

# 铜陵地区中生代侵入岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学及 Cu-Au 成矿指示意义\*

谢建成<sup>1,2</sup> 杨晓勇<sup>2\*\*</sup> 杜建国<sup>3</sup> 孙卫东<sup>2,4</sup>

XIE JianCheng<sup>1,2</sup>, YANG XiaoYong<sup>2\*\*</sup>, DU JianGuo<sup>3</sup> and SUN WeiDong<sup>2,4</sup>

1. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥 230009

2. 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026

3. 安徽省地质调查研究院, 合肥 230011

4. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China

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

3. Anhui Academy of Geological Survey, Hefei 230011, China

4. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2008-05-11 收稿, 2008-07-26 改回.

**Xie JC, Yang XY, Du JG and Sun WD. 2008. Zircon U-Pb geochronology of the Mesozoic intrusive rocks in the Tongling region: Implications for copper-gold mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 24(8):1782–1800**

**Abstract** Tongling region is one of the most important non-ferrous metal producers where the formation of Cu-Au deposits and other poly-metal deposits has close genetic relations with Mesozoic intrusions. In this study, LA-ICP-MS zircon chronology of three-type Mesozoic intrusives (i. e., quartz diorite—monzonite and granodiorite assemblies related with Cu-Au-S-Fe ore-forming) was systematically investigated in Tongling region. The results of high precise zircon U-Pb ages possibly present the sequences of the intrusive evolutions in Tongling region as follows: granodiorite (141Ma) → pyroxene diorite-pyroxene monzodiorite (139Ma) → quartz diorite—quartz monzodiorite (135Ma, 136Ma, 137Ma). These high-precision zircon U-Pb ages manifest that the intrusive rocks possibly experienced immediately after crystallization. Laser ablation ICP-MS zircon U-Pb dating yielded two groups of ages (c. a. 130 ~ 132 Ma and 138 ~ 140 Ma) for the intrusive rocks, which are the most important magmatic events in Tongling area related to Cu-Au mineralization. Combined the high-precision zircon U-Pb dates, Re-Os age of some ore deposit and zircon trace element measurements, two events of ore-forming periods are obtained; one is the ore-forming event with high Ce abnormality (molybdenite Re-Os age of 138 ~ 140Ma), which is closely related to those of copper and gold ore deposits; another is probably ore-forming event with low Ce abnormality (pyrite Re-Os age of about 126 Ma) closely related to those of iron and sulfur ore deposits in the Tongling region.

**Key words** Mesozoic intrusive rocks; LA-ICP-MS zircon chronology; Cu-Au ore-forming; Tongling region

**摘要** 安徽铜陵地区是我国著名的 Cu-Au 多金属产地之一, 金属成矿与燕山期岩浆作用关系密切。本次对铜陵地区石英(二长)闪长岩和花岗闪长岩系统地进行了 LA-ICP-MS 锆石年代学研究。高质量锆石 U-Pb 同位素<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 加权平均年龄结果表明铜陵地区中酸性侵入岩的成岩序列可能为花岗闪长岩(141Ma)→辉石(二长)闪长岩(139Ma)→石英(二长)闪长岩(135Ma, 136Ma, 137Ma)。对比已有的高精度锆石 U-Pb 同位素年龄, 我们认为铜陵地区岩体侵入后可能有个快速冷却的过程。铜陵地区与 Cu-Au 矿床有关的最主要侵入岩 LA-ICP-MS 锆石数据给出两组年龄: 130 ~ 132Ma 和 138 ~ 140Ma。据高精

\* 中国科学院知识创新项目“中国东南部中生代成矿地球动力学和找矿勘查示范(KZCX1-YW-15)”、安徽省优秀青年科技基金资助项目(08040106907)和安徽国土资源厅“铜陵深部找矿”专题资助。

第一作者简介: 谢建成, 男, 1973 年生, 博士, 从事矿床地球化学研究, E-mail: xiejiancheng08@163.com

\*\* 通讯作者: 杨晓勇, E-mail: xyang@ustc.edu.cn

度锆石 U-Pb 数据和一些矿床的 Re-Os 年龄,结合锆石元素地球化学资料,本文得出铜陵地区主要表现出两次成矿事件:早期成矿事件是与高 Ce 异常流体密切相关的铜金成矿事件(辉钼矿 Re-Os 年龄 138 ~ 140Ma);晚期成矿事件可能与低 Ce 异常流体密切相关的铁硫成矿事件(黄铁矿 Re-Os 年龄约 126Ma)。

**关键词** 中生代侵入岩; LA-ICP-MS 锆石年代学; 铜金成矿; 铜陵地区

**中图法分类号** P597.3; P618.41; P618.51

## 1 引言

安徽铜陵地区是我国著名的长江中下游铜-金-铁-硫成矿带的一个重要成矿区,是我国典型的矽卡岩成矿区(常印佛等, 1991; Zhai *et al.*, 1996; Pan and Dong, 1999; Xu and Lin, 2000; Xu and Zhou, 2001; 邓晋福等, 2002)。铜陵地区岩浆岩与成矿关系密切,一直以来也是地质学家研究的重点内容(常印佛等, 1991; 邢凤鸣和徐祥, 1995, 1996, 1999; 唐永成等, 1998; Zhou and Li, 2000; 吴才来等, 2003; 王强等, 2003; 汪洋等, 2004; 王元龙等, 2004; 李进文等, 2007a; 周涛发等, 2008)。

铜陵地区还是我国较早开展同位素地质年代学研究的地区之一(Chen *et al.*, 1985; 陈江峰等, 1993; 周泰禧等, 1987)。但由于条件所限,早期年代学数据的精度较低,一些方法存在问题,如很多数据是用现已不采用的 K-Ar 法测定的,还有选用不合适的样品,如使用全岩等问题。近年来在本区已经获得了一些可靠的高精度锆石年龄数据(王彦斌等, 2004 a, b, c; Xu *et al.*, 2004; Di *et al.*, 2005; 张达等, 2006; 杜杨松等, 2007; 陆三明, 2007; 杨小男等, 2007),但本区可信的成矿年龄很少,仍然缺乏最能代表高温岩浆形成事件的锆石 U-Pb 数据。因此,与成矿有关岩石的同位素精确定年就显得十分重要。

以往部分研究者认为区内岩浆侵入期次从早到晚由辉石二长闪长岩—石英二长闪长岩—花岗闪长岩,即所谓正常演化序列,但也有部分研究者认为是逆演化序列(常印佛等, 1991),即从花岗闪长岩—石英二长闪长岩—辉石二长闪长岩依次侵位。吴才来等(1996)通过铜陵地区岩浆岩体黑云母<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 法年代学研究,结合岩体地质、岩石学、地球化学、包体岩石学和岩浆动力学研究认为岩浆分异演化序列与成因复杂的岩浆侵位次序不存在对应关系,铜陵地区岩浆侵入活动具有多期性,且均属燕山晚期。对于铜陵地区侵入岩体的侵入先后顺序问题目前还存在较大的争论(陆三明, 2007; 李进文等, 2007a)。

本次对铜陵地区石英(二长)闪长岩和花岗闪长岩进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年,结合前人报道的锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 年龄数据,对本区成岩和成矿时代进行系统厘定,进而对铜陵地区成岩成矿的地球动力学背景进行了探讨。

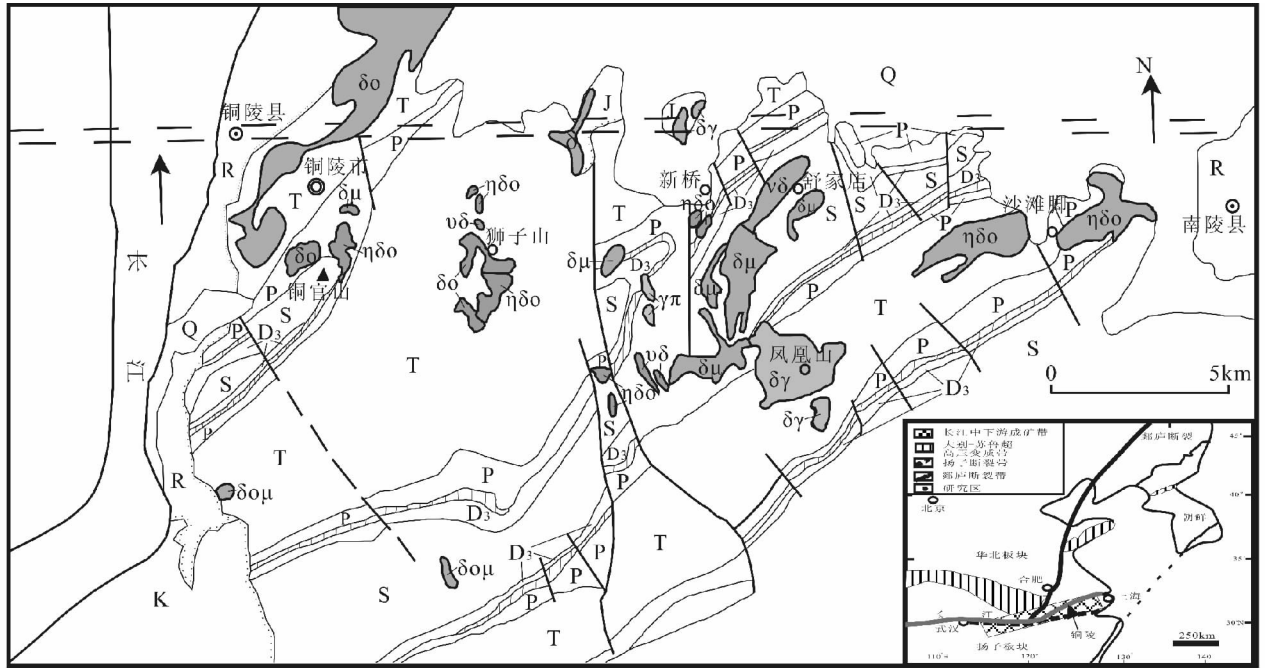
## 2 地质概况

铜陵地区的大地构造位置属扬子板块北缘,为下扬子拗陷之相对隆起区(图 1)。本区经历了活动—稳定—再活动的地质发展史。前南华纪为基底发育阶段;从南华纪至中三叠世为盖层沉积阶段,属相对稳定时期,形成了巨厚的沉积盖层,并成为铜、金、硫、铁等矿化的有利围岩,而且于晚石炭世在区内相对凹陷部位形成的原始矿源层(刘裕庆等, 1984; 刘裕庆和刘兆廉, 1991; 常印佛等, 1991)成为层控矽卡岩型矿床形成的“基顶”(ground preparation)(裴荣富等, 1998);铜陵地区沉积盖层除缺失中下泥盆统外,出露志留系—下三叠统的海相碎屑沉积岩、碳酸盐岩和蒸发岩,其上广泛分布中生代沉积—火山盆地(唐永成等, 1998)。与成矿关系密切的地层是石炭系的碳酸盐岩、二叠系石灰岩和黑色页岩以及三叠系的碳酸盐岩和泥岩(常印佛等, 1991; 唐永成等, 1998; Pan and Dong, 1999; 安徽省地矿局, 1987; 李双应等, 2008)。中三叠世,扬子板块与华北板块发生碰撞(李锦铁, 2001; Li *et al.*, 1993),之后本区再次活动,即为板内变形阶段。印支—燕山运动使本区沉积盖层发生褶皱隆起,形成一系列北东向“S”形褶皱,并伴有断裂拗陷。燕山期强烈的中酸性岩浆—热液作用及其对原始矿源层的叠加,最终形成铜陵矿集区目前的矿床(点)分布格局。

铜陵地区侵入岩体 70 多个,大多数岩体分布于东西向展布的铜陵—南陵深断裂控制的岩浆成矿带之上(常印佛等, 1991; 吴才来等, 2003),控制着铜陵地块内的铜官山矿田、狮子山矿田、新桥矿田、凤凰山矿田、沙滩脚矿田等主要铜金(铁)矿产的分布(图 1),少数分布于铜陵地块南侧的五贵桥、丁桥一带。岩浆岩类型主要包括:①辉石(二长)闪长岩,与本区金铜矿有着密切的关系;②石英(二长)闪长岩,沿铜陵—南陵断裂广泛分布,是铜陵地区最主要的岩浆岩,主要与铜金成矿关系密切;③花岗闪长岩,主要与铜矿、多金属矿成矿关系密切。因而,对燕山期岩浆岩进行系统的研究对于了解该区岩浆岩成因和矿床成因类型的划分以及找矿远景区的预测和圈定都有极为重要的意义。

## 3 岩相学特征

本次选取铜陵地区石英(二长)闪长岩和花岗闪长岩代表性岩体进行采样。由于铜陵地区地表岩石风化和蚀变严重,新鲜岩石样品难以采取,本次部分样品采自于矿床斜巷



图例

- [Q] 第四系 [R] 第三系 [K] 白垩系 [J] 侏罗系 [T] 三叠系 [P] 二叠系 [ ] 石炭系  
 [D<sub>3</sub>] 上泥盆系 [S] 志留系 [Uδ] 辉石闪长岩 [δ] 闪长岩 [δμ] 闪长玢岩 [δo] 石英闪长岩  
 [δoμ] 石英闪长玢岩 [ηδo] 石英二长闪长岩 [δγ] 花岗闪长岩 [γπ] 花岗斑岩 [ ] 基底断裂 [ ] 断层 [ ] 地质界线

图1 铜陵成矿区地质略图

Fig. 1 Geological sketch map of the Tongling metallogenic district, East China

内或钻探样,样品新鲜。

### 3.1 石英(二长)闪长岩

石英(二长)闪长岩是本区分布最广的侵入岩,与铜金矿床关系密切。代表性样品采自于鸡冠石石英二长闪长岩岩体、西狮子山石英闪长岩岩体和缪家闪长玢岩岩体。

鸡冠石石英二长闪长岩出露铜陵地区中部狮子山边,地理坐标为: E117°54'06.9", N30°54'28.8"。出露面积大约0.8平方千米。样品采自钻孔-140米部位,岩石新鲜,灰色,不等粒结构或似斑状结构,矿物成分:斜长石含量40%,半自形一自形板状,发育聚片双晶和卡钠复合双晶,环带结构发育,并具钠化边,具环带结构的斜长石包裹有熔蚀斜长石,后者同时消光,可见斜长石具碎裂现象,有的斜长石裂开后并没有发生错位,裂隙又愈合;碱性长石含量35%,不规则板状,卡斯巴双晶,具环带结构和钠化边,大颗粒碱性长石包裹着嵌晶状角闪石、斜长石、碱性长石和楣石,还可见碱性长石包裹有黑云母,黑云母又包裹碱性长石;绿色角闪石含量10%,角闪石包裹有碱性长石、黑云母、磷灰石和金属矿物;石英含量8%~15%,不规则他形粒状,沿其它矿物颗粒之间充填;少量金属矿物和楣石。

西狮子山石英闪长岩出露于铜陵地区中部西狮子山顶的一露天采坑,地理坐标为: E117°52'53.1", N30°54'50.8"。出露面积大约0.8平方千米。样品采自露天采坑断面处,岩石较新鲜,灰色,块状构造,不等粒半自形粒状结构。岩石主要矿物成分为斜长石(60%~70%),半自形一自形板状,发育聚片双晶和卡钠复合双晶,环带结构发育,斜长石具钠化边,具环带结构的斜长石包裹有熔蚀斜长石,后者同时消光,可见斜长石具碎裂现象;还可见斜长石包裹角闪石现象。钾长石(3%~6%)、石英(10%~15%),不规则他形粒状,具熔蚀现象,呈港湾状或浑圆状,具熔蚀现象,呈港湾状或浑圆状。角闪石(10%~17%),可见绿色和黄色两种角闪石,呈长柱状,两种颜色角闪石具有交叉关系,据此判断为同期产物,可见角闪石中包裹现象,包裹有长石。黑云母,深棕色,含量在1%~3%之间,具暗化边。另外有少量的磷灰石、楣石和金属矿物。

缪家闪长玢岩位于舒家店南边,地理坐标为 E118°04'46.7", N30°57'41.6"。闪长玢岩体侵入在志留纪砂岩和粉砂岩中,出露面积为大约2平方千米。样品采自铜陵至南陵公路边人工露头,样品新鲜。岩石呈灰绿色,斑状结构,斑晶主要为石英2%,被熔蚀成港湾状,有的甚至显示出

