

doi: 10.12029/gc20200412

吴迪, 于炳松, 吴才来, 雷敏, 徐楠, 郑坤. 2020. 安徽铜陵焦冲矿田侵入岩锆石 U-Pb 定年、Hf 同位素特征及成因[J]. 中国地质, 47(4): 1069-1091.

Wu Di, Yu Bingsong, Wu Cailai, Lei Min, Xu Nan, Zheng Kun. 2020. Zircon U-Pb dating, Hf isotopic characteristics and genesis of the intrusive rocks in the Jiaochong deposit, Tongling area, Anhui Province[J]. *Geology in China*, 47(4):1069-1091(in Chinese with English abstract).

## 安徽铜陵焦冲矿田侵入岩锆石 U-Pb 定年、 Hf 同位素特征及成因

吴迪<sup>1,2</sup>, 于炳松<sup>2</sup>, 吴才来<sup>3</sup>, 雷敏<sup>3</sup>, 徐楠<sup>3</sup>, 郑坤<sup>3,4</sup>

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100083;  
3. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 4. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871)

**摘要:**安徽铜陵矿集区出露的侵入岩可划分为高钾钙碱性和橄榄安粗岩系列,作为铜陵 7 大矿田之一的焦冲地区是否也存在两个系列侵入岩? 它们的时代及成因与整个铜陵地区的侵入岩是否相同? 这些问题目前仍不清楚。本文选择铜陵焦冲矿田的侵入岩开展了岩相学、岩石地球化学、LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年及原位 Hf 同位素地球化学研究。结果表明,焦冲矿田也存在高钾钙碱性系列和橄榄安粗岩系列侵入岩,前者的主要岩石类型为石英二长闪长岩、花岗闪长岩,后者为辉石二长闪长岩。LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年结果显示,高钾钙碱性系列侵入岩年代与铜陵地区其他矿区同类岩石年代相同,约为 142 Ma;而橄榄安粗岩系列侵入岩年代比铜陵地区其他矿区同类岩石年轻,约为 136 Ma。总体上看,铜陵地区两个系列侵入岩具有多期次侵位的特征。焦冲高钾钙碱性系列侵入岩含有较多的老的继承性锆石,说明本区古老地壳卷入了岩浆形成过程。结合铜陵地区侵入岩的特征和焦冲矿田侵入岩岩石地球化学研究结果,笔者认为,焦冲矿田两个系列侵入岩成因与铜陵地区侵入岩相似,即橄榄安粗岩系列侵入岩是来自莫霍面附近深部位岩浆房富碱基性岩浆结晶分异后的产物,而高钾钙碱性系列侵入岩是深位岩浆房分异后的岩浆与浅位岩浆房长英质岩浆混合后的产物。

**关键词:**锆石 LA-ICPMS U-Pb 定年; 岩石地球化学; 侵入岩; 铜陵焦冲

中图分类号:P597;P588.12<sup>+</sup>1 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2020)04-1069-23

## Zircon U-Pb dating, Hf isotopic characteristics and genesis of the intrusive rocks in the Jiaochong deposit, Tongling area, Anhui Province

WU Di<sup>1,2</sup>, YU Bingsong<sup>2</sup>, WU Cailai<sup>3</sup>, LEI Min<sup>3</sup>, XU Nan<sup>3</sup>, ZHENG Kun<sup>3,4</sup>

(1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China; 2. China University of Geology (Beijing), Beijing 100083, China; 3. Key Laboratory of Deep-Earth Dynamics of MNR, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 4. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** The intrusive rocks in Tongling area can be separated into a high-K calc-alkaline series and a shoshonitic series. The

收稿日期:2018-02-28; 改回日期:2018-06-03

基金项目:国家自然科学基金(41472063)资助。

作者简介:吴迪,女,1988年生,硕士,主要从事矿物学、岩石学及矿床学研究;E-mail: lotusd37@hotmail.com。

Jiaochong orefield is one of the seven orefields in Tongling area. The problems as to whether there are two series of intrusive rocks in the Jiaochong orefield or not and whether they have the same age and genesis as compared with the other intrusions in Tongling area are not clear. Therefore, this research was focused on the study of petrography, geochemistry, LA-ICPMS zircon U-Pb dating and in situ Hf isotopic analysis. It turns out that there are two series of intrusive rocks in the Jiaochong orefield. The high-K calc-alkaline series mainly contains quartz monzodiorite and granodiorite, and the shoshonitic series consists of pyroxene monzodiorite. The results of LA-ICPMS zircon U-Pb dating show that the age of the high-K calc-alkaline series in the Jiaochong orefield is about 142 Ma, identical with the age of the other orefields in Tongling area; the age of the shoshonitic series is around 136Ma, which is younger than that of the other intrusive bodies in Tongling area. In general, the two series of intrusions indicate the features of the multiphase emplacement. Furthermore, lots of zircons having old inherited core in the high-K calc-alkaline series reveal the existence of the materials of old crust in the magma-forming process. Combined with the characteristics of the intrusive rocks in Tongling area and the geochemical features of Jiaochong intrusions, it is obvious that the genesis of the two series of intrusions in the Jiaochong orefield is similar to that of other intrusions in Tongling area. In other word, the intrusive rocks of the shoshonitic series were formed by the fractional crystallization of the alkali-rich basic magma that originated from the deep magma chamber near the Moho. In the meanwhile, the high-K calc-alkaline series is the product of the magma mixing between the felsic magma derived from the shallow magma chamber and the magma that suffered from the fractional crystallization and originated from the deep magma chamber.

**Key words:** LA-ICPMS zircon U-Pb dating; geochemistry; intrusive rocks; Jiaochong orefield in Tongling area

**About the first author:** WU Di, female, born in 1988, master, majors in mineralogy, petrology and metallogeny; E-mail: lotusd37@hotmail.com.

**Fund support:** Supported by National Natural Science Foundation of China (magma activities and system dynamics in Shujiadian area, Tongling) (No. 41472063).

## 1 引 言

铜陵地区位于安徽省境内长江南岸,长江中下游铁铜等多金属成矿带的中部(图1a)。长江中下游地区有7个矿化集中区(矿集区),从西到东分别是:鄂东、九瑞、安庆—贵池、铜陵、庐枞、宁芜、宁镇矿集区。铜陵矿集区是其中一个重要的矿集区,以盛产铜矿而著名,且已有几千年的开采历史,被誉为中国的古铜都。区内主要产出矽卡岩型、层控矽卡岩型、斑岩型铜矿,同时伴生有金、钼、铅锌等多金属矿床(常印佛等,1983,1991,2017;Wu et al.,2000,2001;张旗等,2001;王强等,2003;狄永军等,2003;杜杨松等,2004,2007;吴才来等,2008;吕庆田等,2009)。这些矿床主要集中分布在铜官山、狮子山、新桥、凤凰山、舒家店、沙滩脚、焦冲矿田内。大量的研究工作表明,这些矿田内的金属矿床与区内中酸性侵入岩关系十分密切(周泰禧等,1987;常印佛等,1991;徐夕生等,2004;杜杨松等,2004,2007;吴才来等,2010,2013;黄文明等,2019)。区内出露高钾钙碱性和橄榄安粗岩系列侵入岩,其中橄榄安粗岩系列侵入岩时代为145~138

Ma,而高钾钙碱性系列侵入岩年代为152~130 Ma(王彦斌等,2004;Di et al.,2005;张达等,2006;楼亚儿等,2006;吴淦国等,2008;吴才来等,2008,2010,2013)。然而,区内同一系列同一类型的侵入岩具有不同的时代,不同矿田内侵入岩的年龄、系列及成因均有一定的变化,是什么机制导致这种变化?同时,不同矿田侵入岩及矿床的研究程度也存在较大的差异,特别是焦冲矿田侵入岩的研究程度相对较低。焦冲矿田内也存在两个系列侵入岩吗?他们形成的时代与铜陵地区其他岩体的时代一致吗?这些问题仍不清楚。因此,本文试图通过铜陵焦冲矿田侵入岩的锆石U-Pb定年、Hf同位素分析和岩石地球化学研究,对上述问题进行探讨。

## 2 地质背景及岩体地质特征

铜陵地区位于扬子地块东北缘的中部,区内沉积了志留纪到三叠纪的海相、滨海相、浅海相及海陆交互的碎屑岩-碳酸盐岩及硅质岩,以及中三叠世上部月山组到新近纪的陆相碎屑岩夹火山岩(图1b)。印支运动使中三叠世以前的地层(盖层)发生了一系列褶皱和断裂。褶皱构造自西向东分

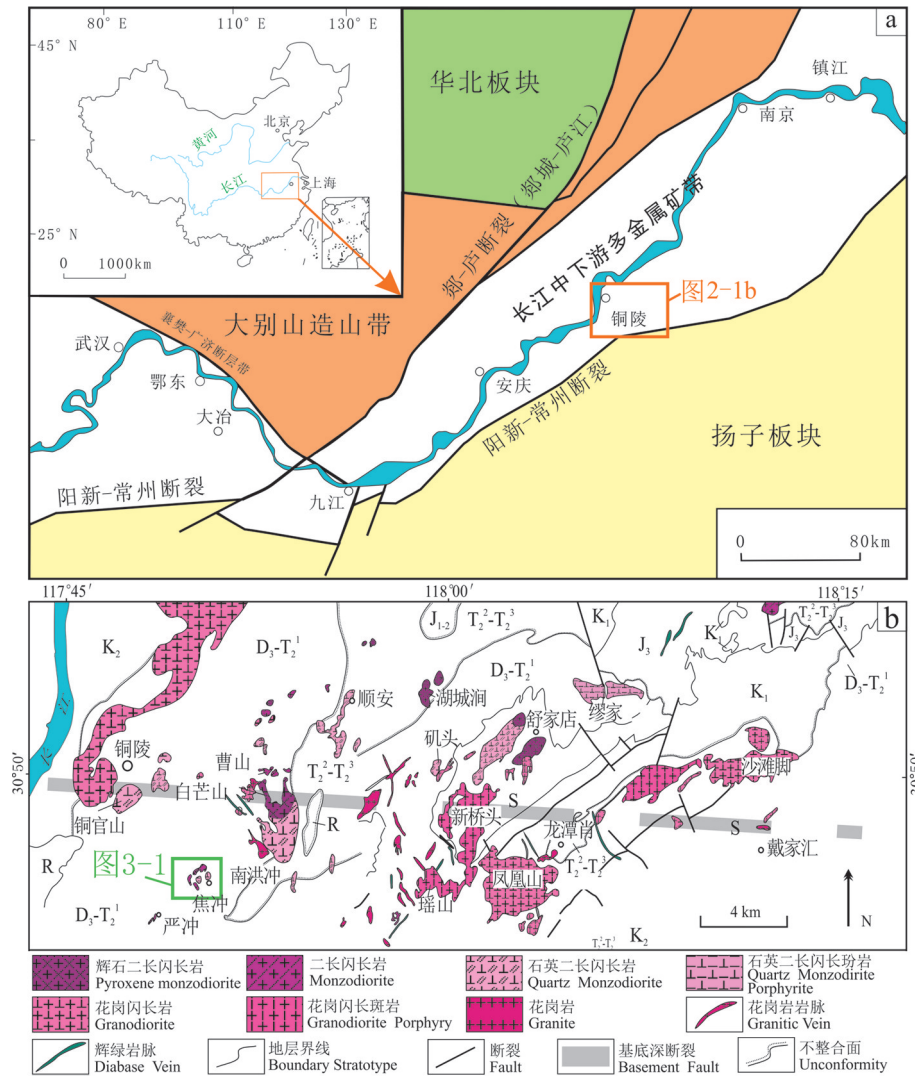


图1 铜陵地区位置图(a)及铜陵地区岩体分布图(b)

Fig.1 The location of Tongling area(a) and distribution of intrusive rocks in Tongling area(b)

别为金口岭向斜、铜官山背斜、大通—顺安复向斜(包括青山次级背斜、朱村向斜)、永村桥—舒家店背斜、新屋里复向斜和戴公山背斜(常印佛等, 1991; 吴才来等, 2013; 张志辉等, 2013)。盖层之下的基底构造分别由东西向、南北向、北北东向3组深大断裂组成, 特别是东西向基底构造制约着铜陵地区侵入岩及相关矿产的分布, 构成了铜陵地区东西向宽约20 km的构造—岩浆—成矿带(常印佛等, 1991)。区内侵入岩可划分为高钾钙碱性系列和橄榄安粗岩系列: 前者包括花岗闪长岩、花岗闪长斑岩、石英二长闪长岩、石英二长闪长玢岩, 后者包括辉石二长闪长岩、二长岩、石英二长岩等(王强等, 2003; 吴淦国等, 2008; 杨小男等, 2008; 阚朝阳等,

2013; 吴才来等, 2013; Wu et al., 2014, 2017), 这些侵入岩均分布在近东西向构造—岩浆—成矿带上(常印佛等, 1991; 吴才来等, 2003; 姚孝德等, 2012)。研究表明, 铜陵高钾钙碱性系列侵入岩中存在大量的暗色微粒闪长质包体和富云母包体, 且与铜矿化关系密切; 橄榄安粗岩系列侵入岩中存在大量的深源堆积岩包体, 且与金矿化关系密切(杨小男等, 2007; 徐晓春等, 2008; 吴才来等, 2010, 2013)。

焦冲矿田位于大通—顺安复向斜中的青山次级背斜核部(图2)。核部最老地层为下三叠统塔山组条带状灰岩( $T_1t$ ), 两边依次为中三叠统南陵湖组薄层灰岩( $T_2n$ ), 及中三叠统分水岭组灰岩夹硅质岩( $T_2f$ )。焦冲矿田主要出露辉石二长闪长岩、石英二

长闪长岩和花岗闪长岩,岩体呈岩株、岩枝状产出,出露面积很小,约0.1 km<sup>2</sup>。岩体与围岩接触带发育矽卡岩化、大理岩化及角岩化。区内主要产出层控矽卡岩型金矿,金矿体主要赋存在不同岩性的岩体接触带附近硅质岩中。其中,辉石二长闪长岩位于矿田的中部,呈不规则的北东向,接触带局部地方发育矽卡岩;花岗闪长岩呈北东向岩枝状,分布在辉石二长闪长岩的东南外围;石英二长闪长岩呈不规则岩脉或岩枝状产出,延伸方向以北东向为主,其次为北西向,主要侵位于塔山组地层中,部分呈北西向的岩体侵入到塔山组和南陵湖组灰岩中(图2)。

### 3 定年样品岩石学特征

选择6个岩石样品(10CL506、10CL507、10CL521、17CL505、17CL511、17CL516)开展LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年,主要岩性为辉石二长闪长岩、石英二长闪长岩和花岗闪长岩。各定年样品岩石学特征分述如下:

辉石二长闪长岩(样品 10CL507、17CL511): 岩

石呈灰黑色,具有半自形板柱状粒状结构,块状构造。主要矿物有斜长石、辉石,其次为黑云母和碱性长石,副矿物为锆石、磷灰石。镜下观察,斜长石为自形一半自形长板状,含量60%~70%;辉石为半自形柱粒状,含量15%~20%;黑云母为片状,含量7%~8%;碱性长石为他形粒状,含量8%~12%。锆石呈柱粒状,磷灰石为自形长柱状。岩石局部具有碳酸盐化,部分黑云母被绿泥石交代(图3a、b)。不透明矿物主要为他形粒状磁黄铁矿,其次为半自形粒状黄铁矿和他形不规则粒状黄铜矿。矿物生成顺序为辉石→斜长石→碱性长石→黑云母→绿泥石→方解石。

石英二长闪长岩(样品 10CL506、17CL505、17CL516),呈深灰色,具有半自形粒状不等粒结构和似斑状结构,块状构造。斑晶主要为自形一半自形板柱状斜长石,粒径1~2.5 mm。部分样品的斜长石发生绢云母化和碳酸盐化(如样品 10CL506),形成鳞片状绢云母和他形粒状方解石,局部绢云母结晶颗粒粗大,形成少量片状白云母,部分角闪石、

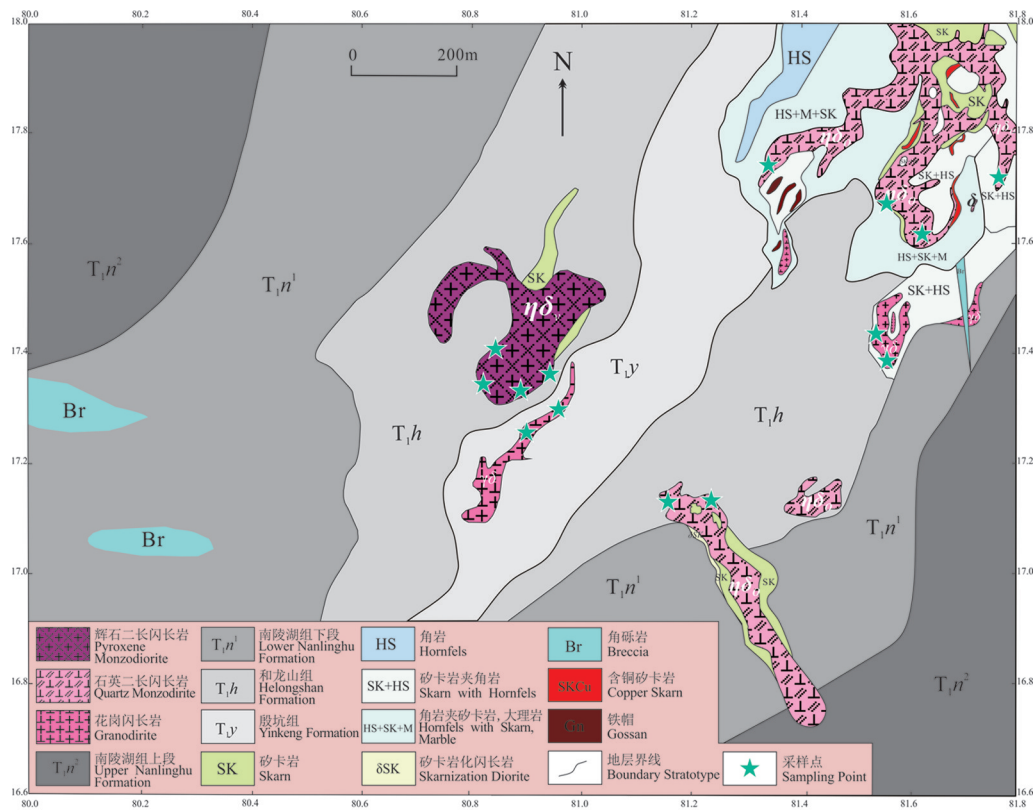


图2 焦冲矿田地质图

Fig.2 Geological map of the Jiaochong deposit

黑云母发生绿泥石化。基质主要为他形粒状石英,其次为钾长石(图3d、e、f)。各主要矿物含量为:斜长石55%~65%,石英10%~15%,钾长石15%,角闪石5%~8%,黑云母5%~7%。不透明矿物主要为半自形粒状磁黄铁矿,其次为自形一半自形粒状黄铁矿、半自形—他形闪锌矿和不规则状黄铜矿。其中,磁黄铁矿先生成,但晚于方解石,黄铁矿后生成,晚于绢云母。根据镜下观察可知透明矿物生成顺序为:角闪石→斜长石→黑云母→石英→钾长石→方解石→绢云母→白云母。

