

江西金滩岩体花岗岩的侵位深度

——来自白云母矿物化学成分的约束

陶继华^{1,2,3}, 杨跃贵¹, 张吉源¹, 石争¹, 许德如^{1,2}

(1. 东华理工大学 地球科学学院, 江西 南昌 330013; 2. 东华理工大学 核资源与环境国家重点实验室, 江西 南昌 330013; 3. 东华理工大学 江西省大气污染成因与控制重点实验室, 江西 南昌 330013)

摘要: 白云母是过铝质花岗岩中常见的矿物, 可以用来作为限制岩体侵位深度的压力计矿物。文章利用电子探针, 对金滩二云母花岗岩中的白云母进行了化学成分分析, 通过白云母结晶压力计算获得金滩岩体的侵位压力为 $4.9 \times 10^8 \sim 6.1 \times 10^8$ Pa, 平均 5.4×10^8 Pa, 对应的侵位深度为 16~20 km, 平均 18 km。综合前人研究成果认为, 华南印支期花岗岩侵位深度普遍为 17~19 km, 且华南印支期造山加厚的地壳厚度很可能 ≥ 50 km, 而在燕山期经历了强烈的风化剥蚀去顶作用。这一认识为揭示华南地区相对缺乏印支期火山岩提供了一种新的解释。

关键词: 华南; 花岗岩; 金滩岩体; 白云母; 侵位深度

中图分类号: P588.12⁺; P578.959

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2024)04-0847-09

The emplaced depth of the granite from Jintan pluton: Constraints from mineral chemistry of muscovite

TAO Ji-hua^{1,2,3}, YANG Yue-gui¹, ZHANG Ji-yuan¹, SHI Zheng¹ and XU De-ru^{1,2}

(1. School of Earth Science, East China University of Technology, Nanchang 330013, China; 2. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, China; 3. Jiangxi Province Key Laboratory of the Causes and Control of Atmospheric Pollution, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: Muscovite is a common mineral in peraluminous granites, it could be a mineral barometer to constrain the emplacement depth of peraluminous granites. Chemical compositions of muscovite from the Jintan two-mica granite are determined using electron microprobe. According to the calculation for the crystallization pressure of the muscovite, the pressure of emplacement of the Jintan pluton is $4.9 \times 10^8 \sim 6.1 \times 10^8$ Pa with average 5.4×10^8 Pa, corresponding to 16~20 km with average 18 km in depth. Combining with previous studies, we suggest that the emplace depth is 17~19 km, and we can presume that crustal thickness of South China in the Indosinian period was likely ≥ 50 km, but it may be denudated because of extensive weathering in the Yanshanian period, which can be a new explanation for the lacking Indosinian volcanic rocks in South China.

Key words: South China; granite; Jintan pluton; muscovite; emplace depth

Fund support: National Natural Science Foundation of China (41963002, 42063001); The Open Foundation of Jiangxi Province Key Laboratory of the Causes and Control of Atmospheric Pollution, East China University of Technology (AE2104)

收稿日期: 2023-06-16; 接受日期: 2024-02-05; 编辑: 曲丽莉

基金项目: 国家自然科学基金(41963002, 42063001); 江西省大气污染成因与控制重点实验室开放基金(AE2104)

作者简介: 陶继华(1985-), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩石地球化学、岩浆岩与成矿作用研究工作, E-mail: taojihua123@163.com。

网络首发时间: 2024-02-22; 网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1966.P.20240222.1128.002.html>

花岗岩是地球大陆地壳的重要组成部分,它们呈岩基、岩株、岩脉等不同产状以不同深度侵位于地壳中(吴福元等, 2007, 2017; Yang, 2017)。花岗岩的侵位深度(或结晶压力)不仅与金属成矿作用存在密切联系,比如斑岩型铜(金)矿床常常与浅部侵位岩体相关(Chiaradia *et al.*, 2012; Richards *et al.*, 2012; Yang, 2017),矽卡岩型铜(金)矿床和侵入型金矿床则多与深部侵位岩体有关(Burt, 1998; Meinert, 1998; Lang and Baker, 2001; Yang *et al.*, 2008; Yang, 2017),花岗岩侵位深度还能对岩石成因研究、了解地壳抬升剥蚀和造山带构造演化提供关键的约束(Anderson, 1996; Anderson *et al.*, 2008; 陶继华等, 2013; Yang, 2017; Yang *et al.*, 2022)。华南印支期造山作用形成了广泛呈面状分布于华南陆内地区的花岗岩,且大多数花岗岩具有过铝质特征($A/CNK > 1$)(孙涛等, 2002, 2003; 孙涛, 2006; Zhou *et al.*, 2006; Wang *et al.*, 2007; 柏道远等, 2007a, 2007b; 郭春丽等, 2011; Gao *et al.*, 2017; Tao *et al.*, 2018)。传统观点认为,华南中生代大面积花岗岩的出露表明华南早中生代以来已有 5~10 km 的上地壳被剥露去顶(王岳军等, 2002),但却没有明确的岩体侵位深度/压力的研究证据来支持该观点。近年来,笔者注意到,尽管华南印支期过铝质花岗岩普遍缺乏计算压力的矿物角闪石,但比较常见含过铝质矿物白云母(陶继华等, 2013)。前人研究发现,原生白云母对花岗岩的侵位压力具有很好的指示作用(Huang and Wyllie, 1973; Borodina and Fershtater, 1988; 孙涛等, 2002), Velde(1965, 1967)根据白云母中 Si 原子的含量与形成压力呈正相关关系,提出了多硅白云母压力计。因此,本文尝试选择原生白云母来估算研究区花岗岩的侵位压力(Anderson and Rowley, 1981; Anderson, 1996; 陶继华等, 2013)。

江西金滩岩体出露于赣中地区,为华南陆内地区典型的印支期花岗岩体,岩体主体为黑云母花岗岩,局部出露了呈岩株状产出的含白云母花岗岩,前人研究表明所有岩石均具过铝质特征(罗志高等, 2010; 赵葵东等, 2013; Tao *et al.*, 2018; 陶继华等, 2020)。为确定金滩花岗岩体的侵位深度,本文以金滩岩体中含白云母的二云母花岗岩为研究对象,开展了详细的岩相学和白云母矿物化学特征研究,计算了白云母的形成压力,进而讨论了金滩岩体的侵位深度,并结合前人研究资料,探讨了华南中生代构造演化背景。

