

doi: [10.12097/gbc.2022.05.023](https://doi.org/10.12097/gbc.2022.05.023)

# “皖南高原”的发现及其演化史初探——来自皖南及其邻区燕山期两期花岗岩的证据

王存智, 朱清波\*, 靳国栋, 褚平利, 刘凯

WANG Cunzhi, ZHU Qingbo\*, JIN Guodong, CHU Pingli, LIU Kai

中国地质调查局南京地质调查中心

Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China

**摘要:** 为了探讨中国东部高原南部边界, 收集整理皖南及邻区燕山期花岗岩的资料, 并综合分析。结果显示, 皖南燕山期花岗岩大致以 132 Ma 为界分为早 (150~132 Ma)、晚 (132~120 Ma) 2 期: 早期的花岗岩主要是花岗闪长岩、二长花岗岩和少量二云母花岗岩, 大多具有埃达克岩的特征; 晚期花岗岩主要是富钾质的花岗岩, 属于 A 型花岗岩。指示中国东部高原的南界不在长江中下游一线, 而应当延伸到皖南及邻区。“皖南高原”大约形成于 150~132 Ma 期间, 在 132 Ma 左右发生了垮塌, 高原的界线向北退缩到长江中下游一线。中国东部高原整体垮塌在 125 Ma 左右, 但是还残留有一些加厚的地区, 主要分布在高原东侧的辽东、胶东、苏北、宁镇一带。

**关键词:** 皖南; 花岗岩; 埃达克岩; A 型花岗岩; 燕山期; 地质调查工程

**中图分类号:** P588.12<sup>†1</sup> **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2024)02/03-0390-11

**Wang C Z, Zhu Q B, Jin G D, Chu P L, Liu K. Discussion on the evolution of the Southern Anhui Plateau: Evidence from the Yanshanian two-stage granite in the southern Anhui Province and its adjacent areas. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(2/3): 390-400**

**Abstract:** In order to study the southern boundary of the eastern plateau in China, the data of Yanshanian granite reported in the literature in the southern Anhui are collected and sorted out in this paper. The results show that, Yanshanian granites in the southern Anhui Province can be divided into early (150~132 Ma) and late (132~120 Ma) periods roughly at 132 Ma. The early granites are mainly granodiorite, monzogranite and a small number of two-mica granite, with adakite characteristics, while the late granites are mainly potassium-rich granites, belonging to A-type granite. The study indicates that the southern boundary of the eastern plateau in China is not along the lower reaches of the Yangtze River, but extends to the southern Anhui Province and adjacent areas. The "Southern Anhui Plateau" was formed around 150~132 Ma and experienced a collapse around 132 Ma, causing the boundary of the plateau to retract northward to the lower reaches of the Yangtze River. The overall collapse of the eastern plateau in China occurred around 125 Ma, but some thickened areas still remain, mainly distributed in the eastern side of the plateau, such as eastern Liaoning Province, eastern Jiaozhou Bay, northern Jiangsu Province, and Nanjing to Zhenjiang City.

**Key words:** the southern Anhui Province; granite; adakite; A-type granite; Yanshanian; geological survey engineering

皖南包括沿江平原和皖南山区, 花岗岩大面积出露(孙涛, 2006), 以广泛发育燕山期岩浆作用为特

点(图 1)。对其中沿江平原地区的研究表明, 岩浆事件(包括侵入岩与火山岩)主要可分为 3 期: 第一期

收稿日期: 2022-05-12; 修订日期: 2022-10-23

资助项目: 中国地质调查局项目《武夷成矿带区域地质调查》(编号: DD20242972)、《武夷成矿带 1: 2.5 万试点填图及成果集成》(编号: DD20221633)

作者简介: 王存智(1983-), 男, 硕士, 正高级工程师, 从事区域地质调查工作。E-mail: [32107407@qq.com](mailto:32107407@qq.com)

\* 通信作者: 朱清波(1986-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事区域地质调查工作, E-mail: [415178053@qq.com](mailto:415178053@qq.com)

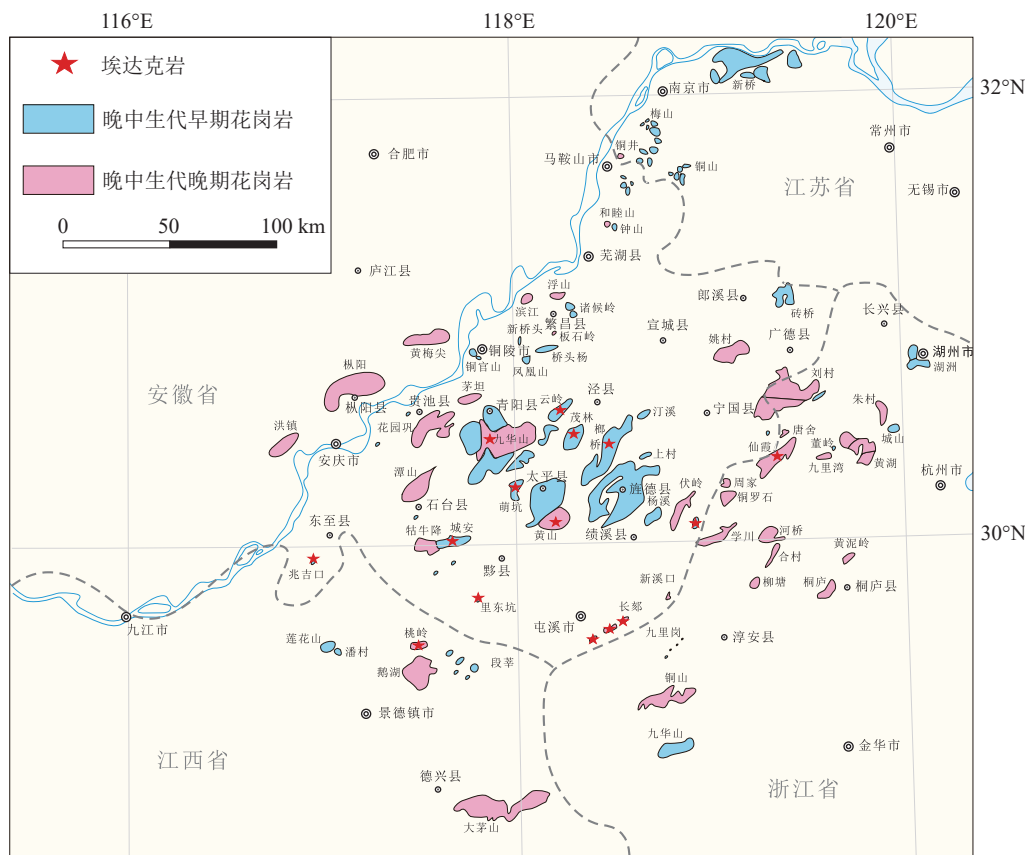


图 1 皖南及邻区燕山期两期花岗岩分布(据孙涛, 2006 修改, 周围非研究对象区域岩体未标识)

Fig. 1 Distribution map of Yanshanian granites in southern Anhui Province and its adjacent areas

为 145~136 Ma, 包括发育在断隆区的高钾钙碱性闪长岩类, 一般具有埃达克岩特征; 第二期为 135~128 Ma, 以发育在断凹区的橄榄安粗岩系火山岩和双峰式火山岩为主; 第三期为 127~123 Ma, 主要为 A 型花岗岩(毛景文等, 2004; 范裕等, 2008; 周涛发等, 2008; 闫峻等, 2012; 薛怀民等, 2013; 王继强等, 2017; 王存智等, 2018, 2021)。

皖南山区江南造山带东段的燕山期岩浆岩分布更广泛。近年来, 大量的高精度年代学资料显示, 江南造山带燕山期岩浆活动可分为 2 期, 分别为 150~137 Ma 和 136~120 Ma(Wu et al., 2012; 闫峻等, 2017)。早期以花岗闪长岩为主, 属于高钾钙碱性系列 I 型花岗岩(Wu et al., 2012; 周翔等, 2012; 周洁等, 2013; 李鹏举等, 2016; 闫峻等, 2017; Zhang et al., 2018); 晚期以正长花岗岩为主, 少量二长花岗岩, 多数具有 A 型花岗岩的特征(张虹等, 2005; 薛怀民等, 2009; 翁望飞等, 2011; Zhou et al., 2013; 高冉等, 2017; 王孝磊等, 2017; 闫峻等, 2017; Yue et al., 2020)。

