

文章编号:1672-6561(2014)01-0152-09

## 安徽铜山铜(金)矿床锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素地球化学

余良范<sup>1</sup>, 毛丽达·尼合买提<sup>2</sup>, 古黄玲<sup>2</sup>, 褚庚<sup>2</sup>, 杨晓勇<sup>2</sup>

(1. 安徽省国土资源厅地质调查中心, 安徽 合肥 230001;

2. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 安徽 合肥 230026)

**摘 要:** 安徽池州的铜山岩体是长江中下游地区沿江岩浆岩主带中的含矿岩体之一, 其形成年龄及岩石成因尚存在争议。该岩体主要由石英闪长玢岩、石英二长斑岩和花岗闪长岩组成, 与铜金矿化关系密切。对铜山矽卡岩型铜(金)矿床的花岗闪长岩开展了锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素地球化学研究。岩石地球化学及同位素年代学研究结果表明: 花岗闪长岩侵入年龄为  $(146.3 \pm 3.2)$  Ma, 形成于早白垩世; 锆石  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值平均为  $-5.23$ , 说明铜山侵入岩具有壳幔混合的岩浆岩源区性质; 锆石的二阶段 Hf 模式年龄分布在  $1\,184.51 \sim 1\,422.72$  Ma 之间, 说明岩浆源区与皖南地区出露的中元古代基底有密切关系。构造判别图解显示, 铜山岩体属火山弧花岗岩, 与长江中下游铜金矿床含矿岩体形成于同一构造背景下, 据此推测铜山地区大地构造背景形成于与古太平洋板块俯冲密切相关的大陆边缘岩浆弧环境。

**关键词:** 铜(金)矿床; Hf 同位素; 锆石 U-Pb 年龄; 花岗闪长岩; 早白垩世; 太平洋板块俯冲; 长江中下游成矿带; 安徽

中图分类号: P588.12<sup>+</sup>1; P597<sup>+</sup>.3 文献标志码: A

## Zircon U-Pb Geochronology and Hf Isotopic Geochemistry of the Tongshan Cu (Au) Deposit in Anhui

YU Liang-fan<sup>1</sup>, NIHEMAITI Maolida<sup>2</sup>, GU Huang-ling<sup>2</sup>, CHU Geng<sup>2</sup>, YANG Xiao-yong<sup>2</sup>

(1. Geological Survey Center, Department of Land and Resources of Anhui Province, Hefei 230001, Anhui, China;

2. School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China)

**Abstract:** Tongshan intrusion in Chizhou of Anhui is one of the ore-bearing intrusions in the main magmatic belt along the middle-lower Yangtze River, and the formation age and rock genesis are still controversial. The intrusion is mainly composed of quartz diorite, quartz monzonitic porphyry and granodiorite, and has close relationship with the Cu-Au mineralization. Zircon U-Pb geochronology and Hf isotopic geochemistry of granodiorite in Tongshan skarn Cu (Au) deposit were studied. Results of petrogeochemistry and isotope chronology show that the age of granodiorite intrusion, which forms in Early Cretaceous, is  $(146.3 \pm 3.2)$  Ma; the average of zircon  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  is  $-5.23$ , illustrating that Tongshan intrusion has the characteristics of magmatite provenance with crust mantle mixing; distributions of two-phase Hf model ages of zircon are  $1\,184.51 \sim 1\,422.72$  Ma, indicating that magma source has significant relationship with the

收稿日期: 2014-03-05

基金项目: 安徽省国土资源科技项目(2011-K-08); 国家自然科学基金项目(41090372, 41173057)

作者简介: 余良范(1963-), 男, 安徽安庆人, 高级工程师, E-mail: ylf1668@sina.com。

通讯作者: 杨晓勇(1964-), 男, 安徽颖上人, 教授, 博士研究生导师, 理学博士, E-mail: xyang555@163.com。

outcropped Mesoproterozoic basement in southern Anhui. The discrimination diagrams show that Tongshan intrusions belong to the island-arc granite (VAG), and the tectonic background of the intrusions is same as the ore-bearing rocks of Cu-Au deposits along the middle-lower Yangtze River, so that it is inferred that the geotectonic backgrounds form in continental margin magmatic arc related to Paleo-Pacific Plate subduction.

**Key words:** Cu (Au) deposit; Hf isotope; zircon U-Pb age; granodiorite; Early Cretaceous; Pacific Plate subduction; the middle-lower Yangtze River metallogenic belt; Anhui

## 0 引言

长江中下游成矿带位于扬子板块北缘的长江断裂带内。该区自晋宁期以来,经历了古生代盖层沉积阶段和中生代板内变形阶段,受特提斯构造域、古太平洋构造域和深部壳幔作用过程复合形成的中生代转换构造背景所控制<sup>[1-5]</sup>,长期的构造作用、岩浆活动和成矿作用形成了断隆区和断凹区的次级构造格局及丰富多样的铁、铜、金多金属等矿床组合,金属矿床(点)有 200 余处,由多个各具特点的矿集区组成。长江中下游地区自西向东为鄂东南、九瑞、安庆—贵池、庐枞、铜陵、宁芜和宁镇等,其中庐枞、宁芜矿集区主要位于断陷火山地区(断凹区),铜陵、安庆—贵池、九瑞、宁镇等矿集区位于隆起区(断隆区)。长江中下游地区矿床类型多样<sup>[1]</sup>,其中由(层控)矽卡岩型、斑岩型和热脉型矿床为主组成的内生铜、铁、金成矿系列是长江中下游成矿带的主要成矿系列,与燕山期岩浆作用和演化有关,成矿带的成岩成矿特色显著。近年来,同位素年代学资料积累迅猛,年龄范围为 134~144 Ma<sup>[6-7]</sup>,表明大规模成矿事件发生在早白垩世。通过岩浆岩精确年代学和地球化学研究来约束岩体侵位时代、岩石成因及构造背景是近年来研究的热点。不同矿集区岩浆岩的锆石精确定年已有很多,但是对于安庆—贵池矿集区中贵池岩段的研究相对较少,尤其是精确的锆石 U-Pb 定年及岩石成因研究显得薄弱,因而限制了对长江中下游地区中生代岩浆作用时空分布规律及成岩机制的认识。

