

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.08.010

安徽铜陵桂花冲铜金矿床的成矿条件与找矿潜力

刘 军^{1,2}, 周涛发^{1,2}, 范 裕^{1,2}, 陈 静^{1,2}, 熊燕云^{1,2}, 刘杰添^{1,2}

(1. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 安徽省矿产资源与矿山环境工程技术研究中心, 安徽 合肥 230009)

摘 要:桂花冲矿床位于铜陵矿集区和繁昌火山岩盆地之间的过渡区,是长江中下游成矿带中新类型的铜金多金属矿床。矿体主要呈透镜状、脉状,分别赋存于桂山岩体与三叠系南陵湖组灰岩地层的接触带和远端碳酸盐地层裂隙中。文章通过记录野外地质工作及全岩地球化学特征,开展锆石 U-Pb 定年研究,发现矿区内青山岩体(花岗岩长斑岩)是成矿前岩体,桂山岩体(石英二长斑岩)是成矿岩体。对比铜陵—繁昌过渡区内姚家岭大型矿床研究发现,青山岩体与姚家岭早期岩体形成时代在 140 Ma 左右,青山岩体可能为姚家岭早期岩体延伸至桂花冲区域,后被推覆至地表;桂山岩体与姚家岭晚期岩体为成矿岩体,形成时代在 138 Ma 左右,两者可能在深部相连,是同一岩体的不同岩枝。综合桂花冲矿床控矿因素和成矿条件分析,探究该类矿床的成矿潜力和勘探方向,分析表明,在铜陵—繁昌过渡区的碳酸盐地层层间裂隙、褶皱滑脱区域、地层岩性显著变化位置以及形成时代在 138 Ma 左右的石英二长斑岩与黄龙组、栖霞组、孤峰组、大隆组、南陵湖组碳酸盐地层的接触带具有较好的找矿潜力。

关键词:锆石 U-Pb 定年;地球化学;桂花冲矿床;铜陵—繁昌过渡区;青山岩体;桂山岩体

中图分类号:P612 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2024)08-1068-12

Metallogenic conditions and prospecting potential of Guihuachong copper-gold deposit in Tongling, Anhui Province

LIU Jun^{1,2}, ZHOU Taofa^{1,2}, FAN Yu^{1,2}, CHEN Jing^{1,2}, XIONG Yanyun^{1,2}, LIU Jietian^{1,2}

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Anhui Province Engineering Research Center for Mineral Resources and Mine Environments, Hefei 230009, China)

Abstract: Guihuachong deposit is located in the transition area between Tongling ore concentration and Fanchang volcanic rock basin. Guihuachong deposit is a new type of copper-gold polymetallic deposit in the middle-lower Yangtze River Valley metallogenic belt. The orebodies are mainly lens-like and vein-like and occur in the contact zone between the Guishan rock mass and the limestone strata of the Triassic Nanlinghu Formation and in the fractures of the distal carbonate strata. By recording the field geological work and geochemical characteristics of the whole rock in detail, this paper carries out the zircon U-Pb dating. It is found that Qingshan pluton (granodiorite porphyry) is the pre-metallogenic pluton, and Guishan pluton (quartz monzonite porphyry) is the ore-forming pluton. It is found that Qingshan pluton and early Yaojialing pluton were formed around 140 Ma in Tongling-Fanchang transition zone, and Qingshan pluton may have been extended from early Yaojialing pluton to the Guihuachong area and then pushed to the surface. The late Guishan pluton and Yaojialing pluton are ore-forming pluton with a formation age of about 138 Ma. They may be connected in depth and are different branches of the same pluton. Based on the analysis of ore-controlling factors and ore-forming conditions, the metallogenic potential and exploration direction of Guihuachong deposit are explored. The analysis shows that in the Tongling-Fanchang transition area, the fractures between carbonate strata, the fold slippage area, the location with significant changes in stratigraphic lithology, the quartz monzonite porphyry and Huanglong Formation with a formation age

收稿日期:2021-05-07; **修回日期:**2021-06-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(91962218)

作者简介:刘 军(1995—),男,重庆市人,合肥工业大学硕士生;

周涛发(1964—),男,安徽合肥人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师,通信作者, E-mail: tfzhou@hfut.edu.cn;

范 裕(1982—),男,安徽合肥人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师。

of about 138 Ma, and the contact zone of carbonate strata in Qixia Formation, Gufeng Formation, Dalong Formation and Nanlinghu Formation have good prospecting potential.

Key words: zircon U-Pb dating; geochemistry; Guihuachong deposit; Tongling-Fanchang transition area; Qingshan pluton; Guishan pluton

长江中下游成矿带是中国东部重要的铜铁金等多金属成矿带,区内燕山期岩浆活动强烈,分布广泛,与成矿密切相关,是我国典型的中生代成矿作用的代表^[1-9]。长江中下游成矿带已发现的矿床类型多样,主要有矽卡岩型、矽卡岩-斑岩复合型、玢岩型和热液脉型铜铁金多金属矿床。铜陵矿集区位于长江中下游成矿带中部,矿集区内燕山期岩浆岩与成矿关系密切,引起许多学者^[9-10]关注。铜陵矿集区北部的繁昌盆地内发育广泛的白垩系火山岩,火山岩覆盖区找矿一直是成矿带找矿的重要方向。随着在铜陵—繁昌过渡区姚家岭大型锌金多金属矿床的发现,文献^[11-15]对其进行成岩成矿时代、地球化学特征、成矿流体性质及演化、成矿物质来源及成因等进行深入研究。文献^[15]报道了该矿床存在两期岩浆活动,早期岩浆活动未成矿,晚期形成的岩体为成矿岩体。近年来,依据姚家岭矿床成矿的地质条件,在铜陵—繁昌过渡区的火山岩覆盖区域,安徽省地质矿产勘查局 321 地质队在桂花冲发现铜 12.98×10^4 t,平均品位为 1.10%;金 6.57 t,平均品位为 3.63 g/t;锌 7.49×10^4 t,平均品位^[16]为 3.11%。华东冶金地质勘查局 812 地质队在桂山发现铜

4.41×10^4 t,平均品位为 1.07%;锌 3.41×10^4 t,平均品位为 2.18%;金 1.8 t,平均品位^[17]为 3.23 g/t。由于两者为同一矿床,本文将其统一称为桂花冲矿床,桂花冲铜金多金属矿床位于铜陵矿集区与繁昌盆地过渡区,与姚家岭矿床相邻,文献^[18]对桂花冲地区进行地球物理解析发现,该地区发育有青山岩体和桂山岩体 2 个岩体,但文献^[18-20]对桂山岩体相关研究较少,两者时空关系以及成矿专属性也尚不清晰。桂花冲矿床位于铜陵—南陵深断裂与戴公山背斜交汇处,发育较多的次级断裂对岩浆岩的侵位和成矿作用非常有利,产出背景特殊,因而对该矿床开展细致的研究尤为重要。

本文通过对桂花冲矿床有关的青山岩体和桂山岩体岩相学、年代学以及地球化学的研究,探讨其时空关系,查明该矿床的成矿岩体;通过与同处铜陵—繁昌过渡区的姚家岭矿床两期岩体对比,对该区成矿潜力进行判断,为下一步找矿提供理论依据。

1 区域地质概况

铜陵—繁昌地质分布^[9]如图 1 所示。

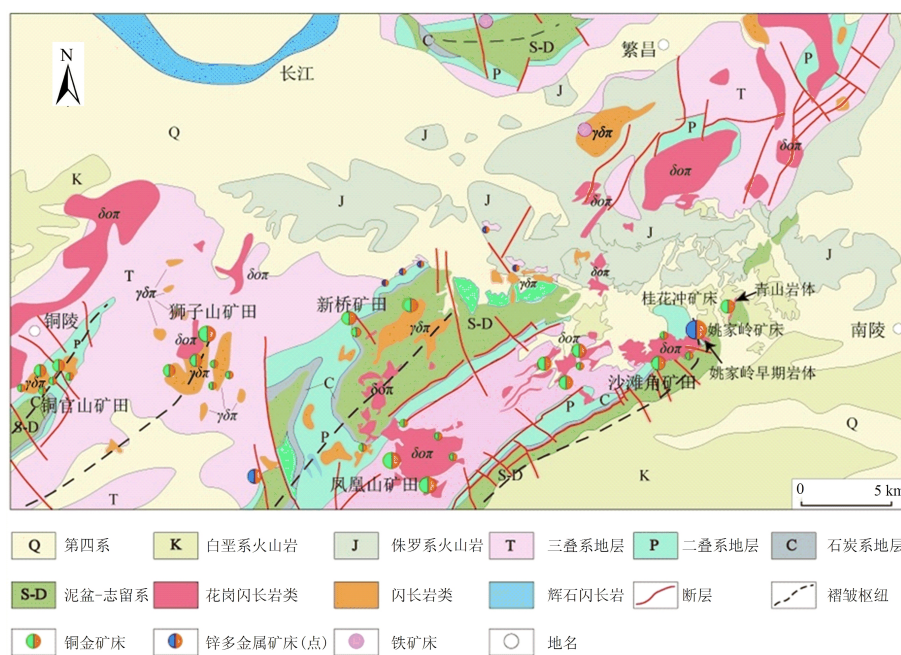


图 1 铜陵—繁昌地质简图

铜陵矿集区大地构造位置位于扬子板块东北缘下扬子中段,大别造山带前陆褶皱带上的中生代次级隆起区^[1-2,13,21]。沉积岩系主要包括志留系一泥盆系陆源碎屑岩,石炭系一三叠系海相一海陆过渡相碳酸盐岩和侏罗系一白垩系火山岩、陆相碎屑岩。

