

安徽铜陵矿集区南部新生代岩浆活动

——来自科学深钻 TK01 的证据

李 骏^{1,2}, 杨竹森², 徐文艺², 杨 丹²

(1. 中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037)

摘 要: 本文主要是对铜陵矿集区南部丁桥科学深钻中的碱性辉长岩进行了 LA-MC-ICPMS 锆石 U-Pb 定年, 年龄为 63.54 ± 0.53 Ma, 表明碱性辉长岩是新生代岩浆侵入活动的产物。全岩主、微量研究结果表明 TK01 中的碱性辉长岩富钾(K_2O 平均为 1.75%)、富碱($K_2O + Na_2O$ 平均为 3.90%)、富钛(TiO_2 平均为 1.58%), 富集大离子不相容元素和轻稀土元素, 亏损重稀土元素, 属于过铝质岩石。 $SiO_2 - K_2O$ 图解中, 样品点落在含钾较高的钾玄岩和钙碱性区域中, 岩浆演化过程中有矿物的分离结晶作用。碱性辉长岩的锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值介于 $-4.7 \sim -11.5$ 。推测 TK01 中的碱性辉长岩主要来源于富集地幔, 稍有陆壳物质的混染, 岩浆形成于大陆板内拉张的构造背景。

关键词: 科学深钻; U-Pb 定年; 新生代; 铜陵矿集区

中图分类号: P597⁺.3; P588.12⁺4

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2017)02-0175-12

The evidence of Cenozoic magmatic activity from science deep drilling TK01 in the southern part of the Tongling ore concentration area, Anhui Province

LI Jun^{1,2}, YANG Zhu-sen², XU Wen-yi² and YANG Dan²

(1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: LA-MC-ICP MS zircon U-Pb dating yielded the age of 63.54 ± 0.53 Ma for alkali gabbro from science deep drilling TK01 in Dingqiao, southern Tongling ore district. The age of alkali gabbro indicates intrusive magma activity in Cenozoic period. Major and trace elements suggest these igneous rocks in TK01 are characterized by high content of potassium (K_2O 1.75% on average), rich alkali ($K_2O + Na_2O$ 3.90% on average), titanium (TiO_2 1.58% on average) and LREEs, thus belonging to peraluminous series. In addition, samples fall in shoshonite and calcium alkaline area in $SiO_2 - K_2O$ diagram. Mineral fractional crystallization occurred during the evolution of magma. $\epsilon_{Hf}(t)$ values of alkali gabbro are $-4.7 \sim -11.5$. It is inferred that alkali gabbros in TK01 were derived from enriched mantle with less contamination by continental material, and that the magma formed in the tectonic setting of continental intraplate extension.

Key words: science deep drilling; LA-MC-ICP MS zircon U-Pb; Cenozoic; southern Tongling ore district

Fund support: Public Welfare Research Project of the Ministry of Land and Resources of China (201311165-3)

收稿日期: 2016-07-12; 接受日期: 2017-02-08

基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项项目(201311165-3)

作者简介: 李 骏(1990-), 男, 硕士研究生, 矿物、岩石、矿床学专业, E-mail: alanjunlee@126.com; 通讯作者: 杨竹森(1964-), 男, 博士, 研究员, 主要从事矿床学及矿床地球化学研究工作, E-mail: yangzhusen@vip.sina.com。

铜陵矿集区是长江中下游成矿带的一个重要组成部分,以发育众多矽卡岩型铜矿床而著称,前人对其进行了大量的研究,基本查明了矿床地质特征、成岩成矿时代、成矿流体性状、成矿作用发育过程及驱动机制等,证明成矿作用与燕山期大规模的岩浆活动相关(范裕等,2008;袁峰等,2010;覃永军等,2010)。此外,许多学者对中国东部(合肥盆地、六合-江宁、江苏东海)的新生代岩浆岩进行了详细的岩石地球化学、同位素年代学、地球动力学等方面的研究(Peng *et al.*, 1986; 鄂莫岚等,1987; 陈道公等,1988; 从柏林等,1996; Zou *et al.*, 2000; 金振民等,2003; 张滨辉等,2007),取得了丰硕的成果。但是,铜陵矿集区新生代有无岩浆活动? 什么样的构造背景导致铜陵矿集区成矿之后在何时抬升? 这些问题至今尚无明确答案。

在铜陵南部丁桥镇实施的科学深钻 TK01 深度达2 160.77 m,岩心完整,岩性变化多。本文基于系统的野外工作,通过对钻孔中的岩浆岩进行锆石 U-

Pb 定年,发现了新生代岩浆活动的证据,为该地区新生代构造背景研究提供了新资料。

1 区域地质

铜陵矿集区处于一断隆区内,位于扬子克拉通北缘,大别山造山带前陆盆地中的次级隆起(图 1)。区内经历了前南华纪基底形成、南华纪-早三叠世沉积盖层发育和中三叠世-第四纪碰撞及造山后板内变形等 3 个大地构造演化阶段(Ma and He, 1989; Wang and Mo, 1995),区内发育有东西向、南北向和北北东向多组基底隐伏深大断裂和北东向、北北向、近南北向表壳断裂及一系列北东走向、相间排列的盖层短轴褶皱,控制着区内岩浆岩和矿床的分布及产状(Wang *et al.*, 2011)。从南华纪至中三叠世为盖层沉积阶段,形成了巨厚的沉积盖层,铜陵地区沉积盖层除缺失中下泥盆统和下石炭统之外,出露志留系-下三叠统的海相碎屑沉积岩、碳酸盐岩和蒸发