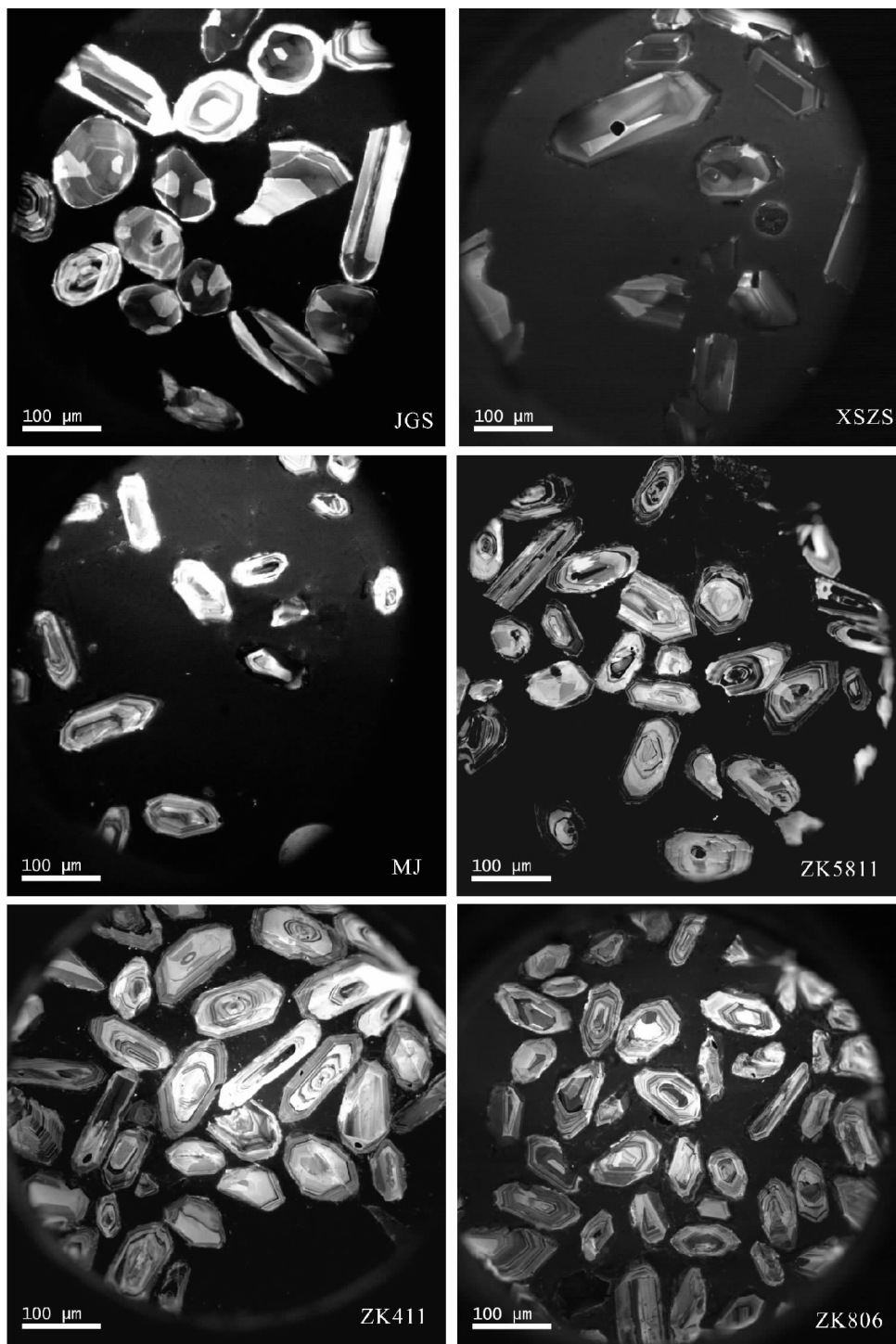


图2 铜陵地区侵入岩中锆石阴极发光图像

Fig.2 Cathodoluminescence (CL) images of representative zircons form the intrusive rocks in Tongling region

熔蚀坑,表面浑浊,黑云母 1%,斜长石 5%,也被熔蚀成港湾状。岩石蚀变强烈,长石已全部碳酸盐化和高岭土化。基质 92%,为隐晶质—玻璃质,含少量金属矿物。

在光学显微镜下观察,三个岩体样品中锆石主要为无色透明,部分为淡黄色,少数为淡褐色,金刚光泽。鸡冠石英英二长闪长岩中大部分锆石颗粒显示相似的晶形,且晶形较

好,大多是自形晶,锆石粒度变化较大,但大多集中在 100μm 左右,长宽比变化在 1:1 到 3:1 之间,大多为 1:1,大部分呈椭圆形,个别为长柱状。缪家闪长玢岩中大部分锆石颗粒显示晶形较好,大多是自形晶,主要为锥面和柱状发育,锆石粒度变化不大,大部分都集中在 100μm 左右,长宽比变化在 1:1 到 2:1 之间。西狮子山石英闪长岩中大部分锆石颗粒

显示晶形较好,大多是自形晶,主要为长柱状和锥形,锆石粒度变化较大,长宽比变化在1:1到2:1之间。阴极发光图像显示出锆石颗粒的内部具有明显的岩浆振荡环带结构,带有内核,属岩浆结晶产物(图2)。部分锆石边部存在裂隙,还有个别内部含有包裹体。

### 3.2 花岗闪长岩

花岗闪长岩岩石样品采自安徽省地矿局321地质队岩芯库中岩芯样,取得的三个岩芯样品(ZK5811-新华山岩体、ZK441-南洪冲岩体、ZK806-向阳村岩体)均比较新鲜,三个样品分别采自于ZK806钻孔-105米、ZK5811钻孔-130米和ZK441钻孔-557米部位,其地理坐标分别为E117°54'04", N30°54'28.2"、E117°53'54.6", N30°54'07.9"和E117°53'59.5", N30°53'53"。岩石呈灰白色或略带肉红色,半自形粒状结构,块状构造。主要矿物为斜长石、角闪石、石英、钾长石和少量黑云母组成。斜长石,含量60%~70%,呈自形一半自形,发育聚片双晶,粒径为0.3mm~1.0mm,蚀变强烈,具熔蚀现象及环带结构,可见斜长石被熔蚀成瓶状,并包裹有熔蚀斜长石;角闪石(10%~15%),呈自形一半自形,长柱状,粒径为0.3mm~0.8mm;石英,含量8%~15%,他形,颗粒大小比较均一,粒径约为0.2mm,具熔蚀现象,呈港湾状或浑圆状;钾长石(10%~15%),呈半自形—他形,颗粒比较小,粒径小于0.2mm;黑云母呈鳞片状,含量较少。副矿物主要为磷灰石、榍石、锆石和磁铁矿。

在光学显微镜下观察,锆石主要为无色透明,部分为淡黄色,少数为淡褐色,金刚光泽。大部分锆石颗粒显示晶形较好,大多是自形晶,主要为锥形,部分为长柱状。三个钻孔岩石样品锆石粒度变化不大,大多都集中在100 $\mu$ m左右,长宽比变化在1:1到3:1之间。阴极发光图像显示出锆石颗粒的内部具有明显的岩浆振荡环带结构,属岩浆结晶产物(图2)。

## 4 分析方法

将分选好的锆石用环氧树脂制靶、打磨和抛光。将所采集的样品,经破碎,人工分选出锆石。每个样品分选出的锆石颗粒为500至数千颗不等。在双目镜下根据锆石颜色、自形程度、形态等特征初步分类,挑选出具有代表性的锆石,在阴极发光上进行照相,锆石的CL图像拍照在西北大学扫描电镜实验室完成,采用FEI公司XL30型SFEG电子束进行锆石内部结构显微照相分析。

锆石的激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)原位U-Pb定年在西北大学大陆动力学国家重点实验室(石英闪长岩样品)和中国科学技术大学中国科学院壳-幔物质与环境重点实验室(花岗闪长岩样品)完成。数据处理采用GLITTER(ver 4.0, Maccyuarie University)程序,年龄计算采用ISOPLLOT(3.00版)软件(Ludwig, 2003)进行。详细分析方

法见袁洪林等(2003)和Yuan *et al.* (2004)。

## 5 测定结果

### 5.1 石英(二长)闪长岩

样品的LA-ICP-MS分析结果见表1。鸡冠石石英二长闪长岩样品(JGS)中18个锆石分析点获得的Th和U含量变化分别为 $86.7 \times 10^{-6} \sim 606 \times 10^{-6}$ 和 $94.1 \times 10^{-6} \sim 399 \times 10^{-6}$ ,平均含量为 $224 \times 10^{-6}$ 和 $240 \times 10^{-6}$ ,锆石U、Th含量变化范围较大,但Th/U比值变化范围不大,为0.66~1.69(表1),表明这些锆石为典型的岩浆锆石(Hoskin and Black, 2000; Belousova *et al.*, 2002)。15个锆石分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄范围为 $127 \pm 3\text{Ma}$ 到 $143 \pm 2\text{Ma}$ , $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $136.1 \pm 3.0\text{Ma}$ (95% confidence, MSWD = 8.3;图3),代表了鸡冠石石英二长闪长岩的形成年龄。在Th/U比值对 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄关系图解中,显示出两种趋向:一种为曲线的关系,另一种为线性关系(图4)。这些锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄可以分为两组:一组较老年龄(平均为 $139.1 \pm 1.9\text{Ma}$ )和一组较年轻年龄(平均为 $132.2 \pm 1.6\text{Ma}$ )。JGS-04和JGS-11分析点显示了铅丢失特征。

西狮子山石英闪长岩样品(XSZS)中20个锆石分析点获得的Th和U含量变化分别为 $226.0 \times 10^{-6} \sim 1160 \times 10^{-6}$ 和 $94.1 \times 10^{-6} \sim 399 \times 10^{-6}$ ,平均含量为 $547 \times 10^{-6}$ 和 $339 \times 10^{-6}$ ,锆石U、Th含量变化范围较大,但Th/U比值变化范围不大,为0.43~0.85(表1),表明这些锆石为典型的岩浆锆石(Hoskin and Black, 2000; Belousova *et al.*, 2002)。16个锆石分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄范围为 $124 \pm 2\text{Ma}$ 到 $148 \pm 2\text{Ma}$ ,位于 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} - ^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 一致曲线上, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $135.1 \pm 3.3\text{Ma}$ (95% confidence, MSWD = 13;图3),代表了西狮子山石英闪长岩结晶年龄,其它锆石分析点偏离了正常 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分布。在Th/U比值对 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄关系图解中,显示出两种趋向:一种为曲线的关系,另一种为线性关系(图4)。这些锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄可以分为两组:一组较老年龄(平均为 $138.0 \pm 2.5\text{Ma}$ )和一组较年轻年龄(平均为 $128.9 \pm 3.3\text{Ma}$ )。

缪家闪长玢岩样品(MJ)中20个锆石分析点获得的Th和U含量变化分别为 $78.0 \times 10^{-6} \sim 268 \times 10^{-6}$ 和 $84.8 \times 10^{-6} \sim 242.3 \times 10^{-6}$ ,平均含量为 $163 \times 10^{-6}$ 和 $179 \times 10^{-6}$ ,锆石U、Th含量变化范围较大,但Th/U比值变化范围不大,为0.85~1.57(表1),表明这些锆石为典型的岩浆锆石(Hoskin and Black, 2000; Belousova *et al.*, 2002)。17个锆石分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄范围为 $129 \pm 2\text{Ma}$ 到 $152 \pm 3\text{Ma}$ , $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $137.3 \pm 2.9\text{Ma}$ (95% confidence, MSWD = 7.5;图3),代表了缪家闪长玢岩的形成年龄。在Th/U比值对 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄关系图解中,显示出明显的为线性关系(图4)。所测试的这些锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄可以分为两组:一组较老年龄(平均为 $140.3 \pm 2.9\text{Ma}$ )和一组较年轻年

表 1 铜陵地区侵入岩 LA-ICP-MS 锆石分析数据  
Table 1 LA-ICP-MS zircon analytical data for the intrusive rocks from the Tongling area

| 样品      | Th                 |        | U                  |          | Th/U    | 同位素比值                                     |  |  |   | 年龄 (Ma)                                  |  |  |     | $\delta\text{Ce}$ | $\delta\text{Eu}$ |        |
|---------|--------------------|--------|--------------------|----------|---------|---|--|--|---|--|--|--|-----|-------------------|-------------------|--------|
|         | $(\times 10^{-6})$ |        | $(\times 10^{-6})$ |          |         | $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$ | $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$ | $\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$ | $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$ | $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$ | $\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$ | $\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$ |     |                   |                   |        |
|         | Th                 | U      | Th                 | U        |         |   |  |  |   |  |  |  |     |                   |                   |        |
| JGS-01  | 177.14             | 254.42 | 0.04883            | 0.0022   | 0.14663 | 0.00639                                   | 0.02178                                  | 0.00025                                  | 140                                       | 79                                       | 139                                      | 6  | 139 | 2                 | 0.62              | 96.54  |
| JGS-02  | 86.68              | 127.44 | 0.04904            | 0.00315  | 0.15105 | 0.00946                                   | 0.02234                                  | 0.00033                                  | 150                                       | 114                                      | 143                                      | 8  | 142 | 2                 | 0.69              | 37.41  |
| JGS-03  | 263.18             | 263.47 | 0.04875            | 0.00203  | 0.15115 | 0.00607                                   | 0.02249                                  | 0.00025                                  | 136                                       | 73                                       | 143                                      | 5  | 143 | 2                 | 0.64              | 44.01  |
| JGS-04  | 255.42             | 250.24 | 0.0537             | 0.00206  | 0.15744 | 0.00577                                   | 0.02127                                  | 0.00023                                  | 358                                       | 63                                       | 148                                      | 5  | 136 | 1                 | 0.70              | 34.68  |
| JGS-05  | 167.88             | 225.2  | 0.04871            | 0.00225  | 0.14667 | 0.00654                                   | 0.02185                                  | 0.00025                                  | 134                                       | 81                                       | 139                                      | 2  | 139 | 2                 | 0.63              | 61.13  |
| JGS-06  | 230.33             | 243.97 | 0.04868            | 0.00295  | 0.13868 | 0.00815                                   | 0.02068                                  | 0.0003                                   | 132                                       | 105                                      | 132                                      | 7  | 132 | 2                 | 0.73              | 20.80  |
| JGS-07  | 306.49             | 305.61 | 0.0486             | 0.00211  | 0.13671 | 0.00573                                   | 0.02042                                  | 0.00023                                  | 129                                       | 76                                       | 130                                      | 5  | 130 | 1                 | 0.62              | 80.84  |
| JGS-08  | 162.58             | 208.63 | 0.04872            | 0.00222  | 0.14545 | 0.00639                                   | 0.02167                                  | 0.00025                                  | 134                                       | 80                                       | 138                                      | 6  | 138 | 2                 | 0.65              | 60.65  |
| JGS-09  | 189.3              | 209.43 | 0.0488             | 0.0032   | 0.14317 | 0.00912                                   | 0.02129                                  | 0.00033                                  | 138                                       | 114                                      | 136                                      | 8  | 136 | 2                 | 0.71              | 37.07  |
| JGS-10  | 221.96             | 254.25 | 0.04874            | 0.00254  | 0.14839 | 0.00749                                   | 0.0221                                   | 0.00028                                  | 135                                       | 91                                       | 140                                      | 7  | 141 | 2                 | 0.70              | 46.57  |
| JGS-11  | 60.83              | 94.05  | 0.04919            | 0.00569  | 0.16573 | 0.01871                                   | 0.02445                                  | 0.00064                                  | 157                                       | 204                                      | 156                                      | 16                                       | 156 | 4                 | 0.63              | 39.57  |
| JGS-12  | 605.92             | 397.53 | 0.04861            | 0.00239  | 0.13634 | 0.00649                                   | 0.02036                                  | 0.00026                                  | 129                                       | 85                                       | 130                                      | 2  | 130 | 2                 | 0.69              | 59.43  |
| JGS-13  | 174.44             | 192.89 | 0.04898            | 0.0036   | 0.15178 | 0.01083                                   | 0.02249                                  | 0.0004                                   | 147                                       | 127                                      | 143                                      | 10                                       | 143 | 3                 | 0.60              | 45.09  |
| JGS-14  | 234.5              | 228.66 | 0.04855            | 0.00441  | 0.13293 | 0.01176                                   | 0.01987                                  | 0.00043                                  | 126                                       | 157                                      | 127                                      | 11                                       | 127 | 3                 | 1.00              | 14.15  |
| JGS-15  | 236.62             | 399.37 | 0.05997            | 0.0011   | 0.99259 | 0.01664                                   | 0.12009                                  | 0.00093                                  | 602                                       | 23                                       | 700                                      | 8  | 731 | 5                 | 0.07              | 2.38   |
| JGS-16  | 88.81              | 137.47 | 0.04896            | 0.00344  | 0.14882 | 0.01017                                   | 0.02205                                  | 0.00038                                  | 146                                       | 122                                      | 141                                      | 9  | 141 | 2                 | 0.71              | 59.95  |
| JGS-17  | 159.99             | 192.42 | 0.04682            | 0.00276  | 0.14492 | 0.00832                                   | 0.02245                                  | 0.00037                                  | 40  | 98                                       | 137                                      | 7  | 143 | 2                 | 0.75              | 33.87  |
| JGS-18  | 412.38             | 338.87 | 0.0475             | 0.00343  | 0.13803 | 0.00968                                   | 0.02108                                  | 0.00032                                  | 74  | 122                                      | 131                                      | 9  | 134 | 2                 | 0.80              | 18.89  |
| XSZS-01 | 542.87             | 306.11 | 0.04872            | 0.00249  | 0.14072 | 0.00695                                   | 0.02096                                  | 0.00027                                  | 134                                       | 89                                       | 134                                      | 6  | 134 | 2                 | 0.59              | 24.18  |
| XSZS-02 | 616.82             | 329.97 | 0.04756            | 0.00237  | 0.14107 | 0.0068                                    | 0.02152                                  | 0.00026                                  | 77  | 84                                       | 134                                      | 6  | 137 | 2                 | 0.61              | 23.39  |
| XSZS-03 | 359.07             | 212.77 | 0.04857            | 0.00394  | 0.12973 | 0.01025                                   | 0.01937                                  | 0.00036                                  | 127                                       | 142                                      | 124                                      | 9  | 124 | 2                 | 0.58              | 19.38  |
| XSZS-04 | 378.11             | 282.65 | 0.04853            | 0.0035   | 0.13314 | 0.00934                                   | 0.0199                                   | 0.00034                                  | 125                                       | 125                                      | 127                                      | 8  | 127 | 2                 | 0.51              | 108.07 |
| XSZS-05 | 1160.67            | 502.15 | 0.04834            | 0.00283  | 0.12899 | 0.00732                                   | 0.01935                                  | 0.00028                                  | 116                                       | ±100                                     | 123                                      | ±7                                       | 124 | ±2                | 0.52              | 99.06  |
| XSZS-06 | 446.44             | 331.6  | 0.0483             | 0.00382  | 0.11881 | ±0.00916                                  | 0.01783                                  | ±0.00033                                 | 114                                       | ±137                                     | 114                                      | ±8                                       | 114 | ±2                | 0.59              | 20.42  |
| XSZS-07 | 313.58             | 224.53 | 0.04858            | ±0.00303 | 0.13327 | ±0.00809                                  | 0.01989                                  | ±0.0003                                  | 128                                       | ±108                                     | 127                                      | ±7                                       | 127 | ±2                | 0.58              | 28.95  |
| XSZS-08 | 226.02             | 191.5  | 0.06183            | ±0.01192 | 0.17078 | ±0.03261                                  | 0.02003                                  | ±0.00053                                 | 668                                       | ±415                                     | 160                                      | 28                                       | 128 | 3                 | 0.60              | 20.89  |
| XSZS-09 | 333.58             | 236.51 | 0.04855            | 0.00272  | 0.1398  | 0.0076                                    | 0.02087                                  | 0.00029                                  | 126                                       | 97                                       | 133                                      | 7  | 133 | 2                 | 0.55              | 26.43  |
| XSZS-10 | 556.02             | 367.05 | 0.06175            | 0.00561  | 0.19718 | 0.01765                                   | 0.02316                                  | 0.00036                                  | 665                                       | 202                                      | 183                                      | 15                                       | 148 | 2                 | 0.57              | 32.56  |
| XSZS-11 | 887.8              | 475.89 | 0.04865            | 0.00187  | 0.14222 | 0.00525                                   | 0.02118                                  | 0.00023                                  | 131                                       | 66                                       | 135                                      | 5  | 135 | 1                 | 0.49              | 116.56 |
| XSZS-12 | 637.44             | 365.16 | 0.0463             | 0.00207  | 0.13681 | 0.00592                                   | 0.02141                                  | 0.00025                                  | 13  | 69                                       | 130                                      | 5  | 137 | 2                 | 0.58              | 16.12  |
| XSZS-13 | 419.62             | 258.29 | 0.04635            | 0.00289  | 0.13005 | 0.00789                                   | 0.02032                                  | 0.0003                                   | 16  | 103                                      | 124                                      | 7  | 130 | 2                 | 0.59              | 8.11   |
| XSZS-14 | 744.47             | 397.44 | 0.04378            | 0.00182  | 0.13347 | 0.00536                                   | 0.02208                                  | 0.00024                                  | -82                                       | 66                                       | 127                                      | 5  | 141 | 2                 | 0.61              | 25.64  |
| XSZS-15 | 771.34             | 531.01 | 0.04628            | 0.00162  | 0.13996 | 0.00472                                   | 0.02191                                  | 0.00022                                  | 12  | 52                                       | 133                                      | 4  | 140 | 1                 | 0.48              | 187.17 |
| XSZS-16 | 455.47             | 297.5  | 0.04627            | 0.00229  | 0.13226 | 0.00634                                   | 0.02071                                  | 0.00026                                  | 12  | 78                                       | 126                                      | 6  | 132 | 2                 | 0.57              | 43.45  |
| XSZS-17 | 534.38             | 446.9  | 0.05385            | 0.00301  | 0.15974 | 0.00862                                   | 0.02149                                  | 0.00032                                  | 365                                       | 95                                       | 150                                      | 8  | 137 | 2                 | 0.54              | 161.55 |
| XSZS-18 | 424.34             | 360.44 | 0.04674            | 0.00203  | 0.14946 | 0.00628                                   | 0.02317                                  | 0.00027                                  | 36  | 68                                       | 141                                      | 6  | 148 | 2                 | 0.52              | 181.42 |
| XSZS-19 | 431.62             | 292.38 | 0.04652            | 0.00207  | 0.14268 | 0.00615                                   | 0.02222                                  | 0.00026                                  | 25  | 70                                       | 135                                      | 5  | 142 | 2                 | 0.54              | 47.44  |
| XSZS-20 | 705.06             | 379.1  | 0.04195            | 0.00201  | 0.12971 | 0.00604                                   | 0.0224                                   | 0.00027                                  | -180                                      | 84                                       | 124                                      | 5  | 143 | 2                 | 0.56              | 41.27  |
| MJ-01   | 152.5              | 176.22 | 0.04907            | 0.0035   | 0.15364 | 0.01066                                   | 0.02271                                  | 0.00037                                  | 151                                       | 126                                      | 145                                      | 9  | 145 | 2                 | 0.66              | 102.52 |
| MJ-02   | 151.68             | 187.72 | 0.04869            | 0.00261  | 0.1392  | 0.00722                                   | 0.02073                                  | 0.00027                                  | 133                                       | 94                                       | 132                                      | 6  | 132 | 2                 | 0.71              | 114.12 |
| MJ-03   | 167.6              | 169.76 | 0.04868            | 0.00252  | 0.1412  | 0.00711                                   | 0.02103                                  | 0.00026                                  | 132                                       | 92                                       | 134                                      | 6  | 134 | 2                 | 0.65              | 56.38  |
| MJ-04   | 217.95             | 242.26 | 0.04866            | 0.00274  | 0.13807 | 0.00753                                   | 0.02058                                  | 0.00028                                  | 131                                       | 98                                       | 131                                      | 7  | 131 | 2                 | 0.59              | 21.83  |

