

北京云蒙山地区侵入岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄、 地球化学特征及其地质意义

康月蓝^{1,2}, 石玉若²

(1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 中国地质科学院地质研究所 北京离子探针中心, 北京 100037)

摘要: 位于华北克拉通北缘的云蒙山地区花岗岩类研究对认识该区域由挤压到拉张的构造背景转换的时间和机制有重要意义。本文在对云蒙山地区长园岩体、官山岩体和云蒙山岩体的岩相学特征及其与周围岩体的关系研究基础上,对这些花岗岩体进行了 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年和主微量元素分析。结合前人研究结果,认为云蒙山地区在晚侏罗世—早白垩世期间主要有 162 ~ 151 Ma 和 151 ~ 141 Ma 两期岩浆活动,从早到晚岩浆酸性逐渐增加,反映岩浆源区从幔源物质到壳源物质的转变,随着晚侏罗世—早白垩世时期的挤压作用,地壳逐渐增厚,后期形成的岩浆更加具有壳源特征,甚至出现了中等分异的花岗岩。通过限定相关岩浆活动的时间,得出云蒙山地区从挤压到拉张的转换时间为 141 ~ 129 Ma,本文研究的花岗岩类形成的构造背景是强挤压陆内造山环境,表明岩浆侵入于该区岩石圈大规模减薄之前。伴随中酸性岩浆上移侵入,残留相的密度越来越大,具备了后期下地壳发生拆沉的一些条件。

关键词: 云蒙山; 花岗岩类; SHRIMP U-Pb 测年; 地球化学; 中生代; 华北克拉通

中图分类号: P597; P588.12⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2018)03-0379-16

Zircon SHRIMP U-Pb ages and geochemical characteristics of the granitoids in Yunmengshan area of Beijing and their geological significance

KANG Yue-lan^{1,2} and SHI Yu-ruo²

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Beijing SHRIMP Center, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: The granitoids in Yunmengshan area, located on the northern margin of the North China Craton, are important for understanding the formation time and mechanism of the tectonic background transition in this area. In this paper, the authors present zircon SHRIMP U-Pb ages and geochemical characteristics of the granitoids in Changyuan pluton, Guanshan pluton and Yunmengshan pluton. The results, in combination with available zircon U-Pb ages, show two magmatic periods in Yunmengshan area: 162 ~ 151 Ma and 151 ~ 141 Ma. Compared with the second period, samples from the first magmatism period are higher in Mg[#] but lower in SiO₂, which indicates that they evolved from the mantle source to the crust source during Late Jurassic-Early Cretaceous compression episode, accompanied by crustal thickening, even with some exposed moderately-fractionated granitoids. The transition from compression to extension in the study area lasted for 12 Ma, i. e., from 141 Ma to 129 Ma. The granitoids from

收稿日期: 2017-06-08; 接受日期: 2018-03-18

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20160345, 1212011121075, 12120114020901)

作者简介: 康月蓝(1995-),女,硕士研究生,主要从事同位素地质年代学研究, E-mail: kangyuelan123@163.com; 通讯作者: 石玉若(1975-),男,研究员,博士生导师,从事同位素地质年代学及岩石学研究, E-mail: shiyuruo@bjshrmp.cn.

Yunmengshan area were formed in a compressional environment before decratonization, and the thickened crust possessed the condition for later delamination.

Key words: Yunmengshan; granitoids; SHRIMP U-Pb age; geochemistry; Mesozoic; North China Craton

Fund support: Project of China Geological Survey (DD20160345, 1212011121075, 12120114020901)

华北克拉通在中生代和早新生代时期发生的岩石圈减薄和去克拉通化作用一直是地质研究的热点(吴福元等, 2008; Zhang *et al.*, 2014), 然而有关华北克拉通由挤压到拉张的转换时间、岩石圈减薄的时间仍有很大争议(徐义刚, 2004; 嵇少丞等, 2008; 吴福元等, 2008, 2014; Xu *et al.*, 2009; Yang and Wu, 2009; Yang *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2012; Li *et al.*, 2012)。北京云蒙山地区位于华北克拉通北缘, 燕山山脉中段, 该区域有代表在地壳挤压增厚背景下形成的云蒙山岩体(Davis *et al.*, 2001; 姬广义等, 2004; 赵美涛等, 2014), 而云蒙山变质核杂岩却形成于区域内拉张环境(Davis *et al.*, 1996)。因此, 云蒙山地区花岗岩类的研究对认识该区域由挤压到拉张的构造背景转换的时间和机制有重要意义。

北京云蒙山及邻近地区出露以下几个大岩体: 云蒙山岩体、长园杂岩体、北石城岩体、四合堂北岩体、冯家峪岩体和番字牌南部岩体。近年来, 不少学者对该区东北部分的花岗岩进行了详细的年代学研究(Davis *et al.*, 1996; 刘翠等, 2004; Shi *et al.*, 2009; 陈印等, 2013, 2014; 孙会一等, 2016), 而云蒙山西南地区精确可靠的年代学数据较少。此外, 云蒙山花岗岩类的地球化学和岩石学的研究程度低。在云蒙山岩体已有的研究基础上, 笔者采集了云蒙山地区长园岩体、官山岩体和云蒙山岩体的花岗岩样品, 进行了岩相学、锆石 U-Pb 年代学及地球化学研究, 结合前人年龄数据建立了该区花岗质岩类的年代谱系, 进而探讨了花岗岩的源区特征及其形成时相应的大陆动力学机制, 以进一步加强和完善北京云蒙山花岗岩的系统研究, 认识该区中生代构造演化过程与形成机制。

1 地质背景

研究区位于华北克拉通北缘, 燕山山脉中段, 密云与怀柔交界处的云蒙山-石门山一带, 夹于北石城断裂与崎峰茶断裂之间, 东南部以河防口-大水峪低角度拆离断层为界。该区域以晚侏罗世-早白垩世

花岗岩为主体, 周围由太古界片麻岩、中上元古界和古生界碳酸盐岩及碎屑岩、侏罗系火山岩及火山碎屑岩组成(Davis *et al.*, 1996; 姬广义等, 2004)(图1)。云蒙山地区挤压-伸展体系由云蒙山推覆体(四合堂韧性剪切带)、大水峪韧性剪切带、云蒙山背形构造、崎峰茶滑脱带、河防口低角正断层、变质核杂岩和花岗岩穹窿组成(Davis *et al.*, 1996; 朱大岗等, 2000)。本次研究的样品均采自云蒙山变质核杂岩下盘的长园岩体、官山岩体和云蒙山岩体。长园带状杂岩体出露于北京昌平区和怀柔区交界处, 面积约 100 km², 平面形态近似卵形, 主要由 4 个侵入体构成, 由外到内为长园岩体、官山岩体、沙峪岩体和西后峪岩体(北京市地质矿产局, 1991; 姬广义等, 2004), 其中官山岩体出露面积约为 18 km², 呈向南凸出半环状, 在岩体内部可见镁铁质暗色微粒包体。云蒙山岩基长约 25 km, 宽约 12 km, 形似卵形, 长轴南西-北东向展布, 出露面积约 270 km², 大部分位于密云境内。岩基的西南部有莲花池韧性断层, 中部有走向 NNE 的青石岭断裂和对家河-柳棵峪-山神庙断裂, 东面和北面有水峪-四合堂早白垩世韧性剪切带(许继峰等, 1994)。

2 样品采集及岩相学特征

样品 GJ05 为中细粒花岗闪长岩, 采自长园岩体(N40°24'52.1", E116°35'30.4")。岩石为灰白色, 中细粒花岗结构, 块状构造, 主要矿物为斜长石(呈宽板状, 含量为 45%, 长 0.2~1.1 mm, 宽 0.2~0.7 mm)、石英(它形粒状, 含量约为 25%, 大部分石英颗粒粒径为 0.1~0.4 mm)、钾长石(呈板状, 含量约 15%, 长 0.3~0.5 mm, 宽 0.3~0.4 mm)、黑云母(片状, 长条状, 含量约 7%, 长 0.05~0.5 mm, 宽 0.05~0.1 mm)和角闪石(呈柱状、粒状, 含量约为 5%, 粒径为 0.05~0.4 mm)(图 2a、2b)。

样品 GJ01 为中细粒花岗闪长岩, 采自长园岩体, 位于甘涧峪村附近(N40°23'17.8", E116°34'53.0")。岩石为灰白色, 中细粒结构, 块状构造, 主要矿物有斜长石(呈宽板状, 较自形, 含量约为 55%,

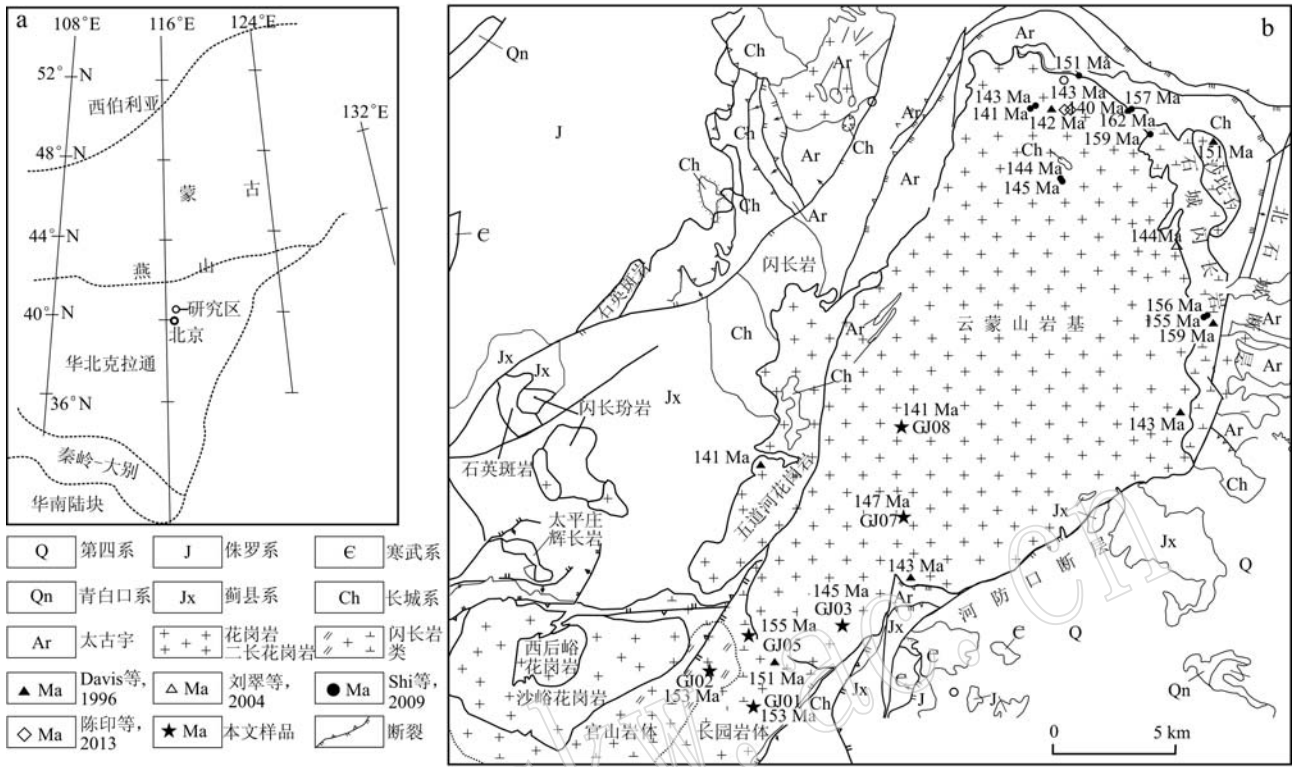


图 1 北京云蒙山地区区域位置(a, 据 Davis 等, 1996)和地质略图(b, 据北京地质矿产局, 1991)

Fig. 1 Location in the North China Craton (a, modified after Davis *et al.*, 1996) and its geological map of the Yunmengshan area (b, modified after BBGMR, 1991)

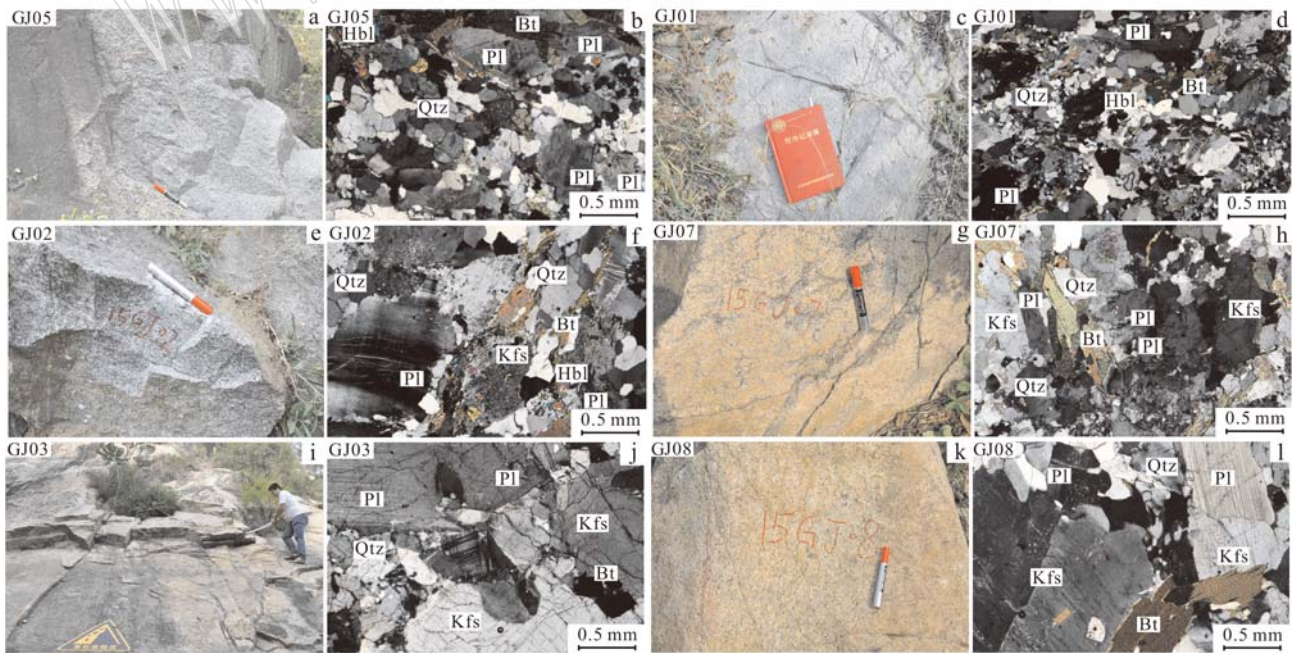


图 2 样品野外及显微照片 (+)