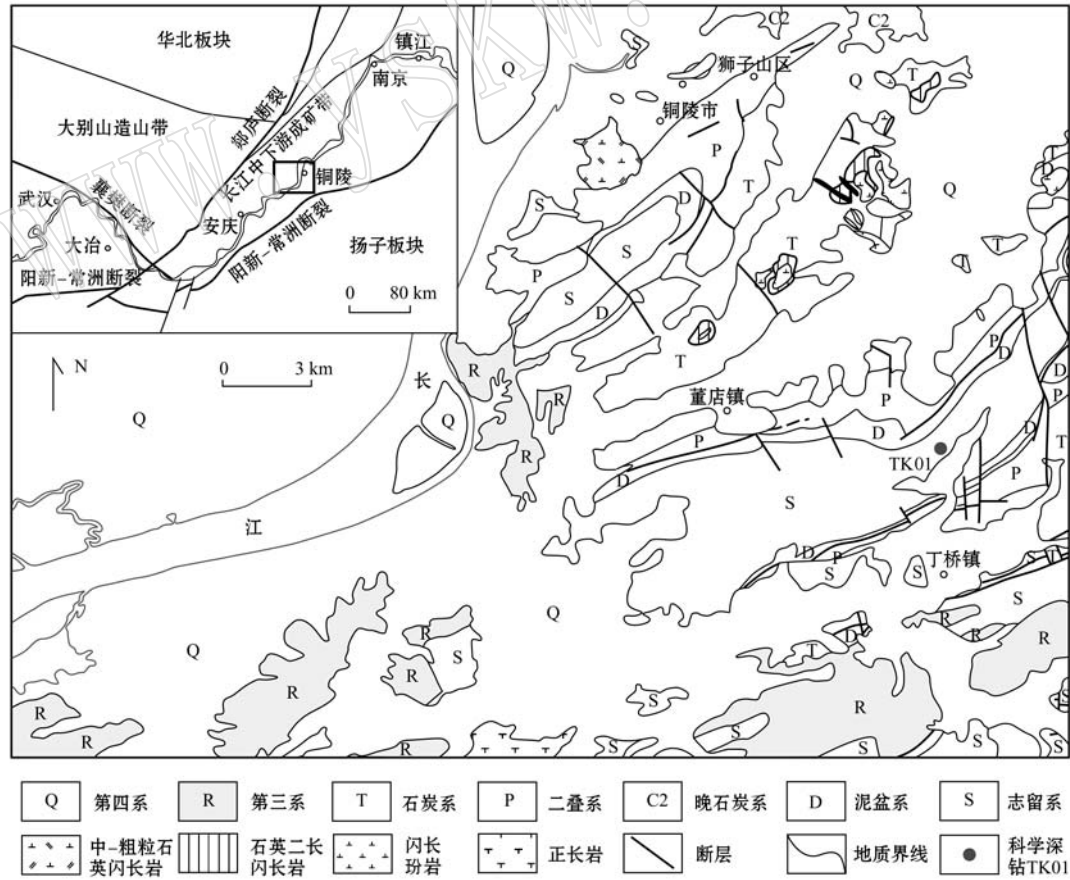


图 1 铜陵南部地质简图(据杜建国等,2005)^①

Fig. 1 Simplified geological map of southern Tongling(modified after Du Jianguo *et al.*, 2005)^①

① 杜建国, 许卫, 孙乘云, 等. 2005. 安庆市幅(H50C002003)1:25 万区域地质调查报告.

岩(谢建成等,2008)。中三叠世,扬子板块与华北板块发生碰撞,之后铜陵矿集区经历了多次抬升和沉降,造成区域内出现了很多中生代沉积-火山盆地,广泛发育燕山期侵入岩,侵入体多呈岩床、岩枝、岩墙和小岩株状产出,岩石类型主要为石英(二长)闪长岩、花岗闪长岩和辉石闪长岩,与成矿关系密切,区域内岩性以陆相和海陆交互相碎屑岩为主。进入新生代以来,铜陵矿集区的构造活动相对较弱,沿江区域出露有第三纪和第四纪沉积地层,岩性以陆相碎屑岩为主,区域内有新生代沉积盆地-宣城盆地,盆地中的中始新统双塔组角度不整合覆于上白垩统宣南组之上(陈烈祖等,1981),缺失古新统。

2 科学深钻 TK01 的岩石组合及碱性辉长岩产出部位

科学深钻 TK01 位于丁桥镇北东向 18 km 处(图 1)(E 117°54′57.6″, N 30°48′23.98″),丁桥科学深钻 TK01 开孔于下志留统高骊山组页岩、粉砂岩,深钻内热液蚀变不发育,仅在 700 m 以上个别地段有少量赤铁矿脉和石英脉穿插,并在相对较宽的石英脉旁伴有硅化和方解石化。另外,在 1 752 m 附近岩石发生退色蚀变,伴有弱的绿泥石化。岩心自上到下可分为 35 个岩性层,根据各层的岩石特征可归纳为 5 个岩性段:

① 砾石层:孔深 0~8 m,属第四系残坡积物,砾石成分主要为泥页岩。② 泥页岩段:孔深 8~448.5 m,岩性以灰黑色泥页岩为主,纹层构造发育,夹三层细砂岩,在细砂岩夹层中发育浸染状和细网脉状硅化和碳酸盐化,穿插有花岗闪长岩和辉长岩脉。③ 砂岩夹泥页岩段:孔深 448.5~1 014.5 m,岩性以灰色、深灰色细砂岩为主,夹一层视厚 40 m 的泥页岩,穿插有花岗闪长岩岩脉。④ 泥页岩段:孔深 1 014.5~2 055.6 m,岩性以深灰、灰黑色泥页岩为主,穿插有辉长岩岩脉。在 1 288.76、1 310.06、1 317.86、1 324、1 329.9 和 1 330.9 m(图 2)处采辉长岩脉样品。⑤ 砂岩段:孔深 2 055.6~2 160.77 m,岩性以灰、深灰、灰黑色粉砂岩为主,穿插有少量辉长岩岩脉。

上述沉积岩段的岩性特征与区域下志留统高家边组岩性相同,只是岩心由浅到深细砂岩增多,颜色由灰黑变为灰色,与区域高家边组正常层序相反,可能钻孔所见地层发生了倒转。

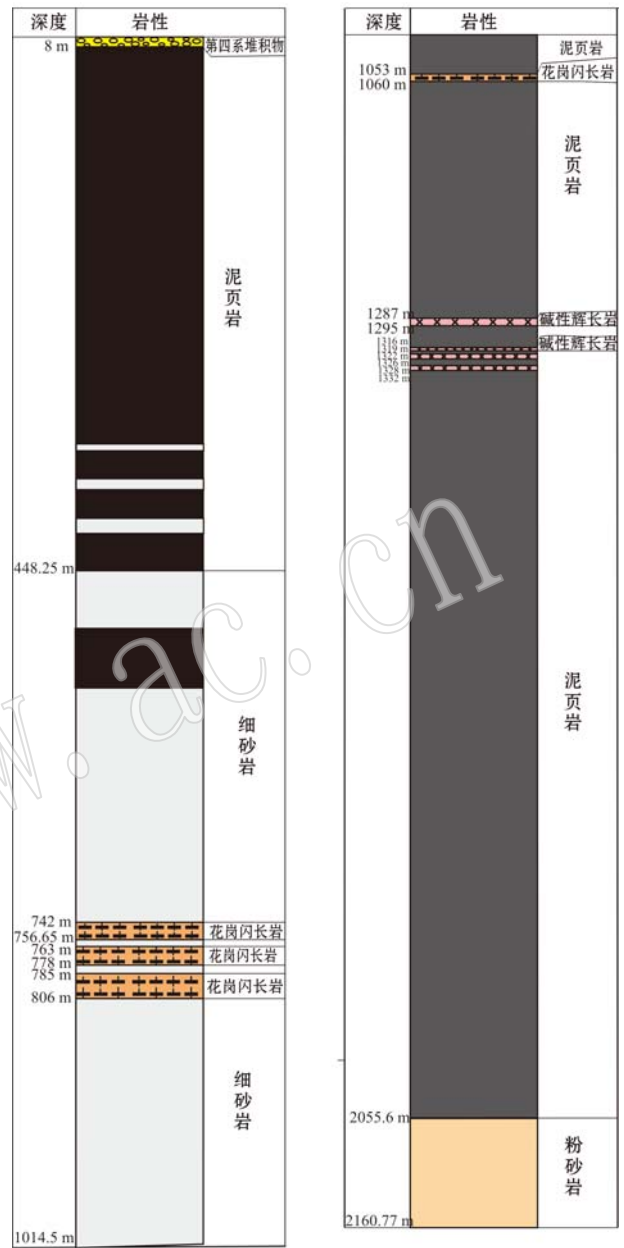


图 2 科学深钻 TK01 岩性分布柱状图

Fig. 2 Lithologic distribution histogram of science deep drilling TK01

科学深钻 TK01 中的碱性辉长岩主要发育在孔深 1 280~1 330 m 之间,所采集的碱性辉长岩样品呈深灰色,辉长结构,块状构造,由斜长石、辉石、角闪石和少量正长石、黑云母组成;斜长石含量 40%~50%,呈自形长板柱状,长度 0.2~0.3 mm,常具较宽的聚片双晶;辉石含量 30%~40%,呈自形、半自形短柱状,长度 0.1~0.2 mm,部分颗粒被角闪石交代;角闪石含量 10% 左右,呈自形长柱状,长度 0.2 mm,或细粒集合体交代辉石(图 3a);正长石含量