续表 1

Continued Table 1

| 样品        | Th                 |                    | U                  |                    | Th/U          | 同位素比值                                     |  |  | 年龄 (Ma)                                   |  |  | $\delta^{206}\text{Pb}$<br>$^{238}\text{U}$ | $\delta^{207}\text{Pb}$<br>$^{235}\text{U}$ | $\delta^{206}\text{Pb}$<br>$^{238}\text{U}$ | $\delta^{207}\text{Pb}$<br>$^{235}\text{U}$ | $\delta\text{Eu}$ | $\delta\text{Ce}$ |
|-----------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------|---|--|--|---|--|--|---|---|---|---|-------------------|-------------------|
|           | $(\times 10^{-6})$ | $(\times 10^{-6})$ | $(\times 10^{-6})$ | $(\times 10^{-6})$ |               | $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$ | $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$ | $\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$ | $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$ | $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$ | $\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$ |   |   |   |   |                   |                   |
| MJ-05     | 216.1              | 207.58             | 0.961              | 0.05791            | 0.00353       | 0.17017                                   | 0.01004                                  | 0.02131                                  | 0.00033                                   | 526                                      | 102                                      | 160   | 9   | 136   | 2   | 0.70              | 1.12              |
| MJ-06     | 150.92             | 160.59             | 1.064              | 0.05279            | 0.00277       | 0.15309                                   | 0.00778                                  | 0.02103                                  | 0.00027                                   | 320                                      | 92                                       | 145   | 7   | 134   | 2   | 0.50              | 26.34             |
| MJ-07     | 83.87              | 116.94             | 1.394              | 0.04922            | 0.00334       | 0.15493                                   | 0.01028                                  | 0.02283                                  | 0.00033                                   | 158                                      | 123                                      | 146   | 9   | 146   | 2   | 0.65              | 57.36             |
| MJ-08     | 200.34             | 185.5              | 0.926              | 0.06812            | 0.00184       | 1.13106                                   | 0.02872                                  | 0.1204                                   | 0.00116                                   | 872                                      | 37                                       | 768   | 14  | 733   | 7   | 0.19              | 15.60             |
| MJ-09     | 164.83             | 180.7              | 1.096              | 0.04877            | 0.00267       | 0.14225                                   | 0.00758                                  | 0.02115                                  | 0.00027                                   | 137                                      | 98                                       | 135   | 7   | 135   | 2   | 0.59              | 37.69             |
| MJ-10     | 111.04             | 167.14             | 1.505              | 0.04611            | 0.00254       | 0.13445                                   | 0.00725                                  | 0.02115                                  | 0.00024                                   | 4  | 120                                      | 128   | 6   | 135   | 2   | 0.66              | 1.21              |
| MJ-11     | 207.72             | 187.59             | 0.903              | 0.04901            | 0.00418       | 0.16069                                   | $\pm 0.01337$                            | 0.02378                                  | $\pm 0.00046$                             | 148                                      | $\pm 151$                                | 151   | $\pm 12$                                    | 152   | $\pm 3$                                     | 0.62              | 85.42             |
| MJ-12     | 200.72             | 198.09             | 0.987              | 0.04878            | 0.00232       | 0.1472                                    | 0.00676                                  | 0.02188                                  | 0.00026                                   | 137                                      | 83                                       | 139   | 6   | 140   | 2   | 0.57              | 82.04             |
| MJ-13     | 78.01              | 84.78              | 1.087              | 0.04877            | 0.00368       | 0.14363                                   | 0.01058                                  | 0.02136                                  | 0.00036                                   | 137                                      | 134                                      | 136   | 9   | 136   | 2   | 0.53              | 26.84             |
| MJ-14     | 141.75             | 149.11             | 1.052              | 0.04922            | 0.00312       | 0.15008                                   | 0.00926                                  | 0.02211                                  | 0.00032                                   | 158                                      | 113                                      | 142   | 8   | 141   | 2   | 0.47              | 68.87             |
| MJ-15     | 180.35             | 189.22             | 1.049              | 0.05046            | 0.00275       | 0.14101                                   | 0.00746                                  | 0.02027                                  | 0.00027                                   | 216                                      | 98                                       | 134   | 7   | 129   | 2   | 0.64              | 41.33             |
| MJ-16     | 106.63             | 157.64             | 1.478              | 0.04912            | 0.0033        | 0.14128                                   | 0.00924                                  | 0.02086                                  | 0.00033                                   | 154                                      | 118                                      | 134   | 8   | 133   | 2   | 0.59              | 31.80             |
| MJ-17     | 163.75             | 201.05             | 1.228              | 0.04884            | 0.0028        | 0.14579                                   | 0.00812                                  | 0.02165                                  | 0.0003                                    | 140                                      | 101                                      | 138   | 7   | 138   | 2   | 0.68              | 19.61             |
| MJ-18     | 185.22             | 213.83             | 1.154              | 0.04903            | 0.0035        | 0.15155                                   | 0.01051                                  | 0.02242                                  | 0.00038                                   | 149                                      | 125                                      | 143   | 9   | 143   | 2   | 0.53              | 39.41             |
| MJ-19     | 267.91             | 226.45             | 0.845              | 0.04868            | 0.00307       | 0.14649                                   | 0.00899                                  | 0.02182                                  | 0.00032                                   | 132                                      | 111                                      | 139   | 8   | 139   | 2   | 0.73              | 10.93             |
| MJ-20     | 109.18             | 170.95             | 1.566              | 0.05031            | 0.00309       | 0.21164                                   | 0.01263                                  | 0.03051                                  | 0.00046                                   | 209                                      | 109                                      | 195   | 11  | 194   | 3   | 0.51              | 42.61             |
| ZK5811-01 | 104.18             | 166.49             | 0.63               | 0.04912            | 0.00728       | 0.13511                                   | 0.01889                                  | 0.02079                                  | 0.00066                                   | 154                                      | 249                                      | 129   | 17  | 133   | 4   | 0.74              | 32.50             |
| ZK5811-02 | 87.30              | 94.69              | 0.92               | 0.06096            | 0.00811       | 0.1882                                    | 0.02424                                  | 0.02275                                  | 0.00112                                   | 638                                      | 194                                      | 175   | 21  | 150   | 7   | 0.68              | 22.69             |
| ZK5811-03 | 81.32              | 104.69             | 0.78               | 0.09114            | 0.00863       | 0.2865                                    | 0.02615                                  | 0.0235                                   | 0.00071                                   | 1450                                     | 128                                      | 256   | 21  | 145   | 4   | 0.71              | 22.79             |
| ZK5811-04 | 42.03              | 125.33             | 0.34               | 0.08998            | 0.00467       | 1.47225                                   | 0.06698                                  | 0.11924                                  | 0.00309                                   | 1425                                     | 49                                       | 919   | 28  | 726   | 18  | 0.55              | 6.03              |
| ZK5811-05 | 123.09             | 362.71             | 0.34               | 0.13114            | 0.00635       | 4.61117                                   | 0.14588                                  | 0.25584                                  | 0.00891                                   | 2113                                     | 27                                       | 1751  | 26  | 1469  | 46  | 0.11              | 14.31             |
| ZK5811-06 | 127.46             | 157.26             | 0.81               | 0.11059            | 0.01212       | 0.28005                                   | 0.04244                                  | 0.02487                                  | 0.00114                                   | 1809                                     | 212                                      | 251   | 34  | 158   | 7   | 0.70              | 18.24             |
| ZK5811-07 | 80.18              | 220.89             | 0.36               | 0.14266            | 0.01024       | 0.46435                                   | 0.03239                                  | 0.02385                                  | 0.00068                                   | 2260                                     | 81                                       | 387   | 22  | 152   | 4   | 0.74              | 27.56             |
| ZK5811-08 | 96.32              | 197.06             | 0.49               | 0.09857            | 0.00377       | 1.65009                                   | 0.05633                                  | 0.1222                                   | 0.00467                                   | 1597                                     | 32                                       | 990   | 22  | 743   | 27  | 0.61              | 13.84             |
| ZK5811-09 | 110.60             | 183.34             | 0.60               | 0.11986            | 0.01118       | 0.35237                                   | 0.02991                                  | 0.02168                                  | 0.0005                                    | 1954                                     | 119                                      | 307   | 22  | 138   | 3   | 0.74              | 23.53             |
| ZK5811-10 | 63.25              | 128.04             | 0.49               | 0.04605            | 0.00369       | 0.11439                                   | 0.00775                                  | 0.01802                                  | 0.00077                                   | 176                                      | 176                                      | 110   | 7   | 115   | 5   | 0.72              | 24.34             |
| ZK5811-11 | 100.29             | 181.13             | 0.55               | 0.11369            | 0.01005       | 0.37872                                   | 0.03265                                  | 0.02477                                  | 0.00123                                   | 1859                                     | 87                                       | 326   | 24  | 158   | 8   | 0.75              | 20.16             |
| ZK5811-12 | 112.53             | 126.89             | 0.89               | 0.12113            | 0.01733       | 0.4198                                    | 0.05897                                  | 0.02639                                  | 0.00182                                   | 1973                                     | 154                                      | 356   | 42  | 168   | 11  | 0.57              | 13.91             |
| ZK5811-13 | 151.18             | 218.67             | 0.69               | 0.05252            | 0.0067        | 0.16217                                   | 0.02097                                  | 0.02235                                  | 0.0003                                    | 308                                      | 265                                      | 153   | 18  | 142   | 2   | 0.61              | 20.17             |
| ZK5811-14 | 137.95             | 251.59             | 0.55               | 0.06369            | 0.00299       | 0.56475                                   | 0.02628                                  | 0.06501                                  | 0.0035                                    | 731                                      | 51                                       | 455   | 17  | 406   | 21  | 0.79              | 31.09             |
| ZK5811-15 | 166.90             | 218.62             | 0.76               | 0.06214            | 0.00539       | 0.18747                                   | 0.01446                                  | 0.02246                                  | 0.00061                                   | 679                                      | 119                                      | 174   | 12  | 143   | 4   | 0.61              | 11.51             |
| ZK5811-16 | 264.42             | 260.36             | 1.02               | 0.08701            | 0.00753       | 0.24859                                   | 0.02031                                  | 0.02089                                  | 0.0004                                    | 1361                                     | $\pm 129$                                | 225   | $\pm 17$                                    | 133   | $\pm 3$                                     | 0.76              | 26.44             |
| ZK5811-17 | 145.00             | 279.75             | 0.52               | 0.09411            | $\pm 0.00658$ | 0.2868                                    | $\pm 0.01964$                            | 0.02217                                  | 0.00049                                   | 1510                                     | 96                                       | 256   | 15  | 141   | 3   | 0.73              | 2.31              |
| ZK5811-18 | 91.66              | 135.54             | 0.68               | 0.08792            | 0.0111        | 0.27705                                   | 0.0322                                   | 0.02372                                  | 0.00105                                   | 1381                                     | 156                                      | 248   | 26  | 151   | 7   | 0.75              | 2.01              |
| ZK5811-19 | 96.44              | 125.70             | 0.77               | 0.05607            | 0.00725       | 0.16717                                   | 0.02059                                  | 0.022                                    | 0.00054                                   | 455                                      | 232                                      | 157   | 18  | 140   | 3   | 0.71              | 18.22             |
| ZK5811-20 | 98.83              | 142.56             | 0.69               | 0.07159            | 0.0123        | 0.22434                                   | 0.0391                                   | 0.02289                                  | 0.00112                                   | 974                                      | 285                                      | 206   | 32  | 146   | 7   | 0.69              | 11.37             |
| ZK441-01  | 70.38              | 102.49             | 0.69               | 0.08332            | 0.01118       | 0.25433                                   | 0.03616                                  | 0.02218                                  | 0.00076                                   | 1277                                     | 229                                      | 230   | 29  | 141   | 5   | 0.77              | 36.93             |
| ZK441-02  | 70.48              | 100.58             | 0.70               | 0.04031            | 0.00799       | 0.1718                                    | 0.01823                                  | 0.02122                                  | 0.00057                                   | -272                                     | 162                                      | 161   | 16  | 135   | 4   | 0.62              | 44.85             |
| ZK441-03  | 73.54              | 91.14              | 0.81               | 0.07402            | 0.00886       | 0.21154                                   | 0.02204                                  | 0.02249                                  | 0.00083                                   | 1042                                     | 151                                      | 195   | 18  | 143   | 5   | 0.63              | 19.59             |
| ZK441-04  | 135.60             | 151.18             | 0.90               | 0.05845            | 0.0085        | 0.16361                                   | 0.02372                                  | 0.02113                                  | 0.00079                                   | 547                                      | 255                                      | 154   | 21  | 135   | 5   | 0.69              | 18.06             |
| ZK441-05  | 133.59             | 154.52             | 0.86               | 0.0658             | 0.0067        | 0.18901                                   | 0.02078                                  | 0.02092                                  | 0.0006                                    | 800                                      | 185                                      | 176   | 18  | 133   | 4   | 0.74              | 28.92             |