受加里东、印支及燕山运动影响,矿集区内褶皱和断裂构造均十分发育,基底构造主要由东西向、南北向和东北向 3 组隐伏基底断裂或深大断裂构成;区内燕山期岩浆活动最为强烈,形成一套高钾钙碱性岩石^[9,22-25],主要沿铜陵一南陵隐伏基底断裂呈近东西向展布,岩浆在浅部的上升侵位过程主要受断裂构造控制,岩石类型主要为石

英(二长)闪长岩、花岗闪长岩和辉石闪长岩等 3 类^[9],集中成群出现,形成自西向东分布以斑岩(层控)矽卡岩型铜金矿床为主要类型的铜官山、狮子山、新桥、凤凰山和沙滩角五大矿田^[5]。

2 矿床地质概况

桂花冲铜金多金属矿床位于铜陵矿集区与繁昌火山岩盆地的过渡区,南部与姚家岭锌金多金属矿床相邻,地质简图^[17]如图 2 所示。区内出露最老地层为志留系上统茅山组地层三叠系下统栖霞组和南陵湖组地层仅零星可见,区内大部分被白垩系上统蝌蚪山组、宣南组火山岩和第四系沉积物所覆盖。

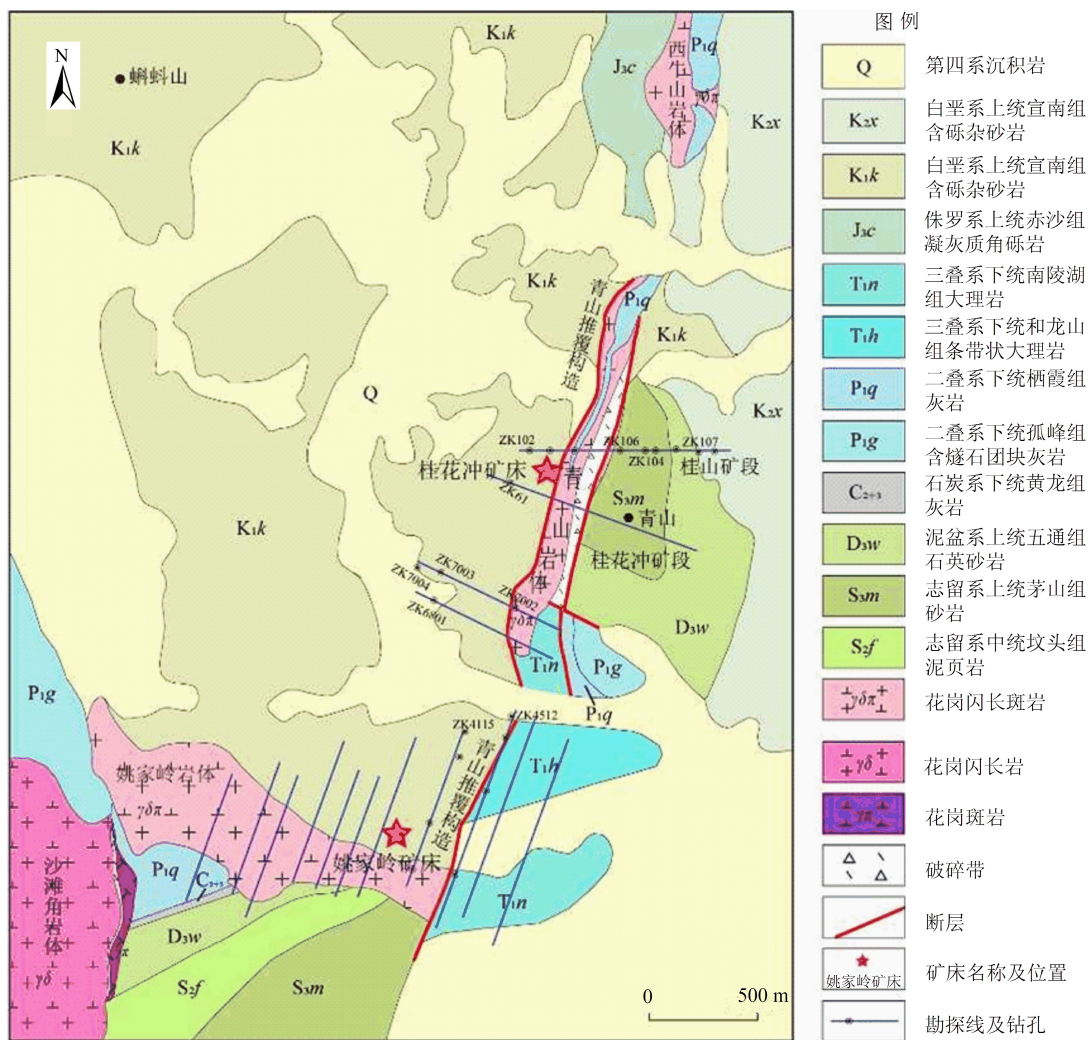


图 2 铜陵一繁昌过渡区地质简图

矿区内主要受戴公山背斜北东段控制,呈北东向延伸,与繁昌火山岩盆地相接。该背斜北东段紧闭狭长,被多条北西向横断层切割,在矿区内浅部被侏罗系上统及白垩系下统火山岩覆盖,出

露较差。矿区内断裂构造发育,被地表大面积火山岩所覆盖,通过钻孔揭露发现的青山逆冲推覆构造,分布于矿区东部,走向 5°~10°,形成时代应在白垩系蝌蚪山组与宣南组地层之间,断层上盘

由志留系、泥盆系、二叠系地层构成的青山推覆体,由于挤压应力及推移作用,上盘发育大量破碎带;下盘在矿区内部区域青山附近仅出露白垩系火山岩地层。

矿区内发育的侵入岩主要有青山岩体和桂山岩体,青山岩体呈北东向产出,长度1.1 km,宽度0.5~0.7 km,出露面积约0.8 km²,岩体向深部延伸较大,岩性为花岗闪长斑岩。桂花冲矿床青山岩体与桂山岩体手标本及蚀变照片如图3所示,通过详细的钻孔编录,矿区深部存在隐伏的桂山岩体,岩性为石英二长斑岩,以强烈钾化和发育大颗粒石英斑晶为特点。从桂山岩体内部至接触带的蚀变具有明显的分带性,依次为钾化、矽卡岩化、绿泥石化。由此可判断桂山岩体为桂花冲矿床的成矿岩体。

浅部青山岩体高岭土化较强,主要呈灰白色,新鲜岩体主要呈灰绿色-灰黑色,斑状结构,块状构造;斑晶主要为长石,质量分数约为45%,斜长石多于钾长石,斜长石为半自形-自形,细粒结构,粒径为0.4~2.0 mm,镜下可见长石裂隙发育,大部分发育简单双晶结构,少量发育环带结构,干涉色普遍为一级灰色-灰白色;钾长石为板柱状结构,粒径为0.5~1.5 mm;次为石英,质量分数约为25%(单偏光下呈无色透明,干涉色为一级灰白色-白色);另外,样品中还发现少量黑云母,质量分数约为3%,其边缘被绿泥石化,但是其中心位置依然可以看出解理,基质为长英质。样品中局部发育方解石细脉,并且其边缘位置有黄铁矿发育,副矿物主要有锆石和磷灰石,局部有绢云母化、绿泥石化等(图3a)。