研究表明, 大陆内花岗岩按照 Sr-Y 含量可分为埃达克型、喜马拉雅型、浙闽型、广西型和南岭型 5 类(张旗等, 2020)。不同类型的花岗岩与其形成的深度有关: 埃达克型花岗岩产于加厚的地壳; 喜马拉雅型花岗岩产于较厚的地壳; 浙闽型和广西型花岗岩产于正常厚度的地壳; 南岭型花岗岩产于减薄的地壳。应用花岗岩分类可以恢复古代地壳厚度(张旗等, 2014)。

对于中国东部燕山期岩浆作用, 张旗等(2001a)提出东部高原的模型来解释这些岩浆岩的广泛发育, 并根据其中埃达克岩的分布划分了高原边界, 认为高原南界在长江中下游一线。中国东部高原最早由任纪舜(1989)提出, 并得到一些学者的认同(董树文等, 2000; 张旗等, 2001b, 2007, 2008; 夏国清等, 2012), 但学术界对此还存在较大的争议。

本文收集了文献中报道的皖南及邻区燕山期花岗岩的资料(表 1), 认为皖南燕山期花岗岩时代主要集中在晚中生代 150~120 Ma, 并且明显可以分为

表 1 皖南及邻区燕山期岩浆岩岩石类型及年龄

Table 1 List of rock types and ages of Yanshanian magmatic rocks in the southern Anhui Province and its adjacent areas

| 岩体编号 | 岩体名称/地点      | 样品号                            | 岩石名称     | 年龄/Ma     | 类型       | 参考文献                               |
|------|--------------|--------------------------------|----------|-----------|----------|------------------------------------|
| 1    | 大茅山          | 10zjs172                       | 花岗岩      | 131 ± 2   | NL       | <a href="#">Sun et al., 2015</a>   |
|      |              | DMS-2-3, DMS-9                 | 花岗岩      | 121 ~ 126 | NL       | <a href="#">Jiang et al., 2011</a> |
| 2    | 庐枞盆地南侧钾质侵入岩带 | LZ07-14, LZ1027, AQ-85, LZ1116 | 花岗岩, 正长岩 | 123 ~ 130 | ZM,NL,GX | <a href="#">薛怀民等, 2016</a>         |
| 3    | 东至兆吉口        | E003                           | 花岗闪长岩    | 144       | XM       | <a href="#">徐晓春等, 2014</a>         |
| 4    | 东至兆吉口        | ZKV4                           | 闪长玢岩     | 134       | AD       |                                    |
|      | 东至兆吉口        | ZKX2                           | 闪长玢岩     | 129       | AD       |                                    |
| 5    | 鹅湖           | EH-1                           | 二云母花岗岩   | 122       | XM       | <a href="#">Jiang et al., 2011</a> |
| 6    | 桃岭           | 16JDZ017-1                     | 花岗岩      | 152       | AD       | <a href="#">韩园园等, 2019</a>         |
| 7    | 瑶里           | 16JDZ014-1                     | 二长花岗岩    | 129       | NL       | <a href="#">韩园园等, 2019</a>         |
| 8    | 金村岩体         | 16JDZ016-2                     | 黑云母二长花岗岩 | 149       | AD       | <a href="#">韩园园等, 2019</a>         |
| 9    | 卧龙谷          | 16WY011-2                      | 二长花岗岩    | 132       | NL       | <a href="#">郭博然等, 2013</a>         |
| 10   | 青山岭岩体        | 16WY006-1                      | 二云母二长花岗岩 | 131       | NL       | <a href="#">韩园园等, 2019</a>         |
| 11   | 段莘岩体         | 16WY001-1                      | 花岗岩      | 131       | NL       | <a href="#">韩园园等, 2019</a>         |
| 12   | 黄山冯村         | 14TX011-2                      | 钾长花岗岩    | 130       | NL       | <a href="#">闫峻等, 2017</a>          |
| 13   | 皖南休宁里东坑      | LDKZK105-B11                   | 花岗闪长岩    | 153       | XM       | <a href="#">陈子微等, 2013</a>         |
| 14   | 东源           |                                | 花岗闪长斑岩   | 146       | AD-XM    | <a href="#">周翔等, 2011</a>          |
| 15   | 剪刀卡          | YP4-TW2                        | 二长花岗岩    | 131       | NL       | <a href="#">汪雅菲等, 2015</a>         |
| 16   | 牯牛降          | GNJ2                           | 花岗岩      | 130       | NL       | <a href="#">谢建成等, 2012</a>         |
| 17   | 城安           | YP4-TW1                        | 花岗闪长岩    | 142       | AD       | <a href="#">汪雅菲等, 2014</a>         |
| 18   | 刘家           | YP4-TW3                        | 正长花岗岩    | 129       | ZM       | <a href="#">汪雅菲等, 2015</a>         |
| 19   | 石台县谭山        | 12WN001-1                      | 花岗岩      | 128       | ZM       | <a href="#">高冉等, 2017</a>          |
| 20   | 池州马头         | CZB92                          | 花岗闪长岩    | 145       | AD       | <a href="#">谢兴楠等, 2013</a>         |
| 21   | 钟村           | 12WN053-4                      | 花岗闪长岩    | 135       | AD       | <a href="#">Yue et al., 2020</a>   |
| 22   | 邵岭           | 12WN035-1                      | 花岗闪长岩    | 146       | AD       | <a href="#">Yue et al., 2020</a>   |
| 23   | 青阳           | 07FW001, 07FW004               | 正长花岗岩    | 142       | AD       | <a href="#">Wu et al., 2012</a>    |
| 24   | 九华山          | 07FW005-07FW009                | 花岗闪长岩    | 130 ~ 131 | NL       | <a href="#">Wu et al., 2012</a>    |
| 25   | 萌坑           | 12WN033-1                      | 花岗闪长岩    | 144       | AD       | <a href="#">Yue et al., 2020</a>   |
| 26   | 黄山           | 07FW127, 07FW131, 07FW132      | 花岗岩      | 125 ~ 127 | NL       | <a href="#">Wu et al., 2012</a>    |
| 27   | 太平           | 07FW123, 07FW124               | 花岗闪长岩    | 140 ~ 142 | AD       | <a href="#">Wu et al., 2012</a>    |
| 28   | 茂林           | 12WN052                        | 花岗闪长岩    | 138       | AD       | <a href="#">Yue et al., 2020</a>   |
| 29   | 瑯桥           | 12WN023-3                      | 花岗闪长岩    | 143       | AD       | <a href="#">Yue et al., 2020</a>   |
| 30   | 姚村           | 8849-1-1                       | 正长花岗岩    | 127       | NL,ZM    | <a href="#">王存智等, 2021</a>         |
| 31   | 宁国刘村         |                                | 二长花岗岩    | 132       | ZM       | <a href="#">陈芳等, 2014</a>          |
| 32   | 浙江埭溪         | 13zj99                         | 花岗岩      | 132       | NL       | <a href="#">Hu et al., 2017</a>    |
| 33   | 皇坟坞          | 13ZJ94                         | 花岗斑岩     | 130       | NL       | <a href="#">胡庆海, 2017</a>          |
| 34   | 阳山           | 13ZJ81                         | 花岗岩      | 132       | NL       | <a href="#">胡庆海, 2017</a>          |

