个年龄 (346.6 \pm 5.3 Ma 和 426 \pm 46 Ma) 可能代表较老的 2 个不同岩浆活动时代或 2 个较老的地壳年龄。

4.3 地质意义

银山矿床是一个与陆相次火山岩有关的中-浅成热液多金属矿床。根据银山次火山岩的空间分布、地质产状和接触关系研究, 本区中生代的中酸性岩浆活动分为 3 个旋回: 由早到晚分别形成石英斑岩、英安斑岩和安山玢岩, 成岩时代集中在早、中侏罗

世。中酸性次火山岩的侵入活动存在反序特征,叶松等^[42]认为是岩浆在带状岩浆房演化中物理和化学梯度变化的结果。虽然叶松^[43]提出本区母岩浆为英安质岩浆,安山质岩浆是英安质岩浆同化混染较深部地壳物质形成的,但江西银山多金属矿床编写组^[10]认为本区火山、次火山岩是断裂带深部的幔源物质和基底地层部分熔融产生的同熔型安山质岩浆分异演化而成的,强调了幔源物质的参与。沈渭洲等^[44]认为银山石英斑岩、英安斑岩位于赣东北深断裂带上,在这些岩石形成过程中,地幔物质直接参与的可能性是存在的。李晓峰等^[22]也认为本区岩浆岩表现出壳幔相互作用的特点。本次在矿区内发现了辉绿岩脉的出露,可以为区内壳幔物质相互作用的可能性提供依据。本次对矿区内出露的辉绿岩中锆石年龄的测试结果显示,辉绿岩的形成年龄为 152 ± 10 Ma,这表明在3个旋回火山活动之后,晚侏罗世又有基性岩浆的活动。因此本区的岩浆活动并没有在中侏罗世安山玢岩侵入后结束,而可能一直延伸到晚侏罗世。结合野外矿化脉体被辉绿岩脉所切割的空间接触关系,我们认为辉绿岩脉形成于银山成矿作用之后,是成矿期后的基性岩浆活动产物。

以辉绿岩为主的基性岩墙群代表基性岩浆从地幔上升到地表的通道,作为地球深部物质的表现,基性岩墙群是大陆或大洋扩张背景下的产物,通常作为伸展构造的标志^[45-46]。银山矿区内的辉绿岩研究程度较低,缺少辉绿岩的地球化学分析,目前无法根据其地球化学数据判别其源区特征及产出的构造环境。然而前人对华南地区在中生代的构造格局已进行了大量的研究,如毛景文等^[47]通过对华南地区中生代大规模成矿作用多阶段特点的研究,认为 $170\sim 150$ Ma、 $140\sim 125$ Ma 和 $110\sim 80$ Ma 这几个阶段的大规模成矿与华南和华北地块后碰撞及太平洋板块俯冲引起弧后多阶段岩石圈伸展有关。李晓峰等^[11]提出华南地区在 $180\sim 170$ Ma 左右处于局

部伸展环境,李晓峰等^[22]根据银山岩体的 $Nb/Zr\leq 0.1$,判断银山矿床位于火山弧环境。陈培荣等^[48]、Li 等^[49]、Xie 等^[50]和华仁民等^[51]通过对中国东南部陆内基性侵入岩体的系统研究,结合大量碱性正长岩、A 型花岗岩、钾玄质侵入岩体、双峰式火山岩、玄武岩、基性岩脉、花岗闪长岩-闪长岩、裂谷和断陷带、大规模成矿作用的时代和地球化学资料,证明中国东南部在中侏罗世岩石圈开始伸展和拉张。据上述前人的研究成果,华南地区在侏罗纪是处于岩石圈伸展拉张的大构造环境中的。本次在银山矿区获得的辉绿岩的锆石年龄为 152 ± 10 Ma,与同处德兴矿集区的德兴斑岩铜矿区内的石英闪长岩形成时代(~ 153.5 Ma^[52])较为一致。因此,银山矿区出露的辉绿岩脉很可能形成于弧后伸展构造背景,可能是幔源岩浆沿着深部张裂隙快速上升到地表结晶的产物,可以认为是本区在晚侏罗世阶段处于局部伸展构造环境的表现。

5 结 论

(1) 银山矿区内辉绿岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 152 ± 10 Ma,表明其侵位时代为晚侏罗世,是成矿作用后的基性岩浆活动产物。

(2) 银山矿床在中生代经历了多个旋回的岩浆活动,岩浆活动时代一直延伸到晚侏罗世。与矿床成矿作用相关的岩体主要为早期的中酸性次火山岩,而最晚阶段的辉绿岩形成于成矿作用之后。

(3) 银山矿区出露的辉绿岩脉可能形成于弧后伸展构造背景,矿区在晚侏罗世可能处于局部伸展的构造环境中。

致谢: 野外工作得到了江西铜业集团银山矿业公司龙跃、贺森泉等地质同行的大力支持和帮助;在锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄测试和数据处理过程中得到了中国地质科学院矿产资源研究所赵令浩实验员的帮助;图件绘制得到中科院地球化学研究所黄诚博士的指导和帮助。在此一并表示感谢!