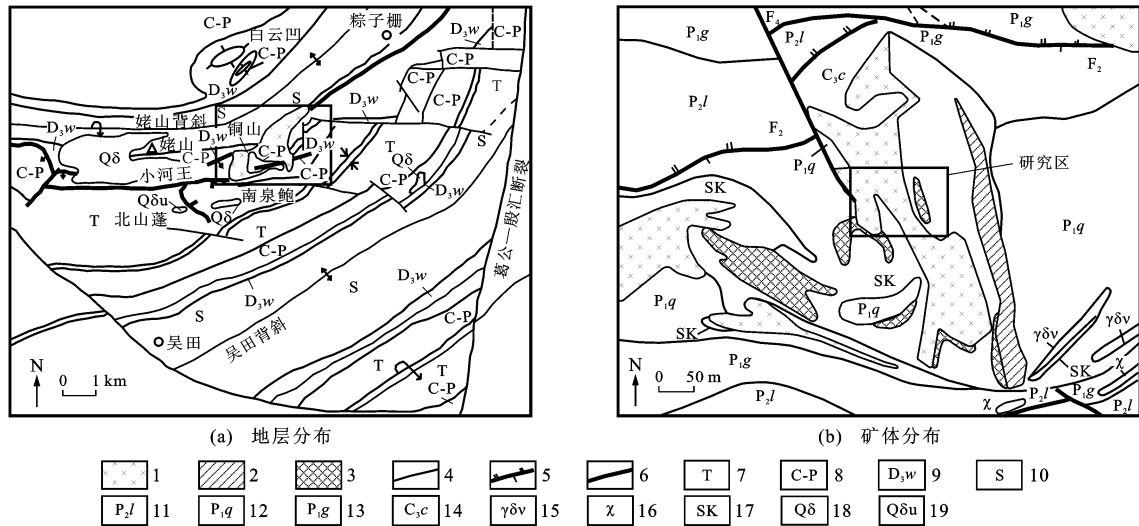
铜山铜矿位于铜陵—安庆矿集区的中部,属层控矽卡岩型矿床<sup>[1]</sup>,前人研究了其地质特征、矿床成因<sup>[8-11]</sup>,但成矿年龄研究甚少。因此,铜山岩体究竟侵位于何时?岩石究竟属于何种成因类型?揭示的构造意义如何?这些问题都没有详细探讨。笔者以安徽池州地区铜山铜矿床岩浆岩为研究对象,通过高精度锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素地球化学研究,探讨含矿岩浆岩的成因和源区,进而为约束长江中下游地区中生代岩浆作用动力学提供依据。

## 1 区域地质背景

铜山铜矿位于长江深断裂南缘,矿区出露地层主要有志留系、泥盆系、石炭系、二叠系和三叠系地层。其中,与矿化关系密切的地层主要有石炭系中统黄龙组( $C_2h$ )、石炭系上统船山组( $C_3c$ )、二叠系下统栖霞组( $P_1q$ )、二叠系下统孤峰组( $P_1g$ )等碳酸盐地层。与本区成矿作用密切相关的成矿岩体是矿区范围内与燕山期岩浆侵入活动有关的成矿母岩,岩浆受对撞挤压上侵而形成的花岗闪长岩矿化较强烈(图 1)。岩体上侵后与碳酸盐地层接触交代作用强烈,接触带附近矽卡岩化发育,热液蚀变较强,主要有硅化、黄铁矿化、绿泥石化、碳酸盐化和钾长石化等。铜山铜矿出露有花岗闪长岩、矽卡岩和一些碳酸盐岩地层,属于露天开采的矿山。

铜山岩体主要由花岗闪长岩组成,呈岩枝状,受控于 NNW 向与 NWW 向共轭剪切断裂,其锐角等分线平行于最大压应力方向,岩体属燕山早期,对于年代学报道有 134、145.1 Ma<sup>[1,5]</sup>,主要侵位于二叠系下统栖霞组灰岩中(图 1),岩石具斑状—似斑状结构,主要矿物成分为:斜长石(体积分数为 35%~40%)、钾长石(25%~30%)、石英(20%~25%)以及暗色矿物黑云母和角闪石(10%~15%)。常见副矿物为榍石、磷灰石及磁铁矿等。花岗闪长岩常为少量绢云母、纤闪石和碳酸盐交代,一般蚀变较弱。矽卡岩在本区极为发育,主要产于接触带,岩石一般为致密块状,矽卡岩或石榴石矽卡岩最为发育,石榴石以钙铝—钙铁榴石为主,局部蚀变带可出现钙铁榴石或钙铝榴石<sup>[12]</sup>。石榴石体积分数一般可达 70%~90%。

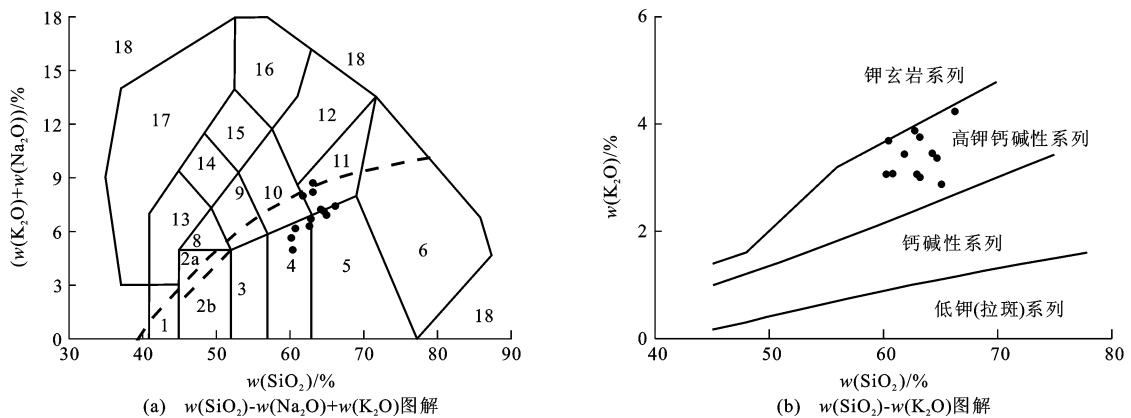
根据已有资料显示,铜山岩体的化学成分均显示富硅( $SiO_2$  含量(质量分数,下同)为 60.23%~66.23%)、富碱( $K_2O$  与  $Na_2O$  含量之和为 4.97%~8.72%)、低钙( $CaO$  含量为 2.61%~5.66%)、低镁( $MgO$  为 1.21%~2.92%)的特征<sup>[5,13]</sup>。铜山岩体岩石类型主要为花岗闪长岩、闪长岩、石英二长岩,岩石主要为高钾钙碱性系列(图 2)。



1—花岗闪长岩;2—含铜砂卡岩;3—含铜磁铁矿体;4—地质界线;5—逆断层;6—性质不明断层;7—三叠系;8—石炭系—二叠系;9—上泥盆统五通组;10—志留系;11—上二叠统龙潭组;12—下二叠统栖霞组;13—下二叠统孤峰组;14—上石炭统船山组;15—花岗闪长斑岩;16—煌斑岩;17—砂卡岩;18—石英闪长岩;19—石英闪长斑岩;图件引自文献[12],有所修改

