

# 滁州中生代火山岩 LA-ICP MS 锆石 U-Pb 年龄 及其构造地质学意义

谢成龙,朱光,牛漫兰,王勇生

合肥工业大学资源与环境工程学院,合肥,230009

**内容提要:**详细的 LA-ICP MS 锆石 U-Pb 年代学研究表明,位于郟庐断裂(郟城—庐江断裂)带上张八岭隆起东侧边界上的滁州火山岩形成于早白垩世,具体年龄为 132 ~ 116 Ma,岩浆具有多期喷发的特点。该岩浆活动中 132Ma 的喷发年龄是郟庐断裂带上同期钙碱性岩浆最早出现的时间,代表了该断裂带上岩石圈伸展运动的开始时间。尽管滁州火山岩在构造位置上属于扬子克拉通,但岩浆岩中的古老锆石指示岩浆来源于古老的华北克拉通,这一现象可以用大陆碰撞后楔入模型来解释。该火山岩形成于中国东部岩石圈减薄的动力学背景之下,为岩石圈减薄及壳幔相互作用造成的早白垩世大规模岩浆活动的同期产物。与华北克拉通内部同期火山岩年代学资料相比,断裂带上火山活动具有相对较早的开始时间和较长的演化历史,表明断裂带内岩石圈具有较克拉通内部强烈的减薄程度和长期的减薄历史,这一特点可能与郟庐断裂带于早白垩世初的大规模左行平移有关。

**关键词:**滁州;中生代火山岩;LA-ICP MS;锆石年代学;郟庐断裂(郟城—庐江断裂)带;岩石圈减薄

有关中国东部岩石圈减薄的问题已经有二十几年的研究历史,中国东部岩石圈由古生代时期大于 200km 的厚度减薄到新生代时期约 80km 的厚度的事实已经得到了普遍的承认(Griffin et al., 1992; 1998; Menzies et al., 1993; Zheng et al., 2001; Deng et al., 2004)。然而,尽管目前对这一问题的研究已经取得了丰硕的成果(Gao et al., 2004; Deng et al., 2004; 许文良等, 2004; Xu et al., 2004; Wu et al., 2005; 张宏福等, 2005; 周新华, 2006; 郑建平等, 2006),但目前对于这一问题的研究主要集中在华北克拉通内部,对其他构造块体的探讨相对较少,尤其对纵跨华北克拉通东部的巨型断裂带——郟庐断裂(郟城—庐江断裂)带还缺乏必要的研究(吴福元等, 2003; Wang et al., 2006)。

郟庐断裂带形成和演化与中国东部复杂的构造格局密切相关。在华北克拉通岩石圈减薄中该断裂带也经历了强烈的伸展活动(朱光等, 2001)。横跨断裂带的地学断面(朱光等, 2002)显示其下岩石圈厚度明显薄于两侧(图 1c, 孙武城等, 1992),暗示岩石圈曾具有明显强烈的减薄程度。然而有关该断裂带与岩石圈减薄关系的研究还较缺乏(吴福元等,

2003),断裂带与克拉通内部相比其岩石圈减薄的时间和机制有何异同尚有待探讨。岩石圈减薄往往与区域上大规模的岩浆活动及伸展运动相伴生,晚中生代时期华北克拉通东部发育了大量的钙碱性为主的岩浆岩系列,沿郟庐断裂带岩浆活动尤为剧烈,这些岩浆岩将是探讨郟庐断裂带与华北克拉通内部岩石圈减薄有何异同的良好对象。

郟庐断裂带在晚中生代时期经历了一次大规模左行平移及随后的伸展运动(朱光等, 2001; 2005a; 刘国生等, 2002),其平移时间已经由该事件中的糜棱岩<sup>39</sup>Ar-<sup>40</sup>Ar年龄进行了限定(朱光等, 2005a),但其后的伸展时间还缺乏约束。钙碱性岩浆活动的形成背景之一即是岩石圈大规模伸展活动,因此可以通过钙碱性岩浆活动的开始出现时间来探讨岩石圈伸展活动的时间,郟庐断裂带上最早出现的钙碱性岩浆活动应大致对应于伸展活动的开始时间。

张八岭隆起东侧的滁州火山岩位于扬子克拉通和华北克拉通的构造边界上,是郟庐断裂带上具有代表性的火山岩样品。由于其构造位置的特殊性,已成为探讨其下岩石圈组成和减薄及其深部动力学过程中值得研究的对象。但目前该套火山岩的研究

注:本文为国家自然科学基金资助项目(批准号 40672131, 40603010)的成果。

收稿日期:2007-03-08;改回日期:2007-06-16;责任编辑:章雨旭。

作者简介:谢成龙,男,1978年生。博士研究生,构造地质学和地球化学专业。Email:geoxie@163.com。

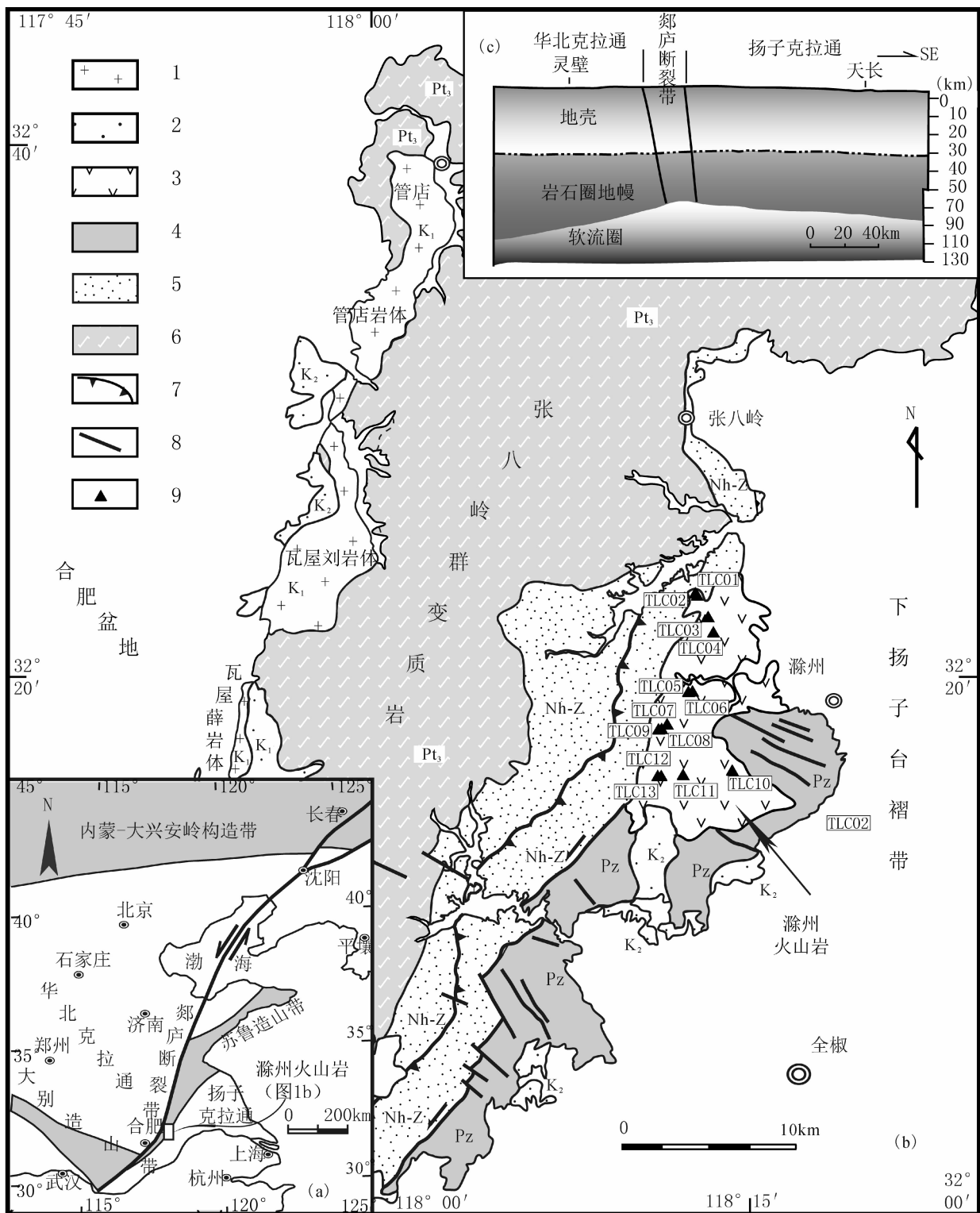


图1 安徽滁州地区晚中生代火山岩构造位置(a)、采样位置图(b)及岩石圈结构(c)(c图据孙武城等,1992)

Fig. 1 Tectonic location(a), sampling location(b) of the late Mesozoic volcanic rocks from the Chuzhou Area, Anhui Province, and the structure of lithosphere beneath it(c). (Fig. c after Sun et al., 1992)

- 1—早白垩世花岗岩体;2—早白垩世泥、砂岩;3—滁州中生代酸性火山岩;4—古生界地层;5—南华系—震旦系;
- 6—张八岭群变质岩;7—韧性逆冲剪切带;8—脆性断层;9—采样位置

- 1—Early Cretaceous intrusive rocks;2—Early Cretaceous sediments;3—Early Cretaceous volcanics;4—Paleozoic;5—Nanhua—Sinian System;6—Zhangbaling Group;7—ductile thrust shear zone;8—brittle fault;9—sampling location

程度还很低(齐进英,1982),尤其是其演化及喷发时代还缺乏年代学制约。本文采用 LA-ICP MS 方法对其进行了单颗粒锆石 U-Pb 年代学研究,确定了火山岩的具体喷发时间,分析了岩浆的来源及背景,并初步探讨了郟庐断裂带的伸展活动时间及该期火山活动与岩石圈减薄的关系。

## 1 地质背景

郟庐断裂带是纵跨中国东部的一条巨型断裂带。其南部始于大别造山带东缘,往北至苏鲁造山带之间为华北克拉通与扬子克拉通的边界,断裂带沿苏鲁造山带西缘往北穿越华北克拉通向中国东北延伸(如图 1a)。

目前的研究认为,郟庐断裂带起源于印支期华北与扬子克拉通的碰撞造山过程中,起源形式为陆内左旋转换断层(朱光等,2004;2005b),且断裂带在早白垩世初再次发生左行平移,随后发生了区域性的伸展运动(朱光等,2001;2005a;刘国生等,2002)。伸展期沿断裂带发育了一系列的断陷盆地(张岳桥等,2004),并沿断陷边界出现了大规模的岩浆活动,形成了大量的、以中酸性为主的岩浆岩系列(牛漫兰等,2007)。但也有学者认为,该期岩浆活动为断裂带走滑期的产物(朱光等,2002)。

郟庐断裂带在大别造山带与苏鲁造山带之间的变质岩出露区为张八岭隆起(图 1a),其西为华北克拉通上的合肥盆地,东为扬子克拉通的下扬子褶断带。张八岭隆起主要出露一套变质岩,其北部为新

元古代张八岭群,南部为肥东群变质杂岩,断裂带叠加于变质岩之上。穿过张八岭隆起北侧的地质断面(孙武城等,1992)显示(图 1c),断裂带向东陡倾,其下岩石圈厚度明显薄于两侧的华北和扬子克拉通,且断裂深达岩石圈底部。

滁州火山岩位于张八岭隆起北段的东侧(图 1b),受平行于郟庐断裂带的次级断裂控制,并形成北北东向的小型火山岩盆地。火山岩南侧和东侧为下古生界,西侧为震旦系。张八岭隆起西侧有管店、瓦屋刘、瓦屋薛等早白垩世岩体(牛漫兰等,2001;2002)。滁县火山岩分布面积约 80 km<sup>2</sup>,总厚度两千余米。在部分地区露头完好,存在薄层的沉积夹层。该火山岩为一套中酸性喷发岩系列,主要为辉石安山岩、英安岩和石英安粗岩等。喷发层序上火山熔岩与火山碎屑岩相间产出,碎屑岩类包括火山集块岩、火山角砾岩和火山凝灰岩。研究区内火山岩未见明显的变形、变质现象,除少数火山凝灰岩显示一定的风化现象外,其余样品均较新鲜。

该套火山岩地层曾被认为属于侏罗系,划归为上侏罗统的黄石坝组和红花桥组(安徽省地质矿产局区域地质调查队,1988)。上部局部见白垩系红层。但长期以来该火山岩缺乏系统的年代学研究,具体喷发时代尚不清楚。

## 2 样品及分析方法

本文对研究区火山岩进行了详细的野外工作,考察了火山岩的剖面特征,并进行了广泛的采样,重

表 1 安徽滁州地区晚中生代火山岩代表性样品主量元素分析结果

Table 1 Analysis for major elements of the representative samples for the late Mesozoic volcanic rocks from the Chuzhou area, Anhui Province

