

doi: 10.12029/gc20160503

吴才来, 董树文, 王陆太, 等. 铜陵矿集区深部发现 126 Ma 的正长花岗岩: 来自 3000 m 科学钻探的证据[J]. 中国地质, 2016, 43(5): 1495–1513.  
Wu Cailai, Dong Shuwen, Wang Lutai, et al. The discovery of the syenogranite with an age of 126 Ma in the depth of Tongling: Evidence from 3000 meters scientific drilling[J]. Geology in China, 2016, 43(5): 1495–1513(in Chinese with English abstract).

## 铜陵矿集区深部发现 126 Ma 的正长花岗岩： 来自 3000 m 科学钻探的证据

吴才来<sup>1</sup> 董树文<sup>2</sup> 王陆太<sup>3</sup> 王次松<sup>3</sup> 雷敏<sup>1</sup> 吴迪<sup>4</sup>

(1. 中国地质科学院地质研究所大陆构造与动力学重点实验室, 北京 100037; 2. 中国地质科学院, 北京 100037;  
3. 安徽地矿局 321 地质队, 安徽 铜陵 244033; 4. 中国地质大学地球科学学院, 北京 100083)

**摘要:** 铜陵矿集区 3000 m 科学钻揭示, 舒家店地区在 1775 m 以下存在红色的正长花岗岩, 从该深度继续钻进约 700 m 后仍为这种岩石, 而这种岩石在地表或其他钻孔中从未见到过。研究表明, 正长花岗岩以富硅、富碱, 富含高场强元素如 Zr、Nb、Y 和轻稀土元素 (Eu 除外) 和较低的 MgO、Ba 和 Sr 的含量为特征, 全岩的  $10000\text{Ga}/\text{Al}$  比值为  $>2.6$ ,  $\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y}>350\times 10^{-6}$ , 稀土元素配分模型具有明显的 Eu 负异常, 微量元素原始地幔标准化曲线具有明显的 Ba、Sr、P、Ti 亏损, 表现出 A 型花岗岩的地球化学属性。锆石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 定年结果表明, 该 A 型花岗岩的年龄为 126 Ma, 与长江中下游地区其他 A 型花岗岩的时代一致, 属于长江中下游地区三期岩浆活动当中的第二期岩浆活动的产物。研究表明, 长江中下游地区 3 次岩浆作用与岩石圈的多次拆沉作用密切相关, 而且每一次拆沉作用都会使壳幔附近的深位岩浆房向地壳浅部迁移, 而 A 型花岗岩则是迁移到浅部的深位岩浆房诱发的地壳部分熔融形成的岩浆, 沿断裂带侵入而形成, 也标志着本区的构造背景在 126 Ma 时处于拉张的高峰期。

**关键词:** 锆石 U-Pb 定年; A 型花岗岩; 铜陵舒家店

中图分类号: P581; P634.1 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2016)05-1495-19

### The discovery of the syenogranite with an age of 126 Ma in the depth of Tongling: Evidence from 3000 meters scientific drilling

WU Cai-lai<sup>1</sup>, DONG Shu-wen<sup>2</sup>, WANG Lu-tai<sup>3</sup>, WANG Ci-song<sup>3</sup>, LEI Min<sup>1</sup>, WU Di<sup>4</sup>

(1. State Key Laboratory of Continental Tectonics and Dynamics, Institute of Geology, CAGS, Beijing 100037, China. 2. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. No. 321 Geological Party, Anhui Bureau of Geology and Mineral Resources, Tongling 244033, Anhui, China. 4. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Tongling Scientific Drilling revealed that there exists a red syenogranite at 1775 meters below the surface in Shujiadian,

收稿日期: 2016-05-12; 改回日期: 2016-06-02

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41472063)、国家专项深部探测 (SinoProbe-05-05)、安徽省地矿局科研项目 (2012-K-03) 和创新研究群体科学基金项目 (40921001) 联合资助。

作者简介: 吴才来, 男, 1960 年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 岩石学专业, 长期从火成岩岩石学、岩浆与成矿科研工作;

E-mail: wucailai@126.com。

Tongling, which has never been seen at the surface or in other drill holes of Tongling area before, and drilling about 700 meters still intersects the rock. Studies show that the syenogranite is characterized by higher content of  $\text{SiO}_2$  and  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ , and lower content of  $\text{MgO}$ , Ba and Sr, enrichment of HFSE (high field strength element) such as Zr, Nb, Y and LREE (light rare earth element) except Eu. The rock has a ratio of  $10000\text{Ga}/\text{Al} > 2.6$ , the total  $\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y} > 350 \times 10^{-6}$ , obvious Eu negative anomaly in the chondrite-normalized REE patterns and depletion of Ba, Sr, P and Ti in the primitive mantle-normalized trace element diagram, showing A-type granite property. Zircon LA-MC-ICP-MS dating yielded a U-Pb age of 126 Ma for the A-type granite, which is consistent with the age of the other A-type granites in the middle and lower reaches of the Yangtze River (MLRYR), and belongs to the product of the second episode in the three episodes of the magmatism in the area. Researches indicate that the three episodes of magmatism in the MLRYR region had a closed relation to the multiple lithosphere delamination. With the continuing delamination, the deep magma chamber near the crust-mantle migrated to the shallow part, causing partial melting of the crust to form A-type granite when the magma was emplaced along the deep fault. It also marked a peak pull-apart in the tectonic background of the MLRYR region.

**Key words:** zircon U-Pb dating; A-type granite; Shuijiadie in Tongling

**About the first author:** WU Cai-lai, male, born in 1960, doctor, professor, supervisor of doctor candidates, mainly engages in igneous petrology and metallogenic research; E-mail: wucailai@126.com.

**Fund support:** Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41472063), Chinese government's Executive Program for Exploring the Deep Interior beneath the Chinese Continent (Sino-Probe-05-05); 2012 Annual Science and Technology Projects of Anhui Land and Resources (No. 2012-K-03) and the Innovation Research Group Science Fund Project (No. 40921001).

铜陵地区是中国重要的有色金属基地之一,在约 1000 km<sup>2</sup> 的范围内,分布着六大矿田,即从西到东有铜官山矿田、狮子山矿田、新桥矿田、凤凰山矿田、舒家店矿田、沙滩脚矿田(图 1),所有这些矿田均分布在近东西向的构造-岩浆-成矿带上<sup>[1]</sup>。研究表明,铜陵地区存在高钾钙碱性系列和橄榄安粗岩系列侵入岩,前者主要岩石组合为辉长闪长岩-石英二长闪长(玢)岩-花岗闪长(斑),后者主要为辉石二长闪长岩-二长岩-石英二长岩<sup>[2-11]</sup>。大量的锆石 U-Pb 定年结果表明,高钾钙碱系列侵入岩时代为 152~138 Ma,而橄榄安粗岩系列侵入岩为 145~137 Ma<sup>[3-4, 6-20]</sup>。然而,铜陵矿集区 3000 m 科学钻在舒家店矿田实施的过程中,发现了在地表或其他钻探中从未见过的红色正长花岗岩。这种红色花岗岩的年龄是多少?它与地表出露的 2 个系列侵入岩有何成因联系?与长江中下游地区同类岩石有何异同?本文将报道这种花岗岩的锆石 U-Pb 年龄,并探讨其地质意义。

## 1 地质背景及科学钻岩心

铜陵地区位于扬子板块的北缘,长江中下游铁铜金多金属成矿带的中部,呈一不规则的菱形地块,周边是火山-沉积盆地。它的西边、北边分别是

庐枞和繁昌中生代火山岩盆地,东边和南边是新生代火山-沉积盆地。区内主要出露志留纪—三叠纪浅海相碳酸盐岩,其中志留系—上泥盆统为深海—半深海相页岩和浅海相的碎屑岩,中石炭统—中三叠统东安鞍山组为滨海—浅海相碳酸盐岩夹半深海相硅质岩及海陆交互的碎屑岩,中三叠统上部月山组至古近—新近系为陆相碎屑岩夹火山岩。志留系—中三叠统形成了一系列 NE 向的褶皱,并被 NE、NNE、NW 和 NNW 向断层切割。铜陵—戴家汇基底深大断裂控制了区内的岩浆活动和矿床的形成,使区内中酸性侵入岩及其相关的矿床分布在 EW 向宽约 20 km 的岩浆-构造-成矿带上<sup>[1,21]</sup>。舒家店矿区位于该带的中东部(图 1),主要出露志留系、泥盆系上统五通组、石炭系、二叠系、三叠系及第四系,其中,志留系高家边组、坟头组粉砂质页岩、泥质页岩组成了 NE 向舒家店背斜的核部,而泥盆系五通组至三叠系东马鞍山组地层组成了背斜的两翼。背斜的南东翼地层稍陡,一般大于 40°,北西翼稍缓,一般 30°~45°。地表及大量的钻探揭示,该矿田中生代岩浆活动十分强烈,形成了辉石二长闪长岩、花岗闪长斑岩、石英二长闪长岩、花岗闪长岩、花岗斑岩、辉绿岩、煌斑岩等。3000 m 科学钻孔(TLSJD-1)定位于舒家店背斜北东端近核部的北

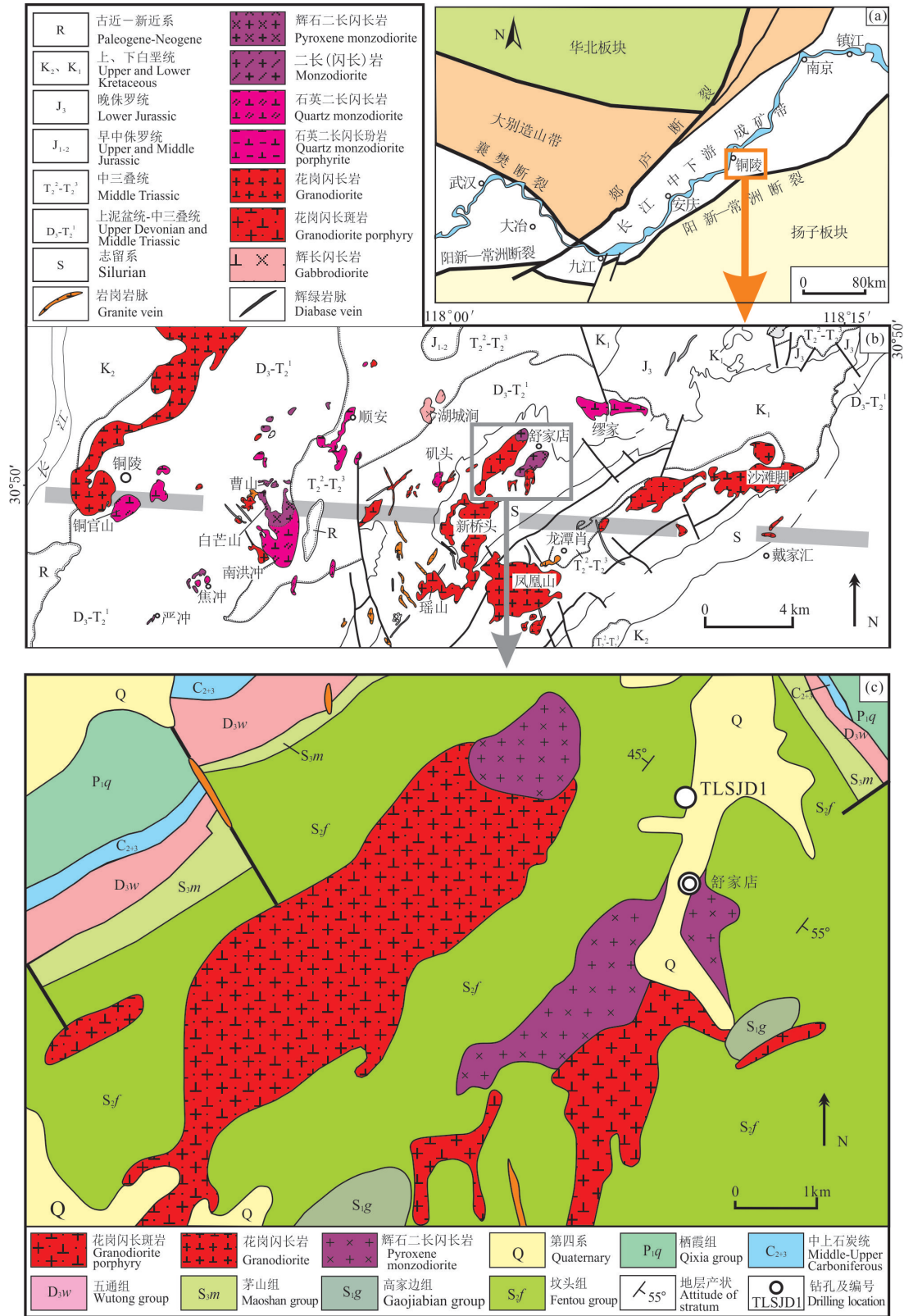


图1 铜陵地区地质图

Fig.1 Geological sketch map of Tongling area, Anhui

西翼(图1), 钻探从志留系高家边组泥质粉砂质页岩开始钻进, 历时15个月(2012年9月—2013年12月), 完成钻探进尺2436.5 m, 揭示的岩性见图2。