1 岩体概况

金滩岩体地处江西省中部地区,构造位置上处于武功山构造带东南部,北东向赣江断裂带西北侧(图 1a、1b)。岩体出露面积 164 km²(江西省地矿局, 1984),主要侵入震旦-寒武纪地层中,空间上呈北西向椭圆形展布(图 1c)。区内断裂构造主要呈北东向、近东西向和北西走向分布(图 1c)。岩体主体为黑云母花岗岩,二云母花岗岩呈岩株状出露于岩体北西部和南西部,含石榴子石的二云母花岗岩则主要出露于岩体的东部(图 1c),不同类型岩石之间的接触关系不清楚(赵葵东等, 2013; Tao *et al.*, 2018; 陶继华等, 2020)。显微镜下观察发现,黑云母花岗岩呈块状构造,似斑状结构,其中斑晶主要由钾长石和少量斜长石组成,主要造岩矿物为钾长石(30%~35%)、斜长石(25%~30%)、石英(30%~35%)和黑云母(8%~10%),副矿物主要有锆石、磷灰石、独居石、磁铁矿和钛铁矿等;二云母花岗岩呈块状构造,以中粒等粒结构为主,少量呈似斑状结构,斑晶主要为钾长石,主要造岩矿物由钾长石(30%~35%)、斜长石(20%~25%)、石英(35%~40%)、黑云母(3%~5%)和白云母(1%~2%)构成,副矿物主要有磷灰石、独居石和锆石等(Tao *et al.*, 2018; 陶继华等, 2020)。

2 样品及分析方法

本次研究的白云母选自金滩二云母花岗岩中的代表性新鲜样品。显微镜下观察发现,白云母矿物颗粒粗大,端面清晰,呈半自形-自形(图 2a);部分白云母与黑云母呈交代反应关系,端面不清晰(图 2b),所有白云母矿物颗粒均未见环带状结构。另外还可见少量由钾长石和/或斜长石交代蚀变形成的细小绢云母颗粒,这类白云母不属于本文研究对象。

将挑选的所有岩石样品磨制成探针片,经显微镜下详细观察后,挑选出代表性的样品,随机对白云母颗粒的干净平整表面进行电子探针化学成分分析。样品测试在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室完成,仪器为 JEOL JXA8100 型电子探针仪,加速电压 15 kV,探针电流 20 nA,计数时间为 20 s,束斑直径 1 μm;校正方法为 ZAF 修正法;采用美国 SPI 公司的硅酸盐矿物及氧

化物标样,主要为含钛角闪石(Ti)、磷灰石(Ca, F)、斜长石(Na, Al)、钾长石(K)、方钠石(Si, Cl)、磁铁矿(Fe)、蔷薇辉石(Mn)、镁铝榴石(Mg)、氧化铬

(Cr)。绝大部分元素在电子探针分析时的检测限为 $100 \times 10^{-6} \sim 300 \times 10^{-6}$,部分元素检测限优于 100×10^{-6} (李洁等, 2013; 陶继华等, 2015, 2020)。

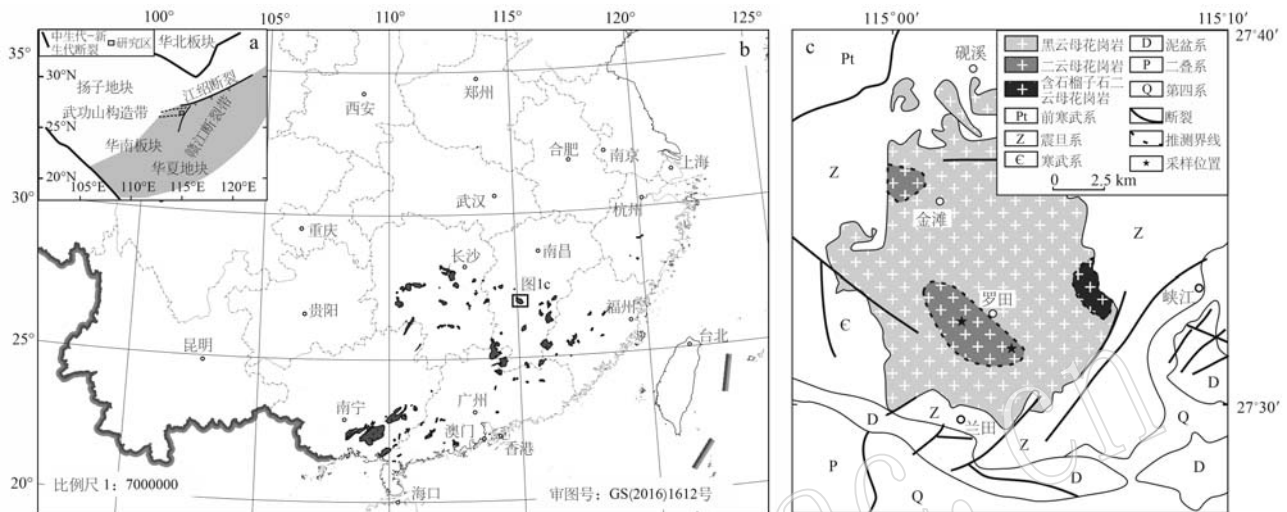


图1 华南板块构造地质简图(a, 据 Li *et al.*, 2010 修改)、中国东南部印支期花岗岩分布图(b, 据陶继华等, 2015 修改)和金滩岩体地质简图(c, 据 Tao *et al.*, 2018 修改)

Fig. 1 Sketch tectonic map of the South China Plate (a, modified after Li *et al.*, 2010), the map showing distribution of the Indosinian granites in southeastern China (b, modified after Tao Jihua *et al.*, 2015) and the simplified geological map of Jintan pluton (c, modified after Tao *et al.*, 2018)