续表 1

| 岩体编号 | 岩体名称/地点 | 样品号                                      | 岩石名称               | 年龄/Ma     | 类型    | 参考文献             |
|------|---------|------------------------------------------|--------------------|-----------|-------|------------------|
| 35   | 中泰      | 13ZT-1,<br>13ZT-2                        | 花岗闪长岩              | 140 ~ 146 | GX    | 胡庆海, 2017        |
| 36   | 浙江沈中坞   | 13zj89                                   | 花岗岩                | 134       | NL    | Hu et al., 2017  |
| 37   | 高岭      | 13ZJ112                                  | 花岗岩                | 130       | NL    | 胡庆海, 2017        |
| 38   | 山川乡     | 13ZJ83-2,<br>13ZJ84,<br>13ZJ86           | 花岗岩、花岗斑岩<br>和花岗闪长岩 | 134 ~ 138 | NL    | 胡庆海, 2017        |
| 39   | 唐舍      | 13ZJ79                                   | 花岗闪长岩              | 132       | NL    | 胡庆海, 2017        |
| 40   | 皖南宁国竹溪岭 | 12ZXL-02                                 | 花岗岩                | 138 ~ 142 | XM    | 陈雪霏等, 2013       |
| 41   | 仙霞      | 13ZJ78                                   | 花岗岩                | 132       | AD    | 周静, 2016         |
| 42   | 统里庄     | 13ZJ80                                   | 正长岩                | 132       | NL    | 胡庆海, 2017        |
| 43   | 浙江麻车埠   | 13zj28                                   | 花岗岩                | 131       | NL    | Hu et al., 2017  |
| 44   | 亭子山     | 13ZJ42,<br>13ZJ44                        | 花岗斑岩               | 132 ~ 137 | NL    | 胡庆海, 2017        |
| 45   | 宁国兰花岭   | GSY-3                                    | 花岗闪长岩              | 148       | AD    | 陈芳等, 2015        |
| 46   | 旌德      | 12WN019-4                                | 二长花岗岩              | 149 ~ 151 | AD    | Yue et al., 2020 |
| 47   | 绩溪伏岭    | ZGS516                                   | 正长花岗岩              | 129       | NL    | 张虹等, 2005        |
| 48   | 绩溪伏岭    | XY516                                    | 正长花岗岩              | 133       | NL    | 陈芳等, 2013        |
| 48   | 顺溪      | 13ZJ07<br>13ZJ16<br>13ZJ103-2<br>13ZJ107 | 花岗岩                | 131 ~ 137 | NL    | 陈雪霏等, 2013       |
| 49   | 绩溪县道遥   | XY-03                                    | 花岗闪长岩              | 149       | AD    | 施珂等, 2017        |
| 50   | 赤石      | 13ZJ36<br>13ZJ37                         | 闪长岩                | 147 ~ 152 | AD    | 陈雪霏等, 2013       |
| 51   | 杨溪      | 12WN045-1                                | 二长花岗岩              | 134       | ZM    | Yue et al., 2020 |
| 52   | 黄山新溪口   | HX2                                      | 花岗岩                | 130       | NL    | 柯宏飙等, 2020       |
| 53   | 黄山塔坑    | 14TX005-1                                | 钾长花岗斑岩             | 127       | NL    | 闫峻等, 2017        |
| 54   | 长陔      | D028                                     | 二长花岗岩              | 142       | XM    | 周术召等, 2016       |
| 55   | 古祝      | D029                                     | 花岗岩                | 146       | XM    | 周术召等, 2016       |
| 56   | 石门      | D251                                     | 花岗岩                | 154       | XM    | 周术召等, 2016       |
| 57   | 黄山五里亭   | D031                                     | 黑云母花岗岩             | 148       | XM    | 周术召等, 2016       |
| 58   | 淳安黄石潭   | HST071003                                | 花岗岩                | 126       | NL    | Li et al., 2013  |
| 59   | 淳安九里岗   |                                          | 花岗岩                | 124       | NL    | Li et al., 2013  |
| 60   | 淳安结蒙    | JM071202                                 | 花岗闪长岩              | 148       | XM    | Li et al., 2013  |
| 61   | 淳安木瓜    | MG11                                     | 花岗斑岩               | 142       | ZM-NL | 厉子龙等, 2013       |
| 62   | 淳安儒洪    | TS071405                                 | 花岗斑岩               | 129       | NL    | Li et al., 2013  |
| 63   | 铜山      | QS3-1                                    | 花岗岩                | 124 ~ 129 | NL    | 张智宇等, 2011       |
| 64   | 开化九华山   | H210-H224                                | 花岗岩                | 135 ~ 138 | NL    | 韩效忠等, 2018       |

注: 岩体类型标准据张旗等, 2020。AD—埃达克岩型; XM—喜马拉雅型; NL—南岭型; ZM—浙闽型; GX—广西型

早、晚 2 个时代(图 1)。两类花岗岩侵入的时代界线在 132 Ma 左右,前者主要为埃达克岩,可能是地壳加厚的产物;后者主要为 A 型花岗岩,指示地壳减薄。暗示 132 Ma 之前,皖南地区也存在高原,在约 132 Ma 之后高原开始垮塌。这为理解皖南及邻区燕山期岩浆作用的地球动力学过程提供了新的思路,也有助于加深对中国东部高原的认识。

## 1 皖南及其邻区晚中生代侵入岩成因类型与时空分布

### 1.1 晚中生代早期的埃达克质岩类

早先对皖南是否存在埃达克岩认识不清(张旗等, 2001a, 2001b, 2007, 2008)。最近的研究表明,皖南晚中生代早期的高钾钙碱性花岗岩、花岗闪长岩、石英闪长岩具有埃达克岩的特征(翁望飞等, 2011; 谢建成等, 2012; 张俊杰等, 2012; 周洁等, 2013; Wang et al., 2016; Gu et al., 2017; Jiang et al., 2018; Qian et al., 2019; Qi et al., 2020; 汪海等, 2020; Xiao et al., 2021)。这些岩体包括旌德、太平、青阳、上荪荻、外宿、石龟山、水油坑、宋村、兰花岭、汪木庵、黄凤坑、桐村、铜厂、榔桥、逍遥、黟县、靠背尖、富家坞等岩体(其中也包括一些赣北的岩体,图 1)。

这些早期的中酸性岩浆岩一般产于江南造山带东段,主要岩石类型为花岗闪长岩,主要矿物组合为斜长石 + 石英 + 钾长石 + 角闪石 ± 黑云母,副矿物有磷灰石、锆石、榍石、磁铁矿、钛铁矿等。岩石主量元素具有高  $\text{SiO}_2$  (66.81%)、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  (15.23%)、 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  (1.01)、低  $\text{TiO}_2$  (0.49%)、 $\text{MgO}$  (1.49%)、 $\text{CaO}$  (3.18%)、 $\text{P}_2\text{O}_5$  (0.18%) 等特征;  $\text{A}/\text{CNK}$  值为 1.04,呈弱过铝质,里特曼指数  $\sigma$  平均为 2.07,指示其属钙碱性系列。稀土元素表现为轻稀土元素富集,重稀土元素亏损,具低  $\text{Y}$  ( $5.04 \times 10^{-6} \sim 22.20 \times 10^{-6}$ , 平均  $14.77 \times 10^{-6}$ ) 和  $\text{Yb}$  ( $0.61 \times 10^{-6} \sim 2.16 \times 10^{-6}$ , 平均  $1.53 \times 10^{-6}$ ) 含量;微量元素表现为富集大离子亲石元素 ( $\text{Rb}$ 、 $\text{La}$ 、 $\text{Ba}$ 、 $\text{Sr}$ ) 和亏损高场强元素 ( $\text{Nb}$ 、 $\text{Ta}$ 、 $\text{Zr}$ 、 $\text{Y}$ ),具高  $\text{Sr}$  ( $227.5 \times 10^{-6} \sim 861 \times 10^{-6}$ , 平均  $429.66 \times 10^{-6}$ ) 的特征,较高  $\text{Sr}/\text{Y}$  (39.05) 和  $\text{La}/\text{Yb}$  (24.34) 值,弱的负  $\text{Eu}$  异常,  $I_{\text{Sr}}$  平均值为 0.7092,  $\varepsilon_{\text{Nd}} < 0$  (翁望飞等, 2011)。岩石学及地球化学特征表明,皖南晚中生代早期花岗闪长岩为“C”型高钾钙碱性埃达克岩,其形成与加厚地壳受地幔热物质上涌

影响部分熔融有关(翁望飞等, 2011),或者与太平洋板块的俯冲有关(谢建成等, 2016)。

### 1.2 晚中生代晚期的 A 型花岗岩

晚中生代 A 型花岗岩在皖南广泛分布。其中在沿江地区,邢凤鸣等(1994)认为分布 2 条 A 型花岗岩带,一条在长江北岸,从安庆的洪镇岩体、大龙山岩体到枞阳的城山岩体、花山岩体、黄梅尖岩体、枞阳岩体等;另一条在长江南岸,从贵池的花园坳岩体、毛坦岩体,南陵的板石岭岩体到繁昌的浮山岩体。这些岩体岩性以石英正长岩和碱性花岗岩为主,地球化学特征表现为富碱、富铁、高  $\text{Ga}/\text{Al}$  值、显著的负  $\text{Eu}$  异常,具有 A 型花岗岩的地球化学特征,侵入年龄集中在 127 ~ 123 Ma (范裕等, 2008; Wu et al., 2012; 彭戈等, 2012)。