Fig. 2 Field photographs and photomicrographs (+) of the samples

长0.2~0.6 mm,宽0.2~0.3 mm)、石英(它形粒状,含量为20%,粒度为0.05~0.5 mm)、黑云母(呈片状,含量约为10%,粒径为0.1~0.3 mm)、角闪石(呈柱状和粒状,含量约8%,粒径为0.1~0.25 mm)和少量的钾长石及其他副矿物(图2c、2d)。

样品GJ02为中粗粒花岗闪长岩,采自官山岩体,位于马道峪村附近(N40°23'49.4", E116°33'21.5")。岩石为灰白色,中粗粒花岗结构,块状构造,主要矿物有斜长石(呈宽板状,自形程度高,含量约为40%,长0.3~1.2 mm,宽0.2~0.8 mm)、石英(它形粒状填充在其他矿物之间,含量约为23%,大部分粒径为0.2~0.5 mm)、钾长石(呈板状、粒状,含量约12%,长0.2~0.6 mm,宽0.1~0.5 mm)、黑云母(片状,含量约为10%,长0.3~1 mm,宽0.1~0.5 mm)和角闪石(呈柱状、粒状分布,含量约为5%,粒径0.1~0.8 mm)(图2e、2f)。

样品GJ07为斑状黑云母二长花岗岩,采自于云蒙山岩体中部(N40°27'22.1", E116°39'20.0")。岩石为肉红色,中粗粒似斑状花岗结构(斑晶主要是钾长石),块状构造,主要矿物有钾长石(板状,含量约为35%,粒度为1~6 mm)、斜长石(呈宽板状,可见韵律环带,含量为30%,粒度为0.5~1 mm)、石英(呈不规则粒状充填在长石之间,含量约为25%,粒度很细小,最大约为0.6 mm)、黑云母(呈片状,含量约7%,粒度较大可以达到0.8 mm)及少量的角闪石(图2g、2h)。

样品GJ03为中粗粒二长花岗岩,采于云蒙山岩体的边部(N40°25'19.0", E116°37'39.2")。岩石为肉红色,中粗粒花岗结构,块状构造。暗色矿物含量较少,主要矿物有钾长石(自形程度较低,交代早期结晶的矿物,在薄片可见条纹长石,钾长石含量约35%,长1~5 mm,宽0.8~3 mm)、斜长石(宽板状,有些可见韵律环带结构,含量约为30%,长0.8~4 mm,宽0.8~3 mm)、石英(呈他形粒状充填在长石的空隙内,含量约30%,粒径为0.1~1.5 mm)、黑云母和角闪石(呈粒状,含量约2%,粒度较小)(图2i、2j)。

样品(GJ08)为中粗粒二长花岗岩,采自云蒙山岩体中部椴树岭村附近(N40°30'11.2", E116°39'37.2")。岩石为肉红色,中粗粒花岗结构,块状构造,主要矿物是斜长石(呈宽板状,含量约为25%,粒径为0.5~0.8 mm)、钾长石(呈宽板状,含量约38%,粒度为0.5~5 mm)、石英(呈他形粒状充填在长石空隙中,含量约25%,粒度为0.1~0.8 mm)、少

量黑云母(片状,含量约5%,粒度约为0.5 mm)和角闪石(图2k、2l)。

3 锆石 SHRIMP U-Pb 年龄

3.1 技术方法

将约5 kg岩石大样清洗干净后粉碎至相应锆石粒度的大小,反复手工淘洗以富集重矿物组分中的锆石,接着进行电磁选分离,最后把样品分成不同磁性组分。被挑选用于分析的锆石组分再经双目镜下检查,进行矿物性分离并除去其他残留矿物。将锆石与标准锆石TEM置于环氧树脂中,然后磨至约一半,使锆石内部暴露,用于反射光、透射光照相及拍摄锆石阴极发光图像和随后的SHRIMP U-Pb分析。阴极发光图像在北京离子探针中心的电子探针研究室完成。

锆石U-Pb年龄分析在北京离子探针中心的SHRIMP-II上完成,详细分析流程和原理详见Williams(1998)文章。测定时仪器质量分辨率约为5000(1%峰高)。一次离子流 O_2^- 强度约为4 nA,一次离子流束斑直径为30 $\mu\text{m} \pm$ 。样品点清洗时间为180 s。测定质量峰为 $^{90}\text{Zr}_2^{16}\text{O}^+$ 、 $^{204}\text{Pb}^+$ 、背景值、 $^{206}\text{Pb}^+$ 、 $^{207}\text{Pb}^+$ 、 $^{208}\text{Pb}^+$ 、 $^{238}\text{U}^+$ 、 $^{232}\text{Th}^{16}\text{O}^+$ 、 $^{238}\text{U}^{16}\text{O}^+$ 。应用标准锆石M257(年龄为561.3 Ma, U含量为 840×10^{-6})标定所测锆石的U含量。应用标准锆石TEM(417 Ma)进行样品年龄校正,TEM和未知锆石测定比例为1:4,均采用5组扫描。Pb/U校正公式采用 $\text{Pb}/\text{U} = A(\text{UO}/\text{U})^2$ 。数据处理采用SQUID 1.02(Ludwig, 2001)和ISOPLLOT(Ludwig, 2003)。测点年龄值采用 ^{204}Pb 校正的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值,数据表中所示单个数据点的误差为 1σ ,加权平均年龄值的误差为 2σ 。

3.2 分析结果

3.2.1 长园中细粒花岗闪长岩(GJ05)

样品GJ05中的锆石为短柱状、粒状,长约100~300 μm ,宽约90~200 μm ,长宽比为1:1~2:1。阴极发光图像中可见补丁结构,颜色较暗的居多,其中有些锆石有较宽的韵律环带结构,具岩浆锆石的特征(图3a)。对该样品的锆石共分析了14个点, U含量为 $40 \times 10^{-6} \sim 235 \times 10^{-6}$, Th含量为 $28 \times 10^{-6} \sim 123 \times 10^{-6}$, Th/U值均大于0.1(表1),具有岩浆锆石特征(Möller, 2003)。除数据点7.1(134 ± 7 Ma)年龄偏低外,其余13个数据点加权平均 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$

年龄为 155 ± 3 Ma, MSWD = 0.91 (图 4a)。该年龄可解释为该岩体的形成年龄。

3.2.2 长园中细粒花岗闪长岩(GJ01)

样品 GJ01 中的锆石为长柱状和短柱状, 呈自形和半自形, 锆石颗粒大小不一, 长约 $100 \sim 350 \mu\text{m}$, 宽约 $70 \sim 200 \mu\text{m}$, 长宽比 $2:1 \sim 3:1$, 阴极发光图像中可见补丁结构, 颜色较暗的居多, 其中有些锆石有较宽的韵律环带结构, 也有一些锆石成分和颜色比较均一, 具有闪长质岩类锆石的一般特征 (图 3b)。14 个锆石 SHRIMP U-Pb 数据点的 U、Th 含量变化较大, U 含量在 $34 \times 10^{-6} \sim 1032 \times 10^{-6}$ 之间, Th 含量在 $23 \times 10^{-6} \sim 239 \times 10^{-6}$ 之间, Th/U 值大于 0.1 (表 1), 具有岩浆锆石特征 (Möller, 2003)。14 个数据点加权平均 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 153 ± 2 Ma, MSWD = 1.51 (图 4b), 该年龄解释为该花岗闪长岩的形成年龄。

3.2.3 官山中粗粒花岗闪长岩(GJ02)

样品 GJ02 中的锆石为它形粒状, 少数为短柱状, 长约 $130 \sim 220 \mu\text{m}$, 宽约 $100 \sim 200 \mu\text{m}$, 长宽比为 $1:1 \sim 2:1$ 。阴极发光图像中锆石颜色较暗, 可见补丁结构, 其中有些锆石有较宽的韵律环带结构, 具闪

长质岩类的锆石特征 (图 3c)。11 个锆石 SHRIMP U-Pb 数据点 U 含量在 $36 \times 10^{-6} \sim 368 \times 10^{-6}$ 之间, Th 含量在 $30 \times 10^{-6} \sim 178 \times 10^{-6}$ 之间 (表 1)。对该样品的锆石共分析了 11 个点, 其中点 2.1 的 U 含量相对较高, 单点误差大, 点 11.1 年龄为 164 ± 8 Ma, 可能是岩浆上侵捕获的围岩锆石, 点 12.1 由于 U 含量相对较低, 单点误差太大, 除去上述 3 个数据点外的 8 个数据点加权平均 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 153 ± 5 Ma, MSWD = 1.17 (图 4c)。该年龄解释为该花岗闪长岩的侵位时代。

3.2.4 云蒙山斑状黑云母二长花岗岩(GJ07)

样品 GJ07 中的锆石为长柱状和短柱状两种晶体, 锆石长约 $100 \sim 300 \mu\text{m}$, 宽约 $70 \sim 90 \mu\text{m}$, 长宽比为 $2:1 \sim 4:1$ 。阴极发光图像显示明显的韵律环带, 具有岩浆锆石的特征 (图 3d)。13 个锆石 SHRIMP U-Pb 数据点的 U 含量为 $183 \times 10^{-6} \sim 843 \times 10^{-6}$, Th 含量在 $39 \times 10^{-6} \sim 439 \times 10^{-6}$ 之间, Th/U 值均大于 0.1 (表 1)。13 个数据点加权平均 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 147 ± 2 Ma, MSWD 为 1.01 (图 4d)。该年龄解释为该岩体的形成时代, 即该岩体的侵位时代。