由图2可见, 从开孔到钻进848.50 m, 全是志留纪页岩、粉砂质页岩、千枚状页岩, 其中在782.84 m处见到一层厚9.63 m的角砾岩; 848.50 m开始见到30.50 m厚的花岗闪长斑岩。从879.00 m到1774.95 m, 又是志留纪千枚状粉砂质页岩、粉砂质页岩、角岩, 其中分别在1415.16 m、1496.18 m处分别见到两层厚度分别为18.64 m和7.62 m的角砾岩。1775 m以下见到肉红色正长花岗岩, 直到2436.50 m仍未穿透。

## 2 正长花岗岩特征

铜陵科学钻揭示的正长花岗岩呈肉红色, 中粗粒花岗结构, 块状构造。主要矿物为钾长石(50%~

65%)、石英(30%~40%), 其次为黑云母(3%~5%), 斜长石(2%~5%), 钾长石为碱性条纹长石, 黑云母为细小鳞片状, 斜长石为长条形, 被包裹在碱性长石中(图3)。电子探针分析表明, 黑云母为镁质黑云母, 碱性长石为正长石( $Or=75\sim85$ )。

在钻孔不同深度分别采集样品, 取样岩心回次和深度以及化学全分析结果列于表1。其中在1807.5 m、2136 m和2317 m深处采集的岩心样品13CL544、14CL516和14CL518, 开展锆石U-Pb定年。

由表1可见, 正长花岗岩样品的 $SiO_2$ 含量为72.93%~76.04%, 全碱含量为9.91%~8.47%, 属高钾钙碱性岩石系列(图4-a), ASI为0.99~1.02, 属准铝质-弱过铝质岩石(图4-b)。岩石的Fe指数( $Fe^*$ )和修正的碱度指数(MALI)分别为0.83~0.87和7.86~8.45, 属铁质类型(图5-a)、碱钙性系列(图5-b)<sup>[22-23]</sup>; 岩石的稀土总量、轻重稀土元素比值分别为

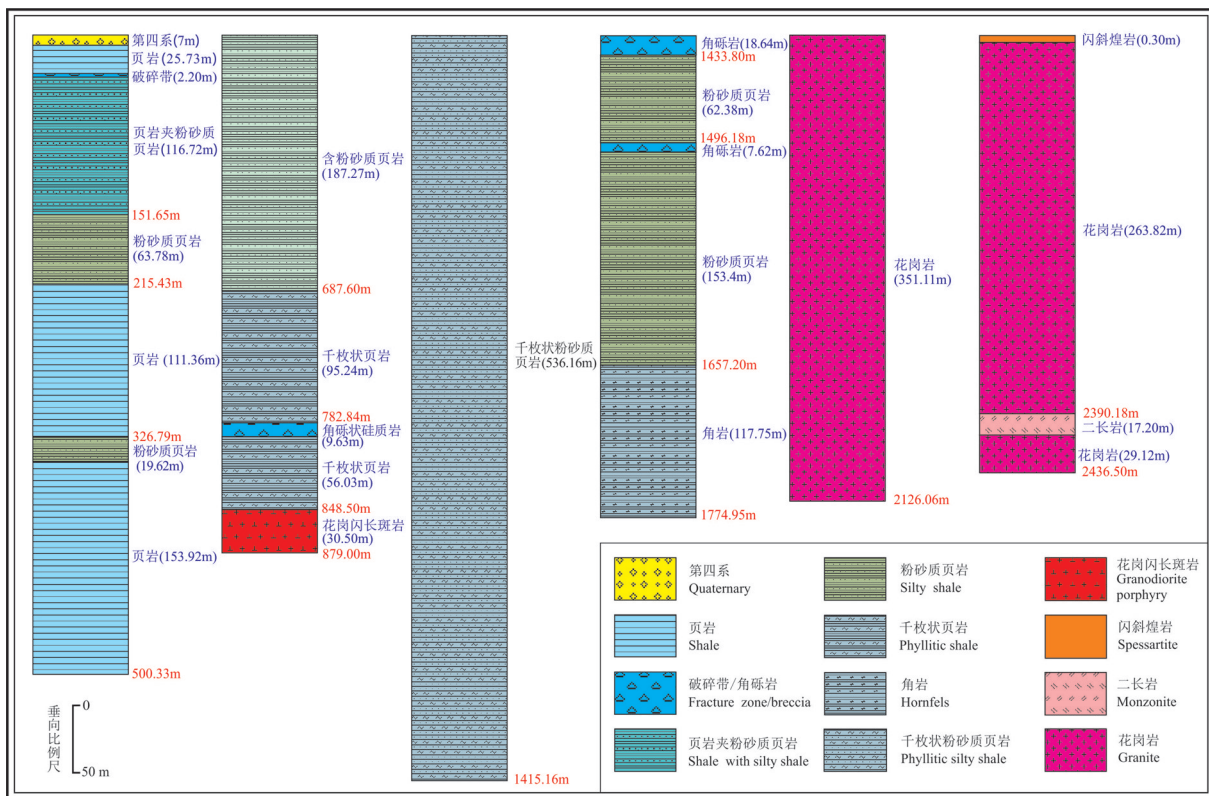


图2 铜陵舒家店科学钻(TLSJD1)岩心柱状示意图  
(红色字体表示深度, 括号内蓝色字体表示岩性的厚度)

Fig.2 Sketch map of rock column for the scientific drilling (TLSJD1) from Shujiadian, Tongling  
The red number represents the drilling depth, and the blue number inside the bracket indicates the thickness of the drilling rock

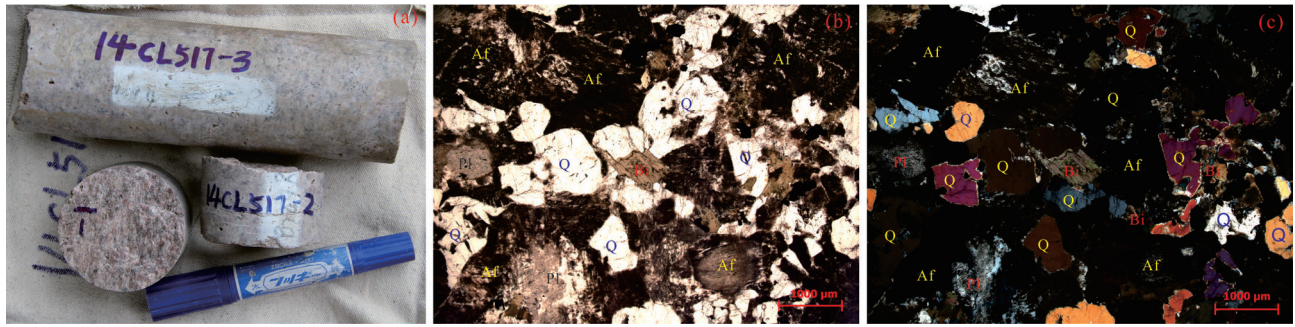


图3 正长花岗岩岩心及镜下特征

Q—石英;Af—碱性长石;Bi—黑云母;Pl—斜长石

Fig. 3 Characteristics of syngranite core and its microscopic petrography

Q—Quartz; Af—Alkali feldspar; Bi—Biotite; Pl—Plagioclase

$196.50 \times 10^{-6} \sim 361.91 \times 10^{-6}$ 、 $5.96 \sim 11.35$ , 具有明显的负铕异常 ( $\delta Eu = 0.22 \sim 0.33$ ) (图6-a), 微量元素蛛网图上表现出明显的Ba、Nb、Sr、P、Ti负异常(图6-b)。

### 3 正长花岗岩锆石U-Pb定年结果

锆石LA-ICP-MS U-Pb定年结果列如表2, 各定年样品锆石特征如下:

样品13CL544: 取自铜陵科学钻1807.5 m深处的岩心。锆石为短柱状, 长宽比为1:1~1.5:1, 具有较好的振荡环带(图7)。这些锆石的U、Th含量分别为 $26 \times 10^{-6} \sim 649 \times 10^{-6}$ 和 $48 \times 10^{-6} \sim 780 \times 10^{-6}$ , Th/U比值均大于0.9, 大多数大于1.5(变化于0.9~2.3)。32颗锆石定年获得的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄变化于(118±3) Ma~(142±3) Ma, 除7号锆石为一老的继承性锆石核(年龄为(142±3) Ma)外, 其余锆石平均年龄为(126±1) Ma(图8-b)。锆石的 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}-^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 比值得出谐和线交点年龄为(125.8±1.5) Ma(图8-a), 并与平均年龄(126±1) Ma在误差范围内基本一致(图8-b)。

样品14CL516: 自铜陵科学钻2136 m深处的岩心。锆石颗粒较小, 为柱状, 长宽比为1.5:1~2:1, 大多数锆石具有老的继承性核, 核的外围具有较好的结晶环带(图7)。这些锆石的U、Th含量分别为 $83 \times 10^{-6} \sim 1015 \times 10^{-6}$ 和 $94 \times 10^{-6} \sim 1534 \times 10^{-6}$ , Th/U比值变化于0.9~2.2。31颗锆石定年得出的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄变化于(118±3) Ma~(156±5) Ma, 由于锆石较小, 部分测点跨入到核部, 得出了比结晶环带偏老的年龄, 如1、6、10、12、17、20、25、26、28、31号锆石, 去除

这些测点, 其余锆石得出平均年龄为(127±2) Ma(图8-d)。锆石的 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}-^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 比值得出谐和线交点年龄为(126.2±1.5) Ma(图8-c), 并与平均年龄(127±2) Ma在误差范围内基本一致(图8-d)。

样品14CL518: 取自铜陵科学钻2317 m深处的岩心。锆石为柱状, 长宽比为1:1~2:1, CL图像显示出明显的环带构造(图7)。31颗锆石测年结果表明, 锆石的U、Th含量分别为 $116 \times 10^{-6} \sim 1023 \times 10^{-6}$ 和 $125 \times 10^{-6} \sim 1476 \times 10^{-6}$ , Th/U比值均大于0.6, 大多数大于1(变化于0.6~1.9),  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄变化于(117±3) Ma~(143±3) Ma, 除24号锆石为一继承性锆石核(年龄为143 Ma)外, 其余锆石得出平均年龄为(126±2) Ma(图8-f)。锆石的 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}-^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 比值得出谐和线交点年龄为(127.0±1.5) Ma(图8-e), 并与平均年龄(126±2) Ma在误差范围内基本一致(图8-f)。

## 4 讨论

### 4.1 花岗岩的成因类型

研究表明, 正长花岗岩主要矿物为碱性长石和石英, 少量的黑云母和斜长石。黑云母呈他形填隙状, 斜长石呈粒度细小的长条形被包裹于碱性长石中, 反映了岩浆结晶温度较高, 具有A型花岗岩的岩相学特征(图3)。从岩石的主量元素来看, 岩石富硅( $\text{SiO}_2$ : 72.93%~76.04%)、富碱( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ : 8.47%~9.91%), 具有较高的铁指数( $\text{Fe}^* = 0.81 \sim 0.86$ )和碱性指数( $\text{MALI} = 7.86 \sim 8.45$ ), 属高钾或碱钙性铁质类型的A型花岗岩<sup>[26-27]</sup>(图4~图5)。从微量元素特征看, 岩石富含大离子亲石元素如K、Rb、Na和高

表1 花岗岩主量元素(%)和微量元素( $10^{-6}$ )化学分析结果  
Table 1 Chemical composition of the dating samples from  
TLSJD1 Drilling