在皖南山区的江南造山带东段, A 型花岗岩大多与早期埃达克质岩体组成复式岩体,如黄山-太平岩体(薛怀民等, 2009)、青阳-九华岩体(Zhang et al., 2018; Qian et al., 2019),牯牛降-城安岩体等(谢建成等, 2012);另外,还包括谭山岩体(高冉等, 2017)、姚村岩体(王存智等, 2021)、刘村岩体(陈芳等, 2014)、伏岭岩体(陈芳等, 2013)、段莘岩体(韩园园等, 2019)、新溪口岩体(柯宏飙, 2020)、塔坑岩体(闫峻等, 2017)及邻区赣东北的冯村岩体(闫峻等, 2017)、卧龙谷岩体(郭博然等, 2013)、青山岭岩体(韩园园等, 2019)和浙西北的统里庄岩体(胡庆海, 2017)、麻车埠岩体(Hu et al., 2017)、黄石潭岩体(Li et al., 2013)、九里岗岩体(Li et al., 2013)、儒洪岩体(Li et al., 2013)、铜山岩体(张智宇等, 2011)、高岭岩体(胡庆海, 2017)等。这些花岗岩体也主要为正长花岗岩,其时限都在 132 Ma 以后。

### 1.3 皖南及邻区两期花岗岩时代的界定

对于皖南及邻区晚中生代花岗岩的期次,多数学者主张分为 2 期(Wu et al., 2012; 周翔等, 2012; 李鹏举等, 2016; Gu et al., 2017; 闫峻等, 2017; Zhang et al., 2018; Yue et al., 2020)。但是, 2 期之间的时代界线也存在不同认识。部分学者认为 2 期分别为 170 ~ 145 Ma 和 145 ~ 120 Ma 两个阶段(Yuan et al., 2003; 周涛发等, 2004; Li et al., 2012; 周翔等, 2012),而另有学者认为 2 个阶段的岩浆活动分别为 150 ~ 137 Ma 和 136 ~ 120 Ma (Wu et al., 2012; 闫峻等, 2017, 赵德奎等, 2019)。



但是,据周静(2016)研究,浙西北地区仙霞花岗闪长岩为典型的埃达克岩( $Sr$  为  $352 \times 10^{-6} \sim 481 \times 10^{-6}$ ,  $Yb$  为  $0.9 \times 10^{-6} \sim 1.2 \times 10^{-6}$ ), 年龄为 132 Ma, 说明埃达克岩的时限可能持续到 132 Ma。

皖南 A 型花岗岩一般出现在 132 Ma 以后, 如陈芳等(2014)报道的安徽广德刘村 A 型花岗岩的时代为 132 Ma; 绩溪伏岭 A 型花岗岩中伏岭岩体小昌溪单元的钾长花岗岩年龄为 129 Ma(陈芳等, 2013); 江南造山带东段桃岭—段莘地区的 A 型花岗岩(二云母花岗岩和二云母二长花岗岩)的年龄在 132.0 ~ 129.7 Ma 之间(韩园园等, 2019); 九华山 A 型花岗岩的年龄为 131.7 ~ 128.4 Ma(Zhang et al., 2018)。值得注意的是, 与九华山紧邻的青阳岩体为埃达克岩, 年龄为 138.3 ~ 132.8 Ma(Zhang et al., 2018), 表明皖南地区从埃达克岩转变为 A 型花岗岩的时代在 132 Ma 左右。因此, 皖南及邻区晚中生代的 2 期花岗岩大致可以分为 150 ~ 132 Ma 和 132 ~ 120 Ma 两个时期。

## 2 讨论

### 2.1 埃达克岩的成因及背景

埃达克岩(adakite)是 1990 年由美国学者 Defant 等命名(Defant et al., 1990)的, 其以  $Sr > 300 \times 10^{-6}$ ,  $Y < 20 \times 10^{-6}$ ,  $Yb < 2 \times 10^{-6}$ ,  $MgO < 3\%$  等地球化学特征为特点(张旗等, 2001b; Castillo, 2006)。但对于埃达克岩成因的认识还存在较大争议(Gu et al., 2018; Qi et al., 2020), 主要观点包括: ①玄武岩岩浆底侵引发的地壳增厚使得下地壳部分熔融, 随后与地幔橄榄岩相互作用(Wang et al., 2006, 2007; 王亮等, 2022; 张梓尧等, 2023); ②幔源玄武岩中角闪石±钛铁矿±磷灰石±钛磁铁矿的低压分离结晶作用(Li et al., 2009); ③俯冲古太平洋板块的部分熔融, 然后是地壳同化作用(Sun et al., 2012; Xie et al., 2012; Deng et al., 2016); ④幔源玄武质岩浆和壳源长英质岩浆的混合(Zhou et al., 2013, 2015; Xie et al., 2018)。

争论的焦点在于埃达克岩是否与压力有关? 较多学者认为埃达克岩的形成不需要高压条件, C 型埃达克岩没有特殊的含义(张超等, 2012; Ma et al., 2015)。也有学者认为埃达克岩形成于岛弧背景, 是消减的板片洋中脊玄武岩部分熔融形成的, 与岛弧/俯冲环境有关(Atherton et al., 1993)。张旗等(2001a, 2001b, 2020)则认为, 埃达克岩主要与部分熔

融之后的残留相有关, 与榴辉岩相平衡的熔体才是埃达克岩, 指示埃达克岩形成于高压背景, 产于板块俯冲带的深部或者加厚地壳的底部(张旗等, 2001a, 2001b, 2020; Castillo, 2006)。因此, 埃达克岩的高  $Sr$  低  $Y$  特点不能用常规的地球化学方法解释, 只能用残留相理论解释(张旗等, 2020)。同时, 残留相理论还可以解释其他类型的花岗岩, 例如, 埃达克型花岗岩富  $Sr$  贫  $Yb$ , 指示源区有石榴子石、无斜长石, 残留相为榴辉岩相; 喜马拉雅型贫  $Sr$  和  $Yb$ , 暗示源区既有石榴子石也有斜长石, 残留相为含石榴子石的麻粒岩相; 浙闽型贫  $Sr$  富  $Yb$ , 源区无石榴子石, 有斜长石, 残留相为斜长角闪岩相; 南岭型非常贫  $Sr$ 、富  $Yb$ , 源区为富高钙的斜长石和辉石, 也为斜长角闪岩相; 广西型富  $Sr$  和  $Yb$ , 源区既无石榴子石也无斜长石, 残留相为角闪石岩相或角闪辉石岩相(张旗等, 2020)。

### 2.2 A 型花岗岩的成因及背景

A 型花岗岩的成因模式繁多, 迄今依然没有统一的认识, 主要模式有: ①幔源玄武质岩浆分异(Turner et al., 1992); ②下地壳岩石经部分熔融抽取 I 型花岗质岩浆后, 麻粒岩残留体再次部分熔融(Collins et al., 1982); ③地壳火成岩直接熔融(Creaser et al., 1991); ④地幔岩浆底侵加热下地壳岩石熔融(Frost et al., 2001); ⑤幔源、壳源岩浆的混合作用(Yang et al., 2006)。

总体来看, 主要有壳源、幔源和壳幔混合 3 种成因模式。张旗等(2012)认为, A 型花岗岩的实质是减薄的下地壳部分熔融的产物, 产生于低压和高温环境, 与源岩无关。因此, A 型花岗岩大体指示了板内、伸展、热等环境(Creaser et al., 1991; Collins et al., 1982; Turner et al., 1992; Frost et al., 2001; Yang et al., 2006), 对应地壳减薄的构造背景。

### 2.3 皖南两期岩浆活动的地质意义

皖南晚中生代早期埃达克岩由于与铜-金等多金属矿床密切相关而受到较多的关注(闫峻等, 2017)。这些埃达克岩为钙碱性, 具有较低的  $Mg^\#$  值, 较高的  $I_{Sr}$  值, 富集的  $Sr-Nd-Hf$  同位素组成, 以及富集大离子亲石元素、亏损高场强元素等特征, 与俯冲洋壳部分熔融形成的埃达克岩显著不同, 可能形成于加厚的下地壳部分熔融(翁望飞等, 2011; 王孝磊等, 2017; 闫峻等, 2017)。Zhou et al.(2013)提