图1 安徽铜山铜(金)矿床区域地质简图

Fig. 1 Geological Map of Tongshan Cu (Au) Deposit in Anhui



1—橄榄辉长岩;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—霓方钠岩/磷霞岩/粗白榴岩;底图引自文献[5]、[13]~[15],有所修改

图2 铜山岩体  $w(SiO_2)-w(Na_2O)+w(K_2O)$  图解和  $w(SiO_2)-w(K_2O)$  图解

Fig. 2 Diagrams of  $w(SiO_2)-w(Na_2O)+w(K_2O)$  and  $w(SiO_2)-w(K_2O)$  of Tongshan Intrusion

笔者选择矿区露天采场的新鲜花岗闪长岩作为研究样品,对其开展锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素测定分析,以期限定其岩石属性和年代学范围,同时对岩浆岩源区属性进行探讨。

## 2 样品分析方法

### 2.1 锆石 U-Pb 年龄

选取铜山花岗闪长岩用于锆石 U-Pb 年代学测定。样品在机械破碎后,经浮选、电磁选和重液分选,在双目镜下挑纯,分选工作在河北省区域地质矿产调查研究所(廊坊)进行;在双目镜下挑选锆石颗

粒粘贴在环氧树脂表面制成标准的锆石分析靶,磨去表面树胶并将锆石磨去 1/3 左右,经抛光后进行透射光和反射光照相;再利用阴极发光(CL)照相分析锆石内部结构,锆石阴极发光图像分析在中国科学技术大学理化科学实验中心扫描电镜实验室完成,采用 FEI 公司 Sirion200 型电镜进行内部结构显微照相分析。

锆石微量元素含量和 U-Pb 同位素定年在中国科学院广州地球化学研究所同位素地质年代学与地球化学重点实验室利用 LA-ICP-MS 分析完成。激光剥蚀系统为 GeoLas 2005, ICP-MS 为 Agilent

7500a。激光剥蚀过程中,采用氦气作载气、氩气为补偿气以调节灵敏度,二者在进入 ICP 之前通过一个 T 型接口混合。在等离子体中心气流(Ar+He)中加入少量氮气,以提高仪器灵敏度、降低检出限和改善分析精密度。每个时间分辨分析数据包括20~30 s 的空白信号和 50 s 的样品信号。对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及 U-Th-Pb 同位素比值和年龄计算)采用软件 ICPMS DataCal<sup>[16]</sup>完成。详细的仪器操作条件和数据处理方法见文献[16]。

锆石微量元素含量利用多个 USGS 参考玻璃(BCR-2G、BIR-1G)作为外标、Si 作内标的方法进行定量计算<sup>[16]</sup>。这些 USGS 玻璃中元素含量的推荐值引自 GeoReM 数据库(<http://georem.mpch-mainz.gwdg.de/>)。U-Pb 同位素定年中,采用锆石标准 91500 作外标进行同位素分馏校正,每分析 5 个样品点,分析 2 次 91500。对于与分析时间有关的 U-Th-Pb 同位素比值漂移,利用 91500 的变化采用线性内插方式进行校正<sup>[16]</sup>。采用软件 ICPMS DataCal 处理锆石微量元素、同位素比值及年龄计算<sup>[16]</sup>,采用 Iso-plot 进行谐和年龄图绘制和加权平均年龄计算<sup>[17]</sup>。

## 2.2 锆石的 Hf 同位素

锆石年龄测定完成后,在原位上用 LA-MC-ICP-MS 进行 Lu-Hf 同位素分析。锆石原位 Hf 同位素分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室采用 GeoLas2005 激光剥蚀器的 Neptune 多接收电感耦合等离子体质谱(LA-MC-ICP-MS)完成,激光束斑直径为 63 nm,激光剥蚀时间为 26 s,详细的仪器运行条件及实验流程见文献[18]。实验获得标准锆石 91500 的  $N(^{176}\text{Hf})/N(^{177}\text{Hf})$  值与文献[19]报道的

数值在误差范围内一致。在计算  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值、单阶段亏损地幔模式年龄( $T_{\text{DM1}}$ )和二阶段 Hf 亏损地幔模式年龄( $T_{\text{DM2}}$ )时, $^{176}\text{Lu}$  的衰变常数  $\lambda$  采用每年  $1.867 \times 10^{-11}$ <sup>[20]</sup>,球粒陨石的  $n(^{176}\text{Lu})/n(^{177}\text{Hf})$ 、 $N(^{176}\text{Hf})/N(^{177}\text{Hf})$  值分别采用 0.033 2 和 0.282 772<sup>[21]</sup>,亏损地幔的  $N(^{176}\text{Hf})/N(^{177}\text{Hf})$ 、 $n(^{176}\text{Lu})/n(^{177}\text{Hf})$  值分别采用 0.283 25 和 0.038 4<sup>[22]</sup>,平均大陆地壳的  $n(^{176}\text{Lu})/n(^{177}\text{Hf})$  值采用 0.015<sup>[23]</sup>。

## 3 同位素地质年代学

花岗闪长岩锆石(03TS8)呈半自形—自形,多数为无色透明,部分为淡黄色,晶体较大,振荡环带明显,长为 105~200  $\mu\text{m}$ ,长宽比为 1.5:1~5:1(图 3)。Vavra 等认为锆石 CL 图像可以区分岩浆锆石和变质锆石<sup>[24]</sup>,现已被广泛接受。本样品锆石的 CL 晶形特征及发光强度直接显示其岩浆成因,而且锆石的微量元素特征(尤其是微量元素 U、Th 含量的相关性)也间接说明其源自岩浆<sup>[25]</sup>。样品中大多数锆石具有显著的韵律环带,核部 CL 强度较弱,外围 CL 强度较高,反映了 U、Th 含量的变化,结晶环带和  $w(\text{Th})/w(\text{U})$  值特征均说明锆石为岩浆成因。值得注意的是,个别锆石虽然具有核边结构,但环带不明显而具有面状分布特征,此类锆石 CL 强度较高, $w(\text{Th})/w(\text{U}) > 0.4$ ,也是岩浆成因,只不过它们可能为残留的古老岩浆锆石,由于年龄较老且受后期岩浆作用影响较大而发生了重结晶作用,使得锆石韵律环带结构消失。