样品号	13CL544	14CL513-2	14CL516-2	14CL517-2	14CL518-2
位置	761 回次	825 回次	918 回次	958 回次	991 回次
孔深/m	1807.5	1934 m	2136 m	2137 m	2317 m
名称	正长花岗岩	正长花岗岩	正长花岗岩	正长花岗岩	正长花岗岩
年龄/Ma	126.7±1.9		127.0±1.7		126.3±1.6
SiO <sub>2</sub>	72.93	74.96	74.77	74.10	76.04
TiO <sub>2</sub>	0.25	0.20	0.20	0.26	0.18
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.10	13.26	13.10	13.62	12.83
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.76	0.75	0.84	1.04	0.71
FeO	0.55	0.42	0.41	0.50	0.40
MnO	0.12	0.07	0.07	0.06	0.02
MgO	0.18	0.17	0.23	0.30	0.20
CaO	0.47	0.52	0.59	0.75	0.60
Na <sub>2</sub> O	4.67	4.14	4.22	4.29	4.14
K <sub>2</sub> O	5.24	4.83	4.76	4.57	4.33
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.03	0.02	0.03	0.05	0.03
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	0.22	0.15	0.14	0.11	0.23
H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	0.24	0.07	0.10	0.13	0.08
灼减量	0.63	0.61	0.72	0.40	0.49
Fe*	0.86	0.84	0.83	0.84	0.81
MALI	8.45	8.39	8.10	7.87	7.86
Sc	7.06	4.95	4.22	5.08	4.00
Cr	5.64	14.73	11.18	11.44	11.15
Co	0.26	0.30	0.48	0.79	0.41
Ni	0.78	0.50	0.52	0.58	0.72
Cu	3.79	2.76	1.69	2.55	2.06
Zn	52.84	28.14	34.13	36.05	23.22
Ga	23.19	20.38	20.89	20.23	21.28
Rb	254	206	231	211	225
Sr	39.76	60.63	73.49	88.62	78.94
Zr	310.6	224.8	201.6	221.7	165.9
Nb	34.27	25.52	22.84	28.55	28.28
Cs	1.49	2.13	3.26	4.25	2.22
Ba	135	153	201	252	152
Hf	13.81	10.86	9.77	10.78	7.42
Ta	2.11	1.62	1.52	1.94	1.96
Pb	18.78	16.50	20.14	17.65	14.37
Th	31.96	22.16	24.92	32.77	30.79
U	9.44	4.33	6.41	7.82	7.85
Y	43.75	50.58	44.57	47.96	37.84
La	83.04	52.07	44.52	41.50	48.11
Ce	160.3	98.72	83.29	87.59	83.52
Pr	18.55	11.20	9.10	10.47	8.52
Nd	59.59	38.06	30.63	36.80	27.05
Sm	10.41	7.87	5.99	7.42	4.88
Eu	0.71	0.65	0.60	0.78	0.47
Gd	9.16	7.39	5.65	6.78	4.67
Tb	1.27	1.40	1.08	1.24	0.83
Dy	7.43	9.05	7.27	8.08	5.72
Ho	1.38	1.88	1.51	1.66	1.24
Er	4.08	5.69	5.04	5.25	4.30
Tm	0.70	0.99	0.91	0.94	0.79
Yb	4.56	6.14	6.01	6.08	5.58
Lu	0.75	0.88	0.89	0.95	0.82
REE	361.91	242.00	202.48	215.54	196.50
LRE/HRE	11.35	6.24	6.14	5.96	7.21
Eu*	0.22	0.26	0.31	0.33	0.30
La/Sm	7.97	6.62	7.43	5.59	9.86
(La/Sm) <sub>N</sub>	4.57	3.79	4.26	3.21	5.66
(Gd/Yb) <sub>N</sub>	1.70	1.02	0.79	0.94	0.71
(La/Lu) <sub>N</sub>	11.10	5.94	4.99	4.37	5.85
Sr/Y	0.91	1.20	1.65	1.85	2.09
Rb/Sr	6.40	3.40	3.14	2.38	2.86
Y/Nb	1.28	1.98	1.95	1.68	1.34
10000×Ga/Al	3.1	2.9	3.0	2.8	3.1

注: Fe\*=FeO<sup>+</sup>/(FeO<sup>+</sup>+Mg), MALI=Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O-CaO。

场强元素如 Zr、Nb、Y 和轻稀土元素 (Eu 除外), 10000Ga/Al 比值为 >2.6(2.8~3.1), Zr+Nb+Ce+Y 平均为  $432.5 \times 10^{-6}$  ( $>350 \times 10^{-6}$ ) 和较低的 MgO (0.17~0.30wt%)、Ba ( $135 \times 10^{-6}$ ~ $252 \times 10^{-6}$ ) 和 Sr ( $39.8 \times 10^{-6}$ ~ $88.6 \times 10^{-6}$ ) 含量, 稀土元素配分模型具有明显的 Eu 负异常 ( $\delta\text{Eu}: 0.22\sim 0.33$ ), 微量元素原始地幔标准化曲线具有明显的 Ba、Sr、P、Ti 亏损, 也表现出 A 型花岗岩的微量元素地球化学特征<sup>[28]</sup> (表 2, 图 6-b, 图 9)。岩石中没有碱性暗色矿物和岩石的 A/CNK=0.99~1.02 (表 2, 图 4-b), 表明该正长花岗岩为准铝质-铝弱饱和的 A 型花岗岩<sup>[29]</sup>。Ti、P、Eu 的负异常可能与含 Ti 矿物相 (如钛铁矿和金红石)、磷灰石、斜长石的分异有关, 长石的分馏还可能产生 Eu、Ba 的同时负异常<sup>[30]</sup>。实验岩石学和锆石饱和温度证明, A 型花岗岩不可能由 I 型花岗岩分异产生<sup>[31]</sup>, 因为 A 型花岗岩需要非常高的温度<sup>[30]</sup>。

按 Eby<sup>[32]</sup> 的研究成果, A 型花岗岩进一步划分为 A<sub>1</sub> 型和 A<sub>2</sub> 型。A<sub>1</sub> 花岗岩的地球化学特征类似于现在的洋岛玄武岩, 岩浆可能来源于地幔, 应该是板内构造环境; 而 A<sub>2</sub> 型花岗岩的地球化学成分类似于大陆地壳岩石或岛弧成因的岩石, 岩浆可能来源于板块汇聚边缘的大陆地壳<sup>[32]</sup>。因此, A<sub>2</sub> 型花岗岩弧的特征可能是由于俯冲作用释放的流体通过地幔交代作用而产生。研究表明, 铜陵舒家店地区深部发现的 A 型花岗岩的 Y/Nb 比值 >1.2, 变化于 1.28~1.98 (表 2), 平均为 1.65, 应属 A<sub>2</sub> 型花岗岩。根据 Nb、Y、Ce 的含量和 Yb/Nb 对 Rb/Nb 投点, 也得出该 A 型花岗岩属 A<sub>2</sub> 型 (图 10)。按照 Li et al.<sup>[33]</sup> 的研究成果, 本区 A<sub>2</sub> 型花岗岩属长江中下游地区长江南带, 同属这个带上的还有茅坦、花园巩、响水涧和黄山岩体, 但这个带上的岩体既有 A<sub>1</sub> 型, 也有 A<sub>2</sub> 型, 不同于长江北带 A<sub>1</sub> 型花岗岩带<sup>[33]</sup>。

#### 4.2 A 型花岗岩的年龄与长江中下游地区中生代岩浆活动期次

以上研究表明, 3000 m 科学钻发现的正长花岗岩属 A<sub>2</sub> 型花岗岩。3 个样品锆石 LA-MC-ICPMS U-Pb 定年得出的年龄分别为 (125.6±1.3) Ma、(127.0±1.7) Ma、(126.3±1.6) Ma, 将所有数据一起处理, 得出 (126.38±0.71) Ma 的年龄值 (图 11), 因此, 确定该 A 型花岗岩的结晶年龄为 126 Ma。此外, 从图 11 可以看出, 除了 126 Ma 峰值锆石外 (图

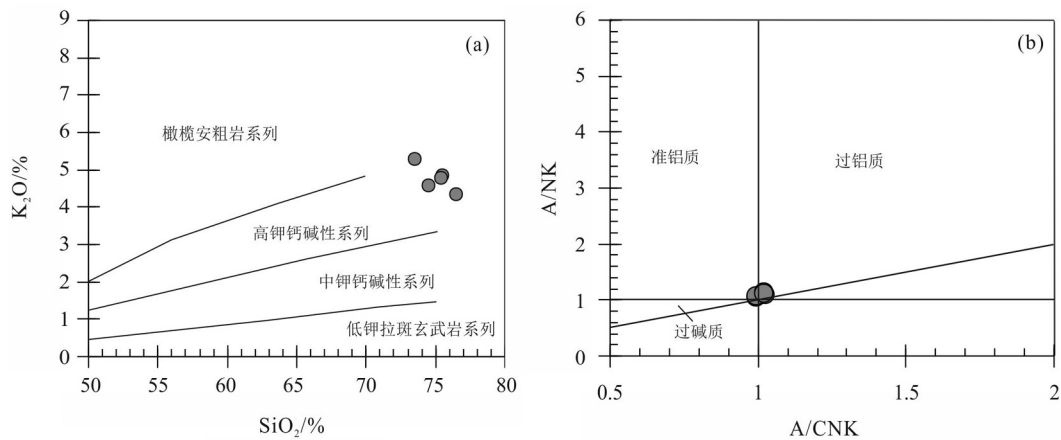


图4 正长花岗岩 SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O图解(a, 据文献[24])和 A/CNK-A/NK图解(b, 据文献[25])  
Fig.4 Diagram of SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O (after references [24] and [25])

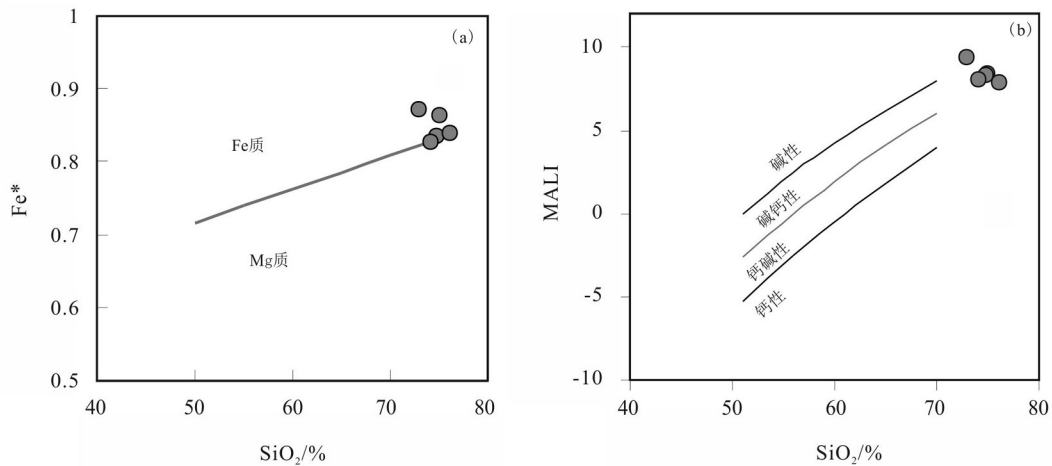


图5 侵入岩 SiO<sub>2</sub>-MALI图解(据文献[22-23])  
Fig.5 Diagram of SiO<sub>2</sub>-MALI (after references [22-23])

11-a),还存在130~143 Ma的锆石(图11-b),结合CL图像可知,这些锆石是早期继承性岩浆锆石,说明本期岩浆上升侵位过程中捕获了早期侵入岩中的锆石。研究表明,铜陵地区中酸性侵入岩可划分为高钾钙碱性系列和橄榄安粗岩系列,两个系列侵入岩时代分别为138~152 Ma和137~145 Ma<sup>[6-20,34]</sup>,前者的岩石组合为辉长闪长岩-石英二长闪长岩-花岗闪长岩,并具有埃达克岩的地球化学特征<sup>[34-36]</sup>,后者为辉石二长闪长岩-二长岩-石英二长岩<sup>[5-11]</sup>,不具有埃达克岩地球化学特征<sup>[9-10]</sup>。橄榄安粗岩浆主要来自幔源岩浆的分异作用,同时具有地壳物质的混染,而高钾钙碱性岩浆主要源自壳源岩浆与幔源分异岩浆的混合作用<sup>[9-11,34]</sup>,而这种126 Ma的正长

花岗岩在铜陵地区的地表或在以往的矿床勘探钻孔中尚未见过,但在邻区存在特征类似的花岗岩如长江以南的繁昌滨江、板石岭、茅坦、花园巩、黄山等岩体和长江以北的枞阳、黄梅尖、大龙山、花山等岩体<sup>[33,37]</sup>,说明这些岩体是同期岩浆作用的产物。

近些年,许多学者对长江中下游地区的岩浆岩进行了大量的定年工作<sup>[38-47]</sup>。根据这些定年资料,不少学者对长江中下游地区中生代岩浆活动期次进行了划分<sup>[48-50]</sup>。常印佛等<sup>[49]</sup>根据长江中下游地区构造-岩浆作用的时代和成岩成矿的特征,将长江中下游地区划分出前成矿阶段(>145 Ma)、成矿阶段(145~123 Ma)和后成矿阶段(<123 Ma),其中成矿阶段又划分为3个亚阶段,即走滑挤压亚阶段

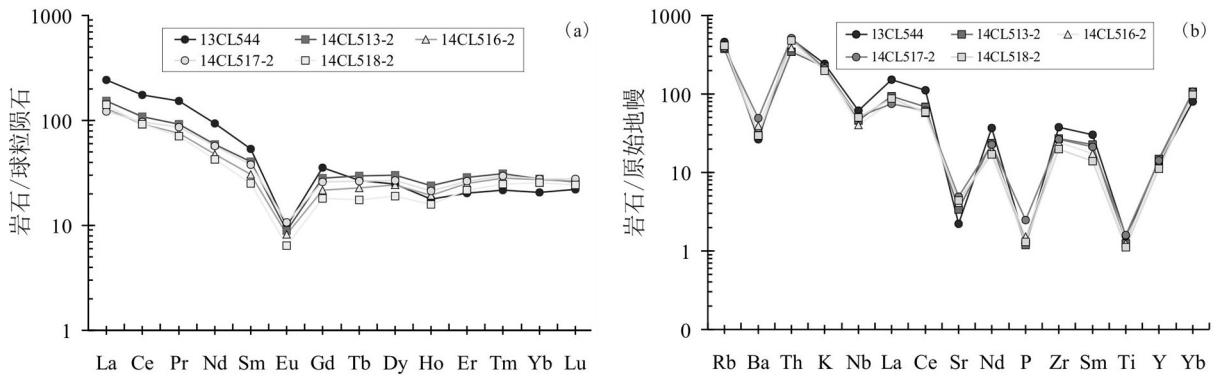


图6 花岗岩类稀土元素球粒陨石标准化图(a 稀土球粒陨石值据文献[26])及微量元素蛛网图(b, 原始地幔值据文献[27]) (样品号同表1)