表 1 锆石 SHRIMP U-Pb 同位素分析结果
Table 1 SHRIMP zircon U-Pb data of the granitoids

| 样品 | $w(^{206}\text{Pb}_c)/\%$ | $u_B/10^{-6}$ | | | $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄/Ma | 同位素比值 | | | | err corr |
|------|---------------------------|---------------|-----|-------|----------------------------------|---|------------------------------------|---------|------------------------------------|---------|----------|
| | | U | Th | Pb* | | | $^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$ | $\pm\%$ | $^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$ | $\pm\%$ | |
| GJ05 | | | | | | | | | | | |
| 1.1 | 2.44 | 49 | 28 | 1.02 | 0.59 | 146.1 ± 6.2 | 0.068 | 47.0 | 0.022 92 | 4.3 | 0.093 |
| 2.1 | 2.17 | 84 | 75 | 1.65 | 0.92 | 146.7 ± 6.8 | 0.106 | 19.0 | 0.023 00 | 4.7 | 0.240 |
| 3.1 | 3.19 | 123 | 123 | 2.46 | 1.03 | 151.3 ± 6.0 | 0.129 | 24.0 | 0.023 75 | 4.0 | 0.165 |
| 4.1 | 0.39 | 65 | 61 | 1.29 | 0.97 | 146.2 ± 6.5 | 0.117 | 47.0 | 0.022 90 | 4.5 | 0.094 |
| 7.1 | 1.67 | 63 | 44 | 1.22 | 0.72 | 133.1 ± 6.6 | 0.127 | 58.0 | 0.020 90 | 5.0 | 0.085 |
| 9.1 | 1.70 | 40 | 33 | 0.85 | 0.85 | 162.6 ± 7.3 | 0.196 | 9.4 | 0.025 50 | 4.5 | 0.481 |
| 11.1 | 2.70 | 79 | 60 | 1.69 | 0.78 | 153.3 ± 3.1 | 0.121 | 16.0 | 0.024 06 | 2.1 | 0.126 |
| 12.1 | 4.03 | 90 | 90 | 1.85 | 1.03 | 150.4 ± 6.1 | 0.020 | 55.0 | 0.023 60 | 4.1 | 0.075 |
| 13.1 | 8.48 | 85 | 94 | 1.73 | 1.15 | 156.0 ± 7.1 | 0.125 | 47.0 | 0.024 50 | 4.6 | 0.099 |
| 14.1 | 1.92 | 109 | 107 | 2.34 | 1.01 | 156.6 ± 6.2 | 0.035 | 35.0 | 0.024 59 | 4.0 | 0.116 |
| 18.1 | 1.20 | 74 | 84 | 1.58 | 1.17 | 159.3 ± 3.5 | 0.250 | 12.0 | 0.025 02 | 2.2 | 0.193 |
| 19.1 | 0.08 | 82 | 53 | 1.76 | 0.67 | 158.9 ± 3.1 | 0.195 | 7.7 | 0.024 96 | 2.0 | 0.256 |
| 20.1 | 0.57 | 235 | 28 | 4.94 | 0.12 | 155.0 ± 2.6 | 0.150 | 6.6 | 0.024 33 | 1.7 | 0.254 |
| 21.1 | 1.02 | 44 | 35 | 0.93 | 0.83 | 155.6 ± 4.2 | 0.186 | 26.0 | 0.024 43 | 2.7 | 0.105 |
| GJ01 | | | | | | | | | | | |
| 1.1 | 0.34 | 107 | 111 | 2.25 | 1.07 | 155.7 ± 3.1 | 0.178 | 8.9 | 0.024 45 | 2.0 | 0.226 |
| 3.1 | 1.67 | 74 | 53 | 1.50 | 0.73 | 147.0 ± 3.4 | 0.128 | 25.0 | 0.023 06 | 2.3 | 0.093 |
| 4.1 | 1.57 | 193 | 239 | 4.01 | 1.28 | 151.4 ± 2.7 | 0.151 | 12.0 | 0.023 76 | 1.8 | 0.146 |
| 5.1 | 2.46 | 97 | 105 | 2.02 | 1.11 | 149.7 ± 3.1 | 0.109 | 23.0 | 0.023 50 | 2.1 | 0.091 |
| 6.1 | 0.45 | 81 | 41 | 1.67 | 0.53 | 153.2 ± 3.0 | 0.166 | 7.4 | 0.024 06 | 2.0 | 0.265 |
| 7.1 | 7.46 | 34 | 23 | 0.72 | 0.69 | 144.7 ± 3.5 | 0.029 | 62.0 | 0.022 70 | 2.5 | 0.040 |
| 8.1 | 0.01 | 1032 | 98 | 21.60 | 0.10 | 155.5 ± 2.4 | 0.167 | 2.1 | 0.024 42 | 1.5 | 0.738 |
| 9.1 | 0.42 | 127 | 104 | 2.66 | 0.85 | 155.1 ± 2.9 | 0.169 | 9.1 | 0.024 36 | 1.9 | 0.206 |
| 10.1 | 1.23 | 147 | 98 | 3.07 | 0.69 | 152.8 ± 2.9 | 0.139 | 15.0 | 0.023 99 | 1.9 | 0.127 |
| 11.1 | 4.26 | 62 | 82 | 1.31 | 1.36 | 149.8 ± 4.1 | 0.069 | 71.0 | 0.023 51 | 2.7 | 0.038 |
| 12.1 | 0.07 | 100 | 109 | 2.13 | 1.13 | 157.9 ± 3.2 | 0.175 | 7.3 | 0.024 80 | 2.1 | 0.287 |
| 13.1 | 2.73 | 127 | 132 | 2.56 | 1.07 | 145.9 ± 3.1 | 0.103 | 22.0 | 0.022 90 | 2.1 | 0.098 |
| 14.1 | 0.88 | 69 | 61 | 1.41 | 0.90 | 152.7 ± 4.3 | 0.221 | 20.0 | 0.023 96 | 2.8 | 0.141 |
| 15.1 | 0.76 | 96 | 101 | 1.95 | 1.09 | 151.7 ± 3.2 | 0.188 | 4.8 | 0.023 82 | 2.1 | 0.443 |

续表 1
Continued Table 1

| 样品 | $w(^{206}\text{Pb}_c)/\%$ | $w_B/10^{-6}$ | | | $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄/Ma | 同位素比值 | | | | err corr |
|------|---------------------------|---------------|-------|-------|----------------------------------|---|------------------------------------|---------|------------------------------------|---------|----------|
| | | U | Th | Pb* | | | $^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$ | $\pm\%$ | $^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$ | $\pm\%$ | |
| GJ02 | | | | | | | | | | | |
| 2.1 | 0.10 | 368 | 178 | 7.09 | 0.50 | 143.3 ± 5.2 | 0.126 | 6.5 | 0.022 48 | 3.6 | 0.562 |
| 4.1 | 1.07 | 78 | 55 | 1.54 | 0.73 | 148.6 ± 5.7 | 0.189 | 12.0 | 0.023 33 | 3.9 | 0.320 |
| 5.1 | 0.44 | 61 | 34 | 1.18 | 0.58 | 146.1 ± 5.8 | 0.139 | 27.0 | 0.022 91 | 4.0 | 0.149 |
| 6.1 | 0.52 | 65 | 77 | 1.44 | 1.22 | 159.7 ± 6.5 | 0.143 | 28.0 | 0.025 10 | 4.1 | 0.148 |
| 7.1 | 0.15 | 134 | 84 | 2.93 | 0.65 | 162.5 ± 6.1 | 0.186 | 5.3 | 0.025 52 | 3.8 | 0.719 |
| 10.1 | 0.15 | 62 | 50 | 1.26 | 0.83 | 148.3 ± 6.4 | 0.063 | 44.0 | 0.023 30 | 4.4 | 0.099 |
| 11.1 | 6.92 | 57 | 48 | 1.25 | 0.86 | 164.6 ± 7.4 | 0.084 | 16.0 | 0.025 90 | 4.6 | 0.283 |
| 12.1 | 7.07 | 36 | 26 | 0.81 | 0.75 | 157.0 ± 10.0 | | | 0.024 70 | 6.7 | |
| 14.1 | 2.67 | 54 | 41 | 1.08 | 0.78 | 151.4 ± 6.8 | 0.145 | 24.0 | 0.023 80 | 4.5 | 0.189 |
| 13.1 | 0.21 | 37 | 30 | 0.76 | 0.84 | 153.0 ± 6.7 | 0.136 | 23.0 | 0.024 00 | 4.4 | 0.190 |
| 16.1 | 1.59 | 84 | 95 | 1.78 | 1.18 | 154.8 ± 3.9 | 0.142 | 24.0 | 0.024 31 | 2.5 | 0.107 |
| GJ07 | | | | | | | | | | | |
| 1.1 | 2.00 | 278 | 39 | 5.87 | 0.15 | 153.5 ± 2.9 | 0.119 | 17.0 | 0.024 10 | 1.9 | 0.113 |
| 2.1 | 1.45 | 386 | 102 | 7.69 | 0.27 | 145.7 ± 2.5 | 0.132 | 11.0 | 0.022 86 | 1.8 | 0.167 |
| 3.1 | 2.12 | 240 | 55 | 4.89 | 0.24 | 147.6 ± 2.7 | 0.120 | 16.0 | 0.023 16 | 1.9 | 0.117 |
| 4.1 | 0.25 | 509 | 133 | 10.10 | 0.27 | 146.3 ± 2.4 | 0.148 | 4.2 | 0.022 95 | 1.6 | 0.391 |
| 5.1 | 12.82 | 843 | 439 | 19.50 | 0.54 | 149.9 ± 2.8 | 0.137 | 21.0 | 0.023 52 | 1.9 | 0.090 |
| 6.1 | 1.79 | 548 | 233 | 10.80 | 0.44 | 144.1 ± 2.4 | 0.148 | 7.6 | 0.022 60 | 1.7 | 0.218 |
| 7.1 | 0.92 | 397 | 157 | 7.88 | 0.41 | 145.8 ± 2.5 | 0.138 | 8.6 | 0.022 88 | 1.7 | 0.200 |
| 8.1 | 0.96 | 306 | 92 | 6.16 | 0.31 | 147.9 ± 2.6 | 0.149 | 9.1 | 0.023 20 | 1.8 | 0.194 |
| 9.1 | 0.42 | 474 | 230 | 9.44 | 0.50 | 147.2 ± 2.4 | 0.151 | 3.0 | 0.023 10 | 1.7 | 0.559 |
| 10.1 | 1.04 | 357 | 180 | 7.01 | 0.52 | 144.2 ± 2.6 | 0.128 | 13.0 | 0.022 63 | 1.8 | 0.136 |
| 11.1 | 1.75 | 183 | 45 | 3.60 | 0.26 | 143.5 ± 3.1 | 0.133 | 22.0 | 0.022 52 | 2.2 | 0.100 |
| 12.1 | 2.33 | 322 | 60 | 6.67 | 0.19 | 150.0 ± 2.7 | 0.113 | 14.0 | 0.023 54 | 1.8 | 0.129 |
| 13.1 | 0.68 | 191 | 83 | 3.76 | 0.45 | 147.5 ± 2.7 | 0.187 | 3.7 | 0.023 15 | 1.9 | 0.506 |
| GJ03 | | | | | | | | | | | |
| 1.1 | 0.88 | 458 | 75 | 8.99 | 0.17 | 144.4 ± 2.5 | 0.155 | 5.3 | 0.022 66 | 1.7 | 0.325 |
| 1.2 | 0.01 | 3 982 | 1 078 | 84.31 | 0.28 | 156.9 ± 2.4 | 0.166 | 2.0 | 0.024 64 | 1.6 | 0.796 |
| 2.1 | 2.65 | 470 | 73 | 9.70 | 0.16 | 148.9 ± 2.7 | 0.121 | 19.3 | 0.023 37 | 1.9 | 0.096 |
| 3.1 | 0.70 | 541 | 144 | 10.45 | 0.28 | 144.2 ± 2.5 | 0.193 | 7.1 | 0.022 62 | 1.7 | 0.245 |
| 3.2 | 6.65 | 3 738 | 2 988 | 69.11 | 0.83 | 128.2 ± 2.1 | 0.128 | 9.6 | 0.020 09 | 1.7 | 0.174 |
| 4.1 | 0.54 | 1 439 | 469 | 27.75 | 0.34 | 142.3 ± 2.3 | 0.146 | 5.3 | 0.022 32 | 1.6 | 0.304 |
| 4.2 | 0.03 | 1 717 | 546 | 34.54 | 0.33 | 149.2 ± 2.3 | 0.158 | 2.4 | 0.023 42 | 1.6 | 0.654 |
| 5.1 | 0.81 | 583 | 123 | 11.53 | 0.22 | 145.6 ± 2.5 | 0.143 | 9.5 | 0.022 84 | 1.8 | 0.185 |
| 7.1 | 1.71 | 453 | 93 | 8.88 | 0.21 | 143.1 ± 2.8 | 0.132 | 16.8 | 0.022 45 | 2.0 | 0.117 |
| 6.1 | 1.46 | 455 | 83 | 9.00 | 0.19 | 144.6 ± 2.9 | 0.178 | 13.5 | 0.022 69 | 2.0 | 0.149 |
| 8.1 | 3.03 | 381 | 123 | 7.43 | 0.33 | 140.5 ± 2.9 | 0.118 | 21.3 | 0.022 03 | 2.1 | 0.097 |
| 9.1 | 0.54 | 394 | 64 | 7.66 | 0.17 | 145.2 ± 2.7 | 0.192 | 7.1 | 0.022 77 | 1.9 | 0.263 |
| 10.1 | 2.38 | 1 096 | 380 | 22.18 | 0.36 | 146.6 ± 2.8 | 0.143 | 9.3 | 0.023 01 | 2.0 | 0.209 |
| 11.1 | 0.37 | 430 | 96 | 8.34 | 0.23 | 143.4 ± 2.7 | 0.157 | 9.0 | 0.022 50 | 1.9 | 0.213 |
| 12.1 | 4.78 | 564 | 124 | 10.76 | 0.23 | 134.8 ± 2.7 | 0.118 | 17.8 | 0.021 13 | 2.0 | 0.113 |
| 13.1 | 3.40 | 1 978 | 728 | 37.25 | 0.38 | 135.0 ± 3.1 | 0.139 | 9.8 | 0.021 17 | 2.3 | 0.234 |
| 14.1 | 0.37 | 3 443 | 890 | 70.02 | 0.27 | 150.3 ± 2.6 | 0.157 | 2.7 | 0.023 58 | 1.7 | 0.646 |
| 15.1 | 4.18 | 283 | 76 | 5.41 | 0.28 | 136.0 ± 3.1 | 0.070 | 44.9 | 0.021 33 | 2.3 | 0.051 |
| 19.1 | 6.27 | 1 103 | 320 | 22.97 | 0.30 | 144.8 ± 2.8 | 0.164 | 16.0 | 0.022 71 | 1.9 | 0.121 |
| GJ08 | | | | | | | | | | | |
| 1.1 | 8.87 | 28 | 12 | 0.55 | 0.45 | 130.0 ± 11.0 | | | 0.02040 | 8.4 | |
| 2.1 | 0.28 | 1 652 | 306 | 31.70 | 0.19 | 142.0 ± 2.1 | 0.147 | 2.7 | 0.022 27 | 1.5 | 0.561 |
| 3.1 | 1.41 | 405 | 82 | 7.91 | 0.21 | 142.9 ± 2.3 | 0.129 | 7.6 | 0.022 41 | 1.6 | 0.215 |
| 4.1 | 1.63 | 283 | 61 | 5.28 | 0.22 | 136.1 ± 2.4 | 0.112 | 14.0 | 0.021 33 | 1.8 | 0.126 |
| 5.1 | 7.27 | 43 | 7 | 0.83 | 0.16 | 129.6 ± 4.5 | | | 0.020 31 | 3.5 | |
| 6.1 | 0.14 | 332 | 116 | 6.45 | 0.36 | 144.1 ± 2.3 | 0.161 | 3.3 | 0.022 61 | 1.6 | 0.495 |
| 7.1 | 0.65 | 359 | 53 | 6.81 | 0.15 | 139.8 ± 2.3 | 0.133 | 6.3 | 0.021 92 | 1.6 | 0.263 |
| 8.1 | 1.32 | 43 | 39 | 0.83 | 0.93 | 139.6 ± 3.6 | 0.145 | 22.0 | 0.021 90 | 2.6 | 0.119 |
| 9.1 | 0.02 | 220 | 36 | 4.30 | 0.17 | 145.4 ± 3.1 | 0.167 | 13.0 | 0.022 81 | 2.1 | 0.172 |
| 10.1 | 1.52 | 118 | 52 | 2.17 | 0.46 | 134.1 ± 2.7 | 0.120 | 18.0 | 0.021 02 | 2.0 | 0.115 |
| 11.1 | 1.01 | 377 | 96 | 7.16 | 0.26 | 139.5 ± 2.3 | 0.133 | 8.0 | 0.021 88 | 1.7 | 0.207 |
| 12.1 | 0.68 | 375 | 99 | 7.66 | 0.27 | 150.3 ± 2.4 | 0.147 | 5.8 | 0.023 60 | 1.6 | 0.279 |
| 13.1 | 0.42 | 384 | 195 | 7.29 | 0.53 | 140.5 ± 2.3 | 0.146 | 6.6 | 0.022 03 | 1.6 | 0.247 |
| 14.1 | 0.69 | 2 539 | 260 | 48.30 | 0.11 | 140.4 ± 2.1 | 0.147 | 2.7 | 0.022 02 | 1.5 | 0.558 |
| 15.1 | 11.19 | 46 | 51 | 0.86 | 1.15 | 123.7 ± 5.2 | | | 0.019 37 | 4.2 | |