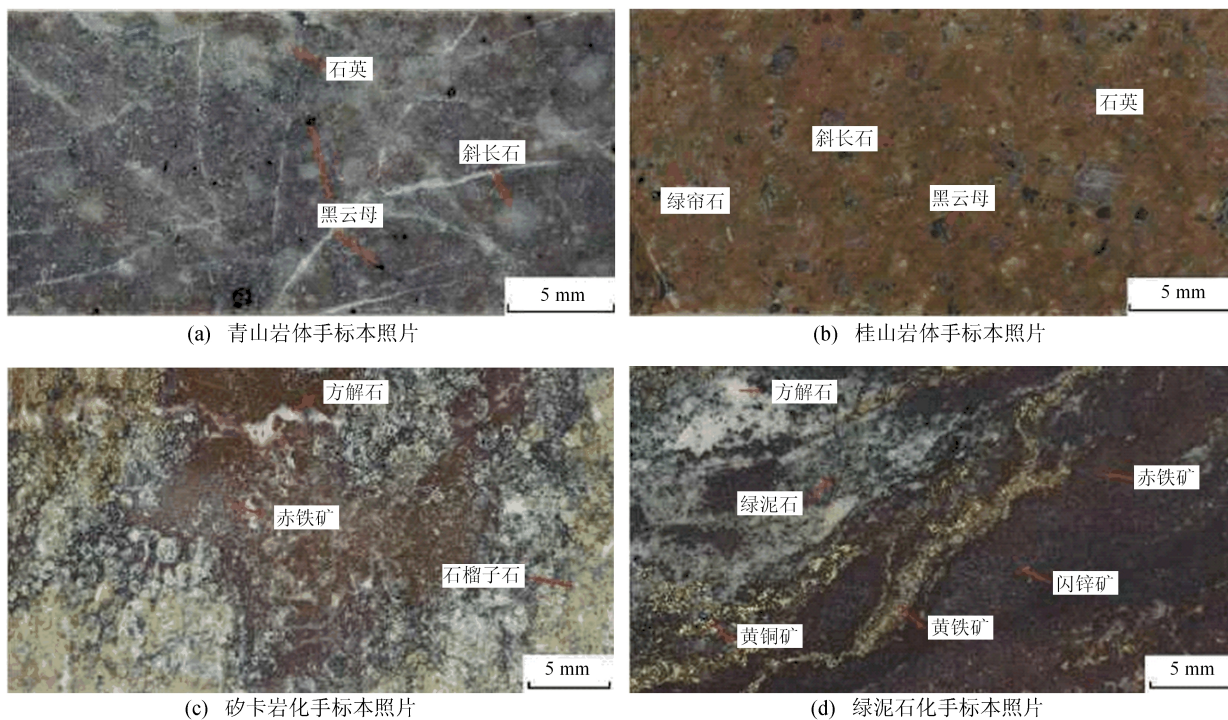


图3 桂花冲矿床青山岩体与桂山岩体手标本及蚀变照片

深部的桂山岩体钾化较强,主要呈红色-深红色,而相对较新鲜的岩体主要呈灰绿色,斑状结构,块状构造;斑晶主要为长石,长石质量分数约为45%,斜长石为自形-半自形,细粒结构,粒径为0.2~3.0 mm,镜下可见简单双晶结构和环带结构,干涉色普遍为一级灰色-灰白色;次要斑晶为石英,质量分数为10%~15%,石英斑晶大者粒径可达3.0~5.0 mm,单偏光下呈无色透明,干涉色为一级灰白色-白色;暗色矿物质量分数约

为5%,主要为黑云母,其解理清晰可见;副矿物主要有金红石、锆石、磷灰石等矿物,局部发生钾长石化、绢云母化、绿泥石化等(图3b)。

桂花冲矿床围岩蚀变强烈,蚀变类型主要有矽卡岩化、钾化、硅化、绢云母化、绿泥石化、绿帘石化和高岭土化等,矽卡岩化与成矿关系密切。矿体主要赋存于桂山岩体与三叠系南陵湖组灰岩地层的接触带中,发育铜锌金矿化,矿体呈透镜状;在碳酸盐岩地层的层间裂隙中发育铅锌矿化,

矿体呈脉状或者透镜状。矿床矿石类型复杂,按照矿石工业类型主要可以划分为铜矿石、铅锌矿石、金矿石(次要)、磁铁矿矿石(次要);按照赋存位置可以分为接触带矿石和远离接触带矿石。矿石矿物以黄铜矿、闪锌矿、方铅矿、黄铁矿为主,其次为磁铁矿、赤铁矿、斑铜矿等;脉石矿物主要有菱铁矿、绿泥石、方解石、钾长石、石英,次为铁白云石、黑云母、磷灰石、绿帘石等;也发育有少量含金、银、碲、钴等微量元素的矿物,如碲银矿、硫砷钴矿、自然金、银金矿等。

3 样品及分析方法

3.1 样品采集

针对桂花冲矿床选取钻孔 ZK107,深度为 1 013 m 的青山岩体和 1 374 m 的桂山岩体进行锆石 U-Pb 同位素年龄测定。岩石地球化学样品采自钻孔 ZK104、ZK107 中较为新鲜的青山岩体和桂山岩体样品。

3.2 锆石 U-Pb 同位素定年

本实验用于测试锆石 U-Pb 同位素年龄的青山岩体和桂山岩体样品,显微镜下拍照在合肥工业大学资源与环境工程学院岩石实验室完成,选

样工作和阴极发光(cathode luminescence, CL)在江苏省南京市南京宏创地质勘查技术服务有限公司实验室完成。锆石 U-Pb 同位素定年在合肥工业大学资源与环境工程学院矿床成因与勘查技术研究中心,使用矿物微区分析实验室激光剥蚀-电感耦合等离子质谱仪(laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry, LA-ICP-MS)完成,实验方法参照文献[25-30]。

3.3 全岩地球化学分析

全岩主量和微量、稀土元素分析在广州澳实分析检测矿物实验室完成。主量元素采用 P61-XRF26s X 射线荧光光谱仪熔融法进行测定,微量元素和稀土元素采用 M61-MS81 电感耦合等离子体质谱进行测定。

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 同位素定年及微量元素组成

本文采用的定年样品中锆石特征较为相似,在反射光下多呈浅黄色或无色,半透明-透明,长柱状、短柱状晶体,部分锆石颗粒边缘略有缺失,长 60~130 μm , CL 图像显示均具有清晰均匀的振荡环带结构,如图 4 所示。

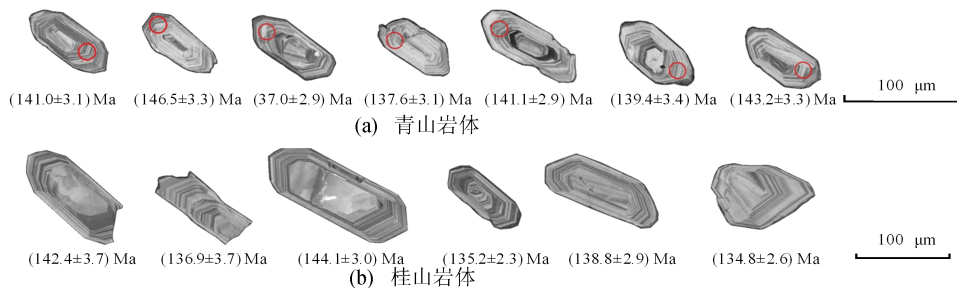


图 4 青山岩体与桂山岩体代表性锆石 CL 图像及单颗粒锆石模式年龄

青山岩体锆石中的 $w(\text{Th})$ 、 $w(\text{U})$ 分别为 $(212\sim 783)\times 10^{-6}$ 、 $(327\sim 654)\times 10^{-6}$, $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 比值大于 0.61~1.33;桂山岩体中 $w(\text{Th})$ 、 $w(\text{U})$ 分别为 $(103\sim 912)\times 10^{-6}$ 、 $(401\sim 1\ 430)\times 10^{-6}$, $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 范围为 0.19~0.64。2 个岩体的锆石 $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 均大于 0.10,显示为岩浆成因锆石的特征^[31]。