样品	TLC01	TLC02	TLC03	TLC04	TLC05	TLC06	TLC07	TLC08	TLC09	TLC10	TLC11	TLC12	TLC13
岩性	英安岩	粗面岩	安山岩	粗面岩	英安岩	安山岩	粗安岩	安山岩	英安岩	粗安岩	英安岩	粗安岩	粗安岩
SiO <sub>2</sub>	67.83	64.98	64.86	63.15	66.56	63.51	58.31	61.60	62.75	59.67	64.05	57.89	58.16
TiO <sub>2</sub>	0.50	0.55	0.58	0.54	0.69	0.72	0.75	0.90	0.88	0.70	0.70	0.79	0.89
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.87	14.88	15.44	15.23	12.86	13.59	16.39	16.74	16.32	15.83	16.58	15.42	16.66
TF <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.11	4.98	5.18	4.88	5.48	5.95	5.86	6.22	6.12	6.72	3.96	7.21	5.45
MnO	0.02	0.04	0.07	0.09	0.05	0.05	0.08	0.04	0.10	0.11	0.11	0.05	0.10
MgO	1.92	2.01	1.38	2.60	2.50	3.51	4.00	0.54	0.39	3.08	0.72	2.97	2.86
CaO	1.48	0.91	2.44	2.26	2.10	2.20	3.89	4.38	3.77	2.78	5.24	4.91	5.54
Na <sub>2</sub> O	5.41	5.89	5.49	4.58	4.99	5.56	6.63	3.86	3.68	6.32	3.47	2.92	3.99
K <sub>2</sub> O	2.26	2.98	2.68	3.60	2.48	2.12	2.52	3.37	3.35	2.72	3.18	3.60	3.46
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.21	0.23	0.24	0.22	0.32	0.33	0.35	0.44	0.43	0.31	0.40	0.46	0.54
烧失	1.91	1.97	1.22	2.41	1.45	1.91	0.73	1.23	1.65	1.40	0.97	3.22	1.68
总量	99.52	99.42	99.58	99.56	99.47	99.45	99.51	99.33	99.43	99.64	99.37	99.45	99.33
Mg <sup>#</sup>	48	45	35	52	48	54	58	15	11	48	27	45	51
σ	2.37	3.58	3.05	3.32	2.37	2.88	5.47	2.81	2.50	4.90	2.10	2.85	3.66

注:样品分析在中国科学院地质与地球物理研究所元素分析实验室完成。

点区域是红花桥水库剖面。经室内整理及镜下分析,选取各喷发层位代表性样品 13 件进行了单颗粒锆石 U-Pb 年代学研究。充分考虑到露头的剥蚀及揭露情况,笔者认为这些样品仍能代表该套火山岩的完整剖面。

所选样品均为致密块状,斑状或似斑状结构。斑晶含量较少,一般为长石类矿物和少量辉石、角闪石等。基质一般由细小的长石新品和玻璃质构成,两者共同组成玻晶交织结构,有时呈粗面结构。所有样品均无明显的变质、变形现象,不含或少含杏仁体、气孔,能够代表新鲜原岩的特征。野外露头观察及镜下鉴定结果表明该火山岩为一套安山岩、英安岩、粗安岩为主的火山岩系列(表 1)。

13 个样品的岩石化学数据列于表 1。由全岩主要氧化物分析结果可以看出,该火山岩为一套中酸性岩浆岩,标准矿物计算及火山岩 TAS 分类(图 2a, Le Bas et al., 1986)表明该套火山岩以安山岩、英安岩、粗安岩为主,这与岩相学的观察是一致的。主要氧化物对  $\text{SiO}_2$  的关系(Harker 图解,略)均具有明显的相关性,表明该套火山岩为相同源区背景的喷发产物。Rittmann 指数及  $\text{SiO}_2$ - $\text{K}_2\text{O}$  关系(图 2b, Peccerillo & Taylor, 1976)表明其为高钾钙碱性系列的火山岩, $\text{Mg}^\#$  指示多数样品应为高镁安山岩系列(Gao et al., 2004)。

用于锆石年代学测试的样品首先经过破碎,经浮选和电磁选等方法挑选出单颗粒锆石,然后在双目镜下挑纯,选样工作在河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成。手工挑出晶形完好、透明度和色泽度好的锆石,粘于环氧树脂表面,经抛光后进行

透射光和反射光照相,据此选择晶体特征良好的锆石进行阴极发光照射(部分图像如图 3),该工作在中国科学院地质与地球物理研究所实验室完成。最后根据阴极发光照射结果选择典型的岩浆锆石进行 U-Pb 年代学测试,LA-ICP MS 锆石 U-Pb 年代学测试是在西北大学大陆动力学实验室完成的,所使用 ICP-MS 为 Elan 6100DRC,激光剥蚀系统为 GeoLas 200M 深紫外(DUV) 193nm ArF 准分子激光剥蚀系统。分析所采用的光斑直径为  $30\mu\text{m}$ ,并采用  $^{29}\text{Si}$  作为外标,以哈佛大学标准锆石 91500 作为外标校正。

锆石 U-Pb 年代学测试数据的处理采用 Glitter (4.0 版)软件进行,普通铅校正采用 Andersen 的方法(Andersen, 2002),年龄计算采用 Isoplot (3.23 版)进行(Ludwig, 2003),测试中的误差标准为  $1\sigma$ ,实验详细的流程参见袁洪林等(2003)和 Yuan et al. (2004),本次实验有效的测试数据为 189 个,具体分析结果见表 2。

### 3 测试结果

滁州火山岩中锆石除极少部分具有浑圆的外形外,绝大多数结晶较好,呈典型的长柱状晶形,具有典型的岩浆震荡环带(图 3),指示其主体为岩浆结晶的产物。由锆石的阴极发光图像可以看出(图 3),所有锆石均具有清晰的内部结构。尽管少部分锆石显示具有核幔结构,但大多数锆石具有典型的单期生长的同心环带特征。锆石中的 Th/U 比值可以指示锆石的成因,岩浆锆石的 Th/U 比一般大于 0.1,而变质锆石的 Th/U 比一般小于 0.1

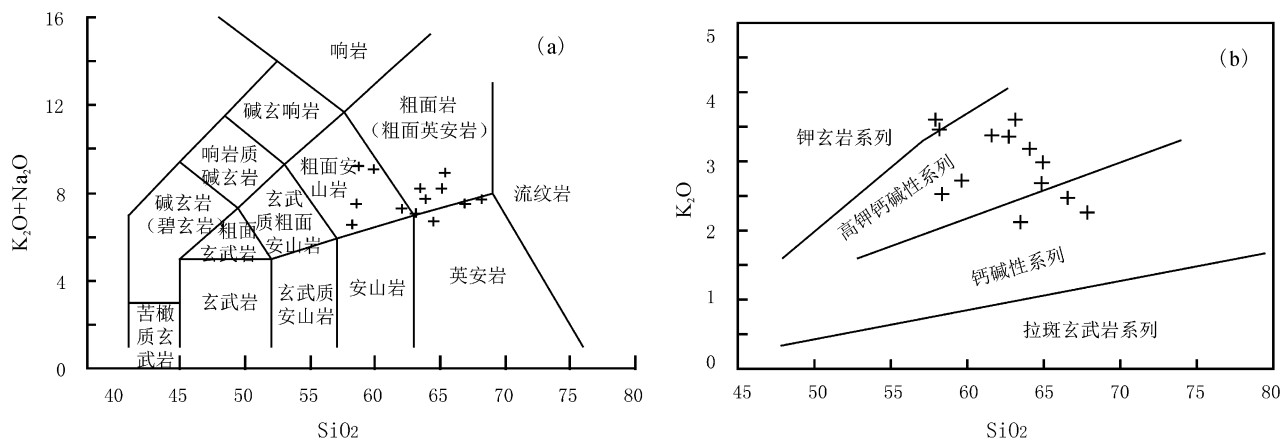


图 2 安徽滁州地区晚中生代火山岩代表性样品 TAS(total alkaline vs. silica)和  $\text{SiO}_2$ - $\text{K}_2\text{O}$  图解

Fig. 2 TAS(a) and  $\text{SiO}_2$ - $\text{K}_2\text{O}$ (b) diagram of the representative samples for the late Mesozoic volcanic rocks from the Chuzhou area, Anhui Province

表 2 安徽滁州晚中生代火山岩 LA-ICP MS 锆石 U-Pb 年代学分析结果

Table 2 LA-ICP MS zircon U-Pb dating data for the late Mesozoic volcanic rocks from the Chuzhou area, Anhui Province