注: 误差为 1σ; Pb_c 和 Pb* 分别为普通铅和放射成因铅。

3.2.5 云蒙山中粗粒二长花岗岩(GJ03)

样品 GJ03 中的锆石为长柱状、短柱状,长约 90 ~200 μm ,宽约 60 ~80 μm ,长宽比为 2:1 ~4:1。阴极发光图像中大多数锆石的中间区域都呈明显的暗色,可能与 U、Th 含量较高有关,但边缘上可见清晰的韵律环带,具岩浆锆石特征(图 3e)。19 个锆石 SHRIMP U-Pb 数据点的 U 含量在 $283 \times 10^{-6} \sim 3\ 982$

$\times 10^{-6}$ 之间, Th 含量在 $73 \times 10^{-6} \sim 2\ 988 \times 10^{-6}$ 之间, Th/U 值大于 0.1(表 1)。对该样品分析了 19 个点,数据点 1.2、3.2 的 U 含量较低,数据点 15.1 的 U、Th 含量较低,单点误差太大,数据点 12.1、13.1 得到的年龄偏小,除去上述 5 个数据点后 14 个数据点加权平均 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $145 \pm 1\ \text{Ma}$, MSWD = 1.12(图 4e)。此年龄解释为该二长花岗岩体的侵位年龄。

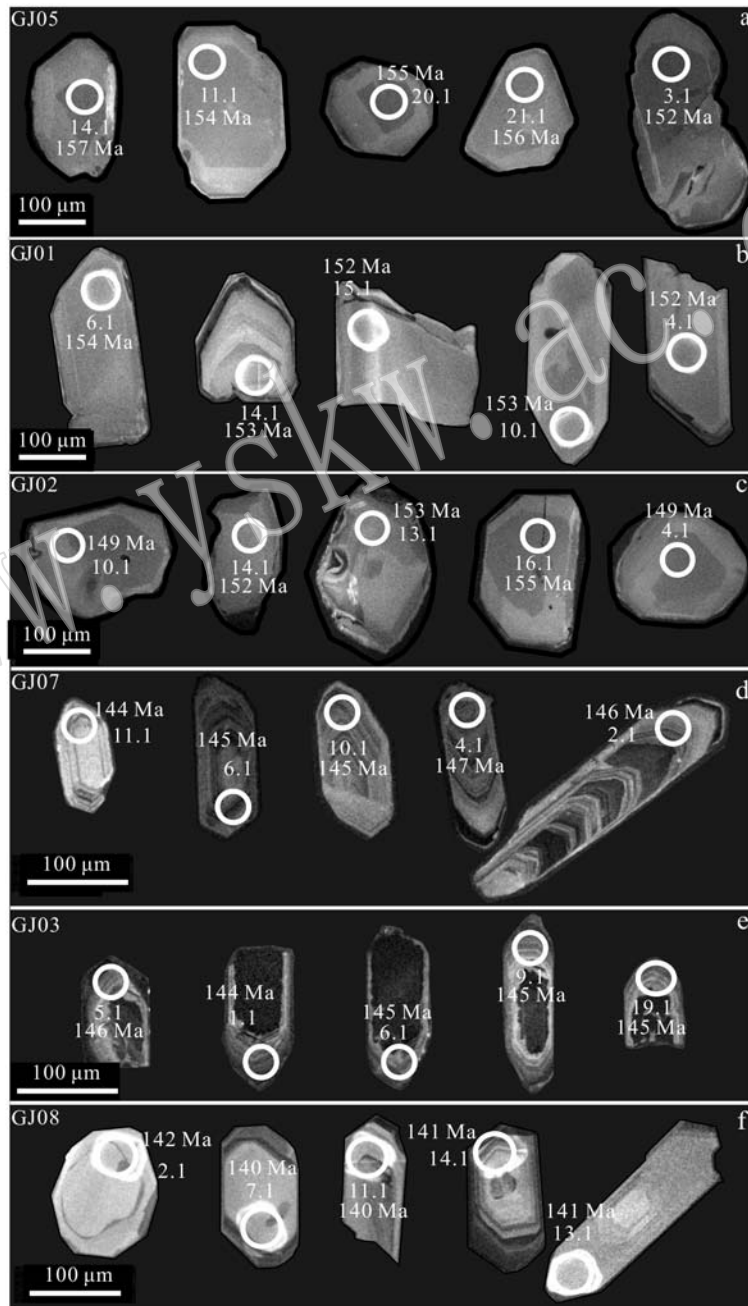


图 3 代表性锆石颗粒阴极发光图像及其 SHRIMP U-Pb 年龄

Fig. 3 Cathodoluminescence (CL) images and SHRIMP U-Pb ages of representative zircon grains

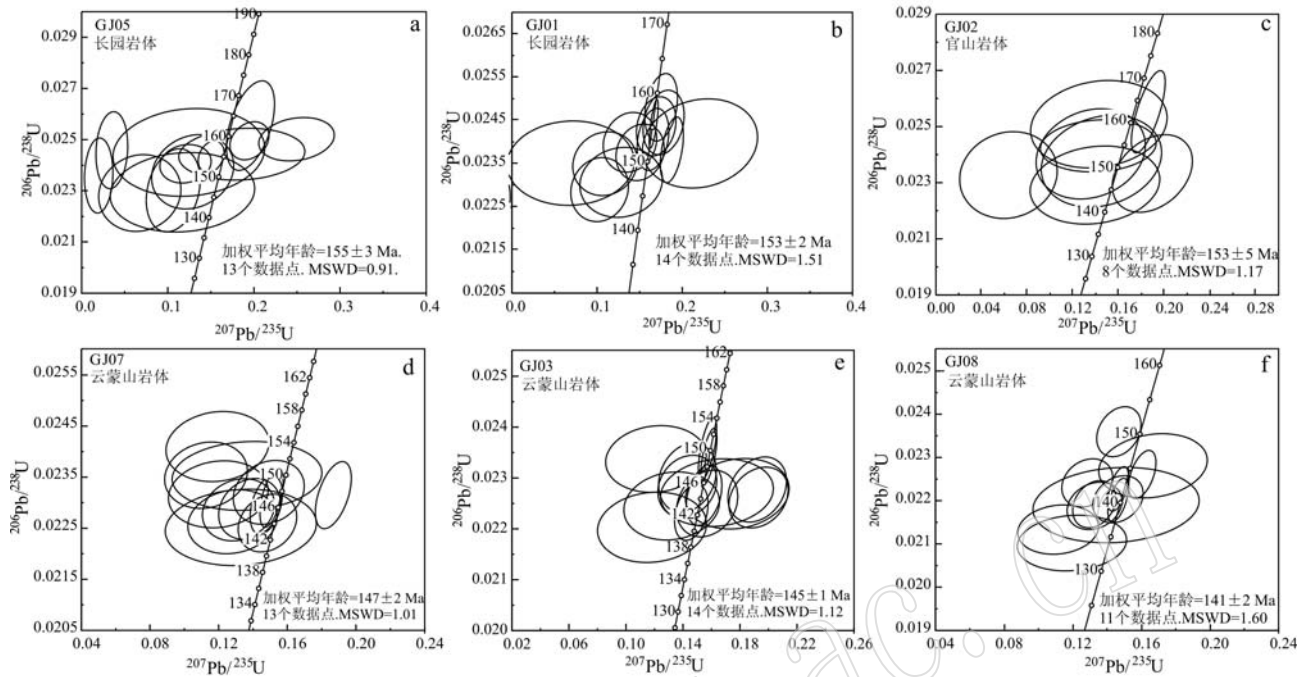


图4 样品的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄谐和图

Fig. 4 Concordia diagrams showing SHRIMP zircon U-Pb data of the samples

3.2.6 云蒙山中粗粒二长花岗岩(GJ08)

样品 GJ08 中的锆石整体粒度较小, 大多为长柱状, 少数粒状。锆石的长宽比为 2:1 ~ 4:1, 大多数可见韵律结构(图 3f)。15 个锆石 SHRIMP U-Pb 数据点显示 U、Th 含量变化较大, 但 Th/U 值均大于 0.1 (表 1)。点 1.1、5.1、15.1 由于 U 含量相对较低, 误差偏大, 点 12.1 的年龄测得为 151 ± 3 Ma, 应为岩浆上侵捕获的围岩锆石。除去上述 4 个点之后 11 个数据点加权平均 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 141 ± 2 Ma, MSWD 为 1.60 (图 4f)。该年龄解释为该岩体的形成时代。

4 地球化学特征

样品的主量元素、微量元素和稀土元素在加拿大 Acme Analytical Lab 进行分析测定, 利用 X 射线荧光光谱法(XRF)分析主量元素, 分析相对误差小于 5%, 而稀土元素和微量元素采用 ICP-MS 法进行分析测试。样品的主量元素、微量元素分析结果见表 2。

4.1 主量元素

在 TAS 图解(图 5a)中, 长园岩体(GJ05、GJ01)和官山岩体(GJ02)样品主要落在石英二长岩和二长

岩范围内, 而云蒙山样品全部在花岗岩的范围内, 根据实际矿物含量的定名见图 5b。它们的主量元素特征如下:

长园岩体(GJ05、GJ01)的 SiO_2 含量为 60.40% ~ 67.18%, 铝含量较高 ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 15.90\% \sim 16.76\%$), A/CNK 值为 0.85 ~ 0.99, 为偏铝质(图 6), K_2O 含量为 3.12% ~ 4.40%, 相对富钾, $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 值为 7.21% ~ 8.53%, 里特曼指数均小于 3.3, 属于高钾钙碱性系列(图 5c), MgO 含量为 0.94% ~ 2.84%, $\text{Mg}^\#$ 低于 50(37.15 ~ 49.63)。

官山岩体(GJ02)的 SiO_2 含量为 59.19% ~ 63.81%, 铝含量较高 ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 16.79\% \sim 16.91\%$), A/CNK 值为 0.87 ~ 0.96, 属于偏铝质(图 6), K_2O 含量为 2.85% ~ 3.88%, 属于高钾钙碱性系列(图 5c), MgO 含量为 1.55% ~ 2.71%, $\text{Mg}^\#$ 很低(45.15 ~ 47.01)。

云蒙山花岗岩样品 GJ07、GJ08 的 SiO_2 含量为 69.13% ~ 70.68%, Al_2O_3 含量较高 (15.78% ~ 16.27%), A/CNK 值为 1.04 ~ 1.06, 属于过铝质(图 6), K_2O 含量为 3.39% ~ 4.05%, 里特曼指数小于 3.3, 属于高钾钙碱性系列(图 5c), $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 含量为 8.60% ~ 9.23%, 与该区闪长岩类相比更加富碱, MgO 含量为 0.23% ~ 0.52%, 与长园岩体和官山岩