Fig.6 (a) Chondrite-normalized REE patterns of intrusion, normalizing values after reference [26] (b) Primitive mantle-normalized trace element spider diagram, normalizing values after reference [27]

(145~136 Ma)、走滑引张亚阶段(135~127 Ma)和引张亚阶段(126~123 Ma)。孙洋等<sup>[50]</sup>将长江中下游地区中生代岩浆活动划分为4期:(1)152~135 Ma, (2)135~127 Ma, (3)127~121 Ma, (4)109~101 Ma。第一期为岩浆侵入阶段,第二期为火山作用阶段,第三期为岩浆侵入阶段(A型),第四期为岩浆浅成侵入阶段。但他划分的第2期和第3期有较大的重叠,两期岩浆活动无明显的时间间隔,因此,可以归为同一期岩浆活动。最近,张赞赞等(待发表)在庐江县东顾山地区深部首次发现了与钨钼多金属矿化有关的隐伏花岗岩体,并获得该岩体的LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄为(94.7±1.4) Ma 和(96.7±1.3) Ma,这可能是长江中下游地区目前发现的最年轻的花岗岩。因此,作者在前人研究的基础上,结合自己的研究结果,将长江中下游地区岩浆活动划分为3期,第一期为151~137 Ma,主要是中酸性岩浆侵入活动,以高钾钙碱性系列岩石为主,其次为橄榄安粗岩系列侵入岩,前者形成矽卡岩型Cu、Mo等矿床,如铜陵、安庆—贵池、九瑞、大冶等地区,后者形成Au、Pb、Zn等矿床;第二期为135~121 Ma,主要为岩浆火山喷发和A型花岗岩浆的侵入活动,以形成多个火山岩盆地,如庐枞、宁芜、繁昌等火山岩盆地,火山岩以橄榄安粗岩系列岩石为主,其次为高钾钙碱性系列岩石,同时,在盆地的边缘也形成一些侵入岩体,如黄梅尖、滨江等A型花岗岩体,主要形成Fe、Cu等矿床;第三期为109~95

Ma,主要是岩浆浅成侵入作用阶段,形成一些斑岩/玢岩类和Fe、Au、Mo、U等多金属矿化<sup>[49]</sup>。

因此,和长江中下游地区其他A型花岗岩一样,铜陵地区126 Ma的A型花岗岩属第二期岩浆作用的产物,标志着长江中下游地区构造体制处于张张的高峰期。

#### 4.3 岩浆活动的构造背景及动力学过程

许多学者对长江中下游地区中生代岩浆活动的构造背景提出过不同的观点,有人认为是弧后盆地<sup>[51-54]</sup>,也有人认为是后碰撞环境<sup>[55-57]</sup>,还有人认为是非造山的板内裂谷环境<sup>[58]</sup>等不同的认识。其中,有人认为A型花岗岩形成于与三叠纪南北中国板块碰撞后有关的弧后和碰撞后伸展的构造环境<sup>[59-60]</sup>;也有人认为是与地幔上涌共生的陆内剪切作用相关<sup>[61]</sup>;还有人认为由于俯冲的太平洋板块后撤<sup>[62]</sup>或由洋脊俯冲诱发的板片窗<sup>[33,63]</sup>等,相反,还有些学者认为中生代大规模岩浆活动和成矿作用源于中国东部岩石圈的拆沉和软流圈的上隆<sup>[64-65]</sup>,与古太平洋板块俯冲无关,大规模岩浆活动源于超级地幔柱的作用<sup>[66-68]</sup>。但无论何种观点,长江中下游地区A型花岗岩形成于张性的构造环境已达成共识。

众所周知,三叠纪以来扬子与华北两大板块存在碰撞造山和大陆深俯冲作用,形成了以超高压变质作用为特征的秦岭—大别造山带,晚侏罗世—早白垩世中国东部完成了古特提斯构造域向环太平洋构造域的大转换和古太平洋俯冲作用,同时形成



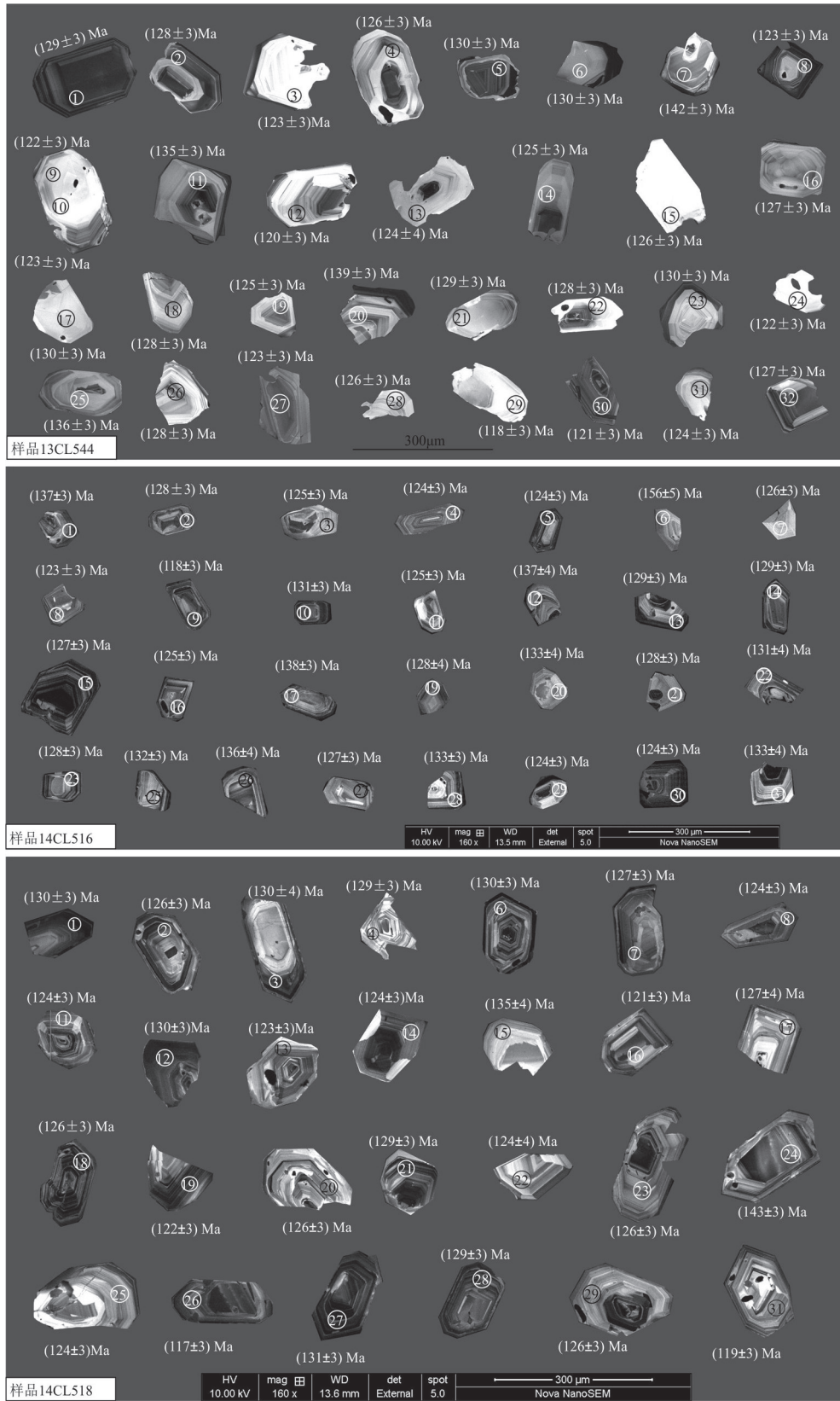
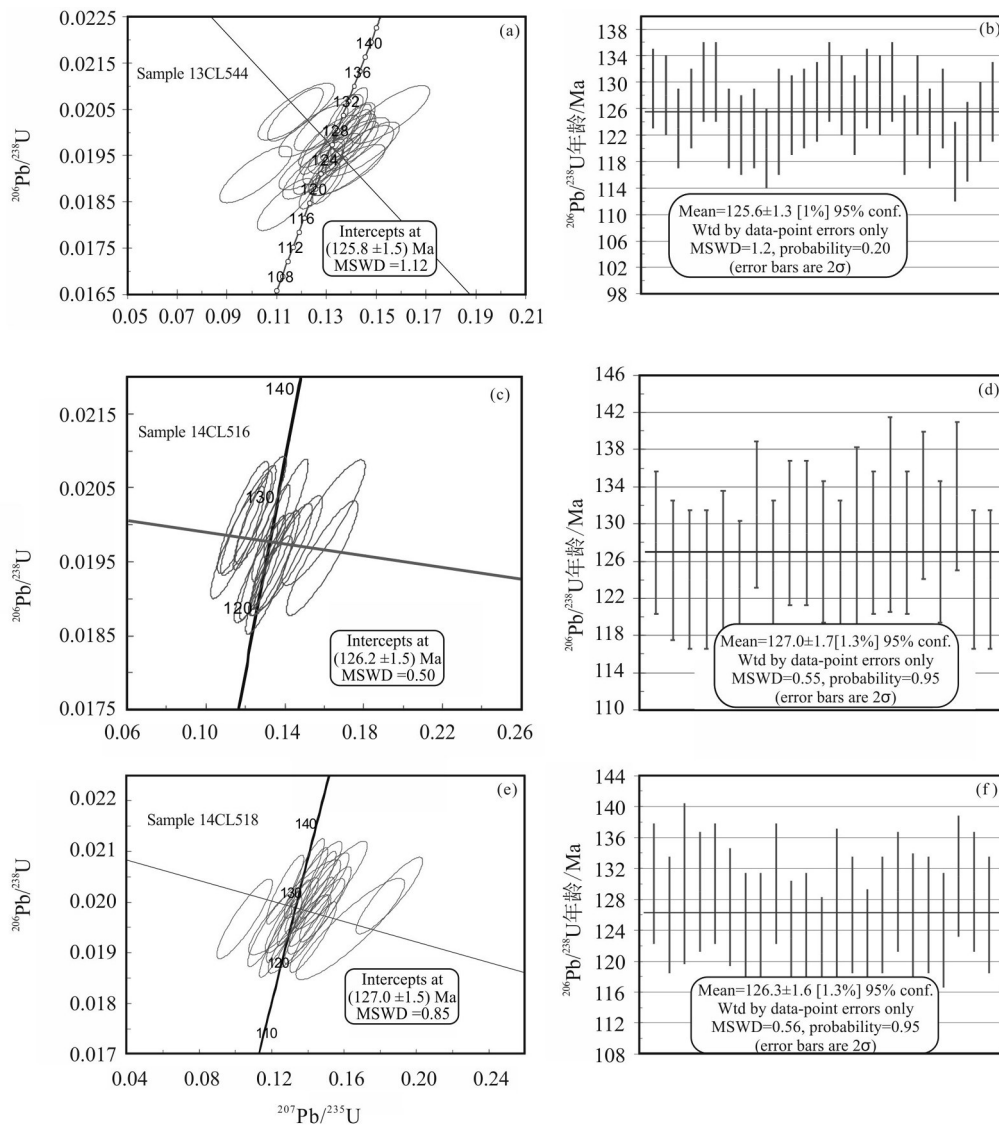


图7 侵入岩锆石阴极发光图像

Fig.7 Cathodoluminescence (CL) images of zircon from the intrusive rocks in Tongling

图8 锆石  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  谐和图Fig.8 Zircon  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  concordia diagram from the intrusive rocks in Tongling

了北东向大规模的侵入-火山岩带<sup>[69-71]</sup>。长江中下游地区位于郟庐断裂与阳新一常州断裂之间(图1),区内分布着大量的中生代火山盆地以及盆地边缘或盆地之间相对隆起区的侵入岩。深地震反射揭示其地壳厚度为31~33 km<sup>[72-73]</sup>,比北侧的大别山带(约41 km)和南侧的江南造山带(约37 km)薄5~10 km<sup>[74-76]</sup>,布伽重力异常也显示长江中下游地区对应于地幔隆起区<sup>[73]</sup>。近期的远震层析成像方法获得了长江中下游地区整个上地幔内存在“两高一低”的速度异常体,浅部的高速体可解释为现存的岩石

圈,深部的高速体可解释拆沉的岩石圈,而夹在中间的低速体为上涌的软流圈物质<sup>[77]</sup>。根据地球物理揭示的长江中下游地区深部结构特征和岩浆活动的阶段性特点,笔者认为,晚侏罗世一早白垩世期间,本区属于太平洋构造域的范围,太平洋板块NW向俯冲<sup>[78-79]</sup>,推挤华南板块、扬子板块向北西方向移动,由于受到华北板块,特别是秦岭-大别-苏鲁造山带的阻挡,在扬子板块的北缘形成多条深大断裂,如郟庐断裂、阳新一常州断裂,由于不断受到太平洋板块的俯冲影响,断裂带地区(长江中下游地

表2 铜陵科学钻TLSJD-1正长花岗岩锆石LA-ICPMS U-Pb定年数据

Table 2 Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating results of the syenogranite from the Scientific Drilling TLSJD-1 in Tongling