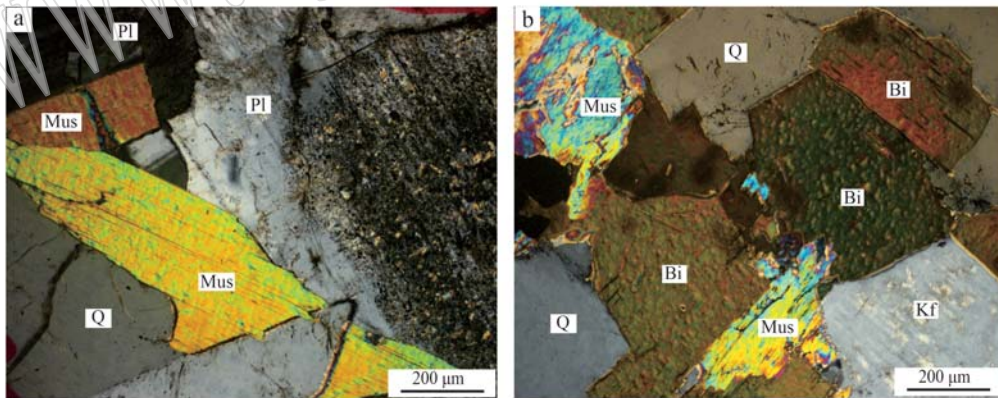


图2 金滩岩体二云母花岗岩显微镜下照片

Fig. 2 The microscopic images of two-mica granite from the Jintan pluton

Bi—黑云母; Mus—白云母; Kf—钾长石; Pl—斜长石; Q—石英

Bi—biotite; Mus—muscovite; Kf—K-feldspar; Pl—plagioclase; Q—quartz

3 分析结果

所有样品的白云母电子探针分析结果见表1,并以22个氧原子为基础计算了白云母晶体化学式中相关元素的原子数。结果显示,金滩二云母花岗岩

中白云母 SiO_2 含量为 45.27%~47.43%, TiO_2 含量为 0.46%~0.87%, Al_2O_3 含量为 32.20%~34.71%, FeO^{T} 含量为 3.23%~4.20%, MgO 含量为 0.84%~1.47%, Na_2O 含量为 0.38%~0.74%, K_2O 含量为 9.94%~10.75%。根据表1中的数据计算出金滩二云母花岗岩中白云母的平均晶体化学式为

表 1 金滩岩体二云母花岗岩中白云母的化学组成
Table 1 Chemical compositions of muscovites from the two-mica granite in Jintan pluton

$w_B/\%$

点号	MS-1	MS-2	MS-3	MS-4	MS-5	MS-6	MS-7	MS-8	MS-9	MS-10	MS-11	MS-12	MS-13	MS-14	MS-15	MS-16	MS-17	MS-18	MS-19
SiO ₂	45.27	46.27	46.23	45.61	46.44	46.33	46.23	46.24	46.39	46.56	46.31	47.43	46.44	46.62	46.39	46.3	47.19	46.9	46.78
TiO ₂	0.83	0.48	0.80	0.79	0.71	0.57	0.59	0.49	0.65	0.61	0.64	0.50	0.59	0.57	0.46	0.76	0.67	0.87	0.66
Al ₂ O ₃	32.57	32.27	33.01	32.88	32.41	33.09	32.64	32.82	33.13	33.68	34.06	33.30	32.94	32.20	34.09	34.32	32.46	34.71	33.91
Cr ₂ O ₃	—	0.32	0.05	0.03	0.03	0.06	—	0.06	0.00	—	0.03	0.09	—	0.01	0.02	0.04	0.03	0.07	0.11
FeO ^T	3.75	3.50	3.87	3.51	4.03	3.48	3.90	3.88	3.87	3.38	3.39	3.70	4.01	4.10	3.23	3.44	4.30	3.46	3.84
MnO	0.05	0.05	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.06	0.01	0.04	0.02	0.01	0.04	0.02	0.03	0.02	0.01	0.06	0.03
MgO	1.16	1.15	1.07	0.96	1.26	1.07	1.11	1.06	1.05	0.92	0.94	1.21	1.22	1.27	0.93	0.84	1.47	0.92	1.05
CaO	—	0.00	—	0.02	0.01	0.01	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.06
Na ₂ O	0.52	0.50	0.47	0.61	0.57	0.58	0.53	0.56	0.47	0.54	0.71	0.43	0.55	0.38	0.73	0.65	0.49	0.74	0.60
K ₂ O	10.32	10.19	10.47	10.11	10.23	10.18	10.23	10.46	10.75	10.45	9.97	10.23	10.02	10.08	9.94	10.14	10.52	10.29	10.03
F	0.39	0.32	0.23	0.2	0.26	0.21	0.21	0.25	0.15	0.1	0.2	0.26	0.23	0.18	0.14	0.21	0.24	0.23	0.17
Cl	0	—	0	0.01	0.01	0.02	0	0.01	—	—	0.01	—	0.01	0.01	—	0.01	0	0	0.01
Total	94.47	94.73	95.99	94.55	95.72	95.38	95.24	95.63	96.32	96.18	96.07	96.88	95.82	95.26	95.82	96.5	97.13	98.01	97.07
F=O=Cl	0.16	0.13	0.1	0.09	0.11	0.09	0.09	0.1	0.06	0.04	0.09	0.11	0.1	0.08	0.06	0.09	0.1	0.1	0.07
以 22 个 O 为基础的阳离子数																			
Si	6.17	6.27	6.2	6.19	6.24	6.23	6.24	6.23	6.21	6.21	6.17	6.27	6.22	6.29	6.19	6.15	6.26	6.14	6.18
Al ^{IV}	1.83	1.73	1.8	1.81	1.76	1.77	1.76	1.78	1.8	1.79	1.83	1.73	1.78	1.72	1.81	1.85	1.74	1.86	1.82
Al ^{VI}	3.40	3.42	3.41	3.45	3.37	3.47	3.43	3.43	3.42	3.5	3.51	3.45	3.42	3.4	3.54	3.51	3.33	3.48	3.46
Ti	0.09	0.05	0.08	0.08	0.07	0.06	0.06	0.05	0.07	0.06	0.06	0.05	0.06	0.06	0.05	0.08	0.07	0.09	0.07
Fe	0.43	0.40	0.43	0.40	0.45	0.39	0.44	0.44	0.43	0.38	0.38	0.41	0.45	0.46	0.36	0.38	0.48	0.38	0.42
Cr	0.00	0.04	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01
Mn	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
Mg	0.24	0.23	0.21	0.20	0.25	0.21	0.22	0.21	0.21	0.18	0.19	0.24	0.24	0.26	0.18	0.17	0.29	0.18	0.21
Ca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Na	0.14	0.13	0.12	0.16	0.15	0.15	0.14	0.15	0.12	0.14	0.18	0.11	0.14	0.1	0.19	0.17	0.13	0.19	0.15
K	1.80	1.76	1.79	1.75	1.75	1.75	1.76	1.80	1.84	1.78	1.69	1.73	1.71	1.73	1.69	1.72	1.78	1.72	1.69
CF	0.33	0.27	0.20	0.17	0.22	0.18	0.18	0.21	0.13	0.09	0.17	0.21	0.19	0.15	0.12	0.18	0.20	0.19	0.15
CCl	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
P/10 ⁸ Pa	4.6	5.9	5.0	4.9	5.6	5.3	5.5	5.3	5.0	5.1	4.6	4.5	5.9	5.3	6.1	4.8	4.2	5.8	4.1