表2 云蒙山地区各个岩体主量元素($w_B/\%$)、微量元素($w_B/10^{-6}$)含量

Table 2 Major($w_B/\%$), REE and trace element ($w_B/10^{-6}$) content of the granitoids from the Yunmengshan area

| 岩体 岩性 样品号 | 长园岩体 | | | | | 官山岩体 | | 云蒙山岩体 | | | | | |
|--------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|
| | 花岗闪长岩 | | | | | | | 斑状二长花岗岩 | | 二长花岗岩 | | | |
| | GJ05-1 | GJ05-2 | GJ05-3 | GJ01-1 | GJ01-2 | GJ02-1 | GJ02-2 | GJ07-1 | GJ07-2 | GJ08-1 | GJ08-2 | GJ03-1 | GJ03-2 |
| SiO ₂ | 60.40 | 60.98 | 60.69 | 66.39 | 67.18 | 63.81 | 59.19 | 69.22 | 69.13 | 70.40 | 70.68 | 75.12 | 74.62 |
| TiO ₂ | 0.79 | 0.78 | 0.78 | 0.44 | 0.40 | 0.50 | 0.85 | 0.30 | 0.28 | 0.19 | 0.15 | 0.05 | 0.05 |
| Al ₂ O ₃ | 16.00 | 15.90 | 16.76 | 16.25 | 16.14 | 16.91 | 16.79 | 16.27 | 16.17 | 15.78 | 16.22 | 14.18 | 14.21 |
| Fe ₂ O ₃ | 5.70 | 5.71 | 5.56 | 3.47 | 3.15 | 3.73 | 6.05 | 2.27 | 2.26 | 1.68 | 1.31 | 0.59 | 0.52 |
| MnO | 0.09 | 0.08 | 0.08 | 0.04 | 0.04 | 0.05 | 0.09 | 0.04 | 0.04 | 0.05 | 0.04 | 0.02 | 0.02 |
| MgO | 2.82 | 2.84 | 2.55 | 1.04 | 0.94 | 1.55 | 2.71 | 0.52 | 0.50 | 0.32 | 0.23 | 0.05 | 0.05 |
| CaO | 4.81 | 4.60 | 4.33 | 2.80 | 2.61 | 3.42 | 4.88 | 1.90 | 1.73 | 1.31 | 1.33 | 0.83 | 0.88 |
| Na ₂ O | 4.09 | 4.00 | 4.42 | 4.19 | 4.13 | 4.32 | 4.46 | 5.21 | 5.01 | 5.09 | 5.19 | 4.44 | 4.47 |
| K ₂ O | 3.12 | 3.36 | 3.08 | 4.30 | 4.40 | 3.88 | 2.85 | 3.39 | 3.75 | 4.05 | 4.04 | 4.38 | 4.58 |
| P ₂ O ₅ | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.20 | 0.19 | 0.20 | 0.34 | 0.13 | 0.13 | 0.08 | 0.05 | <0.01 | <0.01 |
| LOI | 1.5 | 1.1 | 1.1 | 0.5 | 0.5 | 1.2 | 1.4 | 0.4 | 0.6 | 0.8 | 0.5 | 0.3 | 0.6 |
| TOTAL | 99.61 | 99.61 | 99.65 | 99.64 | 99.66 | 99.58 | 99.62 | 99.63 | 99.61 | 99.73 | 99.73 | 99.98 | 99.98 |
| Na ₂ O + K ₂ O | 7.21 | 7.36 | 7.50 | 8.49 | 8.53 | 8.20 | 7.31 | 8.60 | 8.76 | 9.14 | 9.23 | 8.82 | 9.05 |
| K ₂ O/Na ₂ O | 0.76 | 0.84 | 0.70 | 1.03 | 1.07 | 0.90 | 0.64 | 0.65 | 0.75 | 0.80 | 0.78 | 0.99 | 1.02 |
| 里特曼指数 | 2.99 | 3.01 | 3.18 | 3.08 | 3.01 | 3.23 | 3.30 | 2.82 | 2.94 | 3.05 | 3.08 | 2.42 | 2.59 |
| Mg [#] | 49.50 | 49.63 | 47.60 | 37.25 | 37.15 | 45.15 | 47.01 | 31.21 | 30.47 | 27.39 | 25.80 | 14.37 | 16.00 |
| A/CNK | 0.85 | 0.86 | 0.91 | 0.98 | 0.99 | 0.96 | 0.87 | 1.04 | 1.05 | 1.04 | 1.06 | 1.05 | 1.02 |
| Ga | 19.4 | 18.7 | 19.7 | 18.5 | 16.7 | 17.9 | 19.6 | 19.4 | 19.9 | 20.6 | 19.1 | 17.7 | 16.9 |
| Cs | 1.7 | 1.4 | 2.9 | 0.4 | 0.5 | 1.2 | 1.6 | 0.7 | 0.9 | 1.3 | 0.7 | 0.6 | 0.8 |
| Rb | 64.6 | 68.7 | 74.4 | 76.4 | 73.7 | 62.2 | 60.0 | 65.0 | 74.2 | 84.8 | 77.9 | 102.1 | 90.0 |
| Ba | 1 363 | 1 438 | 1 191 | 1 791 | 1 684 | 2 064 | 1 285 | 1 784 | 1 989 | 1 415 | 1 406 | 81 | 77 |
| Th | 5.1 | 7.2 | 7.5 | 6.7 | 7.4 | 3.6 | 5.2 | 3.3 | 3.1 | 2.9 | 2.5 | 2.1 | 1.5 |
| U | 1.6 | 1.9 | 2.0 | 1.2 | 1.7 | 1.1 | 1.6 | 0.6 | 0.9 | 0.6 | 0.4 | 0.7 | 0.5 |
| Nb | 9.5 | 10.4 | 9.5 | 10.0 | 9.7 | 5.9 | 8.8 | 9.4 | 9.0 | 8.6 | 7.4 | 3.9 | 4.0 |
| Ta | 0.6 | 0.6 | 0.7 | 0.9 | 0.7 | 0.5 | 0.5 | 0.6 | 0.6 | 0.5 | 0.5 | 0.2 | 0.3 |
| Sr | 987.7 | 950.5 | 973.6 | 792.9 | 767.8 | 1 066.3 | 1 037.5 | 1 019.6 | 1 002.8 | 742.4 | 751.7 | 103.7 | 97.1 |
| Y | 14.0 | 14.5 | 13.7 | 9.4 | 8.8 | 9.1 | 13.7 | 7.7 | 6.4 | 5.2 | 4.0 | 3.6 | 2.1 |
| Zr | 213.5 | 185.8 | 193.4 | 194.9 | 174.5 | 148 | 196.6 | 205.7 | 190.3 | 126.5 | 105.0 | 70.6 | 45.7 |
| Hf | 5.3 | 5.4 | 5.3 | 5.0 | 4.7 | 4.1 | 5.2 | 5.0 | 4.8 | 3.7 | 2.8 | 2.5 | 1.7 |
| La | 37.8 | 38.7 | 40.3 | 45.2 | 45.2 | 28.6 | 39.7 | 41.6 | 38.8 | 13.5 | 8.9 | 6.4 | 5.7 |
| Ce | 78.8 | 79.4 | 81.8 | 84.2 | 81.0 | 55.1 | 77.5 | 77.1 | 71.7 | 36.0 | 35.8 | 12.2 | 11.7 |
| Pr | 9.05 | 9.20 | 8.98 | 8.96 | 8.51 | 6.14 | 9.11 | 7.99 | 7.10 | 3.13 | 1.78 | 1.41 | 1.19 |
| Nd | 35.4 | 34.2 | 35.2 | 32.0 | 29.2 | 21.9 | 34.5 | 26.6 | 23.5 | 10.7 | 6.2 | 4.6 | 3.9 |
| Sm | 5.63 | 5.95 | 5.77 | 4.43 | 4.37 | 3.51 | 5.74 | 3.29 | 3.11 | 1.83 | 0.90 | 0.73 | 0.59 |
| Eu | 1.55 | 1.56 | 1.46 | 1.21 | 1.05 | 1.03 | 1.66 | 0.98 | 0.81 | 0.49 | 0.37 | 0.16 | 0.14 |
| Gd | 4.57 | 4.52 | 4.58 | 3.16 | 2.94 | 2.69 | 4.42 | 2.28 | 1.99 | 1.57 | 0.82 | 0.53 | 0.41 |
| Tb | 0.56 | 0.59 | 0.57 | 0.39 | 0.37 | 0.34 | 0.56 | 0.27 | 0.24 | 0.20 | 0.12 | 0.06 | 0.05 |
| Dy | 2.97 | 3.12 | 3.00 | 1.87 | 1.85 | 1.73 | 2.88 | 1.32 | 1.14 | 1.13 | 0.64 | 0.32 | 0.35 |
| Ho | 0.54 | 0.53 | 0.5 | 0.31 | 0.32 | 0.30 | 0.45 | 0.20 | 0.16 | 0.20 | 0.11 | 0.04 | 0.05 |
| Er | 1.48 | 1.45 | 1.42 | 0.93 | 0.83 | 0.80 | 1.34 | 0.59 | 0.51 | 0.57 | 0.41 | 0.18 | 0.14 |
| Tm | 0.19 | 0.20 | 0.21 | 0.13 | 0.13 | 0.12 | 0.20 | 0.07 | 0.07 | 0.08 | 0.07 | 0.02 | 0.02 |
| Yb | 1.24 | 1.33 | 1.30 | 0.87 | 0.75 | 0.70 | 1.26 | 0.56 | 0.57 | 0.58 | 0.38 | 0.22 | 0.21 |
| Lu | 0.19 | 0.20 | 0.21 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.17 | 0.08 | 0.08 | 0.08 | 0.05 | 0.03 | 0.04 |
| ΣREE | 179.97 | 180.95 | 185.3 | 183.78 | 176.64 | 123.08 | 179.49 | 162.93 | 149.78 | 70.06 | 56.55 | 26.90 | 24.49 |
| LREE/HREE | 14.33 | 14.15 | 14.72 | 22.62 | 23.16 | 17.10 | 14.91 | 29.34 | 30.47 | 14.89 | 20.75 | 18.21 | 18.28 |
| (La/Yb) _N | 21.87 | 20.87 | 22.24 | 37.27 | 43.23 | 29.31 | 22.60 | 53.29 | 48.83 | 16.70 | 16.80 | 20.87 | 19.47 |
| δEu | 0.91 | 0.88 | 0.84 | 0.94 | 0.84 | 0.99 | 0.97 | 1.04 | 0.93 | 0.86 | 1.29 | 0.75 | 0.83 |
| Sr/Y | 70.55 | 65.55 | 71.07 | 84.35 | 87.25 | 117.18 | 75.72 | 132.42 | 156.69 | 142.77 | 187.93 | 28.81 | 46.24 |
| Zr/Hf | 40.28 | 34.41 | 36.49 | 38.98 | 37.13 | 36.10 | 37.81 | 41.14 | 39.64 | 34.19 | 37.5 | 28.24 | 26.88 |
| 10 ⁴ Ga/Al | 2.3 | 2.2 | 2.2 | 2.2 | 2.0 | 2.0 | 2.2 | 2.3 | 2.3 | 2.5 | 2.2 | 2.4 | 2.2 |

注: A/CNK 为 Al₂O₃/(CaO + Na₂O + K₂O)摩尔比; 里特曼指数为 (K₂O + Na₂O)/(SiO₂ - 43); Mg[#] = 100 (MgO/40.31)/(MgO/40.31 + 2 Fe₂O₃/159.7)。

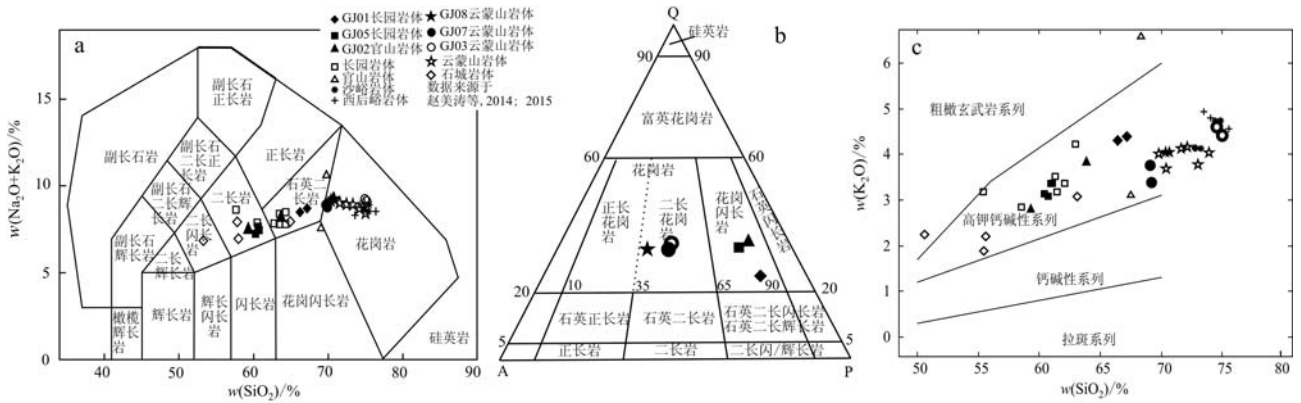


图5 各岩体的TAS图解(a, 据 Middlemost, 1994)、QAP图解(b, 据 Streckeisen, 1974)和 $K_2O - SiO_2$ 岩石系列判别图(c, 据 Peccerillo 和 Taylor, 1976)

Fig. 5 TAS diagram (a, after Middlemost, 1994), QAP diagram (b, after Streckeisen, 1974) and $K_2O - SiO_2$ diagram (c, after Peccerillo and Taylor, 1976) for the samples

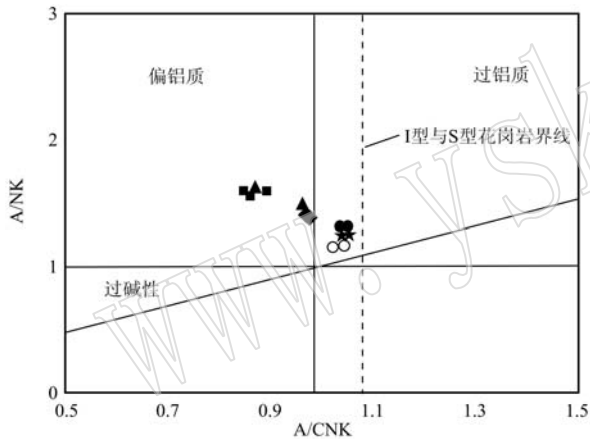


图6 岩石铝饱和指数判别图解(据 Rollinson, 1993; 图例同图5)

Fig. 6 A/NK - A/CNK diagram for the samples (after Rollinson, 1993; legends as for Fig. 5)

体相比明显偏低, $Mg^{\#}$ 值为 25.80 ~ 31.21, 属于低镁范围; 而云蒙山二长花岗岩样品 GJ03 的 SiO_2 含量高(74.62% ~ 75.12%), 而 Al_2O_3 含量低(14.18% ~ 14.21%), A/CNK 值为 1.02 ~ 1.05, 属于过铝质(图6), K_2O 含量为 4.35% ~ 4.58%, 属于高钾钙碱性系列(图5c), MgO 含量低(0.05%)。