样品号及 分析点号	含量/ $10^{-6}$				同位素比值						年龄/Ma					
	Pb	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
					$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$				
13CL544-1	9.6	500	300	1.7	0.04856	0.00107	0.13572	0.00534	0.02027	0.00044	127	48	129	5	129	3
13CL544-2	4.6	250	148	1.7	0.05058	0.00138	0.14033	0.00627	0.02010	0.00042	222	59	133	6	128	3
13CL544-3	1.1	59	36	1.6	0.04882	0.00368	0.12565	0.01209	0.01932	0.00046	139	165	120	11	123	3
13CL544-4	3.4	227	97	2.3	0.05194	0.00204	0.14092	0.00815	0.01971	0.00043	283	90	134	7	126	3
13CL544-5	8.2	449	246	1.8	0.05035	0.00119	0.13948	0.00579	0.02042	0.00045	211	55	133	5	130	3
13CL544-6	1.2	59	37	1.6	0.05728	0.00353	0.15569	0.01291	0.02039	0.00051	502	137	147	11	130	3
13CL544-7	3.5	199	90	2.2	0.05156	0.00247	0.15836	0.01065	0.02230	0.00050	266	109	149	9	142	3
13CL544-8	17.4	726	649	1.1	0.04963	0.00091	0.13151	0.00468	0.01933	0.00043	178	43	125	4	123	3
13CL544-9	1.1	60	39	1.5	0.04661	0.00278	0.12455	0.00996	0.01911	0.00045	29	127	119	9	122	3
13CL544-10	1.2	74	37	2.0	0.05300	0.00368	0.13834	0.01243	0.01919	0.00045	329	157	132	11	123	3
13CL544-11	3.1	155	93	1.7	0.05133	0.00205	0.14917	0.00884	0.02120	0.00049	256	91	141	8	135	3
13CL544-12	4.1	299	118	2.5	0.04950	0.00169	0.12724	0.00669	0.01885	0.00041	172	75	122	6	120	3
13CL544-13	1.0	57	33	1.7	0.05471	0.00398	0.13983	0.01402	0.01939	0.00062	400	155	133	12	124	4
13CL544-14	1.2	59	41	1.4	0.05610	0.00354	0.14440	0.01217	0.01964	0.00048	456	133	137	11	125	3
13CL544-15	0.9	50	26	1.9	0.04933	0.00366	0.13897	0.01332	0.01972	0.00049	164	156	132	12	126	3
13CL544-16	1.8	113	55	2.1	0.05046	0.00253	0.13806	0.00968	0.01984	0.00046	216	109	131	9	127	3
13CL544-17	1.0	48	31	1.5	0.04360	0.00373	0.11794	0.01259	0.02045	0.00050	-91	165	113	11	130	3
13CL544-18	1.5	67	52	1.3	0.04604	0.00329	0.12473	0.01139	0.02003	0.00046		142	119	10	128	3
13CL544-19	5.5	374	162	2.3	0.04703	0.00140	0.12688	0.00613	0.01963	0.00044	51	61	121	6	125	3
13CL544-20	2.9	129	88	1.5	0.04397	0.00182	0.13621	0.00845	0.02184	0.00053	-72	89	130	8	139	3
13CL544-21	2.6	100	88	1.1	0.04674	0.00304	0.13094	0.01130	0.02021	0.00050	36	141	125	10	129	3
13CL544-22	6.1	355	186	1.9	0.05115	0.00153	0.13984	0.00660	0.01998	0.00042	248	69	133	6	128	3
13CL544-23	2.0	115	60	1.9	0.04274	0.00247	0.11751	0.00913	0.02039	0.00047	-137	124	113	8	130	3
13CL544-24	0.8	48	26	1.9	0.03877	0.00366	0.10164	0.01190	0.01909	0.00050	-362	216	98	11	122	3
13CL544-25	1.9	105	55	1.9	0.04515	0.00238	0.13123	0.00949	0.02135	0.00049	-12	113	125	9	136	3
13CL544-26	2.8	155	83	1.9	0.05030	0.00216	0.13853	0.00897	0.02001	0.00052	209	99	132	8	128	3
13CL544-27	2.4	140	75	1.9	0.04807	0.00213	0.12670	0.00817	0.01923	0.00046	103	99	121	7	123	3
13CL544-28	1.8	92	57	1.6	0.04783	0.00266	0.13100	0.00989	0.01981	0.00046	91	121	125	9	126	3
13CL544-29	1.3	49	52	0.9	0.04510	0.00270	0.11341	0.00925	0.01844	0.00046	-15	119	109	8	118	3
13CL544-30	7.0	457	214	2.1	0.05034	0.00130	0.13143	0.00576	0.01897	0.00042	211	55	125	5	121	3
13CL544-31	1.7	101	55	1.8	0.04967	0.00260	0.13213	0.00950	0.01943	0.00045	179	110	126	9	124	3
13CL544-32	13.8	780	421	1.9	0.05197	0.00101	0.14302	0.00520	0.01994	0.00043	284	41	136	5	127	3
14CL516-1	17.0	528	598	0.9	0.05826	0.00175	0.17263	0.0	0.02152	0.00047	540	65	162	7	137	3
14CL516-2	16.8	841	552	1.5	0.04480	0.00152	0.12371	0.0	0.02006	0.00044	0	66	118	6	128	3
14CL516-3	5.0	220	184	1.2	0.05250	0.00306	0.14183	0.0	0.01962	0.00051	307	141	135	10	125	3
14CL516-4	8.2	543	253	2.2	0.05015	0.00214	0.13452	0.0	0.01948	0.00047	202	104	128	8	124	3
14CL516-5	27.0	1095	1015	1.1	0.04897	0.00131	0.13144	0.0	0.01949	0.00042	147	59	125	5	124	3
14CL516-6	2.8	94	83	1.1	0.05071	0.00497	0.17083	0.0	0.02446	0.00078	228	205	160	19	156	5
14CL516-7	4.8	170	182	0.9	0.04266	0.00239	0.11607	0.0	0.01976	0.00050	-141	116	111	8	126	3
14CL516-8	11.2	673	359	1.9	0.04987	0.00196	0.13176	0.0	0.01919	0.00044	189	88	126	7	123	3
14CL516-9	27.4	1534	971	1.6	0.05093	0.00177	0.12979	0.0	0.01851	0.00041	238	72	124	6	118	3
14CL516-10	17.6	911	555	1.6	0.04832	0.00152	0.13704	0.0	0.02060	0.00046	115	65	130	6	131	3
14CL516-11	5.8	311	192	1.6	0.05132	0.00276	0.13800	0.0	0.01953	0.00050	255	117	131	9	125	3
14CL516-12	5.5	240	174	1.4	0.04850	0.00266	0.14373	0.0	0.02152	0.00056	124	117	136	10	137	4
14CL516-13	7.1	342	242	1.4	0.04595	0.00214	0.12780	0.0	0.02020	0.00048	-5	94	122	8	129	3
14CL516-14	15.0	635	531	1.2	0.05047	0.00175	0.14056	0.0	0.02022	0.00044	217	80	134	7	129	3
14CL516-15	17.3	698	635	1.1	0.04856	0.00144	0.13300	0.0	0.01989	0.00043	127	69	127	6	127	3

续表2

样品号及 分析点号	含量/ $10^{-6}$				同位素比值						年龄/Ma					
	Pb	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}$		$^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}$		$^{206}\text{Pb}$		
					$^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{238}\text{U}$	$1\sigma$
14CL516-16	7.3	400	226	1.8	0.05902	0.00313	0.15891	0.0	0.01955	0.00051	568	109	150	10	125	3
14CL516-17	8.3	293	282	1.0	0.05386	0.00245	0.16010	0.0	0.02159	0.00052	365	97	151	9	138	3
14CL516-19	4.5	212	148	1.4	0.05789	0.00366	0.15966	0.0	0.02003	0.00056	526	131	150	12	128	4
14CL516-20	3.6	150	116	1.3	0.04017	0.00362	0.11544	0.0	0.02087	0.00060	-280	171	111	12	133	4
14CL516-21	6.3	247	227	1.1	0.04397	0.00242	0.12149	0.0	0.02006	0.00049	-72	117	116	8	128	3
14CL516-22	5.7	218	205	1.1	0.04652	0.00267	0.13139	0.0	0.02051	0.00056	25	123	125	10	131	4
14CL516-23	10.5	535	344	1.6	0.04291	0.00217	0.11877	0.0	0.02010	0.00050	-128	114	114	8	128	3
14CL516-25	6.0	280	187	1.5	0.05658	0.00313	0.16131	0.0	0.02070	0.00052	475	123	152	11	132	3
14CL516-26	4.3	177	128	1.4	0.08145	0.00465	0.24000	0.0	0.02140	0.00058	1232	112	218	16	136	4
14CL516-27	8.4	366	274	1.3	0.07418	0.00282	0.20320	0.0	0.01989	0.00047	1046	72	188	10	127	3
14CL516-28	8.0	427	245	1.7	0.04733	0.00243	0.13622	0.0	0.02090	0.00050	66	107	130	9	133	3
14CL516-29	5.7	214	213	1.0	0.04843	0.00273	0.12951	0.0	0.01942	0.00049	120	121	124	9	124	3
14CL516-30	18.8	721	711	1.0	0.04746	0.00151	0.12666	0.0	0.01937	0.00043	73	67	121	6	124	3
14CL516-31	5.0	240	160	1.5	0.04942	0.00309	0.14204	0.0	0.02087	0.00056	168	137	135	11	133	4
14CL518-1	6.1	254	216	1.2	0.05071	0.00269	0.14292	0.0	0.02044	0.00050	228	124	136	9	130	3
14CL518-2	17.2	804	590	1.4	0.05201	0.00202	0.14202	0.0	0.01981	0.00045	286	92	135	7	126	3
14CL518-3	3.8	170	126	1.4	0.05448	0.00341	0.15280	0.0	0.02034	0.00057	391	145	144	12	130	4
14CL518-4	9.6	534	298	1.8	0.05218	0.00302	0.14512	0.0	0.02017	0.00053	293	116	138	10	129	3
14CL518-6	24.7	995	851	1.2	0.05193	0.00142	0.14561	0.0	0.02034	0.00044	282	58	138	6	130	3
14CL518-7	7.8	287	281	1.0	0.05439	0.00232	0.14970	0.0	0.01996	0.00049	387	90	142	8	127	3
14CL518-8	10.4	446	370	1.2	0.05215	0.00215	0.13993	0.0	0.01946	0.00045	292	89	133	8	124	3
14CL518-11	7.5	367	268	1.4	0.04443	0.00212	0.11907	0.00814	0.01944	0.00047	-48	94	114	7	124	3
14CL518-12	18.0	524	697	0.8	0.05008	0.00147	0.14090	0.00667	0.02041	0.00044	199	64	134	6	130	3
14CL518-13	9.3	549	290	1.9	0.05370	0.00212	0.14299	0.00851	0.01931	0.00046	358	94	136	8	123	3
14CL518-14	17.3	1119	512	2.2	0.04731	0.00156	0.12694	0.00651	0.01946	0.00043	65	74	121	6	124	3
14CL518-15	3.3	125	116	1.1	0.04318	0.00398	0.12588	0.01471	0.02114	0.00060	-113	182	120	13	135	4
14CL518-16	15.8	719	547	1.3	0.07727	0.00275	0.20182	0.01102	0.01894	0.00043	1128	69	187	9	121	3
14CL518-17	3.5	166	116	1.4	0.04840	0.00481	0.13278	0.01681	0.01990	0.00062	119	209	127	15	127	4
14CL518-18	26.8	1231	917	1.3	0.04850	0.00138	0.13236	0.00614	0.01979	0.00043	124	64	126	6	126	3
14CL518-19	19.6	975	688	1.4	0.04653	0.00156	0.12286	0.00637	0.01915	0.00042	25	68	118	6	122	3
14CL518-20	6.9	362	225	1.6	0.05319	0.00267	0.14461	0.01035	0.01972	0.00049	337	116	137	9	126	3
14CL518-21	17.7	834	562	1.5	0.06667	0.00299	0.18508	0.01217	0.02013	0.00050	827	89	172	10	129	3
14CL518-22	3.4	135	117	1.2	0.06089	0.00560	0.16345	0.01984	0.01947	0.00066	635	192	154	17	124	4
14CL518-23	7.1	454	214	2.1	0.04816	0.00254	0.13107	0.00969	0.01974	0.00049	107	111	125	9	126	3
14CL518-24	11.0	532	297	1.8	0.04779	0.00249	0.14747	0.01076	0.02238	0.00055	89	108	140	10	143	3
14CL518-25	4.2	229	137	1.7	0.05049	0.00303	0.13486	0.01115	0.01937	0.00051	218	130	128	10	124	3
14CL518-26	23.9	664	1023	0.6	0.05609	0.00178	0.14227	0.00721	0.01839	0.00042	456	67	135	6	117	3
14CL518-27	31.2	1476	983	1.5	0.04916	0.00136	0.13956	0.00633	0.02059	0.00044	155	61	133	6	131	3
14CL518-28	15.3	781	493	1.6	0.04563	0.00158	0.12744	0.00681	0.02025	0.00045	-22	65	122	6	129	3
14CL518-29	4.9	270	158	1.7	0.03872	0.00285	0.10504	0.01012	0.01967	0.00052	66	191	101	9	126	3
14CL518-31	6.6	321	237	1.4	0.04237	0.00314	0.10908	0.01073	0.01867	0.00053	-157	144	105	10	119	3