出,该区埃达克岩是下地壳部分熔融的产物,也有地幔物质的加入,说明其对江南造山带东部岩石圈构造体制的影响是由碰撞变为伸展。闫峻等(2017)认为,皖南晚中生代早期的花岗岩体为加厚下地壳部分熔融经过同化混染和分离结晶作用(AFC-Assimilation and Fractional Crystallization)形成,产于高压环境。因此,江南造山带东部的燕山期埃达克质岩石被归因于增厚或分层的大陆下地壳的部分熔融(Wang et al., 2006; Zhou et al., 2013, 2015; 闫峻等, 2017; Zhang et al., 2018)。

皖南晚中生代晚期的 A 型花岗岩指示岩浆源区为斜长石稳定区,对应较大的压力。并且在皖南缺少同期的基性岩浆活动,指示 A 型花岗岩为壳源成因。同时锆石饱和温度范围为 764 ~ 811°C,平均 786°C(薛怀民等, 2009),相对于早期埃达克质岩(锆石饱和温度为 677 ~ 720°C,平均 694°C(Yan et al., 2015),具有更高的温度,指示更靠近岩浆源区,表明其形成于拉张环境下地壳减薄的构造背景(闫峻等, 2017)。

因此,皖南及邻区在 150 ~ 120 Ma 期间,从埃达克质岩到 A 型花岗岩,下地壳岩浆源区从高压低温转变为低压高温(闫峻等, 2017),对应早阶段地壳的加厚和晚阶段强烈拉张背景下地壳的减薄。实际上,类似的现象在大别山也存在。马昌前等(2003)认为,形成于 135 Ma 的高 Sr/Y 埃达克质花岗岩是加厚地壳的产物,135 Ma 之后的 A 型花岗岩是地壳减薄的产物,两类花岗岩指示了大别山中生代地壳从挤压转向伸展的过程。

从早期到晚期,岩浆  $P-T$  条件的系统变化不仅与伸展活动强度的增加一致,而且意味着地幔部分熔融的早期阶段处于含水状态,使岩浆能够在较冷的条件下形成(Yan et al., 2015),指示埃达克岩岩浆作用的构造环境可能是大陆弧,随后转化为伸展背景,与俯冲板块漂移形成的弧后背景有关(Sun et al., 2007; Wong et al., 2009)。随后古太平洋板块后撤(Zhou et al., 2000, 2006),导致 A 型花岗岩岩浆活动(Zhou et al., 2006; Jiang et al., 2011; Yang et al., 2011; Deng et al., 2012; Wu et al., 2012; Gu et al., 2017)。

#### 2.4 东部高原南部边界问题

按照张旗等(2020)对大陆花岗岩的分类,根据已发表的 Sr-Y 含量,将皖南花岗岩分为 5 种类型

(图 2; 表 1)。埃达克岩和喜马拉雅型花岗岩代表地壳加厚区,其余 3 类为地壳正常或厚度减薄区。从图 2 可以看出,早期表示加厚地壳的埃达克型花岗岩和喜马拉雅型花岗岩的分布位置大致在皖南、赣北及浙西北地区,据此勾勒出早期东部高原的南部边界(图 2)。其中最南部形成年龄为 148 ~ 142 Ma 的白际-长陔北东向花岗岩,微量元素 Sr 在  $307 \times 10^{-6} \sim 90 \times 10^{-6}$  之间, Yb 在  $1.98 \times 10^{-6} \sim 1.55 \times 10^{-6}$  之间, Sr/Y 值为 5 ~ 16(周木召, 2016),为喜马拉雅型花岗岩(XM),代表了高原的最南端(图 2)。

张旗等(2001a, 2001b, 2007, 2008)根据中国东部地区出露的埃达克岩勾勒了一个东部高原,其南界止于长江中下游南侧(鄂东南、赣北九江市、铜陵、宁镇—上海一线),其南为地壳减薄地区。本次研究表明,中生代埃达克岩(150 ~ 132 Ma)在皖南地区广泛分布,可以将中国东部高原向南延伸到皖南地区,高原的南界应位于皖浙赣界线附近。在该区域,132 Ma 之前的燕山期花岗岩均为埃达克岩;132 Ma 之前也有 A 型花岗岩,但只出露在高原以南的浙江湖州与江西景德镇一线以南地区(图 2、图 3-a)。其次,张旗等(2001a, 2001b, 2007, 2008)认为,高原整体垮塌发生在 125 Ma 左右。但从图 2 可知,132 Ma 之后,在铜陵以南,埃达克岩全部消失,出露的均为 A 型花岗岩(<132 Ma),说明属于中国东部高原南部地区的“皖南高原”率先在 132 Ma 左右发生垮塌,高原垮塌的范围在安徽铜陵以南,直至张旗等(2001a, 2001b, 2007, 2008)界定的长江中下游南侧(图 3-b)。至 125 Ma 左右,高原整体垮塌,埃达克岩消失,出露的均为 A 型花岗岩(<125 Ma)(图 3-c)。残余的高原仅出现在高原东部,大致在辽东、胶东、苏北、宁镇一带,在约 100 Ma 之后才全部消失(张旗等, 2008)。

### 3 结 论

(1) 皖南燕山期花岗岩主要分为 150 ~ 132 Ma 和 132 ~ 120 Ma 两期,早期的花岗岩主要为花岗闪长岩、二长花岗岩和少量二云母花岗岩;晚期的花岗岩主要为富钾质花岗岩。