样品 03TS8 测试结果列于表 1,该样品共测定 20 粒锆石,获得有效年龄 18 个,并给出了不均一的 U、Th 含量。

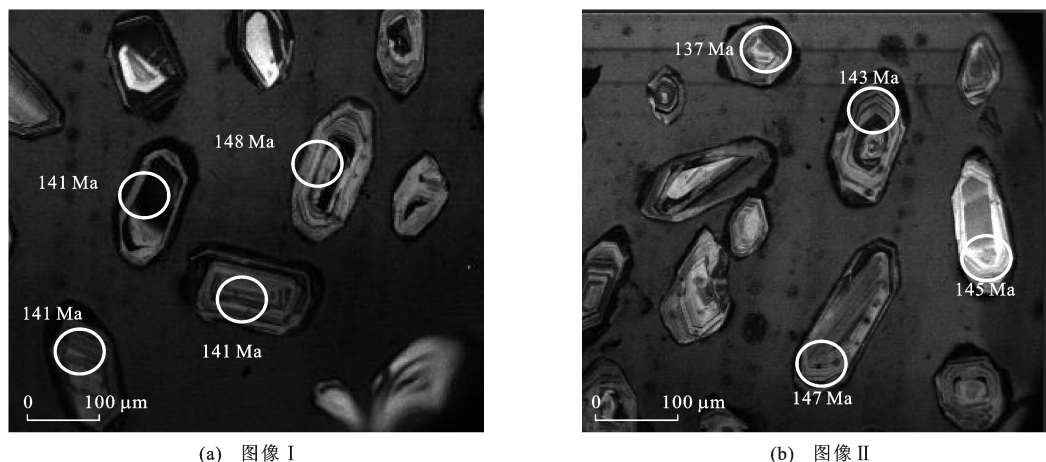


图 3 铜山岩体花岗闪长岩锆石 CL 图像

Fig. 3 Zircon CL Images of Granodiorite of Tongshan Intrusion



表 1 铜山岩体花岗闪长岩锆石 U-Pb 年龄分析结果

Tab. 1 Results of Zircon U-Pb Ages of Granodiorite of Tongshan Intrusion

测点号	$w(\text{Th})/10^{-6}$	$w(\text{U})/10^{-6}$	$w(\text{Th})/w(\text{U})$	$N(^{207}\text{Pb})/N(^{206}\text{Pb})$	$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$	$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$	$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 年龄/Ma
03TS08-1	32.57	26.65	1.22	$0.048\ 1\pm0.004\ 2$	$0.147\ 3\pm0.016\ 5$	$0.022\ 2\pm0.000\ 6$	$142\pm4$
03TS08-2	16.80	26.01	0.65	$0.053\ 7\pm0.004\ 9$	$0.175\ 7\pm0.020\ 4$	$0.023\ 7\pm0.000\ 6$	$151\pm4$
03TS08-3	23.16	28.76	0.81	$0.051\ 4\pm0.004\ 5$	$0.161\ 2\pm0.018\ 1$	$0.022\ 3\pm0.000\ 6$	$142\pm4$
03TS08-4	8.65	12.17	0.71	$0.055\ 3\pm0.006\ 7$	$0.177\ 2\pm0.027\ 1$	$0.022\ 7\pm0.000\ 8$	$145\pm5$
03TS08-5	22.41	41.79	0.54	$0.049\ 8\pm0.004\ 6$	$0.154\ 8\pm0.017\ 9$	$0.022\ 1\pm0.000\ 5$	$141\pm4$
03TS08-6	33.50	28.10	1.19	$0.059\ 3\pm0.003\ 5$	$0.177\ 2\pm0.014\ 6$	$0.022\ 0\pm0.000\ 5$	$141\pm4$
03TS08-7	23.92	32.94	0.73	$0.047\ 7\pm0.004\ 6$	$0.146\ 9\pm0.018\ 0$	$0.023\ 2\pm0.000\ 6$	$148\pm4$
03TS08-8	12.05	15.65	0.77	$0.058\ 6\pm0.005\ 2$	$0.197\ 7\pm0.023\ 1$	$0.024\ 1\pm0.000\ 7$	$154\pm5$
03TS08-9	23.06	36.16	0.64	$0.048\ 9\pm0.005\ 1$	$0.154\ 1\pm0.021\ 4$	$0.022\ 8\pm0.000\ 9$	$145\pm6$
03TS08-10	15.50	22.84	0.68	$0.051\ 5\pm0.004\ 8$	$0.154\ 2\pm0.018\ 5$	$0.023\ 1\pm0.000\ 6$	$147\pm4$
03TS08-11	66.11	76.28	0.87	$0.046\ 5\pm0.004\ 0$	$0.145\ 2\pm0.015\ 8$	$0.022\ 4\pm0.000\ 5$	$143\pm4$
03TS08-12	7.73	11.59	0.67	$0.052\ 9\pm0.010\ 7$	$0.171\ 5\pm0.049\ 2$	$0.021\ 5\pm0.002\ 1$	$137\pm13$
03TS08-13	24.48	30.21	0.81	$0.050\ 0\pm0.005\ 6$	$0.165\ 3\pm0.022\ 8$	$0.024\ 6\pm0.000\ 7$	$157\pm5$
03TS08-14	68.65	57.09	1.20	$0.047\ 4\pm0.004\ 2$	$0.140\ 0\pm0.016\ 1$	$0.022\ 4\pm0.000\ 6$	$143\pm4$
03TS08-15	16.25	25.21	0.64	$0.044\ 3\pm0.005\ 2$	$0.144\ 5\pm0.020\ 9$	$0.023\ 2\pm0.000\ 6$	$148\pm4$
03TS08-17	31.19	36.24	0.86	$0.053\ 8\pm0.005\ 6$	$0.195\ 8\pm0.026\ 2$	$0.025\ 9\pm0.000\ 8$	$165\pm6$
03TS08-18	30.68	29.92	1.03	$0.059\ 7\pm0.004\ 1$	$0.200\ 1\pm0.019\ 0$	$0.024\ 5\pm0.000\ 7$	$156\pm5$
03TS08-20	14.42	18.48	0.78	$0.062\ 6\pm0.006\ 2$	$0.183\ 5\pm0.024\ 3$	$0.021\ 2\pm0.000\ 8$	$135\pm5$

注:误差类型为  $1\sigma$ ;  $w(\cdot)$  为元素含量;  $N(\cdot)/N(\cdot)$  为同一元素同位素比值,  $N(\cdot)$  为该元素的原子丰度;  $n(\cdot)/n(\cdot)$  为不同元素同位素比值,  $n(\cdot)$  为元素的物质的量。

20 个锆石分析点获得的锆石 Th 和 U 含量分别为  $(7.73\sim66.11)\times10^{-6}$ 、 $(11.59\sim76.28)\times10^{-6}$ ,  $w(\text{Th})/w(\text{U})$  值变化范围不大, 为  $0.54\sim1.22$ 。  $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$  年龄为  $(135\pm5)\sim(144\pm6)\text{Ma}$ , 加权平均年龄为  $(146.3\pm3.2)\text{Ma}$  (平均标准权重偏差 (MSWD) 为 1.3) (图 4)。