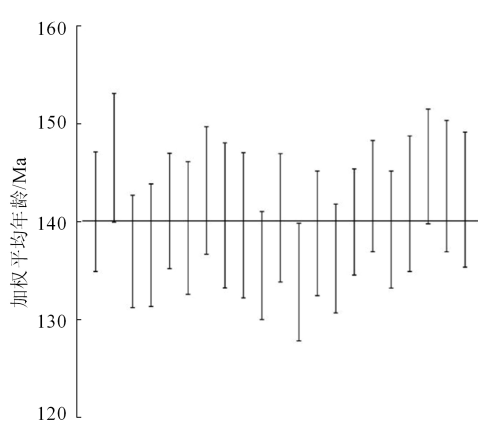
青山岩体 20 颗锆石 U-Pb 同位素测年有效数据见表 1 所列, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄 U 范围为 133~146 Ma。桂花冲矿床青山岩体加权平均年龄锆石 U-Pb 谐和图如图 5a、图 5b 所示。从图 5a、图 5b 可以看出,分析点分布在谐和线上及其附近,具有很好的一致性,表明这些锆石形成之后

的 U-Pb 体系基本保持封闭状态,校正后获得的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 (140.4 ± 1.4) Ma,加权平均方差(mean standard weighted deviation, MSWD)为 0.93, $n=20$,代表青山岩体的形成时代。

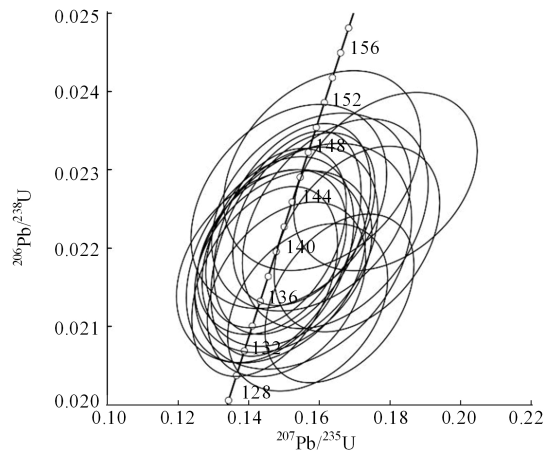
桂山岩体 15 颗锆石 U-Pb 同位素测年有效数据见表 2 所列, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄范围为 134~145 Ma 之间。桂山岩体的平均加权年龄和锆石 U-Pb 谐和图如图 5c、图 5d 所示,由图 5c、图 5d 可知,桂山岩体的锆石分析点分布在谐和线上及其附近,同样具有很好的一致性,校正后获得的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 (138.2 ± 1.4) Ma, MSWD 为 1.4, $n=15$,代表桂山岩体的形成时代。

表 1 青山岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年分析数据

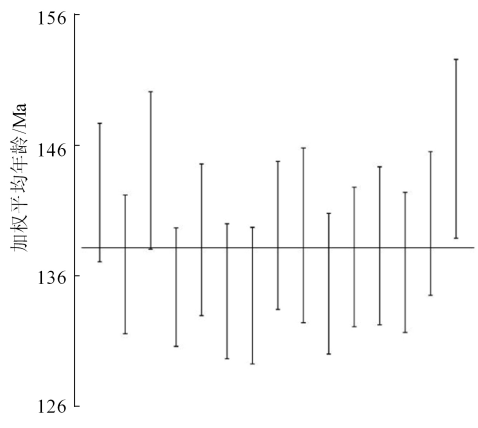
分析点	$\omega/10^{-6}$		同位素比值						表面年龄/Ma	
	Th	U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
1	794	599	0.055 7	0.003 3	0.170 7	0.009 6	0.022 1	0.000 5	141.0	3.1
2	457	517	0.051 7	0.003 9	0.160 9	0.011 4	0.023 0	0.000 5	146.5	3.3
3	443	630	0.051 5	0.003 5	0.150 8	0.009 2	0.021 5	0.000 5	137.0	2.9
4	580	556	0.049 8	0.003 3	0.144 6	0.008 4	0.021 6	0.000 5	137.6	3.1
5	446	730	0.049 3	0.003 0	0.147 8	0.008 1	0.022 1	0.000 5	141.1	2.9
6	251	328	0.048 3	0.003 8	0.146 1	0.009 7	0.021 9	0.000 5	139.4	3.4
7	472	415	0.052 0	0.004 3	0.157 7	0.011 5	0.022 5	0.000 5	143.2	3.3
8	576	621	0.050 1	0.002 9	0.150 6	0.008 7	0.022 1	0.000 6	140.6	3.7
9	269	354	0.051 9	0.004 7	0.155 5	0.012 6	0.021 9	0.000 6	139.6	3.7
10	545	488	0.054 3	0.003 5	0.156 8	0.009 3	0.021 2	0.000 4	135.5	2.8
11	359	493	0.050 2	0.003 6	0.151 7	0.010 2	0.022 0	0.000 5	140.4	3.3
12	212	382	0.049 3	0.004 0	0.146 4	0.010 9	0.021 8	0.000 5	138.8	3.2
13	721	673	0.057 2	0.003 4	0.165 8	0.008 6	0.021 4	0.000 4	136.2	2.8
14	783	654	0.049 1	0.003 2	0.146 6	0.008 6	0.022 0	0.000 4	140.0	2.7
15	679	606	0.050 1	0.003 0	0.155 7	0.008 2	0.022 4	0.000 5	142.6	2.8
16	464	542	0.051 0	0.003 8	0.149 9	0.010 2	0.021 8	0.000 5	139.2	3.0
17	324	446	0.051 6	0.003 7	0.152 4	0.009 1	0.022 2	0.000 5	141.8	3.5
18	372	487	0.057 8	0.003 8	0.178 8	0.010 6	0.022 9	0.000 5	145.6	2.9
19	404	454	0.049 5	0.003 8	0.151 4	0.011 3	0.022 5	0.000 5	143.6	3.4
20	794	599	0.055 7	0.003 3	0.170 7	0.009 6	0.022 1	0.000 5	141.0	3.1



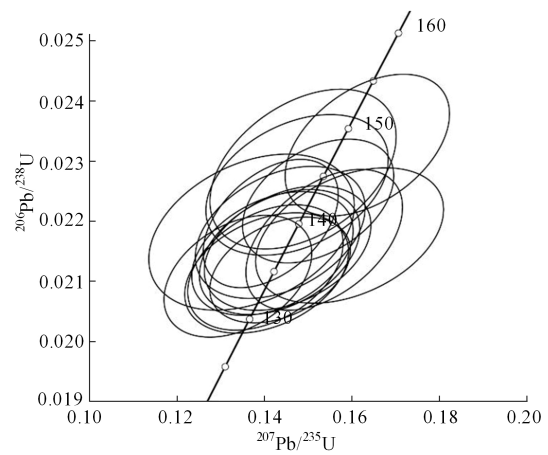
(a) 青山岩体锆石加权平均年龄



(b) 青山岩体锆石 U-Pb 谱和图



(c) 桂山岩体锆石加权平均年龄



(d) 桂山岩体锆石 U-Pb 谱和图

图 5 青山岩体和桂山岩体的加权平均年龄与锆石 U-Pb 谱和图

表 2 桂山岩体 LA-ICP-MS 锆石 UP-b 测年分析数据

分析点	$w/10^{-6}$		同位素比值						表面年龄/Ma	
	Th	U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
1	536	990	0.048 9	0.002 2	0.152 3	0.007 1	0.022 3	0.000 4	142.4	2.7
2	253	620	0.048 0	0.002 8	0.141 8	0.007 6	0.021 5	0.000 4	136.9	2.7
3	103	532	0.047 0	0.002 9	0.147 5	0.008 5	0.022 6	0.000 5	144.1	3.0
4	454	929	0.049 0	0.002 3	0.143 6	0.006 6	0.021 2	0.000 4	135.2	2.3
5	121	401	0.053 0	0.003 0	0.159 5	0.008 8	0.021 8	0.000 5	138.8	2.9
6	333	689	0.048 5	0.002 8	0.140 5	0.007 7	0.021 1	0.000 4	134.8	2.6
7	289	610	0.046 0	0.002 4	0.133 9	0.006 9	0.021 1	0.000 4	134.5	2.6
8	230	626	0.047 5	0.002 7	0.143 6	0.007 9	0.021 8	0.000 4	139.1	2.8
9	142	452	0.045 8	0.003 4	0.137 1	0.009 6	0.021 8	0.000 5	139.1	3.3
10	243	698	0.047 4	0.002 5	0.140 2	0.007 3	0.021 2	0.000 4	135.4	2.7
11	241	659	0.048 3	0.002 7	0.145 3	0.007 8	0.021 6	0.000 4	137.5	2.7
12	214	542	0.052 2	0.002 8	0.153 7	0.007 3	0.021 7	0.000 5	138.3	3.0
13	479	858	0.048 2	0.002 6	0.143 5	0.007 5	0.021 5	0.000 4	137.1	2.7
14	912	1 430	0.046 4	0.002 2	0.141 4	0.006 3	0.022 0	0.000 4	140.0	2.8
15	185	531	0.047 1	0.002 9	0.148 8	0.008 7	0.022 9	0.000 5	145.8	3.4