参 考 文 献:

- [1] 叶庆同. 江西银山铜铅锌矿床原生矿化分带的初步研究[J]. 中国地质科学院南京地质矿产研究所所刊, 1983, 4(1): 1-16.
- [2] 郝正平. 江西银山多金属矿床的矿化分带[J]. 矿床地质, 1988, 7(3): 3-14.
- [3] 莫测辉, 刘丹英, 冯志文, 等. 一种特殊的矿化分带-银山 Cu-Au 多金属矿床多级多中心矿化分带模式[J]. 地质与勘探, 1996, 32(5): 1-7.
- [4] 华仁民, 吴佩红, 陈克荣. 江西银山多金属矿床水-岩反应及成矿流体来源的讨论[J]. 高校地质学报, 1995, 1(2): 37-44.
- [5] 张理刚, 刘敬秀, 于桂香, 等. 江西银山铜-铅-锌-银矿床水-岩体系氩同位素研究[J]. 地质学报, 1996, 70(1): 48-60.
- [6] 张文淮, 张德会, 刘敏. 江西银山铜铅锌金银矿床成矿流体及成矿机制研究[J]. 岩石学报, 2003, 19(2): 242-250.
- [7] Zhang D H, Xu G J, Zhang W H, et al. High salinity fluid inclusions in the Yinshan polymetallic deposit from the Le-De metallogenic belt in Jiangxi Province, China: Their origin and implications for ore genesis [J]. *Ore Geology Reviews*, 2007, 31(1-4): 247-260.
- [8] Wang G G, Ni P, Wang R C, et al. Geological, fluid inclusion and isotopic studies of the Yinshan Cu-Au-Pb-Zn-Ag deposit, South China: Implications for ore genesis and exploration [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 74: 343-360.