续表 1

Continued Table 1

| 样品       | Th                   |                      | U                    |                      | Th/U          | 同位素比值                                     |  |  | 年龄 (Ma)                                   |  |  | $\delta^{206}\text{Pb}$<br>238U | $\delta^{207}\text{Pb}$<br>235U | $\delta\text{Ce}$ |         |      |       |
|----------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------|---|--|--|---|--|--|---------------------------------|---------------------------------|-------------------|---------|------|-------|
|          | ( $\times 10^{-6}$ ) | ( $\times 10^{-6}$ ) | ( $\times 10^{-6}$ ) | ( $\times 10^{-6}$ ) |               | $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$ | $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$ | $\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$ | $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$ | $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$ | $\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$ |                                 |                                 |                   |         |      |       |
| ZK441-06 | 79.74                | 108.21               | 0.74                 | 0.12323              | 0.01109       | 0.39751                                   | 0.03735                                  | 0.02375                                  | 0.00069                                   | 2003                                     | 126                                      | 340                             | 27                              | 151               | 4       | 0.74 | 12.04 |
| ZK441-07 | 182.68               | 271.89               | 0.67                 | 0.05556              | 0.0069        | 0.15698                                   | 0.02044                                  | 0.02056                                  | 0.00063                                   | 435                                      | 236                                      | 148                             | 18                              | 131               | 4       | 0.79 | 30.27 |
| ZK441-08 | 131.10               | 205.91               | 0.64                 |                      |               |   |  |  |   |  |  |                                 |                                 |                   |         | 0.78 | 9.48  |
| ZK441-09 | 114.81               | 156.25               | 0.73                 | 0.06777              | 0.00929       | 0.18683                                   | 0.02459                                  | 0.02036                                  | 0.00068                                   | 862                                      | 222                                      | 174                             | 21                              | 130               | 4       | 0.69 | 7.71  |
| ZK441-10 | 129.25               | 285.16               | 0.45                 | 0.06326              | 0.00578       | 0.18154                                   | 0.0163                                   | 0.02079                                  | 0.00053                                   | 717                                      | 149                                      | 169                             | 14                              | 133               | 3       | 0.79 | 86.91 |
| ZK441-11 | 201.52               | 259.64               | 0.78                 | 0.068                | 0.00685       | 0.19402                                   | 0.01792                                  | 0.02109                                  | 0.0007                                    | 869                                      | 137                                      | 180                             | 15                              | 135               | 4       | 0.85 | 4.61  |
| ZK441-12 | 78.27                | 254.98               | 0.31                 | 0.14992              | 0.00213       | 8.26127                                   | 0.15387                                  | 0.40021                                  | 0.00763                                   | 2345                                     | 15                                       | 2260                            | 17                              | 2170              | 35      | 0.31 | 7.21  |
| ZK441-13 | 261.92               | 329.66               | 0.79                 | 0.06745              | 0.00551       | 0.21603                                   | 0.01681                                  | 0.02332                                  | 0.00044                                   | 852                                      | 131                                      | 199                             | 14                              | 149               | 3       | 0.60 | 57.99 |
| ZK441-14 | 99.34                | 130.17               | 0.76                 | 0.06664              | 0.00926       | 0.25437                                   | 0.03349                                  | 0.0282                                   | 0.00081                                   | 827                                      | 232                                      | 230                             | 27                              | 179               | 5       | 0.70 | 18.32 |
| ZK441-15 | 80.69                | 122.38               | 0.66                 | 0.06635              | 0.00908       | 0.21322                                   | 0.02844                                  | 0.02397                                  | 0.00071                                   | 818                                      | 235                                      | 196                             | 24                              | 153               | 4       | 0.64 | 21.42 |
| ZK441-16 | 77.12                | 325.39               | 0.24                 | 0.0723               | 0.00222       | 1.72342                                   | 0.05769                                  | 0.17283                                  | 0.00326                                   | 994                                      | 38                                       | 1017                            | 22                              | 1028              | 18      | 0.12 | 4.27  |
| ZK441-17 | 117.14               | 169.90               | 0.69                 | 0.06481              | 0.0097        | 0.21974                                   | 0.03025                                  | 0.02551                                  | 0.00092                                   | 768                                      | 234                                      | 202                             | 25                              | 162               | 6       | 0.59 | 8.04  |
| ZK441-18 | 212.09               | 245.10               | 0.87                 | 0.06385              | 0.00488       | 0.21579                                   | 0.01728                                  | 0.02473                                  | 0.00064                                   | 737                                      | 126                                      | 198                             | 14                              | 157               | 4       | 0.68 | 46.93 |
| ZK441-19 | 55.15                | 102.45               | 0.54                 | 0.06427              | 0.00916       | 0.06577                                   | 0.04005                                  | 0.02946                                  | 0.00118                                   | 751                                      | $\pm 256$                                | 239                             | $\pm 32$                        | 187               | $\pm 7$ | 0.80 | 40.37 |
| ZK441-20 | 152.03               | 182.68               | 0.83                 | 0.06614              | $\pm 0.00668$ | 0.21189                                   | $\pm 0.02018$                            | 0.02384                                  | $\pm 0.00057$                             | 811                                      | $\pm 161$                                | 195                             | $\pm 17$                        | 152               | $\pm 4$ | 0.74 | 18.98 |
| ZK441-21 | 235.73               | 241.39               | 0.98                 | 0.08745              | $\pm 0.01738$ | 0.27875                                   | $\pm 0.05367$                            | 0.02319                                  | $\pm 0.00063$                             | 1370                                     | $\pm 350$                                | 250                             | $\pm 43$                        | 148               | $\pm 4$ | 0.54 | 9.41  |
| ZK441-22 | 169.34               | 184.40               | 0.92                 | 0.06391              | $\pm 0.00644$ | 0.18152                                   | $\pm 0.0185$                             | 0.02067                                  | $\pm 0.00044$                             | 739                                      | 183                                      | 169                             | 16                              | 132               | 3       | 0.72 | 44.70 |
| ZK441-23 | 110.81               | 146.46               | 0.76                 | 0.08588              | 0.0081        | 0.29609                                   | 0.0305                                   | 0.02518                                  | 0.00094                                   | 1335                                     | 142                                      | 263                             | 24                              | 160               | 6       | 0.75 | 12.23 |
| ZK441-24 | 279.67               | 249.93               | 1.12                 | 0.07222              | 0.00772       | 0.21627                                   | 0.02349                                  | 0.02186                                  | 0.00057                                   | 992                                      | 180                                      | 199                             | 20                              | 139               | 4       | 0.75 | 10.05 |
| ZK441-25 | 171.51               | 208.85               | 0.82                 | 0.06306              | 0.00597       | 0.19465                                   | 0.01731                                  | 0.02295                                  | 0.00063                                   | 710                                      | 143                                      | 181                             | 15                              | 146               | 4       | 0.72 | 13.59 |
| ZK806-01 | 190.03               | 236.62               | 0.80                 | 0.07963              | 0.01043       | 0.23184                                   | 0.03154                                  | 0.02099                                  | 0.00065                                   | 1188                                     | 224                                      | 212                             | 26                              | 134               | 4       | 1.34 | 45.93 |
| ZK806-02 | 196.27               | 197.47               | 0.99                 | 0.06037              | 0.01145       | 0.18774                                   | 0.03259                                  | 0.02348                                  | 0.00085                                   | 617                                      | 321                                      | 175                             | 28                              | 150               | 5       | 0.84 | 70.55 |
| ZK806-03 | 171.96               | 196.24               | 0.88                 | 0.07379              | 0.00701       | 0.90848                                   | 0.08448                                  | 0.08902                                  | 0.00235                                   | 1036                                     | 146                                      | 656                             | 45                              | 550               | 14      | 0.26 | 12.08 |
| ZK806-04 | 116.44               | 144.62               | 0.81                 | 0.06482              | 0.0099        | 0.1893                                    | 0.03026                                  | 0.02067                                  | 0.00079                                   | 768                                      | 281                                      | 176                             | 26                              | 132               | 5       | 0.86 | 46.24 |
| ZK806-05 | 247.25               | 246.18               | 1.00                 | 0.09119              | 0.00231       | 2.63349                                   | 0.07322                                  | 0.20866                                  | 0.00268                                   | 1450                                     | 33                                       | 1310                            | 20                              | 1222              | 14      | 0.28 | 8.60  |
| ZK806-06 | 89.68                | 129.42               | 0.69                 | 0.04331              | 0.01063       | 0.14209                                   | 0.03317                                  | 0.02398                                  | 0.00086                                   | -107                                     | 311                                      | 135                             | 29                              | 153               | 5       | 0.58 | 73.04 |
| ZK806-07 | 245.91               | 212.00               | 1.16                 | 0.0892               | 0.01261       | 0.25539                                   | 0.0372                                   | 0.02078                                  | 0.00081                                   | 1408                                     | 223                                      | 231                             | 30                              | 133               | 5       | 0.70 | 35.79 |
| ZK806-08 | 700.70               | 418.41               | 1.67                 | 0.0724               | 0.00607       | 0.22949                                   | 0.01829                                  | 0.02333                                  | 0.00055                                   | 997                                      | 124                                      | 210                             | 15                              | 149               | 3       | 0.82 | 11.79 |
| ZK806-09 | 115.99               | 148.95               | 0.78                 | 0.06481              | 0.009         | 0.16452                                   | 0.02064                                  | 0.01902                                  | 0.00061                                   | 768                                      | 214                                      | 155                             | 18                              | 121               | 4       | 0.77 | 41.68 |
| ZK806-10 | 134.73               | 177.14               | 0.76                 | 0.06511              | 0.01092       | 0.18543                                   | 0.03155                                  | 0.02117                                  | 0.00142                                   | 778                                      | 250                                      | 173                             | 27                              | 135               | 9       | 0.62 | 82.67 |
| ZK806-11 | 162.96               | 197.97               | 0.82                 | 0.04216              | 0.008         | 0.12301                                   | 0.02274                                  | 0.02172                                  | 0.00074                                   | -168                                     | 240                                      | 118                             | 21                              | 139               | 5       | 0.64 | 14.55 |
| ZK806-12 | 170.68               | 247.35               | 0.69                 | 0.04619              | 0.00654       | 0.14182                                   | 0.02084                                  | 0.02217                                  | 0.00051                                   | 8  | 242                                      | 135                             | 19                              | 141               | 3       | 0.61 | 89.54 |
| ZK806-13 | 158.94               | 209.64               | 0.76                 | 0.13104              | 0.01018       | 0.36711                                   | 0.02792                                  | 0.02086                                  | 0.0006                                    | 2112                                     | 93                                       | 318                             | 21                              | 133               | 4       | 0.62 | 17.63 |
| ZK806-14 | 140.71               | 183.74               | 0.77                 | 0.07602              | 0.00322       | 1.0548                                    | 0.04223                                  | 0.10343                                  | 0.0022                                    | 1096                                     | 47                                       | 731                             | 21                              | 634               | 13      | 0.28 | 2.65  |
| ZK806-15 | 280.01               | 283.94               | 0.99                 | 0.06987              | 0.00863       | 0.19581                                   | 0.02367                                  | 0.02166                                  | 0.00061                                   | 925                                      | 205                                      | 182                             | 20                              | 138               | 4       | 0.59 | 41.81 |
| ZK806-16 | 133.48               | 182.62               | 0.73                 | 0.05574              | 0.00851       | 0.16494                                   | 0.02522                                  | 0.02276                                  | 0.00057                                   | 442                                      | 299                                      | 155                             | 22                              | 145               | 4       | 0.44 | 57.49 |
| ZK806-17 | 150.02               | 294.20               | 0.51                 | 0.07045              | 0.0137        | 0.08667                                   | 0.01622                                  | 0.00888                                  | 0.00023                                   | 941                                      | 363                                      | 84                              | 15                              | 57                | 1       | 0.52 | 6.66  |
| ZK806-18 | 125.59               | 145.82               | 0.86                 | 0.06553              | 0.01237       | 0.1919                                    | 0.03837                                  | 0.0212                                   | 0.00108                                   | 791                                      | 347                                      | 178                             | 33                              | 135               | 7       | 0.77 | 9.75  |
| ZK806-19 | 195.75               | 242.45               | 0.81                 | 0.05758              | 0.00565       | 0.1826                                    | 0.01861                                  | 0.02254                                  | $\pm 0.00061$                             | 514                                      | $\pm 178$                                | 170                             | $\pm 16$                        | 144               | $\pm 4$ | 0.92 | 29.28 |
| ZK806-20 | 443.60               | 288.89               | 1.54                 | 0.06121              | $\pm 0.00703$ | 0.2                                       | $\pm 0.02354$                            | 0.02319                                  | $\pm 0.00067$                             | 647                                      | $\pm 207$                                | 185                             | $\pm 20$                        | 148               | $\pm 4$ | 0.68 | 29.55 |



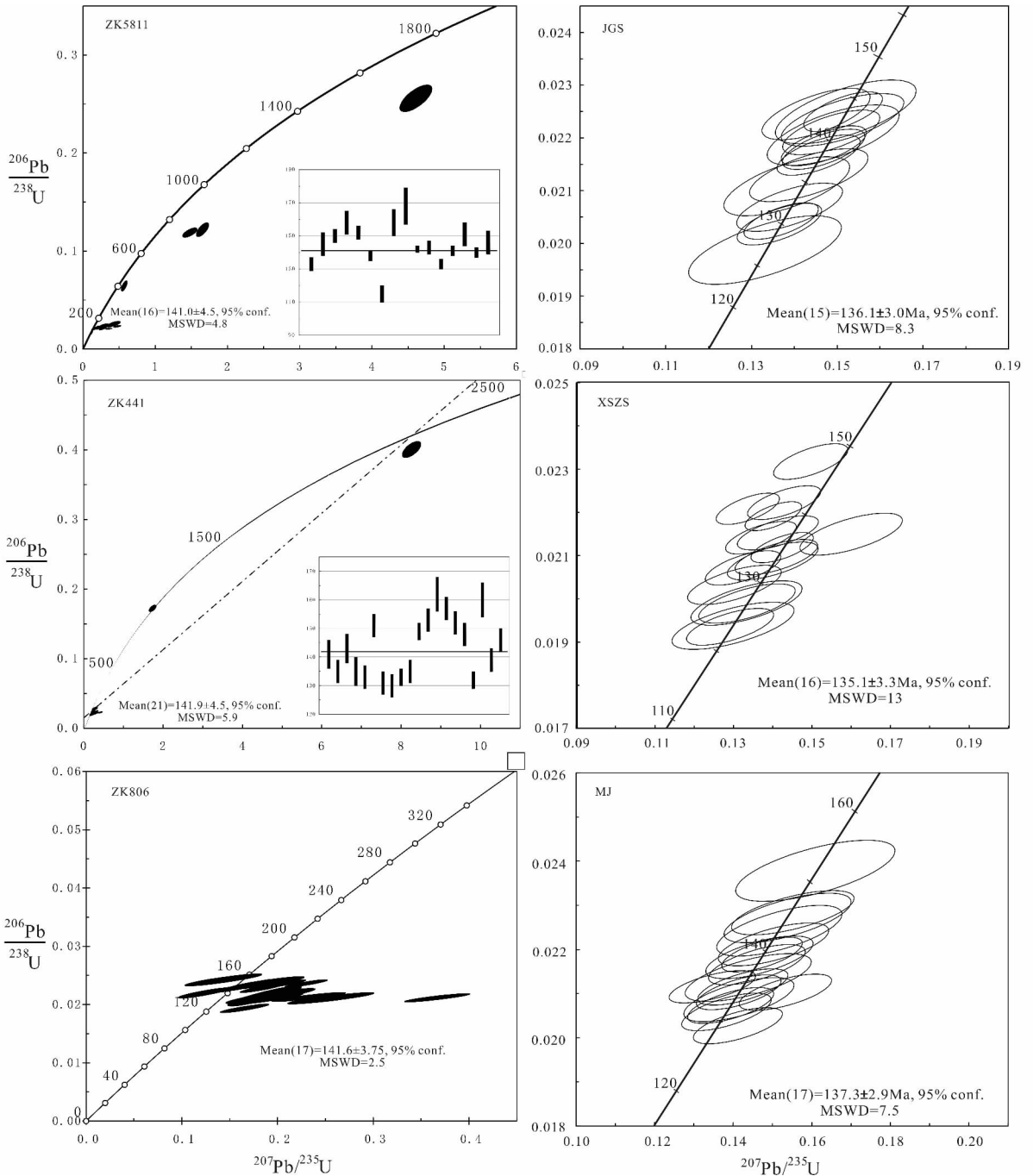


图3 铜陵地区侵入岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素年龄谱和图

Fig. 3 LA-ICP-MS zircon U-Pb Concordia diagrams for the intermediate intrusive rocks from Tongling region