—表示低于检测限。

$K_{1.75}Na_{0.14}Fe_{0.42}Mg_{0.22}Al_{3.44}[Al_{1.79}Si_{6.21}]O_{20}(OH)_4$, 表明其不是理想的纯白云母 $KAl_2[AlSi_3O_{10}](OH)_2$ 成分, 而是由一系列钠云母分子 $NaAl_2[AlSi_3O_{10}](OH)_2$ 和绿磷石分子 $KAl(Fe, Mg)(Si_4O_{10})(OH)_2$ 构成的类质同象系列的中间产物, 并具有与南岭东段印支期二云母花岗岩中白云母相似的成分特征 (Clark, 1981) (图 3)。

4 讨论

4.1 白云母成因类型判别

显微镜下观察, 金滩二云母花岗岩中白云母矿物颗粒粗大, 端面清晰, 呈半自形-自形 (图 2a), 显示原生成因白云母特征, 因此属于原生白云母 (Miller *et al.*, 1981; Speer, 1984; Roycroft, 1991; 孙涛等, 2002); 另外, 还有部分与黑云母共生的交代型

白云母, 其端面不清晰 (图 2b)。根据前人研究, 过铝质花岗岩中与黑云母共生并显示交代作用的白云母是在岩浆作用条件下形成的, 也属于原生岩浆成因白云母, 其矿物化学成分与半自形-自形的大颗粒原生白云母矿物化学成分亦无明显差别 (章邦桐等, 2010; 陶继华等, 2013)。因此, 根据岩相学特征判别, 本次研究的金滩二云母花岗岩中白云母应该均属于原生白云母。

矿物化学成分特征上, 原生白云母一般具有较高的 Ti 含量 (TiO_2 含量 $> 0.4\%$, Miller *et al.*, 1981; Anderson, 1996), 从表 1 中可以看出, 金滩二云母花岗岩中白云母的 TiO_2 含量变化于 $0.46\% \sim 0.87\%$ 之间, 显示原生成因白云母特征。此外, 在所有的化学成分判别图解上 (图 4), 金滩二云母花岗岩中白云母均落入原生白云母区域及其附近, 同样也指示其为原生白云母。

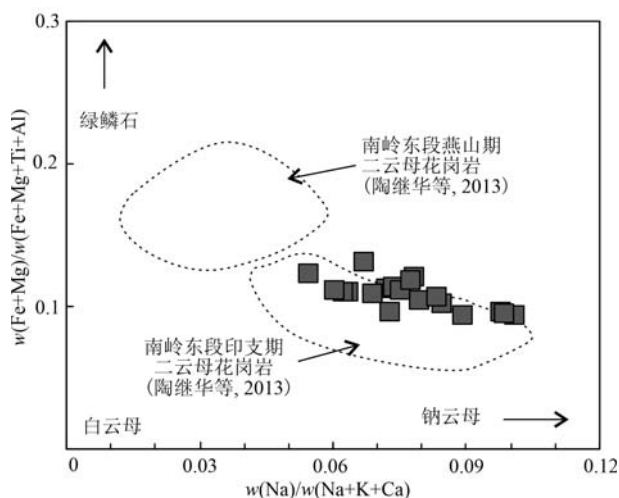


图3 金滩二云母花岗岩中白云母化学成分图解
(据 Clark, 1981 修改)

Fig. 3 Chemical composition diagram of the muscovites from the Jintan two-mica granites (after Clark, 1981)

综上所述,我们认为研究的金滩二云母花岗岩中白云母都属于原生岩浆成因白云母,因而其化学成分可用于探讨寄主花岗岩形成的物理化学条件 (Miller *et al.*, 1981; 孙涛等, 2002; 陶继华等, 2013; Huang *et al.*, 2015; Tao *et al.*, 2018)。

4.2 岩体侵位深度及其地质意义

华南中生代岩浆岩的一个明显特征是印支期缺乏同期火山岩,而燕山期普遍有大量火山岩分布,分布面积达到 90 790 km² (Zhou *et al.*, 2006); 另一显著特点是大多数花岗岩为过铝质花岗岩 ($A/CNK > 1$),尤其是华南印支期花岗岩过铝质花岗岩达到 91% (Zhou *et al.*, 2006),但缺乏常用的角闪石等压力计矿物 (Wang *et al.*, 2007; 陶继华等, 2013),而常见过铝质矿物白云母。因此,在合适的条件下这些白云母可作为限制岩体侵位深度的压力计矿物 (陶继华等, 2013)。前人研究已表明白云母具有压力的指示意义 (Velde 1965, 1967; Huang and Wylle, 1973; Borodina and Fershtater, 1988)。Velde (1965, 1967) 最早提出利用白云母来估算压力, Massonne and Schreyer (1987) 通过新的实验数据对白云母压力计重新进行了标定,在此基础上, Anderson (1996) 给出了白云母基于 Si 含量 (以 11 个氧原子计算) 的压力计算公式:

$$p = -2.6786 \text{ Si}^2 + 43.975 \text{ Si} + 0.01253 t - 113.9995$$

式中, p 为压力 (10^8 Pa), t 为温度 ($^{\circ}\text{C}$)。

根据上述讨论,金滩二云母花岗岩中白云母为原生成因白云母,与黑云母、钾长石和石英共生,因

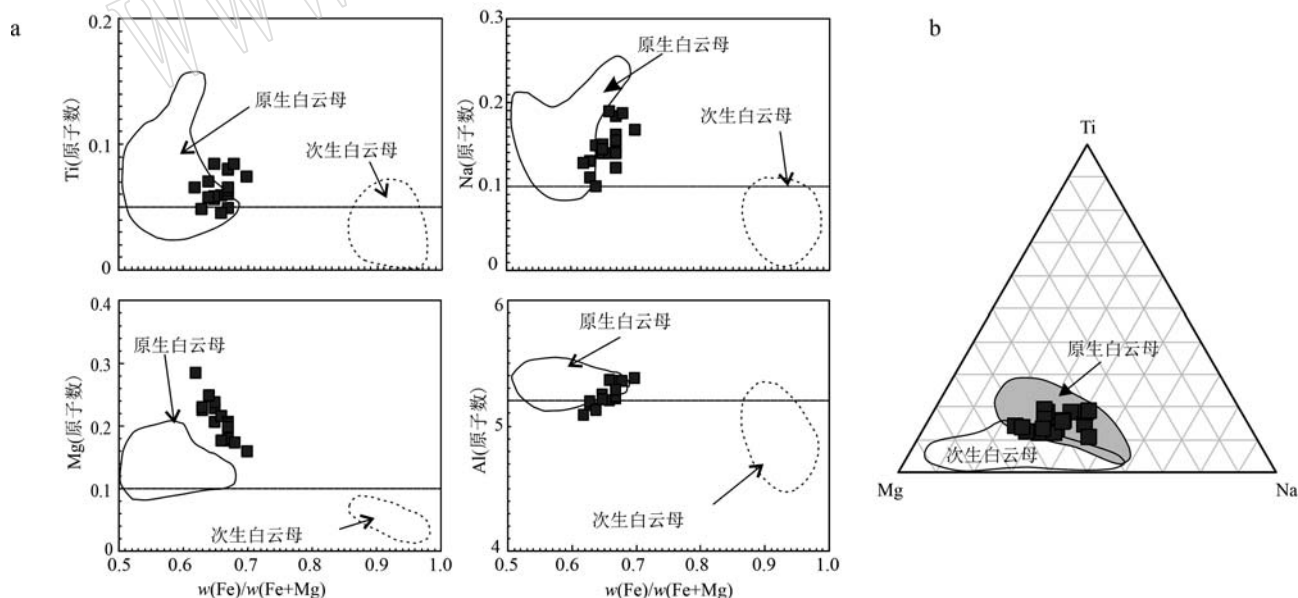


图4 金滩二云母花岗岩中原生白云母和次生白云母化学成分判别图解(a, 据孙涛等, 2002 修改; b, 据 Miller *et al.*, 1981 和 Huang *et al.*, 2015 修改)

Fig. 4 Geochemical discrimination diagrams of primary and secondary muscovites from the Jintan two-mica granites (a, modified after Sun Tao *et al.*, 2002; b, modified after Miller *et al.*, 1981 and Huang *et al.*, 2015)

此适用于该压力计 (Anderson, 1996)。本文选择黑云母估算的岩浆结晶温度 669°C (陶继华等, 2020) 作为计算温度, 利用上述公式计算了金滩二云母花岗岩的侵位压力, 其中 MS-1、MS-11、MS-15、MS-16、MS-18、MS-19 分析点 Si 原子数小于 3.1 (以 11 个 O 原子为基准计算), 低于实验标定白云母压力计所使用的白云母 ($\text{Si} \geq 3.1$), 因此, 这些点的压力值不参与压力平均值估算。剩余分析点所计算压力为 $4.9 \times 10^8 \sim 6.1 \times 10^8 \text{ Pa}$, 平均 $5.4 \times 10^8 \text{ Pa}$, 对应的形成深度为 $16 \sim 20 \text{ km}$, 平均 18 km , 与南岭东段印支期二云母花岗岩计算的岩体侵位深度 19 km (陶继华等, 2013) 基本一致。Wang 等 (2007) 在没有找到合适的矿物压力计的情况下, 通过 CIPW 标准化的 Qz-Ab-Or 体系估算湘中地区印支期花岗岩侵位压力大约为 $5 \times 10^8 \text{ Pa}$, 相当于侵位深度 17 km 。同样地, 如果从 CIPW 标准矿物组成情况来看, 金滩岩体花岗岩也落在湘中地区印支期花岗岩的区域 (图 5), 指示二者可能具有相似的侵位压力, 接近 $5 \times 10^8 \text{ Pa}$, 与本次研究的白云母估算侵位压力结果 ($5.4 \times 10^8 \text{ Pa}$) 基本一致。因此, 综合上述可以推断, 华南印支期花岗岩侵位深度大约在 $17 \sim 19 \text{ km}$ 。

然而, 现在华南地壳厚度 $30 \sim 40 \text{ km}$ (Zhang *et al.*, 2021), 华南印支期造山加厚地壳厚度很可能

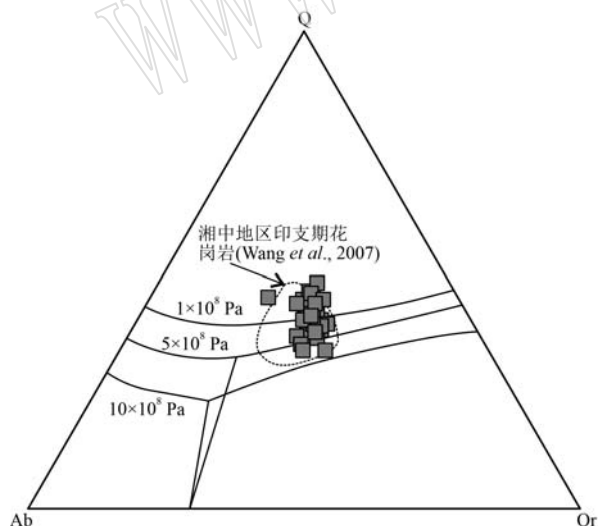


图 5 金滩岩体花岗岩 CIPW 标准矿物组成 (据 Johannes and Holtz, 1996; CIPW 计算的地球化学数据引自 Tao *et al.*, 2018)

Fig. 5 CIPW-normative minerals of the granite of Jintan pluton (after Johannes and Holtz, 1996; the data for CIPW calculation come from Tao *et al.*, 2018)