区)深部岩石圈可能发生了多次拆沉作用。第一次拆沉作用可能发生在152 Ma,软流圈与拆沉后的岩石圈直接接触,导致地幔岩石圈发生部分熔融形成基性岩浆,岩浆上升到幔壳过渡带形成深位岩浆

房,并发生岩浆分异结晶作用,形成辉石、角闪石堆积岩<sup>[6,11,80]</sup>,同时,巨大的高温岩浆房引起上覆地壳低熔点的组分发生部分熔融形成花岗质浅位岩浆房。浅位岩浆房早期的岩浆侵位形成花岗闪长斑

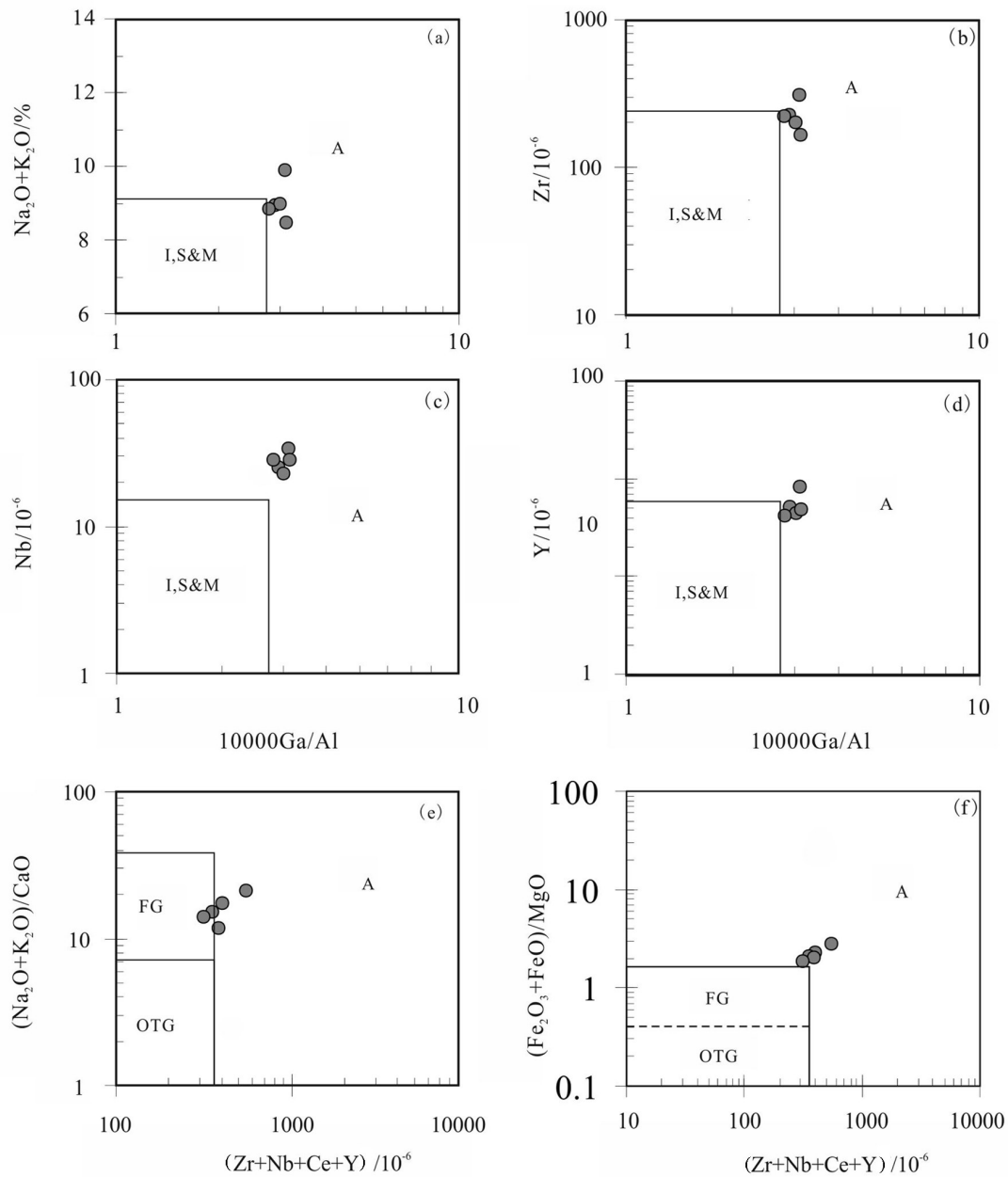


图9 花岗岩成因类型判别图解(据文献[28])

Fig. 9 Discrimination of genetic types of granite (after reference [28])

岩(非埃达克质,如铜陵瑶山岩体等),深位岩浆房分异的岩浆一部分上升到浅位岩浆房发生岩浆混合,形成具有埃达克质岩地球化学特征的中酸性侵入岩<sup>[2,11,35]</sup>,另一部分直接上升到地壳浅部就位,形成辉石二长闪岩(非埃达克质,如铜陵白茫山岩体等);第二次拆沉作用可能发生在135 Ma,再次的拆沉作用,使本区深部的岩石圈厚度更加减薄,地表

形成拗陷带,深部壳幔过渡带深位岩浆房向上迁移,其中的基性岩浆直接喷出地表,形成火山岩盆地,晚期岩浆喷发的强度减弱,迁移到浅部的深位岩浆房诱发地壳部分熔融,形成A型花岗岩浆,岩浆沿深大断裂带附近侵位,形成A型花岗岩体<sup>[44]</sup>。第三次拆沉作用可能发生在110 Ma,拆沉规模不及前两次,导致局部地方岩浆的浅成侵位,形成第三

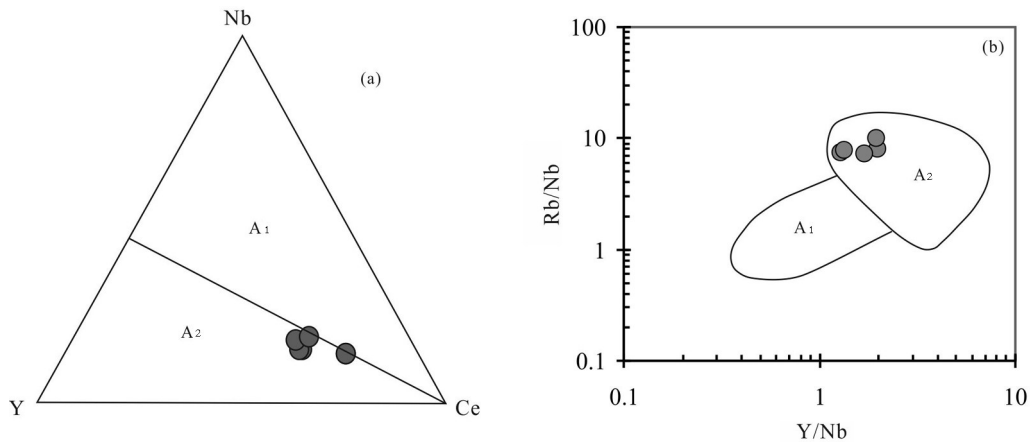


图 10 A 型花岗岩再划分 Nb-Y-Ce (a) 和 Yb/Nb-Rb/Nb (b) 图解 (据文献 [32])

A<sub>1</sub>—大陆裂谷或板内岩浆作用; A<sub>2</sub>—陆陆碰撞或与岛弧有关的花岗岩类

Fig. 10 A type granite subdivision of Nb-Y-Ce (a) and Yb/Nb-Rb/Nb (b) (after reference [32])

A<sub>1</sub>—Continental rift or intraplate magmatism; A<sub>2</sub>—Collision or arc related granitoids

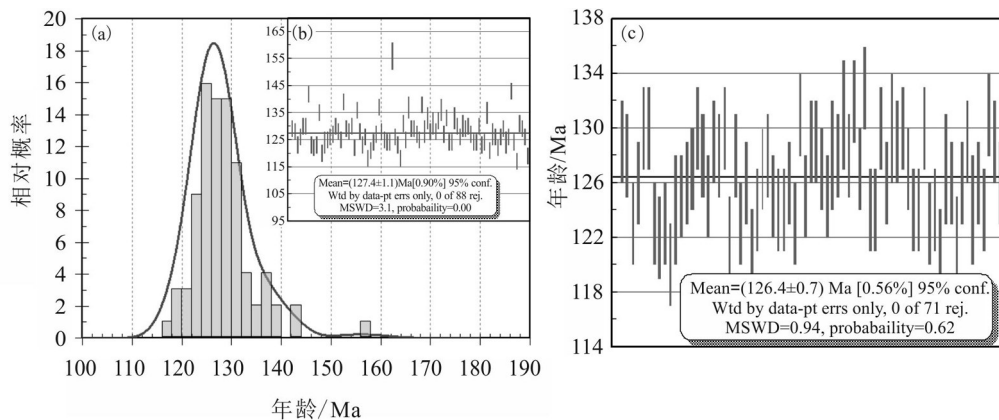


图 11 正长花岗岩的锆石 U-Pb 平均年龄

Fig. 11 Average U-Pb age of syenogranite

期岩浆作用。

A 型花岗岩的产出, 标志着本区岩石圈减薄和伸展达到了高峰<sup>[37]</sup>, 每一次的拆沉作用都诱发幔源岩浆的上涌, 产生岩浆喷出或侵入活动。A 型花岗岩便是继大规模的幔源岩浆火山喷发之后, 壳源岩浆沿长江断裂带两侧侵位形成。

## 5 结论

(1) 铜陵 3000 m 科学钻于 1750 m 深处发现的正长花岗岩富硅、富碱, 具有较高的铁指数和碱性指数, 且富含高场强元素如 Zr、Nb、Y 和轻稀土元素

(Eu 除外), 10000Ga/Al 比值为 >2.6, (Zr+Nb+Ce+Y) > 350 × 10<sup>-6</sup> 和较低的 MgO、Ba 和 Sr 的含量, 稀土元素配分模型具有明显的 Eu 负异常, 微量元素原始地幔标准化曲线具有明显的 Ba、Sr、P、Ti 亏损, 表现出 A 型花岗岩的地球化学属性。

(2) 锆石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 定年结果表明, 该 A 型花岗岩的年龄为 126 Ma, 与长江中下游地区其他 A 型花岗岩的时代一致, 属于长江中下游地区三期岩浆活动当中的第二期岩浆活动的产物。

(3) 长江中下游地区在 J<sub>3</sub>-K<sub>1</sub> 时期, 岩石圈发生了多次拆沉作用, 导致岩石圈的不断减薄, 形成了

多期岩浆活动,同时,壳幔附近的深位岩浆房也不断地向地壳浅部迁移,迁移到浅部的深位岩浆房诱发地壳部分熔融形成A型花岗岩浆。A型花岗岩的产出,标志着长江中下游地区构造背景处于拉张的高峰期。