(2) 早期和晚期花岗岩的类型不同,早期主要为埃达克岩,有少量喜马拉雅型花岗岩,是地壳加厚的产物,指示早期属于高原背景;晚期主要为 A 型(南

岭型)花岗岩及少量浙闽型花岗岩,是地壳减薄的产物,代表地壳伸展减薄的背景。

(3)中国东部高原南界应当延伸到皖南及邻区,“皖南高原”在约 132 Ma 发生了垮塌,边界退缩到长

江中下游一线,在约 125 Ma 高原整体垮塌。

致谢: 本文在撰写过程中得到了中国科学院地质与地球物理研究所张旗研究员的精心指导, 审稿专家对论文修改提出了宝贵建议, 在此一并致谢。

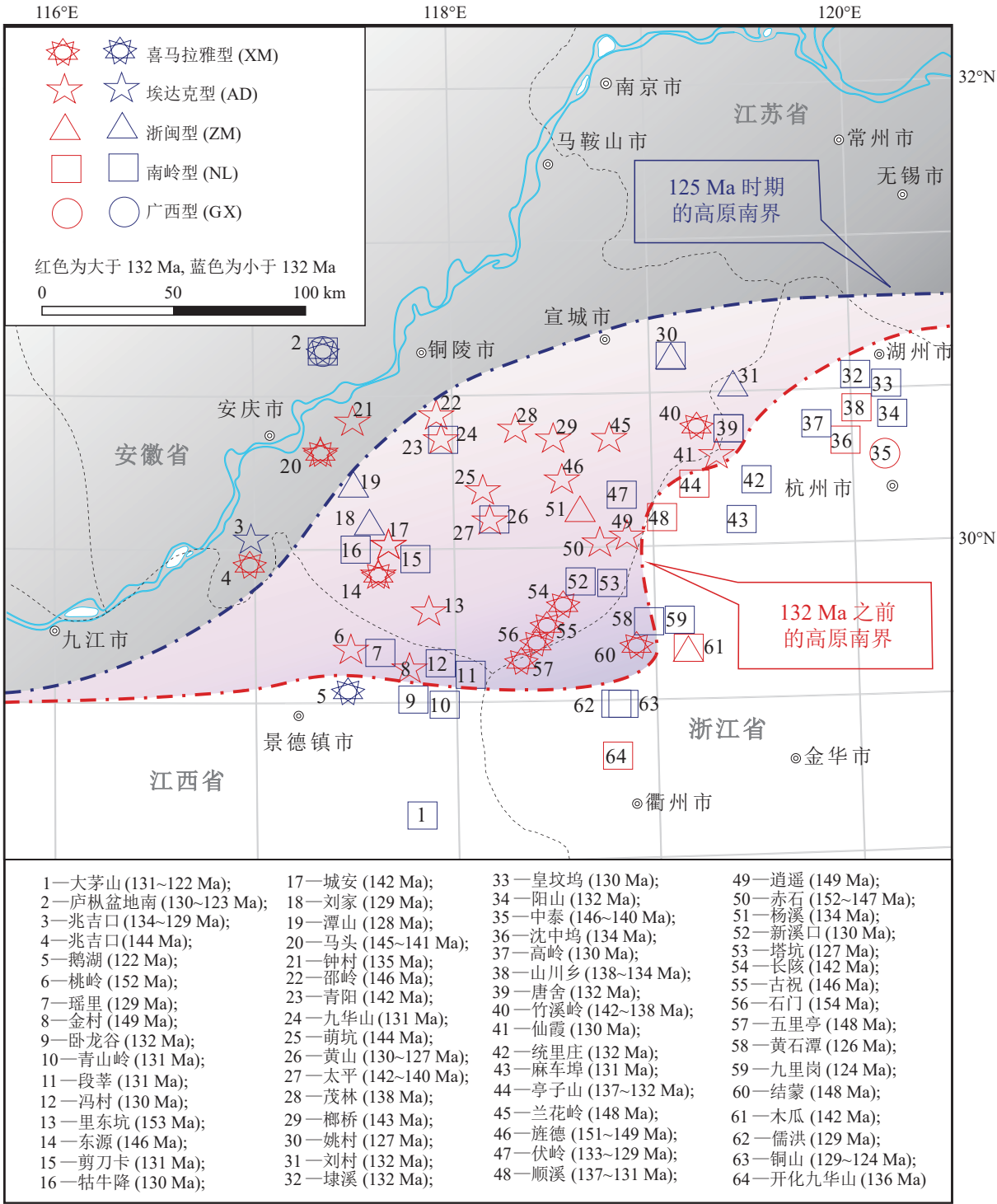


图 2 皖南及邻区不同类型花岗岩分布图(岩体编号及年龄信息见表 1, 岩体类型标准据张旗等, 2020)

Fig. 2 Distribution map of different types of granite in the southern Anhui Province and its adjacent areas



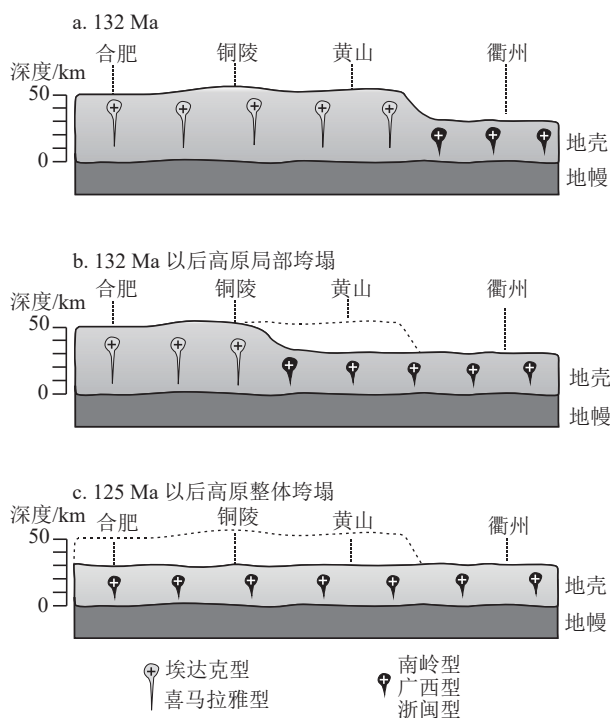


图3 皖南高原演化示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the evolution of the Southern Anhui Plateau

## 参考文献

- Atherton M P, Petford N. 1993. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust[J]. *Nature*, 362(6416): 144–146.
- Castillo P R. 2006. An overview of adakite petrogenesis[J]. *Chinese Science Bulletin*, 51(3): 257–268.
- Collins W J, Beams S D, White A J R, et al. 1982. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 80(2): 189–200.
- Creaser R A, Price R C, Wormald R J. 1991. A-type granites revisited: Assessment of a residual-source model[J]. *Geology*, 19(2): 163–166.
- Defant M J, Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subduction lithosphere[J]. *Nature*, 347: 662–665.
- Deng J H, Yang X Y, Sun W D, et al. 2012. Petrology, geochemistry, and tectonic significance of Mesozoic shoshonitic volcanic rocks, Luzong volcanic basin, eastern China[J]. *International Geology Review*, 54(6): 714–736.
- Deng J H, Yang X Y, Li S, et al. 2016. Partial melting of subducted paleo-Pacific plate during the early Cretaceous: constraint from adakitic rocks in the Shaxi porphyry Cu–Au deposit, Lower Yangtze River Belt[J]. *Lithos*, 262: 651–667.
- Frost B R, Barnes C G, Collins W J, et al. 2001. A geochemical classification for granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 42(11): 2033–2048.
- Gu H L, Yang X Y, Deng J H, et al. 2017. Geochemical and zircon U–Pb geochronological study of the Yangshan A-type granite: Insights into the geological evolution in south Anhui, eastern Jiangnan Orogen[J]. *Lithos*, 284/285: 156–170.
- Gu H L, Yang X Y, Nie Z X, et al. 2018. Study of late-Mesozoic magmatic rocks and their related copper–gold–polymetallic deposits in the Guichi ore-cluster district, Lower Yangtze River Metallogenic Belt, East China[J]. *International Geology Review*, 60(11/14): 1404–1434.
- Hu Q H, Yu K Z, Liu Y S, et al. 2017. The 131–134 Ma A-type granites from northern Zhejiang Province, South China: implications for partial melting of the Neoproterozoic lower crust[J]. *Lithos*, 294/295: 39–52.
- Jiang X Y, Luo J C, Guo J, et al. 2018. Geochemistry of I- and A-type granites of the Qingyang–Jiuhuashan complex, eastern China: Insights into early cretaceous multistage magmatism[J]. *Lithos*, 316/317: 278–294.
- Jiang Y H, Zhao P, Zhou Q, et al. 2011. Petrogenesis and tectonic implications of Early Cretaceous S- and A-type granites in the northwest of the Gan–Hang rift, SE China[J]. *Lithos*, 121: 55–73.
- Li H, Ling M X, Li C Y, et al. 2012. A-type granite belts of two chemical subgroups in central eastern China: indication of ridge subduction[J]. *Lithos*, 150: 26–36.
- Li J W, Zhao X F, Zhou M F, et al. 2009. Late Mesozoic magmatism from the Daye region, eastern China: U–Pb ages, petrogenesis, and geodynamic implications[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 157(3): 383–409.
- Li Z L, Zhou J, Mao J R, et al. 2013. Zircon U–Pb geochronology and geochemistry of two episodes of granitoids from the northwestern Zhejiang Province, SE China: Implication for magmatic evolution and tectonic transition[J]. *Lithos*, 179: 334–352.
- Ma Q, Zheng J P, Xu Y G, et al. 2015. Are continental “adakites” derived from thickened or foundered lower crust?[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 419: 125–133.
- Qi H S, Lu S M, Yang X Y, et al. 2020. Genesis of Cretaceous igneous rocks and its related large scale porphyry U–Au mineralization in Chating, the Middle–Lower Yangtze River Metallogenic Belt: The geochemical constrains[J]. *Ore Geology Reviews*, 127: 103793.
- Qian L, Wang Y, Xie J C, et al. 2019. The Late Mesozoic granodiorite and polymetallic mineralization in southern Anhui Province, China: A perspective from apatite geochemistry[J]. *Solid Earth Sciences*, 4(2019): 178–189.
- Sun F J, Xu X S, Zou H B, et al. 2015. Petrogenesis and magmatic evolution of ~130 Ma A-type granites in Southeast China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 98: 20–224.
- Sun W D, Ding X, Hu Y H, et al. 2007. The golden transformation of the Cretaceous plate subduction in the west Pacific[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 262(3/4): 533–542.
- Sun W D, Ling M X, Chung S L, et al. 2012. Geochemical constraints on adakites of different origins and copper mineralization[J]. *Journal of Geology*, 120(1): 105–120.
- Turner S P, Foden J D, Morrison R S. 1992. Derivation of some A-type magmas by fractionation of basaltic magma: An example from the Padthaway Ridge, South Australia[J]. *Lithos*, 28: 151–179.
- Wang Q, Wyman D A, Xu J F, et al. 2006. Petrogenesis of Cretaceous