分析点	U	Th	Th U	$\frac{n(^{207}\text{Pb})}{n(^{206}\text{Pb})}$		$\frac{n(^{207}\text{Pb})}{n(^{235}\text{U})}$		$\frac{n(^{206}\text{Pb})}{n(^{238}\text{U})}$		$\frac{n(^{208}\text{Pb})}{n(^{232}\text{Th})}$		年龄 ± 1σ			
				$(\times 10^{-6})$		测值	± 1σ	测值	± 1σ	测值	± 1σ	测值	± 1σ	$\frac{n(^{207}\text{Pb})}{n(^{206}\text{Pb})}$	$\frac{n(^{207}\text{Pb})}{n(^{235}\text{U})}$
TLC01-01	348	123	0.35	0.0493	0.0009	0.1368	0.0022	0.02014	0.00012	0.00666	0.00007	161±27	130±2	128.5±0.8	134±1
TLC01-02	328	77.2	0.24	0.0504	0.0012	0.1410	0.0033	0.02030	0.00013	0.00640	0.00004	213±58	134±3	129.5±0.8	129.0±0.7
TLC01-03	551	131	0.24	0.0492	0.0008	0.1358	0.0018	0.02004	0.00011	0.00657	0.00007	155±21	129±2	127.9±0.7	132±1
TLC01-04	185	15.4	0.08	0.0516	0.0013	0.1426	0.0034	0.02007	0.00014	0.00913	0.00032	266±42	135±3	128.1±0.9	184±6
TLC01-05	295	80.9	0.27	0.0491	0.0012	0.1363	0.0032	0.02012	0.00013	0.00637	0.00003	154±58	130±3	128.4±0.8	128.3±0.6
TLC01-06	466	180	0.39	0.0504	0.0010	0.1401	0.0024	0.02015	0.00012	0.00665	0.00007	214±28	133±2	128.6±0.8	134±1
TLC01-07	458	274	0.60	0.0487	0.0015	0.1369	0.0040	0.02040	0.00012	0.00646	0.00004	132±72	130±4	130.2±0.8	130.2±0.7
TLC01-08	430	60.1	0.14	0.0566	0.0009	0.1590	0.0021	0.02037	0.00012	0.01056	0.00013	476±19	150±2	130.0±0.8	212±3
TLC01-09	468	53.2	0.11	0.0492	0.0009	0.1366	0.0023	0.02013	0.00012	0.00637	0.00003	159±43	130±2	128.5±0.7	128.3±0.7
TLC01-10	287	64.4	0.22	0.0491	0.0011	0.1358	0.0028	0.02007	0.00012	0.00635	0.00003	152±51	129±2	128.1±0.8	127.9±0.6
TLC01-11	207	36.0	0.17	0.0510	0.0013	0.1416	0.0034	0.02015	0.00014	0.00635	0.00003	240±59	135±3	128.6±0.9	127.8±0.7
TLC01-12	830	875	1.05	0.0517	0.0008	0.1396	0.0019	0.01960	0.00011	0.00636	0.00004	271±20	133±2	125.1±0.7	128.1±0.8
TLC01-13	305	580	1.90	0.0608	0.0025	0.1659	0.0066	0.01979	0.00015	0.00610	0.00003	632±89	156±6	126.3±1.0	123.0±0.6
TLC01-14	130	183	1.41	0.0551	0.0016	0.1510	0.0042	0.01988	0.00016	0.00676	0.00007	417±48	143±4	127±1	136±1
TLC02-01	476	51.7	0.11	0.0490	0.0009	0.1342	0.0020	0.01988	0.00012	0.00722	0.00013	147±24	128±2	126.9±0.8	145±3
TLC02-02	510	246	0.48	0.0486	0.0008	0.1326	0.0018	0.01980	0.00011	0.00648	0.00005	128±21	126±2	126.4±0.7	131±1
TLC02-03	337	103	0.30	0.0462	0.0010	0.1258	0.0023	0.01978	0.00012	0.00632	0.00008	5±27	120±2	126.3±0.8	127±2
TLC02-04	530	40.5	0.08	0.0526	0.0010	0.1435	0.0023	0.01980	0.00012	0.01047	0.00021	310±26	136±2	126.4±0.8	211±4
TLC02-05	262	30.0	0.11	0.0495	0.0011	0.1362	0.0026	0.01998	0.00013	0.00670	0.00017	169±33	130±2	127.5±0.8	135±3
TLC02-06	652	114	0.18	0.0491	0.0008	0.1354	0.0018	0.02000	0.00011	0.00621	0.00008	153±20	129±2	127.7±0.7	125±2
TLC02-07	179	27.4	0.15	0.0544	0.0013	0.1498	0.0034	0.01999	0.00014	0.00872	0.00019	386±38	142±3	127.6±0.9	175±4
TLC02-08	400	89.4	0.22	0.0513	0.0009	0.1392	0.0022	0.01970	0.00012	0.00709	0.00009	253±25	132±2	125.8±0.8	143±2
TLC02-09	228	18.0	0.08	0.0493	0.0012	0.1352	0.0031	0.01988	0.00014	0.00786	0.00027	164±40	129±3	126.9±0.9	158±5
TLC02-10	335	65.1	0.19	0.0508	0.0011	0.1399	0.0028	0.01996	0.00012	0.00629	0.00003	233±49	133±3	127.4±0.7	126.7±0.6
TLC02-11	212	108	0.51	0.0501	0.0013	0.1383	0.0033	0.02003	0.00014	0.00621	0.00009	199±43	132±3	127.8±0.9	125±2
TLC02-12	428	44.3	0.10	0.0518	0.0009	0.1424	0.0022	0.01992	0.00012	0.00869	0.00015	278±24	135±2	127.2±0.8	175±3
TLC02-13	511	456	0.89	0.0616	0.0018	0.1716	0.0047	0.02022	0.00014	0.00623	0.00003	659±62	161±4	129.1±0.9	125.5±0.7
TLC02-14	96.8	122	1.26	0.0979	0.0027	0.2661	0.0066	0.01973	0.00017	0.00824	0.00009	1584±34	240±5	126±1	166±2
TLC03-01	474	109	0.23	0.0492	0.0008	0.1297	0.0019	0.01912	0.00011	0.00614	0.00008	159±23	124±2	122.1±0.7	124±2
TLC03-02	352	78.6	0.22	0.0498	0.0010	0.1317	0.0023	0.01920	0.00012	0.00623	0.00010	185±30	126±2	122.6±0.8	126±2
TLC03-03	429	135	0.32	0.0490	0.0009	0.1296	0.0021	0.01917	0.00011	0.00593	0.00007	149±27	124±2	122.4±0.7	120±1
TLC03-04	336	137	0.41	0.0488	0.0014	0.1299	0.0034	0.01933	0.00014	0.00620	0.00010	137±48	124±3	123.4±0.9	125±2
TLC03-05	246	87.8	0.36	0.0489	0.0016	0.1294	0.0040	0.01921	0.00016	0.00624	0.00013	142±57	124±4	123±1	126±3
TLC03-06	420	189	0.45	0.0495	0.0009	0.1307	0.0020	0.01915	0.00011	0.00610	0.00006	173±25	125±2	122.3±0.7	123±1
TLC03-07	333	96.5	0.29	0.0492	0.0010	0.1307	0.0023	0.01927	0.00012	0.00605	0.00008	159±29	125±2	123.0±0.8	122±2
TLC03-08	359	39.9	0.11	0.0495	0.0010	0.1311	0.0022	0.01920	0.00011	0.00652	0.00014	173±28	125±2	122.6±0.7	131±3
TLC03-09	455	144	0.32	0.0488	0.0008	0.1300	0.0019	0.01930	0.00011	0.00625	0.00007	140±23	124±2	123.2±0.7	126±1
TLC03-10	225	253	1.13	0.0543	0.0045	0.1436	0.0118	0.01919	0.00025	0.00600	0.00005	382±190	136±10	123±2	120.8±1.0
TLC03-11	333	564	1.70	0.0596	0.0040	0.1578	0.0103	0.01920	0.00022	0.00593	0.00004	589±148	149±9	123±1	119.6±0.8
TLC03-12	126	105	0.83	0.0483	0.0034	0.1274	0.0089	0.01914	0.00022	0.00607	0.00008	113±158	122±8	122±1	122±2
TLC04-01	1872	2580	1.38	0.0482	0.0019	0.1216	0.0047	0.01830	0.00013	0.00580	0.00003	109±90	117±4	116.9±0.8	117.0±0.5
TLC04-02	215	130	0.61	0.1761	0.0016	11.712	0.0884	0.48249	0.00264	0.13320	0.00072	2616±16	2582±7	2538±11	2527±13
TLC04-03	357	270	0.75	0.1509	0.0016	8.5635	0.0769	0.41170	0.00229	0.11536	0.00065	2356±18	2293±8	2223±10	2207±12
TLC04-04	178	141	0.79	0.1616	0.0017	10.095	0.0917	0.45320	0.00260	0.12615	0.00072	2472±19	2444±8	2409±12	2401±13
TLC04-05	362	185	0.51	0.1421	0.0013	7.5313	0.0579	0.38429	0.00205	0.10831	0.00060	2253±17	2177±7	2096±10	2079±11
TLC04-06	72.6	66.6	0.92	0.1588	0.0024	9.4644	0.1253	0.43239	0.00292	0.12057	0.00084	2442±26	2384±12	2317±13	2301±15
TLC04-07	151	154	1.02	0.1538	0.0019	9.0709	0.0975	0.42778	0.00256	0.11965	0.00070	2389±21	2345±10	2296±12	2284±13
TLC04-08	455	4.61	0.01	0.0459	0.0012	0.1155	0.0028	0.01825	0.00013	0.00804	0.00143	-8±35	111±3	116.6±0.8	162±29
TLC04-09	52.5	67.5	1.29	0.1555	0.0018	9.2765	0.0687	0.43281	0.00254	0.13462	0.00077	2408±6	2366±7	2318±11	2553±14
TLC04-10	35.8	55.3	1.54	0.0977	0.0035	1.0503	0.0360	0.07801	0.00095	0.03409	0.00048	1581±46	729±18	484±6	678±9

续表 2-1

分析点	U	Th	$\frac{\text{Th}}{\text{U}}$	$\frac{n(^{207}\text{Pb})}{n(^{206}\text{Pb})}$		$\frac{n(^{207}\text{Pb})}{n(^{235}\text{U})}$		$\frac{n(^{206}\text{Pb})}{n(^{238}\text{U})}$		$\frac{n(^{208}\text{Pb})}{n(^{232}\text{Th})}$		年龄 $\pm 1\sigma$			
	$(\times 10^{-6})$			测值	$\pm 1\sigma$	测值	$\pm 1\sigma$	测值	$\pm 1\sigma$	测值	$\pm 1\sigma$	$\frac{n(^{207}\text{Pb})}{n(^{206}\text{Pb})}$	$\frac{n(^{207}\text{Pb})}{n(^{235}\text{U})}$	$\frac{n(^{206}\text{Pb})}{n(^{238}\text{U})}$	$\frac{n(^{208}\text{Pb})}{n(^{232}\text{Th})}$
	TLC04-11	102		144	1.41	0.0733	0.0011	1.2584	0.0161	0.12461	0.00078	0.04315	0.00028	1021 $\pm$ 16	827 $\pm$ 7
TLC04-12	102	108	1.06	0.0461	0.0034	0.1175	0.0085	0.01851	0.00014	0.00718	0.00032	— $\pm$ 162	113 $\pm$ 8	118.3 $\pm$ 0.9	145 $\pm$ 7
TLC04-13	125	44.3	0.35	0.1511	0.0014	8.6794	0.0615	0.41667	0.00225	0.11674	0.00065	2358 $\pm$ 16	2305 $\pm$ 6	2245 $\pm$ 10	2232 $\pm$ 12
TLC04-14	159	91.6	0.58	0.0461	0.0022	0.1169	0.0055	0.01842	0.00015	0.00631	0.00033	— $\pm$ 103	112 $\pm$ 5	117.7 $\pm$ 0.9	127 $\pm$ 7
TLC04-15	57.0	40.8	0.72	0.0580	0.0196	0.1451	0.0490	0.01814	0.00043	0.00563	0.00058	530 $\pm$ 644	138 $\pm$ 43	116 $\pm$ 3	113 $\pm$ 12
TLC04-16	256	51.4	0.20	0.0461	0.0024	0.1167	0.0060	0.01838	0.00016	0.00596	0.00048	— $\pm$ 113	112 $\pm$ 5	117.4 $\pm$ 1.0	120 $\pm$ 10
TLC04-17	133	86.0	0.65	0.1706	0.0017	10.966	0.0902	0.46607	0.00271	0.12905	0.00073	2564 $\pm$ 17	2520 $\pm$ 8	2466 $\pm$ 12	2453 $\pm$ 13
TLC04-18	228	186	0.81	0.1257	0.0013	5.9442	0.0332	0.34322	0.00179	0.09773	0.00044	2038 $\pm$ 4	1968 $\pm$ 5	1902 $\pm$ 9	1885 $\pm$ 8
TLC04-19	435	114	0.26	0.1306	0.0010	6.3063	0.0383	0.35027	0.00180	0.09956	0.00051	2106 $\pm$ 14	2019 $\pm$ 5	1936 $\pm$ 9	1918 $\pm$ 9
TLC04-20	305	183	0.60	0.1628	0.0015	10.037	0.0726	0.44722	0.00244	0.12440	0.00067	2485 $\pm$ 16	2438 $\pm$ 7	2383 $\pm$ 11	2370 $\pm$ 12
TLC04-21	162	185	1.15	0.0510	0.0039	0.1252	0.0094	0.01780	0.00019	0.00560	0.00004	241 $\pm$ 174	120 $\pm$ 8	114 $\pm$ 1	113.0 $\pm$ 0.8
TLC04-22	303	298	0.98	0.1599	0.0017	9.8481	0.0879	0.44664	0.00258	0.12445	0.00069	2455 $\pm$ 18	2421 $\pm$ 8	2380 $\pm$ 11	2371 $\pm$ 12
TLC04-23	382	219	0.57	0.2506	0.0024	21.889	0.1116	0.63396	0.00329	0.16564	0.00074	3188 $\pm$ 4	3179 $\pm$ 5	3165 $\pm$ 13	3098 $\pm$ 13
TLC04-24	229	504	2.20	0.0484	0.0027	0.1227	0.0066	0.01837	0.00015	0.00582	0.00003	120 $\pm$ 124	118 $\pm$ 6	117.4 $\pm$ 1.0	117.3 $\pm$ 0.5
TLC05-01	54.8	48.7	0.89	0.0510	0.0051	0.1386	0.0138	0.01973	0.00026	0.00621	0.00009	239 $\pm$ 230	132 $\pm$ 12	126 $\pm$ 2	125 $\pm$ 2
TLC05-02	112	130	1.16	0.0480	0.0032	0.1296	0.0086	0.01959	0.00019	0.00621	0.00007	98 $\pm$ 149	124 $\pm$ 8	125 $\pm$ 1	125 $\pm$ 1
TLC05-03	73.8	68.8	0.93	0.1656	0.0018	10.453	0.0722	0.45779	0.00265	0.11947	0.00071	2513 $\pm$ 5	2476 $\pm$ 6	2430 $\pm$ 12	2281 $\pm$ 13
TLC05-04	208	110	0.53	0.1419	0.0015	6.7171	0.0424	0.34325	0.00186	0.08972	0.00054	2251 $\pm$ 5	2075 $\pm$ 6	1902 $\pm$ 9	1737 $\pm$ 10
TLC05-05	263	110	0.42	0.1220	0.0013	5.1946	0.0301	0.30870	0.00161	0.08475	0.00045	1986 $\pm$ 5	1852 $\pm$ 5	1734 $\pm$ 8	1644 $\pm$ 8
TLC05-06	53.5	57.3	1.07	0.1628	0.0019	9.7315	0.0754	0.43342	0.00265	0.11463	0.00074	2485 $\pm$ 6	2410 $\pm$ 7	2321 $\pm$ 12	2193 $\pm$ 13
TLC05-07	133	57.8	0.44	0.1610	0.0017	9.7920	0.0587	0.44098	0.00238	0.11476	0.00069	2466 $\pm$ 5	2415 $\pm$ 6	2355 $\pm$ 11	2196 $\pm$ 13
TLC05-08	201	104	0.52	0.0627	0.0022	0.3001	0.0104	0.03474	0.00025	0.01068	0.00010	697 $\pm$ 77	267 $\pm$ 8	220 $\pm$ 2	215 $\pm$ 2
TLC05-09	374	179	0.48	0.1833	0.0019	12.664	0.0692	0.50098	0.00262	0.12752	0.00065	2683 $\pm$ 4	2655 $\pm$ 5	2618 $\pm$ 11	2426 $\pm$ 12
TLC05-10	223	90.9	0.41	0.1571	0.0016	8.5723	0.0492	0.39582	0.00209	0.10458	0.00058	2424 $\pm$ 4	2294 $\pm$ 5	2150 $\pm$ 10	2010 $\pm$ 11
TLC05-11	132	86.4	0.65	0.0551	0.0055	0.1495	0.0147	0.01968	0.00031	0.00614	0.00008	416 $\pm$ 227	141 $\pm$ 13	126 $\pm$ 2	124 $\pm$ 2
TLC05-12	66.2	80.6	1.22	0.1210	0.0014	5.6381	0.0465	0.33797	0.00202	0.09383	0.00056	1971 $\pm$ 7	1922 $\pm$ 7	1877 $\pm$ 10	1813 $\pm$ 10
TLC05-13	168	217	1.29	0.0536	0.0019	0.1451	0.0050	0.01963	0.00017	0.00602	0.00007	355 $\pm$ 62	138 $\pm$ 4	125 $\pm$ 1	121 $\pm$ 1
TLC05-14	273	159	0.58	0.0491	0.0011	0.1328	0.0027	0.01960	0.00012	0.00619	0.00006	154 $\pm$ 36	127 $\pm$ 2	125.1 $\pm$ 0.8	125 $\pm$ 1
TLC05-15	748	478	0.64	0.1476	0.0015	7.9724	0.0410	0.39180	0.00199	0.10990	0.00047	2318 $\pm$ 4	2228 $\pm$ 5	2131 $\pm$ 9	2108 $\pm$ 9
TLC05-16	157	152	0.97	0.0505	0.0024	0.1370	0.0064	0.01968	0.00016	0.00621	0.00003	217 $\pm$ 111	130 $\pm$ 6	125.6 $\pm$ 1.0	125.0 $\pm$ 0.6
TLC05-17	152	137	0.90	0.2667	0.0027	24.303	0.1349	0.66091	0.00355	0.16451	0.00081	3286 $\pm$ 4	3281 $\pm$ 5	3271 $\pm$ 14	3078 $\pm$ 14
TLC05-18	63.7	50.2	0.79	0.1365	0.0016	7.0098	0.0538	0.37237	0.00220	0.10148	0.00067	2183 $\pm$ 6	2113 $\pm$ 7	2041 $\pm$ 10	1954 $\pm$ 12
TLC05-19	341	178	0.52	0.0497	0.0012	0.1359	0.0029	0.01982	0.00013	0.00604	0.00007	182 $\pm$ 37	129 $\pm$ 3	126.5 $\pm$ 0.8	122 $\pm$ 1
TLC05-20	105	52.2	0.50	0.1606	0.0017	10.408	0.0678	0.46996	0.00264	0.12456	0.00082	2462 $\pm$ 5	2472 $\pm$ 6	2483 $\pm$ 12	2373 $\pm$ 15
TLC05-21	362	249	0.69	0.0501	0.0012	0.1383	0.0030	0.02000	0.00014	0.00619	0.00007	201 $\pm$ 37	132 $\pm$ 3	127.7 $\pm$ 0.9	125 $\pm$ 1
TLC05-22	48.8	44.4	0.91	0.1462	0.0016	8.4014	0.0614	0.41663	0.00244	0.11766	0.00071	2302 $\pm$ 6	2275 $\pm$ 7	2245 $\pm$ 11	2248 $\pm$ 13
TLC05-23	262	128	0.49	0.1278	0.0012	6.0758	0.0487	0.34484	0.00188	0.09822	0.00054	2068 $\pm$ 17	1987 $\pm$ 7	1910 $\pm$ 9	1894 $\pm$ 10
TLC05-24	359	320	0.89	0.0530	0.0018	0.1435	0.0047	0.01966	0.00017	0.00647	0.00009	327 $\pm$ 58	136 $\pm$ 4	126 $\pm$ 1	130 $\pm$ 2
TLC06-01	808	734	0.91	0.0485	0.0012	0.1330	0.0032	0.01988	0.00012	0.00630	0.00003	124 $\pm$ 59	127 $\pm$ 3	126.9 $\pm$ 0.7	126.9 $\pm$ 0.5
TLC06-02	947	1614	1.70	0.0489	0.0008	0.1355	0.0018	0.02010	0.00011	0.00645	0.00003	143 $\pm$ 21	129 $\pm$ 2	128.3 $\pm$ 0.7	130.0 $\pm$ 0.6
TLC06-03	260	240	0.93	0.0531	0.0015	0.1457	0.0038	0.01989	0.00015	0.00654	0.00007	334 $\pm$ 46	138 $\pm$ 3	127.0 $\pm$ 0.9	132 $\pm$ 1
TLC06-04	132	107	0.81	0.0491	0.0019	0.1364	0.0052	0.02014	0.00017	0.00621	0.00009	152 $\pm$ 73	130 $\pm$ 5	129 $\pm$ 1	125 $\pm$ 2
TLC06-05	130	113	0.87	0.0522	0.0029	0.1424	0.0079	0.01980	0.00019	0.00622	0.00004	292 $\pm$ 132	135 $\pm$ 7	126 $\pm$ 1	125.3 $\pm$ 0.7
TLC06-06	3981	5223	1.31	0.0508	0.0007	0.1402	0.0013	0.02002	0.00011	0.00662	0.00003	231 $\pm$ 12	133 $\pm$ 1	127.8 $\pm$ 0.7	133.4 $\pm$ 0.6
TLC06-07	646	726	1.12	0.0489	0.0010	0.1353	0.0024	0.02005	0.00013	0.00662	0.00005	145 $\pm$ 29	129 $\pm$ 2	128.0 $\pm$ 0.8	133 $\pm$ 1
TLC06-08	84.9	63.8	0.75	0.0512	0.0032	0.1391	0.0086	0.01968	0.00023	0.00679	0.00016	251 $\pm$ 120	132 $\pm$ 8	126 $\pm$ 1	137 $\pm$ 3
TLC06-09	129	538	4.18	0.0479	0.0028	0.1304	0.0076	0.01975	0.00018	0.00631	0.00005	93 $\pm$ 113	124 $\pm$ 7	126 $\pm$ 1	127 $\pm$ 1
TLC06-10	115	89.9	0.78	0.0542	0.0023	0.1513	0.0062	0.02024	0.00019	0.00635	0.00011	379 $\pm$ 75	143 $\pm$ 5	129 $\pm$ 1	128 $\pm$ 2
TLC06-11	280	182	0.65	0.0540	0.0020	0.1515	0.0054	0.02034	0.00015	0.00636	0.00003	372 $\pm$ 84	143 $\pm$ 5	129.8 $\pm$ 1.0	128.1 $\pm$ 0.7
TLC07-01	201	216	1.08	0.0498	0.0017	0.1371	0.0044	0.01996	0.00016	0.00591	0.00007	186 $\pm$ 60	130 $\pm$ 4	127 $\pm$ 1	119 $\pm$ 1
TLC07-02	267	181	0.68	0.0528	0.0015	0.1473	0.0038	0.02021	0.00015	0.00900	0.00010	322 $\pm$ 45	139 $\pm$ 3	129.0 $\pm$ 0.9	181 $\pm$ 2