### 参考文献(References):

- [1] 常印佛, 刘湘培, 吴言昌. 长江中下游铁铜成矿带[M]. 北京:地质出版社, 1991: 1-379.  
Chang Yinbo, Liu Xianpei, Wu Yanchang. The Iron-Copper Ore-Forming Belt of Middle-Lower Yangtze River [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991: 1-379 (in Chinese).
- [2] 汪洋, 邓晋福, 姬广义. 长江中下游地区早白垩世埃达克质岩的大地构造背景及其成矿意义[J]. 岩石学报, 2004, 20: 297-314.  
Wang Yang, Deng Jinfu, Ji Guang Yi. A perspective on the geotectonic setting of early Cretaceous adakite-like rocks in the Lower Reaches of Yangtze River and its significance for copper-gold mineralization [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20(2): 297-314 (in Chinese with English abstract).
- [3] 杨小男, 徐兆文, 张军, 等. 安徽狮子山矿田南洪冲岩体形成时代及成因机制研究[J]. 岩石学报, 2007, 23(6): 1543-1551. Yang Xiaonan, Xu Zhaowen, Zhang Jun, et al. Geochronology and origin of Nanhongchong pluton in Shizishan ore-field, Anhui Province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(6): 1543-1551 (in Chinese with English abstract).
- [4] 杨小男, 徐兆文, 徐夕生, 等. 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, 2008, 82(4): 510-516.  
Yang Xiaonan, Xu Zhaowen, Xu Xisheng, et al. Zircon U-Pb geochronology and its implication for the temperature of Yanshanian magma in Tongling, Anhui Province [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 62(4): 510-516 (in Chinese with English abstract).
- [5] 吴才来, 陈松永, 史仁灯, 等. 铜陵中生代中酸性侵入岩特征及成因[J]. 地球学报, 2003, 24(1): 41-48.  
Wu Cailai, Chen Songyong, Shi Rendeng, et al. Origin and Features of the Mesozoic Intermediate-acid intrusive in the Tongling Area, Anhui, China [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 24(1): 41-48 (in Chinese with English abstract).
- [6] 吴才来, 董树文, 国和平, 等. 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, 2008, 24(8): 1801-1812.  
Wu Cailai, Dong Shuwen, Guo Heping, et al. Zircon SHRIMP U-Pb dating of intrusive rocks and hypomagmatic process from Shizishan, Tongling [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(8): 1801-1812 (in Chinese with English abstract).
- [7] 吴才来, 高前明, 国和平, 等. 铜陵地区铜官山矿田侵入岩锆石 SHRIMP 定年[J]. 地质学报, 2010, 84(12): 1746-1758.  
Wu Cailai, Gao Qianming, Guo Heping, et al. Zircon SHRIMP dating of High-K calc series intrusive rocks from Tongling, Anhui, China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2010, 84(12): 1746-1758 (in Chinese with English abstract).
- [8] 吴才来, 高前明, 国和平, 等. 铜陵中酸性侵入岩成因及锆石 SHRIMP 定年[J]. 岩石学报, 2010, 26(9): 2630-2652.  
Wu Cailai, Gao Qianming, Guo Heping, et al. Petrogenesis of the intermediate-acid intrusive rocks and zircon SHRIMP dating in Tongling, Anhui, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(9): 2630-2652 (in Chinese with English abstract).
- [9] 吴才来, 董树文, 郭祥焱, 等. 中国铜陵中酸性侵入岩[M]. 北京:地质出版社, 2013: 1-232.  
Wu Cailai, Dong Shuwen, Guo Xiangyan, et al. Intermediate-acid Intrusive Rocks from Tongling, China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2013, 1-232.
- [10] 吴才来, 郭祥焱, 王次松, 等. 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, 2013, 42(1): 11-28.  
Wu Cailai, Guo Xiangyan, Wang Cisong, et al. Zircon U-Pb dating of High-K calc-alkaline intrusive rocks from Tongling: Implications for the tectonic setting [J]. *Geochimica*, 2013, 42(1): 11-28 (in Chinese with English abstract).
- [11] Wu Cailai, Dong Shuwen, Paul T. Robinson, et al. 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*, 2014, 126 (1/2): 78-102. doi: 10.1130/B30613.1.
- [12] 徐夕生, 范钦成, O'Reilly S Y, 等. 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, 2004, 49(18): 1883-1891.  
Xu Xisheng, Fan Qincheng, O'Reilly S Y, et al. Zircon U-Pb dating of the quartz diorite and its enclaves in Tongguanshan, Anhui province: Discussion on the petrologic genesis [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(18): 1883-1891 (in Chinese).
- [13] 狄永军, 吴淦国, 张达, 等. 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, 2005: 804.  
Di Yongjun, Wu Ganguo, Zhang Da, et al. Zircon SHRIMP U-Pb Geochronology of Xiaotongguanshan and Shatanjiao intrusive rocks from Tongling and their petrological significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2005: 804 (in Chinese).
- [14] 吴淦国, 张达, 狄永军, 等. 铜陵矿集区侵入岩锆石 U-Pb 年龄及深部动力学背景[J]. 中国科学(D 辑), 2008, 38(5): 630-645.  
Wu Ganguo, Zhang Da, Di Yongjun, et al. Zircon U-Pb age and deep dynamic background of the intrusive rocks in the Tongling ore area [J]. *China Science (D Series)*, 2008, 38 (5): 630-645 (in Chinese).
- [15] 徐晓春, 陈三明, 谢巧勤, 等. 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, 2008, 82(4): 500-509.

- Xu Xiaochun, Chen Sanming, Xie Qiaoqin, et al. 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*, 2008, 62(4): 500–509 (in Chinese with English abstract).
- [16] 谢建成, 杨晓勇, 肖益林, 等. 铜陵矿集区中生代侵入岩成因及成矿意义[J]. *地质学报*, 2012, 86(3): 423–459.
- Xie Jiancheng, Yang Xiaoyong, Xiao Yilin, et al. Petrogenesis of Mesozoic intrusive rocks from the Tongling ore cluster region: The metallogenic significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86 (3): 423–459 (in Chinese with English abstract).
- [17] 王彦斌, 刘敦一, 曾普胜, 等. 铜陵地区小铜官山石英闪长岩锆石 SHRIMP 的年龄及其成因指示[J]. *岩石矿物学杂志*, 2004, 23 (4): 298–304.
- Wang Yanbin, Liu Dunyi, Zeng Pusheng, et al. SHRIMP U–Pb geochronology of Xiaotongguanshan quartz–dioritic intrusions in Tongling district and its petrogenetic implications [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2004, 23(4): 298–304 (in Chinese with English abstract).
- [18] 王彦斌, 刘敦一, 曾普胜, 等. 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*, 2004, 25(4): 423–427.
- Wang Yanbin, Liu Dunyi, Zeng Pusheng, et al. SHRIMP U–Pb geochronology of gabbro–diorite in the Chaoshan gold deposit and its geological significance [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2004, 25(4): 423–427 (in Chinese with English abstract).
- [19] 王彦斌, 刘敦一, 蒙义峰, 等. 安徽铜陵新桥铜–硫–铁–金矿床中石英闪长岩和辉绿岩锆石 SHRIMP 年代学及其意义[J]. *中国地质*, 2004, 32(2): 169–173.
- Wang Yanbin, Liu Dunyi, Meng Yifeng, et al. SHRIMP U–Pb geochronology of the Xinqiao Cu–S–Fe–Au deposit in the Tongling ore district, Anhui [J]. *Geology in China*, 2004, 31(2): 169–173 (in Chinese with English abstract).
- [20] 吴才来, 周询若, 黄许成, 等. 铜陵地区中酸性侵入岩年代学研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 1996, 15(4): 299–306.
- Wu Cailai, Zhou Xunruo, Huang Xucheng, et al.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  chronology of intermediate–acid intrusive rocks from Tongling [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 1996, 15 (4): 299–307 (in Chinese with English abstract).
- [21] 常印佛, 刘学圭. 铜陵地区层控砂卡岩矿床研究[J]. *矿床地质*, 1983, 2(1): 11–20.
- Chang Yinbo, Liu Xuegui. Stratabound skarn type deposits——a case study of Lower Yangtzi depression within Anhui Province [J]. *Mineral Deposits*, 1983, 2 (1): 11–20 (in Chinese with English abstract).
- [22] Peccerillo A, Taylor S R. Geochemistry of Eocene calc–alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey [J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 1976, 58: 63–81.
- [23] Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1989, 101: 635–643.
- [24] Frost B R, Barnes C G, Collins W J, et al. A geochemical classification for granitic rocks [J]. *Journal of Petrology*, 2001, 42: 2033–2048.
- [25] Frost B R., Frost C D. A geochemical classification for feldspathic igneous rocks [J]. *Journal of Petrology*, 2008, 49: 1955–1969.
- [26] Taylor S R, McLennan S. The Continental crust: Composition and evolution [M]. Blackwell Scientific Publications, 1985, 54: 209–230.
- [27] McDonough W F, Sun S S. Isotopic and geochemical systematics in Tertiary–Recent basalts from southeastern Australia and implication for the sub–continental lithosphere [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1985, 49: 2051–2067
- [28] Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. A–type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1987, 95: 407–419.
- [29] King P L, White A J R, Chappell B W, et al. Characterization and origin of aluminous A–type granites from the Lachlan fold belt, southeastern Australia [J]. *Journal of Petrology*, 1997, 38: 371–391.
- [30] Wu F Y, Jahn B M, Wilde S A, et al. Highly fractionated I–type granites in NE China (II): Isotopic geochemistry and implications for crustal growth in the Phanerozoic [J]. *Lithos*, 2003, 67: 191–204.
- [31] Clemens J D, Holloway J R, White A J R. Origin of an A–type granite: experimental constraints [J]. *American Mineralogist*, 1986, 71: 317–324.
- [32] Eby G N. Chemical subdivision of the A–type granitoids: Petrogenetic and tectonic Implications [J]. *Geology*, 1992, 20: 641–644.
- [33] Li H, Ling M X, Li C Y, et al. A–type granite belts of two chemical subgroups in central eastern China: Indication of ridge subduction [J]. *Lithos*, 2012, 150: 26–36.
- [34] 谢建成, 杨晓勇, 杜建国, 等. 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*, 2008, 24(8): 1782–1800.
- Xie Jiancheng, Yang Xiaoyong, Du Jianguo, et al. Zircon U–Pb geochronology of the Mesozoic intrusive rocks in the Tongling region: Implications for copper–gold mineralization [J]. *Acta Petrologica*, 2008, 24(8): 1782–1800 (in Chinese with English abstract).
- [35] 王强, 许继峰, 赵振华, 等. 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)*, 2003, 33 (4): 323–334.
- Wang Qiang, Xu Jifeng, Zhao Zhenhua, et al. Petrogenesis of the Mesozoic intrusive rocks in the Tongling area, Anhui Province, China and their constraint to geodynamic process [J]. *Science in China (Series D)*, 2003, 33(4): 323–334 (in Chinese).



- [36] 孟祥金, 吕庆田, 杨竹森, 等. 长江中下游铜陵及邻区中生代酸性侵入岩地球化学特征及其深部岩浆作用探讨[J]. 地质学报, 2011, 85(5): 757-777.  
Meng Xiangjin, Lv Qingtian, Yang Zhusen, et al. Geochemical characteristics of Mesozoic intermediate-acid intrusive rocks in Tongling and adjacent area of the middle and lower reaches of the Yangtze River and its indication to the deep-seated magmatism [J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(5): 757-777 (in Chinese with English abstract).
- [37] 谢贤斌, 杨牧, 丛桂新. 长江中下游地区A型花岗岩研究[J]. 南方金属, 2015, 202(1): 15-21.  
Xie Xianbin, Yang Mu, Cong Guixin. Study on A-type granitoids in the Middle and Lower reaches region of the Yangtze River [J]. Southern Metals, 2015, 202 (1): 15-21. (in Chinese with English abstract)
- [38] 张旗, 简平, 刘敦一. 宁芜火山岩的锆石 SHRIMP 定年及其意义[J]. 中国科学(D辑), 2003, 33(4): 309-314.  
Zhang Qi, Jian Ping, Liu Dunyi. Zircon SHRIMP dating of Ningwu volcanic rocks and its significance [J]. Science in China (Series D), 2003, 33 (4): 309-314 (in Chinese).
- [39] 谢桂青, 毛景文, 李瑞玲, 等. 长江中下游鄂东南地区大寺组火山岩 SHRIMP 定年及其意义[J]. 科学通报, 2006, 51(19): 2283-2291.  
Xie Guiqing, Mao Jingwen, Li Ruiling, et al. In the middle and lower reaches of the Yangtze River in Southeastern Hubei Province Dasi volcanic rock shrimp set in and its significance [J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51 (19): 2283-2291 (in Chinese).
- [40] 闫峻, 刘海泉, 宋传中. 长江中下游繁昌—宁芜火山盆地火山岩锆石 U-Pb 年代学及其地质意义[J]. 科学通报, 2009, 54(12): 1716-1724 (in Chinese).  
Yan Jun, Liu Haiquan, Song Chuanzhong. In the middle and lower reaches of the Yangtze River Fanchang Ningwu volcanic basin volcanic rocks zircon U-Pb dating and its geological significance [J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(12): 1716-1724 (in Chinese).
- [41] 袁峰, 周涛发, 范裕, 等. 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, 2010, 26(9): 2805-2817.  
Yuan Feng, Zhou Tao, Fan Yu, et al. LA-ICP MS U-Pb ages of zircons from Mesozoic volcanic rocks and their significance in Fanchang Basin, Anhui Province, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(9): 2805-2817 (in Chinese with English abstract).
- [42] 袁峰, 周涛发, 范裕, 等. 宁芜盆地花岗岩类的锆石 U-Pb 年龄、同位素特征及其意义[J]. 地质学报, 85(5): 821-833.  
Yuan Feng, Zhou Taofa, Fan Yu, et al. Zircon U-Pb ages and isotope characteristics of the granitoids in the Ningwu basin, China [J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85 (5): 821-833 (in Chinese with English abstract).
- [43] 周涛发, 范裕, 袁峰. 长江中下游成矿带成岩成矿作用研究进展[J]. 岩石学报, 2008, 24 (8): 1665-1678.  
Zhou Taofa, Fan Yu, Yuan Feng. Advances on petrogenesis and metallogeny study of the mineralization belt of the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River area [J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(8): 1665-1678 (in Chinese with English abstract).
- [44] 周涛发, 范裕, 袁峰, 等. 长江中下游成矿带火山岩盆地的成岩成矿作用[J]. 地质学报, 2011, 85(5): 712-730.  
Zhou Taofa, Fan Yu, Yuan Feng, et al. Petrogenesis and metallogeny study of the volcanic basins in the Middle and Lower Yangtze metallogenic belt [J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(5): 712-730 (in Chinese with English abstract).
- [45] 薛怀民, 董树文, 马芳. 安徽庐枞火山岩盆地橄榄玄粗岩系的地球化学特征及其对下扬子地区晚中生代岩石圈减薄机制的约束[J]. 地质学报, 2010, 84(5): 664-681.  
Xue Huaimin, Dong Shuwen, Ma Fang. Geochemistry of shoshonitic volcanic rocks in Luzong basin, Anhui Province (Eastern China): Constraints on Cretaceous lithospheric thinning of the Lower Yangtze region [J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84 (5): 664-681 (in Chinese with English abstract).
- [46] 薛怀民, 董树文, 马芳. 长江中下游地区庐(江)—枞(阳)和宁(南京)—芜(湖)盆地内与成矿有关潜火山岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄[J]. 岩石学报, 2010, 26(9): 2653-2664 (in Chinese with English abstract).  
Xue Huaimin, Dong Shuwen, Ma Fang. Zircon U-Pb SHRIMP ages of Sub-volcanic bodies related with porphyritic Fe-deposits in the Luzong and Ningwu basins, Middle and Lower Yangtze river researches, Central China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26 (9): 2653-2664 (in Chinese with English abstract).
- [47] 曾键年, 覃永军, 郭坤一, 等. 安徽庐枞盆地含矿岩浆岩锆石 U-Pb 年龄及其对成矿时限的约束[J]. 地质学报, 2010, 84(4): 466-478.  
Zeng Jiannian, Qin Yongjun, Guo Kunyi, et al. Zircon U-Pb dating of ore-bearing magmatic rocks and its constraint on the formation time of the ore deposits in Luzong basin, Anhui Province [J]. Acta geologica Sinica, 2010, 84 (4): 466-478 (in Chinese with English abstract).
- [48] 闫峻, 彭戈, 刘建敏, 等. 下扬子繁昌地区花岗岩成因: 锆石年代学和 Hf-O 同位素制约[J]. 岩石学报, 2012, 28(10): 3209-3227.  
Yan Jun, Peng Ge, Liu Jianmin, et al. Petrogenesis of granites from Fanchang district, the Lower Yangtze region: Zircon geochronology and Hf-O isotopes constrains [J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28 (10): 3209-3227 (in Chinese with English abstract).
- [49] 常印佛, 周涛发, 范裕. 复合成矿与构造转换——以长江中下游成矿带为例[J]. 岩石学报, 2012, 28(10): 3067-3075.  
Chang Yinfo, Zhou Taofa, Fan Yu. Polygenetic compound mineralization and tectonic evolution: Study in the Middle-Lower Yangtze River Valley metallogenic belt [J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(10): 3067-3075 (in Chinese with English abstract).