铜山岩体锆石 Lu-Hf 同位素分析结果见表 2。由表 2 可以看出, 7 个锆石有效点的二阶段模式年龄分布在  $1\ 184.51\sim1\ 422.72\ \text{Ma}$  之间 (图 5), 二阶段 Hf 模式年龄可以代表花岗岩原岩从亏损地幔脱离出

来的地质时间。铜山岩体锆石二阶段 Hf 模式年龄与皖南地区出露的中元古代基底年龄值相近 ( $1\ 200\sim1\ 800\ \text{Ma}$ )<sup>[26]</sup>,  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为  $-7.64\sim-2.08$  (图 6), 平均为  $-5.23$ , 具有壳幔混合的岩浆岩源区性质。Sr 同位素研究显示, 铜山岩体的初始  $N(^{87}\text{Sr})/N(^{86}\text{Sr})$  值为  $0.706\ 737\sim0.707\ 618$ <sup>[27-28]</sup>, 指示铜山岩体的物源来自陆壳和上地幔混合源区。综上所述, 铜山岩体岩浆物源与铜陵矿集区 (如铜官山岩体) 具有相似性<sup>[29]</sup>, 据此推测铜山岩体的初始岩浆可能源于皖南基底的部分熔融与地幔物质的混合。

表 2 铜山岩体锆石 Hf 同位素分析结果

Tab. 2 Results of Zircon Hf Isotope of Tongshan Intrusion

测点号	年龄/Ma	$n(^{176}\text{Yb})/n(^{177}\text{Hf})$	$n(^{176}\text{Lu})/n(^{177}\text{Hf})$	$N(^{176}\text{Hf})/N(^{177}\text{Hf})$	$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	$T_{\text{DM1}}$	$T_{\text{DM2}}$	$f_{\text{Lu/Hf}}$
03TS08-1	142	0.282 051	0.001 062	$0.282\ 551\pm0.000\ 012$	-8.79	-5.68	1 063	1 324	-0.97
03TS08-2	151	0.282 551	0.000 890	$0.282\ 496\pm0.000\ 015$	-10.77	-7.64	1 137	1 421	-0.97
03TS08-3	142	0.282 496	0.000 956	$0.282\ 497\pm0.000\ 013$	-10.71	-7.59	1 136	1 421	-0.97
03TS08-4	145	0.282 497	0.000 735	$0.282\ 548\pm0.000\ 013$	-8.92	-5.78	1 059	1 328	-0.98
03TS08-5	141	0.282 548	0.001 200	$0.282\ 628\pm0.000\ 012$	-6.07	-2.98	958	1 186	-0.96
03TS08-6	141	0.282 628	0.001 031	$0.282\ 574\pm0.000\ 012$	-7.98	-4.87	1 030	1 283	-0.97
03TS08-7	148	0.282 574	0.001 030	$0.282\ 653\pm0.000\ 014$	-5.19	-2.08	919	1 138	-0.97

注:  $\epsilon_{\text{Hf}} = [(N(^{167}\text{Hf})/N(^{177}\text{Hf}))_i / (N(^{167}\text{Hf})/N(^{177}\text{Hf}))_{\text{CHUR}} - 1] \times 10^4$ , 下标 i 表示初始比值, 下标 CHUR 表示球粒陨石均一源与样品同时的比值,  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  为年龄  $t$  对应的  $\epsilon_{\text{Hf}}$  值;  $f_{\text{Lu/Hf}}$  为富集系数。

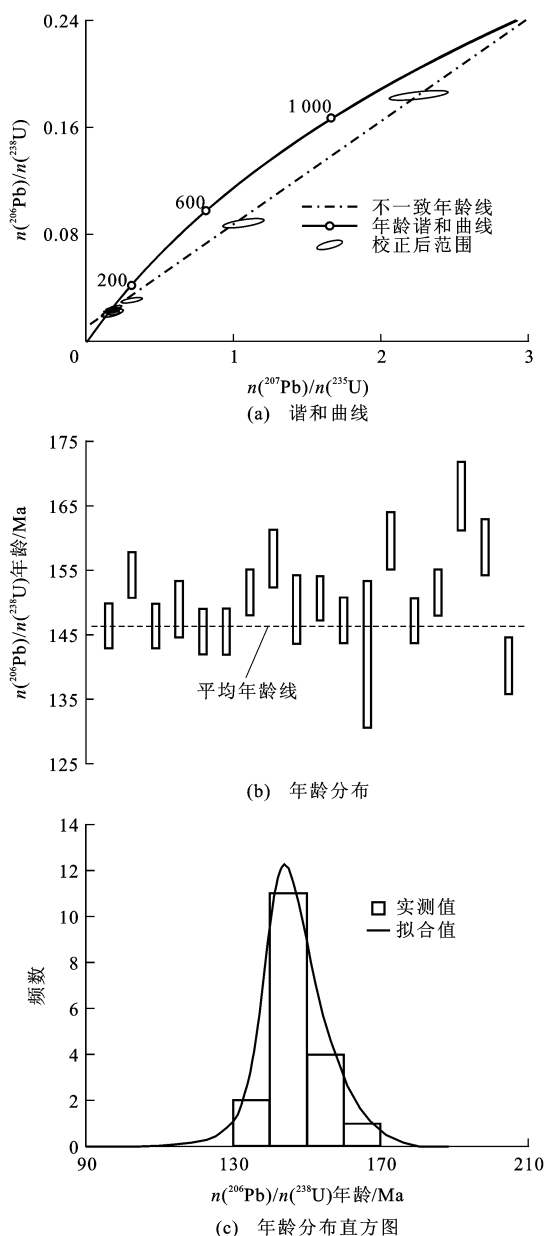


图 4 铜山岩体花岗闪长岩锆石 U-Pb 年龄谱和曲线和年龄分布

Fig. 4 Zircon U-Pb Concordia Diagram and Distributions of Ages of Granodiorite of Tongshan Intrusion

长江中下游地区中生代岩浆作用是中国东部大陆岩石圈减薄环境中大规模成岩成矿作用的一个重要组成部分。虽然该区岩浆岩形成时间比较集中,主要分布于 120~145 Ma<sup>[4]</sup>,但岩浆岩活动在时间上表现出显著的分区性和演化趋势。铜山岩体是贵池岩段长江系列岩体的典型代表,前人仅有的年代学资料显示单矿物黑云母 K-Ar 年龄为 139 Ma,全岩单矿物 Rb-Sr 等时线年龄为 142 Ma<sup>[30]</sup>,属于早白垩世。K-Ar 法和 Rb-Sr 法等时线测年的封闭温度较低,得到的年龄数据相对偏小,制约了对沿江岩浆