续表 2-2

分析点	U	Th	$\frac{\text{Th}}{\text{U}}$	$\frac{n(^{207}\text{Pb})}{n(^{206}\text{Pb})}$		$\frac{n(^{207}\text{Pb})}{n(^{235}\text{U})}$		$\frac{n(^{206}\text{Pb})}{n(^{238}\text{U})}$		$\frac{n(^{208}\text{Pb})}{n(^{232}\text{Th})}$		年龄 $\pm 1\sigma$			
	$(\times 10^{-6})$			测值	$\pm 1\sigma$	测值	$\pm 1\sigma$	测值	$\pm 1\sigma$	测值	$\pm 1\sigma$	$\frac{n(^{207}\text{Pb})}{n(^{206}\text{Pb})}$	$\frac{n(^{207}\text{Pb})}{n(^{235}\text{U})}$	$\frac{n(^{206}\text{Pb})}{n(^{238}\text{U})}$	$\frac{n(^{208}\text{Pb})}{n(^{232}\text{Th})}$
	TLC07-03	299		49.4	0.17	0.0518	0.0014	0.1446	0.0037	0.02023	0.00014	0.00636	0.00004	278 $\pm$ 62	137 $\pm$ 3
TLC07-04	159	223	1.41	0.0558	0.0027	0.1540	0.0072	0.02002	0.00023	0.00681	0.00011	444 $\pm$ 84	145 $\pm$ 6	128 $\pm$ 1	137 $\pm$ 2
TLC07-05	153	272	1.78	0.0548	0.0066	0.1476	0.0176	0.01955	0.00035	0.00610	0.00006	403 $\pm$ 276	140 $\pm$ 16	125 $\pm$ 2	123 $\pm$ 1
TLC07-06	155	289	1.87	0.0608	0.0076	0.1640	0.0203	0.01956	0.00039	0.00603	0.00007	633 $\pm$ 282	154 $\pm$ 18	125 $\pm$ 2	122 $\pm$ 1
TLC07-07	174	239	1.37	0.0492	0.0042	0.1328	0.0113	0.01958	0.00026	0.00619	0.00007	158 $\pm$ 195	127 $\pm$ 10	125 $\pm$ 2	125 $\pm$ 1
TLC07-08	194	270	1.39	0.0538	0.0048	0.1449	0.0127	0.01953	0.00027	0.00611	0.00005	363 $\pm$ 203	137 $\pm$ 11	125 $\pm$ 2	123.1 $\pm$ 1.0
TLC07-09	216	319	1.48	0.0481	0.0028	0.1297	0.0073	0.01955	0.00023	0.00577	0.00010	105 $\pm$ 104	124 $\pm$ 7	125 $\pm$ 1	116 $\pm$ 2
TLC07-10	136	171	1.26	0.0520	0.0034	0.1435	0.0091	0.02001	0.00021	0.00629	0.00004	285 $\pm$ 149	136 $\pm$ 8	128 $\pm$ 1	126.7 $\pm$ 0.8
TLC07-11	342	826	2.41	0.0529	0.0012	0.1428	0.0030	0.01961	0.00013	0.00619	0.00004	322 $\pm$ 36	136 $\pm$ 3	125.2 $\pm$ 0.8	124.7 $\pm$ 0.8
TLC07-12	496	1168	2.36	0.0528	0.0011	0.1428	0.0026	0.01961	0.00013	0.00639	0.00004	321 $\pm$ 29	135 $\pm$ 2	125.2 $\pm$ 0.8	128.7 $\pm$ 0.8
TLC07-13	545	1023	1.88	0.0535	0.0011	0.1450	0.0027	0.01967	0.00013	0.00666	0.00004	348 $\pm$ 30	137 $\pm$ 2	125.6 $\pm$ 0.8	134.2 $\pm$ 0.8
TLC07-14	569	896	1.58	0.0514	0.0010	0.1390	0.0024	0.01961	0.00012	0.00630	0.00004	259 $\pm$ 28	132 $\pm$ 2	125.2 $\pm$ 0.8	126.9 $\pm$ 0.8
TLC07-15	702	1195	1.70	0.0602	0.0013	0.1629	0.0032	0.01961	0.00013	0.00672	0.00005	612 $\pm$ 30	153 $\pm$ 3	125.2 $\pm$ 0.8	135 $\pm$ 1
TLC08-01	686	688	1.00	0.0536	0.0015	0.1385	0.0037	0.01875	0.00012	0.00587	0.00003	352 $\pm$ 63	132 $\pm$ 3	119.8 $\pm$ 0.7	118.3 $\pm$ 0.5
TLC08-02	19.3	10.2	0.53	0.0539	0.0174	0.1379	0.0440	0.01855	0.00077	0.00580	0.00087	367 $\pm$ 589	131 $\pm$ 39	118 $\pm$ 5	117 $\pm$ 17
TLC08-03	550	263	0.48	0.0544	0.0012	0.1381	0.0028	0.01842	0.00013	0.00652	0.00008	386 $\pm$ 33	131 $\pm$ 3	117.7 $\pm$ 0.8	131 $\pm$ 2
TLC08-04	97.3	58.2	0.60	0.0508	0.0027	0.1319	0.0067	0.01884	0.00019	0.00609	0.00015	232 $\pm$ 99	126 $\pm$ 6	120 $\pm$ 1	123 $\pm$ 3
TLC08-05	249	128	0.51	0.0496	0.0017	0.1270	0.0042	0.01857	0.00015	0.00609	0.00011	177 $\pm$ 63	121 $\pm$ 4	118.6 $\pm$ 0.9	123 $\pm$ 2
TLC08-06	107	97.2	0.91	0.0545	0.0026	0.1424	0.0066	0.01897	0.00022	0.00691	0.00013	390 $\pm$ 84	135 $\pm$ 6	121 $\pm$ 1	139 $\pm$ 3
TLC08-07	163	105	0.64	0.0461	0.0020	0.1198	0.0051	0.01887	0.00017	0.00626	0.00023	- $\pm$ 92	115 $\pm$ 5	121 $\pm$ 1	126 $\pm$ 5
TLC08-08	186	93.3	0.50	0.0432	0.0022	0.1095	0.0054	0.01837	0.00016	0.00585	0.00012	-111 $\pm$ 92	105 $\pm$ 5	117 $\pm$ 1	118 $\pm$ 2
TLC08-09	151	38.2	0.25	0.0509	0.0026	0.1309	0.0065	0.01865	0.00018	0.00587	0.00005	236 $\pm$ 119	125 $\pm$ 6	119 $\pm$ 1	118 $\pm$ 1
TLC08-10	406	37.0	0.09	0.0499	0.0013	0.1288	0.0033	0.01870	0.00013	0.00590	0.00007	192 $\pm$ 63	123 $\pm$ 3	119.4 $\pm$ 0.8	119 $\pm$ 1
TLC08-11	149	108	0.72	0.0478	0.0029	0.1239	0.0074	0.01879	0.00020	0.00596	0.00008	91 $\pm$ 136	119 $\pm$ 7	120 $\pm$ 1	120 $\pm$ 2
TLC08-12	626	133	0.21	0.0511	0.0011	0.1335	0.0028	0.01895	0.00012	0.00597	0.00004	244 $\pm$ 51	127 $\pm$ 2	121.0 $\pm$ 0.8	120.2 $\pm$ 0.8
TLC09-01	676	607	0.90	0.0492	0.0009	0.1297	0.0021	0.01911	0.00012	0.00632	0.00005	158 $\pm$ 27	124 $\pm$ 2	122.0 $\pm$ 0.8	127 $\pm$ 1
TLC09-02	233	259	1.11	0.0571	0.0043	0.1515	0.0111	0.01924	0.00022	0.00597	0.00004	497 $\pm$ 169	143 $\pm$ 10	123 $\pm$ 1	120.4 $\pm$ 0.9
TLC09-03	40.2	107	2.67	0.0604	0.0102	0.1589	0.0266	0.01907	0.00042	0.00588	0.00006	619 $\pm$ 380	150 $\pm$ 23	122 $\pm$ 3	119 $\pm$ 1
TLC09-04	80.8	51.2	0.63	0.0452	0.0035	0.1213	0.0093	0.01945	0.00024	0.00658	0.00019	-7 $\pm$ 145	116 $\pm$ 8	124 $\pm$ 2	133 $\pm$ 4
TLC09-05	139	114	0.82	0.0739	0.0024	0.1976	0.0060	0.01939	0.00017	0.00757	0.00011	1040 $\pm$ 47	183 $\pm$ 5	124 $\pm$ 1	152 $\pm$ 2
TLC09-06	254	877	3.45	0.0503	0.0014	0.1326	0.0035	0.01914	0.00014	0.00608	0.00004	207 $\pm$ 47	126 $\pm$ 3	122.2 $\pm$ 0.9	122.5 $\pm$ 0.8
TLC09-07	279	365	1.31	0.0553	0.0025	0.1474	0.0064	0.01931	0.00021	0.00614	0.00010	426 $\pm$ 78	140 $\pm$ 6	123 $\pm$ 1	124 $\pm$ 2
TLC09-08	227	1224	5.40	0.0567	0.0046	0.1523	0.0124	0.01948	0.00021	0.00606	0.00003	480 $\pm$ 187	144 $\pm$ 11	124 $\pm$ 1	122.1 $\pm$ 0.6
TLC09-09	209	184	0.88	0.0784	0.0027	0.2091	0.0068	0.01934	0.00019	0.00789	0.00011	1158 $\pm$ 48	193 $\pm$ 6	123 $\pm$ 1	159 $\pm$ 2
TLC10-01	79.8	74.4	0.93	0.0601	0.0022	0.1624	0.0056	0.01961	0.00016	0.00756	0.00010	607 $\pm$ 60	153 $\pm$ 5	125 $\pm$ 1	152 $\pm$ 2
TLC10-02	591	122	0.21	0.1850	0.0019	11.829	0.0639	0.46363	0.00240	0.11537	0.00064	2699 $\pm$ 4	2591 $\pm$ 5	2456 $\pm$ 11	2207 $\pm$ 12
TLC10-03	262	133	0.51	0.1481	0.0015	8.3337	0.0477	0.40815	0.00214	0.10752	0.00054	2324 $\pm$ 4	2268 $\pm$ 5	2206 $\pm$ 10	2064 $\pm$ 10
TLC10-04	115	89.3	0.78	0.1682	0.0018	10.481	0.0664	0.45193	0.00250	0.11755	0.00064	2540 $\pm$ 5	2478 $\pm$ 6	2404 $\pm$ 11	2246 $\pm$ 12
TLC10-05	206	146	0.71	0.0511	0.0014	0.1394	0.0035	0.01979	0.00014	0.00615	0.00007	244 $\pm$ 44	133 $\pm$ 3	126.3 $\pm$ 0.9	124 $\pm$ 1
TLC10-06	332	80.7	0.24	0.0486	0.0011	0.1332	0.0028	0.01988	0.00013	0.00649	0.00010	127 $\pm$ 36	127 $\pm$ 2	126.9 $\pm$ 0.8	131 $\pm$ 2
TLC10-07	72.9	54.6	0.75	0.1601	0.0018	9.1253	0.0705	0.41347	0.00250	0.10672	0.00074	2456 $\pm$ 6	2351 $\pm$ 7	2231 $\pm$ 11	2050 $\pm$ 14
TLC10-08	519	360	0.69	0.1602	0.0016	9.5715	0.0524	0.43323	0.00224	0.11458	0.00051	2458 $\pm$ 4	2394 $\pm$ 5	2320 $\pm$ 10	2193 $\pm$ 9
TLC10-09	170	85.0	0.50	0.0488	0.0017	0.1323	0.0043	0.01967	0.00015	0.00653	0.00011	137 $\pm$ 63	126 $\pm$ 4	125.6 $\pm$ 0.9	132 $\pm$ 2
TLC10-10	535	138	0.26	0.1270	0.0014	6.0860	0.0384	0.34770	0.00187	0.10024	0.00067	2056 $\pm$ 5	1988 $\pm$ 6	1924 $\pm$ 9	1931 $\pm$ 12