- English abstract).
- [50] 孙洋, 马昌前, 刘园园. 长江中下游燕山期最新的成岩成矿事件: 来自宁镇地区的证据[J]. 科学通报, 2014, 59(8): 668–678.  
Sun Yang, Ma Changqian, Liu Yuanyuan. The latest Yanshanian magmatic and metallogenic events in the Middle–Lower Yangtze River belt: Evidences from the Ningzhen region[J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(8): 668–678 (in Chinese).
- [51] Gill J, Whelan P. Early rifting of an oceanic island arc (Fiji) produced shoshonitic to tholeiitic basalts [J]. J. Geophys. Res., 1989, 94: 4561–4578.
- [52] Bacon C R. Calc–alkaline, shoshonitic, and primitive tholeiitic lavas from monogenetic volcanoes near Crater Lake, Oregon [J]. J. Petrol., 1990, 3 (1): 135–166.
- [53] Conrey R M, Sherrod D R, Hooper P R, et al. Diverse primitive magmas in the Cascade arc, northern Oregon and southern Washington [J]. Can. Mineral., 35: 367–396.
- [54] Sun C H, Stern R J. Genesis of Mariana shoshonites: contribution of the subduction component [J]. J. Geophys. Res., 2001, 106: 589–608.
- [55] Turner S, Arnaud N, Liu J, Rogers N, et al. Postcollision, shoshonitic volcanism on the Tibetan Plateau: implications for convective thinning of the lithosphere and the source of ocean island basalts[J]. J. Petrol., 1996, 37: 45–71.
- [56] Eklund O, Konopelko D, Ruttanen H, et al. 1.8 Ga Svecofennian post–collisional shoshonitic magmatism in the Fennoscandian shield [J]. Lithos, 1998, 45: 87–108.
- [57] Liegeois J P, Navez J, Hertogen J, et al. Contrasting origin of post–collisional high–K calc–alkaline and shoshonitic versus alkaline and peralkaline granitoids: the use of sliding normalization [J]. Lithos, 1998, 45: 1–28.
- [58] Davis J M, Elston W E, Hawkesworth C J. Basic and intermediate volcanism of the Mogollon–Datil volcanic field: Implications for mid–Tertiary tectonic transitions in southwestern New Mexico, USA [C]//Prichard H M, Alabaster T, Harris N B W, Neary C R (Eds.). Magmatic Processes and Plate Tectonics, Special Publication 76. Geological Society of London, London, 1993: 469–488.
- [59] 曹毅, 杜杨松, 蔡春麟, 等. 安徽庐纵地区中生代A型花岗岩类及其岩石包体: 在碰撞后岩浆演化过程中的意义[J]. 高校地质学报, 2008, 14(4): 565–576.  
Cao Yi, Du Yangsong, Cai Chunlin, et al. Mesozoic A–type granitoids and xenoliths in the Lujiang–Zongyang area, Anhui Province: Significance in postcollisional magmatic evolution [J]. Geological Journal of China Universities, 2008, 4: 565–576 (in Chinese with English abstract).
- [60] 杜杨松, 曹毅, 袁万明, 等. 安徽沿江地区中生代碰撞后到造山后岩浆活动和壳幔相互作用——来自火山–侵入杂岩和岩石包体的证据[J]. 岩石学报, 2007, 23(6): 1294–1302.  
Du Yangsong, Cao Yi, Yuan Wanming, et al. Mesozoic post–collisional to postorogenic magmatic activities and crustal interaction with mantle along the Yangtze River, Anhui Province: Evidence from volcanic–intrusive complexes and xenoliths[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23 (6): 1294–1302 (in Chinese with English abstract).
- [61] 范裕, 周涛发, 袁峰, 等. 庐枞地区A型花岗岩锆石 LA–ICPMS U–Pb 年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 2008, 24(8): 1665–1678.  
Fan Yu, Zhou Taofa, Yuan Feng, et al. LAICP–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, 2008, 24(8): 1715–1724 (in Chinese with English abstract).
- [62] Wong J, Sun M, Xing GF, et al. Geochemical and zircon U–Pb and Hf isotopic study of the Baijuehuajian metaluminous A–type granite: Extension at 125–100 Ma and its tectonic significance for South China [J]. Lithos, 2009, 112(3/4): 289–305
- [63] Ling M X, Wang F Y, Ding X, et al. Cretaceous Ridge Subduction Along the Lower Yangtze River Belt, Eastern China[J]. Econ Geol., 2009, 104: 303–321.
- [64] 邓晋福, 莫宣学, 赵海铃, 等. 中国东部岩石圈去根/去根作用与大陆“活化”[J]. 现代地质, 1994, 8: 349–356.  
Deng Jinfu, Mo Xuanxue, Zhao Ling, et al. Lithosphere root/de–rooting and activation of the east China continent [J]. Geoscience, 1994, 8: 349–356 (in Chinese with English abstract).
- [65] 邓晋福, 吴宗絮. 下扬子克拉通岩石圈减薄事件与长江中下游 Cu–Fe 成矿带 [J]. 安徽地质, 2001, 11(2): 86–91.  
Deng Jinfu, Wu Zongxu. Lithospheric thinning event in the Lower Yangtze Craton and Cu–Fe metallogenic belt in the Middle and Lower Yangtze River Reaches [J]. Geology of Anhui, 2001, 11(2): 86–91 (in Chinese with English abstract).
- [66] 张旗, 王焰, 钱青, 等. 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, 2001, 17(2): 236–244.  
Zhang Qi, Wang Yan, Qian Qing, et al. The characteristics and tectonic–metallogenic significances of the adakites in Yanshan period from eastern China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2001, 17(2): 236–244 (in Chinese with English abstract).
- [67] 张旗, 金惟俊, 李承东, 等. 中国东部燕山期大规模岩浆活动与岩石圈减薄: 与大火成岩省的关系 [J]. 地学前缘, 2009, 16(2): 21–31.  
Zhang Qi, Jin Cheng, Li Chengdong, et al. Large scale magmatic activity and lithospheric thinning of eastern China in Yanshan period: relationship to the large igneous province [J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(2): 21–31 (in Chinese with English abstract).
- [68] 郑永飞, 张少兵. 华南前寒武纪大陆地壳的形成和演化 [J]. 科学通报, 2007, 52: 1–10.  
Zheng Yongfei, Zhang Shaobing. The formation and evolution of the continental crust of the Southern China Province in the pre–Cambrian period [J]. China Science Bulletin, 2007, 52: 1–10 (in Chinese).

- [69] Ames L, Zhou G, Xiong B. Geochronology and isotopic character of ultrahigh-pressure metamorphism with implications for collision of the Sino-Korean and Yangtze Cratons, central China [J]. *Tectonics*, 1996, 15: 472-489.
- [70] 毛景文, 谢桂青, 张作衡, 等. 中国北方中生代大规模成矿作用的期次和相应的地球动力学背景 [J]. *岩石学报*, 2005, 21(1): 169-188.
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Zhang Zuoheng, et al. Mesozoic large-scale metallogenic pulses in North China and corresponding geodynamic settings. *Acta Petrologica Sinica* [J]. *Chinese Journal of rocks*, 2005, 21 (1): 169-188(in Chinese with English abstract).
- [71] 窦志娟, 杨祝良, 陈志洪, 等. 长江中下游成矿带溧水盆地(次)火山岩的年代学及其意义[J]. *矿物岩石*, 2015, 35(2): 25-31.
- Dou Zhijuan, Yang Zhuliang, Chen Zhihong, et al. Geochronology and Significance of Lishui Basin (SUB) Volcanic Rocks of the Yangtze River Metallogenic Belt [J]. *Minerals and Rocks*, 2015, 35 (2): 25-31(in Chinese with English abstract).
- [72] 吕庆田, 董树文, 史大年, 等. 长江中下游成矿带岩石圈结构与成矿动力学模型——深部探测(SinoProbe)综述[J]. *岩石学报*, 2014, 30(4): 889-906.
- Lu Qingtian, Dong Shuwen, Shi Danian, et al. Lithosphere architecture and geodynamic model of Middle and Lower Reaches of Yangtze Metallogenic Belt: A review from SinoProbe [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(4): 889-906 (in Chinese with English abstract).
- [73] 吕庆田, 侯增谦, 赵金华, 等. 深地震反射剖面揭示的铜陵矿集区复杂地壳结构形态[J]. *中国科学D辑: 地球科学*, 2003, 33(5): 442-449.
- Lu Qingtian, Hou Zengqian, Zhao Jinhua, et al. Deep seismic reflection profiles to reveal the complex crustal structure of the Tongling ore cluster region [J]. *China Science Series D: Earth Sciences*, 2003, 33 (5): 442-449(in Chinese).
- [74] Wang C Y, Zeng R S, Mooney W D, et al. A crustal model of the ultrahigh-pressure Dabie Shan orogenic belt, China, derived from deep seismic refraction profiling [J]. *J. Geophys. Res.*, 2000, 105 (B5):10857-10869.
- [75] Zhang Z J, Li Y K, Lu D Y, et al. Velocity and anisotropy structure of the crust in the Dabieshan orogenic belt from wide angle seismic data[J]. *Phys. Earth Planet Int.*, 2000, 122: 115-131.
- [76] Zhang Z J, Wang G J, Teng J W, et al. CDP mapping to obtain the fine structure of the crust and upper mantle from seismic sounding data: an example for the southeastern China [J]. *Phys. Earth Planet Int.*, 2000, 122: 133-146.
- [77] 江国明, 张贵宾, 吕庆田, 等. 长江中下游地区成矿深部动力学机制: 远震层析成像证据[J]. *岩石学报*, 2014, 30(4): 907-917.
- Jiang Guoming, Zhang Guibin, Lu Qingtian, et al. Deep geodynamics of mineralization beneath the Middle-Lower Reaches of Yangtze River: Evidence from teleseismic tomography [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(4) : 907-917 (in Chinese with English abstract).
- [78] 陈江峰, 喻钢, 杨刚, 等. 安徽沿江江南中生代岩浆-成矿年代学格架[J]. *安徽地质*, 2005, 15: 161-170.
- Chen Jiangfeng, Yu Gang, Yang Gang, et al. The Mesozoic magmatic geochronology framework of Southern Anhui along Yangtze River [J]. *Geology of Anhui*, 2005, 15: 161-170 (in Chinese with English abstract).
- [79] 王丽娟, 黄建平, 于津海, 等. 长江中下游溧水盆地中基性次火山岩-侵入岩的锆石U-Pb定年和Lu-Hf同位素[J]. *科学通报*, 2014, 59(14): 1305-1317.
- Wang Lijuan, Huang Jianping, Yu Jinhai, et al. Zircon U-Pb dating and Lu-Hf isotope study of intermediate-mafic sub-volcanic and intrusive rocks in the Lishui Basin in the middle and lower reaches of Yangtze River [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59(14): 1305-1317, doi: 10.1007/s11434-010-0180-9 (in Chinese).
- [80] 杜杨松, 秦新龙, 李铨具. 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*, 2004, 23(2): 109-116.
- Du Yangsong, Qin Xinlong, Lee Honju. Mesozoic mantle-derived magma underplating in Tongling, Anhui Province: evidence from megacrysts and xenoliths [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2004, 23(2): 109-116 (in Chinese with English abstract).