花岗闪长岩(样品10CL521):呈灰白色,具有似斑状不等粒结构,块状构造。斑晶为半自形短柱状斜长石,片状黑云母及半自形—他形角闪石。显微镜下观察,斜长石斑晶大小约为1 mm,具明显的环带结构和聚片双晶。少量斜长石斑晶绢云母化和绿泥石化,局部有黑云母交代角闪石,并残留一部分角闪石,少量斜长石被钾长石交代。薄片可见长英质岩脉的穿插,岩脉主要由半自形粒状石英组成,含少量碱性长石和不透明矿物。基质成分主要为他形粒状碱性长石及少量的他形粒状石英和少量他形不规则状方解石(图3c)。各主要矿物含量分别为:斜长石50%~65%,石英15%~25%,钾长

石10%,角闪石5%~10%,黑云母5%。不透明矿物主要为磁黄铁矿,其次为黄铁矿和黄铜矿。可推测矿物生成顺序为:斜长石→角闪石→黑云母→石英→碱性长石。

## 4 分析方法

### 4.1 锆石U-Pb定年

采集样品各2 kg,破碎至80~120目,用水淘洗粉尘后,先用磁铁吸出磁铁矿等磁性矿物,再用重液选出锆石,最后在双目镜下人工挑出锆石。锆石的分选由河北廊坊区调院完成。锆石和标样一起黏在玻璃板上后,用环氧树脂浇铸,制成薄片再抛光,并拍照反射光和阴极发光照片,最后在激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-MC-ICP-MS)上测定锆石的U、Th、Pb含量及定年。测年工作在中国地质科学院地质研究所大陆构造及动力学重点实验室完成,标样为91500, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄的加权平均值误差为 $\pm 2\sigma$ 。U/Pb比值数据处理使用软件LaDating@Zrn,校正Pb同位素使用软件ComPb corr#3-18(Anderson, 2002),校正后的数据使用美国Berkeley地质年代学中心编制的ISOPLOT和SQUID(Ludwing, 2003)程序进行处理,得到年龄结

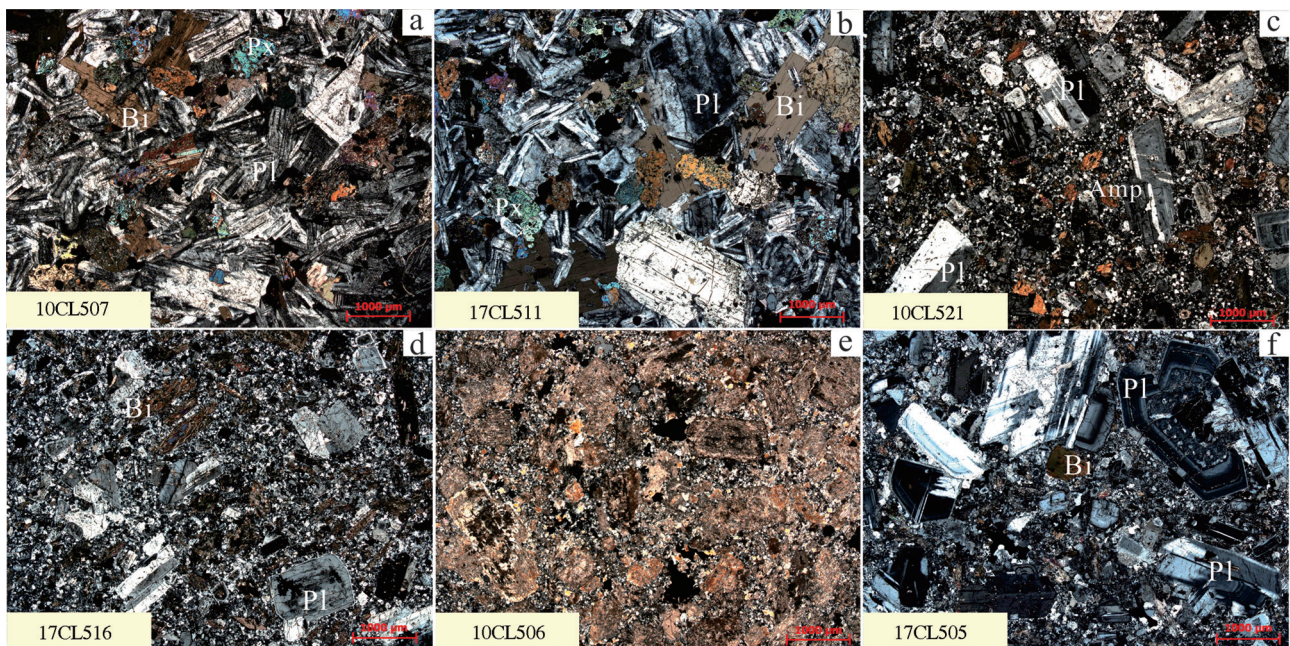


图3 焦冲矿田两系列岩石正交偏光镜下照片

a, b—辉石二长闪长岩; c, d, e—石英二长闪长岩; f—花岗闪长岩

Fig.3 Photomicrographs of representative intrusive rocks in the Jiaochong orefield

a, b—Pyroxene monzodiorite; c, d, e—Quartz monzodiorite; f—Granodiorite

果。详细分析方法如袁洪林等(2003)的描述。

#### 4.2 锆石 Hf 同位素分析

锆石 Hf 同位素测试是在中国地质科学院地质研究所大陆构造及动力学重点实验室完成,所用仪器为 Neptune 多接收等离子质谱和 Newwave UP213 紫外激光剥蚀系统(LA-MC-ICP-MS),实验过程中采用 He 作为剥蚀物质载气。根据锆石大小,剥蚀直径采用 44  $\mu\text{m}$ ,测定时使用国际上通用的锆石标样 GJ1 作为参考物质,分析过程中锆石标样 GJ1 的  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  测试加权平均值为  $0.282015 \pm 8(2\sigma, n=10)$ 。相关仪器运行条件及详细分析流程见侯可军等(2007)。

#### 4.3 全岩化学分析

本文对岩石样品(含定年样品)进行了化学全分析(表1),由中国地质科学院测试所(国家地质实验测试中心)完成。用 X 荧光光谱仪(3080E)对氧化物进行测试,并执行标准分别为:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{SiO}_2$  和  $\text{TiO}_2$  执行 GB/T14506.28-1993 标准,  $\text{FeO}$  执行 GB/T14506.14-1993 标准;  $\text{CO}_2$  执行 GB9835-1988 标准;  $\text{H}_2\text{O}^+$  执行 GB/T14506.2-1993 标准; LOI 执行 LY/T1253-1999 标准; 稀有元素和微量元素 As、Ba、Be、Bi、Cd、Ce、Co、Cs、Cu、Dy、Er、Eu、Ga、Gd、Hf、Ho、La、Li、Lu、Mo、Nb、Nd、Ni、Pb、Pr、Rb、Sb、Sc、Sm、Sn、Sr、Ta、Tb、Th、Tm、U、W、Y、Yb、Zn 和 Zr 用等离子质谱(X-series)执行 DZ/T0223-2001 标准。用不同的分析方法交叉检查,参考国际标准 GBW 矫正。分析精度分别为: 主要氧化物  $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{CaO}$  和  $\text{FeO}$  为 1%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{H}_2\text{O}^+$  和  $\text{CO}_2$  为 10%, 微量元素 La、Ce、Pr、Nd、Y、Sr、V、Zn、Ga、Rb、Cs、Pb、Th、Nb、Zr 和 Ba 为 15%, Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Er、Yb、V、Co、Ni、U、Hf、Ta 和 Sc 为 20%, Tb、Ho、Tm 和 Lu 为 25%。

## 5 分析结果

### 5.1 锆石 U-Pb 定年

样品锆石特征及定年结果分述如下:

样品 10CL507(辉石二长闪长岩):该样品中的锆石多为短柱状或粒状,长宽比值约为 1:1。阴极发光(CL)图像能够揭示锆石内部结构(Vavran et al., 1999)。CL 图像显示该样品中的一部分锆石为

均匀的灰黑色,部分具有扇状结构,不含有矿物包裹体和继承性核(图 4a)。锆石中 U 和 Th 含量分别为  $84.1 \times 10^{-6}$  ~  $1956 \times 10^{-6}$  和  $67.0 \times 10^{-6}$  ~  $1115 \times 10^{-6}$ , Th/U 比值变化较大,为 0.26 ~ 1.95,平均值为 0.66(表 1)。其中锆石的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄变化范围为  $(129 \pm 2)\text{Ma}$  ~  $(166 \pm 6)\text{Ma}$ ,除去不谐和年龄测点,计算平均年龄为  $(135.9 \pm 3.8)\text{Ma}$ 。 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  比值得出谐和线交点年龄为  $(136.8 \pm 3.3)\text{Ma}$ (图 5a),与平均年龄在误差范围内基本一致。

样品 17CL511(辉石二长闪长岩):该样品中的锆石和样品 10CL507 中的相似,为短柱状或粒状,长宽比为 1:1~1.5:1。从 CL 图像看,锆石内部不具有老的继承性核,部分锆石具有环带结构,显示出岩浆成因锆石的特点(图 4b)。锆石中的 U 和 Th 含量分别为  $85.1 \times 10^{-6}$  ~  $1912 \times 10^{-6}$  和  $56.1 \times 10^{-6}$  ~  $1173 \times 10^{-6}$ , Th/U 比值变化较大,为 0.18 ~ 1.55,平均值为 0.60(表 1)。同时锆石的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄变化范围为  $(131.1 \pm 4.1)\text{Ma}$  ~  $(140.0 \pm 7.0)\text{Ma}$ ,除去不谐和年龄测点,计算加权平均年龄是  $(135.9 \pm 1.9)\text{Ma}$ 。 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  比值得出谐和线交点年龄为  $(135.4 \pm 1.8)\text{Ma}$ (图 5b),与平均年龄在误差范围内基本一致。

样品 10CL506(石英二长闪长岩):该样品中的锆石为柱状,具有较好的柱面和锥面,长宽比值为 2:1。该样品中的锆石内部结构清晰,具有较好的振荡环带结构,不含有矿物包裹体(图 4e),这是典型的岩浆结晶锆石(Pidgeon et al., 1998)。锆石的 CL 特征由内部元素分布规律决定,其发光强度主要与锆石中 U 和 Th 含量相关(Hanchar et al., 1993)。样品中 U 和 Th 含量相对较低,分别为  $50.3 \times 10^{-6}$  ~  $389 \times 10^{-6}$  和  $6.4 \times 10^{-6}$  ~  $346 \times 10^{-6}$ , Th/U 比值变化较大,为 0.12 ~ 1.40,平均值为 0.62(表 1)。其中锆石 6、7、9、10、12、16、19、26、27、29 和 31 含有老的继承性核,年龄分别为 2364 Ma、864 Ma、792 Ma、1714 Ma、306 Ma、854 Ma、2258 Ma、858 Ma、1639 Ma、1988 Ma、2036 Ma, Th/U 平均值为 0.64。岩浆结晶锆石的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄变化范围是从  $(134 \pm 4)\text{Ma}$  ~  $(154 \pm 4)\text{Ma}$ ,除去不谐和年龄测点,计算加权平均年龄为  $(142.5 \pm 2.2)\text{Ma}$ 。 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  比值得出谐和线交点年龄为  $(142.5 \pm 2.5)\text{Ma}$ (图 5e),与平均年龄基本一致。

样品 17CL505(石英二长闪长岩):该样品中锆石多具有柱状或长柱状,长宽比值为1:1~2.5:1。锆石内部结构清晰,具有较好的振荡环带结构,不含有矿物包裹体(图4f)。锆石中U和Th含量分别为 $17.2 \times 10^{-6} \sim 1056 \times 10^{-6}$ 和 $11.2 \times 10^{-6} \sim 868 \times 10^{-6}$ ,Th/U比值为0.3~1.8,平均值为0.74(表1)。其中锆石1、4、5、6、9、12、14、15、16、17、25、26、29和30含有老的继承性核,其年龄分别为923 Ma、812 Ma、2462 Ma、1695 Ma、344 Ma、302 Ma、885 Ma、389 Ma、764 Ma、823 Ma、227 Ma、2494 Ma、1332 Ma和341 Ma,Th/U平均值为0.71。岩浆结晶锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $(139.2 \pm 5)\text{Ma} \sim (159.7 \pm 5)\text{Ma}$ ,除去不谐和年龄测点,计算平均年龄为 $(142.4 \pm 2.3)\text{Ma}$ 。 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} - ^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 比值得出谐和线交点年龄为 $(142.1 \pm 2.4)\text{Ma}$ (图5f),与平均年龄在误差范围内

基本一致。

样品 17CL516(石英二长闪长岩):该样品中锆石多具有柱状或长柱状,长宽比值为1.5:1~3:1。锆石内部结构清晰,具有较好的振荡环带结构,不含有矿物包裹体(图4d)。锆石中U和Th含量变化范围相对小,分别为 $178 \times 10^{-6} \sim 521 \times 10^{-6}$ 和 $94 \times 10^{-6} \sim 514 \times 10^{-6}$ ,Th/U比值范围是0.51~1.08,平均值为0.75(表1)。其中锆石2含有老的继承性核,其年龄为363 Ma,Th/U比值为0.77。岩浆结晶锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $(138 \pm 5)\text{Ma} \sim (151 \pm 5)\text{Ma}$ ,除去不谐和年龄测点,计算平均年龄为 $(142.8 \pm 1.0)\text{Ma}$ 。 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} - ^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 比值得出谐和线交点年龄为 $(142.0 \pm 1.0)\text{Ma}$ (图5d),与平均年龄在误差范围内基本一致。

样品 10CL521(花岗闪长岩):该样品中的锆石

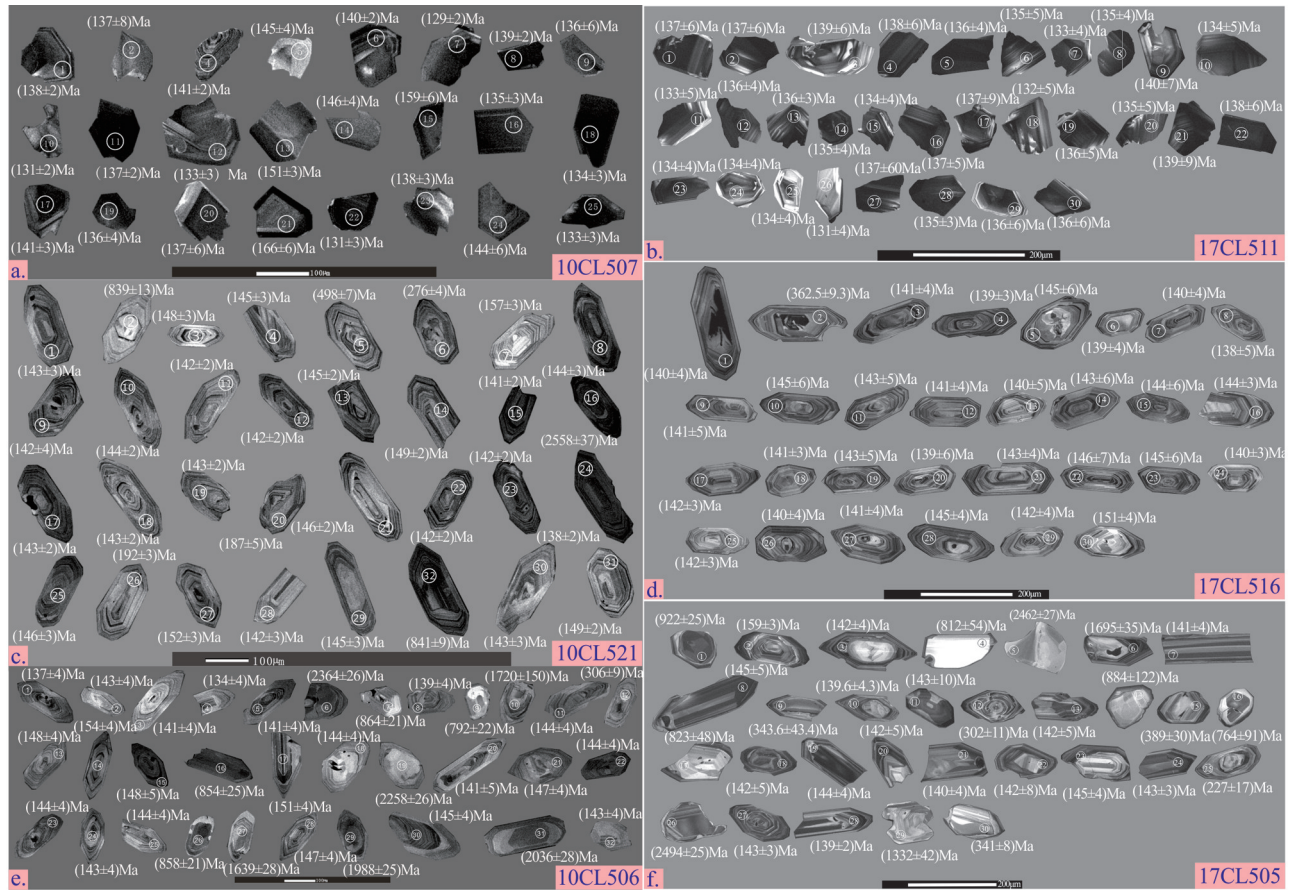


图4 锆石CL阴极发光图像

a—10CL507—辉石二长闪长岩; b—17CL511—辉石二长闪长岩; c—10CL521—花岗闪长岩; d—17CL516—石英二长闪长岩;  
e—10CL506—石英二长闪长岩; f—17CL505—石英二长闪长岩