TLC10-11	701	121	0.17	0.0493	0.0009	0.1339	0.0021	0.01968	0.00012	0.00570	0.00009	164 $\pm$ 25	128 $\pm$ 2	125.6 $\pm$ 0.8	115 $\pm$ 2
TLC10-12	262	125	0.48	0.0494	0.0015	0.1348	0.0039	0.01980	0.00015	0.00674	0.00010	166 $\pm$ 53	128 $\pm$ 3	126.4 $\pm$ 0.9	136 $\pm$ 2
TLC10-13	104	42.8	0.41	0.1200	0.0015	3.0526	0.0341	0.18447	0.00113	0.05287	0.00031	1957 $\pm$ 23	1421 $\pm$ 9	1091 $\pm$ 6	1041 $\pm$ 6
TLC10-14	146	68.2	0.47	0.0496	0.0023	0.1341	0.0060	0.01963	0.00020	0.00624	0.00015	174 $\pm$ 86	128 $\pm$ 5	125 $\pm$ 1	126 $\pm$ 3
TLC10-15	300	147	0.49	0.0523	0.0021	0.1407	0.0054	0.01951	0.00016	0.00612	0.00004	299 $\pm$ 92	134 $\pm$ 5	125 $\pm$ 1	123.4 $\pm$ 0.7
TLC10-16	283	172	0.61	0.0502	0.0018	0.1345	0.0046	0.01945	0.00014	0.00614	0.00003	203 $\pm$ 84	128 $\pm$ 4	124.2 $\pm$ 0.9	123.7 $\pm$ 0.6
TLC10-17	158	98.1	0.62	0.1580	0.0019	9.5544	0.0960	0.43861	0.00277	0.12235	0.00076	2434 $\pm$ 21	2393 $\pm$ 9	2344 $\pm$ 12	2333 $\pm$ 14

续表 2-3

分析点	U	Th	Th/U	$\frac{n(^{207}\text{Pb})}{n(^{206}\text{Pb})}$		$\frac{n(^{207}\text{Pb})}{n(^{235}\text{U})}$		$\frac{n(^{206}\text{Pb})}{n(^{238}\text{U})}$		$\frac{n(^{208}\text{Pb})}{n(^{232}\text{Th})}$		年龄 $\pm 1\sigma$			
	( $\times 10^{-6}$ )			测值	$\pm 1\sigma$	测值	$\pm 1\sigma$	测值	$\pm 1\sigma$	测值	$\pm 1\sigma$	$\frac{n(^{207}\text{Pb})}{n(^{206}\text{Pb})}$	$\frac{n(^{207}\text{Pb})}{n(^{235}\text{U})}$	$\frac{n(^{206}\text{Pb})}{n(^{238}\text{U})}$	$\frac{n(^{208}\text{Pb})}{n(^{232}\text{Th})}$
	TLC10-18	212		121	0.57	0.0517	0.0021	0.1388	0.0055	0.01946	0.00016	0.00612	0.00004	273 $\pm$ 95	132 $\pm$ 5
TLC10-19	211	113	0.53	0.1645	0.0017	9.5263	0.0784	0.42005	0.00244	0.11672	0.00066	2502 $\pm$ 17	2390 $\pm$ 8	2261 $\pm$ 11	2231 $\pm$ 12
TLC10-20	267	168	0.63	0.0491	0.0015	0.1343	0.0039	0.01986	0.00015	0.00682	0.00009	151 $\pm$ 54	128 $\pm$ 3	126.8 $\pm$ 0.9	137 $\pm$ 2
TLC10-21	1016	205	0.20	0.0490	0.0008	0.1322	0.0020	0.01958	0.00011	0.00620	0.00003	146 $\pm$ 38	126 $\pm$ 2	125 $\pm$ 0.7	124.9 $\pm$ 0.6
TLC10-22	310	133	0.43	0.1615	0.0014	8.7044	0.0596	0.39087	0.00210	0.10880	0.00058	2472 $\pm$ 15	2308 $\pm$ 6	2127 $\pm$ 10	2088 $\pm$ 10
TLC10-23	336	140	0.42	0.0538	0.0017	0.1447	0.0043	0.01949	0.00016	0.00700	0.00012	364 $\pm$ 53	137 $\pm$ 4	124 $\pm$ 1	141 $\pm$ 2
TLC11-01	1142	1323	1.16	0.0557	0.0014	0.1422	0.0035	0.01853	0.00011	0.00577	0.00002	607 $\pm$ 60	135 $\pm$ 3	118.3 $\pm$ 0.7	116.3 $\pm$ 0.5
TLC11-02	760	914	1.20	0.0518	0.0011	0.1355	0.0024	0.01896	0.00012	0.00570	0.00004	2699 $\pm$ 4	129 $\pm$ 2	121.1 $\pm$ 0.8	114.9 $\pm$ 0.8
TLC11-03	121	125	1.03	0.0708	0.0027	0.1869	0.0069	0.01914	0.00020	0.00806	0.00012	2324 $\pm$ 4	174 $\pm$ 6	122 $\pm$ 1	162 $\pm$ 2
TLC11-04	173	228	1.31	0.0706	0.0030	0.1843	0.0076	0.01894	0.00021	0.00699	0.00011	2540 $\pm$ 5	172 $\pm$ 6	121 $\pm$ 1	141 $\pm$ 2
TLC11-05	168	279	1.66	0.0517	0.0024	0.1318	0.0060	0.01851	0.00019	0.00587	0.00008	244 $\pm$ 44	126 $\pm$ 5	118 $\pm$ 1	118 $\pm$ 2
TLC11-06	208	256	1.23	0.0473	0.0032	0.1217	0.0080	0.01865	0.00021	0.00593	0.00007	127 $\pm$ 36	117 $\pm$ 7	119 $\pm$ 1	119 $\pm$ 1
TLC11-07	101	234	2.31	0.0630	0.0093	0.1583	0.0231	0.01824	0.00034	0.00560	0.00006	2456 $\pm$ 6	149 $\pm$ 20	117 $\pm$ 2	113 $\pm$ 1
TLC11-08	781	1652	2.12	0.0598	0.0010	0.1572	0.0022	0.01908	0.00011	0.00644	0.00004	2458 $\pm$ 4	148 $\pm$ 2	121.8 $\pm$ 0.7	129.7 $\pm$ 0.8
TLC11-09	833	1692	2.03	0.0563	0.0020	0.1480	0.0051	0.01905	0.00013	0.00593	0.00003	137 $\pm$ 63	140 $\pm$ 5	121.7 $\pm$ 0.8	119.5 $\pm$ 0.5
TLC11-10	121	99.2	0.82	0.0752	0.0034	0.1985	0.0085	0.01914	0.00024	0.00810	0.00016	2056 $\pm$ 5	184 $\pm$ 7	122 $\pm$ 2	163 $\pm$ 3
TLC12-01	452	197	0.44	0.0575	0.0013	0.1638	0.0037	0.02068	0.00013	0.00642	0.00003	509 $\pm$ 53	154 $\pm$ 3	131.9 $\pm$ 0.8	129.3 $\pm$ 0.7
TLC12-02	314	305	0.97	0.0620	0.0015	0.1809	0.0038	0.02116	0.00015	0.00754	0.00007	674 $\pm$ 33	169 $\pm$ 3	135.0 $\pm$ 0.9	152 $\pm$ 1
TLC12-03	392	8.14	0.02	0.0498	0.0012	0.1433	0.0033	0.02085	0.00014	0.00658	0.00023	187 $\pm$ 57	136 $\pm$ 3	133.0 $\pm$ 0.9	133 $\pm$ 5
TLC12-04	148	151	1.02	0.0576	0.0026	0.1676	0.0074	0.02112	0.00019	0.00655	0.00004	513 $\pm$ 102	157 $\pm$ 6	135 $\pm$ 1	132.0 $\pm$ 0.8
TLC12-05	121	120	0.99	0.0557	0.0023	0.1584	0.0063	0.02063	0.00017	0.00643	0.00004	439 $\pm$ 93	149 $\pm$ 6	132 $\pm$ 1	129.5 $\pm$ 0.7
TLC12-06	169	128	0.76	0.0545	0.0018	0.1552	0.0050	0.02064	0.00018	0.00568	0.00009	393 $\pm$ 56	147 $\pm$ 4	132 $\pm$ 1	114 $\pm$ 2
TLC12-07	73.7	45.2	0.61	0.0569	0.0038	0.1619	0.0105	0.02063	0.00024	0.00641	0.00005	489 $\pm$ 150	152 $\pm$ 9	132 $\pm$ 1	129 $\pm$ 1
TLC12-08	373	150	0.40	0.0500	0.0010	0.1417	0.0024	0.02055	0.00013	0.00647	0.00007	195 $\pm$ 27	135 $\pm$ 2	131.1 $\pm$ 0.8	130 $\pm$ 1
TLC12-09	91.7	56.5	0.62	0.0521	0.0028	0.1510	0.0080	0.02102	0.00020	0.00660	0.00004	289 $\pm$ 126	143 $\pm$ 7	134 $\pm$ 1	133.0 $\pm$ 0.8
TLC12-10	215	150	0.70	0.0497	0.0018	0.1432	0.0050	0.02090	0.00015	0.00660	0.00003	181 $\pm$ 85	136 $\pm$ 4	133.3 $\pm$ 1	133.0 $\pm$ 0.7
TLC12-11	246	157	0.64	0.0543	0.0016	0.1554	0.0044	0.02075	0.00017	0.00631	0.00009	383 $\pm$ 48	147 $\pm$ 4	132 $\pm$ 1	127 $\pm$ 2
TLC12-12	167	108	0.65	0.0549	0.0019	0.1594	0.0052	0.02105	0.00018	0.00736	0.00011	408 $\pm$ 57	150 $\pm$ 5	134 $\pm$ 1	148 $\pm$ 2
TLC13-01	816	810	0.99	0.0512	0.0019	0.1450	0.0052	0.02052	0.00014	0.00646	0.00003	251 $\pm$ 86	137 $\pm$ 5	131.0 $\pm$ 0.9	130.1 $\pm$ 0.7
TLC13-02	146	121	0.83	0.0496	0.0020	0.1401	0.0054	0.02047	0.00018	0.00639	0.00010	178 $\pm$ 74	133 $\pm$ 5	131 $\pm$ 1	129 $\pm$ 2
TLC13-03	263	242	0.92	0.0477	0.0013	0.1357	0.0034	0.02063	0.00015	0.00643	0.00007	83 $\pm$ 46	129 $\pm$ 3	131.6 $\pm$ 0.9	130 $\pm$ 1
TLC13-04	254	189	0.74	0.0625	0.0017	0.1787	0.0045	0.02074	0.0048	0.00010	691 $\pm$ 41	167 $\pm$ 4	132 $\pm$ 1	191 $\pm$ 2	
TLC13-05	191	179	0.94	0.0566	0.0023	0.1608	0.0064	0.02062	0.00020	0.00698	0.00011	474 $\pm$ 70	151 $\pm$ 6	132 $\pm$ 1	141 $\pm$ 2
TLC13-06	50.6	44.5	0.88	0.0602	0.0031	0.1697	0.0085	0.02048	0.00022	0.00756	0.00015	609 $\pm$ 90	159 $\pm$ 7	131 $\pm$ 1	152 $\pm$ 3
TLC13-07	89.0	190	2.13	0.0599	0.0028	0.1676	0.0076	0.02030	0.00020	0.00717	0.00008	599 $\pm$ 82	157 $\pm$ 7	130 $\pm$ 1	144 $\pm$ 2
TLC13-08	260	406	1.56	0.0660	0.0017	0.1864	0.0045	0.02050	0.00016	0.00732	0.00006	805 $\pm$ 37	174 $\pm$ 4	131 $\pm$ 1	147 $\pm$ 1
TLC13-09	70.8	33.0	0.47	0.0466	0.0045	0.1322	0.0127	0.02056	0.00034	0.00655	0.00037	31 $\pm$ 208	126 $\pm$ 11	131 $\pm$ 2	132 $\pm$ 7