4.2 地球化学特征

4.2.1 主量元素

青山岩体和桂山岩体的全岩主、微量及稀土元素分析结果见表 3 所列。由于样品存在一定的

高岭土化、钾化,挑选相对新鲜的样品进行全岩地球化学分析,样品烧失量在 2.41%~4.56%,化学成分总质量分数范围在 99.34%~100.31%,符合岩石化学全分析质量规范要求。

表 3 青山岩体与桂山岩体主量元素分析结果

项目	青山岩体					项目	桂山岩体				
	107-1013	107-1021	107-1374	104-1235	104-1350		107-1013	107-1021	107-1374	104-1235	104-1350
$w(\text{SiO}_2)/\%$	63.78	61.77	63.29	65.93	65.94	$w(\text{Zr})/10^{-6}$	225.00	200.00	185.00	178.00	173.00
$w(\text{TiO}_2)/\%$	0.44	0.43	0.40	0.35	0.35	$w(\text{Hf})/10^{-6}$	5.90	5.30	4.90	4.80	4.70
$w(\text{Al}_2\text{O}_3)/\%$	15.74	15.69	15.71	16.02	15.94	$w(\text{Sm})/10^{-6}$	4.86	5.42	4.59	3.69	3.82
$w(\text{Fe}_2\text{O}_3)/\%$	2.88	2.67	2.96	2.49	2.57	$w(\text{Ti})/10^{-4}$	23.20	25.00	23.20	19.80	20.20
$w(\text{MnO})/\%$	0.03	0.05	0.03	0.04	0.04	$w(\text{Y})/10^{-6}$	14.10	14.90	11.50	8.50	9.20
$w(\text{FeO})/\%$	1.59	1.09	0.52	1.04	1.02	$w(\text{Yb})/10^{-6}$	1.13	1.29	0.86	0.60	0.64
$w(\text{MgO})/\%$	1.19	0.67	0.59	0.77	1.05	$w(\text{Lu})/10^{-6}$	0.18	0.21	0.14	0.10	0.10
$w(\text{CaO})/\%$	4.97	6.91	3.69	3.15	2.85	$w(\text{Pr})/10^{-6}$	8.33	9.18	7.39	6.31	6.09
$w(\text{K}_2\text{O})/\%$	2.19	2.68	4.39	3.04	2.86	$w(\text{Eu})/10^{-6}$	1.17	1.4	1.05	0.91	0.93
$w(\text{P}_2\text{O}_5)/\%$	0.19	0.20	0.14	0.14	0.14	$w(\text{Tb})/10^{-6}$	0.48	0.54	0.44	0.31	0.35
$w(\text{Rb})/10^{-6}$	61.50	57.00	130.50	105.00	86.40	$w(\text{Dy})/10^{-6}$	2.48	2.82	2.23	1.53	1.70
$w(\text{Ba})/10^{-6}$	822.00	727.00	841.00	942.00	920.00	$w(\text{Ho})/10^{-6}$	0.45	0.52	0.38	0.26	0.30
$w(\text{Th})/10^{-6}$	10.55	9.39	6.78	6.39	6.16	$w(\text{Er})/10^{-6}$	1.18	1.32	0.95	0.63	0.71
$w(\text{U})/10^{-6}$	4.58	2.94	2.59	2.00	2.08	$w(\text{Tm})/10^{-6}$	0.18	0.19	0.13	0.09	0.10
$w(\text{Ta})/10^{-6}$	0.83	0.85	0.59	0.59	0.62	$\Sigma_{\text{REE}}/10^{-6}$	168.98	182.33	145.19	126.05	123.81
$w(\text{Nb})/10^{-6}$	15.40	14.10	10.60	11.00	11.40	$\Sigma_{\text{LREE}}/10^{-6}$	159.36	171.40	136.73	120.01	117.24
$w(\text{La})/10^{-6}$	41.10	42.00	33.60	29.90	27.50	$\Sigma_{\text{HREE}}/10^{-6}$	9.62	10.93	8.46	6.04	6.57
$w(\text{Ce})/10^{-6}$	75.40	81.70	64.00	58.60	57.50	$\Sigma_{\text{LREE}}/\Sigma_{\text{HREE}}$	16.57	15.68	16.16	19.87	17.84
$w(\text{Sr})/10^{-4}$	15.65	8.40	6.90	10.55	10.30	$(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$	26.09	23.35	28.02	35.75	30.82
$w(\text{Nd})/10^{-6}$	28.50	31.70	26.10	20.60	21.40	δCe	1.00	1.02	1.00	1.05	1.09
$w(\text{P})/10^{-6}$	860.00	870.00	640.00	610.00	590.00	δEu	0.86	0.91	0.82	0.91	0.89

表 3 中,青山岩体稀土元素(rare earth element, REE)总量(Σ_{REE})为 $(168.98 \sim 182.33) \times 10^{-6}$,均值为 175.66×10^{-6} ,轻稀土元素(light rare earth element, LREE)总量(Σ_{LREE})为 $(159.36 \sim 171.40) \times 10^{-6}$,重稀土元素(heavy rare earth element, HREE)总量(Σ_{HREE})为 $(9.62 \sim 10.93) \times 10^{-6}$, $\Sigma_{\text{LREE}}/\Sigma_{\text{HREE}}$ 在 15.68 ~ 16.57 之间, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 23.35 ~ 26.09;桂山岩体 Σ_{REE} 为 $(123.81 \sim 145.19) \times 10^{-6}$,均值为 131.68×10^{-6} , Σ_{LREE} 为 $(117.24 \sim 136.73) \times 10^{-6}$, Σ_{HREE} 为 $(6.04 \sim 8.46) \times 10^{-6}$, $\Sigma_{\text{LREE}}/\Sigma_{\text{HREE}}$ 在 16.16 ~ 19.87 之间, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 质量分数为 28.02 ~ 35.75。

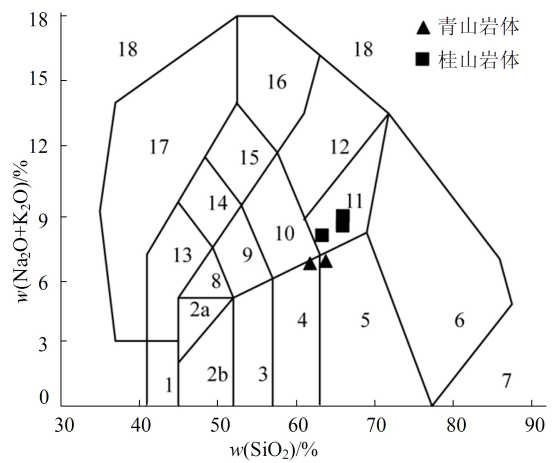
青山岩体样品中的 $w(\text{SiO}_2)$ 在 61.77% ~ 63.78% 之间, $w(\text{K}_2\text{O})$ 在 2.19% ~ 2.68% 之间。桂花冲矿床侵入岩 $\text{SiO}_2-(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ 图解^[32] 如图 6 所示,该类侵入岩在 $\text{SiO}_2-(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 图中一个样品落入闪长岩区域,另一个样品落入花岗闪长岩区域。研究区判别图解如图 7^[33] 所示。由图 7a 可知,在 $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ 图中 1 个样品落入高钾钙碱性系列,另一个落入钙碱性系列中,可能发生高岭土化等蚀变; $w(\text{Na}_2\text{O})$ 在 3.91% ~ 4.51% 之间, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 在 15.69% ~ 15.74% 之间,铝饱和指数(A/CNK)在 0.72 ~ 0.81 之间。

由图 7b 可知,在 A/CNK-A/NK 图解中,所有样品均落入准铝质区域内,表明青山岩体属于准铝质系列。

桂山岩体样品中的 $w(\text{SiO}_2)$ 介于 63.29% ~

65.94% 之间, $w(\text{K}_2\text{O})$ 范围为 2.86% ~ 4.39%, $w(\text{Na}_2\text{O})$ 范围为 3.50% ~ 5.92%。由图 6 可知,该类侵入岩在 $\text{SiO}_2-(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 分类图解中 3 个样品均落入石英二长岩区域。