4.2 稀土元素

长园岩体(GJ05、GJ01)样品的稀土元素总含量(ΣREE)为 $176.64 \times 10^{-6} \sim 185.30 \times 10^{-6}$, $(La/Yb)_N$ 值为 20.87 ~ 43.23。球粒陨石标准化图解(图7a)显示, 曲线形态基本一致, 总体呈右倾型, 均表现出轻稀土元素相对重稀土元素明显富集, 重稀土元素相

对平坦, 轻、重稀土元素分馏较为明显, 无或者具很微弱的 Eu 的负异常($\delta Eu = 0.84 \sim 0.94$)。

官山岩体(GJ02)样品的稀土元素 ΣREE 为 $123.08 \times 10^{-6} \sim 179.49 \times 10^{-6}$, $(La/Yb)_N$ 值为 22.60 ~ 29.31。球粒陨石标准化配分曲线形态基本一致(图7a), 总体呈右倾型, 均表现出轻稀土元素相对重稀土元素明显富集, 重稀土元素相对平坦, 轻、重稀土元素分馏较为明显, 无或者有很微弱的 Eu 的负异常($\delta Eu = 0.97 \sim 0.99$)。

云蒙山花岗岩(GJ07 和 GJ08)样品的稀土元素 ΣREE 为 $56.55 \times 10^{-6} \sim 162.93 \times 10^{-6}$, $(La/Yb)_N$ 值为 16.70 ~ 53.29。稀土元素球粒陨石标准化图解上显示为右倾型(图7b), 轻稀土元素相对重稀土元素明显富集, 重稀土元素相对平坦, 轻、重稀土元素分馏较强, Eu 显示无或微弱的异常($\delta Eu = 0.86 \sim 1.29$)。样品 GJ03 稀土元素强烈亏损, ΣREE 为 $24.49 \times 10^{-6} \sim 26.90 \times 10^{-6}$, 轻重稀土元素分馏明显, 具有微弱的 Eu 负异常(图7b)。

4.3 微量元素

长园岩体(GJ05、GJ01)各样品微量元素原始地幔标准化配分图解的组成模式与赵美涛等(2015)的模式相似(图7c), 显示岩体富集大离子亲石元素如 Rb、Ba、K、Sr, 同时富集 Zr、Hf, 亏损高场强元素如 Nb、Ta、Ti。其岩石地球化学特征显示较高的 Sr/Y 值, Sr 含量为 $767.8 \times 10^{-6} \sim 987.7 \times 10^{-6}$, Y 含量为 $8.8 \times 10^{-6} \sim 14.5 \times 10^{-6}$, 显示埃达克质岩特征(图8a)(张旗等, 2008)。

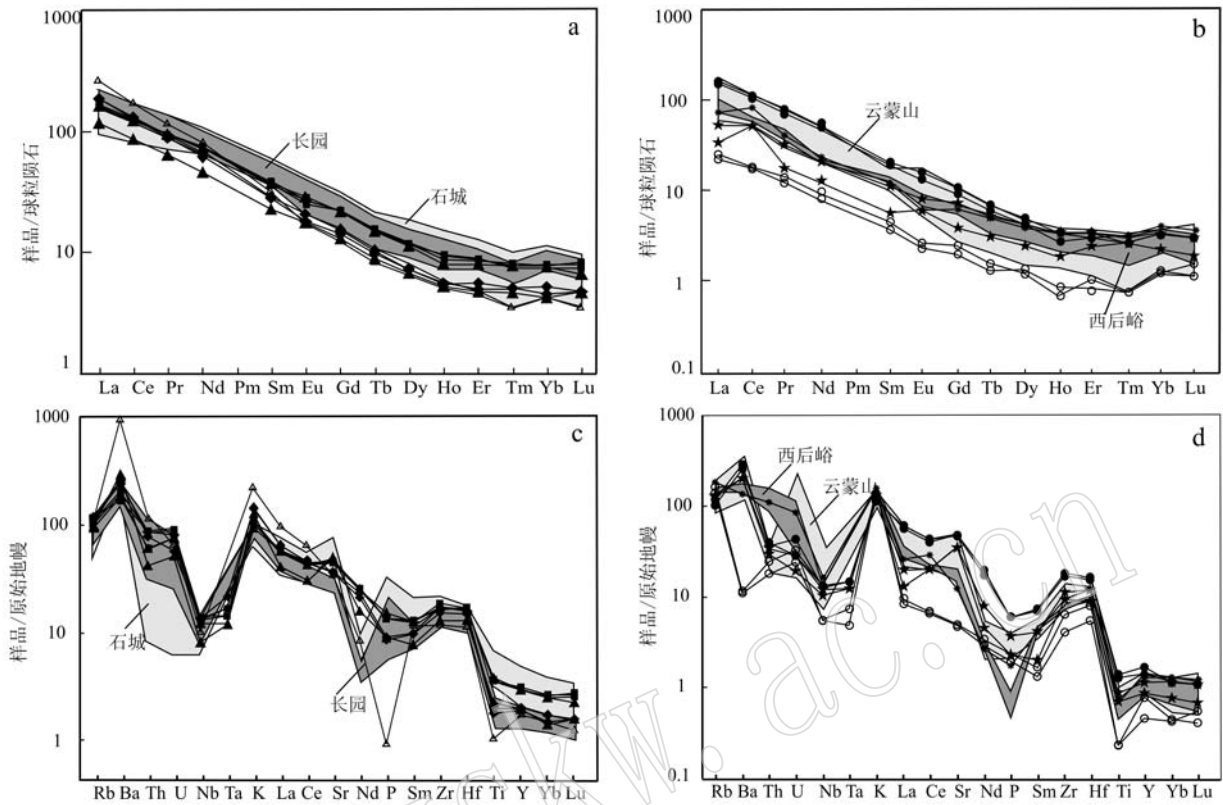


图 7 侵入岩体稀土元素球粒陨石标准化配分图和微量元素原始地幔标准化蛛网图

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle-normalized spider diagrams for the samples from the plutons
数据来源及图例同图 5; 球粒陨石值据 Boynton(1984); 原始地幔标准化值据 Sun 和 McDonough(1989)
data source and legends as for Fig. 5; chondrite values after Boynton (1984); primitive mantle values after Sun and McDonough(1989)

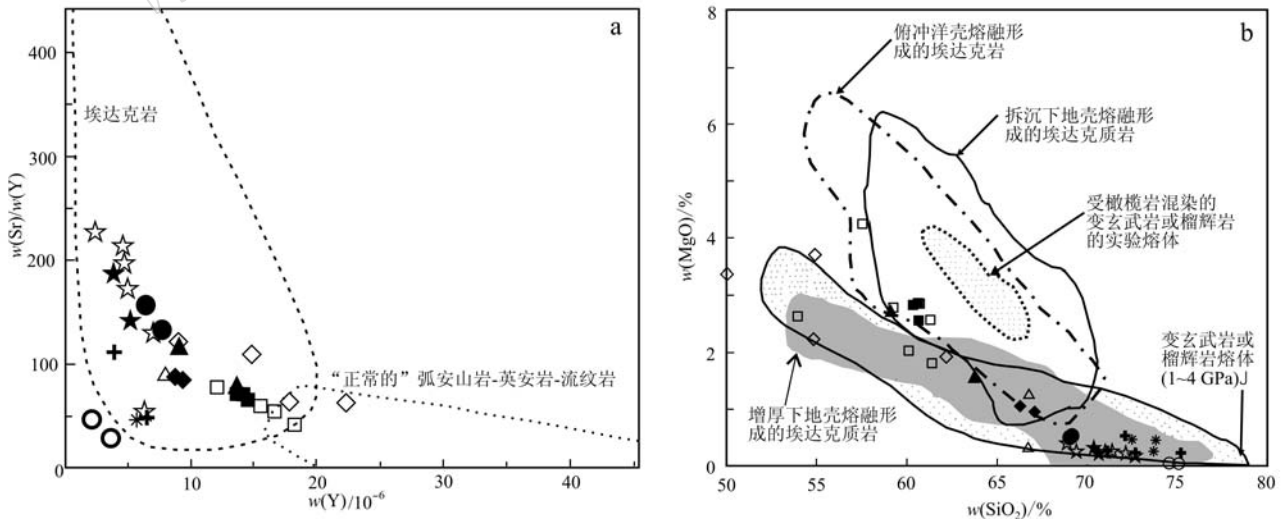


图 8 云蒙山地区各岩体 Sr/Y - Y (a, 据 Defant and Drummond, 1990) 与 MgO - SiO₂ 图解 (b, 据 Wang *et al.*, 2007)

Fig. 8 Sr/Y versus Y diagram (a, modified after Defant and Drummond, 1990) and MgO versus SiO₂ diagram

(modified after Wang *et al.*, 2007) for the granitoids from Yunmengshan area

数据来源及图例同图 5

data source and legends as for Fig. 5

官山岩体(GJ02)各样品微量元素原始地幔标准化配分图解的组成模式(图7c)显示岩体富集大离子亲石元素如Rb、Ba、K、Sr,同时富集Zr、Hf,亏损高场强元素如Nb、Ta、P和Ti。具较高的Sr/Y值,Sr含量较高($1\ 037.5 \times 10^{-6} \sim 1\ 066.3 \times 10^{-6}$),Y含量为 $9.1 \times 10^{-6} \sim 13.7 \times 10^{-6}$,显示埃达克质岩特征(图8a)(张旗等,2008)。

云蒙山岩体样品(GJ07和GJ08)微量元素原始地幔标准化配分图解的组成基本相似,其中样品GJ03与其他样品模式有一定区别(图7d)。该图解显示云蒙山岩体富集大离子亲石元素,亏损Ta、Nb、P和Ti等高场强元素,具有高的Sr含量($742.4 \times 10^{-6} \sim 1\ 019.6 \times 10^{-6}$)和Sr/Y值(132.42~187.93),显示埃达克质岩特征(图8a)(张旗等,2008)。样品GJ03亏损Ba,与云蒙山地区花岗岩类相比Zr含量低,具较低的Zr/Hf值(26.88~28.24)(表2)、低Sr含量($97.1 \times 10^{-6} \sim 103.7 \times 10^{-6}$)和低的Sr/Y值(28.81~46.24)(图8a)。

5 讨论

5.1 岩体的形成时代和岩浆成分演化

北京云蒙山变质核杂岩下盘出露的花岗岩体主要为长园杂岩体、云蒙山岩基、石城岩体和五道河岩体。其中长园杂岩体包括长园岩体、官山岩体、沙峪岩体和西后峪岩体。Davis等(1996)在该区进行锆石U-Pb年龄测定长园岩体侵入年龄为 151 ± 2 Ma(表3),而长园环带杂岩体中各岩体的侵入接触关系显示长园岩体和官山岩体早于沙峪岩体和西后峪岩体侵位(姬广义等,2004;赵美涛等,2015)。姬广义等(2004)认为云蒙山地区岩浆侵入活动时间序列为:长园岩体→官山岩体→云蒙山岩体→沙峪岩体→西后峪岩体,总体上具有闪长质岩类早侵位,花岗岩、二长花岗岩后侵位的趋势。Davis等(1996)在该区进行的锆石U-Pb年龄测定得到云蒙山岩基的侵位年龄范围为 $143 \sim 141$ Ma(表3);刘翠等(2004)报道了云蒙山片麻状花岗岩的锆石SHRIMP U-Pb定年结果,认为 144 ± 4 Ma代表了云蒙山岩体的侵位时间;Shi等(2009)对云蒙山花岗岩体的北边和东边岩体进行了系统的锆石SHRIMP U-Pb定年研究,获得的云蒙山岩体岩石年龄分布范围为 $151 \sim 141$ Ma(表3),北石城岩体的锆石U-Pb年龄范围为 $162 \sim 155$ Ma(Davis等,1996;Shi *et al.*, 2009)(表3)。

本文研究的样品采自长园岩体、官山岩体和云蒙山岩体,分别获得岩体形成年龄为 $155 \sim 153$ 、 153 和 $147 \sim 141$ Ma。结合前人研究成果,可以将云蒙山地区岩体分为两个岩浆期次(图9):早期岩浆活动时间为 $162 \sim 151$ Ma,为长园岩体、官山岩体、石城岩体和沙坨子岩体,岩性主要为闪长质;晚期的岩浆活动时间为 $151 \sim 141$ Ma,主要是云蒙山岩体、沙峪岩体、西后峪岩体和五道河岩体,岩性偏酸性,大多数为花岗岩和二长花岗岩。