(Belousova et al., 2002)。滁州火山岩锆石中 Th/U 比值除少数小于 0.1 以外,大多数大于 0.1,属典型的岩浆成因锆石。因此,滁州火山岩中锆石除了部分样品具古老岩浆锆石及变质锆石外,锆石群形态单一,多数为喷发期岩浆活动一次结晶而形成的,能代表火山岩的形成年龄。

由于本次工作用于分选锆石的每个样品采样均较充足(单样重大于 15kg),分选出的锆石颗粒较多,保证了各样品用于 U-Pb 年代学测试的新生锆石均为晶体特征完好、形态类似、无变质壳的颗粒。13 个样品的谐和图及  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄如图

4。测试结果显示,滁州火山岩各层位的喷发年龄分布于 132~116Ma 之间,与其所在层位顺序吻合且在时间上有一定的跨度。尽管一些样品之间的年龄差别已经在同位素分析的精度范围内,但这些特征反映了滁州火山岩是长期的(16Ma)、脉动式的(间歇式的)岩浆喷发的产物。

火山岩样品中,除 TLC01、TLC12 和 TLC13 未见古老锆石外,其余样品均含有古老的岩浆锆石和变质锆石(考虑到主要获取岩浆的喷发年龄,部分样品中的古老锆石未测试)。这些古老锆石年龄均大于 1.7Ga,主要分布在 1.8~2.6Ga 之间(表 2),还



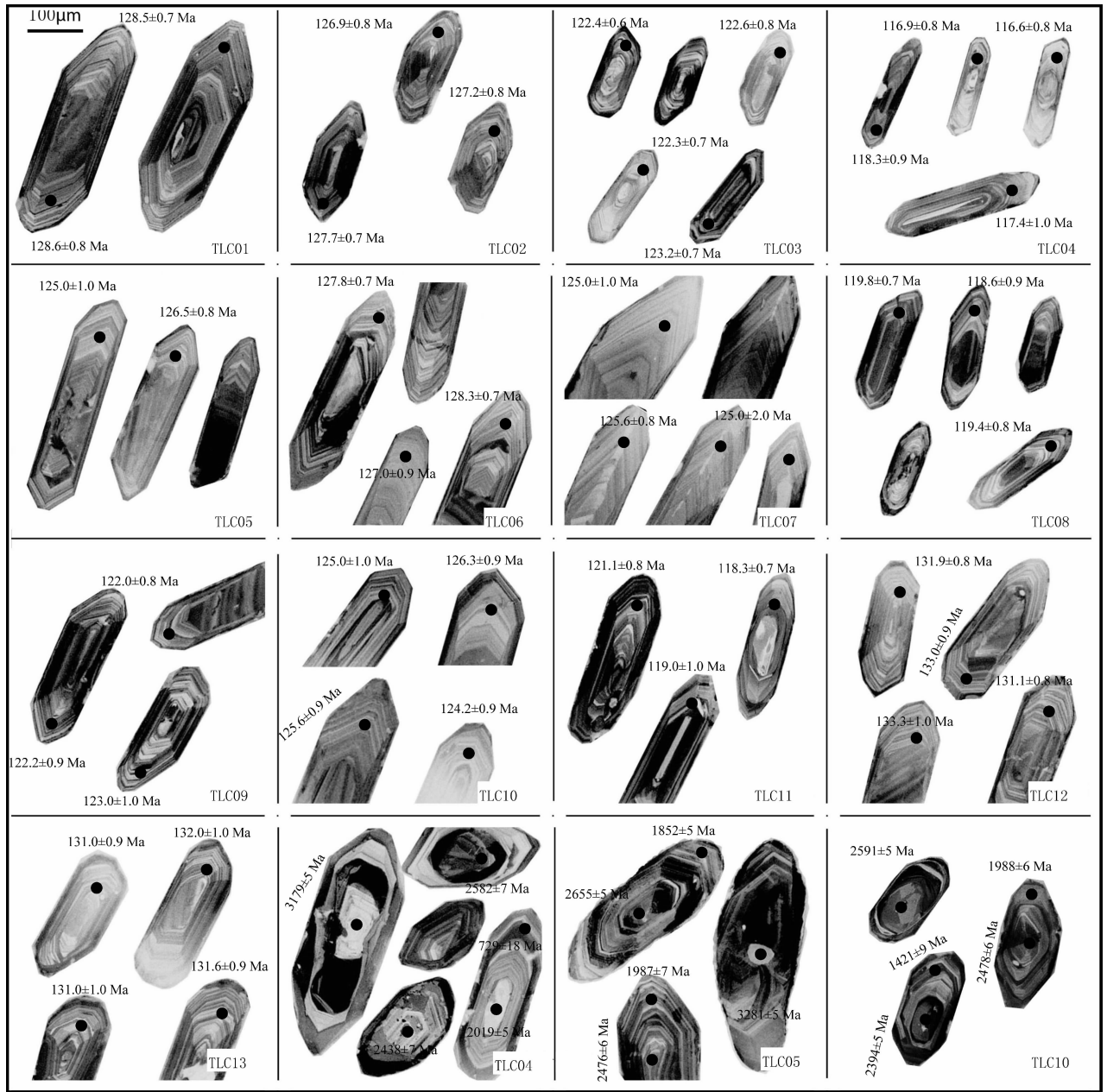


图 3 安徽滁州晚中生代火山岩样品部分阴极发光(CL)图像及测试位置

Fig. 3 Some Cathode luminescence (CL) images of selected zircons in the late Mesozoic volcanic rocks from the Chuzhou area, Anhui Province

有少数锆石具有 3.0Ga 以上的年龄,其中最大的年龄约 3271Ma(图 3)。样品中的古老锆石在谐和曲线上均形成了上、下交点年龄(图 4), TLC04 的上交点年龄为  $2606 \pm 54\text{Ma}$ , 下交点年龄为  $1721 \pm 86\text{Ma}$ ; TLC05 的上交点年龄为  $2614 \pm 130\text{Ma}$ , 下交点年龄为  $1580 \pm 180\text{Ma}$ ; TLC10 的上交点年龄为  $2680 \pm 220\text{Ma}$ , 下交点年龄为  $1650 \pm 400\text{Ma}$ 。这几组年龄具有很好的一致性,即均具有 1.7Ga 左右的下交点年龄和 2.6Ga 左右的上交点年龄。

## 4 问题讨论

### 4.1 喷发时代及源区特征

本次工作获得了滁州火山岩 132~116Ma 的喷发年龄。这一结果说明该套火山岩为早白垩世的喷发产物,而不是前人认为的晚侏罗世(安徽省地质矿产局区域地质调查队,1988)。除了采样的偏在性,总体上这些数据指示该套火山岩至少经历了约 16Ma 的喷发过程。尽管部分年龄之间的差异已经