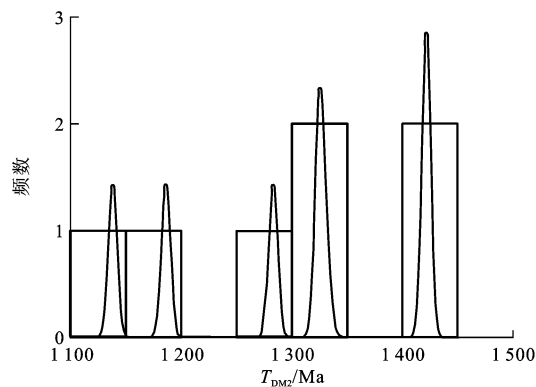


图 5 铜山岩体锆石 Lu-Hf 同位素二阶段模式年龄分布

Fig. 5 Distribution of Two-phase Model Ages of Zircon Lu-Hf Isotope of Tongshan Intrusion

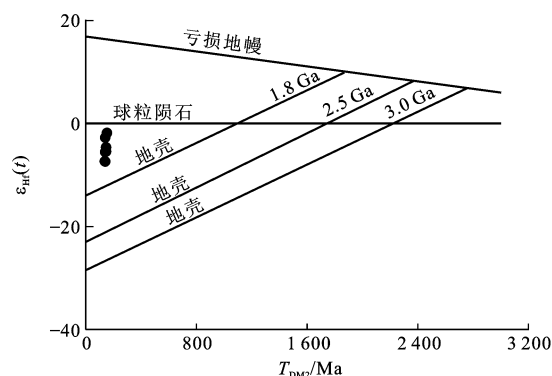
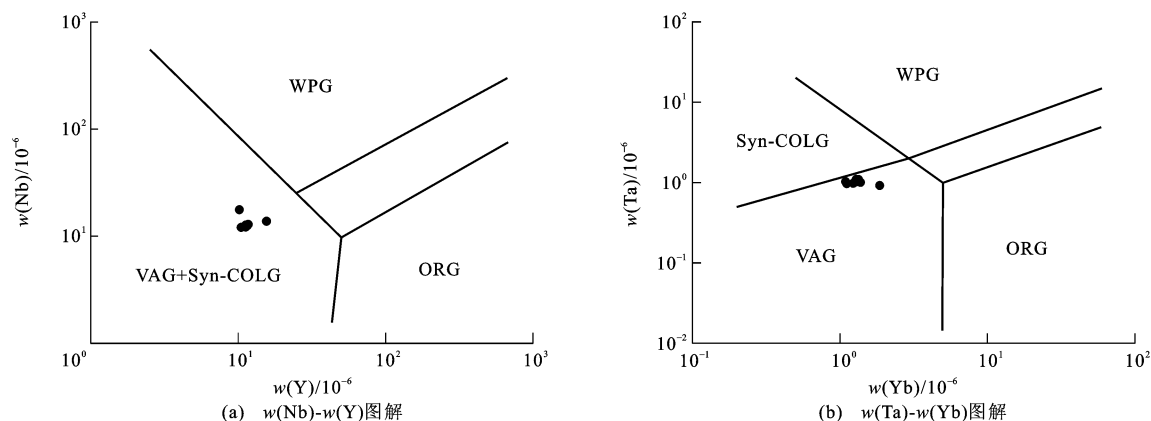


图 6 铜山岩体二阶段模式年龄与  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值的关系

Fig. 6 Relationship Between Two-phase Model Age and  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  Value of Tongshan Intrusion

岩带中生代岩浆作用时空分布、构造演化以及地球动力学的认识,而锆石 U-Pb 同位素测年系统中,锆石不易受后期地质作用所扰动,而且锆石 U-Pb 同位素体系有较高的封闭温度,其年龄更能精确代表岩体的形成年龄。(146.3±3.2)Ma 的锆石 U-Pb 年龄代表了该花岗闪长岩的形成时代,表明其是早白垩世的产物。与安庆—贵池矿集区内安庆岩段的月山岩体 ((138.7±0.5)~(139.3±1.5)Ma<sup>[31-33]</sup>) 相比,贵池岩段铜山岩体形成略早;与长江中下游沿江地区大部分岩浆岩形成时段 (120~145 Ma)<sup>[34-35]</sup> 相比,铜山岩体形成于长江中下游岩浆活动的早期,推测长江中下游沿江带以九江为起点向 NE 至沿海的成岩时代有变小的趋势<sup>[4,31]</sup>。

在构造环境判别图解中,铜山岩体都落在火山弧花岗岩范围内(图 7)<sup>[5]</sup>。根据长江中下游地区及其邻区的区域地质构造、早白垩世岩浆岩的岩石-地球化学特征和岩浆活动的时空演变特征,该区在早白垩世早期处于大陆边缘岩浆弧内陆一侧,相应的岩浆活动与古太平洋板块的斜向俯冲



VAG—火山弧花岗岩; Syn-CLOG—同碰撞花岗岩; WPG—板内花岗岩; ORG—洋脊花岗岩; 图件引自文献[5]、[36], 有所修改

图7 铜山岩体大地构造环境判别图解

Fig. 7 Discrimination Diagrams of Tectonic Environment of Tongshan Intrusion

作用有关, 晚期由于俯冲的岩片变陡, 发育具有弧后环境特征的岩浆岩<sup>[36-41]</sup>。岩石地球化学特征表明, 本区岩浆岩形成的大地构造背景应该是与古太平洋板块俯冲密切相关的大陆边缘岩浆弧内陆一侧的环境。

#### 4 结 语

(1) 锆石 U-Pb 谐和年龄和  $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$  加权平均年龄结果表明, 铜山花岗闪长岩侵入岩的成岩年龄为  $(146.3 \pm 3.2)\text{Ma}$ , 表明铜山岩体的形成时代在早白垩世, 与长江中下游地区大部分含矿岩体时代接近。

(2) 铜山岩体锆石  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值平均为  $-5.23$ , 说明铜山侵入岩具有壳幔混合的岩浆岩源区性质。

(3) 锆石二阶段 Hf 模式年龄分布在  $1184.51 \sim 1422.72\text{Ma}$  之间, 说明岩浆源区与皖南地区出露的中元古代基底有密切关系。

(4) 推测铜山地区大地构造背景形成于与古太平洋板块俯冲密切相关的大陆边缘岩浆弧环境。

#### 参考文献:

#### References:

- [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.  
CHANG Yin-fo, LIU Xiang-pei, WU Yan-chang. The Copper-iron Metallogenic Belt of the Middle-lower Yangtze River [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991.
- [2] 陶奎元, 毛建仁, 杨祝良, 等. 中国东南部中生代岩石构造组合和复合动力学过程的记录 [J]. 地学前缘, 1998, 5(4): 183-191.  
TAO Kui-yuan, MAO Jian-ren, YANG Zhu-liang, et al.