Fig.4 Cathodoluminescence images of zircon

a—10CL507—pyroxene monzodiorite; b—17CL511—pyroxene monzodiorite; c—10CL521—granodiorite; d—17CL516—granodiorite;  
e—10CL506—quartz monzodiorite; f—17CL505—quartz monzodiorite

表1 焦冲锆石 LA-ICPMS U-Pb 定年数据  
Table 1 Data of zircon La-ICPMS U-Pb dating from granites in Jiaochong

样品号及分 析点号	含量/10 <sup>6</sup>			同位素比值						表面年龄/Ma						
	Pb	Th	U	Th/U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	1σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	1σ	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	1σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	1σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	1σ	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	1σ
辉石二长闪长岩																
10CL507-1	20.7	198	304	0.65	0.0594	0.0039	0.1755	0.0121	0.0216	0.0004	580	120	164	10	138	2
10CL507-2	7.60	89.5	84.1	1.06	0.0602	0.0156	0.1556	0.0361	0.0214	0.0012	612	401	147	32	137	8
10CL507-4	26.8	85.6	105	0.82	0.0471	0.0020	0.1418	0.0060	0.0221	0.0003	55	65	135	5	141	2
10CL507-5	19.5	194	263	0.74	0.1210	0.0091	0.3821	0.0284	0.0227	0.0006	1971	92	329	21	145	4
10CL507-6	29.0	197	742	0.27	0.0548	0.0021	0.1660	0.0061	0.0220	0.0003	402	57	156	5	140	2
10CL507-7	16.7	138	377	0.37	0.0517	0.0026	0.1433	0.0070	0.0202	0.0003	274	83	136	6	129	2
10CL507-8	77.0	751	1087	0.69	0.0554	0.0023	0.1667	0.0068	0.0218	0.0003	428	65	157	6	139	2
10CL507-9	10.1	110	120	0.92	0.0843	-0.0143	0.2061	-0.0321	0.0213	0.0009	1300	418	190.2	27	136	6
10CL507-10	13.0	107	315	0.34	0.0492	0.0028	0.1394	0.0080	0.0205	0.0004	159	99	132	7	131	2
10CL507-11	102	1115	1956	0.57	0.0536	0.0014	0.1597	0.0042	0.0214	0.0002	353	39	150	4	137	2
10CL507-12	8.80	90.0	130	0.69	0.0588	0.0056	0.1564	0.0133	0.0209	0.0005	559	146	148	12	133	3
10CL507-13	36.3	310	570	0.54	0.0727	0.0036	0.2325	0.0114	0.0237	0.0004	1007	71	212	9	151	3
10CL507-14	10.4	67.0	260	0.26	0.0555	0.0051	0.1712	0.0151	0.0230	0.0007	433	147	160	13	146	4
10CL507-15	10.3	97.5	112	0.87	0.0724	0.0090	0.2320	0.0265	0.0249	0.0009	996	174	212	22	159	6
10CL507-16	20.2	233	184	1.27	0.0526	0.0046	0.1529	0.0126	0.0212	0.0005	311	144	144	11	135	3
10CL507-17	25.7	249	348	0.72	0.0477	0.0032	0.1466	0.0097	0.0222	0.0005	84	105	139	9	141	3
10CL507-18	46.0	357	1067	0.33	0.0528	0.0019	0.1525	0.0060	0.0210	0.0004	320	52	144	5	134	3
10CL507-19	12.0	123	180	0.68	0.0655	0.0052	0.1876	0.0145	0.0213	0.0006	789	115	175	12	136	4
10CL507-20	31.4	380	195	1.95	0.0394	0.0055	0.1038	0.0131	0.0216	0.0009	-325	189	100	12	137	6
10CL507-21	16.3	136	211	0.65	0.0374	0.0049	0.1299	0.0157	0.0261	0.0009	-450	261	124	14	166	6
10CL507-22	42.1	341	1000	0.34	0.0466	0.0019	0.1336	0.0059	0.0205	0.0005	26	55	127	5	131	3
10CL507-23	74.7	553	1638	0.34	0.0664	0.0020	0.2010	0.0067	0.0217	0.0004	820	39	186	6	138	3
10CL507-24	14.3	166	138	1.20	0.0565	0.0078	0.1440	0.0181	0.0227	0.0010	473	205	137	16	144	6
10CL507-25	31.1	234	803	0.29	0.0465	0.0018	0.1331	0.0051	0.0209	0.0004	25	46	127	5	133	3
辉石二长闪长岩																
17CL511-01	206	1173	1912	0.61	0.0486	0.0011	0.1442	0.0069	0.0215	0.0009	127.9	194.4	136.8	6.2	137	6.0
17CL511-02	82.1	460	804	0.57	0.0485	0.0013	0.1445	0.0078	0.0216	0.0010	124.2	226.8	137.0	7.0	138	6.6
17CL511-03	17.7	95.3	106	0.90	0.0581	0.0083	0.1725	0.0193	0.0218	0.0010	531.5	291.6	161.6	16.8	139	6.5
17CL511-04	60.2	318	905	0.35	0.0485	0.0011	0.1450	0.0070	0.0217	0.0011	124.2	194.4	137.5	6.2	138	6.7
17CL511-05	149	836	1838	0.46	0.0485	0.0010	0.1426	0.0051	0.0213	0.0007	124.2	23.2	135.4	4.6	136	4.5
17CL511-06	29.5	162	661	0.24	0.0489	0.0014	0.1436	0.0073	0.0213	0.0009	142.7	64.8	136.3	6.5	136	5.9
17CL511-07	70.4	412	596	0.69	0.0486	0.0014	0.1398	0.0057	0.0209	0.0007	127.9	50.9	132.8	5.1	133	4.3
17CL511-08	69.5	376	1362	0.28	0.0488	0.0012	0.1427	0.0058	0.0212	0.0008	200.1	55.6	135.4	5.2	135	4.8
17CL511-09	83	444	1427	0.31	0.0490	0.0013	0.1483	0.0081	0.0220	0.0011	146.4	-83.3	140.4	7.2	140	7.0
17CL511-10	31.8	172	702	0.25	0.0491	0.0014	0.1423	0.0067	0.0210	0.0008	153.8	64.8	135.1	6.0	134	5.3
17CL511-11	38.2	218	312	0.70	0.0485	0.0020	0.1396	0.0071	0.0209	0.0008	124.2	101.8	132.7	6.3	133	5.3
17CL511-12	19.7	103	522	0.20	0.0486	0.0017	0.1434	0.0064	0.0214	0.0007	127.9	83.3	136.1	5.7	137	4.3
17CL511-13	68.9	364	1190	0.31	0.0484	0.0011	0.1427	0.0047	0.0214	0.0006	120.5	55.6	135.4	4.2	136	3.5
17CL511-14	94.0	513	1142	0.45	0.0489	0.0012	0.1431	0.0053	0.0212	0.0006	142.7	64.8	135.8	4.7	136	4.1
17CL511-15	107	582	892	0.65	0.0485	0.0012	0.1413	0.0056	0.0211	0.0007	120.5	55.6	134.2	5.0	135	4.3
17CL511-16	25.3	134	588	0.23	0.0487	0.0015	0.1445	0.0068	0.0215	0.0009	200.1	64.8	137.0	6.1	137	5.6
17CL511-17	42.4	244	300	0.81	0.0517	0.0026	0.1545	0.0159	0.0216	0.0015	272.3	120.4	145.9	13.9	138	9.7
17CL511-18	31.7	173	443	0.39	0.0488	0.0017	0.1397	0.0079	0.0207	0.0008	200.1	83.3	132.8	7.1	132	5.2
17CL511-19	129.2	705	1726	0.41	0.0484	0.0011	0.1423	0.0064	0.0213	0.0008	116.8	55.6	135.1	5.8	136	5.2
17CL511-20	46.8	267	174	1.53	0.0491	0.0023	0.1436	0.0089	0.0212	0.0008	153.8	111.1	136.3	7.9	135	5.4
17CL511-21	10.5	56.1	309	0.18	0.0504	0.0022	0.1518	0.0132	0.0218	0.0014	213.0	101.8	143.5	11.7	139	9.2
17CL511-22	65.9	357	1209	0.30	0.0490	0.0012	0.1470	0.0065	0.0218	0.0009	146.4	-83.3	139.3	5.7	139	6.0
17CL511-23	38.5	211	440	0.48	0.0481	0.0017	0.1404	0.0060	0.0212	0.0007	105.6	50.9	133.4	5.4	135	4.2
17CL511-24	23.3	130	193	0.68	0.0486	0.0023	0.1416	0.0082	0.0211	0.0007	127.9	111.1	134.4	7.3	135	4.6
17CL511-25	34.8	183	118	1.55	0.0494	0.0029	0.1438	0.0092	0.0211	0.0007	164.9	-23.1	136.5	8.2	135	4.3
17CL511-26	16.0	93.3	85.1	1.10	0.0483	0.0038	0.1366	0.0103	0.0205	0.0007	122.3	185.2	130.0	9.2	131	4.1
17CL511-27	42.0	224	827	0.27	0.0484	0.0012	0.1444	0.0075	0.0216	0.0010	120.5	55.6	137.0	6.6	138	6.1
17CL511-28	39.4	214	780	0.27	0.0478	0.0013	0.1399	0.0046	0.0212	0.0005	100.1	64.8	133.0	4.1	135	3.0
17CL511-29	33.3	177	169	1.05	0.0494	0.0025	0.1460	0.0101	0.0214	0.0010	164.9	120.4	138.3	8.9	137	6.4
17CL511-30	118	646	745	0.87	0.0496	0.0015	0.1459	0.0079	0.0213	0.0010	176.0	50.9	138.2	7.0	136	6.1
花岗闪长岩																
10CL521-1	58.2	207	212	0.98	0.0527	0.0036	0.1596	0.0107	0.0225	0.0004	317	119	150	9	143	3
10CL521-2	135	86.7	76.5	1.13	0.0713	0.0034	1.3411	0.0631	0.1390	0.0023	967	69	864	27	839	13
10CL521-3	86.0	240	326	0.74	0.0538	0.0034	0.1702	0.0111	0.0232	0.0004	364	114	160	10	148	3
10CL521-4	71.0	173	286	0.60	0.0503	0.0037	0.1531	0.0109	0.0227	0.0004	208	127	145	10	145	3
10CL521-5	349	205	403	0.51	0.0623	0.0023	0.6875	0.0238	0.0804	0.0012	684	50	531	14	498	7
10CL521-6	79.6	67.6	176	0.38	0.0587	0.0031	0.3487	0.0176	0.0437	0.0007	555	84	304	13	276	4
10CL521-7	57.0	148	203	0.73	0.0530	0.0041	0.1765	0.0130	0.0247	0.0006	330	128	165	11	157	3
10CL521-8	58.2	124	239	0.52	0.0492	0.0038	0.1482	0.0108	0.0226	0.0005	155	125	140	10	144	3
10CL521-9	101	291	391	0.74	0.0494	0.0026	0.1532	0.0080	0.0223	0.0004	166	89	145	7	142	2



续表 1

样品号及分 析点号	含量/ $10^{-6}$			同位素比值						表面年龄/Ma						
	Pb	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$
10CL521-10	65.7	139	273	0.51	0.0527	0.0031	0.1575	0.0090	0.0226	0.0004	317	97	148	8	144	2
10CL521-11	74.8	196	305	0.64	0.0456	0.0029	0.1376	0.0087	0.0223	0.0004	125	104	131	8	142	2
10CL521-12	86.1	212	352	0.60	0.0490	0.0028	0.1496	0.0083	0.0223	0.0004	148	95	142	7	142	2
10CL521-13	84.1	254	314	0.81	0.0513	0.0031	0.1537	0.0088	0.0227	0.0003	253	104	145	8	145	2
10CL521-14	66.3	126	269	0.47	0.0527	0.0031	0.1657	0.0098	0.0234	0.0004	314	104	156	9	149	2
10CL521-15	101	200	435	0.46	0.0485	0.0028	0.1462	0.0082	0.0222	0.0003	124	100	139	7	141	2
10CL521-16	1139	289	238	1.22	0.1700	0.0052	7.9926	0.2871	0.3407	0.0059	2558	37	2230	32	1890	28
10CL521-17	77.1	160	326	0.49	0.0474	0.0026	0.1466	0.0078	0.0224	0.0004	68	86	139	7	143	2
10CL521-18	72.4	172	296	0.58	0.0477	0.0032	0.1457	0.0097	0.0224	0.0003	87	119	138	9	143	2
10CL521-19	82.8	200	338	0.59	0.0466	0.0026	0.1427	0.0079	0.0225	0.0003	31	91	135	7	143	2
10CL521-20	79.7	46.5	263	0.18	0.0524	0.0037	0.2123	0.0136	0.0295	0.0008	305	98	196	11	187	5
10CL521-21	92.0	163	386	0.42	0.0538	0.0027	0.1697	0.0084	0.0229	0.0003	364	86	159	7	146	2
10CL521-22	85.1	241	334	0.72	0.0499	0.0026	0.1538	0.0081	0.0223	0.0003	188	94	145	7	142	2
10CL521-23	81.6	203	329	0.62	0.0508	0.0029	0.1547	0.0088	0.0223	0.0003	232	103	146	8	142	2
10CL521-24	91.9	242	387	0.62	0.0464	0.0023	0.1366	0.0066	0.0217	0.0004	18	71	130	6	138	2
10CL521-25	58.9	142	233	0.61	0.0500	0.0033	0.1577	0.0104	0.0229	0.0004	194	118	149	9	146	3
10CL521-26	352	581	1080	0.54	0.0589	0.0022	0.2456	0.0107	0.0302	0.0005	563	68	223	9	192	3
10CL521-27	99.4	254	363	0.70	0.0425	0.0024	0.1373	0.0078	0.0239	0.0004	-151	97	131	7	152	2
10CL521-28	63.0	134	268	0.50	0.0483	0.0026	0.1506	0.0083	0.0223	0.0004	113	88	142	7	142	3
10CL521-29	55.5	149	218	0.69	0.0497	0.0035	0.1557	0.0108	0.0227	0.0004	179	122	147	9	145	3
10CL521-30	77.0	245	296	0.83	0.0495	0.0035	0.1494	0.0108	0.0224	0.0004	170	129	141	9	143	3
10CL521-31	71.4	175	270	0.65	0.0457	0.0028	0.1466	0.0091	0.0235	0.0004	-20	103	139	8	149	2
石英二长闪长岩																
17CL516-01	50.1	242	476	0.51	0.0490	0.0014	0.1487	0.0065	0.0220	0.0008	150.1	-97.2	140.8	5.8	140	4.8
17CL516-02	87.0	182	236	0.77	0.0621	0.0017	0.4955	0.0174	0.0578	0.0015	679.6	84.1	408.7	11.9	363	9.3
17CL516-03	42.1	209	265	0.79	0.0516	0.0022	0.1579	0.0093	0.0222	0.0007	264.9	78.7	148.8	8.2	141	4.6
17CL516-04	101	495	488	1.02	0.0525	0.0017	0.1577	0.0058	0.0218	0.0006	305.6	50.9	148.7	5.1	139	3.8
17CL516-05	46.9	223	256	0.87	0.0488	0.0019	0.1529	0.0081	0.0227	0.0011	200.1	83.3	144.5	7.1	145	6.6
17CL516-06	58.0	281	365	0.77	0.0495	0.0019	0.1499	0.0078	0.0219	0.0007	172.3	92.6	141.8	6.9	140	4.1
17CL516-07	30.7	145	249	0.58	0.0494	0.0020	0.1505	0.0079	0.0221	0.0008	164.9	92.6	142.4	7.0	141	4.9
17CL516-08	39.2	198	276	0.72	0.0489	0.0022	0.1462	0.0089	0.0217	0.0009	142.7	101.9	138.5	7.9	138	5.7
17CL516-09	27.3	126	226	0.56	0.0486	0.0022	0.1492	0.0087	0.0222	0.0008	131.6	101.8	141.2	7.7	142	5.2
17CL516-10	45.5	219	290	0.76	0.0487	0.0020	0.1532	0.0084	0.0228	0.0010	131.6	69.4	144.7	7.4	146	6.3
17CL516-11	96.0	469	433	1.08	0.0482	0.0018	0.1497	0.0074	0.0225	0.0008	109.4	69.4	141.6	6.5	143	5.3
17CL516-12	47.5	228	319	0.71	0.0488	0.0019	0.1494	0.0077	0.0222	0.0008	200.1	92.6	141.3	6.9	142	4.9
17CL516-13	101	514	521	0.99	0.0485	0.0016	0.1469	0.0079	0.0220	0.0009	120.5	236.1	139.1	7.0	140	5.7
17CL516-14	39.0	184	299	0.62	0.0482	0.0020	0.1494	0.0086	0.0225	0.0010	109.4	101.8	141.4	7.7	143	6.1
17CL516-15	34.6	166	272	0.61	0.0485	0.0023	0.1512	0.0088	0.0226	0.0010	124.2	111.1	143.0	7.8	144	6.6
17CL516-16	37.5	173	286	0.61	0.0494	0.0019	0.1547	0.0062	0.0227	0.0005	164.9	92.6	146.1	5.5	145	3.2
17CL516-17	61.0	289	360	0.80	0.0507	0.0019	0.1560	0.0072	0.0223	0.0006	227.8	83.3	147.2	6.3	142	3.8
17CL516-18	36.5	174	277	0.63	0.0496	0.0020	0.1515	0.0071	0.0221	0.0006	176.0	78.7	143.2	6.3	141	3.9
17CL516-19	53.3	249	344	0.72	0.0489	0.0020	0.1516	0.0082	0.0225	0.0009	142.7	92.6	143.3	7.2	143	5.6
17CL516-20	46.5	236	294	0.80	0.0486	0.0024	0.1463	0.0086	0.0218	0.0009	131.6	120.4	138.6	7.6	139	6.0
17CL516-21	44.9	215	267	0.81	0.0483	0.0020	0.1495	0.0070	0.0224	0.0007	122.3	254.6	141.5	6.2	143	4.5
17CL516-22	59.0	265	354	0.75	0.0491	0.0019	0.1558	0.0095	0.0230	0.0012	153.8	-69.4	147.0	8.4	147	7.3
17CL516-23	60.0	276	351	0.79	0.0488	0.0020	0.1536	0.0084	0.0228	0.0010	200.1	125.0	145.1	7.4	146	6.6
17CL516-24	85.0	429	430	1.00	0.0483	0.0016	0.1471	0.0054	0.0221	0.0005	122.3	74.1	139.4	4.8	141	3.4
17CL516-25	20.3	94.0	178	0.53	0.0497	0.0026	0.1529	0.0079	0.0223	0.0005	189.0	97.2	144.4	7.0	142	3.5
17CL516-26	37.5	186	220	0.85	0.0492	0.0018	0.1493	0.0069	0.0220	0.0007	166.8	83.3	141.3	6.1	140	4.5
17CL516-27	64.0	319	369	0.86	0.0490	0.0018	0.1502	0.0067	0.0222	0.0007	146.4	83.3	142.1	5.9	142	4.3
17CL516-28	52.2	236	340	0.69	0.0483	0.0018	0.1516	0.0073	0.0228	0.0007	122.3	92.6	143.4	6.4	145	4.6
17CL516-29	28.3	132	232	0.57	0.0485	0.0023	0.1497	0.0075	0.0224	0.0007	120.5	111.1	141.7	6.6	143	4.6
17CL516-30	49.3	206	290	0.71	0.0508	0.0023	0.1662	0.0071	0.0237	0.0008	231.6	101.8	156.1	6.2	151	4.8
石英二长闪长岩																
10CL506-1	88.0	346	334	1.03	0.0452	0.0023	0.1332	0.0074	0.0214	0.0006	-7	67	127	7	137	4
10CL506-2	61.7	139	250	0.56	0.0576	0.0027	0.1743	0.0090	0.0224	0.0006	515	65	163	8	143	4
10CL506-3	66.2	169	272	0.62	0.0477	0.0025	0.1494	0.0090	0.0221	0.0006	84	84	141	8	141	4
10CL506-4	76.1	110	365	0.30	0.0448	0.0023	0.1319	0.0076	0.0210	0.0006	-28	72	126	7	134	4
10CL506-5	76.5	236	299	0.79	0.0534	0.0031	0.1634	0.0098	0.0221	0.0006	348	84	154	9	141	4
10CL506-6	1474	151	355	0.43	0.1516	0.0029	7.7652	0.2624	0.3705	0.0109	2364	26	2204	30	2032	51