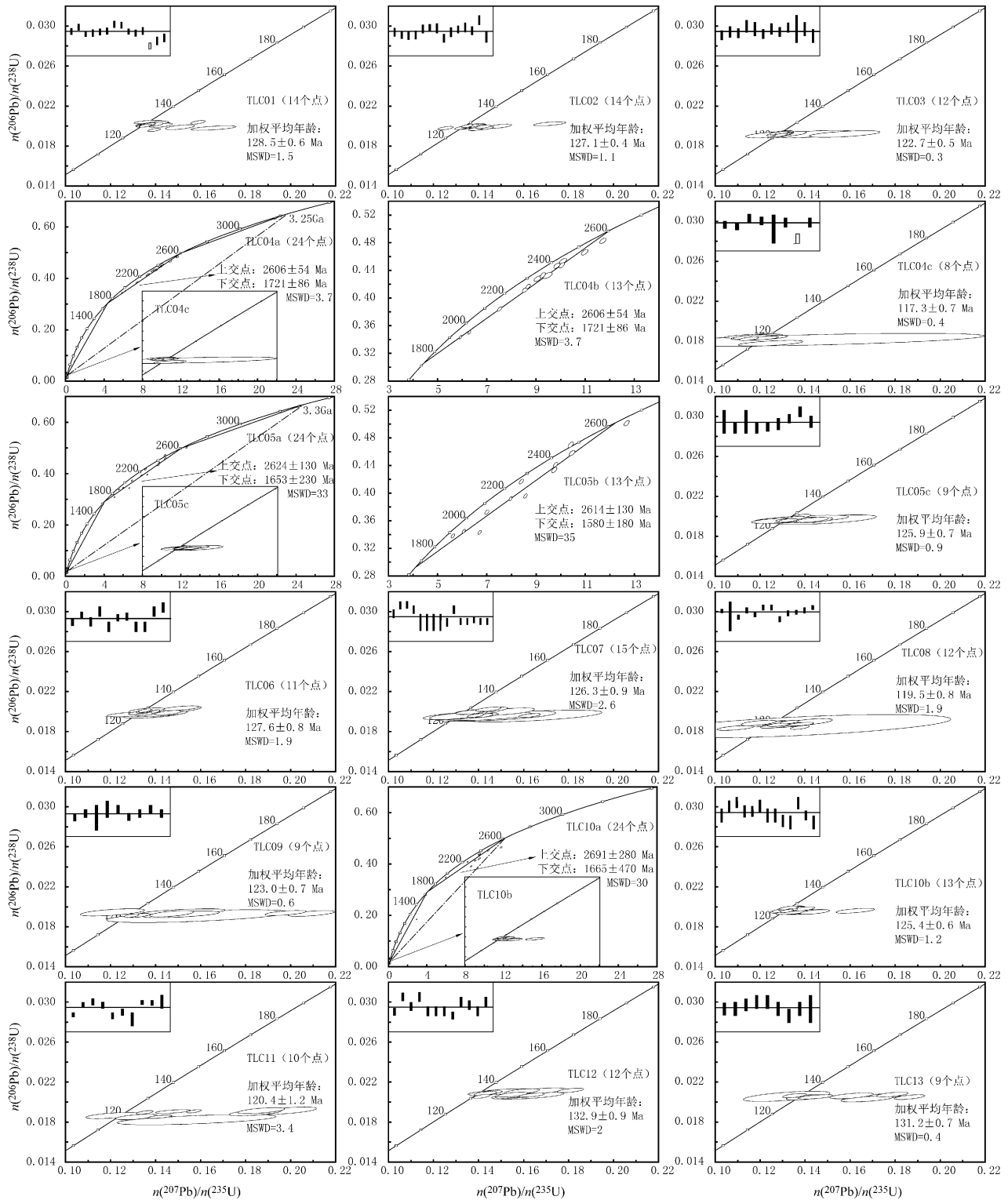


图 4 安徽滁州晚中生代火山岩 LA-ICP MS 单颗粒锆石 U-Pb 谐和图  
Fig. 4 U-Pb Concordia diagram of single-grain zircon LA-ICP MS analysis of late Mesozoic volcanic rocks from the Chuzhou area, Anhui Province

小于同位素体系的误差范围,但整体上看该套火山岩仍然属于较长时间范围内的多期喷发产物,研究

区内大量发育的火山集块岩及沉积夹层佐证了这一多期喷发的结论。测试结果表明,多数样品的喷发

年龄集中在 126Ma 左右,代表了岩浆喷发的峰期时间。

除火山岩的喷发年龄外,本次测试工作还获得了大量的古老锆石年龄。这些年龄主要集中于 1.6~3.3Ga 之间,且均在谐和曲线上形成了约 2.6Ga 和 1.7Ga 左右的上、下交点年龄。由于这几个样品的交点年龄非常一致,且与华北克拉通实际的地质背景相吻合,因此这些年龄是有意义的地质年龄。样品中的古老锆石按年龄的分布特征与华北克拉通的陆壳演化时间相吻合,而样品中也未发现 0.7Ga 左右的古老锆石,因此我们认为其岩浆来源于古老的华北克拉通源区。显然,少数锆石 3.3Ga 左右的年龄与华北陆壳的早期增生事件相吻合,而 2.6Ga 则代表了华北克拉通陆壳的主体生长时间,1.7Ga 左右的年龄对应于华北克拉通大规模麻粒岩相变质过程及基底克拉通化(中条运动)的完成时间。

从浅部来看,滁州火山岩位于郯庐断裂带的东侧边界上,在浅部地层上归属于扬子克拉通的下扬子小区,而古老锆石却指示岩浆应来源于古老的华北克拉通。这一现象指示这里的深部岩石圈与地表是解耦的。该现象可以用 Li(1994)提出的陆壳拆离模型来解释,即俯冲后的扬子上地壳与下部的下地壳及岩石圈地幔发生分离,华北岩石圈在挤压背景下楔入其中,从而出现了浅部与深部岩石圈解耦的现象。Chung(1999)根据南京北侧六合新生代玄武岩的 Sr—Nd—Pb 同位素特征,也认为该处的深部岩石圈应为华北型的,地表与深部岩石圈是解耦的,与本次古老锆石反映的信息一致。

#### 4.2 郯庐断裂带的伸展活动时间

众所周知,华北克拉通东部及其附近的构造块体在晚中生代时期曾发生了一次规模巨大的岩浆事件(许文良等,2004;Wu et al.,2005;翟明国等,2005),滁州火山岩即是该次岩浆事件的产物之一。有关这一事件中岩浆岩的岩石学特征,不同的研究者从不同的角度阐述了其类型特征,如橄榄安粗岩系(有时属于高钾钙碱性岩系)、富钾火山岩、高镁安山岩(闪长岩)、埃达克质火山岩(花岗岩)等(邱检生等,1996;潘国强等,2001;Gao et al.,2004;王晓蕊等,2005;凌文黎等,2006)。尽管这些划分是基于不同地区的具体岩石特征确定的,但整体上看这一时期的火山岩多具有钙碱性为主、富钾、高镁、高 Sr 低 Y、类似埃达克质及双峰式等特征,因此其形成应具有统一的动力学背景。

钙碱性火山岩的形成背景往往有两种主要的类

型,一种是形成于与俯冲带相关的构造背景下,另一种是形成于岩石圈伸展的构造背景下(李伍平和路凤香,1999)。考虑到中国东部晚中生代时期以板内构造背景为主,因此这一时期的钙碱性岩浆岩均被认为与岩石圈的伸展、减薄有关。目前普遍认为侏罗纪以后中国东部发生了区域性的岩石圈伸展运动(张岳桥等,2004),但具体的开始时间并没有很好的限定。中国东部的岩石圈结构具有明显的不均一性(周新华,2006),岩石圈减薄在时空上也存在明显的不一致性(Zhang et al.,2003;徐义刚等,2004;闫峻和陈江峰,2005),因此局部的伸展运动开始时间是存在差异的。地壳浅部大规模伸展断陷的开始及受断陷控制的钙碱性岩浆活动的开始均应大致对应于岩石圈伸展的开始时间,因此可以根据各地此类岩浆活动的开始时间限定岩石圈减薄和伸展活动开始时间。

大量的地质事实证明,郯庐断裂带在早白垩世初曾发生过一次大规模的左行平移事件,并在随后发生了区域性的岩石圈伸展运动(Xu & Zhu,1994;朱光等,2001;2005a;刘国生等,2002)。朱光等(2005a)曾根据肥东地区走滑糜棱岩的  $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$  年龄确定了该期平移事件发生于 143Ma 左右,但随后的伸展运动开始时间一直没有很好的年代学数据进行约束。在郯庐断裂带的山东段(沂沭断裂带),邱检生等(2001a)获得了五莲分岭山青山组钙碱性火山岩 109.9~108.2Ma 的  $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$  年龄;在张八岭隆起段,牛漫兰等(2002)获得了瓦屋刘、瓦屋薛岩体 127.9 和 120.0Ma 的黑云母  $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$  年龄,李学明等(1985)获得了管店岩体 128Ma 的锆石 U-Pb 年龄。以上这些年龄均代表这些钙碱性火山岩的形成年龄,可能对应于断裂带各部位岩石圈伸展的开始时间。在已有的同期岩浆岩年代学数据中,本次工作发现的 132Ma 的火山岩是目前郯庐断裂带上形成年龄最老的高钾钙碱性岩浆岩,因此 132Ma 最接近郯庐断裂带伸展活动的开始时间。

以上岩浆岩年代学数据表明,郯庐断裂带在安徽部分(张八岭隆起段)的钙碱性岩浆开始时间明显早于其在山东部分(沂沭断裂带)开始时间。因此,该断裂带在安徽部分的伸展活动开始时间应明显早于山东部分的开始时间,反映出断裂带上伸展活动时间在空间上存在着一定的差异。

#### 4.3 区域对比及岩石圈减薄

中国东部晚中生代的岩浆活动在浅部地质上往往与区域上大规模的伸展断陷、构造体制转折及成

矿作用相对应,其深部过程则与中国东部的岩石圈减薄、转型相对应。目前的主流观点认为,该期岩浆活动是中国东部岩石圈大规模减薄过程中的产物,在时间上对应于岩石圈减薄的峰期(Wu et al., 2005; 许文良等, 2004)。然而,尽管这些岩浆活动大多数形成于早白垩世,但具体形成时间却略有差异,反映了岩石圈减薄的时空差异性。

华北克拉通内部的鲁西地区属于典型的板内环境,是探讨断裂带下岩石圈减薄问题较好的对比实例。邱检生等(2001b)在鲁西的蒙阴、费县两地获得了富钾火山岩  $^{39}\text{Ar}$ - $^{40}\text{Ar}$  年龄为 124.3 ~ 114.8Ma; 裴福萍等(2004)获得的费县玄武岩的 K-Ar 年龄为 119Ma; Zhang 等(2002)得到的方城玄武岩和安山岩的 K-Ar 年龄分别为 124.9Ma 和 116.2Ma。本次工作获得的 132~116Ma 的火山岩年龄,显然早于鲁西地区的火山岩形成时代,并有着长期的喷发历史(16Ma)。岩石圈减薄及其随后的重力均衡下的伸展运动是这一时期岩浆活动的主要因素,较早的岩浆活动开始时间和较长的岩浆喷发历程说明郯庐断裂带比克拉通内部伸展运动更为强烈,暗示郯庐断裂带上岩石圈具有更为强烈的减薄程度。

中国东部的岩石圈减薄问题已经有较多的研究,但具体的减薄机制及时间还有待探讨(Gao et al., 2004; Deng et al., 2004; 许文良等, 2004; Xu et al., 2004; Wu et al., 2005; 张宏福等, 2005; Zhang et al., Lin et al., 2005; 周新华, 2006; 郑建平等, 2006)。从中国东部中—新生代岩浆岩及岩石圈内化学成分的演化特点来看,很可能是岩石圈底部的持续减薄造成了岩石圈内部强烈的地球化学过程和壳—幔混源的岩浆过程。从岩浆岩的地球化学特点来看(另文发表),这一过程和机制在郯庐断裂带上与克拉通内部并无显著区别,仅仅在时间和演化程度上有一定的区别。我们认为中国东部晚中生代时期由特提斯构造域向滨太平洋构造域的转变(构造体制转折)可能是加速中国东部岩石圈减薄、伸展及诱发大规模岩浆活动的重要因素,而郯庐断裂带在这一构造背景下先发生的左行平移(朱光等, 2005a),则可能是造成断裂带上与华北克拉通内部岩浆活动之间差异的原因。断裂带的存在为岩浆及热源上升提供了有利的通道,同时断裂的减压熔融作用及广泛的流体活动均是岩浆形成的有利因素,而断裂伸展活动时的剪切加热作用可以造成岩石圈内几百度的升温(Schott et al., 2000; Li, 2000),并

能大大降低岩石圈的强度(Burov et al., 1998),从而有利于加剧岩石圈减薄的程度和大规模岩浆作用的形成。

## 5 结论

本文对滁州火山岩 LA-ICP MS 单颗粒锆石 U-Pb 同位素年代学进行了研究,并结合中国东部中生代以来的岩浆活动特点,探讨了岩浆活动与岩石圈减薄的关系,主要得到以下结论:

(1) 郯庐断裂带上滁州地区的火山岩形成于早白垩世,具体喷发时期在 132~116Ma 之间,经历了约 16Ma 的喷发历史,为多期喷发的产物。

(2) 郯庐断裂带上已有的晚中生代钙碱性岩浆岩的形成年龄中,本文获得的 132Ma 的滁州火山岩早期喷发年龄是其中最老的年龄,该年龄应代表了郯庐断裂带下岩石圈伸展活动的开始时间。

(3) 滁州火山岩在地表位于郯庐断裂带东侧边界上的扬子克拉通上,而火山岩中古老锆石的年龄特征却指示岩浆来源于古老的华北克拉通,这一现象与 Li(1994)的陆壳拆离模型相吻合。

(4) 对比郯庐断裂带及华北克拉通内部同期火山岩的年代学资料,表明断裂带内火山岩较克拉通内部的同期火山岩具有较早的喷发时间和较长期的喷发历史,暗示深大断裂带内岩石圈具有较长期的较薄历史和较强的减薄强度。

(5) 断裂带与克拉通内部岩石圈减薄的差异可能与郯庐断裂带在早白垩世初的大规模左行平移有关,大型断裂带的存在不仅有利于减压熔融形成大量岩浆,还可以为热和岩浆活动提供了有利的上升通道,其伸展期剪切作用还可以造成岩石圈内明显的升温作用并明显降低岩石圈的强度,从而有利于岩石圈的强烈减薄及大规模岩浆活动的发生。

**致谢:** 本文在样品测试过程中得到了柳小明博士等的热情指导,在此表示感谢!

## 参 考 文 献 / References

- 安徽省地质矿产局区域地质调查队. 1988. 安徽地层志(侏罗系分册). 合肥:安徽科学技术出版社, 1~73.
- 李伍平, 路凤香. 1999. 钙碱性火山岩构造背景的研究进展. 地质科技情报, 18(2): 15~18.
- 凌文黎, 谢先军, 柳小明, 程建萍. 2006. 鲁东中生代标准剖面青山群火山岩锆石 U-Pb 年龄及其构造意义. 中国科学(D辑), 36(5): 401~411.
- 刘国生, 宋传中, 王道轩, 牛漫兰. 2002. 郯庐断裂(K<sub>2</sub>-E)的伸展活动及其对合肥盆地的控制. 合肥工业大学学报, 25(5): 672~677.