Mesozoic Petro-tectonic Associations and Records of the Geodynamic Processes in Southeast China [J]. Earth Science Frontiers, 1998, 5(4): 183-191.

- [3] 戚建中, 刘红樱, 姜耀辉. 中国东部燕山期俯冲走滑体制及其对成矿定位的控制 [J]. 火山地质与矿产, 2000, 21(4): 244-265.  
QI Jian-zhong, LIU Hong-ying, JIANG Yao-hui. Yanshanian Subduction and Strike-sliping Regime of East China, and Its Control of Ore Localization [J]. Volcanology and Mineral Resources, 2000, 21(4): 244-265.
- [4] ZHOU T F, FAN Y, YUAN F, et al. Geochronology of the Volcanic Rocks in the Lu-Zong Basin and Its Significance [J]. Science in China: Series D, 2008, 51(10): 1470-1482.
- [5] 张智宇, 杜杨松, 张 静, 等. 安徽贵池铜山岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学与岩石地球化学特征研究 [J]. 地质论评, 2011, 57(3): 366-378.  
ZHANG Zhi-yu, DU Yang-song, ZHANG Jing, et al. SHRIMP Zircon U-Pb Geochronology, Petrochemical and Geochemical Characteristics of Tongshan Intrusion in Guichi, Anhui Province [J]. Geological Review, 2011, 57(3): 366-378.
- [6] DENG J, WANG Q F, XIAO C H, et al. Tectonic-magmatic-metallogenic System, Tongling Ore Cluster Region, Anhui Province, China [J]. International Geology Review, 2011, 53(5/6): 449-476.
- [7] YANG X Y, LEE I. Review of the Stable Isotope Geochemistry of Mesozoic Igneous Rocks and Cu-Au Deposits Along the Middle-lower Yangtze Metallogenic Belt, China [J]. International Geology Review, 2011, 53(5/6): 741-757.
- [8] 俞沧海, 袁小明. 贵池铜山岩体岩石化学与地球化学特征 [J]. 安徽地质, 1999, 9(3): 194-198.  
YU Cang-hai, YUAN Xiao-ming. The Petrochemical

- and Geochemical Characteristics of the Tongshan Intrusive, Guichi[J]. *Geology of Anhui*, 1999, 9(3): 194-198.
- [9] 俞沧海. 贵池铜山铜矿床成因探讨[J]. *地质与勘探*, 2001, 37(2): 12-16.  
YU Cang-hai. Study on the Genesis of Tongshan Copper Ore Deposit in Guichi[J]. *Geology and Prospecting*, 2001, 37(2): 12-16.
- [10] 周曙光. 安徽铜山矿床成矿物质来源及成矿作用探讨[J]. *矿产与地质*, 2003, 17(5): 610-612.  
ZHOU Shu-guang. Matter Source of the Tongshan Deposit and Its Mineralization[J]. *Mineral Resources and Geology*, 2003, 17(5): 610-612.
- [11] 左胜平. 铜山铜矿找矿预测[J]. *矿业快报*, 2003(12): 25-26.  
ZUO Sheng-ping. Exploration Predicting of Tongshan Copper Deposit[J]. *Express Information of Mining Industry*, 2003(12): 25-26.
- [12] 邱瑞龙. 铜山铜矿矽卡岩稀土元素地球化学特征[J]. *地质学报*, 1987(1): 91-100.  
QIU Rui-long. REE Geochemistry of Skarns in the Tongshan Copper Deposit, Guichi, Anhui Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1987(1): 91-100.
- [13] 赵晓霞, 戴塔根, 张宇, 等. 安徽贵池铜山铜矿成矿地质条件及矿床成因[J]. *中国有色金属学报*, 2012, 22(3): 827-836.  
ZHAO Xiao-xia, DAI Ta-gen, ZHANG Yu, et al. Ore-forming Geological Conditions and Deposit Genesis of Tongshan Copper Deposit in Guichi, Anhui Province, China[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2012, 22(3): 827-836.
- [14] MIDDLEMOST E A K. Naming Materials in the Magma/Igneous Rock System[J]. *Earth-science Reviews*, 1994, 37(3/4): 215-224.
- [15] RICKWOOD P C. Boundary Lines Within Petrologic Diagrams Which Use Oxides of Major and Minor Elements[J]. *Lithos*, 1989, 22(4): 247-263.
- [16] LIU Y S, GAO S, HU Z C, et al. Continental and Oceanic Crust Recycling-induced Melt-peridotite Interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb Dating, Hf Isotopes and Trace Elements in Zircons from Mantle Xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 2010, 51(1/2): 537-571.
- [17] LUDWIG K R. User's Manual for Isoplot 3.0: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[R]. Reston: USGS, 2003.
- [18] YUAN H L, GAO S, DAI M N, et al. Simultaneous Determinations of U-Pb Age, Hf Isotopes and Trace Element Compositions of Zircon by Excimer Laser-ablation Quadrupole and Multiple-collector ICP-MS[J]. *Chemical Geology*, 2008, 247(1/2): 100-118.
- [19] GRIFFIN W L, PEARSON N J, BELOUSOVA E A, et al. Comment: Hf-isotope Heterogeneity in Zircon 91500[J]. *Chemical Geology*, 2006, 233(3/4): 358-363.
- [20] SODERLUND U, PATCHETT P J, VERVOORT J D, et al. The  $^{176}\text{Lu}$  Decay Constant Determined by Lu-Hf and U-Pb Isotope Systematics of Precambrian Mafic Intrusions[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 219(3/4): 311-324.
- [21] BLICHERT-TOFT J, ALBAREDE F. The Lu-Hf Isotope Geochemistry of Chondrites and the Evolution of the Mantle-crust System[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1997, 148(1/2): 243-258.
- [22] GRIFFIN W L, PEARSON N J, BELOUSOVA E, et al. The Hf Isotope Composition of Cratonic Mantle: LAM-MC-ICP-MS Analysis of Zircon Megacrysts in Kimberlites[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64(1): 133-147.
- [23] GRIFFIN W L, WANG X, JACKSON S E, et al. Zircon Chemistry and Magma Mixing, SE China: In-situ Analysis of Hf Isotopes, Tonglu and Pingtan Igneous Complexes[J]. *Lithos*, 2002, 61(3/4): 237-269.
- [24] VAVRA G, SCHMID R, GEBAUER D. Internal Morphology, Habit and U-Th-Pb Microanalysis of Amphibolite-to-granulite Facies Zircon: Geochronology of the Ivren Zone (Southern Alps)[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1999, 134(4): 380-404.
- [25] HANCHAR J M, MILLER C F. Zircon Zonation Patterns as Revealed by Cathodoluminescence and Back-scattered Electron Images: Implications for Interpretation of Complex Crustal Histories[J]. *Chemical Geology*, 1993, 110(1/2/3): 1-13.
- [26] 王文斌, 李文达, 范洪源. 长江中下游地区变质基底及地壳形成时间[J]. *火山地质与矿产*, 1996, 17(3/4): 42-50.  
WANG Wen-bin, LI Wen-da, FAN Hong-yuan. Time of Formation for Metamorphic Basement and Crust in the Middle-lower Reaches of Yangtze River[J]. *Volcanology and Mineral Resources*, 1996, 17(3/4): 42-50.
- [27] 陈江峰, 周泰禧, 李学明, 等. 安徽南部燕山期中酸性侵入岩的源区锆、钨同位素制约[J]. *地球化学*, 1993(3): 261-268.  
CHEN Jiang-feng, ZHOU Tai-xi, LI Xue-ming, et al. Sr and Nd Isotopic Constraints on Source Regions of the Intermediate and Acid Intrusions from Southern Anhui Province[J]. *Geochimica*, 1993(3): 261-268.