- [9] 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, 1991, 2: 186-193.
- [10] 江西银山多金属矿床编写组. 江西银山铜铅锌金银矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1996: 1-380.
- [11] 李晓峰, 陈文, 毛景文, 等. 江西银山多金属矿床蚀变绢云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄及其地质意义[J]. 矿床地质, 2006, 25(1): 17-26.
- [12] Li X F, Watanabe Y, Mao J W, et al. Sensitive High-Resolution Ion Microprobe U-Pb Zircon and ^{40}Ar - ^{39}Ar Muscovite Ages of the Yinshan Deposit in the Northeast Jiangxi Province, South China [J]. *Resource Geology*, 2007, 57(3): 325-337.
- [13] Wang G G, Ni P, Zhao K D, 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.
- [14] Li X F, Wang C Z, Mao J W, et al. Kubler index and K-Ar ages of illite in the Yinshan polymetallic deposit, Jiangxi Province, South China: Analyses and implications [J]. *Resource Geology*, 2005, 55(4): 397-404.
- [15] 华仁民. 江西银山铅锌铜矿化机制的讨论[J]. 矿床地质, 1987, 6(2): 90-96.
- [16] 何国朝, 林德松. 江西银山矿床的稳定同位素组成特征[J]. 矿产与地质, 1992, 6(5): 406-411.
- [17] 黄定堂. 江西银山铜多金属矿床成因再认识[J]. 矿产与地质, 1999, 13(4): 199-203.
- [18] 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.
- [19] 乐小横, 张志辉. 江西银山铅锌矿床成矿流体特征[J]. 地质找矿论丛, 2001, 16(1): 29-51.
- [20] 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): 102-106.
- [21] 李晓峰, 胡瑞忠, 韦星林, 等. 江西德兴地区主要矿床类型、成矿地质特征及其成因关系[J]. 地质评论, 2012, 58(1): 82-90.
- [22] 李晓峰, 胡瑞忠, 华仁民, 等. 华南中生代与同熔型花岗岩有关的铜铅锌多金属矿床时空分布及其岩浆源区特征[J]. 岩石学报, 2013, 29(12): 4037-4050.
- [23] Liu X, Fan H R, Santosh M, et al. Origin of the Yinshan epithermal-porphyry Cu-Au-Pb-Zn-Ag deposit, southeastern China: insights from geochemistry, Sr-Nd and zircon U-Pb-Hf-O isotopes [J]. *International Geology Review*, 2013, 55(15): 1835-1864.
- [24] 吴才来, 董树文, 王次松, 等. 铜陵地区晚古生代岩浆活动的发现: 来自凤凰山岩体 ZK66 钻孔岩心辉绿岩锆石 U-Pb 定年的证据[J]. 中国地质, 2013, 40(3): 715-729.
- [25] 祝新友, 王京彬, 刘慎波, 等. 广东凡口 MVT 铅锌矿床成矿年代-来自辉绿岩锆石 SHRIMP 定年证据[J]. 地质学报, 2013, 87(2): 167-177.
- [26] 郭阳, 王生伟, 孙晓明, 等. 云南省武定县迤纳厂铁铜矿区元古代辉绿岩锆石的 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 2014, 38(1): 208-215.
- [27] 陆慧娟, 华仁民, 毛光周, 等. 江西德兴泗洲辉绿岩体锆石 La-ICP-MS 定年及其地质意义[J]. 地质学报, 2006, 80(7): 1017-1025.
- [28] 王劲松, 周家喜, 杨德智, 等. 黔东南辛便辉绿岩锆石 U-Pb 年代学和地球化学研究[J]. 地质学报, 2012, 86(3): 460-469.
- [29] 陈继平, 廖群安, 罗婷, 等. 北山磁海辉绿岩型铁矿区基性杂岩锆石 U-Pb 年代学及岩石成因[J]. 地质科技情报, 2013, 32(4): 76-83.
- [30] 张晓静, 肖加飞. 桂西北玉凤_巴马晚二叠世辉绿岩年代学、地球化学特征及成因研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2014, 33(2): 163-176.
- [31] 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.
- [32] Nasdala L, Hofmeister W G, Norberg N, et al. Zircon M257-a homogeneous natural reference material for the ion microprobe U-Pb analysis of zircon [J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 2008, 32(3): 247-265.
- [33] Liu Y S, Hu Z C, Zong K Q, et al. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(15): 1535-1546.
- [34] Ludwig K R. User's Manual for Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel [J]. *Berkeley: Geochronology Centre Special Publication*, 2003, 4: 74.
- [35] 叶庆同. 赣东北铅锌矿床成矿系列和成矿机理[M]. 北京: 北京科学技术出版社, 1987: 1-124.
- [36] 林德松, 何国朝. 江西银山矿床矿物包裹体研究[J]. 矿产与地质, 1990, 4(3): 50-58.
- [37] Lee J K W, Williams I S, Ellis D J. Pb, U and Th diffusion in natural zircon [J]. *Nature*, 1997, 390(6656): 159-162.
- [38] Cherniak D J, Watson E B. Pb diffusion in zircon [J]. *Chemical Geology*, 2000, 172(1-2): 5-24.
- [39] Rubatto D. Zircon trace element geochemistry: partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism [J]. *Chemical Geology*, 2002, 184(1-2): 123-138.
- [40] Mezger K, Krogstad E J. Interpretation of discordant U-Pb zircon ages: An evaluation [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 1997, 15(1): 127-140.
- [41] Hoskin P W O, Schaltegger U. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2003, 53(1): 27-62.
- [42] 叶松, 莫宣学. 江西德兴银山火山岩-次火山岩带状岩浆房初步研究[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 1998, 23(3): 257-261.
- [43] 叶松. 江西德兴银山火山岩-次火山岩岩石学及与成矿关系的研究[D]. 武汉: 中国地质大学(硕士论文), 1995.
- [44] 沈渭洲, 凌洪飞, 李武显, 等. 中国东南部花岗岩类 Nd-Sr 同位素研究[J]. 高校地质学报, 1999, 5(1): 22-32.
- [45] Halls H C. The importance and potential of mafic dyke swarms in studies of geodynamic processes [J]. *Geoscience Canada*, 1982, 9(3): 145-154.
- [46] 祁生胜, 邓晋福, 叶占福, 等. 青海祁漫塔格地区晚泥盆世辉绿岩墙群 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其构造意义[J]. 地质通报, 2013, 32(9): 1385-1393.
- [47] 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): 45-55.
- [48] 陈培荣, 华仁民, 章邦桐, 等. 南岭燕山早期后造山花岗岩类: 岩石学制约和地球动力学背景[J]. 中国科学, 2002, 32(4): 279-289.
- [49] Li X H, Chen Z G, Liu D Y, et al. Jurassic gabbro-granite-syenite suites from southern Jiangxi Province, SE China: age, origin, and tectonic significance [J]. *International Geological Review*, 2003, 45(10): 898-921.
- [50] Xie G Q, Mao J W, Hu R Z, et al. Jurassic intra-plate basaltic magmatism in southeast China: Evidence from geological and geochemical characteristics of the Chebu gabbroite in southern Jiangxi Province [J]. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 2005, 79(5): 662-672.
- [51] 华仁民, 陈培荣, 张文兰, 等. 华南中生代花岗岩类及其成矿作用的大地构造背景[J]. 陈骏. 地质与地球化学研究进展[M]. 南京: 南京大学出版社, 2006: 198-206.
- [52] 周清, 姜耀辉, 廖世勇, 等. 德兴铜矿闪长玢岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年及原位 Hf 同位素研究[J]. 地质学报, 2012, 86(11): 1726-1734.