本文研究的花岗质岩类中主要岩性为花岗闪长岩和二长花岗岩,岩体的岩相学特征都表现出一定的一致性:都比较富硅,属于偏铝质-过铝质的高钾钙碱性花岗岩;两期形成的花岗岩类 Na_2O 含量大于3.2%,无富铝的矿物如白云母、堇青石出现,所以不是S型花岗岩,亏损高场强元素,无碱性暗色矿物, $10^4 \text{Ga}/\text{Al} = 1.9 \sim 2.5 (< 2.6)$; $\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y} = 63.5 \times 10^{-6} \sim 376.2 \times 10^{-6}$,均值为 $249.3 \times 10^{-6} (< 350 \times 10^{-6})$,所以也不是A型花岗岩(Whalen *et al.*, 1987)。岩石中含有普通角闪石, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 0.64 \sim 1.14 (< 1.2)$, A/CNK 均小于1.1。基于上述理由,认为该区岩石均属于高钾钙碱性I型花岗岩类。云蒙山地区的样品(除GJ03,后文讨论)都具高 $\text{SiO}_2 (> 56\%)$ 、高 $\text{Al}_2\text{O}_3 (> 15\%)$ 、低 $\text{MgO} (< 3\%)$ 、高Sr($> 400 \times 10^{-6}$)、高 $(\text{La}/\text{Yb})_N (> 20)$ 特征,几乎无负Eu异常,低Y($< 18 \times 10^{-6}$),低Yb($< 1.9 \times 10^{-6}$),亏损高场强元素,符合埃达克岩的主要化学特征(图8)(张旗等,2008),表示岩浆源区无或仅有微量斜长石残留,残留相含有石榴子石。I型花岗岩的源岩理论上是未经受变质的火成岩再次熔融而成,早期形成的长园岩体、官山岩体具有较高的 $\text{Mg}^\#$ 值(37.15~49.63),偏向于中性岩体,因此仅由下地壳部分熔融不能解释其岩体成因。而晚期的云蒙山岩体更加偏酸性, $\text{Mg}^\#$ 值低(14.37~31.21),显示壳源的物质组成。在 $\text{MgO}-\text{SiO}_2$ 图解(图8b)中,早期形成的闪长质岩石样品分布范围较大,而后期形成的花岗岩/二长花岗岩均为显示为下地壳物质部分熔融。赵美涛等(2014,2015)研究了云蒙山地区长园杂岩体、石城闪长岩和云蒙山花岗岩的岩石成因,得出长园石英二长闪长岩、官山石英二长岩和石城闪长岩均为基性岩浆分离结晶的产物;云蒙山花岗岩是华北克拉通下地壳古老基性岩类在高压下($p \geq 1.5$ GPa)失水部分熔融的产物。本文样品的稀土元素球粒陨石标准化配分和微量元素原始地幔标准化

表3 云蒙山岩体花岗岩、闪长岩锆石 U-Pb 年龄数据表

Table 3 Summary of zircon U-Pb age data of the granitoids from the Yunmengshan pluton

| 样号 | 岩性 | 岩体 | 年龄 | 误差 | 测年方法 | 文献 |
|-----------|-------|-----|-----|----|----------------|----------------------------|
| PRC3 | 花岗闪长岩 | 五道河 | 141 | 2 | U-Pb | Davis <i>et al.</i> , 1996 |
| D0420-4-1 | 花岗岩 | 云蒙山 | 141 | 1 | SHRIMP U-Pb | Shi <i>et al.</i> , 2009 |
| MY156-1 | 花岗岩 | 云蒙山 | 141 | 1 | LA-ICP-MS U-Pb | 陈印等, 2013 |
| GJ08 | 二长花岗岩 | 云蒙山 | 141 | 2 | SHRIMP U-Pb | 本文 |
| PRC4 | 花岗闪长岩 | 云蒙山 | 142 | 2 | U-Pb | Davis <i>et al.</i> , 1996 |
| PRC5 | 花岗闪长岩 | 云蒙山 | 143 | 2 | U-Pb | Davis <i>et al.</i> , 1996 |
| PRC6 | 花岗闪长岩 | 云蒙山 | 143 | 2 | U-Pb | Davis <i>et al.</i> , 1996 |
| D0420-4-2 | 二长花岗岩 | 云蒙山 | 143 | 3 | SHRIMP U-Pb | Shi <i>et al.</i> , 2009 |
| MY155-3 | 花岗闪长岩 | 云蒙山 | 143 | 2 | LA-ICP-MS U-Pb | 陈印等, 2013 |
| WY-48 | 二长花岗岩 | 石城北 | 144 | 4 | SHRIMP U-Pb | 刘翠等, 2004 |
| D0421-25 | 花岗岩 | 云蒙山 | 144 | 2 | SHRIMP U-Pb | Shi <i>et al.</i> , 2009 |
| GJ03 | 二长花岗岩 | 云蒙山 | 145 | 1 | SHRIMP U-Pb | 本文 |
| D0421-24 | 花岗岩 | 云蒙山 | 145 | 2 | SHRIMP U-Pb | Shi <i>et al.</i> , 2009 |
| GJ07 | 二长花岗岩 | 云蒙山 | 147 | 2 | SHRIMP U-Pb | 本文 |
| D0502-1 | 二长闪长岩 | 云蒙山 | 151 | 5 | SHRIMP U-Pb | Shi <i>et al.</i> , 2009 |
| PRC1 | 花岗闪长岩 | 沙坨子 | 151 | 2 | U-Pb | Davis <i>et al.</i> , 1996 |
| PRC7 | 闪长岩 | 长园 | 151 | 2 | U-Pb | Davis <i>et al.</i> , 1996 |
| GJ01 | 花岗闪长岩 | 长园 | 153 | 3 | SHRIMP U-Pb | 本文 |
| GJ02 | 花岗闪长岩 | 官山 | 153 | 5 | SHRIMP U-Pb | 本文 |
| GJ05 | 花岗闪长岩 | 长园 | 155 | 3 | SHRIMP U-Pb | 本文 |
| D0501-4-1 | 闪长岩 | 石城 | 155 | 4 | SHRIMP U-Pb | Shi <i>et al.</i> , 2009 |
| D0501-4-2 | 花岗岩 | 石城 | 156 | 4 | SHRIMP U-Pb | Shi <i>et al.</i> , 2009 |
| D0422-2 | 闪长岩 | 北石城 | 157 | 4 | SHRIMP U-Pb | Shi <i>et al.</i> , 2009 |
| PRC8 | 闪长岩 | 北石城 | 159 | 2 | U-Pb | Davis <i>et al.</i> , 1996 |
| D0422-4 | 闪长岩 | 石城 | 159 | 5 | SHRIMP U-Pb | Shi <i>et al.</i> , 2009 |
| D0422-3 | 二长花岗岩 | 石城 | 162 | 2 | SHRIMP U-Pb | Shi <i>et al.</i> , 2009 |

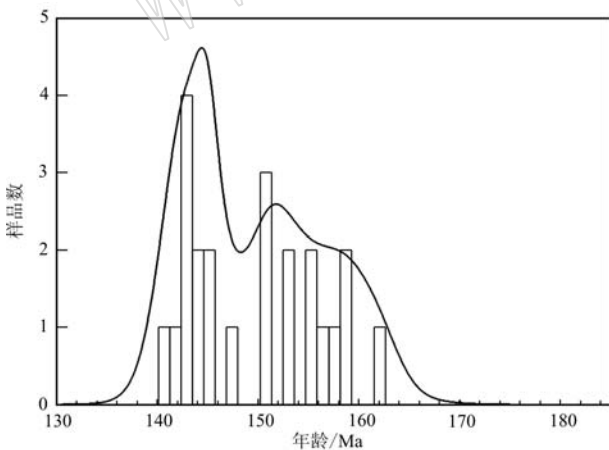


图9 云蒙山地区花岗岩、闪长岩锆石 U-Pb 年龄分布图
Fig. 9 Histogram of zircon ages of the granites and diorites from the Yunmengshan area

蛛网图与前人获得该区的分布图相似(图7),表示相似的源区组成。在云蒙山地区早期形成的长园岩体、官山岩体、石城岩体 SiO_2 含量为 49.96% ~ 67.18%, 具有较高的 $\text{Mg}^\#$ 值(37.15 ~ 49.63),

A/CNK 值小于 1, 是基性岩浆分离结晶的产物; 晚期云蒙山岩体、沙峪岩体、西后峪岩体 SiO_2 含量为 68.96% ~ 75.23%, $\text{Mg}^\#$ 值低, A/CNK 值大于 1, 是华北克拉通下地壳部分熔融的产物, 两期岩浆作用反映了云蒙山地区岩浆物质源区由地幔/下地壳物质向地壳物质转换, 两期不同岩浆作用的转换时间为 151 Ma, 与 Davis 等(2001)获得的幔源岩浆向地壳混染转换的时间一致。岩浆源区的转变表示随着晚侏罗时期的挤压作用, 地壳逐渐增厚, 从而使后期形成的岩浆更加具有壳源特征。

云蒙山地区较晚期的岩浆活动时间为 151 ~ 141 Ma, 主要形成了云蒙山岩体、沙峪岩体、西后峪岩体和五道河岩体。本文及前人在上述岩体中所采大多数样品的地球化学特征表明岩体的岩性主要为花岗岩和二长花岗岩, 且高 Sr 低 Y, 具有埃达克质岩的特征。然而本次同样取自云蒙山岩体的样品 GJ03, 与上述样品的地球化学特征有一定区别。该样品(GJ03)与其他样品相比有以下特征: 样品中的暗色矿物含量很少, SiO_2 含量高(74.62% ~ 75.12%), Ca

的含量低 ($\text{CaO} = 0.83\% \sim 0.88\%$), MgO 含量低 (0.05%), P 含量低 (低于 0.01%); 稀土元素强烈亏损, ΣREE 为 $24.49 \times 10^{-6} \sim 26.90 \times 10^{-6}$, 轻重稀土元素分馏明显, 具有 Eu 负异常 (图 7b); 与云蒙山地区其他花岗岩类相比 Rb 含量增多, 而亏损 Ba , 具有低 Sr 含量 ($97.1 \times 10^{-6} \sim 103.7 \times 10^{-6}$) 和低的 Sr/Y 值 ($28.81 \sim 46.24$) 特征 (表 2, 图 8a), 全岩中 Zr 、 Hf 含量低, Zr/Hf 值较低 ($26.88 \sim 28.24$) (表 2), 而样品 GJ03 锆石中的 U 、 Th 含量与该区其他样品相比较 (表 1), 上述特征与发生分异作用的花岗岩特点相似 (吴福元等, 2017)。二长花岗岩样品 GJ03 特殊的地球化学特征反映了其源区岩浆经历了一定程度的结晶分异作用, 其中 P 含量低可能与磷灰石结晶分离有关, 黑云母分离结晶会造成熔体 Ba 亏损, 这与岩石中暗色矿物含量少符合, 而随着岩浆的演化, 岩石中的斜长石牌号降低, Sr 的含量会有所降低, 同时岩浆冷却结晶的成岩过程中斜长石、钾长石发生分离结晶也会造成 Sr 、 Ba 和 Eu 的亏损 (邱检生等, 2005), 该样品较低的 Zr 含量和 Zr/Hf 值可能和锆石的分离结晶有关, 低 Y 和 HREE 的特征表示残留相中有石榴子石。因此, 本文认为二长花岗岩样品 GJ03 是地壳物质发生部分熔融后, 在斜长石、钾长石、黑云母、锆石、磷灰石和石榴子石等矿物结晶分离的条件下, 经历了一定程度的结晶分异作用所形成。

5.3 构造背景分析

华北克拉通在中生代经历了强烈的构造格局的转变和克拉通的破坏 (翟明国等, 2004; 周新华, 2006; 翟明国, 2010), 华北克拉通由挤压向拉张转换的时间有很大争议 (吴福元等, 2008; 嵇少丞等, 2008; Xu *et al.*, 2009; Yang *et al.*, 2009, 2010; Zhang *et al.*, 2012), 一些研究认为华北克拉通东部和北部地区岩石圈减薄作用和去克拉通化过程在中生代早期就已经发生 (Yang *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2012)。徐义刚 (2004) 根据华北地区岩浆作用的峰期, 认为 $130 \sim 120 \text{ Ma}$ 是华北克拉通减薄的时期, 而吴福元 (2008) 划分出侏罗纪到白垩纪华北地区 $180 \sim 155 \text{ Ma}$ 和 $135 \sim 115 \text{ Ma}$ 的两大岩浆作用期次, 并认为后者发生岩石圈的减薄和破坏; 嵇少丞等 (2008) 认为该区碱性岩浆活动时间代表华北克拉通岩石圈减薄的开始, 得出三叠纪早期华北地区岩石圈开始减薄的认识。研究区位于克拉通的北部边缘, 两个期次岩浆作用形成的岩石为埃达克质岩, 形

成于挤压环境中, 说明在 141 Ma (即早白垩世) 之前该区并不是拉张环境, 与华北克拉通大部分边缘地区的挤压-伸展转换的时间 (Yang *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2012) 相比较晚。该区挤压环境下形成的岩体分布时间为 $162 \sim 141 \text{ Ma}$, 期间地壳逐渐增厚, 而密云变质核杂岩活动的时间范围为 $129 \sim 127 \text{ Ma}$ (孙会一等, 2016), 指示该区拉张的环境, 因此, 云蒙山地区从挤压到拉张的转换时间为 $141 \sim 129 \text{ Ma}$ 。

云蒙山变质核杂岩下盘岩体形成于晚侏罗世—早白垩世, 从时间序列上看, 根据董树文等 (2007) 划分的燕山运动期次, 本文研究的两个期次的花岗岩 ($162 \sim 151 \text{ Ma}$ 、 $151 \sim 141 \text{ Ma}$) 都属于强挤压陆内造山期 ($165 \pm 5 \sim 136 \text{ Ma}$), 表明该时期地壳是增厚的。在该时间段内, 由于东侧太平洋板块、北侧蒙古—鄂霍茨克海、南侧和西侧拉萨地块和特提斯洋向东亚大陆多向汇聚, 形成以华北地块为中心的汇聚构造运动样式和多向挤压变形统一的汇聚构造体系 (董树文, 2007), 在挤压环境下地壳逐步变厚, 具备了后续拆沉作用发生的条件。

6 结论

(1) 本文通过测定 6 个不同岩体样品的 SHRIMP U-Pb 年龄, 结合前人的研究数据得出云蒙山地区在晚侏罗世—早白垩世主要有两期岩浆活动: $162 \sim 151 \text{ Ma}$ 以闪长岩、花岗闪长岩为主; $151 \sim 141 \text{ Ma}$ 以花岗岩和二长花岗岩为主, 有少量花岗闪长岩。云蒙山地区从挤压到拉张的转换时间为 $141 \sim 129 \text{ Ma}$ 。

(2) 云蒙山地区两期岩浆酸性逐渐增加, 岩浆源区反映从幔源到壳源, 表示随着晚侏罗世时期的挤压作用, 地壳逐渐增厚, 后期形成的岩浆更加具有壳源特征, 伴随产生一些中等分异的花岗岩。

(3) 本文研究的花岗岩类形成的构造背景是强挤压陆内造山环境, 其挤压作用受各个方向板块运动作用影响, 表明岩浆侵位于该区岩石圈大规模减薄之前。伴随中酸性岩浆上移侵位, 残留相的密度越来越大, 具备了后期下地壳发生拆沉的一些条件。

致谢 伍家善研究员在研究过程中给予指导, 李琳琳、侯晨阳等协助野外采样, 北京离子探针中心工作人员在实验期间提供了帮助, 匿名审稿人对本文提出了宝贵修改意见, 使本文质量得到很大提高,

在此一并表示感谢!