续表1

样品号及分 析点号	含量/ $10^{-6}$			同位素比值						表面年龄/Ma						
	Pb	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$
10CL506-7	189	76.0	118	0.64	0.0670	0.0020	1.3253	0.0474	0.1434	0.0037	839	36	857	21	864	21
10CL506-8	73.3	210	293	0.72	0.0517	0.0023	0.1552	0.0077	0.0219	0.0006	273	65	147	7	139	4
10CL506-9	176	139	99.1	1.40	0.0671	0.0032	1.2315	0.0627	0.1307	0.0038	840	59	815	29	792	22
10CL506-10	1291	181	350	0.52	0.1053	0.0084	4.4066	0.3184	0.3034	0.0100	1720	150	1714	60	1708	49
10CL506-11	58.7	98.8	252	0.39	0.0567	0.0027	0.1738	0.0091	0.0225	0.0007	479	66	163	8	144	4
10CL506-12	119	122	212	0.58	0.0656	0.0033	0.4584	0.0262	0.0486	0.0015	793	69	383	18	306	9
10CL506-13	83.9	171	324	0.53	0.0579	0.0026	0.1836	0.0087	0.0233	0.0006	525	58	171	7	148	4
10CL506-14	48.9	86.3	191	0.45	0.0566	0.0035	0.1835	0.0120	0.0242	0.0007	475	94	171	10	154	4
10CL506-15	57.6	181	213	0.85	0.0451	0.0027	0.1444	0.0100	0.0233	0.0008	-14	89	137	9	148	5
10CL506-16	70.8	6.40	52.8	0.12	0.0667	0.0037	1.2985	0.0777	0.1417	0.0044	827	74	845	34	854	25
10CL506-17	44.5	123	159	0.77	0.0489	0.0032	0.1602	0.0107	0.0238	0.0007	141	100	151	9	151	4
10CL506-18	67.4	124	280	0.44	0.0560	0.0034	0.1749	0.0114	0.0226	0.0007	453	92	164	10	144	4
10CL506-19	332	34.5	74.6	0.46	0.1425	0.0034	7.8282	0.2613	0.3995	0.0111	2258	26	2211	30	2167	51
10CL506-20	53.6	139	219	0.64	0.0487	0.0033	0.1472	0.0104	0.0221	0.0007	135	99	139	9	141	5
10CL506-21	42.3	106	156	0.68	0.0774	0.0049	0.2502	0.0181	0.0230	0.0007	1131	96	227	15	147	4
10CL506-22	35.9	76.2	151	0.50	0.0474	0.0033	0.1465	0.0107	0.0226	0.0007	71	106	139	9	144	4
10CL506-23	68.5	198	265	0.75	0.0436	0.0024	0.1351	0.0081	0.0226	0.0006	-91	79	129	7	144	4
10CL506-24	59.7	168	235	0.72	0.0561	0.0027	0.1744	0.0088	0.0225	0.0006	457	64	163	8	143	4
10CL506-25	73.7	159	301	0.53	0.0524	0.0026	0.1648	0.0085	0.0226	0.0007	303	66	155	7	144	4
10CL506-26	639	293	389	0.75	0.0687	0.0014	1.3542	0.0406	0.1424	0.0037	890	28	869	18	858	21
10CL506-27	338	56.3	112	0.50	0.1008	0.0024	3.8291	0.1254	0.2762	0.0072	1639	28	1599	26	1572	36
10CL506-28	70.3	212	273	0.78	0.0354	0.0027	0.1062	0.0082	0.0231	0.0007	-58	178	103	8	147	4
10CL506-29	1462	265	363	0.73	0.1222	0.0023	5.7030	0.1777	0.3386	0.0094	1988	25	1932	27	1880	45
10CL506-30	63.4	40.3	294	0.14	0.0506	0.0025	0.1558	0.0079	0.0228	0.0007	222	64	147	7	145	4
10CL506-31	231	45.5	50.3	0.90	0.1255	0.0033	6.4164	0.2252	0.3705	0.0104	2036	28	2035	31	2032	49
10CL506-32	54.0	111	228	0.49	0.0476	0.0026	0.1471	0.0088	0.0225	0.0007	79	79	139	8	143	4
石英二长闪长岩																
17CL505-01	427	318	415	0.77	0.0695	0.0013	1.4765	0.0474	0.1539	0.0046	916.7	42.4	920.8	20	923	26
17CL505-02	71.0	287	434	0.66	0.0516	0.0019	0.1787	0.0072	0.0251	0.0006	333.4	83.3	166.9	6.2	160	3.8
17CL505-03	67.0	312	617	0.51	0.0489	0.0018	0.1510	0.0060	0.0224	0.0008	142.7	83.3	142.8	5.3	143	4.8
17CL505-04	14.4	11.2	17.2	0.65	0.0662	0.0042	1.2235	0.1080	0.1343	0.0096	813.0	129.6	811.4	49	812	55
17CL505-05	357	90.1	136	0.66	0.1606	0.0027	10.1541	0.3536	0.4582	0.0146	2462	27.0	2448.9	33	2432	65
17CL505-06	492	194	317	0.61	0.1039	0.0019	4.2340	0.2100	0.2955	0.0142	1695	34.7	1680.6	41	1669	71
17CL505-07	100	533	306	1.74	0.0476	0.0021	0.1461	0.0073	0.0223	0.0007	79.7	101.9	138.4	6.5	142	4.5
17CL505-08	134	680	385	1.77	0.0496	0.0020	0.1557	0.0076	0.0228	0.0008	176.0	69.4	146.9	6.7	145	5.0
17CL505-09	134	401	536	0.75	0.0899	0.0047	0.6916	0.1172	0.0547	0.0071	1433	94.9	533.7	70	344	43
17CL505-10	51.8	246	515	0.48	0.0487	0.0018	0.1471	0.0066	0.0219	0.0007	200.1	83.3	139.4	5.8	140	4.3
17CL505-11	25.2	85.0	159	0.53	0.0839	0.0198	0.2721	0.0800	0.0225	0.0016	1291	456.0	244.4	64	143	10
17CL505-12	140	226	318	0.71	0.0600	0.0018	0.3981	0.0207	0.0480	0.0019	605.6	64.8	340.3	15	302	12
17CL505-13	61.0	275	593	0.46	0.0494	0.0017	0.1525	0.0082	0.0224	0.0008	164.9	97.2	144.1	7.3	143	5.3
17CL505-14	108	89.9	149	0.60	0.1146	0.0037	2.3491	0.3998	0.1471	0.0218	1873	57.1	1227.3	121	885	123
17CL505-15	192	384	375	1.03	0.0623	0.0017	0.5362	0.0510	0.0622	0.0051	683.3	64.8	435.9	34	389	31
17CL505-16	131	101	131	0.78	0.0820	0.0028	1.4350	0.2097	0.1258	0.0161	1256	67.1	903.6	88	764	92
17CL505-17	45.4	35.0	66.2	0.53	0.0663	0.0022	1.2455	0.0873	0.1362	0.0085	816.7	930.6	821.4	40	823	48
17CL505-18	79.0	405	512	0.79	0.0489	0.0018	0.1509	0.0085	0.0224	0.0009	142.7	83.3	142.7	7.6	143	5.7
17CL505-19	42.8	158	339	0.47	0.0588	0.0039	0.1846	0.0146	0.0227	0.0007	566.7	138.9	172.1	12.5	145	4.2
17CL505-20	134	630	1056	0.60	0.0489	0.0015	0.1506	0.0074	0.0223	0.0009	142.7	97.2	142.4	6.5	142	5.7
17CL505-21	52.7	264	389	0.68	0.0490	0.0019	0.1488	0.0075	0.0220	0.0008	146.4	92.6	140.8	6.7	140	4.9
17CL505-22	62.0	299	531	0.56	0.0489	0.0017	0.1511	0.0099	0.0224	0.0013	142.7	97.2	142.9	8.8	143	8.1
17CL505-23	47.7	187	578	0.32	0.0496	0.0016	0.1563	0.0069	0.0228	0.0007	176.0	60.2	147.4	6.1	146	4.2
17CL505-24	77.0	362	539	0.67	0.0492	0.0014	0.1525	0.0056	0.0225	0.0006	166.8	64.8	144.1	5.0	143	3.9
17CL505-25	52.9	197	314	0.63	0.0575	0.0019	0.2848	0.0239	0.0359	0.0027	522.3	74.1	254.5	18.9	227	17
17CL505-26	937	253	253	1.00	0.1636	0.0023	10.3511	0.3190	0.4588	0.0127	2494	24.7	2467	30	2434	56
17CL505-27	46.3	220	359	0.61	0.0499	0.0021	0.1545	0.0074	0.0225	0.0005	190.8	101.8	145.9	6.6	143	3.4
17CL505-28	169	868	839	1.03	0.0495	0.0013	0.1491	0.0045	0.0218	0.0005	172.3	55.6	141.1	4.0	139	2.9
17CL505-29	185	93.5	124	0.75	0.0856	0.0017	2.6858	0.1066	0.2274	0.0080	1332	42.4	1325	29.7	1320	42
17CL505-30	99.0	88.4	157	0.56	0.0797	0.0143	0.5972	0.1071	0.0544	0.0014	1191	357.2	475.4	68.1	341	8.4

多为长柱状,长宽比值为2:1~3:1。CL图像显示,锆石具有较好的振荡环带结构,不含有矿物包裹体(图4c)。岩浆结晶锆石的U和Th含量分别为 $203.4 \times 10^{-6} \sim 1080.7 \times 10^{-6}$ 和 $46.5 \times 10^{-6} \sim 580.9 \times 10^{-6}$ ,Th/U比值变化范围为0.18~0.98(表1),平均值为0.61。其中锆石2、5、6、16、和30为老的继承性核,年龄分别为839 Ma、498 Ma、276 Ma、2558 Ma和841 Ma, Th/U平均值为0.96,其余岩浆结晶锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄变化于 $(138 \pm 2.5) \text{ Ma} \sim (192 \pm 2.5) \text{ Ma}$ ,除去不谐和年龄测点,计算平均年龄为 $(142.82 \pm 0.98) \text{ Ma}$ 。 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} - ^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 比值得出谐和线交点年龄为 $(142.99 \pm 0.98) \text{ Ma}$ (图5c),与平均年龄基本一致。

## 5.2 锆石Hf同位素特征

选择3个定年样品(17CL511、17CL505、17CL516)开展Hf同位素分析,结果列于表2。

由表2可见,样品17CL505取自焦冲石英二长闪长岩。26颗锆石中有12颗老的继承性核,剩下的14颗锆石为岩浆结晶锆石。岩浆结晶锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值变化范围是0.000404~0.002829,平均值为0.001489(表2)。 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值变化范围是0.281556~0.282422,平均值为0.282206(表2,图6a);岩浆结晶锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均为负值,变化范围是-40.0~-9.5,总平均值为-16.7(表2),二阶段模式年龄( $t_{\text{DM2}}$ )变化范围在690~3558 Ma,平均值为2052 Ma(表2)。老的继承性锆石核的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值变化范围是0.000341~0.001397,平均值为0.000929(表2); $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值变化范围是0.280998~0.282561,平均值为0.281762(表2,图6a);其中锆石4、6和17的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为正值,分别为2.9、2.0和10,平均值为4.9,二阶段模式年龄分别为1048 Ma、1526 Ma、2760 Ma,平均值1778 Ma;其余老的继承性锆石核 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均为负值,变化范围是-33.6~-4.3,总平均值为-18.6(表2,图7),二阶段模式年龄( $t_{\text{DM2}}$ )变化范围在1747~3853 Ma,平均值为2960 Ma(表2)。

样品17CL516取自焦冲荷花形石英二长闪长岩。25颗锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值变化范围是0.0006~0.001569, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值均小于0.002,总的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 平均值为0.001014(表2)。 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值变化范围是0.282175~0.282370,平均值为0.282233(表2,图

6b)。样品中锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均为负值,变化范围是-18.1~-11.1,总平均值为-15.9(表2,图7),二阶段模式年龄( $t_{\text{DM2}}$ )变化范围在1906~2339 Ma,平均值为2201 Ma(表2)。

样品17CL511取自焦冲辉石二长闪长岩。28颗锆石中的17个锆石 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值小于0.002,平均值为0.001619;剩余11个锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 的比值大于0.002,平均值0.003337(表2)。 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值变化范围是0.282503~0.282628,平均值为0.282555(表2,图6c)。样品中 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均为负值,变化范围是-6.6~-2.4,总平均值为-4.9(表2,图7),二阶段模式年龄( $t_{\text{DM2}}$ )变化范围在1340~1613 Ma,平均值为1502 Ma(表2)。

## 5.3 岩石地球化学

对不同的岩石样品进行了主量元素、稀土元素和微量元素的化学分析,结果如表3。

### 5.3.1 主量元素

橄榄安粗岩系列侵入岩(10CL507、10CL510和10CL511)中的 $\text{SiO}_2$ 含量比高钾钙碱性系列侵入岩(10CL506、10CL521、17CL505、17CL516、17CL517和17CL518)中的要低,为46.76%~49.16%(表3)。里特曼指数( $\sigma$ )大于4.0(5.82~8.12),在 $\text{SiO}_2 - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 图解(Irvine and Baragar, 1971; Middlemost, 1994)中,辉石二长闪长岩落于二长辉长岩和二长闪长岩中,为碱性系列。高钾钙碱性系列侵入岩的 $\text{SiO}_2$ 含量为58.94%~65.44%,里特曼指数小于3.3(2.16~2.87),在 $\text{SiO}_2 - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 图解中,落于花岗闪长岩和二长岩区域,为亚碱性系列(图8)。从 $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}$ 图解(Peccerillo and Taylor, 1976)可以看出,本区侵入岩样品可划分为高钾钙碱性系列和橄榄安粗岩系列(图9),两个系列侵入岩的ASI均小于1,介于0.68~0.93,为准铝质(图10),具有I型花岗岩的地球化学属性(Frost et al., 2001; Frost and Frost, 2008)。根据前人已发表的铜陵地区其他岩体主量元素地球化学数据,结合镜下特征,铜陵地区高钾钙碱性系列侵入岩为辉长闪长岩、石英二长闪长岩、花岗闪长岩,橄榄安粗岩系列侵入岩主要为辉石二长闪长岩、二长岩、石英二长岩(吴才来等,2010,2013)。焦冲地区主要岩石类型与其相对应,为石英二长闪长岩、花岗闪长岩和辉石二长闪长岩,分别为高钾钙碱性系列(前两者)