5%左右,呈自形厚板状,粒度 0.2 mm,具卡式双晶(图 3b);黑云母含量 5%左右,呈半自形-它形片状,直径 0.1~0.2 mm,或呈细粒集合体交代辉石和角

闪石。5 件样品中 3 件样品新鲜无蚀变,仅样品 TK01-1288.76 有较强的绿泥石化和粘土化,样品 TK01-1310.06 发育弱绿泥石化。

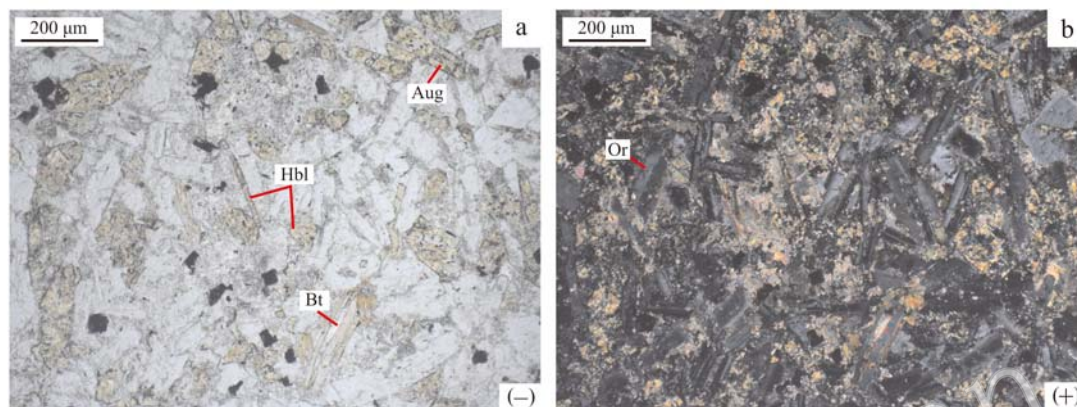


图 3 科学深钻 TK01 中的碱性辉长岩显微镜下照片

Fig. 3 Photomicrographs of alkali gabbro in science deep drilling TK01

Aug—辉石; Bt—黑云母; Hbl—角闪石; Or—正长石

Aug—augite; Bt—biotite; Hbl—hornblende; Or—orthoclase

3 测试方法

测试样品的锆石挑选工作由河北省区域地质矿产调查研究所完成。采用常规方法将 200~300 g 样品粉碎至 300 μm 左右,经淘洗、重选富集,再经磁选和密度分选后,在双目镜下进一步挑选出晶型完好、透明度和色泽度较好的锆石颗粒。进行锆石 U-Pb 定年的样品用环氧树脂粘贴于样品靶上,进行打磨和抛光,使锆石露出新鲜截面。然后对锆石靶进行阴极发光(CL)、透射光和反射光照相,据此选择并标记合适的锆石位置进行 U-Pb 定年和 Hf 同位素分析。

LA-MC-ICPMS 锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素测试分析在中国地质科学院矿产资源研究所国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室 MC-ICP-MS 实验室完成,锆石定年分析所用仪器为 Finnigan Neptune 型 MC-ICP-MS 及与之配套的 Newwave UP 213 激光剥蚀系统。激光剥蚀所用斑束直径为 25 μm ,频率为 10 Hz,能量密度约为 2.5 J/ cm^2 ,以 He-Ar 混合气体为载气。LA-MC-ICP-MS 激光剥蚀采用单点剥蚀的方式,数据分析前用锆石 GJ-1 进行调试仪器,使之达到最优状态,锆石 U-Pb 定年以锆石 GJ-1 为外标, U、Th 含量以锆石 M127(U 923 $\times 10^{-6}$, Th 439 $\times 10^{-6}$, Th/U 0.475; Nasdala *et al.*, 2008)为外标进行校正。数据处理采用 ICPMSData-

Cal 程序(Liu *et al.*, 2010),锆石年龄谱和图用 Iso-plot 3.0 程序获得。详细实验测试过程参见侯可军等(2009)。

锆石 Hf 同位素测试在 Neptune 多接收等离子质谱和 Newwave UP213 紫外激光剥蚀系统(LA-MC-ICP-MS)上进行,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 55 μm 或 40 μm ,测定时使用锆石国际标样 GJ1 和 Plesovice 作为参考物质,分析点与 U-Pb 定年分析点为同一位置。相关仪器运行条件及详细分析流程见侯可军等(2007)。分析过程中锆石标准 GJ1 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 测试加权平均值分别为 $0.282\,007 \pm 0.000\,007$ (2σ , $n=36$),与文献报道值(Morel *et al.*, 2006; 侯可军等, 2007)在误差范围内一致。

样品的主量元素、微量元素和稀土元素在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。将较为新鲜的岩石样品粉碎至 200 目以下的粉末。主量元素分析在飞利浦 PW2404X 射线荧光光谱仪上完成,采用 GB/T14506.28-93 硅酸盐岩石化学分析方法 X 射线荧光光谱法分析测定,相对误差小于 5%;包括稀土元素在内的微量元素采用 Finnigan MAT 制造的 HR-ICP-MS(Element I)仪器上完成,实验方法采用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)方法通则。实验过程中温度为 20℃,相对湿度 30%;微量元素含量大于 10×10^{-6} 时,相对误差 $< 5\%$,含量小于 10

$\times 10^{-6}$ 时, 相对误差 $<10\%$ 。

4 测试结果

4.1 LA-MC-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄

本次对科学深钻 TK01 中的碱性辉长岩样品 TK01-1330.9 中的锆石进行了 LA-MC-ICPMS U-Pb 同位素测年, 10 个测点的 U-Pb 分析结果见表 1。样品中挑选出的有限锆石多为柱状自形晶, 长度 $400 \sim 150 \mu\text{m}$, 宽约 $40 \sim 80 \mu\text{m}$, 长宽比为 $4:1 \sim 1.5:1$ 。锆石的阴极发光图像(图 4)可分为两组: 一组发育细密震荡环带, 内部有或无核幔结构, 显示岩浆锆石的特征, 5 个测点的 $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 值介于 $1.08 \sim 1.70$ 之间, 为典型岩浆锆石(大于 0.1; Belousova *et al.*, 2002); 另一组发育宽环带或条带, 并呈浑圆轮廓, 显示变质锆石特征, 但 5 个测点的 $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 值介于 $0.69 \sim 1.51$ 之间, 又具岩浆锆石特征(大于 0.1; Belousova *et al.*, 2002), 推断其为变质的岩浆锆石。5 颗岩浆锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中在 $63.29 \sim 63.95 \text{ Ma}$ 之间, 加权平均年龄为 $63.54 \pm 0.53 \text{ Ma}$ (1σ , $\text{MSWD}=0.26$), 可代表碱性辉长岩的侵位结晶年龄。在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ — $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和图上(图 5), 碱性辉长岩中的岩浆锆石测点均投影在谐和线附近, 谐和度在 95% 以上, 表明锆石未受后期热变质作用影响, U-Pb 同位素体系封闭好, 所测结果可靠。另 5 颗变质岩浆锆石的 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄在 $2347.36 \sim 2452.10 \text{ Ma}$, 表明其为碱性辉长岩浆上侵过程中捕获的变质基底中的岩浆锆石。