- adakitic and shoshonitic igneous rocks in the Luzong area, Anhui Province (eastern China): Implications for geodynamics and Cu–Au mineralization[J]. *Lithos*, 89: 424–446.
- Wang Q, Wyman D A, Xu J F, et al. 2007. Partial melting of thickened or delaminated lower crust in the middle of eastern China: Implications for Cu–Au mineralization[J]. *Journal of Geology*, 115(2): 149–161.
- Wang S W, Zhou T F, Yuan F, et al. 2016. Geochemical characteristics of the Shujiadian Cu deposit related intrusion in Tongling: Petrogenesis and implications for the formation of porphyry Cu systems in the Middle–Lower Yangtze River Valley metallogenic belt, eastern China[J]. *Lithos*, 252: 185–199.
- Wong J, Sun M, Xing G F, et al. 2009. Geochemical and zircon U–Pb and Hf isotopic study of the Baijhuajian metaluminous A–type granite: extension at 125–100 Ma and its tectonic significance for South China[J]. *Lithos*, 112(3/4): 289–305.
- Wu F Y, Ji W Q, Sun D H, et al. 2012. Zircon U–Pb geochronology and Hf isotopic compositions of the Mesozoic granites in southern Anhui Province, China[J]. *Lithos*, 150: 6–25.
- Xiao Q L, Zhou T F, Hollings P, et al. 2021. Mineral and whole-rock chemistry of the Chating porphyry Cu–Au deposit related intrusions in the Middle–Lower Yangtze River Belt, Eastern China: Implications for magma evolution and mineralization[J]. *Lithos*, 380/381: 105881.
- Xie J C, Yang X Y, Sun W D, et al. 2012. Early Cretaceous dioritic rocks in the Tongling region, eastern China: implications for the tectonic settings[J]. *Lithos*, 150: 49–61.
- Xie J C, Wang Y, Li Q Z, et al. 2018. Petrogenesis and metallogenic implications of Late Mesozoic intrusive rocks in the Tongling region, eastern China: a case study and perspective review[J]. *International Geology Review*, 60(11/14): 1361–1380.
- Yan J, Liu J M, Li Q Z, et al. 2015. In situ zircon Hf–O isotopic analyses of late Mesozoic magmatic rocks in the Lower Yangtze River Belt, central eastern China: implications for petrogenesis and geodynamic evolution[J]. *Lithos*, 227: 57–76.
- Yang J H, Wu F Y, Chung S L, et al. 2006. A hybrid origin for the Qianshan A–type granite, northeast China: Geochemical and Sr–Nd–Hf isotopic evidence[J]. *Lithos*, 89(1/2): 89–106.
- Yang X Y, Yang X M, Chi Y Y, et al. 2011. A porphyritic copper (gold) ore-forming model for the Shaxi–Changpushan district, Lower Yangtze metallogenic belt, China: geological and geochemical constraints[J]. *International Geology Review*, 53: 580–611.
- Yuan F, Zhou T F, Yue S C, et al. 2003. Rare Earths of Magmatic Rocks in Yanshanian Stage in Adjacent Region of Anhui and Jiangxi Provinces, Jiangnan Uplift[J]. *Journal of Rare Earth*, 21(5): 591–594.
- Yue Q, Yan J, Liu J M, et al. 2020. Geochronology, petrogenesis and tectonic implications of the early Cretaceous granitoids in the Jingde–Guangde area, Anhui province, South China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 190: 104–150.
- Zhang Y S, Yan J, Li Q Z, et al. 2018. Pulses of Late Mesozoic magmatism: Zircon ages and Hf–O isotopic composition of the Qingyang–Jiuhuashan granitic complex, southern Anhui province, eastern China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 167: 181–196.
- Zhou J, Jiang Y H, Xing G F, et al. 2013. Geochronology and petrogenesis of Cretaceous A–type granites from the NE Jiangnan Orogen, SE China[J]. *International Geology Review*, 55: 1359–1383.
- Zhou T F, Wang S W, Fan Y, et al. 2015. A review of the intracontinental porphyry deposits in the Middle–Lower Yangtze River Valley metallogenic belt, Eastern China[J]. *Ore Geology Reviews*, 65: 433–456.
- Zhou X M, Li W X. 2000. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in southeastern China: Implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas[J]. *Tectonophysics*, 326(3/4): 269–287.
- Zhou X M, Sun T, Shen W Z, et al. 2006. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution[J]. *Episodes*, 29(1): 26–33.
- 陈芳, 王登红, 杜建国, 等. 2013. 安徽绩溪伏岭花岗岩 LA–ICP–MS 锆石 U–Pb 年龄的精确测定及其地质意义[J]. *岩矿测试*, 32(6): 970–977.
- 陈芳, 王登红, 杜建国, 等. 2014. 安徽宁国刘村二长花岗岩地球化学特征、LA–ICP–MS 锆石 U–Pb 年龄及其地质意义[J]. *地质学报*, 88(5): 869–882.
- 陈芳, 王登红, 杜建国, 等. 2015. 安徽宁国兰花岭钨矿床含矿岩体的地球化学特征、LA–ICP–MS 锆石 U–Pb 年代学研究[J]. *大地构造与成矿学*, 39(2): 369–377.
- 陈雪霏, 汪应庚, 孙卫东, 等. 2013. 皖南宁国竹溪岭地区花岗岩锆石 U–Pb 年代学及地球化学及其成因研究[J]. *地质学报*, 87(11): 1662–1678.
- 陈子微, 余心起, 周翔, 等. 2013. 皖南休宁县里东坑似斑状花岗闪长岩成岩成矿特征分析[J]. *中国地质*, 40(6): 1762–1776.
- 董树文, 吴锡浩, 吴珍汉, 等. 2000. 论东亚大陆的构造翘变——燕山运动的全球意义[J]. *地质论评*, 46(1): 8–13.
- 范裕, 周涛发, 袁峰, 等. 2008. 安徽庐江–枞阳地区 A 型花岗岩的 LA–ICP–MS 定年及其地质意义[J]. *岩石学报*, 24(8): 1715–1724.
- 高冉, 闫峻, 李全忠, 等. 2017. 皖南谭山岩体成因: 年代学和地球化学制约[J]. *高校地质学报*, 23(2): 227–243.
- 郭博然, 刘树文, 杨朋涛, 等. 2013. 江西卧龙岗花岗岩和铜厂花岗闪长斑岩的地球化学特征及成因——对赣东北地区铜矿成矿地质背景的制约[J]. *地质通报*, 32(7): 1035–1046.
- 韩效忠, 吴兆剑, 刘蓉蓉, 等. 2018. 浙江新路盆地九华山火山–侵入杂岩年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. *地球科学*, 43(S1): 192–208.
- 韩园园, 闫峻, 杨超, 等. 2019. 江南造山带东段桃岭–段莘带花岗岩锆石定年和岩石成因[J]. *矿物岩石*, 2: 34–44.
- 胡庆海. 2017. 扬子板块东缘(浙江北部)晚中生代花岗岩的地球化学特征及其地球动力学意义[D]. 中国地质大学(武汉)博士学位论文.
- 柯宏颀, 王金泉, 丁勇, 等. 2020. 皖南歙县新溪口岩体锆石 U–Pb 定年、地球化学特征及找矿前景[J]. *华东地质*, 41(2): 116–127.
- 李鹏举, 余心起, 邱骏挺, 等. 2016. 皖南休罗—白垩纪两类花岗岩的岩石成因、氧逸度特征及成矿意义[J]. *岩石学报*, 32(2): 399–418.
- 房子龙, 周静, 毛建仁, 等. 2013. 浙西北木瓜燕山期花岗岩斑岩的定年、地球化学特征及其地质意义[J]. *岩石学报*, 29(10): 3607–3622.
- 马昌前, 杨坤光, 明厚利, 等. 2003. 大别山中生代地壳从挤压转向伸展的时间: 花岗岩的证据[J]. *中国科学(D 辑)*, 33(9): 817–827.
- 毛景文, Holly S, 杜安道, 等. 2004. 长江中下游地区铜金(钼)矿 Re–Os 年龄测定及其对成矿作用的指示[J]. *地质学报*, 78(1):