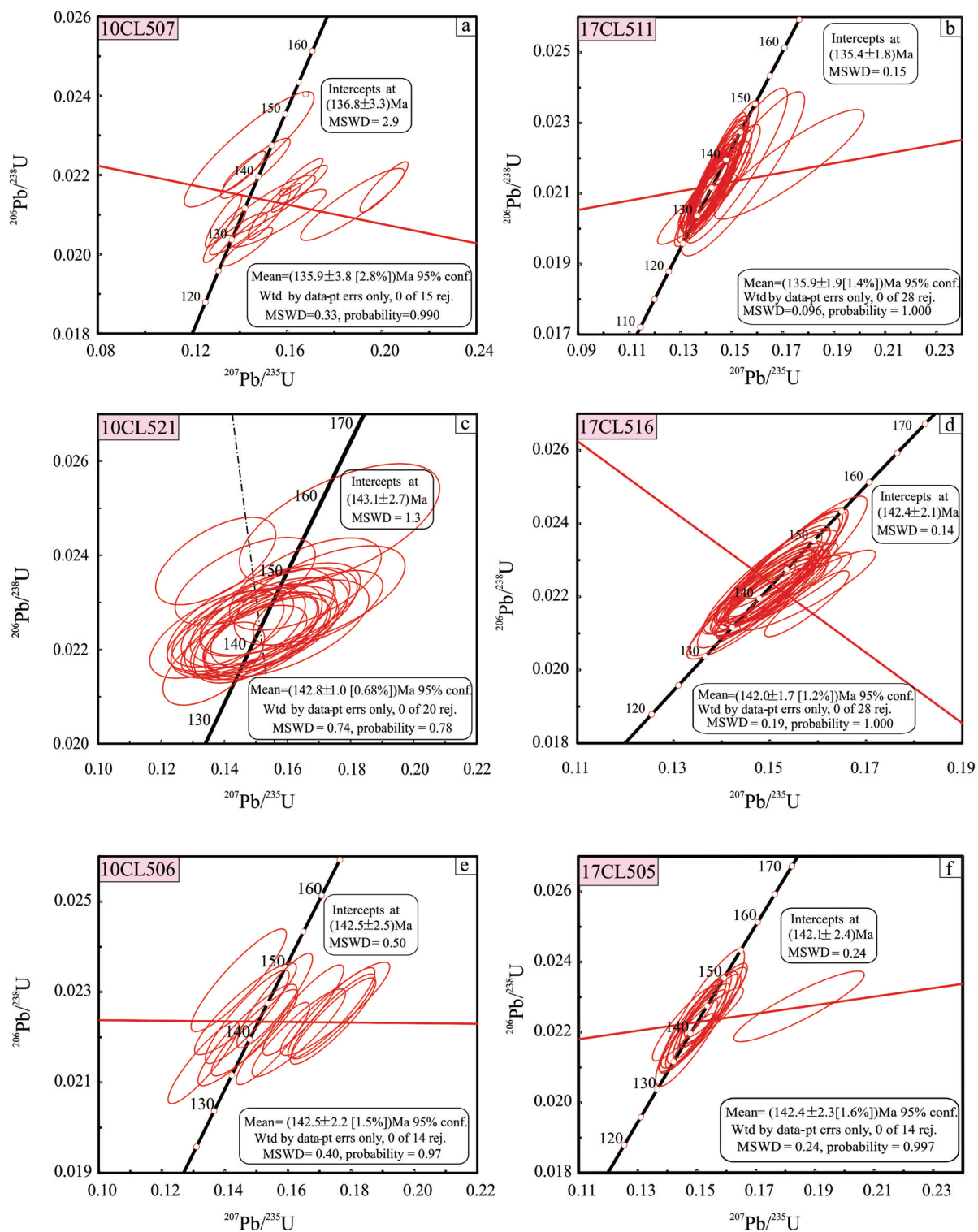


图5 锆石  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ – $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和图(图例同图4)

Fig.5 Zircon U–Pb concordia diagrams. MSWD–Mean square of weighted deviates (symbols as for Fig. 4)

表2 锆石Lu-Hf同位素分析结果

Table 2 Zircon Lu-Hf isotopic data of intrusive rocks from the Jiangchong deposit

样品号	年龄/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$2\sigma$	$t_{\text{DM1}}$	$t_{\text{DM2}}$	$f_{\text{LuHf}}(\text{s})$
辉石二长闪长岩, (135.9±1.9)Ma													
17CL511-1	137	0.097966	0.001501	0.002717	0.000016	0.282586	0.000018	-6.6	-3.8	0.6	988	1434	-0.92
17CL511-2	138	0.106375	0.000579	0.003131	0.000039	0.282523	0.000019	-8.8	-6.1	0.7	1093	1577	-0.91
17CL511-3	139	0.034035	0.000494	0.001083	0.000007	0.282568	0.000016	-7.2	-4.3	0.6	970	1464	-0.97
17CL511-4	138	0.049326	0.000553	0.001440	0.000003	0.282514	0.000014	-9.1	-6.2	0.5	1055	1587	-0.96
17CL511-5	136	0.172038	0.001768	0.004911	0.000025	0.282528	0.000024	-8.6	-6.1	0.8	1142	1574	-0.85
17CL511-6	136	0.051891	0.000483	0.001555	0.000026	0.282560	0.000019	-7.5	-4.7	0.7	994	1486	-0.95
17CL511-7	133	0.067227	0.001782	0.002052	0.000035	0.282511	0.000019	-9.2	-6.5	0.7	1078	1599	-0.94
17CL511-8	135	0.101672	0.000466	0.002902	0.000013	0.282568	0.000022	-7.2	-4.5	0.8	1019	1476	-0.91
17CL511-9	140	0.020429	0.000117	0.000675	0.000003	0.282554	0.000011	-7.7	-4.7	0.4	979	1497	-0.98
17CL511-10	134	0.126942	0.000742	0.003613	0.000032	0.282578	0.000020	-6.9	-4.2	0.7	1025	1458	-0.89
17CL511-11	133	0.099114	0.001100	0.002944	0.000008	0.282539	0.000020	-8.2	-5.6	0.7	1064	1543	-0.91
17CL511-12	137	0.098669	0.000490	0.002970	0.000025	0.282628	0.000020	-5.1	-2.4	0.7	932	1340	-0.91
17CL511-13	136	0.100896	0.000995	0.002915	0.000005	0.282617	0.000022	-5.5	-2.7	0.8	946	1366	-0.91
17CL511-16	137	0.138777	0.000835	0.003970	0.000036	0.282604	0.000023	-6.0	-3.3	0.8	996	1403	-0.88
17CL511-17	137	0.044615	0.000965	0.001466	0.000027	0.282542	0.000014	-8.1	-5.3	0.5	1017	1527	-0.96
17CL511-18	132	0.076598	0.001399	0.002497	0.000036	0.282566	0.000017	-7.3	-4.6	0.6	1011	1478	-0.92
17CL511-19	136	0.070718	0.001297	0.002202	0.000047	0.282520	0.000020	-8.9	-6.1	0.7	1069	1578	-0.93
17CL511-20	135	0.066014	0.000367	0.002002	0.000004	0.282537	0.000013	-8.3	-5.5	0.5	1040	1541	-0.94
17CL511-21	139	0.057461	0.000375	0.001970	0.000009	0.282557	0.000019	-7.6	-4.7	0.7	1010	1498	-0.94
17CL511-22	139	0.102730	0.001755	0.003005	0.000029	0.282563	0.000021	-7.4	-4.6	0.7	1029	1487	-0.91
17CL511-23	135	0.050893	0.002103	0.001721	0.000049	0.282532	0.000018	-8.5	-5.7	0.6	1038	1550	-0.95
17CL511-24	135	0.057265	0.001008	0.001821	0.000021	0.282554	0.000017	-7.7	-4.9	0.6	1010	1500	-0.95
17CL511-25	135	0.030456	0.000549	0.001090	0.000025	0.282560	0.000015	-7.5	-4.6	0.5	981	1482	-0.97
17CL511-26	131	0.023135	0.000376	0.000801	0.000011	0.282513	0.000014	-9.2	-6.4	0.5	1040	1590	-0.98
17CL511-27	138	0.052238	0.002050	0.001523	0.000049	0.282563	0.000020	-7.4	-4.5	0.7	989	1479	-0.95
17CL511-28	135	0.122574	0.000714	0.003626	0.000033	0.282616	0.000023	-5.5	-4.6	0.8	968	1373	-0.89
17CL511-29	137	0.038466	0.000215	0.001227	0.000005	0.282503	0.000019	-9.5	-2.8	0.7	1066	1613	-0.96
17CL511-30	136	0.076891	0.000979	0.002399	0.000033	0.282526	0.000018	-8.7	-6.6	0.6	1067	1568	-0.93
石英二长闪长岩, (142.4±2.3)Ma													
17CL505-1	923	0.024031	0.000325	0.000785	0.000013	0.281535	0.000013	-43.7	-23.9	0.5	2388	3278	-0.98
17CL505-4	812	0.027847	0.000595	0.000912	0.000019	0.282359	0.000016	-14.6	2.9	0.6	1258	1526	-0.97
17CL505-5	2432	0.012339	0.000176	0.000417	0.000003	0.281127	0.000014	-58.2	-4.3	0.5	2913	3213	-0.99
17CL505-6	1669	0.020789	0.000174	0.000739	0.000002	0.281801	0.000015	-34.3	2.0	0.5	2022	2760	-0.98
17CL505-7	142	0.057505	0.000618	0.001947	0.000019	0.282345	0.000019	-15.1	-12.2	0.7	1314	690	-0.94
17CL505-8	145	0.085573	0.000170	0.002829	0.000012	0.282422	0.000020	-12.4	-9.5	0.7	1233	1006	-0.91
17CL505-9	344	0.031597	0.000216	0.001057	0.000005	0.281739	0.000015	-36.5	-29.2	0.5	2125	3306	-0.97
17CL505-10	140	0.023287	0.000290	0.000788	0.000007	0.281627	0.000016	-40.5	-37.5	0.6	2262	3548	-0.98
17CL505-12	302	0.036014	0.000301	0.001242	0.000013	0.282389	0.000015	-13.6	-7.2	0.5	1227	1747	-0.96
17CL505-13	143	0.053786	0.001523	0.001839	0.000040	0.282378	0.000017	-13.9	-11.0	0.6	1263	1894	-0.94
17CL505-14	885	0.010164	0.000047	0.000341	0.000002	0.281275	0.000013	-52.9	-33.6	0.5	2710	3853	-0.99
17CL505-15	389	0.031051	0.000677	0.001039	0.000021	0.281977	0.000015	-28.1	-19.8	0.5	1795	2685	-0.97
17CL505-16	764	0.041872	0.000299	0.001290	0.000007	0.281730	0.000014	-36.8	-20.7	0.5	2150	3326	-0.96
17CL505-17	823	0.039034	0.000394	0.001359	0.000011	0.282561	0.000014	-7.5	10.0	0.5	988	1048	-0.96
17CL505-18	143	0.026432	0.000237	0.000939	0.000011	0.281556	0.000015	-43.0	-40.0	0.5	2369	3558	-0.97
17CL505-19	145	0.056155	0.002399	0.002219	0.000084	0.282375	0.000019	-14.0	-11.1	0.7	1280	1562	-0.93
17CL505-20	142	0.046309	0.000333	0.001616	0.000015	0.282329	0.000015	-15.7	-12.7	0.5	1324	1611	-0.95
17CL505-21	140	0.040066	0.000347	0.001362	0.000011	0.282244	0.000016	-18.7	-15.7	0.6	1436	2190	-0.96
17CL505-22	143	0.035549	0.000477	0.001224	0.000020	0.282144	0.000016	-22.2	-19.2	0.6	1570	2409	-0.96
17CL505-23	146	0.042162	0.001513	0.001395	0.000048	0.282416	0.000014	-12.6	-9.5	0.5	1194	1806	-0.96
17CL505-24	143	0.042307	0.001815	0.001498	0.000059	0.282392	0.000016	-13.4	-10.4	0.6	1231	1860	-0.95
17CL505-27	143	0.044260	0.000072	0.001616	0.000009	0.282178	0.000015	-21.0	-18.0	0.5	1539	2335	-0.95
17CL505-28	139	0.033515	0.000280	0.001177	0.000012	0.282413	0.000014	-12.7	-9.7	0.5	1191	1810	-0.96
17CL505-29	1321	0.018483	0.000169	0.000574	0.000003	0.281648	0.000014	-39.8	-11.0	0.5	2222	2778	-0.98
17CL505-30	341	0.013333	0.000270	0.000404	0.000006	0.282069	0.000011	-24.9	-17.5	0.4	1640	2450	-0.99

续表2

样品号	年龄/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$2\sigma$	$t_{\text{DM1}}$	$t_{\text{DM2}}$	$f_{\text{Lu/Hf}}(s)$
石英二长闪长岩, (142.82±0.98)Ma													
17CL516-1	140	0.016937	0.000102	0.000790	0.000007	0.282227	0.000015	-19.3	-16.3	0.5	1437	2224	-0.98
17CL516-2	363	0.044343	0.000219	0.001569	0.000006	0.282211	0.000018	-19.8	-12.3	0.6	1490	2138	-0.95
17CL516-3	141	0.035387	0.001234	0.001469	0.000045	0.282303	0.000015	-16.6	-13.6	0.5	1356	2058	-0.96
17CL516-4	139	0.035416	0.000373	0.001368	0.000019	0.282239	0.000015	-18.8	-15.9	0.5	1442	2072	-0.96
17CL516-5	145	0.014121	0.000155	0.000600	0.000010	0.282235	0.000016	-19.0	-15.9	0.6	1420	2206	-0.98
17CL516-6	140	0.027760	0.000268	0.001204	0.000014	0.282235	0.000017	-19.0	-16.0	0.6	1442	2209	-0.96
17CL516-7	141	0.019079	0.000377	0.000827	0.000013	0.282287	0.000018	-17.1	-14.1	0.6	1355	2088	-0.98
17CL516-7	141	0.019079	0.000377	0.000827	0.000013	0.282287	0.000018	-17.1	-14.1	0.6	1355	2088	-0.98
17CL516-10	146	0.018246	0.000566	0.000764	0.000016	0.282370	0.000015	-14.2	-11.1	0.5	1238	1906	-0.98
17CL516-11	143	0.022172	0.000319	0.000897	0.000016	0.282201	0.000015	-20.2	-17.1	0.5	1477	2285	-0.97
17CL516-12	142	0.019408	0.000295	0.000802	0.000010	0.282209	0.000014	-19.9	-16.9	0.5	1463	2266	-0.98
17CL516-13	140	0.033382	0.000380	0.001297	0.000017	0.282217	0.000015	-19.6	-16.7	0.5	1471	2247	-0.96
17CL516-14	143	0.021151	0.000436	0.000791	0.000012	0.282175	0.000014	-21.1	-18.0	0.5	1509	2339	-0.98
17CL516-16	144	0.023733	0.000585	0.000959	0.000018	0.282206	0.000015	-20.0	-17.0	0.5	1474	2273	-0.97
17CL516-17	145	0.026966	0.000572	0.001140	0.000026	0.282231	0.000016	-19.1	-16.1	0.6	1445	2218	-0.97
17CL516-18	141	0.023814	0.000294	0.000936	0.000014	0.282262	0.000013	-18.1	-15.0	0.5	1395	2147	-0.97
17CL516-19	143	0.027279	0.000236	0.001049	0.000007	0.282228	0.000015	-19.2	-16.2	0.5	1445	2221	-0.97
17CL516-20	139	0.024320	0.000678	0.000937	0.000024	0.282260	0.000015	-18.1	-15.1	0.5	1397	2150	-0.97
17CL516-21	143	0.023507	0.000155	0.000872	0.000004	0.282232	0.000015	-19.1	-16.1	0.5	1434	2214	-0.97
17CL516-22	147	0.034371	0.000480	0.001316	0.000012	0.282255	0.000015	-18.3	-15.2	0.5	1418	2163	-0.96
17CL516-23	146	0.030856	0.000307	0.001174	0.000011	0.282183	0.000014	-20.8	-17.8	0.5	1514	2326	-0.96
17CL516-24	141	0.027541	0.000152	0.001097	0.000007	0.282196	0.000017	-20.4	-17.4	0.6	1493	2294	-0.97
17CL516-25	142	0.018023	0.000250	0.000805	0.000006	0.282209	0.000013	-19.9	-16.9	0.5	1463	2261	-0.98
17CL516-27	140	0.025439	0.000327	0.000972	0.000016	0.282289	0.000015	-17.1	-14.1	0.5	1358	2084	-0.97
17CL516-28	142	0.013924	0.000121	0.000642	0.000009	0.282189	0.000014	-20.6	-17.6	0.5	1485	2309	-0.98

和橄榄安粗岩系列侵入岩(后者)(图8,图9)。

### 5.3.2 微量元素

由表3可见,橄榄安粗岩系列侵入岩比高钾钙碱性系列侵入岩含有较高的过渡族元素(表3)。随着 $\text{SiO}_2$ 含量的增加,两系列岩石的 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{FeO}^{\text{T}}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 和大多数微量元素如V、Co、Sr、Y的含量减少(表3);同时 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 和Nb、Ni也相对减少,而 $\text{Na}_2\text{O}$ 、Zr、U、Hf、Ta和Th的含量随 $\text{SiO}_2$ 的增加而增加(表3)。在微量元素蛛网图中,两个系列侵入岩表现出Nb、Ti和P的负异常,及稍微的Sr正异常(图11)。

### 5.3.3 稀土元素

橄榄安粗岩系列侵入岩的稀土元素总量为 $325 \times 10^{-6} \sim 454 \times 10^{-6}$ ,明显高于高钾钙碱性系列侵入岩( $147 \times 10^{-6} \sim 221 \times 10^{-6}$ )(表3)。稀土元素总量的高低主要取决La、Ce和Sm的含量,因为这些元素是不相容元素,在岩浆结晶的早期阶段,不易进入结晶相而保留在残余岩浆中。橄榄安粗岩系列侵入岩的LREE/HREE比值(13~13.4)略高于高钾钙碱性系列侵入岩(11.2~12.2),两者的轻重稀土元素比值远远大于1,显示稀土元素分异程度大,轻稀土富集。在稀土元素球粒陨石标准化图中,两个系列侵入岩均表现出轻稀土分异明显,重稀土相对分异弱,不

具有Eu负异常的特点。从表3中发现,随 $\text{SiO}_2$ 含量增加,两个系列侵入岩La、Ce、Yb和REE减少,LREE/HREE和La/Sm比值增加,说明岩浆演化过程中赋存稀土元素的矿物如磷灰石等发生了分离结晶作用。两个系列侵入岩的稀土元素球粒陨石标准化配分曲线相似,均无明显的正负Eu异常的右倾型,与铜陵地区其他岩体稀土元素配分曲线基本一致,但焦冲橄榄安粗岩系列侵入岩的稀土配分曲线位置高于其他岩石(由于稀土含量较高)(图12)。