$\geq 50 \text{ km}$, 反映华南印支期花岗岩可能是在地壳挤压加厚构造背景下深部熔融作用形成。华南印支期造山作用的一个显著特点是形成了宽达 1300 km 的陆内褶皱造山带和岩浆岩带, 其特征与北美拉拉米造山带 (Laramide Orogeny) (Li and Li, 2007) 类似。研究表明, 北美拉拉米陆内造山带 (褶皱推覆带后部) 形成 $55 \sim 65 \text{ km}$ 厚的加厚地壳, 并伴生同时期的二云母花岗岩带 (Coney and Harms, 1984; Liu *et al.*, 2010; 陶继华等, 2013; Chapman *et al.*, 2015)。本次研究进一步支持华南印支期存在类似于北美拉拉米造山带的陆内造山带, 并且很可能是加厚地壳构造背景下的深部熔融作用导致了区内二云母花岗岩的形成 (Coney and Harms, 1984; Collins *et al.*, 2016)。

由于本次研究的样品和上述前人研究的样品 (Wang *et al.*, 2007; 陶继华等, 2013) 没有钻孔取样, 均为地表环境的露头采样, 因此, 我们推测华南早中生代以来可能有 $17 \sim 19 \text{ km}$ 的地壳物质被剥蚀, 而不是传统观点认为的 $5 \sim 10 \text{ km}$ 地壳物质被剥蚀 (王岳军等, 2002)。葛小月等 (2002) 根据燕山期中酸性高 Sr/Y 火成岩的熔融残留相矿物组合特征, 推测中国东部燕山期地壳厚度大约 $30 \sim 45 \text{ km}$, 这一地壳厚度与目前湘赣桂地壳厚度约 $35 \sim 42 \text{ km}$ (王岳军等, 2002) 和现今南岭地壳厚度约 $33 \sim 40 \text{ km}$ (孙涛等, 2003) 基本相当。也就是说, 华南地壳厚度随时间演化从印支期到燕山期减少了约 $5 \sim 15 \text{ km}$ 以上。而从燕山期到现今, 华南地壳的厚度没有明显变化, 表明华南印支期地壳主要处于造山挤压加厚构造环境, 燕山期地壳主要处于伸展拉张和造山带垮塌的构造背景 (柏道远等, 2007a; Bonnetti *et al.*, 2023), 但燕山期之后没有明显的地壳挤压加厚过程。同时, 另一方面, 似乎也暗示华南印支期受挤压加厚的地壳物质可能主要在燕山早期经历了强烈的风化剥蚀作用, 巨厚的 ($5 \sim 15 \text{ km}$) 风化剥蚀去顶作用导致大量处于上地壳的印支期火山岩可能在燕山早期已被风化剥蚀而没有得到保存。此外, 华南早侏罗世沉积岩碎屑锆石中存在大量印支期岩浆岩锆石 (李武显等, 2013), 也支持这一观点。相比之下, 从燕山期到现今, 华南并没有经历明显的地壳挤压加厚和巨厚的风化剥蚀, 因此大量的燕山期火山岩得以保存至今 (Zhou *et al.*, 2006)。

5 结论

(1) 金滩二云母花岗岩中白云母并不是理想的纯白云母成分,而是由一系列钠云母分子 $\text{NaAl}_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_2$ 和绿磷石分子 $\text{KAl}(\text{Fe}, \text{Mg})(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ 构成的类质同象系列的中间产物,计算的平均晶体化学式为 $\text{K}_{1.75}\text{Na}_{0.14}\text{Fe}_{0.42}\text{Mg}_{0.22}\text{Al}_{3.44}[\text{Al}_{1.79}\text{Si}_{6.21}]\text{O}_{20}(\text{OH})_4$;

(2) 岩相学和矿物化学成分判别金滩二云母花岗岩中的白云母属于原生白云母;

(3) 通过白云母矿物化学成分压力计算结果显示,金滩岩体侵位压力为 $4.9 \times 10^8 \sim 6.1 \times 10^8 \text{ Pa}$, 平均 $5.4 \times 10^8 \text{ Pa}$, 对应形成深度为 $16 \sim 20 \text{ km}$, 平均 18 km , 反映金滩二云母花岗岩是在地壳加厚构造背景下深部熔融和侵位结晶形成的;

(4) 华南印支期造山加厚的地壳厚度很可能 $\geq 50 \text{ km}$, 但在燕山早期经历了 $5 \sim 15 \text{ km}$ 的风化剥蚀去顶作用,这可能为理解华南地区相对缺乏印支期火山岩提供了一种新的认识。

致谢 电子探针分析过程中得到了中国科学院广州地球化学研究所陈林丽工程师的帮助;论文写作过程中得到了中国科学院广州地球化学研究所李武显研究员的指导和帮助;中国科学院地球化学研究所江小燕副研究员和另一名匿名审稿专家在论文评审过程中给出了诸多宝贵的意见,使文章在内容和理论上都得到了升华;编辑部对本文的完善提供了建设性的意见和帮助,在此一并表示衷心的感谢。