- [28] 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.  
TANG Yong-cheng, WU Yan-chang, CHU Guo-zheng, et al. Geological Characteristics of Copper-gold Polymetallic Deposit Along the Yangtze River of Anhui Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998.
- [29] XU X S, FAN Q C, O'REILLY S Y, et al. U-Pb Dating of Zircons from Quartz Diorite and Its Enclaves at Tongguanshan in Anhui and Its Petrogenetic Implication[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(19): 2073-2082.
- [30] 周余涛. 安徽铜山铜矿床有关地质体中稀土元素特征及其地质意义[J]. 安徽地质, 1997, 7(2): 51-58.  
ZHOU Yu-e. The Characteristics of REE in Some Geological Bodies of the Tongshan Copper Ore Deposit and Their Implications, Anhui Province[J]. Geology of Anhui, 1997, 7(2): 51-58.
- [31] 张智宇, 杜杨松, 向文帅, 等. 安徽安庆铜铁矿床成因: 矿床地质特征与元素地球化学约束[J]. 岩石学报, 2012, 28(11): 3739-3756.  
ZHANG Zhi-yu, DU Yang-song, XIANG Wen-shuai, et al. Genesis of Anqing Copper-iron Deposit, Anhui Province: Constraints from Mineral Deposit Geology and Element Geochemistry[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(11): 3739-3756.
- [32] 张乐骏, 周涛发, 范裕, 等. 安徽月山岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其意义[J]. 岩石学报, 2008, 24(8): 1725-1732.  
ZHANG Le-jun, ZHOU Tao-fa, FAN Yu, et al. SHRIMP U-Pb Zircon Dating of Yueshan Intrusion in the Yueshan Ore Field, Anhui, and Its Significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(8): 1725-1732.
- [33] 刘园园, 马昌前, 张超, 等. 安徽月山闪长岩的成因探讨——锆石 U-Pb 定年及 Hf 同位素证据[J]. 地质科技情报, 2009, 28(5): 22-30.  
LIU Yuan-yuan, MA Chang-qian, ZHANG Chao, et al. Petrogenesis of Yueshan Pluton in Anhui—Zircon U-Pb Dating and Hf Isotope Evidence[J]. Geological Science and Technology Information, 2009, 28(5): 22-30.
- [34] 杜杨松, 李顺庭, 曹毅, 等. 安徽铜陵铜官山矿区中生代侵入岩的形成过程——岩浆底侵、同化混染和分离结晶[J]. 现代地质, 2007, 21(1): 71-77.  
DU Yang-song, LI Shun-ting, CAO Yi, et al. UAF-related Origin of the Late Jurassic to Early Cretaceous Intrusions in the Tongguanshan Ore Field, Tongling, Anhui Province, East China[J]. Geoscience, 2007, 21(1): 71-77.
- [35] 陈江峰, 喻钢, 杨刚, 等. 安徽沿江江南晚中生代岩浆-成矿年代学格架[J]. 安徽地质, 2005, 15(3): 161-169.  
CHEN Jiang-feng, YU Gang, YANG Gang, et al. A Geochronological Framework of Late Mesozoic Magmatism and Metallogenesis in the Lower Yangtze Valley, Anhui Province[J]. Geology of Anhui, 2005, 15(3): 161-169.
- [36] PEARCE J A, HARRIS N B W, TINDLE A G. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks[J]. Journal of Petrology, 1984, 25(4): 956-983.
- [37] XIE G Q, MAO J W, LI X W, et al. Late Mesozoic Bimodal Volcanic Rocks in the Jinniu Basin, Middle-lower Yangtze River Belt (YRB), East China: Age, Petrogenesis and Tectonic Implications[J]. Lithos, 2011, 127(1/2): 144-164.
- [38] YANG S Y, JIANG S Y, LI L, et al. Late Mesozoic Magmatism of the Jiurui Mineralization District in the Middle-lower Yangtze River Metallogenic Belt, Eastern China: Precise U-Pb Ages and Geodynamic Implications[J]. Gondwana Research, 2011, 20(4): 831-843.
- [39] ZHOU T F, FAN Y, YUAN F, et al. Geochronology and Significance of Volcanic Rocks in the Ning-Wu Basin of China[J]. Science China: Earth Sciences, 2011, 54(2): 185-196.
- [40] 汪洋, 邓晋福, 姬广义. 长江中下游地区早白垩世埃达克质岩的大地构造背景及其成矿意义[J]. 岩石学报, 2004, 20(2): 297-314.  
WANG Yang, DENG Jin-fu, JI Guang-yi. A Perspective on the Geotectonic Setting of Early Cretaceous Adakite-like Rocks in the Lower Reaches of Yangtze River and Its Significance for Copper-gold Mineralization[J]. Acta Petrologica Sinica, 2004, 20(2): 297-314.
- [41] MAO J W, XIE G Q, DUAN C, et al. A Tectono-genetic Model for Porphyry-skarn-stratabound Cu-Au-Mo-Fe and Magnetite-apatite Deposits Along the Middle-lower Yangtze River Valley, Eastern China[J]. Ore Geology Reviews, 2011, 43(1): 294-314.