由图 7a 可知,2 个样品落入高钾钙碱性系列,另一个落入钾玄武岩系列中,可能与钾化等有关。 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 介于 15.71% ~ 16.02% 之间,铝饱和指数(A/CNK)在 0.88 ~ 0.91 之间。由图 7b 可知,在 A/CNK-A/NK 图解中,所有样品均落入准铝质区域内,表明桂山岩体属于准铝质系列。



1. 橄辉长岩 2a. 碱性辉长岩 2b. 亚碱性辉长岩 3. 辉长闪长岩 4. 闪长岩 5. 花岗闪长岩 6. 花岗岩 7. 石英岩 8. 二长辉长岩 9. 二长闪长岩 10. 二长岩 11. 石英二长岩 12. 正长岩 13. 副长石辉长岩 14. 副长石二长闪长岩 15. 副长石二长正长岩 16. 副长正长岩 17. 副长深成岩 18. 宽方钠岩/磷霞岩/粗白榴岩

图 6 桂花冲矿床侵入岩 $\text{SiO}_2-(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ 图解

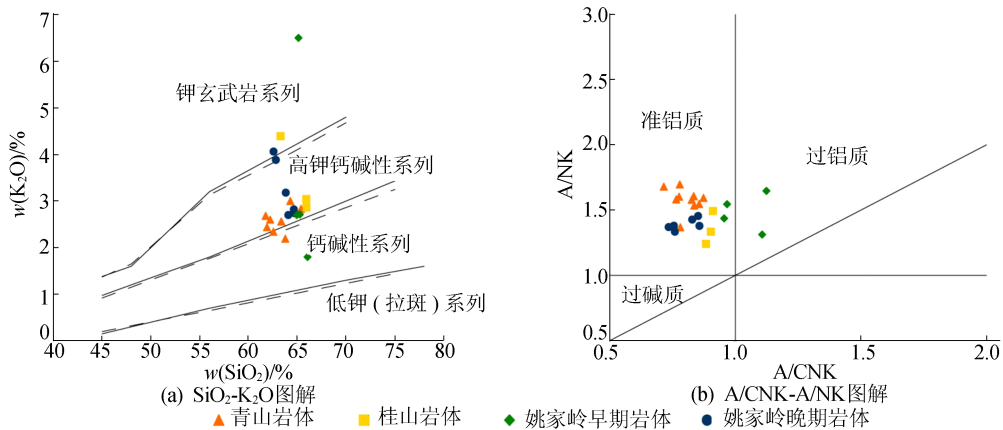


图 7 研究区侵入岩 $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ 判别图解和 A/CNK-A/NK 判别图解

4.2.2 微量元素及稀土元素

研究区侵入岩微量元素原始地幔标准化蛛网图及稀土配分曲线如图 8 所示,其中标准化数据

引自文献[34-35]。

由图 8a 可知,在微量元素蛛网图中,青山岩体和桂山岩体均表现为具有富集 Rb、Sr、Ce 等大

离子亲石元素,而 Nb、Ta 等高场强元素相对亏损,可能是由地壳混染造成的^[9]。

从图 8b 可以看出,两者均表现出向右倾斜的

稀土元素配分模式,轻重稀土分异较明显,轻稀土富集而重稀土亏损;两者 δEu 相近,都具有较弱的异常。

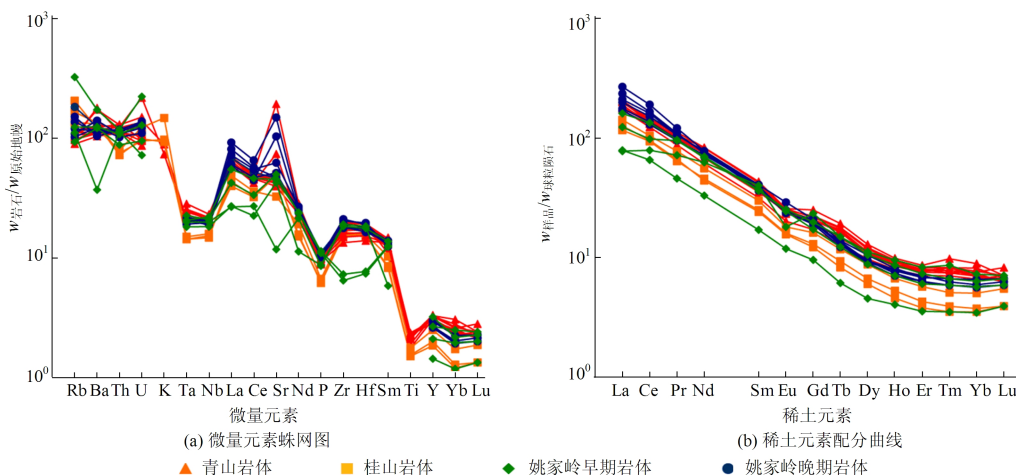


图 8 研究区侵入岩微量元素原始地幔标准化蛛网图及稀土配分曲线

5 讨 论

5.1 成岩时代

铜陵矿集区地表出露的岩体有 70 多个,均为浅成侵入体^[9]。随着 SHRIMP 及 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 高精度同位素定年方法在铜陵矿集区的广泛应用,获得了更为精确的铜陵地区侵入岩的形成时代,主要集中在 145~135 Ma 之间^[7,9]。本文研究桂花冲铜金多金属矿床有关的青山岩体锆石 U-Pb 年龄为 (140.4 ± 1.4) Ma, MSWD 为 0.93, $n=20$, 桂山岩体锆石 U-Pb 年龄为 (138.2 ± 1.4) Ma, MSWD 为 1.4, $n=15$, 依据侏罗系与白垩系界线年龄^[36-37] 为 (145.5 ± 4) Ma, 表明二者均是早白垩世岩浆作用的产物。

铜陵—繁昌过渡区域侵入岩形成时代统计见表 4 所列。

表 4 铜陵—繁昌过渡区侵入岩形成年代统计

岩体名称	岩性	形成年代/Ma	资料来源
青山岩体	花岗闪长斑岩	140.4±1.4	本文
		141.1±1.8	文献[18]
		138.3±1.4	文献[20]
桂山岩体	石英二长斑岩	138.2±1.4	本文
		141.4±1.1	文献[38]
姚家岭早期岩体	花岗闪长斑岩	141.4±1.7	文献[13]
		141.3±3.6	文献[39]
		140.2±1.0	文献[15]
姚家岭晚期岩体	石英二长斑岩	138.9±1.2	文献[15]

姚家岭早期岩体形成时代^[13-15,37-40] 为 $(140.2 \sim 141.4)$ Ma, 姚家岭晚期岩体(石英二长斑岩)的形成时代^[15] 约为 138.9 Ma, 表明岩性为花岗闪长斑岩的青山岩体与姚家岭早期岩体形成时代在 140 Ma 左右, 岩性为石英二长斑岩的桂山岩体与姚家岭晚期岩体形成时代在 138 Ma 左右, 形成时代均为早白垩世, 属于铜陵矿集区燕山期大规模岩浆活动的产物。

5.2 岩浆起源

岩石的微量元素特征能够较好地反映岩浆成因, 根据 Sr 的地球化学性质, Sr 主要在岩浆结晶分异的早期富集^[41]。青山岩体的全岩 Sr 的质量分数为 $(8.40 \sim 15.65) \times 10^{-4}$, 平均质量分数为 12.025×10^{-4} ; 桂山岩体 Sr 的质量分数在 $(6.90 \sim 10.30) \times 10^{-4}$, 平均质量分数为 9.25×10^{-4} , 两者均高于上、下陆壳 Sr 的平均质量分数^[41] 为 300×10^{-6} 。地壳重熔形成的岩石几乎不可能形成高 Sr 质量分数的岩石, 说明青山岩体和桂山岩体的岩浆物质可能与幔源岩浆有关。

从图 8a 可以看出, 青山岩体和桂山岩体均富集 Rb、Sr、Th、U、Ce 等大离子亲石元素, 表明两者成岩物质可能与富集上地幔部分熔融有关, 而相对亏损 Nb、Ti、Ta 等高场强元素表明壳源物质的混染导致高场强元素的亏损^[9], 文献^[42] 认为明显的 Nb 亏损通常是俯冲带火山岩或者典型陆壳岩石的标志, 文献^[43] 认为与俯冲带有关的岩石一般具有质量分数较高的 U、Th、Pb。青山岩