- 121–131.
- 彭戈, 闫峻, 初晓强, 等. 2012. 贵池岩体的锆石定年和地球化学: 岩石成因和深部过程[J]. 岩石学报, 28(10): 3271–3286.
- 任纪舜. 1989. 中国东部及邻区大地构造演化的新见解[J]. 中国区域地质, 4: 1–12.
- 施珂, 张达玉, 丁宁, 等. 2017. 皖南逍遥岩体的年代学、地球化学特征及其成因分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 47(6): 1746–1762.
- 孙涛. 2006. 新编华南花岗岩分布图及其说明[J]. 地质通报, 25(3): 332–337.
- 汪海, 赵壮, 杨晓勇, 等. 2020. 安庆-贵池矿集区宝树尖铜多金属矿床成因: 来自岩石地球化学及年代学的约束[J]. 岩石学报, 36(1): 184–204.
- 汪雅菲, 袁峰, 杜建国. 2014. 皖南城安岩体锆石 U-Pb 年代学研究[J]. 矿床地质, 33(增刊): 163–264.
- 汪雅菲. 2015. 安徽城安岩体地球化学特征及成因研究[D]. 合肥工业大学硕士学位论文.
- 王存智, 黄志忠, 赵希林, 等. 2018. 长江中下游宣城水东地区早白垩世酸性火山岩年代学、地球化学及岩石成因[J]. 岩石矿物学杂志, 37(5): 697–715.
- 王存智, 黄志忠, 赵希林, 等. 2021. 下扬子地区姚村 A 型花岗岩年代学、地球化学特征及岩石成因[J]. 中国地质, 48(2): 549–563.
- 王亮, 王凯, 张翔, 等. 2022. 南祁连扎子沟埃达克岩年代学、地球化学特征及地质意义[J]. 西北地质, 55(1): 39–49.
- 王继强, 孙维安, 袁峰, 等. 2017. 庐枞盆地大倪庄铜矿床地质特征、成岩时代及成因探讨[J]. 中国地质, 44(1): 86–100.
- 王孝磊, 周金城, 陈昕, 等. 2017. 江南造山带的形成与演化[J]. 矿物岩石地球化学通报, 36(5): 714–735.
- 翁望飞, 支利庚, 蔡连友, 等. 2011. 皖南中生代高钾钙碱性埃达克岩地球化学特征及岩石成因[J]. 地质调查与研究, 35(2): 98–107.
- 夏国清, 伊海生, 赵西西, 等. 2012. 晚中生代中国东部高原古高程定量研究[J]. 科学通报, 57(23): 2220–2230.
- 谢建成, 陈思, 荣伟, 等. 2012. 安徽牯牛降 A 型花岗岩的年代学、地球化学和构造意义[J]. 岩石学报, 28(12): 4007–4020.
- 谢建成, 夏冬梅, 方德, 等. 2016. 皖南晚中生代花岗闪长岩地球化学: 成岩成矿制约[J]. 岩石学报, 32(2): 439–455.
- 谢兴楠, 马春, 柳建新, 等. 2013. 安徽马头铜钼多金属矿区复式花岗岩体成因及与成矿的关系[J]. 中国有色金属学报, 23(9): 2584–2591.
- 邢凤鸣, 徐祥. 1994. 安徽两条 A 型花岗岩带[J]. 岩石学报, 10(4): 357–369.
- 徐晓春, 刘雪, 张赞赞, 等. 2014. 安徽东至兆吉口铅锌矿区岩浆岩锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质科学, 49(2): 431–455.
- 薛怀民, 汪应庚, 马芳, 等. 2009. 高度演化的黄山 A 型花岗岩: 对扬子克拉通东南部中生代岩石圈减薄的约束[J]. 地质学报, 83(2): 247–259.
- 薛怀民, 马芳, 关海燕, 等. 2013. 怀宁盆地火山岩的年代学、地球化学及与长江中下游其他火山岩盆地的对比[J]. 中国地质, 40(3): 694–714.
- 薛怀民, 马芳, 曹光跃, 等. 2016. 长江中下游庐枞火山岩盆地南侧钾质侵入岩带的成因[J]. 地质学报, 90(9): 2233–2257.
- 闫峻, 彭戈, 刘建敏, 等. 2012. 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, 28(10): 3209–3227.
- 闫峻, 后田结, 王爱国, 等. 2017. 皖南中生代早期成矿和晚期非成矿花岗岩成因对比[J]. 中国科学: 地球科学, 47(11): 1269–1291.
- 赵德奎, 古黄玲, 舒旺杰, 等. 2019. 安徽贵池地区岩浆岩演化特征及其与金银多金属矿的关系[J]. 华东地质, 40(2): 126–134.
- 张超, 马昌前, Holt F. 2012. 含水大陆下地壳的部分熔融: 大别山 C 型埃达克岩成因探讨[J]. 高校地质学报, 18(1): 41–51.
- 张虹, 戴圣潜, 管运财, 等. 2005. 皖南绩溪伏岭岩体岩石地球化学特征[J]. 中国地质, 32(3): 411–416.
- 张俊杰, 王光杰, 杨晓勇, 等. 2012. 皖南旌德花岗闪长岩与暗色包体的成因: 地球化学、锆石 U-Pb 年代学与 Hf 同位素制约[J]. 岩石学报, 28(12): 4047–4063.
- 张旗, 钱青, 王二七, 等. 2001a. 燕山中晚期的“中国东部高原”: 埃达克岩的启示[J]. 地质科学, 36: 248–255.
- 张旗, 王焰, 钱青, 等. 2001b. 中国东部燕山期埃达克岩的特征及其构造-成矿意义[J]. 岩石学报, 17(2): 236–244.
- 张旗, 金惟俊, 王元龙, 等. 2007. 晚中生代中国东部高北界探讨[J]. 岩石学报, 23(4): 689–700.
- 张旗, 王元龙, 金惟俊, 等. 2008. 晚中生代的中国东部高原: 证据、问题和启示[J]. 地质通报, 27(9): 1404–1430.
- 张旗, 冉皞, 李承东. 2012. A 型花岗岩的实质是什么?[J]. 岩石矿物学杂志, 31(4): 621–626.
- 张旗. 2014. 大陆花岗岩的地球动力学意义[J]. 矿物岩石学杂志, 33(4): 785–798.
- 张旗, 焦守涛. 2020. 埃达克理论: 埃达克岩来自高压背景——一个科学的、可靠的、有预见性的科学发现[J]. 岩石学报, 36(6): 1675–1683.
- 张智宇, 杜杨松, 张静, 等. 2011. 安徽贵池铜山岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学与岩石地球化学特征研究[J]. 地质论评, 57(3): 366–378.
- 张梓尧, 张义虎, 徐磊, 等. 2023. 西秦岭宕昌—舟曲地区晚三叠世埃达克质花岗岩年代学、地球化学特征及其构造意义[J/OL]. 西北地质, 1–16. doi: 10.12401/j.nwg.2023013.
- 周洁, 姜耀辉, 曾勇, 等. 2013. 江南造山带东段旌德岩体锆石 LA-ICPMS 年龄和 Nd-Sr-Hf 同位素地球化学[J]. 中国地质, 40(5): 1379–1391.
- 周静. 2016. 浙西北早白垩世花岗质岩石成因与构造演化[D]. 浙江大学博士学位论文.
- 周术召. 2016. 皖南白际-长垅北东向花岗岩带特征及其与燕山期断裂带的成因关系[D]. 中国地质大学(北京)硕士学位论文.
- 周涛发, 袁峰, 侯明金, 等. 2004. 江南隆起带东段皖赣相邻区燕山期花岗岩类的成因及形成的地球动力学背景[J]. 矿物岩石, 24(3): 65–71.
- 周涛发, 范裕, 袁峰. 2008. 长江中下游成矿带成岩成矿作用研究进展[J]. 岩石学报, 24(8): 1665–1678.
- 周翔, 余心起, 王德恩, 等. 2011. 皖南东源含 W-Mo 花岗闪长斑岩及成矿年代学研究[J]. 现代地质, 25(2): 201–210.
- 周翔, 余心起, 杨赫鸣, 等. 2012. 皖南绩溪县靠背尖高 Ba-Sr 花岗闪长斑岩年代学及其成因[J]. 岩石学报, 28(10): 3403–3417.