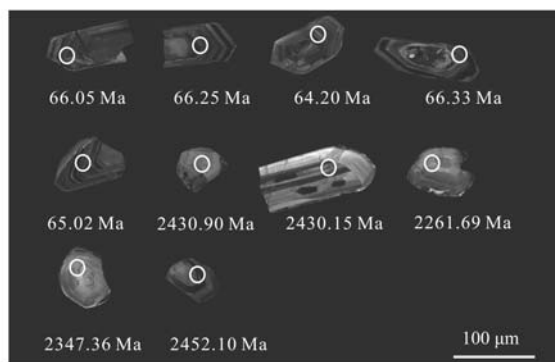


图 4 科学深钻 TK01 中的碱性辉长岩(TK01-1330.9) 锆石阴极发光照片(白圈表示 U-Pb 测年分析位置)

Fig. 4 Representative cathodoluminescence images of zircons from alkali gabbro (TK01-1330.9) in science deep drilling TK01 (the white loops represent the analytical position of U-Pb dating)

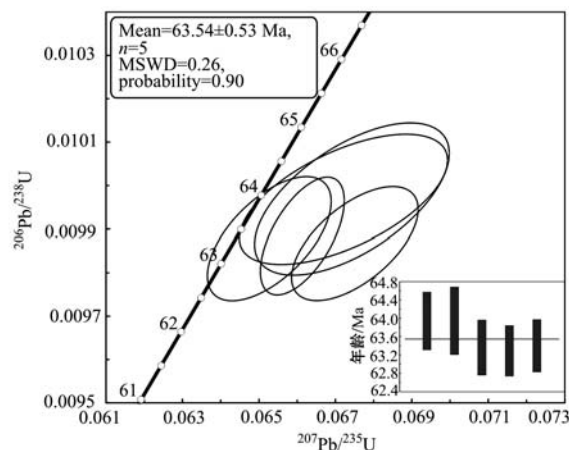
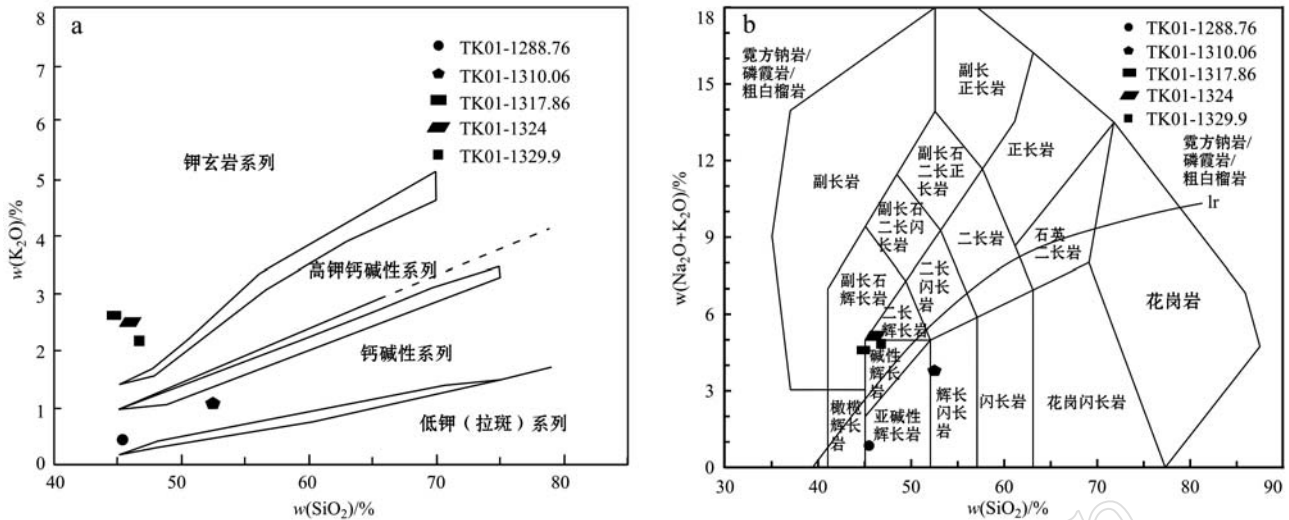


图 5 科学深钻 TK01 中碱性辉长岩(TK01-1330.9) 锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 5 Zircon U-Pb concordia diagram of alkali gabbro (TK01-1330.9) in science deep drilling TK01

4.2 主量元素

科学深钻 TK01 中的碱性辉长岩的主量元素分析结果见表 2。碱性辉长岩的 SiO_2 变化范围介于 $44.78\% \sim 52.42\%$, 平均值为 47.05% , Al_2O_3 含量较高, 变化范围为 $12.27\% \sim 13.33\%$, 平均值为 12.846% , MgO 变化范围为 $4.62\% \sim 7.44\%$, 平均值为 6.76% , TiO_2 变化范围介于 $1.53\% \sim 1.64\%$, 平均为 1.58% , K_2O 变化范围为 $0.45\% \sim 2.6\%$, 平均为 1.75% , Na_2O 为 $0.45\% \sim 2.78\%$, 平均为 2.14% , 全碱($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$)含量分布于 $0.9\% \sim 5.23\%$ 之间, 平均为 3.90% , $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 介于 $0.38 \sim 1.26$ 之间, 变化区间较大。造成碱性辉长岩 K_2O 和 Na_2O 含量变化范围较大的原因, 可能与样品 TK01-1288.76 有较强的绿泥石化和粘土化及样品 TK01-1310.06 发生弱绿泥石化有关, 辉石的绿泥石化和斜长石的粘土化过程中会导致 K_2O 和 Na_2O 的流失。将样品点投到 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解中(图 6a), 3 件样品点落在钾玄岩区域内, 另 2 件受到蚀变的样品位于钙碱性系列区域, 表明岩石总体上应为钾玄岩系列。在 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 的岩石分类图(图 6b)上, 3 件样品点投在碱性辉长岩与二长辉长岩和副长石辉长岩交界区附近, 另 2 件受到蚀变的样品分别落在辉长闪长岩和亚碱性辉长岩区, 显示岩石总体上属于碱性辉长岩。碱性辉长岩的固结指数为 $25.44 \sim 34.23$ (小于 40), 表明岩浆经历了结晶分异或同化混染作用。

图6 科学深钻 TK01 中的碱性辉长岩的 K₂O-SiO₂ 图(a)和 Na₂O+K₂O-SiO₂ 图(b)Fig. 6 K₂O-SiO₂ diagram (a) and TAS diagram (b) of alkali gabbro in TK01

4.3 稀土元素

碱性辉长岩脉的稀土元素分析结果(表2)显示,碱性辉长岩的稀土元素总量大,ΣREE 变化范围为 $228.51 \times 10^{-6} \sim 275.95 \times 10^{-6}$, LREE 变化范围为 $207.41 \times 10^{-6} \sim 253.15 \times 10^{-6}$, HREE 变化范围为 $21.1 \times 10^{-6} \sim 22.8 \times 10^{-6}$, LREE/HREE 比值为 $9.83 \sim 11.1$, La/Yb 比值介于 $18.59 \sim 23.23$, 表明轻重稀土元素之间的分异强烈,轻稀土富集,重稀土亏损(图7a)。(Eu 为 $0.62 \sim 0.88$, δCe 为 $0.93 \sim 0.97$, 表明岩石具有弱负 Eu 异常,而 Ce 异常不明显。上述 5 件碱性辉长岩样品的稀土元素组成基本一致,表明弱蚀变过程没有明显改变岩石的稀土元素组成,对利用稀土元素进行岩浆来源和构造环境讨论