References

- Anderson J L. 1996. Status of thermobarometry in granitic batholiths [J]. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh-Earth Sciences*, 87: 125~138.
- Anderson J L, Barth A P, Wooden J L, *et al.* 2008. Thermometers and Thermobarometers in Granitic Systems[J]. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 69: 121~142.
- Anderson J L and Rowley M C. 1981. Synkinematic intrusion of peraluminous and associated metaluminous granitic magmas, Whipple Mountains, California[J]. *Canadian Mineralogist*, 19(1): 83~101.
- Bai Daoyuan, Jia Baohua, Ma Tieqiu, *et al.* 2007a. Relationship of petro-geochemical characteristics to metallogenic capacity differences between Indosinian and Early Yanshanian granites in southeastern Hunan[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(5): 387~398 (in Chinese with English abstract).
- Bai Daoyuan, Zhou Liang, Ma Tieqiu, *et al.* 2007b. Genesis and tectonic setting of Indosinian granites in southeast Hunan[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(3): 197~212 (in Chinese with English abstract).
- Bonnetti C, Riegler T, Liu X D, *et al.* 2023. Granite-related high-temperature hydrothermal uranium mineralisation: Evidence from the alteration fingerprint associated with an early Yanshanian magmatic event in the Nanling belt, SE China[J]. *Mineralium Deposita*, 58(3): 427~460.
- Borodina N S and Fershtater G B. 1988. Composition and nature of muscovite in granites[J]. *International Geology Review*, 30(4): 375~381.
- Burt D M, 1998. Vector treatment of the composition of some skarn minerals[C]//Lentz D R. *Mineralized Intrusion-Related Skarn Systems*. Mineralogical Association of Canada, Short Course, 26: 51~70.
- Chapman J B, Ducea M N, DeCelles P G, *et al.* 2015. Tracking changes in crustal thickness during orogenic evolution with Sr/Y: An example from the North American Cordillera[J]. *Geology*, 43(10): 919~922.
- Chiaradia M, Ulianov A, Kouzmanov K, *et al.* 2012. Why large porphyry Cu deposits like high Sr/Y magmas? [J]. *Scientific Reports*, 2(1): 685.
- Clarke D B. 1981. The mineralogy of peraluminous granites: A review [J]. *Canadian Mineralogist*, 19(1): 3~17.
- Collins W J, Huang H. Q and Jiang X Y. 2016. Water-fluxed crustal melting produces Cordilleran batholiths[J]. *Geology*, 44(2): 143~146.
- Coney P J and Harms T A. 1984. Cordilleran metamorphic core complexes: Cenozoic extensional relics of Mesozoic compression[J]. *Geology*, 12(9): 550~554.
- Gao P, Zheng Y F and Zhao Z F. 2017. Triassic granites in South China: A geochemical perspective on their characteristics, petrogenesis, and tectonic significance[J]. *Earth-Science Reviews*, 173 (Supplement C): 266~294.
- Ge X Y, Li X H, Chen Z G, *et al.* 2002. Geochemistry and petrogenesis of Jurassic high Sr/low Y granitoids in eastern China: Constrains on crustal thickness[J]. *Chinese Science Bulletin*, 47(11): 962~968.
- Guo Chunli, Chen Yuchuan, Lin Zhiyong, *et al.* 2011. SHRIMP zircon U-Pb dating, geochemistry and zircon Hf isotopic characteristics of granitoids in Keshuling granites, Jiangxi Province and their genetic analysis[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30(4): 567~580 (in Chinese with English abstract).

- Huang H Q, Li X H, Li Z X, *et al.* 2015. Formation of the Jurassic South China Large Granitic Province: Insights from the genesis of the Jiufeng pluton[J]. *Chemical Geology*, 401: 43~58.
- Huang W L and Wyllie P J. 1973. Melting relations of muscovite-granite to 35 Kbar as a model for fusion of metamorphosed subducted oceanic sediments[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 42(1): 1~14.
- Jiangxi Geological Survey. 1984. Regional Geology of Jiangxi Province Geological Memoirs [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~811 (in Chinese with English abstract).
- Johannes W and Holtz F. 1996. Petrogenesis and Experimental Petrology of Granitic Rocks [M]. Berlin: Springer, 1~335.
- Lang J R and Baker T. 2001. Intrusion-related gold systems: The present level of understanding[J]. *Mineralium Deposita*, 36(6): 477~489.
- Li Jie, Zhong Junwei, Yu Yang, *et al.* 2013. Insights on magmatism and mineralization from micas in the Xihuashan granite, Jiangxi Province, South China[J]. *Geochimica*, 42(5): 393~404 (in Chinese with English abstract).
- Li Wuxian, Zhao Xilin, Xing Guangfu, *et al.* 2013. Geochronology of the detrital zircons from early Jurassic sedimentary rocks from the Dongkeng basin and its geological implications[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 37(1): 78~86 (in Chinese with English abstract).
- Li Z X and Li X H. 2007. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model[J]. *Geology*, 35(2): 179~182.
- Li Z X, Li X H, Wartho J A, *et al.* 2010. Magmatic and metamorphic events during the early Paleozoic Wuyi-Yunkai orogeny, southeastern South China: New age constraints and pressure-temperature conditions[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 122(5-6): 772~793.
- Liu L J, Gurnis M, Seton M, *et al.* 2010. The role of oceanic plateau subduction in the Laramide orogeny[J]. *Nature Geoscience*, 3(5): 353~357.
- Luo Zhigao, Wang Yuejun, Zhang Feifei, *et al.* 2010. LA-ICPMS zircon U-Pb dating for Baimashan and Jintan Indosinian granitic plutons and its petrogenetic implications[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 34(2): 282~290 (in Chinese with English abstract).
- Massonne H J and Schreyer W. 1987. Phengite Geobarometry Based on the Limiting Assemblage with K-Feldspar, Phlogopite, and Quartz [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 96(2): 212~224.
- Meinert L D. 1998. A review of skarns that contain gold[C]// Lentz D R. Mineralized Intrusion-related Skarn Systems. Mineralogical Association of Canada, Short Course 26: 359~414.
- Miller C F, Stoddard E F, Bradfish L J, *et al.* 1981. Composition of plutonic muscovite; genetic implications[J]. *Canadian Mineralogist*, 19: 25~34.
- Richards J P, Spell T, Rameh E, *et al.* 2012. High Sr/Y magmas reflect arc maturity, high magmatic water content, and porphyry Cu±Mo±Au potential: Examples from the Tethyan arcs of Central and Eastern Iran[J]. *Economic Geology*, 107(2): 295~332.
- Roycroft P. 1991. Magmatically Zoned Muscovite from the Peraluminous two-Mica Granites of the Leinster Batholith, Southeast Ireland[J]. *Geology*, 19(5): 437~440.
- Speer J A. 1984. Micas in igneous rocks[J]. *Reviews in Mineralogy*, 13: 299~356.
- Sun Tao, Chen Peirong, Zhou Xinmin, *et al.* 2002. Strongly peraluminous granites in eastern Nanling mountains, China: Study on muscovites[J]. *Geological Review*, 48(5): 518~525 (in Chinese with English abstract).
- Sun T, Zhou X M, Chen P R, *et al.* 2005. Strongly peraluminous granites of mesozoic in Eastern Nanling Range, Southern China: Petrogenesis and implications for tectonics[J]. *Science in China Series D—Earth Sciences*, 48(2): 165~174.
- Sun Tao. 2006. A new map showing the distribution of granites in South China and its explanatory notes [J]. *Geological Bulletin of China*, 25(3): 332~335 (in Chinese with English abstract).
- Tao Jihua, Cen Tao, Long Wenguo, *et al.* 2015. Mineral chemistry of biotites from the Indosinian weakly peraluminous and strongly peraluminous granites in South China and their constraints on petrogenesis[J]. *Earth Science Frontiers*, 22(2): 64~78 (in Chinese with English abstract).
- Tao J H, Li W X, Cai Y F, *et al.* 2014. Mineralogical feature and geological significance of muscovites from the Longyuanba Indosinian and Yanshannian two-mica granites in the eastern Nanling Range[J]. *Science China: Earth Sciences*, 57(6): 1150~1157.
- Tao J H, Li W X, Wyman D A, *et al.* 2018. Petrogenesis of Triassic granite from the Jintan pluton in Central Jiangxi Province, South China: Implication for uranium enrichment[J]. *Lithos*, 320~321: 62~74.
- Tao Jihua, Lin Qiulin, Li Xinhao, *et al.* 2020. Mineral chemical characteristics of biotites from the Jintan granites in Jiangxi province and the implication for uranium enrichment [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 39(2): 267~282 (in Chinese with English abstract).
- Velde B. 1965. Phengite micas; synthesis, stability, and natural occurrence[J]. *American Journal of Science*, 263(10): 886~913.
- Velde B. 1967. Si+4 Content of natural phengites[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 14(3): 250~258.
- Wang Y J, Fan W M, Sun M, *et al.* 2007. Geochronological, geochemical and geothermal constraints on petrogenesis of the Indosinian peraluminous granites in the South China Block: A case study in the Hu-