龄 (平均为  $132.2 \pm 1.6$  Ma)。

## 5.2 花岗闪长岩

样品的 LA-ICP-MS 分析结果见表 1。花岗闪长岩三个钻孔样品 ZK5811、ZK441 和 ZK806 中锆石分析点获得的 Th 和 U 含量变化分别为  $42.0 \times 10^{-6} \sim 264.4 \times 10^{-6}$ 、 $70.4 \times 10^{-6} \sim 329.7 \times 10^{-6}$ 、 $89.7 \times 10^{-6} \sim 700.7 \times 10^{-6}$  和  $94.7 \times 10^{-6} \sim 362.7 \times 10^{-6}$ 、 $91.1 \times 10^{-6} \sim 329.7 \times 10^{-6}$ 、 $129.4 \times$

$10^{-6} \sim 294.2 \times 10^{-6}$ ，Th/U 比值变化范围不大，大部分都集中在为 0.5 ~ 0.8 (表 1)，表明这些锆石为典型的岩浆锆石 (Hoskin and Black, 2000; Belousova *et al.*, 2002)。ZK5811 样品 16 个锆石分析点的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄范围为  $115 \pm 5$  Ma 到  $168 \pm 11$  Ma， $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为  $141.0 \pm 4.5$  Ma (95% confidence, MSWD=4.8; 图 3)，代表了其形成年龄。在 Th/U 比值对  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄关系图解中，显示出明显的为线性关系 (图 4)。ZK441 样品 21 个锆石分析点的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄

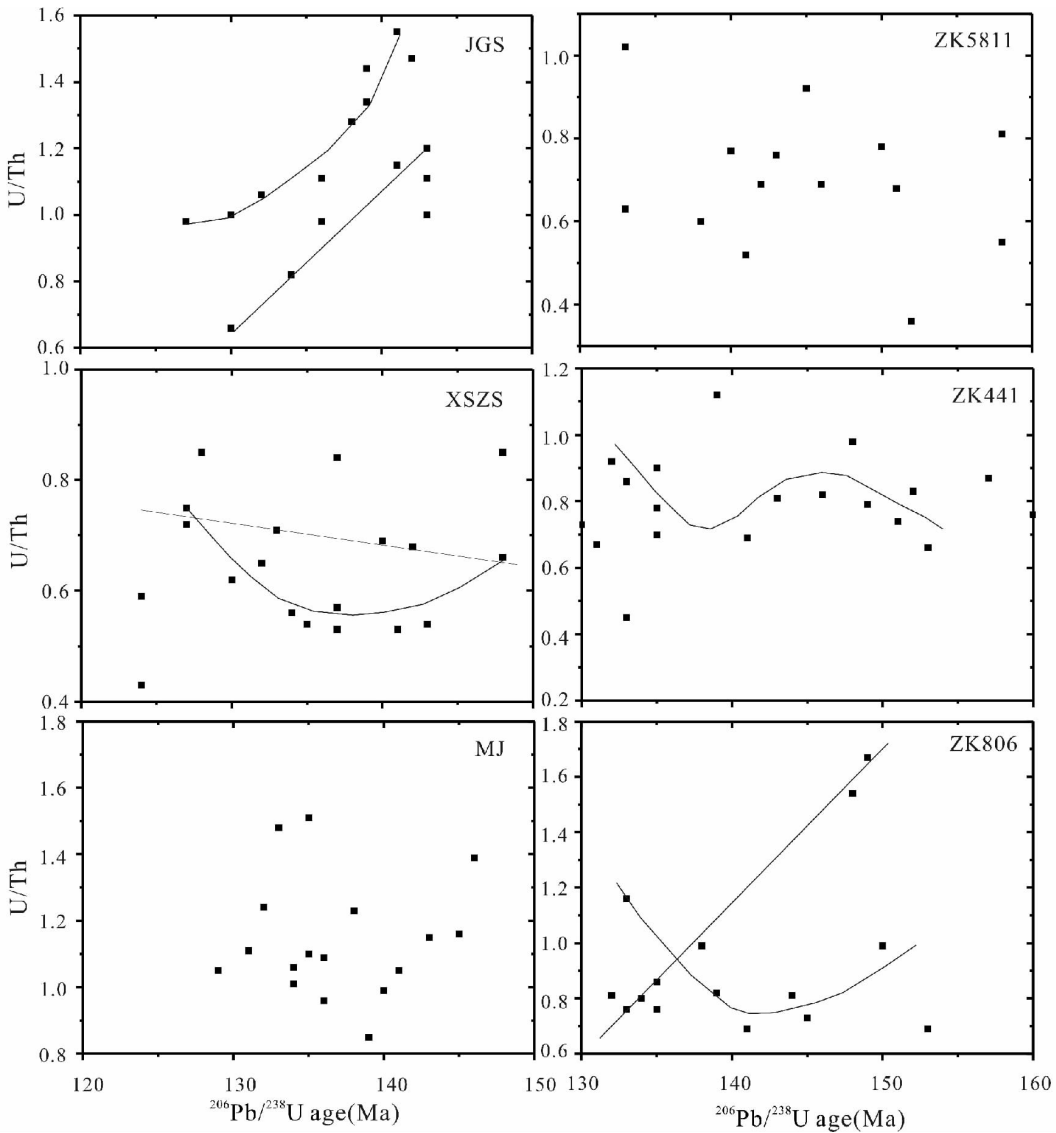


图4 铜陵地区侵入岩锆石<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄-Th/U 图解

Fig. 4 Zircon <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U ages-Th/U diagrams from the Tongling intrusive rocks

范围为  $130 \pm 4\text{Ma}$  到  $162 \pm 6\text{Ma}$ , <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 加权平均年龄为  $141.9 \pm 4.5\text{Ma}$  (95% confidence, MSWD = 5.9; 图3), 代表了其形成年龄。在 Th/U 比值对<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄关系图解中, 显示出明显的为曲线关系(图4)。ZK806 样品 17 个锆石分析点的<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄范围为  $57 \pm 1\text{Ma}$  到  $153 \pm 5\text{Ma}$ , <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 加权平均年龄为  $141.6 \pm 3.7\text{Ma}$  (95% confidence, MSWD = 2.5; 图3), 代表了其形成年龄。在 Th/U 比值对<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄关系图解中, 显示出两种趋向: 一种为曲线的关系, 另一种为线性关系(图4)。三个样品 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素年龄谱和图中分散的<sup>207</sup>Pb/<sup>235</sup>U 值是由于<sup>207</sup>Pb 计数不准确引起的, 并非铅丢失造成的。

## 6 讨论

### 6.1 岩浆岩形成年龄

陈江峰等(1985)对安徽铜陵铜官山石英闪长岩中的角闪石进行了 Ar-Ar 年龄测定, 获得了  $136.9 \pm 1.4\text{Ma}$ 。周泰禧等(1987)利用 Ar-Ar 和 K-Ar 分别对金口岭石英闪长岩和天鹅抱蛋闪长岩中黑云母进行了年龄测定, 获得了  $137.3 \pm 1.4\text{Ma}$  和  $136.5 \pm 0.9\text{Ma}$ 。吴才来等(1996)运用黑云母 Ar-Ar 同位素定年方法分别对冬瓜山石英二长闪长岩、胡村花岗岩闪长岩、舒家店辉石二长闪长岩和湖城涧辉长辉绿岩进行了研究, 得到了  $135.8 \pm 1.1\text{Ma}$ 、 $139.8 \pm 0.8\text{Ma}$ 、 $138.2 \pm 4.6\text{Ma}$  和

表2 铜陵地区侵入岩高精度锆石同位素地质年龄数据

Table 2 High precise zircon isotopic geological age dates of the intrusive rocks from Tongling region

| 序号 | 岩体名称 | 岩石类型    | 测试对象 | 测试方法     | 年龄值 (Ma)    | 资料来源                    |
|----|------|---------|------|----------|-------------|-------------------------|
| 1  | 白芒山  | 辉石二长闪长岩 | 锆石   | SHRIMP   | 139 ± 2     | 陆三明, 2007               |
| 2  | 朝山   | 辉石二长闪长岩 | 锆石   | SHRIMP   | 142.9 ± 1.1 | 王彦斌等, 2004 <sup>b</sup> |
| 3  | 胡村   | 花岗闪长岩   | 锆石   | SHRIMP   | 140 ± 3     | 陆三明, 2007               |
| 4  | 沙滩角  | 花岗闪长岩   | 锆石   | SHRIMP   | 151.8 ± 2.6 | Di <i>et al.</i> , 2005 |
| 5  | 凤凰山  | 花岗闪长岩   | 锆石   | SHRIMP   | 144.2 ± 2.3 | 张达等, 2006               |
| 6  | 矾头   | 石英二长闪长岩 | 锆石   | SHRIMP   | 140.0 ± 2.2 | 王彦斌等, 2004 <sup>a</sup> |
| 7  | 铜官山  | 石英闪长岩   | 锆石   | SHRIMP   | 141.3 ± 2.9 | 王彦斌等, 2004 <sup>c</sup> |
| 8  | 铜官山  | 石英闪长岩   | 锆石   | SHRIMP   | 133.3 ± 3.2 | 王彦斌等, 2004 <sup>c</sup> |
| 9  | 铜官山  | 石英闪长岩   | 锆石   | LA-ICPMS | 137.5 ± 1.1 | 徐夕生等, 2004              |
| 10 | 铜官山  | 微粒闪长岩包体 | 锆石   | LA-ICPMS | 137.5 ± 2.4 | 徐夕生等, 2004              |
| 11 | 小铜官山 | 石英二长闪长岩 | 锆石   | SHRIMP   | 142.8 ± 1.8 | Di <i>et al.</i> , 2005 |
| 12 | 小铜官山 | 石英二长闪长岩 | 锆石   | SHRIMP   | 139.5 ± 2.9 | 杜杨松等, 2007              |
| 13 | 西狮子山 | 石英闪长岩   | 锆石   | LA-ICPMS | 135.1 ± 3.3 | 本文                      |
| 14 | 青山脚  | 石英二长闪长岩 | 锆石   | SHRIMP   | 136 ± 2     | 陆三明, 2007               |
| 15 | 鸡冠石  | 石英二长闪长岩 | 锆石   | SHRIMP   | 134 ± 3     | 陆三明, 2007               |
| 16 | 鸡冠石  | 石英二长闪长岩 | 锆石   | LA-ICPMS | 136.1 ± 3.0 | 本文                      |
| 17 | 缪家   | 闪长玢岩    | 锆石   | LA-ICPMS | 137.3 ± 2.9 | 本文                      |
| 18 | 新华山  | 花岗闪长岩   | 锆石   | LA-ICPMS | 141.0 ± 4.5 | 本文                      |
| 19 | 南洪冲  | 花岗闪长岩   | 锆石   | LA-ICPMS | 141.2 ± 1.6 | 杨小男等, 2007              |
| 20 | 南洪冲  | 花岗闪长岩   | 锆石   | LA-ICPMS | 141.9 ± 4.5 | 本文                      |
| 21 | 向阳村  | 花岗闪长岩   | 锆石   | LA-ICPMS | 141.6 ± 3.7 | 本文                      |

133.3 ± 3.2Ma 年龄。曾普胜等(2004)报道了凤凰山和清水塘花岗闪长岩黑云母 K-Ar 法年龄 152.9 ± 2.9Ma 和 143.4 ± 2.2Ma。

高精度锆石 U-Pb 同位素定年在铜陵地区开展的较晚(表2),王彦斌等(2004a, b, c)首次应用锆石 SHRIMP 定年方法对本区与成矿有关的侵入岩体进行了年龄测定,获得了新桥石英闪长岩<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 加权平均年龄为 140.4 ± 2.2Ma、朝山辉石闪长岩<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 加权平均年龄为 142.9 ± 1.1Ma,而在铜官山石英闪长岩两个样品 508-1 和 508-2 获得的<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 加权平均年龄分别为 141.3 ± 2.9Ma 和 133.3 ± 3.2Ma。陆三明(2007)对狮子山矿田四个代表性岩体进行了锆石 SHRIMP 定年。其中胡村花岗闪长岩<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 加权平均年龄为 140 ± 3Ma (n = 13, MSWD = 0.49);白芒山辉石二长闪长岩<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 加权平均年龄为 139 ± 2Ma (n = 16, MSWD = 1.6);青山脚和鸡冠石石英二长闪长岩<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 加权平均年龄分别为 136 ± 2Ma (n = 15, MSWD = 1.3)和 134 ± 3Ma (n = 10, MSWD = 1.5)。Di *et al.* (2005)报道了铜陵小铜官山和沙滩脚侵入体锆石 SHRIMP 定年分别为 142.8 ± 1.8Ma 和 151.8 ± 2.6Ma。张达等(2006)报道了铜陵凤凰山花岗闪长岩岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 144.2 ± 2.3Ma。杜杨松等(2007)报道了铜陵小铜官山石英二长闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄(139.5 ± 2.9)Ma。

Xu *et al.* (2004)对铜官山石英闪长岩及其微粒闪长岩包体进行了 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 同位素定年,获得了<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 加权平均年龄分别为 137.5 ± 1.1Ma 和 137.5 ±

2.4Ma,包体的结晶年龄和石英闪长岩年龄完全一致。杨小男等(2007)对铜陵狮子山矿田南洪冲岩体进行了 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年,获得<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄为 141.2 ± 1.6Ma。本次对铜陵地区石英(二长)闪长岩进行了 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 同位素定年,获得了本区石英(二长)闪长岩组合<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 加权平均年龄分别为 136.1 ± 3.0Ma、135.1 ± 3.3Ma 和 137.3 ± 2.9Ma,与 Xu *et al.* (2004)的结果在误差范围内是一致的。本次所获得的三个花岗闪长岩组合岩石样品(ZK5811、ZK411、ZK806)的<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 加权平均年龄分别为 141.0 ± 4.5Ma、141.9 ± 4.5Ma 和 141.6 ± 3.7Ma,比石英闪长岩组合岩石样品的<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 加权平均年龄要高。

从高质量锆石 U-Pb 同位素<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 加权平均年龄结果表明铜陵地区中酸性侵入岩的年龄峰值主要在 135 ~ 145Ma 之间(表2,图5),三类侵入岩组合中花岗闪长岩组合的形成年龄在 140 ~ 144.2Ma,辉石(二长)闪长岩组合的形成年龄在 139 ~ 142.9Ma,而石英(二长)闪长岩组合的形成年龄在 133.3 ~ 142.8Ma,大多集中在 135 ~ 137.5Ma 之间。另外在铜陵地区地表见辉石闪长岩和石英闪长岩的先后侵入关系,除在新桥头石英闪长岩中见有辉石闪长岩的捕虏体外,在焦冲闪长玢岩中也见黑云母辉石闪长岩捕虏体,在银坑冲见石英闪长岩呈岩枝穿插于辉石闪长岩中,显然辉石闪长岩形成早于石英闪长岩。结果反映出铜陵地区花岗闪长岩组合年龄最老,辉石(二长)闪长岩组合的年龄次之,而石英(二长)闪长岩形成年龄最晚,说明本区岩浆演化并非正常的岩浆演化序列。Ar-Ar、K-Ar 等同位素定年结果虽比较分

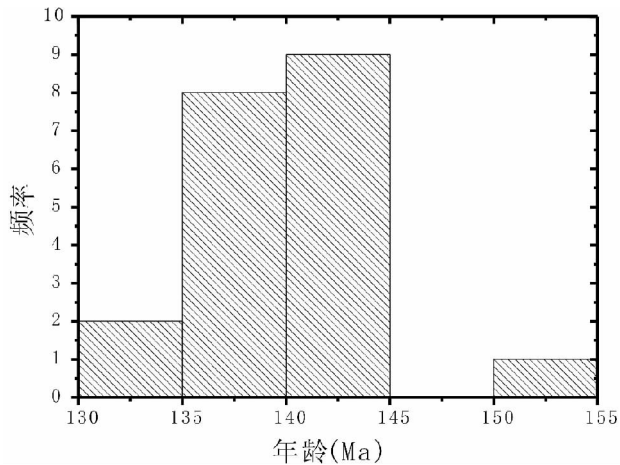


图5 铜陵地区侵入岩高质量锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄频谱图

Fig. 5 High precise zircon  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  weighted age frequency spectrum for the intrusive rocks in Tongling region

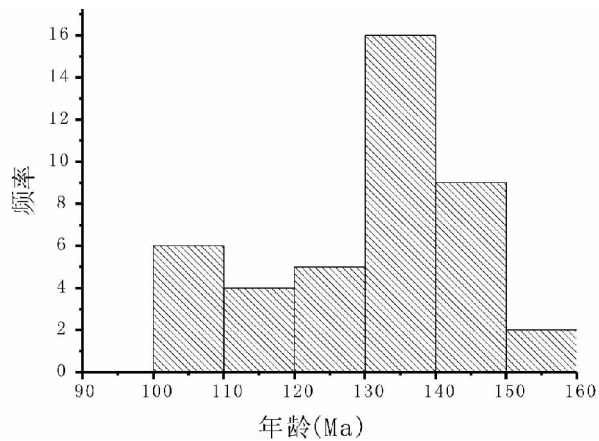


图6 铜陵地区侵入岩其它定年体系年龄频谱图

Fig. 6 Age frequency spectrum of other dating system for the intrusive rocks in Tongling region

散,但年龄峰值主要仍表现在 130 ~ 150Ma 之间(图 6),与高质量锆石 U-Pb 同位素 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄峰值相近,但年龄值比高质量锆石 U-Pb 同位素值略低,代表了角闪石和黑云母的封闭年龄,也能反映出本区岩浆演化并非正常的岩浆演化序列。两种年龄在误差范围内大体一致说明铜陵地区岩体侵入后可能有个快速冷却的过程。

### 6.2 铜陵地区成岩成矿事件

铜陵地区中酸性侵入岩(花岗闪长岩和石英闪长岩)的激光 ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄可以分为明显的两组: 130 ~ 132Ma 和 138 ~ 140Ma (表 1)。在这么短暂的时间内(10Ma),本区发生了两次集中的岩浆侵入事件活动。正是由于这频繁而集中的岩浆活动不仅为铜陵地区提供了丰富