## 6 讨 论

### 6.1 岩浆活动期次

根据前人研究,铜陵矿集区中生代岩浆活动最早开始时间为152 Ma(狄永军等,2005),而高峰期为140 Ma左右,成矿作用与岩浆活动时间相近或略晚(常印佛等,1991;吴才来等,2003,2008,2010a;杨小男等,2007,2008;杜杨松等,2007b,2010b;徐晓春等,2008;谢建成等,2008)。表4是收集的前人发表的区内侵入岩的锆石U-Pb年龄。由表4可见,铜陵矿集区内橄榄安粗岩系列中的舒家店和曹山辉石二长闪长岩年龄分别为142 Ma、145 Ma(王彦斌等,2004;吴才来等,2010),而白芒山辉石二长闪

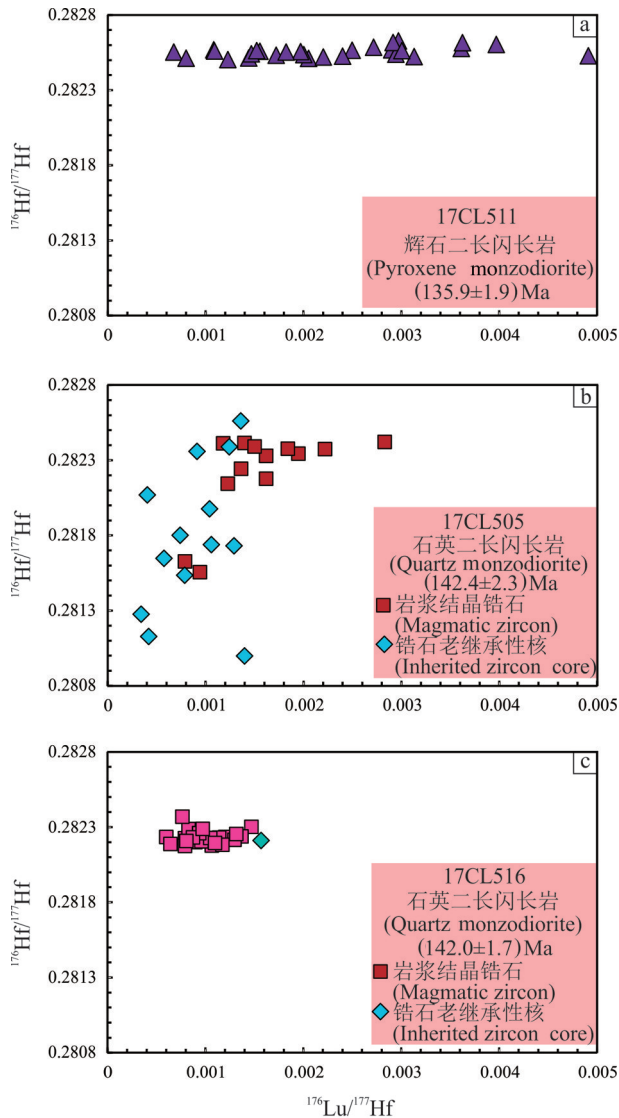


图6 锆石  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ - $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 关系图  
Fig.6 Diagrams of  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  versus  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$

长岩年龄为138 Ma(吴才来等,2008)。高钾钙碱性系列湖城涧辉长闪长岩年龄为142 Ma,然而,吴才来等(2010)根据铜陵狮子山矿田橄榄安粗岩系列白芒山岩体 SHRIMP-RG 锆石U-Pb定年结果认为,该区辉石二长闪长质岩浆最早侵位时间可能为142 Ma,138 Ma为后期一次较大规模的岩浆侵入活动,而133 Ma是区域上发生的又一次岩浆构造热事件,因此,本区岩浆活动存在多期次侵位的特点。本文研究的焦冲地区辉石二长闪长岩,锆石U-Pb年龄为136 Ma,比铜陵矿集区其他同类型岩石的年龄小,说明岩浆侵位晚于邻区狮子山矿田白芒山岩体(142 Ma、138 Ma)和曹山岩体的年龄(145 Ma)及

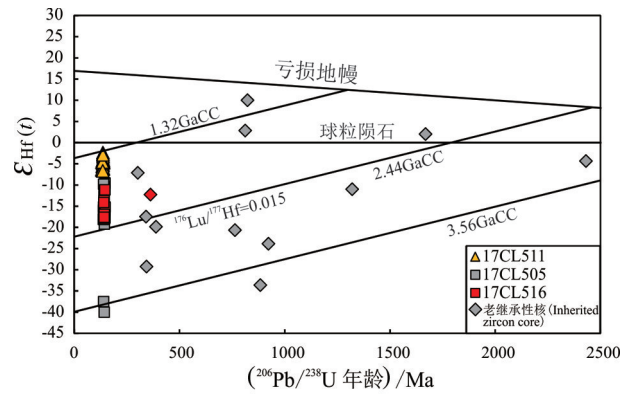


图7 花岗岩类锆石Hf同位素演化图

▲—辉石二长闪长岩;■—石英二长闪长岩;  
◆—老继承性锆石核

Fig.7 Age versus zircon Hf isotopic compositions

Triangles— Pyroxene monzodiorite; Blocks— Quartz monzodiorite;  
Rhombuses— Zircons with older inherited cores

舒家店岩体(142 Ma)。由此可见,整个铜陵地区相同类型的岩浆侵位期次不同,反映了岩浆活动具有多期次性的特点。焦冲地区辉石二长闪质岩浆活动可能是铜陵地区橄榄安粗岩系列岩浆活动的较晚一次。

铜陵地区高钾钙碱性系列侵入岩年龄为152~130 Ma(Wu et al., 2000; 杜杨松等,2004;徐夕生等,2004;王彦斌等,2004;狄永军等,2005;楼亚儿等,2006;张达等,2006;杨小男等,2007;谢建成等,2008;吴才来等,2008,2010)(表4),其中的(130±3)Ma为长英岩脉的年龄(狄永军等,2005)。从这些定年数据可以得出,铜陵地区高钾钙碱性系列岩浆活动大约起始于152 Ma,并持续到130 Ma,岩浆活动持续22 Ma。橄榄安粗岩系列侵入岩侵入起始于145 Ma,延续到136 Ma,岩浆活动持续9 Ma。可见,橄榄安粗岩系列岩浆活动起始的时间晚于高钾钙碱性系列岩浆,但岩浆活动结束的时间早于高钾钙碱性系列岩浆。其中,焦冲矿区高钾钙碱性系列中石英二长闪长岩和花岗闪长岩的年龄均为142 Ma、143 Ma,属铜陵地区早白垩世岩浆活动的产物,而焦冲矿区橄榄安粗岩系列侵入岩年龄为136 Ma,是铜陵地区较晚一期的岩浆活动产物。

### 6.2 岩石成因与岩浆活动构造环境

研究表明,铜陵地区中生代构造运动经历了两次转变:(1)在中三叠世,构造由拉张转为强烈的挤压状态(Deng et al., 2011)。在此期间,岩石圈加厚,并且形成了一系列北东向褶皱;由于盖层中的层间

表 3 铜陵焦冲矿区侵入岩全岩主量元素(%)和微量元素( $10^{-6}$ )含量Table 3 Content of major (%) and trace elements ( $10^{-6}$ ) of whole rock for the intrusive rocks from Jiaochong, Tongling

分析项目	10CL506	10CL521	17CL505	17CL516	17CL517	17CL518	10CL507	17CL510	17CL511
SiO <sub>2</sub>	58.94	65.44	61.34	60.24	62.98	63.44	46.76	47.97	49.16
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.17	14.45	16.20	15.99	16.31	16.13	18.01	16.23	16.99
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.60	0.50	4.06	3.74	2.96	2.67	5.21	5.01	4.66
FeO	3.63	2.86	1.01	1.84	1.12	1.96	4.20	5.02	4.71
CaO	5.00	4.98	4.95	4.34	4.82	4.41	9.31	9.28	8.88
MgO	1.82	1.56	2.23	1.99	1.60	1.65	5.07	5.69	4.74
K <sub>2</sub> O	3.78	3.83	2.96	3.20	3.49	3.33	2.54	2.61	2.88
Na <sub>2</sub> O	3.33	3.21	3.71	3.75	4.00	4.01	3.65	3.22	3.70
TiO <sub>2</sub>	0.60	0.52	0.66	0.75	0.62	0.60	1.65	1.54	1.34
MnO	0.03	0.08	0.04	0.06	0.07	0.09	0.16	0.17	0.15
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.26	0.23	0.25	0.33	0.26	0.27	0.92	0.89	0.85
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	2.14	0.90	0.79	1.59	0.38	0.70	1.62	1.09	1.05
CO <sub>2</sub>	3.90	0.91					0.52		
LOI	5.65	1.57	2.35	3.54	1.50	1.21	1.75	2.07	1.65
Alk	7.11	7.04	6.67	6.96	7.50	7.34	6.19	5.83	6.59
K <sub>2</sub> O/N <sub>2</sub> O	1.14	1.19	0.80	0.85	0.87	0.83	0.70	0.81	0.78
ASI	0.83	0.79	0.90	0.93	0.87	0.90	0.73	0.68	0.70
$\sigma$	2.87	2.16	2.35	2.67	2.76	2.60	8.12	5.82	6.33
La	32.9	32.5	40.7	50.2	40.3	41.0	65.8	101	80.9
Ce	63.7	64.3	73.0	93.2	76.4	73.3	139	198	158
Pr	7.20	7.15	8.12	10.79	8.71	8.47	16.50	20.20	16.52
Nd	26.7	26.0	30.03	39.8	31.5	31.8	65.4	80.0	76.1
Sm	4.90	4.52	5.15	7.09	5.64	5.61	12.6	17.4	14.4
Eu	1.43	1.17	1.62	2.02	1.77	1.73	3.59	4.57	3.80
Gd	4.14	3.73	4.55	6.13	4.88	4.74	9.97	13.8	11.2
Tb	0.60	0.53	0.64	0.87	0.67	0.67	1.25	1.79	1.45
Dy	3.07	2.87	3.44	4.66	3.50	3.45	5.47	8.31	6.71
Ho	0.58	0.54	0.62	0.85	0.61	0.61	0.96	1.31	1.08
Er	1.67	1.54	1.81	2.41	1.74	1.71	2.48	3.46	2.85
Tm	0.23	0.23	0.27	0.37	0.26	0.26	0.30	0.46	0.38
Yb	1.47	1.44	1.77	2.43	1.73	1.68	1.84	2.82	2.40
Lu	0.22	0.23	0.26	0.35	0.25	0.25	0.26	0.40	0.34
LREE/HREE	11.4	12.2	11.9	11.2	12.1	12.1	13.4	13.0	13.3
$\Sigma$ REE	149	147	172	221	178	175	325	454	377
$\delta$ Eu	0.95	0.85	1.00	0.92	1.01	1.00	0.95	0.87	0.88
Y	17.1	16.0	20.7	22.8	17.3	17.9	26.2	33.2	28.8
Zr	158	149	196	280	217	168	148	259	279
Hf	4.44	4.15	5.18	7.63	6.58	4.99	3.83	7.25	6.87
Rb	82.0	65.20	75.8	92.4	73.8	68.6	78.0	87.4	85.3
Sr	663	717	971	899	848	802	1253	1217	1241
Nb	11.8	12.1	14.3	19.1	14.7	15.1	10.4	17.2	17.7
Ba	706	806	1012	941	1010	942	1267	1083	1001
Ta	0.84	0.79	0.87	1.40	1.23	0.94	0.57	0.89	0.99
Th	6.75	5.57	10.52	10.72	8.40	9.34	8.59	16.12	17.92
Li	10.4	5.41	10.3	12.2	5.30	7.53	20.1	24.9	15.6
Be	1.47	1.42	1.79	1.96	1.61	1.85	1.91	2.38	2.98
Sc	8.52	7.39	10.8	9.24	7.95	7.90	19.9	22.5	18.29
Co	10.8	8.58	12.7	13.4	10.5	7.91	31.6	33.0	29.5
Ni	4.52	3.93	6.64	5.59	4.65	4.17	17.9	23.4	18.6
Cu	119	38.9	45.9	92.7	146	59.5	66.4	55.6	65.2
Zn	16.1	41.5	28.1	46.4	39.8	51.5	124	129	116
Ga	18.7	17.5	23.9	24.4	21.6	22.0	21.4	25.1	24.2
Cd	0.06	0.22	0.09	0.12	0.18	0.20	0.48	0.30	0.24
Cs	1.54	0.91	1.47	1.49	1.46	1.10	6.77	6.26	4.38
Pb	7.38	12.6	8.09	10.8	14.2	15.9	18.6	19.4	17.9
U	2.49	1.77	3.02	2.78	2.47	2.63	2.53	3.58	4.70
Bi	1.15	0.16	0.16	0.65	0.96	0.13	0.12	0.09	0.16
W	1.61	0.73	0.73	1.14	0.62	1.00	1.08	1.51	3.64
Mo	0.56	16.6	0.18	1.51	2.36	0.56	0.92	1.24	1.39
Rb/Sr	0.12	0.09	0.08	0.10	0.09	0.09	0.06	0.07	0.07
Ba/Rb	8.61	12.4	13.4	10.2	13.7	13.7	16.2	12.4	11.7
Sr/Y	38.8	44.8	46.8	39.4	49.0	44.8	47.8	36.7	43.1
La/Sm	6.71	7.19	7.90	7.07	7.14	7.30	5.22	5.84	5.62



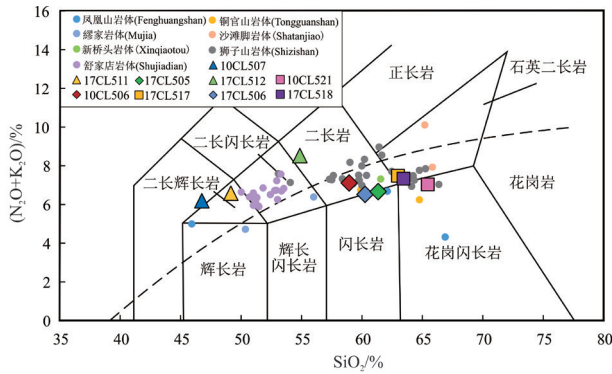


图 8 岩体岩石地球化学分类 TAS 判别图解 (据 Middlemost, 1994; Irvine and Baragar, 1971)

(虚线为 Irvine 分界线, 上方为碱性, 下方为亚碱性) 三角代表橄榄安粗系列侵入岩样品, 方块代表高钾钙碱性系列侵入岩样品。区域上其他岩体的岩石化学数据来自吴才来等(2003, 2010, 2013a, b), 黄顺生(2004), 王云健等(2007), 瞿泓滢等(2011), 赖小东等(2012), 陆顺富等(2014)。以下图中数据来源相同

Fig.8 Diagram of  $SiO_2-(Na_2O+K_2O)$  for the intrusive rocks (after Middlemost, 1994; Irvine and Baragar, 1971)

The dashed line represents boundary between alkaline and subalkaline series. Squares—Intrusive rocks of the shoshonitic series in the Jiaochong orefield. Blocks—Intrusive rocks of the high-K, calc-alkaline series in the Jiaochong orefield. Dots—Data of other deposits in Tonling area after Wu Cailai et al. (2003, 2010, 2013a, b), Huang Sunsheng (2004), Wang Yunjian et al. (2007), Qu Hongying et al. (2011), Lai Xiaodong et al. (2010), Lu Fushun et al. (2014).

The data using in the following diagrams after the same sources

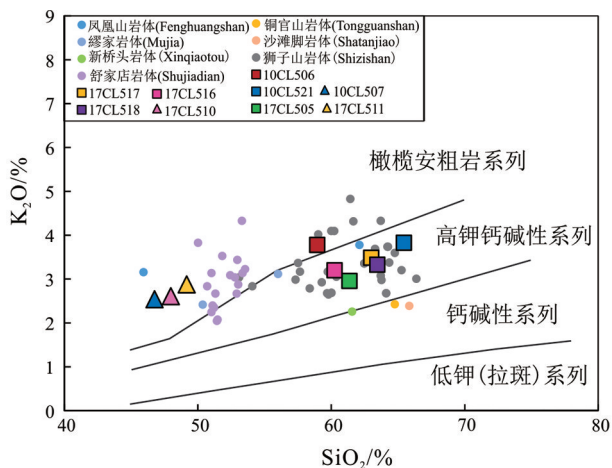


图 9 侵入岩  $SiO_2-K_2O$  图解 (据 Peccerillo and Taylor, 1976) (图例同图 8)

Fig.9 Diagram of  $K_2O$  versus  $SiO_2$  of the intrusive rocks (after Peccerillo and Taylor, 1976) Symbols as for Fig. 8

顺层断裂十分发育, 并且被纵向深大断层切割, 为后期的岩浆侵位和成矿作用提供了构造空间。(2) 在晚侏罗世—早白垩世, 铜陵地区构造环境从挤压状态转变成拉伸状态, 此转换期间加厚的岩石圈发

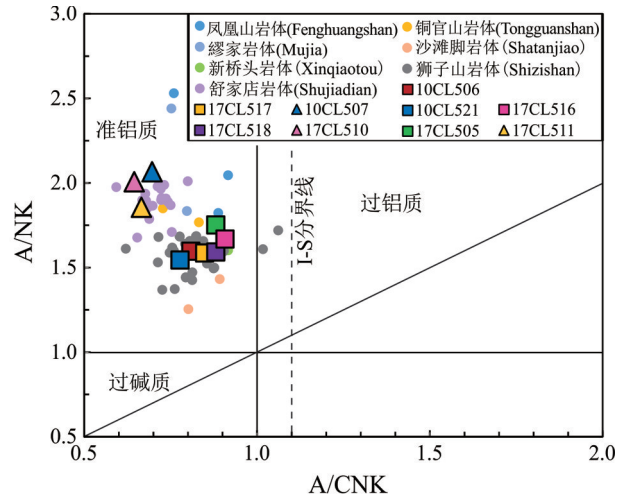


图 10 A/CNK-A/NK 图解 (据 Maniar and Piccoli, 1989; 图例同图 8)

Fig.10 Diagram of A/NK versus A/CNK (after Maniar and Piccoli, 1989). A= Molar  $Al_2O_3$ , N= Molar  $Na_2O$ , K= Molar  $K_2O$ , and C= Molar CaO. Symbols as for Fig. 8