不会产生明显影响。

4.4 微量元素

科学深钻 TK01 中碱性辉长岩脉的微量元素分析结果(表2)表明,碱性辉长岩微量元素丰度明显高于原始地幔,总体呈右倾趋势(图7b),其中 Nb、Ta、Ti 有弱亏损,暗示岩浆演化过程中有辉石和钛铁矿的结晶分异。样品的 Rb/Sr 比值为 $0.057 \sim 0.147$, Rb/Ba 比值为 $0.196 \sim 0.426$, 高于原始地幔的相应比值,表明岩浆发生过分异演化。上述碱性辉长岩样品中 3 件未蚀变样品与 2 件弱蚀变样品相比,除了 Rb、K、Sr 含量变化较大外,其它微量元素组成基本相似,对利用高场强元素讨论岩浆来源和构造环境不会产生明显影响。

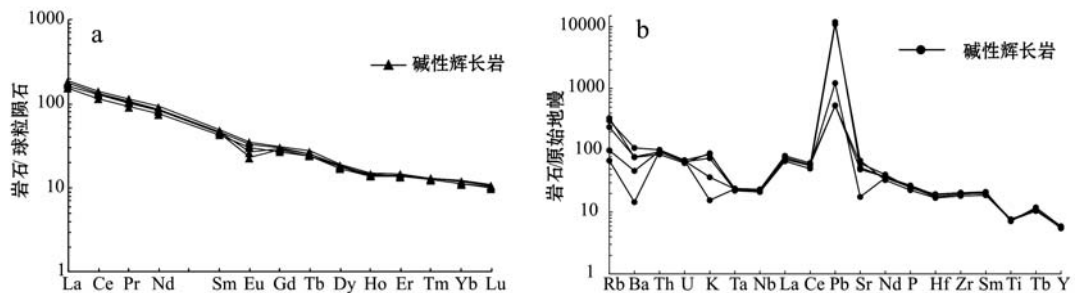


图7 科学深钻 TK01 中的中碱性辉长岩的稀土元素球粒陨石标准化图(a, 标准化数据据 Boynton, 1984)和微量元素原始地幔标准化图(b, 标准化数据据 Sun and MacDonough, 1989)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns (a, normalizing values after Boynton, 1984) and primitive mantle normalized multi-element spider diagrams (b, normalizing values after Sun and MacDonough, 1989) for alkali gabbro in science deep drilling TK01

表 2 科学深钻 TK01 碱性辉长岩岩石化学分析($w_B/\%$)和稀土微量元素分析结果($w_B/10^{-6}$)
 Table 2 Analyses of chemical compositions ($w_B/\%$) and analyses of trace and REE elements compositions ($w_B/10^{-6}$)
 for the samples of alkali gabbro in science deep drilling TK01

样品号	TK01-1288.76	TK01-1310.06	TK01-1317.86	TK01-1324	TK01-1329.9
SiO ₂	45.38	52.42	44.78	46.04	46.61
TiO ₂	1.57	1.64	1.59	1.53	1.58
Al ₂ O ₃	12.27	13.33	12.87	12.95	12.81
Fe ₂ O ₃	2.78	1.31	1.18	2.08	2.82
FeO	12.31	8.39	9.09	7.14	6.57
MnO	0.32	0.26	0.22	0.15	0.15
MgO	7.44	4.62	7.26	7.05	7.42
CaO	6.82	6.8	9.45	8.94	8.6
Na ₂ O	0.45	2.78	2.05	2.74	2.71
K ₂ O	0.45	1.06	2.6	2.49	2.16
P ₂ O ₅	0.53	0.57	0.48	0.52	0.54
LOI	9.52	6.64	8.17	8.21	8
Total	99.85	99.82	99.75	99.84	99.96
K ₂ O/(K ₂ O+Na ₂ O)	0.5	0.28	0.56	0.48	0.44
K ₂ O+Na ₂ O	0.9	3.84	4.65	5.23	4.87
Be	1.07	1.51	1.49	1.67	1.52
Sc	22.4	21.9	24.3	22.2	21.8
V	257	248	270	253	243
Cr	484	259	397	374	378
Co	54.5	32.4	39.5	38.8	39.6
Ni	259	59.8	144	157	164
Cu	40.7	120	65.5	48.3	50.3
Zn	263	872	346	101	113
Ga	19	19	18.9	20	18.9
Rb	43.4	63.7	211	192	151
Sr	372	1 113	1 442	1 303	1 040
Y	25.5	25	26.5	27	25.6
Zr	231	231	205	230	219
Nb	16.2	15.9	15.1	16.7	15.6
Cs	4.73	5.49	39.3	42.6	34.2
Ba	102	325	540	766	550
La	50.5	54.3	47.4	57.8	53.9
Ce	104	106	93.1	114	107
Pr	12.5	13.1	11.3	14	12.8
Nd	49.2	50.7	45	55.3	50.9
Sm	8.83	8.97	8.38	9.48	9.18
Eu	1.69	1.96	2.23	2.57	2.38
Gd	7.35	7.49	7.01	7.94	7.73
Tb	1.14	1.19	1.13	1.29	1.2
Dy	5.47	5.78	5.73	6.08	5.93
Ho	1	1	1.04	1.07	1.02
Er	2.93	2.89	2.88	3.1	2.86
Tm	0.42	0.41	0.42	0.43	0.41
Yb	2.5	2.36	2.55	2.55	2.32
Lu	0.34	0.33	0.34	0.35	0.32
Hf	6.06	5.85	5.27	5.85	5.47
Ta	0.97	0.97	0.91	0.99	0.92
Pb	87	849	779	37.6	37.9
Th	8.14	8.17	7.23	8.57	7.94
U	1.43	1.42	1.31	1.46	1.37
ΣREE	275.95	247.86	257.95	256.48	228.51
LREE/HREE	11.1	10.72	10.84	10.96	9.83
δEu	0.88	0.62	0.84	0.71	0.87
δCe	0.94	0.97	0.95	0.93	0.94

注: $\delta Eu = Eu / \sqrt{Sm \cdot Gd}$, $\delta Ce = Ce / \sqrt{La \cdot Pr}$ 。

4.5 锆石 Hf 同位素测试结果

科学深钻 TK01 中碱性辉长岩的 5 颗锆石 Hf 同位素分析结果(表 3)表明, 3 个测点的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值小于 0.002, 说明锆石形成之后放射性成因 Hf 的积累较少。所测锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值范围为 0.282 437~0.282 640(平均为 0.235 434),

依据锆石测年计算的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 变化范围为 -11.86~-4.68(平均为 -7.43)(图 8), 模式年龄(t_{DM1}) 0.91~1.18 Ga(平均为 1.06 Ga)。样品的锆石 Hf 模式年龄远大于其结晶年龄, 表明岩浆源区可能受到过地壳物质混染或者源于富集地幔(吴福元等, 2007)。

表 3 科学深钻 TK01 中碱性辉长岩 TK01-1330.9 的锆石 Hf 同位素分析结果
Table 3 Zircon Hf isotopic compositions of alkali gabbro in science deep drilling TK01