的金属矿物质,而且结果导致了本区独特的成矿事件。关于老一组年龄,当前的铜陵地区中酸性侵入岩 SHRIMP 和 LA-ICPMS 锆石定年结果在误差范围内是一致的(王彦斌等, 2004 a, b, c; Xu *et al.*, 2004; Di *et al.*, 2005; 张达等, 2006; 杜杨松等, 2007; 陆三明, 2007; 杨小男等, 2007)。有意义的是,可代表中酸性侵入岩的形成年龄的这些高精度锆石 U-Pb 年龄与 K-Ar 和  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年龄(分别为  $136.5 \pm 0.9 \sim 138.6 \pm 4.0\text{Ma}$  和  $135.8 \pm 1.1 \sim 137.3 \pm 1.4\text{Ma}$ ) (Chen *et al.*, 1985; 曾普胜等, 2004; 吴才来等, 1996; 周泰熹等, 1987); Rb-Sr 全岩年龄(135 ~ 137Ma) (陈江峰等, 1993; 邢凤鸣和徐祥, 1996) 在误差范围内是一致的。K-Ar 和 Rb-Sr 同位素体系的封闭温度比锆石要低的多,锆石与 K-Ar 及 Rb-Sr 一致的年龄可能表明这些侵入岩形成后立刻经历了快速冷却的过程,或二者的结合。K-Ar 和 Rb-Sr 同位素体系的封闭温度约在 300 ~ 500℃,而铜陵地区中酸性侵入岩的结晶温度在 800℃。因此,铜陵地区中酸性侵入岩结晶后经历了快速冷却的过程。而且,中酸性侵入岩形成年龄也与本区的辉钼矿所代表的铜金成矿年龄在误差范围内是一致的,例如: Sun *et al.* (2003) 报道了本区狮子山矿田龙虎山辉钼矿 Os-Os 年龄为  $138.0 \pm 2.0\text{Ma}$ 。蒙义峰等(2004)报道了金口岭和塌里牧 Cu-Au 矿床的辉钼矿 Re-Os 等时线年龄  $137.0 \pm 0.19\text{Ma}$  和  $138.6 \pm 0.2\text{Ma}$ 。毛景文等(2004)对铜陵地区大团山、沙滩脚和南阳山的矽卡岩型层状矿体中的辉钼矿进行精确定年,得出铜钼金硫化物成矿的模式年龄为  $138.0 \pm 3.2\text{Ma} \sim 140.8 \pm 2.0\text{Ma}$ ,等时线年龄  $139.1 \pm 2.7\text{Ma}$ 。新一组年龄与庐枞和宁芜盆地的火山岩及侵入其中的浅成侵入岩的年龄相一致(约 127 ~ 131Ma) (Zhou *et al.*, 2008),在本区近地表没有明显的表现出来,但在庐枞盆地的火山岩及侵入其中的浅成侵入岩中已经发现中-大型斑岩铜矿,我们认为铜陵地区中酸性侵入岩的这组新年龄可能也对应有相一致的一期成矿事件,只不过未在地表显露出来。因此这组新年龄的发现为本区深部寻找斑岩型铜矿提供了依据。

谢建成等(2009)对新桥铜金铁硫矿床进行了黄铁矿 Re-Os 同位素精确定年,获得黄铁矿的等时线年龄为  $126 \pm 11\text{Ma}$ ,属于早白垩世,代表了铁硫化物的成矿年龄。与 Yu and Mao(2004)报道的宁芜斑岩铁矿中钠长石年龄  $122.9 \pm 0.2\text{Ma} \sim 124.9 \pm 0.3\text{Ma}$  接近。以上结果表明铁硫化物的成矿年龄在 112.6 ~ 126Ma,晚于铜金钼硫化物的成矿年龄。

在  $\text{Eu}/\text{Eu}^*$  [ $\text{Eu}/\text{Eu}^* = \text{Eu}_N/\text{SQRT}(\text{Sm}_N^* \text{Gd}_N)$ ] 对  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄图解(图 7)中,三个中性侵入岩样品(JGS、XSZS 和 MJ)和三个花岗闪长岩侵入岩样品(ZK5811、ZK441 和 ZK806)的锆石样品显示出周期性的变化趋势。 $\text{Eu}/\text{Eu}^*$  值主要变化在 0.6 ~ 0.9。在  $\text{Ce}/\text{Ce}^*$  ( $\text{Ce}/\text{Ce}^* = 2\text{Ce}_N/(\text{La}_N + \text{Pr}_N)$ ) 对  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄图解(图 8)中,鸡冠石石英二长闪长岩(JGS)和南洪冲花岗闪长岩(ZK441)的锆石样品也显示出周期性的变化趋势,峰值年龄约为 130Ma 和 139Ma,谷值年龄约为 126Ma 和 134Ma。 $\text{Ce}/\text{Ce}^*$  峰值对应的年龄与两组

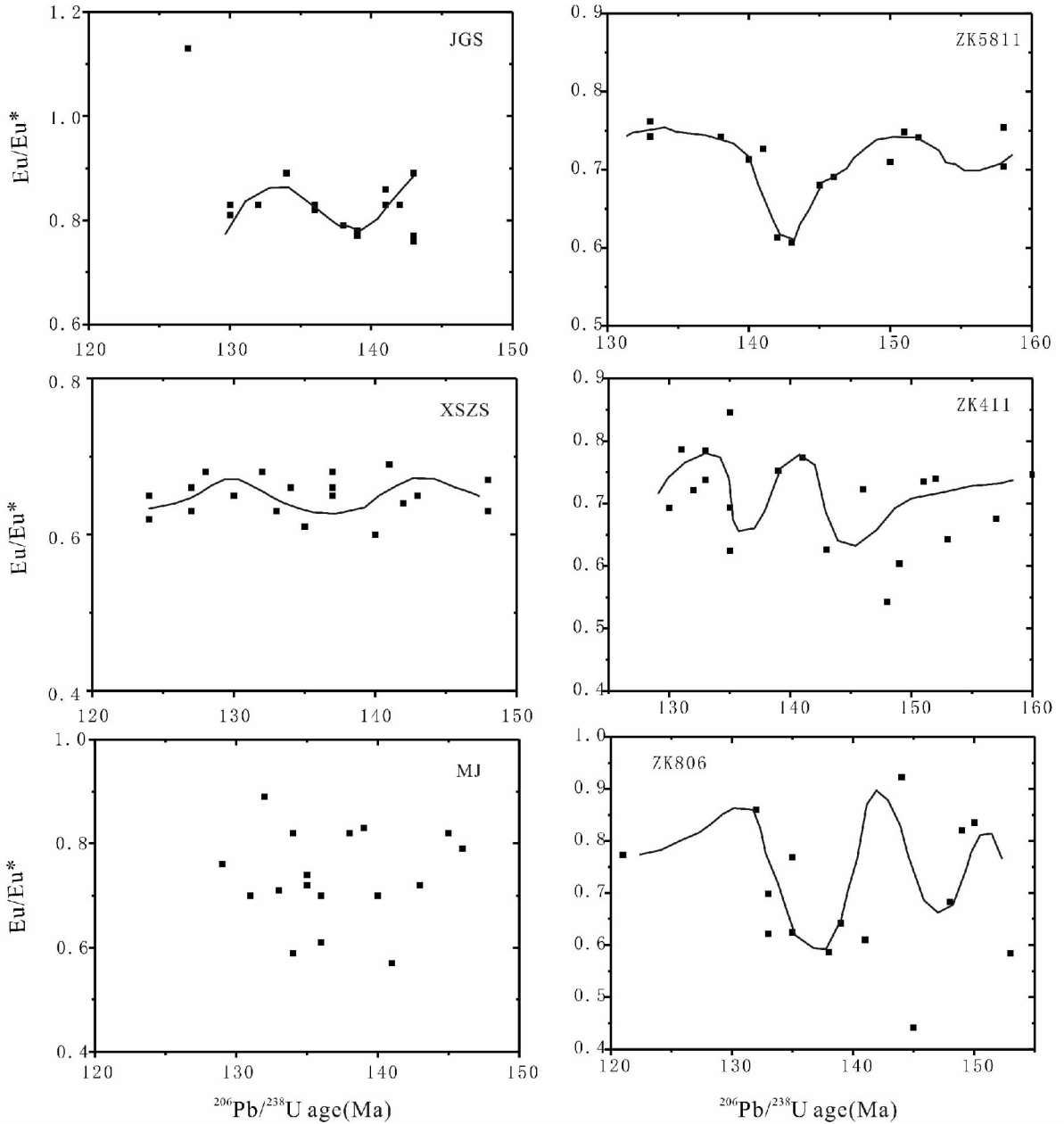


图7 铜陵地区侵入岩  $\text{Eu}/\text{Eu}^* - {}^{206}\text{Pb}/{}^{238}\text{U}$  年龄图解

Fig.7  $\text{Eu}/\text{Eu}^* - {}^{206}\text{Pb}/{}^{238}\text{U}$  age diagrams for the intrusive rocks in Tongling region

锆石 U-Pb 年龄相一致。西狮子山石英闪长岩 (XSZS) 的锆石样品表现出两种变化趋势: 一为低 Ce 异常 ( $< 50$ ) 表现出周期性的变化趋势, 另一为高 Ce 异常 ( $> 100$ ) 表现出周期性的变化趋势 (图 8)。新华山 (ZK441) 和向阳村 (ZK806) 花岗岩也表现出类似的特征 (图 8)。缪家闪长岩的锆石样品表现出与鸡冠石侵入岩样品相似的周期性的变化趋势 (图 8)。六个中酸性侵入岩特殊的 Ce 和 Eu 异常特征说明本区至少存在两种热液流体, 高 Ce 异常流体和低 Ce 异常流体。锆石 Ce 异常主要受岩浆的氧逸度控制, 受结晶温度的控制程度低 (Ballard *et al.*, 2002)。大量事实表明在氧化的长英质岩浆与成矿作用密切相关, 其中氧逸度起着支配作用

(Ballard *et al.*, 2002; Sun *et al.*, 2004)。岩浆的氧逸度控制着熔体中硫的氧化状态: 在低氧逸度情况下, 岩浆中的硫主要以  $\text{S}^{2-}$  的形式存在; 而在高氧逸度情况下, 它主要以  $\text{SO}$  和  $\text{SO}_2$  的形式存在。 $\text{S}^{2-}$  向  $\text{SO}$  或  $\text{SO}_2$  转换能阻止不混溶的硫化物相的饱和, 从而能从正在分馏的熔体中提取 Cu (Sun *et al.*, 2004)。这时高氧逸度岩浆中铜元素在分异和分馏中富集, 进入岩浆-热液流体中 (Ballard *et al.*, 2002; Sun *et al.*, 2004; Ulrich *et al.*, 1999)。高 Ce 异常与铜和金密切相关, 而低 Ce 异常与铁和硫密切相关 (Ballard *et al.*, 2002; Sun *et al.*, 2004; Liang *et al.*, 2006)。这与本区辉钼矿 Re-Os 年龄 (138 ~ 140Ma) 所代表的铜金矿床成矿事件和黄铁矿 Re-Os

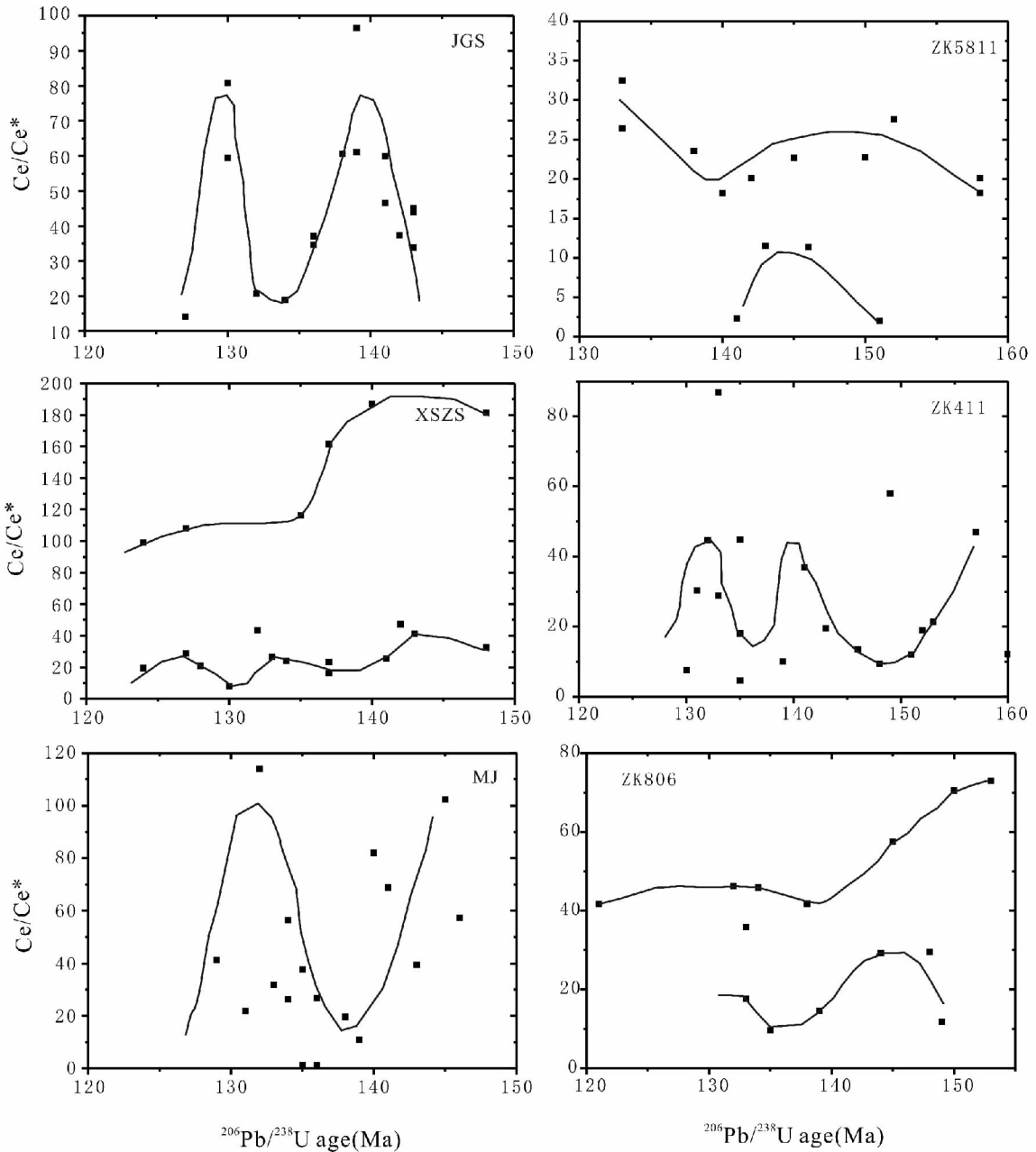


图 8 铜陵地区侵入岩 Ce/Ce\* - <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄图解

Fig. 8 Ce/Ce\* - <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U age diagrams for the intrusive rocks in Tongling region

年龄 (约 126Ma) 所代表的铁硫矿床成矿事件相吻合。

结合前人关于本区侵入岩的定年结果 (表 2), 铜陵地区主要表现出两次集中的侵入事件, 一次侵入时间为 138 ~ 140Ma, 这次显著的岩浆侵入事件对应了本区大规模的一次与高 Ce 异常流体密切相关的铜金成矿事件; 另一次侵入时间在 130 ~ 132Ma, 与庐枞和宁芜盆地的火山岩及侵入其中的浅成侵入岩的年龄相一致 (约 127 ~ 131Ma), 在本区没有显露成矿事件, 但在庐枞盆地中有中到大型斑岩铜矿床, 因此本区深部有可能存在斑岩型铜矿。本区还可能存在另一次与低 Ce 异常流体密切相关的铁硫成矿事件 (约 126Ma),

这次铁矿成矿时代与长江中下游地区 120Ma 到 126Ma 岩浆活动同时代。

### 6.3 岩浆—成矿作用的地球动力学背景

135 ~ 145Ma, 130Ma 和 120 ~ 126Ma 左右的岩浆—成矿作用遍布整个中国东部, 因此对它们形成的地球动力学背景就必须纳入一个统一的背景来考虑。但是这一时代的岩浆活动在华南 (广义的含义, 包括扬子和华夏地块) 和华北的分别特征有所不同。在华北主要沿南北两缘 (地块边界) 和郯庐断裂分布。似乎由与郯庐断裂有关的剪切活动所引起的,