References

- Beijing Bureau of Geology and Mineral Resources of Beijing. 1991. Regional Geology of Beijing[M]. Beijing: Geological Publishing House, 597(in Chinese).
- Boynton W V. 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies[A]. Henderson P. Rare Earth Element Geochemistry[C]. New York: Elsevier Science Publishing Company Inc, 63~114.
- Chen Yin, Zhu Guang, Jiang Dazhi, *et al.* 2013. Timing determination of phase B of the Yanshan movement in the eastern north China craton: Evidence from dating of a ductile shear zone in Sihetang, northeastern Beijing[J]. Acta Geologica Sinica, 87(3): 295~310 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yin, Zhu Guang, Jiang Dazhi, *et al.* 2014. Deformation characteristics and formation mechanism of the Yunmengshan metamorphic core complex[J]. Chin. Sci. Bull., 59(16): 1 525~1 541(in Chinese with English abstract).
- Davis A, Qian X L, Zheng Y D, *et al.* 1996. Mesozoic deformation and plutonism in the Yunmengshan: A metamorphic core complex north of Beijing, China[A]. Yin A and Harrison T M. The tectonic evolution of Asia[C]. Cambridge: Cambridge University Press, 253~280.
- Davis G A, Zheng Y D, Wang C, *et al.* 2001. Mesozoic tectonic evolution of Yanshan Fold and Thrust Belt, with emphasis on Hebei and Liaoning Provinces, northern China[J]. Memories Geological Society of American, 194: 171~198.
- Defant M J and Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere[J]. Nature, 347: 6 626~6 665.
- Dong Shuwen, Zhang Yueqiao, Long Changxing, *et al.* 2007. Jurassic tectonic revolution in China and new interpretation of the Yanshan movement[J]. Acta Geologica Sinica, 81(11): 1 449~1 461 (in Chinese with English abstract).
- Ji Guangyi, Wang Yang and Sun Yonghua. 2004. Petrological characteristics and structural deformation of Yunmengshan magmatic complex[J]. Beijing Geology, 16(3): 1~11(in Chinese with English abstract).
- Ji Shaocheng, Wang Qian and Xu Zhiqin. 2008. Break-up of the North China Craton through lithospheric thinning[J]. Acta Geologica Sinica, 82(2): 174~193(in Chinese with English abstract).
- Li S Z, Zhao G C, Dai L M, *et al.* 2012. Mesozoic basins in eastern China and their bearing on the deconstruction of the North China Craton [J]. Asian Earth Sci., 47: 80~93.
- Liu Cui, Deng Jinfu, Su Shangguo, *et al.* 2004. Zircon SHRIMP dating of Yunmengshan gneissic granite and its geological significance[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 23(2): 141~146(in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2001. Squid 1.02: A User's Manual[J]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2: 1~19.
- Ludwig K R. 2003. User's Manual for Isoplot 3.00, A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley Geochronology Center, 70.
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. Earth-Science Review, 37: 215~224.
- Möller A, O'Brien P J, Kennedy A, *et al.* 2003. Linking growth episodes of zircon and metamorphic textures to zircon chemistry: An example from the ultrahigh-temperature granulites of Rogaland (SW Norway) [J]. Geological Society, London, Special Publications, 220: 65~81.
- Peccerillo A and Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calcalkaline volcanic rocks of the Kastamonu area, northern Turkey[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 58: 63~81.
- Qiu Jiansheng, Hu Jian, Wang Xiaolei, *et al.* 2005. The Baishigang pluton in Heyuan, Guangdong Province: A highly fractionated I-type granite[J]. Acta Geologica Sinica, 79(4): 503~514 (in Chinese with English abstract).
- Rollinson H R. 1993. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation[M]. Longman: Scientific & Technical Limited, 1~352.
- Shi Y R, Zhao X T, Ma Y S, *et al.* 2009. Late Jurassic-Early Cretaceous plutonism in the northern part of the Precambrian North China Craton: SHRIMP zircon U-Pb dating of diorites and granites from the Yunmengshan Geopark, Beijing[J]. Acta Geologica Sinica-English Edition, 83(2): 310~320.
- Sun Huiyi, Shi Yuruo, Zhao Xitao, *et al.* 2016. SHRIMP zircon U-Pb ages of Early Cretaceous granites from Miyun, Beijing and its geological significances[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 38(1): 43~54(in Chinese with English abstract).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: Implications for mantle composition and process[A]. Saunders A D and Norry M J. Magmatism in Ocean Basins[C]. Geological Society, London, Special Publication, 42: 313~345.
- Whalen J B, Currie K L and Chappell B W. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 95(4): 407~419.
- Williams I S. 1998. U-Th-Pb geochronology by Ion Microprobe[A]. McKibben M A, Shanks III W C and Ridley W I. Applications of Microanalytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes[C]. Reviews in Economic Geology, 7: 1~35.
- Wang Q, Wyman D A, Xu J F, *et al.* 2007. Early Cretaceous adakitic granites in the Northern Dabie complex, central China: Implications for partial melting and delamination of thickened lower crust[J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 71: 2 609~2 636.
- Wu Fuyuan, Liu Xiaochi, Ji Weiqiang, *et al.* 2017. Identification and study of highly-fractionated granites[J]. Scientia Sinica Terrae, 47(7): 745~765(in Chinese).
- Wu Fuyuan, Xu Yigang, Zhu Rixiang, *et al.* 2014. Thinning and destruction of the cratonic lithosphere: A global perspective[J]. Science China: Earth Sciences, 44(11): 2 358~2 372(in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Xu Yigang, Gao Shan, *et al.* 2008. Lithospheric thinning

- and destruction of the North China Craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(6): 1 145 ~ 1 174(in Chinese with English abstract).
- Xu Jifeng, Wang Renjing and Yang Shurong. 1994. Rock deformation and genesis of Yunmengshan granitic batholith[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 19(6): 806 ~ 814 (in Chinese with English abstract).
- Xu Yigang. 2004. Lithospheric thinning beneath North China: A temporal and spatial perspective[J]. *Geological Journal of China Universities*, 10(3): 324 ~ 331(in Chinese with English abstract).
- Xu Y G, Li H Y, Pang C J, *et al.* 2009. On the timing and duration of the destruction of the North China Craton[J]. *Chin. Sci. Bull*, 54: 3 379 ~ 3 396.
- Yang J H and Wu F Y. 2009. Triassic magmatism and its relation to decratonization in the eastern North China Craton[J]. *Sci. China Ser. D Earth Sci.*, 52: 1 319 ~ 1 330.
- Yang J H, O' Reilly S Y, Walker R J, *et al.* 2010. Diachronous decratonization of the Sino-Korean craton: Geochemistry of mantle xenoliths from North Korea[J]. *Geology*, 38: 799 ~ 802.
- Zhai Mingguo. 2010. Tectonic evolution and metallogenesis of North China Craton[J]. *Mineral Deposits*, 29(1): 24 ~ 36(in Chinese with English abstract).
- Zhai Mingguo, Meng Qingren, Liu Jianming, *et al.* 2004. Geological features of Mesozoic regime inversion in Eastern North China and implication for geodynamics[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 285 ~ 297 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Meitao and Wang Yang. 2014. Geochemical characteristics and petrogenesis of the Shicheng diorite and Yunmengshan granite in Beijing area[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 34(3): 60 ~ 69 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Meitao and Wang Yang. 2015. Geochemical characteristics and petrogenesis of Changyuan zoned pluton in Beijing municipality[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 34(4): 820 ~ 829(in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Wang Yan, Xiong Xiaolin, *et al.* 2008. Adakite and Granite: Challenge and Opportunity[M]. Beijing: China Land Press, 1 ~ 344 (in Chinese).
- Zhang S H, Zhao Y, Davis G A, *et al.* 2014. Temporal and spatial variations of Mesozoic magmatism and deformation in the North China Craton: Implications for lithospheric thinning and decratonization[J]. *Earth-Science Reviews*, 131: 49 ~ 87.
- Zhang S H, Zhao Y, Ye H, *et al.* 2012. Early Mesozoic alkaline complexes in the northern North China Craton: Implication for cratonic lithospheric destruction[J]. *Lithos*, 155: 1 ~ 18.
- Zhou Xinhua. 2006. Major transformation of subcontinental lithosphere beneath eastern China in the Cenozoic Mesozoic: Review and prospect [J]. *Earth Science Frontiers*, 13(2): 50 ~ 64 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Dagang, Cui Shengqin, Wu Zhenhan, *et al.* 2000. Tectonic features of the compressional-extensional system and dynamic analysis of rock fabric in Yunmengshan area, Beijing[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 21 (4): 337 ~ 344(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 北京市地质矿产局. 1991. 北京市区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 597.
- 陈 印, 朱 光, 姜大志, 等. 2013. 四合堂剪切带活动时代及其对燕山运动 B 幕时间的限定[J]. *地质学报*, 87(3): 295 ~ 310.
- 陈 印, 朱 光, 姜大志, 等. 2014. 云蒙山变质核杂岩的变形规律与发育机制[J]. *科学通报*, 59(16): 1 525 ~ 1 541.
- 董树文, 张岳桥, 龙长兴, 等. 2007. 中国侏罗纪构造变革与燕山运动新诠释[J]. *地质学报*, 81(11): 1 449 ~ 1 461.
- 姬广义, 汪 洋, 孙永华. 2004. 北京云蒙山岩浆杂岩体的岩石学和构造变性特征[J]. *北京地质*, 16(3): 1 ~ 11.
- 嵇少丞, 王 茜, 许志琴. 2008. 华北克拉通破坏与岩石圈减薄[J]. *地质学报*, 82(2): 174 ~ 193.
- 刘 翠, 邓晋福, 苏尚国, 等. 2004. 北京云蒙山片麻状花岗岩锆石 SHRIMP 定年及其地质意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 3(2): 141 ~ 146.
- 邱检生, 胡 建, 王孝磊, 等. 2005. 广东河源白岗岩体: 一个高分异的 I 型花岗岩[J]. *地质学报*, 79(4): 503 ~ 514.
- 孙会一, 石玉若, 赵希涛, 等. 2016. 北京密云早白垩世花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *地球科学与环境学报*, 38(1): 43 ~ 54.
- 吴福元, 刘晓驰, 纪伟强, 等. 2017. 高分异花岗岩的识别与研究 [J]. *中国科学*, 47(7): 745 ~ 765.
- 吴福元, 徐义刚, 高 山, 等. 2008. 华北岩石圈减薄与克拉通破坏研究的主要学术争论[J]. *岩石学报*, 24(6): 1 145 ~ 1 174.
- 吴福元, 徐义刚, 朱日祥, 等. 2014. 克拉通岩石圈减薄与破坏[J]. *中国科学:地球科学*, 44(11): 2 358 ~ 2 372.
- 许继峰, 王人镜, 杨淑荣. 1994. 北京云蒙山花岗岩基的岩石变形及其成因[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 19(6): 806 ~ 814.
- 徐义刚. 2004. 华北岩石圈减薄的时空不均一特征[J]. *高校地质学报*, 10(3): 324 ~ 331.
- 翟明国. 2010. 华北克拉通的形成演化与成矿作用[J]. *矿床地质*, 29(1): 24 ~ 36.
- 翟明国, 孟庆任, 刘建明, 等. 2004. 华北东部中生代构造体制转折峰期的主要地质效应和形成动力学探讨[J]. *地学前缘*, 22(1): 33 ~ 36.
- 赵美涛, 汪 洋. 2014. 北京石城闪长岩和云蒙山花岗岩岩石地球化学特征及成因[J]. *矿物岩石*, 34(3): 60 ~ 69.
- 赵美涛, 汪 洋. 2015. 北京长园带状岩体的岩石地球化学特征及成因探讨[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 34(4): 820 ~ 829.
- 张 旗, 王 焰, 熊小林, 等. 2008. 埃达克岩和花岗岩: 挑战与机遇[M]. 北京: 中国大地出版社, 1 ~ 344.
- 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 [J]. *地学前缘*, 13(2): 50 ~ 64.
- 朱大岗, 崔盛芹, 吴珍汉, 等. 2000. 北京云蒙山地区挤压-伸展体系构造特征及其岩石组构的动力学分析[J]. *地球学报*, 21(4): 337 ~ 344.