生拆沉作用, 导致软流圈物质上涌, 引起了强烈的壳幔相互作用, 并在莫霍面附近形成一个巨大的深位岩浆房, 并发生分异结晶作用 (Deng et al., 2011; Wu et al., 2014, 2017)。深位岩浆房的热及其结晶潜热引起上部地壳低熔点的组分发生部分熔融, 形成长英质岩浆, 在上地壳与中下地壳之间形成浅位岩浆房 (Wu et al., 2014)。在构造作用下, 岩浆房中的岩浆上升侵位, 形成不同岩性的侵入体。

焦冲地区存在高钾钙碱性系列和橄榄安粗岩系列侵入岩, 前者主要岩石代表为石英二长闪长岩、花岗闪长岩, 后者主要代表岩性为辉石二长闪长岩。其中, 部分高钾钙碱性系列侵入岩的地球化学特征与埃达克岩相似, 主要表现为  $SiO_2 > 56\%$ ,  $Al_2O_3 > 15\%$ ,  $N_2O > K_2O$ , 富碱、贫镁、高铝、富集大离子亲石元素 (Sr、Ba) 和 LREE, 相对亏损高场强元素 (Nb、Ta、Ti、Zr、Hf 等), 无正负 Eu 异常、轻稀土分异明显、重稀土分异相对较弱的特点, 显示出 I 型火成岩的特征, 而两个系列侵入岩的 Sr/Y 比值较高, 为 38.77 ~ 104.47,  $(La/Yb)_N$  值 12.95 ~ 15.25, 又显示出埃达克质岩石的地球化学属性。另外, 焦冲地区两个系列侵入岩的  $ASI < 1$ , 在 A/CNK-A/NK 图解中, 均为准铝质岩石, 类似于 I 型花岗岩类 (图 8)。并且, 岩石具有相似的稀土配分模式和微量元素配分模式, 及 La/Nb 比值变化较大, 为 1.2 ~ 6.3, Zr/Ba 比

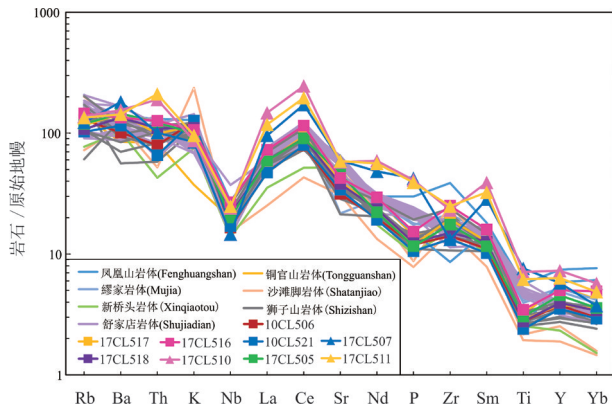


图 11 微量元素蛛网图(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)  
三角代表橄榄安粗岩系列侵入岩样品, 方块代表高钾钙碱性系列侵入岩样品, 直线代表铜陵地区其他岩体

Fig. 11 N-MORB normalized trace element spider diagrams of the intrusive rocks (normalizing values after Sun and McDonough, 1989)

Squares—Intrusive rocks of the shoshonitic series in the Jiaochong orefield.  
Blocks—Intrusive rocks of the high-K, calc-alkaline series in the Jiaochong orefield. Lines—Data of other deposits in Tongling area

值为 0.11~0.26(大多数小于 0.2), 反映其原始岩浆可能含有地幔成分(Ormerod et al., 1988; DePaolo et al., 2000)。焦冲高钾钙性系列岩石中发现大量的不同年龄的老的继承性锆石, 表明古老地壳参与了岩浆的形成过程。从锆石 Hf 同位素特征来看, 焦冲橄榄安粗岩系列辉石二长闪长岩的锆石  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为 -6.6~-2.4, 二阶段模式年龄为 1340~1613 Ma, 而高钾钙碱性系列侵入岩的锆石  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为 -40.0~-9.5, 二阶段模式年龄为 690~3558 Ma, 说明两个系列侵入岩均含有富集岩石圈地幔的成分, 且橄榄安粗岩系列侵入岩含有较多的幔源物质, 而高钾钙碱性系列侵入岩含有更多的壳源物质, 与前人的研究结果吻合(Müller and Groves, 1993; Wang et al., 2004b; Li et al., 2009b)。从高钾钙碱性系列侵入岩中老的继承性锆石 Hf 同位素成分来看,  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  负值为主(-33.6~-4.3),  $t_{\text{DM2}}=1747\sim 3853$  Ma, 也有部分正值(+2~+10),  $t_{\text{DM2}}=1048\sim 2760$  Ma, 说明高钾钙碱性系列侵入岩源岩以地壳源为主, 同时也混合有幔源物质。在 Pearce et al. (1984) 图解中(图 13), 焦冲地区两个系列侵入岩均落于火山弧花岗岩范围内, 表明它们具有火山弧岩浆岩的地球化学属性, 但并不代表它们中生代就是形成于岛弧环境, 而是反映了岩浆源区和岩浆演化过程的特征, 这可能是与新元古代华南板块俯冲于扬子板块之下形成富集地幔有

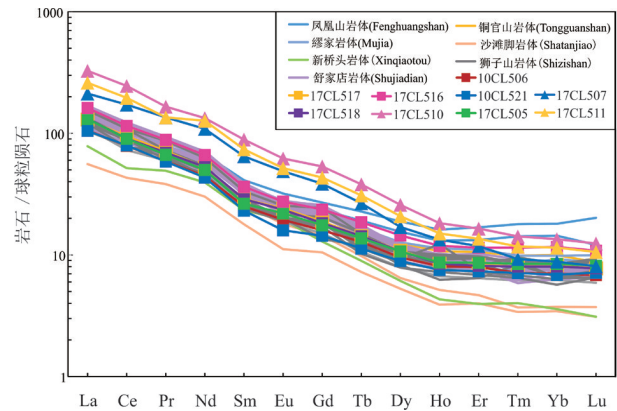


图 12 稀土元素球粒陨石标准化图(标准化值据 Taylor and McLennan, 1985)(图例同图 11)

Fig. 12 Chondrite-normalized REE patterns of the intrusive rocks (normalizing values after Taylor and McLennan, 1985). Symbols as for Fig. 11

关(Wu et al., 2014, 2017)。因为, 太平洋板块俯冲带离铜陵地区差不多 1000 km, 不可能在铜陵地区形成岛弧。有人提出洋脊俯冲模型来解释铜陵地区中酸性侵入岩的特征(Ling et al., 2009, 2011; Liu et al., 2010; Sun et al., 2010), 但与岩石的 Sr、Nd 同位素( $I_{\text{Sr}}=0.7068\sim 0.7100$ ,  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)=-8.2\sim -16.2$ )和锆石 Hf 同位素( $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)=-40.0\sim -2.4$ )特征不吻合, 洋脊俯冲熔融形成的岩石具有  $I_{\text{Sr}}<0.706$ ,  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)>0$  和锆石 Hf 同位素( $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)>0$ )的特征(Wu et al., 2014, 2017)。因此, 笔者认为, 铜陵地区受太平洋板块俯冲的远程效应影响, 加上附近北东向郟庐断裂的走滑活动, 导致铜陵地区深部岩石圈的拆沉作用, 引发富集的岩石圈地幔部分熔融形成富碱的基性岩浆, 这些岩浆在下地壳莫霍面附近聚集形成深位岩浆房, 并发生分离结晶作用, 形成堆积岩; 同时, 巨大的深位岩浆房本身产生的热和岩浆结晶潜热使得上部地壳低熔点的组分发生部分熔融形成长英质的浅位岩浆房。随着区域上深大断裂切割地壳由浅变深, 深位岩浆房中分异的岩浆一部分上升到浅位岩浆房, 发生岩浆混合, 形成高钾钙碱性系列石英二长闪长岩和花岗闪长质岩浆, 岩体中出现大量的暗色微粒闪长质包体; 另一部分深位岩浆房分异的岩浆直接上升到地壳浅部盖层岩石中, 形成橄榄安粗岩系列辉石二长闪长岩(Wu et al., 2014, 2017)。焦冲地区高钾钙碱性系列侵入岩浆活动时间与区域上同类岩浆活动时间相同, 但橄榄安粗岩

表4 铜陵地区侵入岩锆石U-Pb年龄统计  
Table 4 Statistics of zircon U-Pb ages of intrusive rocks from Tonling

岩石系列	岩体名称	岩石类型	锆石U-Pb年龄/Ma	定年方法	资料来源
橄榄安粗岩系列	曹山	二长闪长岩	142.9±1.1	SHRIMP	王彦斌等,2004
	白芒山	辉石二长闪长岩	138.2±0.6	SHRIMP-RG	吴才来等,2008
	舒家店	辉石二长闪长岩	142.4±0.7	SHRIMP-RG	吴才来等,2010
	焦冲	辉石二长闪长岩	136.2±2.5	LA-ICPMS	本文
	焦冲	辉石二长闪长岩	135.9±1.9	LA-ICPMS	本文
高钾钙碱性系列	湖城洞	辉长闪长岩	142.7±0.6	SHRIMP-RG	吴才来等,2010
			137.5±1.1	LA-ICPMS	徐夕生等,2004
			139±3	SHRIMP	王彦斌等,2004
	铜官山	石英二长闪长岩	139.5±2.9	SHRIMP	杜杨松等,2004
			142.8±1.8	SHRIMP	狄永军等,2005
			130±3	SHRIMP	狄永军等,2005
			141.7±1.4	SHRIMP-RG	吴才来等,2010
	天鹅抱蛋山	石英二长闪长岩	141.3±1.3	SHRIMP-RG	吴才来等,2010
	鸡冠山	石英二长闪长岩	139.8±0.8	SHRIMP-RG	吴才来等,2008
	鸡冠石	石英二长闪长岩	136±4	SHRIMP	楼亚儿等,2006
	大团山	石英二长闪长岩	139.8±1.0	SHRIMP-RG	吴才来等,2008
	矾头	石英二长闪长岩	140.4±2.2	SHRIMP	王彦斌等,2004
	焦冲	石英二长闪长岩	142.5±2.2	LA-ICPMS	本文
	焦冲	石英二长闪长岩	142.4±2.3	LA-ICPMS	本文
	焦冲荷花形	石英二长闪长岩	142.0±1.7	LA-ICPMS	本文
		142.8±1.6	SHRIMP-RG	吴才来等,2013	
繆家	石英二长闪长岩	143.2±1.3	LA-ICPMS	吴才来等,2013	
		137±3	LA-ICPMS	谢建成等,2008	
南洪冲	花岗闪长岩	138.8±1.3	SHRIMP-RG	吴才来等,2013	
		141±2	LA-ICPMS	杨小男等,2007	
胡村	花岗闪长岩	141±1	SHRIMP-RG	吴才来等,2008	
凤凰山	花岗闪长岩	142.4±1.0	SHRIMP-RG	吴才来等,2010	
		144.2±2.3	SHRIMP	张达等,2006	
		151.8±2.6	SHRIMP	狄永军等,2005	
沙滩脚	花岗闪长岩	144.1±1.2	SHRIMP-RG	吴才来等,2013	
		144.1±1.5	LA-ICPMS	吴才来等,2013	
焦冲荷花形	花岗闪长岩	142.8±1.0	LA-ICPMS	本文	
新桥头	花岗闪长斑岩	147.2±1.5	SHRIMP-RG	吴才来等,2013	
瑶山	花岗闪长斑岩	146.0±0.9	SHRIMP-RG	吴才来等,2010	
桥头杨	花岗闪长斑岩	146.5±3.8	LA-ICPMS	吴才来等,2013	

系列岩浆晚于区域上同类岩浆活动。

## 7 结 论

(1) LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年结果表明,焦冲地区高钾钙碱性系列侵入岩年龄约为 142 Ma; 橄榄安粗岩系列侵入岩年龄约为 136 Ma。与区域上侵入岩相比,焦冲地区高钾钙碱性系列侵入岩的年龄与整个铜陵地区同类岩石的年龄相似,而橄榄安粗岩系列侵入岩比铜陵地区同类岩石年龄年轻,可能

是该系列岩浆活动最晚期的产物,由此也说明铜陵地区两个系列侵入岩具有多期次侵位的特点。

(2) 根据锆石 CL 图像分析及定年结果,焦冲地区高钾钙碱性系列侵入岩体含有较多的老的继承性锆石核,说明其源岩含有古老的地壳物质。根据岩石地球化学特征,该系列侵入岩具有岛弧 I 型花岗岩类地球化学属性。同时,该系列岩石中含有大量的暗色闪长质微粒包体,反映了岩浆的混合成因;而橄榄安粗岩系列侵入岩体并未发现继承性锆

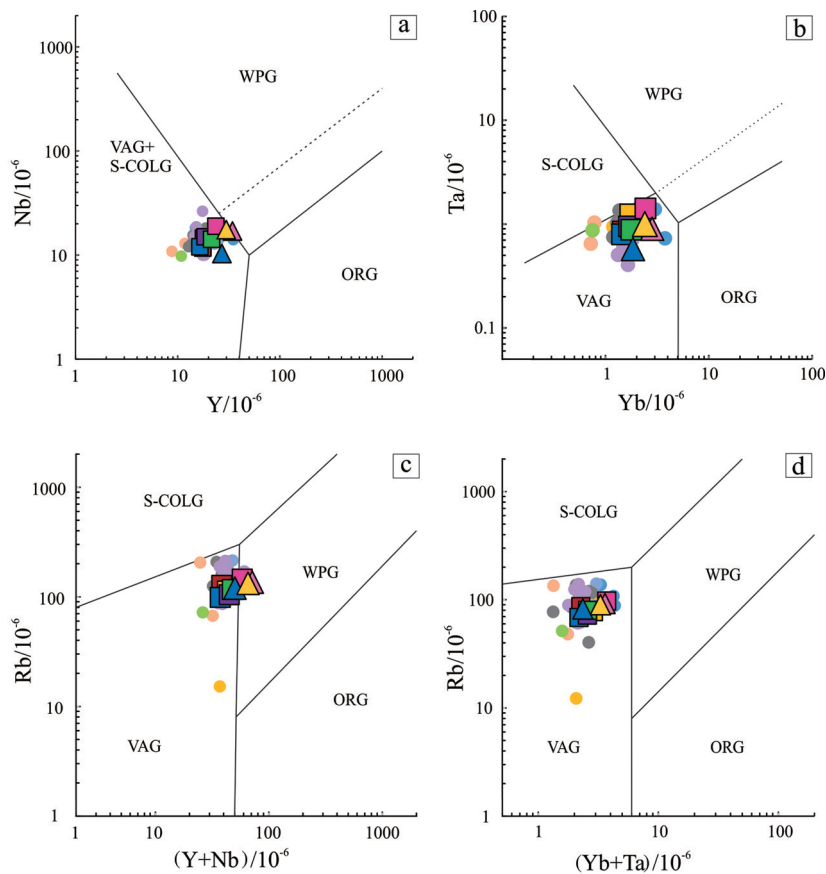


图 13 Y-Nb (a)、Yb-Ta (b)、Rb - (Y+Nb)(c)和 Rb - (Yb+Ta) (d) 图解 (据 Pearce et al., 1984)  
(VAG+S-COLG—火山弧和同碰撞花岗岩; WPG—板内花岗岩; ORG—洋中脊花岗岩; 图例如图 8)

Fig. 13 Diagrams of Y versus Nb (a), Ta versus Yb (b), Rb versus (Y+Nb) (c), Rb versus (Yb+Ta) (d) (after Pearce et al., 1984)  
(VAG+S-COLG—Volcanic arc and syn-collision granites; WPG—Within plate granites; ORG—Oceanic ridge granites. Symbols as for Fig. 8)

石,但含有大量的辉石堆积岩包体,说明其原始岩浆可能来自富集上地幔,并发生强烈的岩浆分离结晶作用。

## References

- Anderson T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report  $^{204}\text{Pb}$  [J]. *Chemical Geology*, 192(1/2): 59-79.
- Castillo P R. 2006. An overview of adakite petrogenesis [J]. *Chinese Science Bulletin*, 51: 257-268.
- Castillo P R. 2012. Adakite petrogenesis [J]. *Lithos*, 134: 304-316.
- Chang Yinfu, Liu Xiangpei, Wu Yanchang. 1991. The Copper-Iron Belt of the Middle and Lower Reaches of the Changjiang River [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1-379 (in Chinese with English abstract).
- Chang Yinfu, Liu Xuegui. 1983. Stratabound skarn type deposits—a case study of Lower Yangtzi depression within Anhui Province [J]. *Mineral Deposits*, 2(1): 11-20 (in Chinese with English abstract).
- Chang Yinfu, Pei Rongfu, Hou Zengqian, Yang Zhusen. 2017. Geochemical dataset of the Shizishan magmatic fluid system in the Tongling ore concentration area, Anhui Province [J]. *Geology in China*, 44(S1): 49-55 (in Chinese with English abstract).
- Deng Jun, Wang Qingfei, Xiao Changhao, Yang Liqiang, Liu Huan, Gong Qing, Zhang Jing. 2011. Tectonic-magmatic-metallogenic system, Tongling ore cluster region, Anhui Province, China [J]. *International Geology Review*, 53(5/6): 449-476.
- DePaolo D J, Daley E E. 2000. Neodymium isotopes in basalts of the southwest basin and range and lithospheric thinning during continental extension [J]. *Chemical Geology*, 169: 157-185.
- Di Yongjun, Wu Ganguo, Zhang Da, Song Biao, Zang Wenshuan, Zhang Zhongyi, Li Jinwen. 2005. Zircon SHRIMP U-Pb Geochronology of Xiaotongguanshan and Shatanjiao intrusive rocks from Tongling and their petrological significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 79(6): 804-812 (in Chinese with English abstract).
- Du Yangsong, Qin Xinlong, Lee Huanju. 2004. Mesozoic mantle-derived magma underplating in Tongling, Anhui Province: Evidence from megacrysts and xenoliths [J]. *Acta Petrol. Mineral.*, 23(2): 109-116 (in Chinese with English abstract).