中 $w(\text{U})$ 为 $(2.94\sim 4.58)\times 10^{-6}$; $w(\text{Th})$ 为 $(9.39\sim 10.55)\times 10^{-6}$; $w(\text{Pb})$ 为 $(11.30\sim 20.10)\times 10^{-6}$ 。桂山岩体中 $w(\text{U})$ 为 $(2.00\sim 2.59)\times 10^{-6}$; $w(\text{Th})$ 为 $(6.16\sim 6.38)\times 10^{-6}$; $w(\text{Pb})$ 为 $(20.4\sim 28.9)\times 10^{-6}$, 均具有较高的 U、Th、Pb 质量分数, 显示出富集岩石圈地幔的特征。

2 个岩体的地球化学特征均表现出高硅、高铝、低镁的特点; 微量元素均具有高 Sr、低 Y、低 Yb 的特点, 均具有弱的负 Eu 异常等, 这些特征显示出埃达克质岩石的特征, 但是样品 MgO 质量分数极低, 与正常的埃达克质岩石有很大的不同。很多学者对铜陵矿集区的埃达克质岩石进行研究, 文献[24-25, 44]认为铜陵矿集区的埃达克质岩石是由经历蚀变的洋壳部分熔融形成, 文献[45-48]则认为是由下地壳减薄或拆沉作用而引发的部分熔融形成。此外, 本文测得青山岩体 $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 为 2.3~3.2 (平均值为 2.75) 与桂山岩体 $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 为 2.6~3.2 (平均值为 2.9) 明显低于下地壳熔融形成的埃达克质岩石 ($w(\text{Th})/w(\text{U})$ 为 3~50)^[41], 因此, 青山岩体和桂山岩体可能不是直接由下地壳减薄或者板片熔融的岩浆作用形成, 结合文献[20]同位素的研究认为, 两者属于地幔和地壳物质混合来源, 与文献[49]对姚家岭岩体的研究取得的结论一致。

结合文献[13, 15]对姚家岭早期岩体和晚期岩体、青山岩体以及本文的研究, 表明在铜陵—繁昌过渡区, 出露地表的青山岩体与姚家岭早期形成时代均在 140 Ma 左右; 如图 7、图 8 (部分数据参考文献[15, 20]) 所示, 两者地球化学特征相似; 通过姚家岭矿床 1 号、16 号、60 号、70 勘探线钻孔揭露可以发现在白垩系火山岩之下发育花岗闪长斑岩, 青山岩体可能为姚家岭早期岩体延伸至桂花冲区域被青山推覆构造带至地表。隐伏的桂山岩体与姚家岭晚期岩体岩性均为石英二长斑岩, 两者形成时代在 138 Ma 左右, 地球化学性质相似, 如图 7、图 8 所示 (部分数据参考文献[15, 20]), 两者可能在深部相连, 为同一岩体的不同岩枝。

5.3 构造环境

晚侏罗纪(170~145 Ma)古太平洋板块开始俯冲, 造成中国东部受挤压整体抬升, 岩石圈迅速增厚, 随后进入碰撞造山后的应力转换期(145~130 Ma), 古太平洋板块的俯冲应力减弱, 铜陵矿集区的构造环境由挤压变为伸展环境, 增厚的岩石圈发生拆沉, 深部软流圈物质上涌, 致使岩石圈

伸展减薄, 促使岩石圈地幔减压熔融形成玄武质岩浆发生底侵下地壳岩石, 形成埃达克质岩浆, 幔源岩浆和下地壳岩浆混合, 在深部岩浆房发生分异作用, 并沿着岩石圈断裂, 深大断裂等上侵, 最终经过一系列复杂而强烈的岩浆作用形成铜陵矿集区中酸性侵入岩(主要岩性为二长闪长岩、辉石闪长岩、石英闪长岩和花岗闪长岩)^[9, 50-51]。

5.4 成矿指示意义

本文通过对桂山岩体与青山岩体锆石 U-Pb 同位素定年与姚家岭两期岩体对比得出, 在铜陵—繁昌过渡区出露地表的姚家岭早期岩体和青山岩体形成时代相对较早, 与围岩接触后未成矿; 形成时代相对较晚的桂山岩体与姚家岭晚期岩体为成矿岩体。在该过渡区内, 较晚的岩浆发生上侵与石炭系黄龙组, 二叠系栖霞组上段、孤峰组上段以及大隆组地层、三叠系南陵湖组碳酸盐岩地层接触后, 发生矿质沉淀, 形成多金属矿体。在铜陵—繁昌过渡区赋矿层位与铜陵矿集区内赋矿围岩地层层位相同, 表明该区也具有“多层楼”成矿潜力, 且该区位于铜陵—南陵深断裂与戴公山背斜交汇位置, 发育较多的次级断裂对岩浆的侵位和成矿作用非常有利。

因此, 本文认为该区的碳酸盐地层层间裂隙、褶皱滑脱区域、地层岩性显著变化位置以及形成时代为 138 Ma 左右的石英二长斑岩与碳酸盐地层接触带具有有利的成矿条件, 研究区具有很好的矽卡岩型矿床的找矿潜力。

6 结 论

通过对桂花冲矿床内发育的二个岩体的研究以及与同处铜陵—繁昌过渡区域的姚家岭两期岩体对比研究, 本文得出以下结论。

1) 桂花冲矿床矿区内青山岩体(花岗闪长斑岩)形成年龄为 (140.4 ± 1.4) Ma, 桂山岩体(石英二长斑岩)形成年龄为 (138.2 ± 1.4) Ma, 两者均形成于早白垩世。

2) 青山岩体与姚家岭早期岩体相似, 与碳酸盐地层接触后未成矿, 两者形成时代为 140 Ma 左右, 具有相似的地球化学特征, 青山岩体可能为姚家岭早期岩体延伸至桂花冲, 后被构造推覆至地表。

3) 桂山岩体与姚家岭晚期岩体为成矿岩体, 两者形成时代在 138 Ma 左右, 具有相似的地球化学特征, 两者可能在深部相连, 为同一岩体不同岩枝。

4) 铜陵—繁昌过渡区位于铜陵—南陵深断裂与戴公山背斜交汇位置,发育有较多的次级断裂对岩浆的侵位和成矿作用非常有利。碳酸盐地层层间裂隙、褶皱滑脱部位、地层岩性显著变化位置以及形成时代为 138 Ma 左右的石英二长斑岩与石黄组、栖霞组上段、孤峰组上段、大隆组地层、南陵湖组碳酸盐地层的接触带具有较好的矽卡岩型矿床的找矿潜力。

[参 考 文 献]