但最近大多数学者认为是由西太平洋板块俯冲引起的,中国东部属于安第斯型活动陆缘环境(吴利仁, 1985; Jahn *et al.*, 1990; Lapierre *et al.*, 1997; Faure *et al.*, 1996; Davis *et al.*, 1996, 2001; Menzies and Xu, 1998; Zhou and Li, 2000; 邓晋福等, 2000; Zhou *et al.*, 2006)。而在华南则呈面状分布(Li, 2000; Zhou and Li, 2000)。长江中下游则正好是一个过渡地带,但与华南的特点更接近。从华南内部到东南沿海直到台湾,岩浆活动也有自西向东变年轻的趋势(Li, 2000; Zhou and Li, 2000),在这种情况下,太平洋俯冲很可能起到了关键作用。由于与A型花岗岩和具有板内地球化学特点的玄武岩共生,有的学者强调岩石圈拉张作用(可能具有弧后性质或郯庐走滑断裂系有关)(Li, 2000),认为其形成环境与美国西部的盆岭地区(Basin and Range Province)相似。而有的学者则认为180~80Ma之间太平洋板块的俯冲角度由非常平缓变化到中等,俯冲过程中地幔楔部分熔融生成的玄武岩岩浆的底垫(underplating)导致岩浆岩和矿床的形成(Zhou and Li, 2000)。邓晋福和吴宗絮(2001)指出在下扬子地区自晚侏罗世开始的突发性岩石圈去根诱发新生地幔岩浆注入地壳导致大规模岩浆一成矿作用。根据大别造山带中幔源基性岩地球化学性质的研究, Li and Yang (2003)提出一种模式,认为尽管地表出露的扬子—华北边界在北淮阳以北,但由于壳幔之间的拆离,扬子和华北岩石圈的边界可能在地表的大别南缘,即大体与长江中下游成矿带的位置相当。基于这一模式,当侏罗纪—白垩纪之交,太平洋板块开始向欧亚大陆俯冲,大致向西的俯冲导致大体南北向的拉张,扬子—华北岩石圈边界正是一薄弱地带,拉张达到较大深度,导致地幔上涌和岩石圈熔融,幔源岩浆加热导致地壳部分熔融,两种岩浆的混合和相互作用形成了种类丰富的岩浆岩(Li and Yang, 2003)。俯冲带的后退(Zhou and Li, 2000)使长江中下游岩浆岩带表现出自西向东年轻化的趋势。近来,根据华南中生代花岗岩—火山岩的性质、时空分布及其变化,以及地球化学性质的研究, Zhou *et al.* (2006)认为晚中生代时,自J<sub>2</sub>开始,古太平洋板块对欧亚大陆板块的消减作用,使华南地壳整体上处于伸展应力环境,并先后经历了两个时期,即燕山早期(J<sub>2</sub>-J<sub>3</sub>)发生在华南内陆的板内岩浆活动期和燕山晚期(K<sub>1</sub>-K<sub>2</sub>)的岩浆活动阶段(K<sub>1</sub>为主)和内陆弧后阶段(K<sub>2</sub>)。它们是大洋板片对大陆消减过程中伸展造山的早、晚两个时期。地壳伸展—减压熔融和作为热源的玄武岩岩浆底侵,是产生燕山期花岗质岩浆的两个主要原因。本次通过对铜陵地区侵入岩的研究支持了这种观点。长江中下游地区燕山晚期岩浆活动区与华南燕山期岩浆活动整体上所呈现的NE走向不协调,其原因可能与晚中生代发生的近EW向走向的沿江断裂构造带有关。

长江中下游地区岩浆活动与铁铜金矿床成矿时代总体有自南向北年代变新的趋势:由南到北分布着一系列由老到新的岩浆岩或矿床,如江西武山地区花岗闪长斑岩的年龄为145±3.9Ma(丁昕等, 2005),与武山铜矿南矿带辉钼矿

Re-Os 同位素年龄146.4±2.6Ma(李进文等, 2007b)是吻合的;鄂东南地区铜-金-钼矿床的矿床成矿年龄为138~144Ma(毛景文等, 2004; 谢桂青等, 2006, 2008a, b),和阳新花岗闪长岩和铜山口花岗闪长斑岩的锆石 SHRIMP 年龄(140Ma)在误差范围内基本上一致;安徽安庆铜矿月山岩体的形成时代为139Ma(Zhou *et al.*, 2007; 张乐骏等, 2008);到铜陵地区中性侵入岩的形成时代和成矿年龄在138~140Ma;再向北延伸至皖中的沙溪地区侵入岩的年龄和斑岩型铜矿的成矿年龄约在130Ma(王强等, 2001, 2004; Yang *et al.*, 2007)。所以,我们推测,长江中下游地区的岩浆岩,自中晚侏罗世以来,不断地受到洋壳成分的加入与改造,岩浆岩的成分具备某些洋壳型埃达克质岩石地球化学特征。其中的铁铜金多金属矿床的形成也受制于太平洋板块自东北向西南的斜向俯冲的大地构造环境,这个俯冲过程,也就是该区域壳幔地球化学作用的过程。

## 7 结论

(1)高质量锆石 U-Pb 同位素<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 加权平均年龄结果和 Ar-Ar、K-Ar 等同位素定年结果表明:铜陵地区中酸性侵入岩的年龄峰值主要在135~145Ma之间,三类侵入岩组合中花岗闪长岩组合的形成年龄在140~144.2Ma,辉石(二长)闪长岩组合的形成年龄在139~142.9Ma,而石英(二长)闪长岩组合的形成年龄在133.3~142.8Ma,大多集中在135~137.5Ma之间。结果表明铜陵地区中酸性侵入岩的成岩序列可能为花岗闪长岩→辉石(二长)闪长岩→石英(二长)闪长岩。Ar-Ar、K-Ar 等同位素年龄和高质量锆石 U-Pb 同位素<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 加权平均年龄在误差范围内大体一致说明铜陵地区岩体侵入后可能有个快速冷却的过程。

(2)铜陵地区可能主要表现出两次集中的岩浆侵入事件和两次成矿事件。一次岩浆侵入时间为138~140Ma,这次显著的岩浆侵入事件对应了本区大规模的一次与高Ce异常流体密切相关的铜金成矿事件;另一次侵入时间可能在130~132Ma,与庐枞和宁芜盆地的火山岩及侵入其中的浅成侵入岩的年龄相一致(约127~131Ma),在本区未显成矿事件,但在庐枞盆地中有中到大型斑岩铜矿床,因此本区深部有可能存在斑岩型铜矿。本区还可能存在另一次与低Ce异常流体密切相关的铁硫成矿事件(约126Ma),这次铁矿成矿时代与长江中下游地区120到126Ma岩浆活动同时代。研究表明长江中下游地区燕山期岩浆活动可能与西太平洋板块俯冲事件密切相关;相应的铜、金多金属矿床的形成也受控于太平洋板块斜向俯冲的大地构造环境。

**致谢** 本研究得到常印佛院士的指导,野外采样得到安徽省地矿局321地质队郭祥焱总工和蒋跃明高工的帮助以及二位审稿专家提出中肯而富有建设性的意见。

## References

- Anhui Bureau of Geology and Mineral. 1987. Regional Geologic Records of Anhui Province. Beijing: Geological Publishing House, 1 - 721 (in Chinese)
- Ballard JR, Palin JM and Campbell IH. 2002. Oxidized magmas associated with porphyry copper deposits in northern Chile: Inferences based on Ce (IV) /Ce (III) in zircon. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 144: 347 - 364
- Belousova EA, Griffin WL, Suzanne YOR and Fisher NI. 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143 (5): 602 - 622
- Chang YF, Liu XP and Wu YC. 1991. The Copper-iron Belt of the Middle and Lower Reaches of the Changjiang River. Beijing: Geological Publishing House, 1 - 239 (in Chinese with English abstract)
- Chen JF, Folland KA and Zhou TX. 1985. Mesozoic granitoids of the Yangtze fold belt, China: Isotopic constrains on the magma sources. In: Wu LR, *et al.* (eds.). *The crust-The Significance of Granites Gneisses in Lithosphere*. Theophrastus, Athens, 217 - 237
- Chen JF, Zhou TX, Li XM, Forland KA, Huang CY and Lu W. 1993. Sr and Nd isotopic constraints on source regions of the intermediate and acidic intrusions from southern Anhui Province. *Geochimica* (3): 261 - 268 (in Chinese with English abstract)
- Davis GA, Qian X, Zheng Y, Yu H, Wang C, Tong HM, Gehrels GE, Shafiquallah M and Fryxell JE. 1996. Mesozoic deformation and plutonism in the Yunmeng Shan: A Chinese metamorphic core complex north of Beijing, China. In: Yin A and Harrison TM (eds.). *The Tectonics Evolution of Asia*. Cambridge University Press, 253 - 280
- Davis GA, Zheng Y, Wang C, Darby BJ and Zhang CH. 2001. Mesozoic tectonic evolution of the Yanshan fold and thrust belt, with emphasis on Hebei and Liaoning provinces, northern China. In: Hendrix MS and Davis GA (eds.). *Paleozoic and Mesozoic Tectonics of Central Asia: From Continental Assembly to Intracontinental Deformation*. Boulder, Colorado: Geological Society of America, 171 - 197
- Deng JF and Wu ZX. 2001. Lithospheric thinning event in the Lower Yangtze Craton and Cu-Fe metallogenic belt in the Middle and Lower Yangtze River Reaches. *Anhui Geology*, 11 (2): 86 - 91 (in Chinese with English abstract)
- Deng JF, Dai SQ, Zhao HL and Du JG. 2002. Recognition of magma-fluid-metallogenic system and subsystem in the Tongling Cu-Au (Ag) metallogenic area. *Mineral Deposits*, 21 (4): 317 - 322 (in Chinese with English abstract)
- Deng JF, Zhao GC, Zhao HL, Luo ZH, Dai SQ and Li KM. 2000. Yanshanian igneous petro-tectonic assemblage and orogenic-deep processes in East China. *Geological Review*, 46: 41 - 48 (in Chinese with English abstract)
- Di YJ, Wu GG, Zhang D, Song B, Zang WS, Zhang ZY and Li JW. 2005. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of the Xiaotongguanshan and Shatanjiao intrusions and its petrological implications in the Tongling Area, Anhui. *Acta Geologica Sinica*, 79(6): 795 - 802
- Ding X, Jiang SY, Ni P, Gu LX and Jiang YH. 2005. Zircon SIMS U-Pb geochronology of host granitoids in Wushan and Yongping copper deposits, Jiangxi Province. *Geological Journal of China Universities*, 11 (3): 383 - 389 (in Chinese with English abstract)
- Du YS, Li ST, Cao Y, Qin XL and LouYE. 2007. UAFC-Related Origin of the Late Jurassic to Early Cretaceous Intrusions in the Tongguanshan Ore Field, Tongling, Anhui Province, East China. *Geology in China*, 21 (1): 71 - 77 (in Chinese with English abstract)
- Faure M, Sun Y, Shu L, Monie P and Charvel J. 1996. Extensional tectonics within a subduction-type orogen: The case study of the Wugongshan Dome (Jiangxi Province, southeastern China). *Tectonophysics*, 263: 77 - 106
- Hoskin PWO and Black LP. 2000. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon. *J. Meta. Geol.*, 18: 423 - 439
- Jahn BM, Zhou XH and Li JL. 1990. Formation and tectonic evolution of southeastern China and Taiwan: Isotopic and geochemical constraints. *Tectonophysics*, 183: 145 - 160
- Lapierre H, Jahn BM, Charvet J and Yu YW. 1997. Mesozoic felsic arc magmatism and continental olivine tholeiites in Zhejiang Province and their relationship with the tectonic activity in southeastern China. *Tectonophysics*, 274: 321 - 338
- Li JW, Li XH, Pei RF, Mei YX, Wang YL, Qun WJ, Huang XB, Zang WS. 2007b. Re-Os Age of molybdenite from the Southern ore zone of the Wushan copper deposit, Jiangxi Province, and its geological significance. *Acta Geologica Sinica*, 81 (6): 801 - 807 (in Chinese with English abstract)
- Li JW, Pei RF, Zang DQ, Mei YX, Zang WS, Meng GX, Zeng PS, Li TJ and Di YJ. 2007a. Geochemical characteristics of the Yanshanian intermediate-acid intrusive rocks in the Tongling mineralization concentration area, Anhui Province, and their geological Implications. *Acta Geoscientica Sinica*, 28 (1): 11 - 22 (in Chinese with English abstract)
- Li JY. 2001. Pattern and time of the collision between the Sino-Korean and Yangtze block; Evolution of the Sinian-Jurassic sedimentary settings in the middle-lower reaches of the Yangtze River. *Acta Geologica Sinica*, 75 (1): 25 - 34 (in Chinese with English abstract)
- Li SG and Yang W. 2003. Decoupling of surface and subsurface suture in the Dabie orogen and a continent-collisional lithospheric-wedging model; Sr-Nd-Pb isotopic evidence of Mesozoic igneous rocks in eastern China. *Chinese Sci. Bull.*, 48(8): 831 - 838
- Li SG, Xiao YL, Liu DL, Chen YZ, Ge NJ, Zhang ZQ, Sun SS, Cong BL, Zhang RY, Stanley RH and Wang SS. 1993. Collision of the North China and Yangtze blocks and formation of coesite-bearing eclogites, timing and processes. *Chemical Geology*, 109: 89 - 111
- Li SY, Meng QR, Wang Q, Kong WL and He G. 2008. Deposition of carbonate slope and ore-forming in Permian strata in the Middle-Lower Reaches of the Yangtze River, east China. *Acta Petrologica Sinica*, 24(8): 1733 - 1744 (in Chinese with English abstract)
- Li XF. 2000. Cretaceous magmatism and lithospheric extension South east China. *J. Asian Earth Sci.*, 18: 293 - 305
- Liang HY, Campbell IH, Allen C, Sun WD, Liu CQ, Yu HX, Xie YW and Zhang YQ. 2006. Zircon Ce<sup>4+</sup>/Ce<sup>3+</sup> ratios and ages for Yulong ore-bearing porphyries in eastern Tibet. *Miner Deposita*, 41: 152 - 159
- Liu YQ and Liu ZL. 1991. Isotope geochemistry and genesis of stratiform copper (iron-sulfur) deposits in Tongling area, Anhui Province. *Bulletin of Institute of Mineral Deposits*, (1): 70 - 101 (in Chinese with English abstract)
- Liu YQ, Liu ZL and Yang CX. 1984. Stable isotope studies of the Dongguanshan copper deposit in Tongling prefecture, Anhui Provinc. *Bulletin of Institute of Mineral Deposits*, (1): 47 - 114 (in Chinese with English abstract)
- Lu SM. 2007. The magmatism and fluid mineralization in Shizishan copper-gold ore-field of Tongling, Anhui Province. A dissertation submitted to Hefei University of Technology for the degree of Doctor of Philosophy, 1 - 156
- Ludwig KR. 2003. ISOPLOT 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication, No. 4, 1 - 70
- Mao JW, Stein H, Du AD, Zhou TF, Mei YX, Li YF, Zang WS and Li JW. 2004. Molybdenite Re-Os precise dating for molybdenite from Cu-Au-Mo deposits in the Middle-Lower Reaches of Yangtze River belt and its implications for mineralization. *Acta Geologica Sinica*, 78(1): 121 - 131 (in Chinese with English abstract)
- Meng YF, Yang ZS, Zeng PS, Xu WY and Wang XC. 2004. Tentative temporal constraints of ore-forming fluid systems in Tongling metallogenic province. *Mineral Deposits*, 23: 271 - 280 (in Chinese