- Du Yangsong, Li Shunting, Cao Yi, Qin Xinlong, Lou Yaer. 2007. UAFC-related origin of the Late Jurassic to Early Cretaceous intrusions in the Tongguanshan ore field, Tongling, Anhui Province, east China [J]. *Geoscience*, 21(1): 71–77 (in Chinese with English abstract).
- Frost B R, Frost C D. 2008. A geochemical classification for feldspathic igneous rocks [J]. *Journal of Petrology*, 49(11): 1955–1969.
- Frost B R, Barnes C G, Collins W J, Arculus R J, Ellis D J, Frost C D. 2001. A geochemical classification for granitic rocks [J]. *Journal of Petrology*, 42(11): 2033–2048.
- Hanchar J M, Miller C F. 1993. Zircon zonation patterns as revealed by cathodoluminescence and backscattered electron images: Implications for interpretation of complex crustal histories [J]. *Chemical Geology*, 110: 1–13.
- Hou Kejun, Li Yanhe, Zou Tianren. 2007. Laser ablation–MC–ICPMS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications [J]. *Acta Petrol. Sinica*, 23(10): 2595–2604 (in Chinese with English abstract).
- Huang Wenming, Wu Cailai, Gao Dong, Wu Di, Liu Chuanyun, Zeng Quan. 2019. Petrogenesis and tectonic implications of the intermediate–acid plutons in Shatanjiao ore–field, Tongling, Anhui [J]. *Geology in China*, 46(4): 861–877 (in Chinese with English abstract).
- Irvine T N, Baragar W R A. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8: 523–548.
- Lai Xiaodong, Yang Xiaoyong, Sun Weidong, Cao Xiaosheng. 2012. Chronological–geochemical characteristics of the Shujiadian intrusion, Tongling ore cluster field: Its significance to metallogenesis [J]. *Acta Geologica Sinica*, 86(3): 470–485 (in Chinese with English abstract).
- Li Jianwei, Zhao Xinfu, Zhou Meifu, Ma Changqian, Souza Z S, Vasconcelos P. 2009. Late Mesozoic magmatism from the Daye region, eastern China: U–Pb ages, petrogenesis, and geodynamic implications [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 157: 383–409.
- Ling Mingxing, Wang Fangyue, Ding Xing, Zhou Jibin, Zartman R E, Yang Xiaoyong, Sun Weidong. 2009. Cretaceous ridge subduction along the lower Yangtze River belt, eastern China [J]. *Economic Geology*, 104(2): 303–321.
- Ling Mingxing, Wang Fangyue, Ding Xing, Zhou Jibin, Sun Weidong. 2011. Different origins of adakites from the Dabie Mountains and the Lower Yangtze River Belt, eastern China: Geochemical constraints [J]. *International Geology Review*, 53(5/6), 727–740.
- Liu Yongsheng, Gao Shan, Hu Zhaochu, Gao Changgui, Zong keqing, Wang, Dongbing. 2010. Continental and oceanic crust recycling–induced Melt–Peridotite Interactions in the Trans–North China Orogen: U–Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths [J]. *Journal of Petrology*, 51(1/2): 537–571.
- Lou Yaer, Du Yangsong. 2006. Characteristics and zircon SHRIMP U–Pb ages of the Mesozoic intrusive rocks in Fanchang, Anhui Province [J]. *Geochimica*, 35(4): 359–366 (in Chinese with English abstract).
- Lu Shunfu, Zeng Jiannian, Li Jinwei, Wu Yafei, Li Xiaofen, Huang Zhiwei. 2014. Geochronology and geochemistry of the Hucun granodiorite in the Shizishan area, Tongling [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 33(3): 355–365 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2003. User’s manual for Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel [M]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 4: 1–70.
- Lü Qingtian, Meng Guixiang, Yan Jiayong, Zhang Kun, Zhao Jinhua, Gong Xuejing. 2019. Multi–scale exploration of mineral system: Concept and progress–A case study in the middle and lower reaches of the Yangtze River Metallogenic Belt [J]. *Geology in China*, 46(4): 673–689 (in Chinese with English abstract).
- Maniar P D, Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 101: 635–643.
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in magma/igneous rock system [J]. *Earth–Science Reviews*, 37: 215–224.
- Müller D, Groves D. 1993. Direct and indirect associations between potassic igneous rocks, shoshonites and gold–copper deposits [J]. *Ore Geology Reviews*, 8(5): 383–406.
- Ormerod D S, Hawkesworth C J, Rogers N W, Leeman W P, Menzies M A. 1988. Tectonic and magmatic transitions in the Western Great Basin, USA. *Nature*, 333 (26): 349–353.
- Pearce J A, Harris N B M, Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks [J]. *Journal of Petrology*, 25: 956–983.
- Peccerillo A, Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc–alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey [J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 58: 63–81.
- Pidgeon R T, Nemchin A A, Hitchen G J. 1998. Internal structures of zircons from Archean granites from the Darling Range batholith: Implications for zircon stability and the interpretation of zircon U–Pb ages [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 132: 288–299.
- Que Chaoyang, Wu Ganguo, Zhang Da, Zhang Zhihui, Di Yongjun, Fang Hongwei, Yuan Qin. 2013. LA–ICP–MS zircon U–Pb dating of dioritic prophyrite in Jiaochong Au–S deposit, Tongling area, and its geological significance [J]. *Mineral Deposits*, 32(6): 1221–1235 (in Chinese with English abstract).
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [C]//Saunders A D, Norry M J (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society of London Special Publication,

- 42: 313–345.
- Sun Weidong, Ling Mingxing, Yang Xiaoyong, Fan Weiming, Ding Xing, Liang Huaying. 2010. Ridge subduction and porphyry copper–gold mineralization: An overview [J]. *Science China Earth Sciences*, 53(4): 475–484.
- Taylor S R, McClennan S. 1985. *The Continental Crust: Composition and Evolution* [M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 54: 209–230.
- Vavra G, Schmid R, Gebauer D. 1999. Internal morphology, habit and U–Th–Pb microanalysis of amphibolite–to–granulite facies zircons: geochronology of the Ivrea Zone (South Alps) [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 134: 380–404.
- Wang Qiang, Xu Jifeng, Zhao Zhenhua, Xiong Xiaolin, Bao Zhiwei. 2003. The genesis of the yanshan intrusive rocks in Tongling area, Anhui, and its restriction on the deep dynamic process[J]. *Science in China (Series D)*, 33(4): 323–334 (in Chinese).
- Wang Yanbin, Liu Dunyi, Zeng Pusheng, Yang Zhusen, Tian Shihong. 2004a. SHRIMP U–Pb geochronology of gabbro–diorite in the Chaoshan gold deposit and its geological significance [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 25(4):423–427 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yanbin, Liu Dunyi, Zeng Pusheng, Yang Zhusen, Meng Yifeng, Tian Shihong. 2004b. SHRIMP U–Pb geochronology of Xiaotongguanshan quartz–dioritic intrusions in Tongling district and its petrogenetic implications [J]. *Acta Petrol. Mineral.*, 23(4): 298–304 (in Chinese with English abstract).
- Wu Cailai, Chen Songyong, Shi Rendeng, Hao Meiyong. 2003. Origin and features of the Mesozoic intermediate–acid intrusive in Tongling area, Anhui, China [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 24 (1): 41–48 (in Chinese with English abstract).
- Wu Cailai, Dong Shuwen, Guo Heping, Guo Xiangyan, Gao Qianming, Liu Lianggen, Chen Qilong, Le Min, Wooden J L, Mazadab F K, Mattinson C. 2008. Zircon SHRIMP U–Pb dating of intrusive rocks and hypomagmatic process from Shizishan, Tongling[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(8): 1801–1812 (in Chinese with English abstract).
- Wu Cailai, Gao Qianming, Guo Heping, Guo Xiangyan, Liu Lianggen, Gao Yuehong, Lei Min, Qin Haipeng. 2010. Petrogenesis of the intermediate–acid intrusive rocks and zircon SHRIMP dating in Tongling, Anhui, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(9): 2630–2652 (in Chinese with English abstract).
- Wu Cailai, Guo Xiangyan, Wang Cisong, Wu Xiuping, Gao Yuanhong, Lei Min, Qin Haipeng, Liu Chunhua, Li Mingze, Chen Qilong. 2013. Zircon U–Pb dating of high–K calc–alkaline intrusive rocks from Tongling: Implication for the tectonic setting [J]. *Geochimica*, 42(1): 11–28 (in Chinese with English abstract).
- Wu Cailai, Dong Shuwen, Paul T, Robinson B, Ronald Frost, Gao Yuanhong, Lei Min, Chen Qilong, Qin Haipeng. 2014. Petrogenesis of high–K, calc–alkaline and shoshonitic intrusive rocks in Tongling area, Anhui Province (eastern China), and their tectonic implications [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 126 (1–2): 78–102.
- Wu Cailai, Chen Songyong, Hao Meiyong, Shi Rendeng. 2001. The origin and features of the two intermediate–acid intrusive series in Tongling area, Anhui, China [J]. *Continental Dynamics*, 6(1): 1–12.
- Wu Cailai, Dong Shuwen, Wu Di, Zhang Xin, Ernst W G. 2017. Late Mesozoic high–K calc–alkaline magmatism in SE China: The Tongling Example [J]. *International Geology Review*. <http://dx.doi.org/10.1080/00206814.2017.1313137>.
- Xu Xiaochun, Chen Sanming, Xie Qiaolin, Bai Lin, Chu Guozheng. 2008. SHRIMP Zircon U–Pb dating for the magmatic rocks in Shizishan ore–field of Tongling, Anhui Province, and its geological implications [J]. *Acta Geologica Sinica*, 62(4): 500–509 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xisheng, Fan Qincheng, O’Reilly S Y, Jiang Shaoyong, Griffin W L, Wang Rucheng, Qiu Jiansheng. 2004. Zircon U–Pb dating of the quartz diorite and its enclaves in Tongguanshan, Anhui province: Discussion on the petrologic genesis [J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(18): 1883–1891 (in Chinese with English abstract).
- Xie Jiancheng, Yang Xiaoyong, Du Jianguo, Sun Weidong. 2008. Zircon U–Pb geochronology of the Mesozoic intrusive rocks in the Tongling region: Implications for copper–gold mineralization [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(8): 1782–1800 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Honglin, Wu Fuyuan, Gao Shan, Liu Xiaoming, Xu Ping, Sun Deyou. 2003. LA–ICP–MS Zircon U–Pb age and REE of Cenozoic pluton in NE China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 48 (14): 1511–1520 (in Chinese).
- Yao Xiaode, Du Jianguo, Xu Wei, Chen Fang, Tan Dexing. 2012. Regional metallogenic model in Tongling ore cluster area, Anhui Province [J]. *Journal of Hefei University of Technology(Natural Science)*, 35(7): 965–976 (in Chinese with English abstract).
- Yang Xiaonan, Xu Zhaowen, Xu Xisheng, Ling Hongfei, Liu Suming, Zhang Jun, Li Haiyong. 2008. Zircon U–Pb geochronology and its implication for the temperature of Yanshanian magma in Tongling, Anhui Province [J]. *Acta Geologica Sinica*, 62(4): 510–516 (in Chinese with English abstract).
- Qu Hongying, Chang Guoxiong, Pei Rongfu, Wang Haolin, Mei Yanxiong, Wang Yonglei. 2011. Geological and geochemical characteristics of the Shizishan orefield in Anhui Province[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 30(4): 430–439 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Wang Yan, Qian Qing. 2001. The characteristics and tectonic–metallogenic significances of the adakites in Yanshan period from eastern China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17(2): 236–244 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Da, Wu Ganguo, Di Yongjun, Zang Wenshan, Shao Yongjun, Yu Xinqi, Zhang Xiangxin, Wang Qunfeng. 2006. Emplacement

- dynamics of Fenghuangshan pluton (Tongling, Anhui Province): Constraints from U-Pb SHRIMP dating of zircons and structural deformation [J]. *Earth Science*, 31(6): 823-829 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Taixi, Li XueMing, Zhao Junshen, Zhang Futao. 1987. Geochronology of igneous rocks from Tongguanshan ore area of Anhui Province [J]. *Journal of China University of Science and Technology*, 17:403-407 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 常印佛, 刘湘培, 吴言昌. 1991. 长江中下游铁铜成矿带[J]. 北京: 地质出版社, 1-379.
- 常印佛, 刘学圭. 1983. 铜陵地区层控矽卡岩矿床研究[J]. *矿床地质*, 2(1): 11-20.
- 常印佛, 裴荣富, 侯增谦, 杨竹森. 2017. 安徽省铜陵矿集区狮子山岩浆流体系统地球化学测试数据集[J]. *中国地质*, 44(S1): 49-55.
- 杜杨松, 秦新龙, 李铨具. 2004. 安徽铜陵地区中生代幔源岩浆底侵作用——来自矿物巨晶和岩石包体的证据[J]. *岩石矿物学杂志*, 23(2): 109-116.
- 杜杨松, 李顺庭, 曹毅, 秦新龙, 楼亚儿. 2007. 安徽铜陵铜官山矿田中生代侵入岩的形成过程——岩浆底侵、同化混染和分离结晶[J]. *现代地质*, 21(1): 71-77.
- 狄永军, 吴淦国, 张达, 宋彪, 藏文栓, 张忠义, 李进文. 2005. 铜陵地区小铜官山和沙滩脚岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究及其岩石学意义[J]. *地质学报*, 79(6): 804-812.
- 侯可军, 李延河, 邹天人. 2007. LA-MS-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用[J]. *岩石学报*, 23(10): 2595-2604.
- 黄文明, 吴才来, 高栋, 吴迪, 刘川云, 曾全. 2019. 安徽铜陵沙滩脚矿田中酸性侵入岩成因及构造意义[J]. *中国地质*, 46(4): 861-877.
- 赖小东, 杨晓勇, 孙卫东, 曹晓生. 2012. 铜陵舒家店岩体年代学、岩石地球化学特征及成矿意义[J]. *地质学报*, 86(3): 471-485.
- 楼亚儿, 杜杨松. 2006. 安徽繁昌中生代侵入岩的特征和锆石 SHRIMP 测年[J]. *地球化学*, 35(4): 333-345.
- 陆顺富, 曾建年, 李锦伟, 吴亚飞, 李小芬, 黄志伟. 2014. 铜陵狮子山地区胡村岩体年代学及地球化学特征[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 33(3): 355-365.
- 吕庆田, 孟贵祥, 严加永, 张昆, 赵金花, 龚雪婧. 2019. 成矿系统的多尺度探测: 概念与进展——以长江中下游成矿带为例[J]. *中国地质*, 46(4): 673-689.
- 阚朝阳, 吴淦国, 张达, 张志辉, 狄永军, 方红薇, 袁琴. 2013. 铜陵地区焦冲金硫矿床闪长玢岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *矿床地质*, 32(6): 1221-1235.
- 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岩的成因及其对深部动力学过程的制约[J]. *中国科学(D 辑)*, 33(4): 323-334.
- 王彦斌, 刘郭一, 曾普胜, 杨竹森, 蒙义峰, 田世洪. 2004a. 安徽铜陵地区幔源岩浆底侵作用的年代——朝山辉石闪长岩锆石 SHRIMP 定年[J]. *地球学报*, 25(4): 423-427.
- 王彦斌, 刘郭一, 曾普胜, 杨竹森, 蒙义峰, 田世洪. 2004b. 铜陵地区小铜官山石英闪长岩锆石 SHRIMP 的 U-Pb 年龄及其成因知识[J]. *岩石矿物学杂志*, 23(4): 298-304.
- 吴才来, 陈松永, 史仁灯, 等. 2003. 铜陵中生代中酸性侵入岩特征及成因[J]. *地球学报*, 24(1): 41-48.
- 吴才来, 董树文, 国和平, 郭祥炎, 高前明, 刘良根, 陈其龙, 雷敏, Wooden J L, Mazadab F K, Mattinson C. 2008. 铜陵狮子山地区中酸性侵入岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及岩浆作用的深部过程[J]. *岩石学报*, 24(8): 1801-1812.
- 吴才来, 高前明, 国和平, 郭祥炎, 刘良根, 郜源红, 雷敏, 秦海鹏. 2010. 铜陵中酸性侵入岩成因及锆石 SHRIMP 定年[J]. *岩石学报*, 26(9): 2630-2652.
- 吴才来, 郭祥炎, 王次松, 武秀平, 郜源红, 雷敏, 秦海鹏, 刘春花, 李名则, 陈其龙. 2013. 铜陵地区高钾钙碱性系列侵入岩锆石 U-Pb 年代学及其地质意义[J]. *地球化学*, 42(1): 11-28.
- 徐晓春, 陈三明, 谢巧勤, 柏林, 褚国正. 2008. 安徽铜陵狮子山矿田岩浆岩锆石 SHRIMP 定年及其成因意义[J]. *地质学报*, 8(4): 500-509.
- 徐夕生, 范钦成, O'Reilly S Y, 蒋少涌, Griffin W L, 王汝成, 邱检生. 2004. 安徽铜官山石英闪长岩及其包体锆石 U-Pb 定年与成因探讨[J]. *科学通报*, 49(18): 1883-1891.
- 谢建成, 杨晓勇, 杜建国, 孙卫东. 2008. 安徽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[J]. *岩石学报*, 24(8): 1782-1800.
- 袁洪林, 吴福元, 高山, 柳小明, 徐平, 孙德友. 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[J]. *科学通报*, 48(14): 1511-1520.
- 姚孝德, 杜建国, 徐卫, 陈芳, 谭德兴. 2012. 安徽省铜陵矿集区区域成矿模式[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 35(7): 965-976.
- 杨小男, 徐兆文, 徐夕生, 凌洪飞, 刘苏明, 张军, 李海勇. 2008. 安徽铜陵狮子山矿田岩浆岩锆石 U-Pb 年龄意义[J]. *地质学报*, 82(4): 510-516.
- 瞿泓滢, 常国雄, 裴荣富, 王浩琳, 梅燕雄, 王永磊. 2011. 安徽铜陵狮子山矿田岩石的地球化学特征[J]. *岩矿测试*, 30(4): 430-439.
- 张旗, 王焰, 钱青. 2001. 中国东部燕山期埃达克岩的特征及其构造-成矿意义[J]. *岩石学报*, 17(2): 236-244.
- 张达, 吴淦国, 狄永军, 藏文栓, 邵拥军, 余心起, 张祥信, 王群峰. 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[J]. *地球科学*, 31(6): 823-829.
- 周泰禧, 李学明, 赵俊深, 张富陶. 1987. 安徽铜陵铜官山矿田火成岩的同位素地质年龄[J]. *中国科学技术大学学报*, 17(3): 403-407.