- [1] 常印佛,刘湘培,吴言昌.长江中下游铜铁成矿带[M].北京:地质出版社,1991:1-37.
- [2] 唐永成,吴言昌,储国正,等.安徽沿江地区铜金多金属矿床地质[M].北京:地质出版社,1998:1-85.
- [3] 毛景文,STEIN H,杜安道,等.长江中下游地区铜金(铂)矿 Re-Os 年龄测定及其对成矿作用的指示[J].地质学报,2004,78(1):121-131.
- [4] 毛景文,邵拥军,谢桂青,等.长江中下游成矿带铜陵矿集区铜多金属矿床模型[J].矿床地质,2009,28(2):109-119.
- [5] 周涛发,范裕,袁峰.长江中下游成矿带成岩成矿作用研究进展[J].岩石学报,2008,24(8):1665-1678.
- [6] 周涛发,范裕,袁峰,等.长江中下游成矿带火山岩盆地的成岩成矿作用[J].地质学报,2011,85(5):712-730.
- [7] 周涛发,范裕,袁峰,等.长江中下游成矿带地质与矿产研究进展[J].岩石学报,2012,28(10):3051-3066.
- [8] 徐晓春,楼金伟,谢巧勤,等.安徽铜陵狮子山矿田铜、金共生与分离的热力学研究[J].地质学报,2011,85(5):731-743.
- [9] 徐晓春,白茹玉,谢巧勤,等.安徽铜陵中生代侵入岩地质地球化学特征再认识及成因讨论[J].岩石学报,2012,28(10):3139-3169.
- [10] 谢建成,杨晓勇,肖益林,等.铜陵矿集区中生代侵入岩成因及成矿意义[J].地质学报,2012,86(3):423-459.
- [11] 刘绍峰.安徽铜陵姚家岭锌金多金属矿床成矿作用研究[D].北京:中国地质大学,2012.
- [12] 刘绍峰,杜松松,付水兴,等.安徽姚家岭锌金多金属矿区花岗闪长斑岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素特征及其地质意义[J].地球科学,2013,38(1):91-102.
- [13] 钟国雄,周涛发,袁峰,等.安徽铜陵姚家岭锌金多金属矿床成岩成矿年代学研究[J].岩石学报,2014,30(4):1075-1086.
- [14] 刘建敏,闫峻,李全忠,等.铜陵姚家岭岩体的锆石定年和岩石成因[J].地质科学,2014,49(2):494-512.
- [15] XIONG Y Y, ZHOU T F, FAN Y, et al. Geochemistry and geochronology of the causative intrusion and a new genetic model study of the Yaojialing polymetallic skarn deposit, Tongling district, China[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(6):1997-2011.
- [16] 安徽省地质矿产勘查局 321 地质队.安徽省南陵县桂花冲铜金矿勘探报告[R].铜陵:安徽省地质矿产勘查局 321 地质队,2016.
- [17] 华东冶金地质勘察研究院 812 地质队.安徽省南陵县桂山铜金多金属矿普查地质报告[R].铜陵:华东冶金地质勘察研究院 812 地质队,2018.
- [18] 殷延端,罗雷,汪佩佩,等.安徽省铜陵桂山铜铅锌矿 C-H-O-S-Pb 同位素地球化学特征[J].地质科学,2018,53(4):1466-1478.
- [19] 左晓敏.安徽桂花冲铜矿床地质与成矿流体地球化学[D].北京:中国地质大学,2015.
- [20] 岳紫龙.安徽桂花冲铜矿床特征与成因[D].北京:中国地质大学,2015.
- [21] 范裕,常印佛,周涛发,等.中国矿产地质:长江中下游卷[M].北京:地质出版社,2019:75-125.
- [22] MAO J W, WANG Y T, LEHMANN B, et al. Molybdenite Re-Os and albite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of Cu-Au-Mo and magnetite porphyry systems in the Yangtze River valley and metallogenic implications[J]. Ore Geology Reviews, 2006, 29(3/4):307-324.
- [23] 吴淦国,张达,狄永军,等.铜陵矿集区侵入岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其深部动力学背景[J].中国科学(D辑:地球科学),2008,38(5):630-645.
- [24] LING M X, WANG F Y, DING X, et al. Cretaceous ridge subduction along the Lower Yangtze River belt, eastern China[J]. Economic Geology, 2009, 104(2):303-321.
- [25] LING M X, WANG F Y, DING X, et al. Different origins of adakites from the Dabie Mountains and the Lower Yangtze River belt, eastern China: geochemical constraints [J]. International Geology Review, 2011, 53 (5/6): 727-740.
- [26] LIU Y, HU Z, GAO S, et al. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. Chem Geol, 2008, 257:34-43.
- [27] 宁思远,汪方跃,薛纬栋,等.长江中下游铜陵地区宝山岩体地球化学研究[J].地球化学,2017,46(5):397-412.
- [28] 汪方跃,葛黎,宁思远,等.一个新的矿物面扫描分析方法开发和地质学应用[J].岩石学报,2017,33(11):3422-3436.
- [29] WIEDENBECK M, ALLE P, CORFU F, et al. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses[J]. Geostandards and Geoanalytical Research, 1995, 19(1):1-23.
- [30] LUDWIG K R. ISOPLOT 3.00: a geochronological toolkit for microsoft excel [J]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2003, 39:91-445.
- [31] 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.
- [32] MIDDLEMOST E A K. Naming materials in the magma/igneous rock system [J]. Earth-Science Reviews, 1994, 37(3/4):215-224.
- [33] PECCERILLO A, TAYLOR A R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2016.

- tology, 1976, 58: 63-81.
- [34] MANIAR P D, PICCOLI P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. Geological Society of America Bulletin, 1989, 101: 635-643.
- [35] SUM S S, MCDONOUGH W F. Chemical and isotope systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. Geological Society of London, 1989, 42: 313-345.
- [36] 章森桂, 张允白, 严惠君. “国际地层表”(2008)简介[J]. 地层学杂志, 2009, 33(1): 1-10.
- [37] 周忠和, 贺怀宇, 汪筱林. 侏罗系-白垩系界线和我国东北地区下白垩统陆相地层相关问题的探讨[J]. 古生物学报, 2009, 48(3): 541-555.
- [38] 吴星星, 闫峻, 唐裕禄, 等. 安徽铜陵沙滩脚岩体年代学及地球化学特征[J]. 矿物岩石, 2011, 31(1): 75-82.
- [39] 殷延端, 洪天求, 贾志海, 等. 铜陵姚家岭锌金多金属矿的辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及成矿物质来源[J]. 地质论评, 2016, 62(1): 248-256.
- [40] 刘政. 安徽铜陵姚家岭锌金多金属矿床成岩成矿作用研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
- [41] 黄文明, 吴才来, 高栋, 等. 安徽铜陵沙滩脚矿田中酸性侵入岩成因及构造意义[J]. 中国地质, 2019, 46(4): 861-877.
- [42] JAHN B M, WU F Y, LO C H, et al. Crust-mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust: geochemical and Sr-Nd isotopic evidence from post-collisional mafic-ultramafic intrusions of the northern Dabie complex, central China[J]. Chemical Geology, 1999, 157: 119-146.
- [43] 朱炳泉. 地球科学中同位素体系理论与运用: 兼论中国大陆地壳演化[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 1-65.
- [44] SUN W D, LING M X, YANG X Y, et al. Ridge subduction and porphyry copper-gold mineralization: an overview[J]. Science China Earth Sciences, 2010, 53(4): 475-484.
- [45] 张旗, 王焰, 钱青, 等. 中国东部燕山期埃达克岩的特征及其构造: 成矿意义[J]. 岩石学报, 2001, 17(2): 236-244.
- [46] 王彦斌, 刘敦一, 曾普胜, 等. 铜陵地区小铜官山石英闪长岩锆石 SHRIMP 的 U-Pb 年龄及其成因指示[J]. 岩石矿物学杂志, 2004, 23(4): 298-304.
- [47] 王彦斌, 刘敦一, 曾普胜, 等. 安徽铜陵地区幔源岩浆底侵作用的年代: 朝山辉石闪长岩锆石 SHRIMP 定年[J]. 地球学报, 2004, 78(4): 423-427.
- [48] 王彦斌, 刘敦一, 蒙义峰, 等. 安徽铜陵新桥铜-硫-铁-金矿床中石英闪长岩和辉绿岩锆石 SHRIMP 年代学及其意义[J]. 中国地质, 2004, 31(2): 169-173.
- [49] 钟国雄. 安徽铜陵姚家岭锌金多金属矿床成矿机制与找矿方向研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
- [50] 董树文, 马立成, 刘刚, 等. 论长江中下游成矿动力学[J]. 地质学报, 2011, 85(5): 612-625.
- [51] 吕庆田, 董树文, 汤井田, 等. 多尺度综合地球物理探测: 揭示成矿系统、助力深部找矿: 长江中下游深部探测(Sino-Probe-03)进展[J]. 地球物理学报, 2015, 58(12): 4319-4343.

(责任编辑 吴亮)

(上接第 1067 页)

- [15] 刘光斌, 滕向如, 余志勇, 等. 基于雷电流注入的圆柱表面电流分布仿真研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(1): 94-99.
- [16] 彭永忠. 高速铁路简支箱梁施工组织设计研究[D]. 长沙: 中南大学, 2007.
- [17] 中华人民共和国铁道部. 客运专线综合接地技术实施办法(暂行): 铁集成[2006]220号[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2006: 1-16.
- [18] 焦耀锋. 雷电流模型及其瞬态电磁效应研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2021.
- [19] 朱德贵. 航天发射场雷击电磁瞬态特性分析及防护研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021.
- [20] GIACCOLETTO L J. Frequency-and time-domain analysis of skin effects[J]. IEEE Transactions on Magnetism, 1996, 32(1): 220-229.
- [21] SARGENT M, DARVENIZA M. Tower surge impedance[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, 2007, 88(5): 680-687.
- [22] 黄渤. 高速铁路弱电设备接地雷电冲击响应特性[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- [23] 史秀红. 雷击对铁路信号系统的影响[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- [24] 中华人民共和国质量监督检验检疫总局. 雷电电磁脉冲防护: GB/T 19727.1-2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006: 1-28.

(责任编辑 张镛)