点号	t/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\epsilon\text{Hf}(t)$	t_{DM1}/Ma	t_{DM2}/Ma	$f_{\text{Lu/Hf}}$
TK01-1330.9-1	63.94	0.081 863	0.002 265	0.282 446	0.000 027	-11.53	1 179	1 785	-0.931 791 0
TK01-1330.9-2	63.29	0.080 851	0.002 913	0.282 640	0.000 026	-4.68	913	1 352	-0.912 267 8
TK01-1330.9-3	78.86	0.038 717	0.001 161	0.282 437	0.000 027	-11.86	1 157	1 795	-0.965 016 8
TK01-1330.9-4	63.40	0.047 800	0.001 478	0.282 507	0.000 020	-9.37	1 067	1 647	-0.955 488 1
TK01-1330.9-5	63.54	0.061 649	0.001 876	0.282 571	0.000 026	-7.12	987	1 505	-0.943 490 3

注: $\epsilon\text{Hf}(t) = 10\,000 \times \{ (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{s}} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{s}} \times (e^{\lambda t} - 1) / (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} \times (e^{\lambda t} - 1) - 1 \}$, $t_{\text{DM1}} = 1/\lambda \times \ln \{ 1 + (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{s}} - (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} / (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{s}} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} \}$, $t_{\text{DM2}} = t_{\text{DM1}} - (t_{\text{DM1}} - t) \times (f_{\text{cc}} - f_{\text{s}}) / (f_{\text{cc}} - f_{\text{DM}})$, $f_{\text{Lu/Hf}} = (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{s}} / (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} - 1$, $\lambda = 1.867 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$, $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{s}}$ 和 $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{s}}$ 为样品测定值, $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} = 0.033\,2$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} = 0.282\,772$, $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.038\,4$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.283\,25$, $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{平均地壳}} = 0.015$, $f_{\text{cc}} = (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{平均地壳}} / (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} - 1$, $f_{\text{s}} = f_{\text{Lu/Hf}}$; $f_{\text{DM}} = (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} / (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} - 1$, t 为锆石结晶年龄。

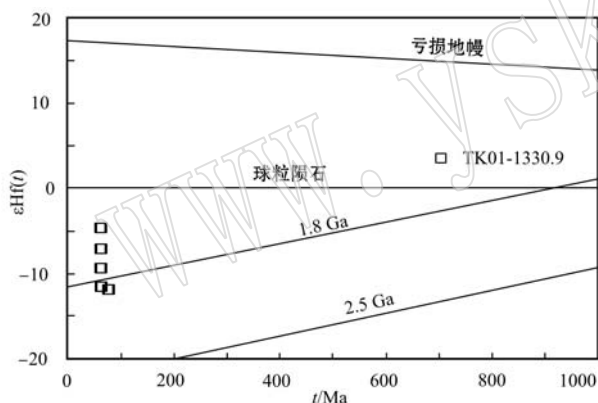


图 8 科学深钻 TK01 中碱性辉长岩的锆石 Lu-Hf 同位素组成

Fig. 8 Zircon Lu-Hf isotopic compositions of alkali gabbro in science deep drilling TK01

5 讨论

5.1 碱性辉长岩形成时代

铜陵地区新生代岩浆活动的强度很低, 以往很少有新生代岩浆活动的报道。本次工作在丁桥科学深钻 TK01 中发现的碱性辉长岩, 其 LA-MC-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄加权平均为 $63.54 \pm 0.53 \text{ Ma}$ (MSWD=0.26), 测试的误差小, 可信度高, 可代表锆石的结晶年龄以及岩浆侵位年龄, 证实该地区存

在古近系的基性岩浆活动, 为该地区新生代的构造和岩浆活动研究提供了可靠的年代学证据。

铜陵矿集区的新生代基性岩浆活动并不是孤立的, 其与江汉盆地大范围分布的古近系火山岩的 Ar/Ar 年龄 ($57.3 \pm 0.4 \text{ Ma}$, 彭头平等, 2006) 接近, 并与中国东部早第三纪红色断陷盆地如广东、江苏、浙江等地区的断陷盆地中大量分布的早第三纪火山岩(从柏林等, 1990)相对应, 表明长江中下游地区及至整个中国东部在古近纪发生了一次大范围的构造-岩浆事件。这一构造-岩浆事件是中国东部喜山期构造活动的直接反映。朱清波等(2011)将喜山期的构造演化阶段分为早喜山期(75~61.5 Ma)和晚喜山期(43.2~3.4 Ma)两个阶段, 伸展断陷作用主要发育在 75~61.5 Ma。因此, 铜陵矿集区碱性辉长岩的侵入时期应属于喜山早期的伸展断陷时期。这与安徽沿江地区广泛分布古近系, 并在宣城盆地见始新统双塔组角度不整合覆于上白垩统宣南组之上(陈烈祖等, 1981)的地质事实相吻合。

5.2 碱性辉长岩的源区

碱性辉长岩的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值在 -12.7~-4.5 范围(图 8), 表明岩浆起源于富集地幔的部分熔融, 并可能受到古老地壳物质的混染。计算的 Hf 同位素模式年龄为 0.91~1.18 Ga(平均 1.06 Ga), 与苏北一带晚元古代形成的上地幔石榴石二辉橄榄岩的年龄

(925 ± 53 Ma, 白文吉等, 1992)相近,暗示铜陵矿集区的碱性辉长岩浆为古老的大陆岩石圈富集地幔部分熔融的产物。碱性辉长岩的轻稀土富集、重稀土亏损特征明显不同于洋中脊玄武岩所具有的重稀土富集、轻稀土亏损的特征,说明其源区并非正常的原始地幔或者亏损地幔(刘洪等, 2002),而可能与富集地幔的部分熔融及地壳物质不同程度的混染有关(赵振华等, 1994),在 $\text{La}/\text{Sm}-\text{La}$ 图解中(图 9)样品也显示出部分熔融的趋势。此外,碱性辉长岩具有较高的 Sr 丰度(剔除蚀变样品, $\text{Sr} > 1\,000 \times 10^{-6}$),与金伯利岩和大陆碱性玄武岩等高钾幔源岩石具有较高的 Sr 丰度(唐永成等, 1998)相类似,同样暗示岩浆来源于大陆富集地幔的部分熔融。

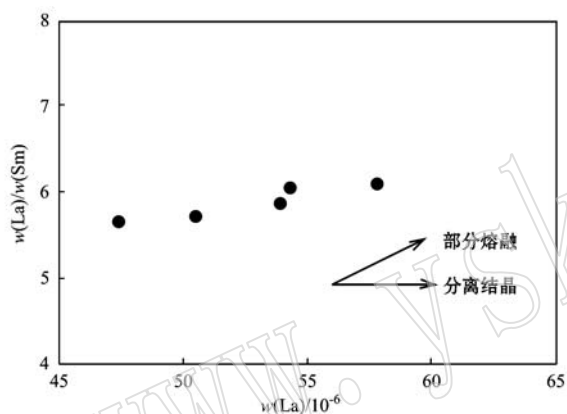


图 9 科学深钻 TK01 中碱性辉长岩的 $\text{La}/\text{Sm}-\text{La}$ 图解

Fig. 9 La/Sm versus La plot of alkali gabbro in science deep drilling TK01

岩浆岩的 Nb/U 比值通常可判别岩浆是否受到地壳物质的混染(柴凤梅等, 2007)。科学深钻 TK01 中的碱性辉长岩的 Nb/U 比值为 $11.2 \sim 11.5$, 低于 MORB 和 OIB ($\text{Nb}/\text{U} \approx 47$, Hofmann *et al.*, 1986), 而高于陆壳上地壳 ($\text{Nb}/\text{U} \approx 9$, Taylor and McLennan, 1985) 和全球平均俯冲沉积物 ($\text{Nb}/\text{U} \approx 5$, Plank and Langmuir, 1998), 显示科学深钻 TK01 中的碱性辉长岩的原生岩浆受到了地壳物质的混染。此外,地壳的 $(\text{Nb}/\text{La})_{\text{PM}}$ 和 $(\text{Ta}/\text{La})_{\text{PM}}$ 比值远小于 1 (Rudnick and David, 1995)。科学深钻 TK01 中的碱性辉长岩的 $(\text{Nb}/\text{La})_{\text{PM}}$ 和 $(\text{Ta}/\text{La})_{\text{PM}}$ 比值为 $0.28 \sim 0.32$ (平均为 0.30) 和 $0.30 \sim 0.34$ (平均为 0.32) 均远小于 1, 也显示其岩浆受到了地壳物质的混染。