- with English abstract)
- Menzies M and Xu Y. 1998. Geodynamics of the North China Craton. In: Flower M, Chung SL, Lo CH and Lee TY (eds.). Mantle Dynamics and Plate Interaction in East Asia. Washington, D C: Am. Geophys. Union Geodynamic, 27: 155 – 165
- Pan Y and Dong P. 1999. The lower Changjiang (Yangtze /Yangtze River) metallogenic belt, east center China; Intrusion and wallrock hosted Cu-Fe-Au, Mo, Zn, Pb, Ag deposits. Ore Geology Reviews, 15: 177 – 242
- Pei RF, Lv FX, Fan JZ, et al. 1998. Metallogenetic Series and Exploration of Metal Deposits in North Side. Beijing: Geological Publishing House, 91 – 106 (in Chinese with English abstract)
- Sun WD, Arculus RJ, Kamenetsky VS and Binns RA. 2004. Release of gold-bearing fluids in convergent margin magmas prompted by magnetite crystallization. Nature, 431: 976 – 978
- Sun WD, Xie Z, Chen JF, Zhang X, Chai ZF, Du AD, Zhao JS, Zhang CH and Zhou TF. 2003. Os-Os Dating of copper and molybdenum deposits along the Middle and Lower Reaches of Yangtze River, China. Economic Geology, 98 (1): 175 – 180
- Tang YC, Wu YC, Chu GZ, Xing FM, Wang YM, Cao FY and Chang YF. 1998. Geology of Copper-gold Polymetallic Deposits Along the Yangtze River, Anhui Province. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 351 (in Chinese with English abstract)
- Ulrich T, Guether D and Heinrich CA. 1999. Gold concentrations of magmatic brines and the metal budget of porphyry copper deposits. Nature, 399: 676 – 679
- Wang Q, Xu JF, Zhao ZF, Xiong XL and Bao ZW. 2003. Petrogenesis of the Mesozoic intrusive rocks in the Tongling area, Anhui Province, China and their constraint on geodynamic process. Science in China (Series D), 33(4): 323 – 334
- Wang Q, Zhao ZH, Jian P, Xu JF, Bao ZW and Ma JL. 2004. SHRIMP zircon geochronology and Nd-Sr isotopic geochemistry of the Dexing granodiorite porphyries. Acta Petrologica Sinica, 20(2): 315 – 324 (in Chinese with English abstract)
- Wang Q, Zhao ZH, Xiong XL and Xu JF. 2001. Crustal growth and the melting of mafic lower crust: Evidence from the Shaxi adakitic sodic quartz diorite-porphyrites, in Anhui Province, China. Geochimica, 30: 353 – 362 (in Chinese with English abstract)
- Wang Y, Deng JF and Ji GY. 2004. 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. Acta Petrologica Sinica, 20(2): 297 – 314 (in Chinese with English abstract)
- Wang YB, Liu DY, Meng YF, Zeng PS, Yang ZS and Tian SH. 2004a. SHRIMP U-Pb geochronology of the Xinqiao Cu-S-Fe-Au deposit in Tongling ore district, Anhui. Geology in China, 31(2): 169 – 173 (in Chinese with English abstract)
- Wang YB, Liu DY, Zeng PS, Yang ZS and Tian SH. 2004b. SHRIMP U-Pb geochronology of pyroxene diorite in the Chaoshan gold deposit and its geological significance. Acta Geoscientia Sinica 25(4): 423 – 427 (in Chinese with English abstract)
- Wang YB, Liu DY, Zeng PS, Yang ZS and Tian SH. 2004c. SHRIMP U-Pb geochronology of Xiaodongguanshan quartz-dioritic intrusions in Tongling district and its petrogenetic implications. Acta Petrologica et Mineralogica, 23(4): 298 – 304 (in Chinese with English abstract)
- Wang YL, Wang Y, Zhang Q, Jia XQ and Han S. 2004. The geochemical characteristics of Mesozoic intermediate-acid intrusives of the Tongling area and its metallogenesis-geodynamic implications. Acta Petrologica Sinica, 20(2): 325 – 338 (in Chinese with English abstract)
- Wu CL, Chen SN, Shi RD and He MY. 2003. Origin and features of the Mesozoic intermediate acid intrusive in the Tongling area, Anhui, China. Acta Geoscientia Sinica, 24(1): 41 – 48 (in Chinese with English abstract)
- Wu CL, Zhou XR, Huang XC, Zhang CH and Huang WM. 1996.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  chronology of intrusive rocks from Tongling. Acta Petrologica et Mineralogica, 15(4): 299 – 306 (in Chinese with English abstract)
- Wu LR and Qi JY. 1985. The Mesozoic volcanic rocks along the lower reaches of Yangtze River region. Institute of Geology, Academia Sinica. Petrological Research. Beijing: Science Press, 1 – 10 (in Chinese with English abstract)
- Xie GQ, Li RL, Jiang GH, Zhao CS and Hou KJ. 2008a. Geochemistry and petrogenesis of Late Mesozoic granitoids in southeastern Hubei Province and constrains on the timing of lithospheric thinning, Middle-Lower Reaches of the Yangtze River, eastern China. Acta Petrologica Sinica, 24(8): 1703 – 1714 (in Chinese with English abstract)
- Xie GQ, Mao JW, Li RL, Jiang GH, Zhao CS, Zhao HJ, Hou KJ and Pan HJ. 2008b.  $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$  Ar phlogopite dating of large skarn Fe deposits and tectonic framework in southeastern Hubei Province, Middle-Lower Reaches of the Yangtze River, eastern China. Acta Petrologica Sinica, 24(8): 1917 – 1927 (in Chinese with English abstract)
- Xie GQ, Mao JW, Li RL, Zhang ZS, Zhao WC, Qu WJ, Zhao CS and Wei SK. 2006. Timing of mineralization and geodynamic framework of Cu-Au-Mo-(W) deposits from Southeastern Hubei Province, China: Constraints from Re-Os molybdenite. Mineral Deposits, 25(1): 43 – 52 (in Chinese with English abstract)
- Xie JC, Yang XY, Du JG, Du XW, Xiao YL, Qu WJ and Sun WD. 2009. Re-Os precise dating of pyrite from the Xinqiao Cu-S-Fe-Au deposits in Tongling: Its implications for mineralization. Chinese Journal of Geology, 44(1) (in press) (in Chinese with English abstract)
- Xing FM and Xu X. 1995. The essential features of magmatic rocks along the Yangtze River in Anhui Province. Acta Petrologica Sinica, 11(4): 409 – 422 (in Chinese with English abstract)
- Xing FM and Xu X. 1996. High-potassium calc-alkaline intrusive rocks in Tongling area, Anhui Province. Geochimica, 25(1): 29 – 38 (in Chinese with English abstract)
- Xing FM and Xu X. 1999. Yangtze Magmatic Belt and Metallogenesis. Hefei: Anhui People's Publishing House, 1 – 170 (in Chinese)
- Xu G and Lin X. 2000. Geology and geochemistry of the Changlongshan skarn iron deposit, Anhui Province, China. Ore Geology Reviews, 16(1-2): 91 – 106
- Xu G and Zhou J. 2001. The Xinqiao Cu-S-Fe-Au deposit in the tongling mineral district, China: Synorogenic remobilization of a stratiform sulfide deposit. Ore Geology Reviews, 18(1-2): 77 – 94
- Xu XS, Fan QC, O'Reilly SY, Jiang SY, Griffin WL, Wang RC and Qiu JS. 2004. U-Pb dating of zircons from quartz diorite and its enclaves at Tongguanshan in Anhui and its petrogenetic implication. Chinese Science Bulletin, 49(19): 2073 – 2082
- Yang XN, Xu ZW, Zhang J, Wang YJ, Xu XS, Jiang SY, Ling HF, Liu LG and Chen DY. 2007. Geochronology and origin of Nanhongchong pluton in Shizishan ore-field, Anhui Province. Acta Petrologica Sinica, 23(6): 1543 – 1551 (in Chinese with English abstract)
- Yang XY, Zheng YF, Xiao YL, Du JG and Sun WD. 2007.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  Ar dating of the Shaxi porphyry Cu-Au deposit in the southern Tan-Lu Fault Zone, Anhui Province. Acta Geologica Sinica, 81(3): 477 – 487
- Yu JJ and Mao JW. 2004.  $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$  Ar dating of albite and phlogopite from porphyry iron deposits in the Ningwu basins in east-central China and its significance. Acta Geologica Sinica, 78: 435 – 442
- Yuan HL, Gao S, Liu XM, Li HM, Detlef G and Wu FY. 2004. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry. Geostandard and Geoanalytical Research, 28: 353 – 370
- Yuan HL, Wu FY, Gao S, Liu XM, Xu P and Sun DY. 2003. LA-ICP-MS Zircon U-Pb age and REE of Cenozoic pluton in NE China. Chinese Sci. Bull., 48(14): 1511 – 1520 (in Chinese)
- Zeng PS, Yang ZS, Meng YF, Pei RF, Wang YB, Wang XC, Xu WY, Tian SH and Yao XD. 2004. Temporal-spatial configuration and mineralization of Yanshanian magmatic fluid systems in Tongling ore concentration area, Anhui Province. Mineral Deposits, 23(3): 298 – 309 (in Chinese with English abstract)

- Zhai YS, Xiong YL, Yao SZ and Lin XD. 1996. Metallogeny of copper and iron deposits in the Eastern Yangtze Craton, east-central China. *Ore Geology Reviews*, 11: 229 – 248
- Zhang D, Wu GG, DI YJ, Zang WS, Shao YJ, Yu XQ, Zhang XX and Wang QF. 2006. Emplacement dynamics of Fenghuangshan Pluton (Tongling, Anhui Province); Constraints from U-Pb SHRIMP dating of zircons and structural deformation. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 31(6): 823 – 829 (in Chinese with English abstract)
- Zhang LJ, Zhou TF, Fan Y and Yuan F. 2008. SHRIMP U-Pb zircon dating of Yueshan intrusion in the Yueshan ore field, Anhui, and its significance. *Acta Petrologica Sinica*, 24(8): 1725 – 1732 (in Chinese with English abstract)
- Zhou TF, Fan Y and Yuan F. 2008. Advances on petrogenesis and metallogeny study of the mineralization belt of the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River area. *Acta Petrologica Sinica*, 24(8): 1665 – 1678 (in Chinese with English abstract)
- Zhou TF, Fan Y, Yuan F, Lu SM, Shang SG, David C, Sebastien M and Zhao GC. 2008. Geochronology of the volcanic rocks in the Lu-Zong (Lujiang-Zongyang) basin and its significance. *Sci. China (Ser. D)*, 51(10): 1470 – 1482
- Zhou TF, Yuan F, Yue SC, Liu XD, Zhang X and Fan Y. 2007. Geochemistry and evolution of ore-forming fluids of the Yueshan Cu-Au skarn- and vein-type deposits, Anhui Province, South China. *Ore Geology Reviews*, 31(2): 279 – 303
- Zhou TX, Li M, Zhao J S and Zhang FT. 1987. Geochronology of igneous rocks from the Tongguanshan ore area of Anhui Province. *Journal of China University of Science & Technology*, 17(3): 403 – 407 (in Chinese with English abstract)
- Zhou XM and Li WX. 2000. Origin of late Mesozoic igneous rocks in southeastern China; Implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magma. *Tectonophysics*, 326: 269 – 278
- Zhou XM, Sun T and Shen WZ. 2006. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution. *Episodes*, 29: 26 – 33
- 附中文参考文献**
- 安徽省地矿局. 1987. 安徽省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1 – 721
- 常印佛, 刘湘培, 吴言昌. 1991. 长江中下游铜铁成矿带. 北京: 地质出版社, 1 – 239
- 陈江峰, 周泰禧, 李学明, Forland KA, 黄承义, 卢伟. 1993. 安徽南部燕山期中酸性侵入岩的源区锶、钍同位素制约. *地球化学*, 22(3): 261 – 268
- 邓晋福, 戴圣潜, 赵海玲, 杜建国. 2002. 铜陵 Cu-Au(Ag)成矿区岩浆—流体—成矿系统和亚系统的识别. *矿床地质*, 21(4): 317 – 322
- 邓晋福, 吴宗絮. 2001. 下扬子克拉通岩石圈减薄事件与长江中下游 Cu-Fe 成矿带. *安徽地质*, 11(2): 86 – 91
- 邓晋福, 赵国春, 赵海玲, 罗照华, 戴圣潜, 李凯明. 2000. 中国东部中生代火成岩构造组合与造山—深部过程. *地质论评*, 46: 41 – 48
- 丁昕, 蒋少涌, 倪培, 顾连兴, 姜耀辉. 2005. 江西武山和永平铜矿含矿花岗质岩体锆石 SIMS U-Pb 年代学. *高校地质学报*, 11(3): 383 – 389
- 杜杨松, 李顺庭, 曹毅, 秦新龙, 楼亚儿. 2007. 安徽铜陵铜官山矿区长生代侵入岩的形成过程——岩浆地侵、同化混染和分离结晶. *现代地质*, 21(1): 71 – 77
- 李锦轶. 2001. 中朝地块与扬子地块碰撞的时限与方式——长江中下游地区震旦纪—侏罗纪沉积环境的演化. *地质学报*, 75(1): 25 – 34
- 李进文, 裴荣富, 张德全, 梅燕雄, 臧文栓, 孟贵祥, 曾普胜, 李铁军, 狄永军. 2007a. 铜陵矿集区燕山期中酸性侵入岩地球化学特征及其地质意义. *地球学报*, 28(1): 11 – 22
- 李进文, 李旭辉, 裴荣富, 梅燕雄, 王永磊, 屈文俊, 黄修保, 臧文栓. 2007b. 江西武山铜矿南矿带辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及其地质意义. *地质学报*, 81(6): 801 – 807
- 李双应, 孟庆任, 万秋, 孔为伦, 何刚. 2008. 长江中下游地区二叠纪碳酸盐斜坡沉积及其成矿意义. *岩石学报*, 24(8): 1733 – 1744
- 刘裕庆, 刘兆廉, 杨成兴. 1984. 铜陵地区冬瓜山铜矿的稳定同位素研究. *中国地质科学院矿床地质研究所所刊*, 第 1 号: 47 – 114
- 刘裕庆, 刘兆廉. 1991. 铜陵地区层状铜(铁、硫)矿床同位素地球化学和矿床成因研究. *中国地质科学院矿床地质研究所所刊*, 第 1 号: 70 – 101
- 陆三明. 2007. 安徽铜陵狮子山铜金矿田岩浆作用与流体成矿. 博士学位论文. 合肥: 合肥工业大学
- 毛景文, Stein H, 杜安道, 周涛发, 梅燕雄, 李永峰, 臧文栓, 李进文. 2004. 长江中下游地区铜金(钼)矿 Re-Os 年龄测定及其对成矿作用的指示. *地质学报*, 78(1): 121 – 131
- 蒙义峰, 杨竹森, 曾普胜, 徐文艺, 王训诚. 2004. 安徽铜陵矿集区成矿流体系统时限的初步厘定. *矿床地质*, 23(3): 271 – 280
- 裴荣富, 吕凤翔, 范继璋等. 1998. 华北地块北缘及其北侧金属矿床成矿系列与勘查. 北京: 地质出版社. 91 – 106
- 唐永成, 吴言昌, 储国正, 邢凤鸣, 王永敏, 曹奋扬, 常印佛. 1998. 安徽沿江地区铜金多金属矿床地质. 北京: 地质出版社, 1 – 351
- 汪洋, 邓晋福, 姬广义. 2004. 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. *岩石学报*, 20(2): 297 – 314
- 王强, 许继峰, 赵振华, 熊小林, 包志伟. 2003. 安徽铜陵地区燕山期侵入体的成因及其对深部动力学过程的制约. *中国科学(D 辑)*, 33(4): 323 – 334
- 王强, 赵振华, 简平, 许继峰, 包志伟, 马金龙. 2004. 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. *岩石学报*, 20(2): 315 – 324
- 王强, 赵振华, 熊小林, 许继峰. 2001. 底侵玄武质下地壳的熔融: 来自沙溪 Adakite 质富钠石英闪长岩的证据. *地球化学*, 30: 353 – 362
- 王彦斌, 刘敦一, 蒙义峰, 曾普胜, 杨竹森, 田世洪. 2004a. 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. *中国地质*, 31(2): 169 – 173
- 王彦斌, 刘敦一, 曾普胜, 杨竹森, 田世洪. 2004b. 安徽铜陵地区幔源岩浆底侵作用的时代——朝山辉石闪长岩锆石 SHRIMP 定年. *地球学报*, 25(4): 423 – 427
- 王彦斌, 刘敦一, 曾普胜, 杨竹森, 蒙义峰, 田世洪. 2004c. 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. *岩石矿物学杂志*, 23(4): 298 – 304
- 王元龙, 王焰, 张旗, 贾秀琴, 韩松. 2004. 铜陵地区中生代中酸性侵入岩的地球化学特征及其成矿——地球动力学意义. *岩石学报*, 20(2): 325 – 338

- 吴才来, 陈松年, 史仁灯, 郝美英. 2003. 铜陵中生代中酸性侵入岩特征与成因. 地球学报, 24(1): 41-48
- 吴才来, 周珣若, 黄许陈, 张成火, 黄文明. 1996. 铜陵地区中酸性侵入岩年代学研究. 岩石矿物学杂志, 15(4): 299-306
- 吴利仁, 齐进英. 1985. 中国东部中生代花岗岩类. 岩石学报, 1(1): 1-10
- 谢桂青, 毛景文, 李瑞玲, 张祖送, 赵维超, 屈文俊, 赵财胜, 魏世昆. 2006. 鄂东南地区 Cu-Au-Mo-(W) 矿床的成矿时代及其成矿地球动力学背景探讨: 辉钼矿 Re-Os 同位素年龄. 矿床地质, 25(1): 43-52
- 谢桂青, 李瑞玲, 蒋国豪, 赵财胜, 侯可军. 2008a. 鄂东南地区晚中生代侵入岩的地球化学和成因及对岩石圈减薄时限的制约. 岩石学报, 24(8): 1703-1714
- 谢桂青, 毛景文, 李瑞玲, 蒋国豪, 赵财胜, 赵海杰, 侯可军, 熊继传. 2008b. 鄂东南地区大型矽卡岩型铁矿床金云母<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 同位素年龄及其构造背景初探. 岩石学报, 24(8): 1917-1927
- 谢建成, 杨晓勇, 杜建国, 杜小伟, 肖益林, 屈文俊, 孙卫东. 2009. 安徽铜陵新桥 Cu-S-Fe-Au 矿床黄铁矿 Re-Os 定年及对成矿的指示意义. 地质科学, 44(1): (in press)
- 邢凤鸣, 徐祥. 1995. 安徽沿江地区中生代岩浆岩的基本特点. 岩石学报, 11(4): 409-422
- 邢凤鸣, 徐祥. 1996. 铜陵地区高钾钙碱系列侵入岩. 地球化学, 25(1): 29-38
- 邢凤鸣, 徐祥. 1999. 安徽扬子岩浆岩带与成矿. 合肥: 安徽人民出版社, 1-170
- 杨小男, 徐兆文, 张军, 王云健, 徐夕生, 蒋少涌, 凌洪飞, 刘良跟, 陈达源. 2007. 安徽狮子山矿田南洪冲岩体形成时代及成因机制研究. 岩石学报, 23(6): 1543-1551
- 袁洪林, 吴福元, 高山, 柳小明, 徐平, 孙德有. 2003. 中国东部新生代侵入体的锆石激光探针年龄测定与稀土元素成分分析. 科学通报, 48(14): 1511-1520
- 曾普胜, 杨竹森, 蒙义峰, 裴荣富, 王彦斌, 王训诚, 徐文艺, 田世洪, 姚孝德. 2004. 安徽铜陵矿集区燕山期岩浆流体系时空结构及成矿. 矿床地质, 23(3): 298-309
- 张达, 吴淦国, 狄永军, 臧文拴, 邵拥军, 余心起, 张祥信, 汪群峰. 2006. 铜陵凤凰山岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄与构造变形及其对岩体侵位动力学背景的制约. 地球科学——中国地质大学学报, 31(6): 823-829
- 张乐骏, 周涛发, 范裕, 袁峰. 2008. 安徽月山岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其意义. 岩石学报, 24(8): 1725-1732
- 周泰禧, 李学明, 赵家深, 张富陶. 1987. 安徽铜陵铜官山矿田火成岩的同位素地质年龄. 中国科学技术大学学报, 17(3): 403-407
- 周涛发, 范裕, 袁峰. 2008. 长江中下游成矿带成岩成矿作用研究进展. 岩石学报, 24(8): 1665-1678