- 牛漫兰, 朱光, 宋传中. 2001. 郟庐断裂带中生代火山活动与深部过程. 合肥工业大学学报, 24(2): 147~153.
- 牛漫兰, 朱光, 刘国生. 2002. 郟庐断裂带中—南段中生代岩浆活动的构造背景与深部过程. 地质科学, 37(4): 393~404.
- 牛漫兰, 谢成龙, 宋传中, 王道轩, 向必伟. 2007. 郟庐断裂带早白垩世火山岩的 K-Ar 年龄及其构造意义. 地质科学, 42(2): 382~387.
- 潘国强, 陆现彩, 于航波. 2001. 北淮阳中生代 Adakite 岩石地球化学特征及成因讨论. 岩石学报, 17(4): 541~640.
- 裴福萍, 许文良, 王清海, 王冬艳, 林景忡. 2004. 鲁西费县中生代玄武岩及幔源捕虏晶的矿物化学: 对岩石圈地幔性质的制约. 高校地质学报, 10(1): 88~97.
- 齐进英. 1982. 安徽滁县中生代火山岩岩石化学及斜长石特征. 地质科学, 2(1982): 152~161.
- 邱检生, 王德滋, 罗清华, 刘洪. 2001a. 鲁东胶莱盆地青山组火山岩的  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  定年——以五莲分岭山火山机构为例. 高校地质学报, 7(3): 351~355.
- 邱检生, 王德滋, 周金城, 曾家湖. 1996. 山东中生代橄辉安粗岩系火山岩的地质、地球化学特征及岩石成因. 地球科学, 21(5): 546~552.
- 邱检生, 徐夕生, 罗清华. 2001b. 鲁西富钾火山岩和煌斑岩的  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  定年及源区示踪. 科学通报, 46(18): 1500~1508.
- 孙武城, 徐杰, 杨主恩, 等. 1992. 上海奉贤至内蒙古阿拉善左旗地质学断面. 北京: 地震出版社, 1~66.
- 王晓蕊, 高山, 柳小明, 袁洪林, 胡兆初, 张宏, 王选策. 2005. 辽西四合屯早白垩世义县组高镁安山岩的地球化学: 对下地壳拆沉作用和 Sr/Y 变化的指示. 中国科学(D辑), 35(8): 700~709.
- 吴福元, 葛文春, 孙德有, 郭春丽. 2003. 中国东部岩石圈减薄研究中的几个问题. 地学前缘, 10(3): 51~60.
- 徐义刚. 2004. 华北岩石圈减薄的时空不均一特征. 高校地质学报, 10(3): 324~331.
- 许文良, 王清海, 王冬艳, 裴福萍, 高山. 2004. 华北克拉通东部中生代岩石圈减薄的过程与机制: 中生代火成岩和深源捕虏体证据. 地学前缘, 11(3): 309~317.
- 闫峻, 陈江峰. 2005. 华北地块东部晚中生代至新生代岩石圈不均一减薄与改造模式. 地质评论, 15(1): 16~26.
- 袁洪林, 吴福元, 高山, 柳小明, 徐平, 孙德有. 2003. 东北地区新生代侵入体的锆石激光探针年龄测定与稀土元素成分分析. 科学通报, 48(14): 1511~1520.
- 翟明国, 樊祺诚, 张宏福, 隋建立. 2005. 华北东部岩石圈减薄中的下地壳过程: 岩浆底侵、置换与拆沉作用. 岩石学报, 21(6): 1509~1526.
- 张宏福, 周新华, 范蔚茗, 孙敏, 郭锋, 英基丰, 汤艳杰, 张瑾, 牛利锋. 2005. 华北东南部中生代岩石圈地幔性质、组成、富集过程及其形成机理. 岩石学报, 21(4): 1271~1280.
- 张岳桥, 赵越, 董树文, 杨农. 2004. 中国东部及邻区早白垩世裂陷盆地构造演化阶段. 地学前缘, 11(3): 123~133.
- 郑建平, 路凤香, Griffin W L, 余淳梅, 张瑞生, 袁晓萍, 吴秀玲. 2006. 华北东部橄辉岩与岩石圈减薄中的地幔伸展和侵蚀置换作用. 地学前缘, 13(2): 76~85.
- 周新华. 2006. 中国东部中、新生代岩石圈转型与减薄研究若干问题. 地学前缘, 13(2): 50~64.
- 朱光, 牛漫兰, 刘国生, 王道轩, 宋传中. 2002. 郟庐断裂带早白垩世走滑运动中的构造、岩浆、沉积事件. 地质学报, 76(3): 325~334.
- 朱光, 牛漫兰, 刘国生, 王勇生, 谢成龙, 李长城. 2005a. 郟庐断裂带东段走滑运动的  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  法定年. 地质学报, 79(3): 303~316.
- 朱光, 宋传中, 牛漫兰, 刘国生, 王勇生. 2002. 郟庐断裂带的岩石圈结构及其成因分析. 高校地质学报, 8(3): 248~256.
- 朱光, 王道轩, 刘国生, 宋传中, 徐嘉炜, 牛漫兰. 2001. 郟庐断裂带的伸展活动及其动力学背景. 地质科学, 36(3): 269~278.
- 朱光, 王勇生, 牛漫兰, 刘国生, 谢成龙. 2004. 郟庐断裂带的同造山运动. 地学前缘, 11(3): 169~182.
- 朱光, 谢成龙, 王勇生, 牛漫兰, 刘国生. 2005b. 郟庐高压走滑韧性剪切带特征及其  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  定年. 岩石学报, 21(6): 1687~1702.
- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report  $^{204}\text{Pb}$ . Chemical Geology, 192: 59~79.
- Belousova E A, Griffin W L, O'Reilly S Y, Fisher N I. 2002. Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type. Contribution to Mineralogy & Petrology, 143: 602~622.
- Burov E, Jaupart C, Mareschal J C. 1998. Large-scale crustal heterogeneities and lithospheric strength in cratons. Earth and Planetary Science Letters, 164: 205~219.
- Chung S L. 1999. Trace element and isotope characteristics of Cenozoic basalts around the Tanlu fault with implications for the Eastern Plate Boundary between North and South China. Journal of Geology, 107: 301~312.
- Deng J F, Mo X X, Zhao H L, Wu Z X, Luo Z H, Su S G. 2004. A new model for the dynamic evolution of Chinese lithosphere: "continental roots plume tectonics". Earth Science Review, 65: 223~275.
- Gao S, Rudnick R L, Yuan H L, Liu X M, Liu Y S, Xu W L, Ling W L, Ayers J, Wang X C, Wang Q H. 2004. Recycling lower continental crust in the North China craton. Nature, 432: 892~897.
- Griffin W L, O'Reilly S Y, Ryan C G. 1992. Composition and thermal structure of the lithosphere beneath South Africa, Siberia and China; proton microprobe studies. International Symposium on Cenozoic Volcanic Rocks and Deep-seated Xenoliths of China and its Environs, Beijing, 1~20.
- Griffin W L, Zhang A D, O'Reilly S Y, Ryan C G. 1998. Phanerozoic evolution of the lithosphere beneath the Sino-Korean Craton. In Flower M F, Chung S L, Lo C H, et al. Mantle dynamics and plate interactions in East Asia. AGU Geodynamics Series 27, 1998: 155~165.
- Le Bas M J, Le Maitre R W, Streckeisen A, Zanettin B. 1986. A chemical classification of volcanic rocks based total alkali-silica diagram. Journal of Petrology, 27: 745~750.
- Li Z X. 1994. Collision between the North and South China Blocks: A Crustal-detachment model for the suturing in the region east of the Tanlu fault. Geology, 22: 739~742.
- Lin G, Zhang Y, Guo F, Wang Y J, Fan W M. 2005. Numerical modelling of lithosphere evolution in the North China Block: Thermal versus tectonic thinning. Journal of Geodynamics, 40: 92~103.
- Liu M. 2001. Cenozoic extension and magmatism in the North American Cordillera: the role of gravitational collapse. Tectonophysics, 342: 407~433.
- Ludwig K R. 2003. Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication No. 4, 1~70.
- Menzies M A, Fan W M, Zhang M. 1993. Paleozoic and Cenozoic lithoprobes and the loss of > 120 km of Archean lithosphere, Sino-Korean craton, China. In: Prichard H M, Alabaster T, Harris N B W, Neary C R, ed. Magmatic Processes and Plate Tectonics. Geological Society, London, 76: 71~81.
- Mezger K and Krogstad E J. 1997. Interpretation of discordant U-Pb zircon ages: An evaluation. J. Metamorphic Geology, 15: 127~

- 140.
- Peccerillo A, Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calcalkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contribution to Mineralogy & Petrology*, 58: 68~81.
- Schott B, Schmeling H. 1998. Delamination and detachment of a lithospheric root. *Tectonophysics*, 296: 225~247.
- Wang Q, Derek A W, Xu J F, Zhao Z H, Jian P, Xiong X L. 2006. Petrogenesis of Cretaceous adakitic and shoshonitic igneous rocks in the Luzong area, Anhui Province (eastern China): Implications for geodynamics and Cu—Au mineralization. *Lithos*, 89(2006): 424~446.
- Wu F Y, Lin J Q, Wilde S A, Zhang X O, Yang J H. 2005. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China. *Earth and Planetary Science Letters*, 233: 103~119.
- Xu J W and Zhu G. 1994. Tectonic model of the Tan-Lu fault zone, eastern China. *International Geology Review*, 36: 771~784.
- Xu Y G, Huang X L, Ma J L, Wang Y B, Iizuka Y, Xu J F, Wang Q, Wu X Y. 2004. Crust—mantle interaction during the tectonothermal reactivation of the North China Craton: constraints from SHRIMP zircon U-Pb chronology and geochemistry of Mesozoic plutons from western Shandong. *Contribution to Mineralogy & Petrology*, 147: 750~767.
- Yuan H L, Gao S, Liu X M, Li H M, Günther D, Wu F Y. 2004. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry. *Geostandard and Geoanalytical Research*, 28: 353~370.
- Zhang H F, Sun M, Zhou X H, Zhou M F, Fan W M, Zheng J P. 2003. Secular evolution of the lithosphere beneath the eastern North China Craton: Evidence from Mesozoic basalts and high-Mg andesites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(22): 4373~387.
- Zhang H F, Sun M, Zhou X H, Ying J F. 2005. Geochemical constraints on the origin of Mesozoic alkaline intrusive complexes from the North China Craton and tectonic implications. *Lithos*, 81(2005): 297~317.
- Zheng J P, O'Reilly S Y, Griffin W L, Lu F X, Zhang M, Pearson N J. 2001. Relict refractory mantle beneath the eastern North China block: significance for lithosphere evolution. *Lithos*, 57: 43~66.

## LA-ICP MS Zircon U-Pb Ages of the Mesozoic Volcanic Rocks from Chuzhou Area and Their Tectonic Significances

XIE Chenglong, ZHU Guang, NIU Manlan, WANG Yongsheng

*School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, 230009*

### Abstract

Detailed LA-ICP MS zircon U-Pb geochronological data show that the Mesozoic volcanic rocks from Chuzhou area, which located on the east boundary of the Zhangbaling Uplift, were erupted during the Early Cretaceous, the forming ages varied between 132~116Ma, which show a characteristic of multi-stage eruption in a long period(16Ma). 132 Ma is the earliest eruption age of the cal-alkaline magma within the Tan-Lu(Tancheng—Lujiang) fault zone, this age should represented the beginning of the lithosphere extensive movement beneath the fault zone. U-Pb dating of the ancient zircon indicate a source of the North China craton though these volcanic rocks were located on the Lower Yangtze block, this case support an interpretation of the crustal detachment model about the suturing of the North China and Yangtze craton. The lava occurred under a dynamic setting of the lithospheric thinning in Eastern China, and these rocks are ascribed to the lithospheric thinning and crust—mantle interaction as well as the large scale contemporary magmatism during the Early Cretaceous. Compared with the geochronology data of the contemporary volcanic rocks from the inner North China craton, the volcanic activity on the Tan-Lu fault zone was earlier and has a comparatively long history. This indicates an intense degree and a long period of the lithospheric thinning within the fault zone compared with inner craton, and this should ascribe to the large scale sinistral strike-slip shear of the Tan-Lu fault zone in the beginning of the Early Cretaceous.

**Key words:** Chuzhou; Volcanic rocks; U-Pb geochronology; Tan-Lu(Tancheng—Lujiang) fault zone; lithospheric thinning