原生玄武岩浆的 $\text{Mg}^\#$ 值应为 $0.68 \sim 0.75$ (Frey, 1978), 当发生橄榄石和辉石的分离结晶时, $\text{Mg}^\#$ 值一般会逐渐降低。科学深钻 TK01 中碱性辉

长岩的 $\text{Mg}^\#$ 变化范围在 $0.46 \sim 0.59$, 低于原生玄武岩浆, 表明碱性辉长岩的原生岩浆曾经发生过低度结晶分异。此外, 岩石的微量元素具有 Nb、Ta 和 Ti 的弱亏损, 也反映碱性辉长岩的原生岩浆发生过辉石的低度结晶分异。

综上, 笔者认为科学深钻 TK01 中的碱性辉长岩来源于大陆富集地幔部分熔融, 上侵过程中受到地壳物质的混染。

5.3 构造环境及意义

中国东部新生代早期广大范围内的基性岩浆活动由陆内伸展、拉张断陷引起(胡受奚等, 1992, 1994; 彭头平等, 2006)。铜陵科学深钻 TK01 中的碱性辉长岩形成于板内环境, 其侵入活动与中国东部陆内伸展、拉张断陷引起的大规模差异升降活动密切相关, 表现在碱性辉长岩侵位于相对隆升的铜陵断块南缘。由碱性辉长岩的形成年龄 (63.54 ± 0.53 Ma) 可知, 铜陵断块的相对隆升发生在朱清波等(2011)划分的早喜山期。由于碱性辉长岩具细晶结构(斜长石长度 $0.2 \sim 0.3$ mm, 辉石长度 $0.1 \sim 0.2$ mm), 表明其为浅成侵入岩脉, 侵位深度在 $2 \sim 5$ km。样品取自深钻 1.3 km 附近 ($1\,288.76 \sim 1\,329.90$ m), 反映铜陵断块抬升剥蚀了 $0.7 \sim 3.7$ km, 使得矿集区内的矿床抬升至近地表而被发现利用。

6 结论

(1) 科学深钻 TK01 中的碱性辉长岩的岩石地球化学性质表明, 岩石富钛、富钾、富碱, 属于钾玄岩系列, 为过铝质岩石, 具有轻稀土元素富集、重稀土元素亏损和富集大离子不相容元素的特征。

(2) 科学深钻 TK01 中的碱性辉长岩的锆石 U-Pb 年龄 63.54 ± 0.53 Ma 为岩浆结晶年龄。表明碱性辉长岩是长江中下游地区第三纪古新世时期侵入岩浆活动的产物。

(3) 科学深钻 TK01 中的碱性辉长岩起源于大陆富集地幔部分熔融, 上侵过程中受到地壳物质的混染。

References

- Bai Wenji, Hu Xufeng and Zhou Meifu. 1992. Formation conditions and age for garnet lherzolite from Eastern Shandong and Northern Jiang-

- su, China[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 11(4): 299~305 (in Chinese with English abstract).
- Belousova E A, Griffin W L, O'Reilly S Y, *et al.* 2002. Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 143: 602~622.
- Boynton W V. 1984. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies[A]. Henderson P. *Rare Earth Element Geochemistry* [C]. Elsevier, 63~114.
- Chai Fengmei, Parat A, Zhang Zhaochong, *et al.* 2007. Geochemistry of the lamprophyres dykes in the SW margin of the Tarin block and their source region[J]. *Geological Review*, 53(1): 11~21(in Chinese with English abstract).
- Chen Daogong and Peng Zicheng. 1988. K-Ar ages and Pb, Sr isotopic characteristics of some Cenozoic volcanic rocks from Anhui and Jiangsu provinces, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 5(2): 3~12(in Chinese with English abstract).
- Cong Bolin, Wang Qingchen, Zhang Haizheng, *et al.* 1996. Petrogenesis of Cenozoic volcanic rocks in Hefei Basin, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 12(3): 370~381(in Chinese with English abstract).
- Fan Yu, Zhou Taofa, Yuan Feng, *et al.* 2008. LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of the A-type granites in the Lu-Zong(Lujiang-Zongyang) area and their geological significances[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(8): 1 715~1 724(in Chinese with English abstract).
- Frey F A. 1978. Integrated models of basalt petrogenesis: a study of quartz-tholeiites to olivine basalts from south eastern Australia utilizing geochemical and experimental petrological data[J]. *Journal of Petrology*, 119: 463~513.
- Hofmann A W, Jochum K, Seufert M, *et al.* 1986. Nb and Pb in oceanic basalts: New constraints on mantle evolution[J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 79: 33~45.
- Hou Kejun, Li Yanhe and Tian Yourong. 2009. In situ U-Pb zircon dating using laser ablation-multi ion counting-ICP-MS[J]. *Mineral Deposits*, 28(4): 481~492(in Chinese with English abstract).
- Hou Kejun, Li Yanhe, Zou Tianren, *et al.* 2007. Laser ablation-MC-ICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2 595~2 604(in Chinese with English abstract).
- Hu Shouxi, Guo Jichun and Hu Zhihong. 1992. Evolution and development of plate tectonics and magmatism at the active continental margin of east China during Mesozoic and Cenozoic eras[J]. *Jiangsu Geology*, 16(3~4): 129~136(in Chinese with English abstract).
- Hu Shouxi, Zao Yiyi, Hu Zhihong, *et al.* 1994. Evolution and development of tectonics and magmatism at the active continental margin of the east China (E 106°) during Mesozoic and Cenozoic[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 10(4): 370~381(in Chinese with English abstract).
- Jin Zhenmin, Yu Ridong, Yang Wencai, *et al.* 2003. Mantle-derived xenoliths of peridotite from Pingdingshan, Donghai County, Jiangsu province and their implications for deep structures[J]. *Acta Geologica Sinica*, 77(4): 451~462(in Chinese with English abstract).
- Liu Hong, Qiu Jiansheng, Luo Qinghua, *et al.* 2002. Petrogenesis of the Mesozoic potash-rich volcanic rocks in the Luzong basin, Anhui Province: Geochemical constraints[J]. *Geochimica*, 31(2): 129~140(in Chinese with English abstract).
- Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Zong Keqing, *et al.* 2010. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS[J]. *Chinese Science Bulletin*, 55(15): 1 535~1 546.
- Ma Xingyuan and He Guoqi. 1989. Precambrian crustal evolution of eastern Asia[J]. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 3(1~4): 9~15.
- Morel M L A, Nebel O, Nebel-Jacobsen Y J, *et al.* 2006. Hafnium isotope characterization of the GJ-1 zircon reference material by solution and laser-ablation MC-ICP-MS[J]. *Chemical Geology*, 255: 231~235.
- Nasdala L, Hofmeister W, Norberg N, *et al.* 2008. Zircon M257—A homogeneous natural reference material for the ion microprobe U-Pb analysis of zircon[J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 32: 247~265.
- Peng Toupeng, Wang Yuejun, Fan Weiming, *et al.* 2006. ³⁹Ar/⁴⁰Ar geochronology and geochemistry of the early Tertiary basaltic rocks in the Jiangnan Basin, China and its petrogenesis[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(6): 1 617~1 626(in Chinese with English abstract).
- Peng Zicheng, Zartman R E, Futa K, *et al.* 1986. Pb-, Sr- and Nd-isotopic systematics, chemical characteristics of Cenozoic basalts, eastern China[J]. *Chem. Geol.*, 59: 3~33.
- Plank T and Langmuir C H. 1998. The chemical composition of subducting sediment and its consequences for the crust and mantle[J]. *Chem. Geol.*, 145: 325~394.
- Qin Yongjun, Zeng Jiannian, Zeng Yong, *et al.* 2010. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of ore-bearing pyroxene-trachyandesite porphyry and its geological significance in Luohe-Nihe iron ore field in Luzong basin, southern Anhui, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 29(6): 851~862(in Chinese with English abstract).
- Rundnick R L and David M F. 1995. Nature and composition of the continental crust: A lower crustal perspective[J]. *Reviews of Geophysics*, 33(3): 267~309.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes (in magmatism in the ocean basins)[J]. *Geol. Soc. Spec. Publ.*, 42: 313~345.
- Taylor S R and McLennan S M. 1985. *The Continental Crust: Its Com-*

- position and Evolution[M]. Blackwell, Oxford Press, 312.
- Wang Hongzhen and Mo Xuanxue. 1995. An outline of the tectonic evolution of China[J]. Episodes, 18(1~2): 6~16.
- Wang Qianfei, Deng Jun, Huang Dinghua, *et al.* 2011. Deformation model for the Tongling ore cluster region, east-central China[J]. International Geology Review, 53(5~6): 562~579.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Zheng Yongfei, *et al.* 2007. Lu-Hf isotopic systematic and their applications in petrology[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(2): 185~220(in Chinese with English abstract).
- Xie Jiancheng, Yang Xiaoyong, Du Jianguo, *et al.* 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): 1 782~1 800(in Chinese with English abstract).
- Yuan Feng, Zhou Taofa, Fan Yu, *et al.* 2010. LA-ICPMS U-Pb ages of zircons from Mesozoic volcanic rocks and their significance in Fanchang basin, Anhui Province, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 26(9): 2 805~2 817(in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhenhua and Zhou Lingdi. 1994. Some of China's rich base of rare earth elements geochemistry intrusive rocks[J]. Sci. China (B), 24(10): 1 109~1 120(in Chinese with English abstract).
- Zhu Qingbo, Yang Kunguang and Cheng Wanqiang. 2011. Structural evolution of northern Jiangnan up lift evidence from ESR Dating [J]. Geoscience, 25(1): 31~38(in Chinese with English abstract).
- Zou Haibo, Zindler A, Xu Xisheng, *et al.* 2000. Major, trace element, and Nd, Sr and Pb isotope studies of Cenozoic basalts in SE China: mantle sources, regional variations, and tectonic significance[J]. Chem. Geol., 171: 33~47.
- 白文吉, 胡旭峰, 周美付. 1992. 胶东-苏北石榴石二辉橄榄岩形成条件及年代[J]. 岩石矿物学杂志, 11(4): 299~305.
- 柴凤梅, 帕拉提·阿布都卡迪尔, 张招崇, 等. 2007. 塔里木板块西南缘钾质煌斑岩地球化学及源区特征[J]. 地质论评, 53(1): 11~21.
- 陈道公, 彭子成. 1988. 苏皖若干新生代火山岩的钾氩年龄和铅铋同位素组成[J]. 岩石学报, 5(2): 3~12.
- 陈烈祖, 夏广胜. 1981. 安徽沿江地区早第三纪地层[J]. 地层学杂志, 5(3): 157~164.
- 从伯林, 王清晨, 张海政, 等. 1996. 中国合肥盆地新生代火山岩成因岩石学研究[J]. 岩石学报, 12(3): 370~381.
- 从柏林, 张儒媛, 李曙光, 等. 1990. 中国苏北-胶东南高压变质带的同位素地质年代初探[J]. 岩石圈构造演化开放实验室年报, 73~76.
- 鄂莫岚, 赵大升. 1987. 中国东部新生代玄武岩及深源岩石包体[M]. 北京: 科学出版社.
- 范裕, 周涛发, 袁峰, 等. 2008. 安徽庐江-枞阳地区 A 型花岗岩的 LA-ICP-MS 定年及其地质意义[J]. 岩石学报, 24(8): 1 715~1 724.
- 侯可军, 李延河, 田有荣. 2009. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术[J]. 矿床地质, 28(4): 481~492.
- 侯可军, 李延河, 邹天人, 等. 2007. LA-MC-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): 2 595~2 604.
- 胡受奚, 郭继春, 胡志宏. 1992. 中国东部中-新生代岩浆特征、演化及其与构造环境演化的联系[J]. 江苏地质, 16(3~4): 129~136.
- 胡受奚, 赵乙英, 胡志宏, 等. 1994. 中国东部中-新生代活动大陆边缘构造-岩浆作用演化和发展[J]. 岩石学报, 10(4): 370~381.
- 金振民, 余日东, 杨文采, 等. 2003. 江苏东海县幔源橄榄岩包体及其深部构造意义[J]. 地质学报, 77(4): 451~462.
- 刘洪, 邱检生, 罗清华, 等. 2002. 安徽庐枞中生代富钾火山岩成因的地球化学制约[J]. 地球化学, 31(2): 129~140.
- 彭头平, 王岳军, 范蔚茗, 等. 2006. 江汉盆地早第三纪玄武质岩石 $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ 年代学和地球化学特征及其成因意义[J]. 岩石学报, 22(6): 1 617~1 626.
- 覃永军, 曾健年, 曾勇, 等. 2010. 安徽南部庐枞盆地罗河-泥河铁矿田含矿辉石粗安玢岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其地质意义[J]. 地质通报, 29(6): 851~862.
- 唐永成, 吴言昌, 储国正, 等. 1998. 安徽沿江地区铜金多金属矿床地质[M]. 北京: 地质出版社, 60~85.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. 2007. 锆石 Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. 岩石学报, 23(2): 185~220.
- 谢建成, 杨晓勇, 杜建国, 等. 2008. 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): 1 782~1 800.
- 袁峰, 周涛发, 范裕, 等. 2010. 安徽繁昌盆地中生代火山岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及其意义[J]. 岩石学报, 26(9): 2 805~2 817.
- 赵振华, 周玲棣. 1994. 我国某些富碱侵入岩的稀土元素地球化学[J]. 中国科学(B辑), 24(10): 1 109~1 120.
- 张斌辉, 刘勇胜, 高山. 2007. 中国东部新生代玄武岩高 Fe-Mn 比值的成因意义[J]. 中国科学(D辑), 37(11): 1 456~1 466.
- 朱清波, 杨坤光, 程万强. 2011. 江南隆起带北缘新生代构造演化的石英 ESR 年代学研究[J]. 现代地质, 25(1): 31~38.

附中文参考文献