- nan Province[J]. *Lithos*, 96(3~4): 475~502.
- Wang Y J, Zhang Y H, Fan W M. *et al.* 2002. Numerical modeling of the formation of Indo-Sinian peraluminous granitoids in Hunan Province: Basaltic underplating versus tectonic thickening[J]. *Science in China Series D-Earth Sciences*, 45(11): 1 042~1 056.
- Wu F Y, Liu X C, Ji W Q, *et al.* 2017. Highly fractionated granites: Recognition and research [J]. *Science China Earth Sciences*, 60(7): 1 201~1 219.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Yang Jinhui, *et al.* 2007. Discussions on the petrogenesis of granites[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1 217~1 238 (in Chinese with English abstract).
- Yang L, Miller C F and Wu F Y. 2022. Estimating crystallization pressure of peraluminous melts: An experimentally based empirical approach[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 177(8): 78.
- Yang X M. 2017. Estimation of crystallization pressure of granite intrusions[J]. *Lithos*, 286~287: 324~329.
- Yang X M, Lentz D R, Chi G, *et al.* 2008. Geochemical characteristics of gold-related granitoids in southwestern New Brunswick, Canada [J]. *Lithos*, 104(1): 355~377.
- Zhang Bangtong, Wu Junqi, Ling Hongfei, *et al.* 2010. Petrological discrimination between primary and secondary muscovites and its geological implications: A case study of Fucheng peraluminous granite pluton in southern Jiangxi [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(3): 225~234 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Y, Shi D, Lü Q, *et al.* 2021. The crustal thickness and composition in the eastern South China Block constrained by receiver functions: Implications for the geological setting and metallogenesis[J]. *Ore Geology Reviews*, 130: 103988.
- Zhao Kuidong, Li Jiren, Ling Hongfei, *et al.* 2013. Geochronology, geochemistry and petrogenesis of two-stage Indosinian granites from the Xiajiang uranium ore deposit, Jiangxi Province: Implication for Indosinian tectonics and genesis of uranium-bearing granites in South China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(12): 4 349~4 361 (in Chinese with English abstract).
- 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.
- 葛小月, 李献华, 陈志刚, 等. 2002. 中国东部燕山期高Sr低Y型中酸性火成岩的地球化学特征及成因: 对中国东部地壳厚度的制约[J]. *科学通报*, 47(6): 474~480.
- 郭春丽, 陈毓川, 蔺志永, 等. 2011. 赣南印支期柯树岭花岗岩体SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄、地球化学、锆石 Hf 同位素特征及成因探讨[J]. *岩石矿物学杂志*, 30(4): 567~580.
- 江西省地矿局. 1984. 江西省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1~811.
- 李 洁, 钟军伟, 于 洋, 等. 2013. 赣南西华山花岗岩的云母成分特征及其对岩浆演化与成矿过程的指示[J]. *地球化学*, 42(5): 393~404.
- 李武显, 赵希林, 邢光福, 等. 2013. 南岭东段早侏罗世沉积岩碎屑锆石 U-Pb 定年及其地质意义——以东坑盆地为例[J]. *大地构造与成矿学*, 37(1): 78~86.
- 罗志高, 王岳军, 张菲菲, 等. 2010. 金滩和白马山印支期花岗岩体LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年及其成岩启示[J]. *大地构造与成矿学*, 34(2): 282~290.
- 孙 涛. 2006. 新编华南花岗岩分布图及其说明[J]. *地质通报*, 25(3): 332~335.
- 孙 涛, 陈培荣, 周新民, 等. 2002. 南岭东段强过铝质花岗岩中白云母研究[J]. *地质论评*, 48(5): 518~525.
- 孙 涛, 周新民, 陈培荣, 等. 2003. 南岭东段中生代强过铝花岗岩成因及其大地构造意义[J]. *中国科学(D 辑)*, 33(12): 1 209~1 218.
- 陶继华, 岑 涛, 龙文国, 等. 2015. 华南印支期弱过铝质和强过铝质花岗岩中黑云母的矿物化学及其岩石成因制约[J]. *地学前缘*, 22(2): 64~78.
- 陶继华, 李武显, 蔡元峰. 等. 2013. 南岭东段龙源坝印支和燕山期二云母花岗岩中白云母矿物化学特征及地质意义[J]. *中国科学: 地球科学*, 43(10): 1 659~1 666.
- 陶继华, 林秋伶, 李鑫浩, 等. 2020. 江西金滩花岗岩中黑云母矿物化学特征及其对 U 富集的启示[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 39(2): 267~282.
- 王岳军, Zhang Y H, 范蔚茗, 等. 2002. 湖南印支期过铝质花岗岩的形成: 岩浆底侵与地壳加厚热效应的数值模拟[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 32(6): 491~499.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. *岩石学报*, 23(6): 1 217~1 238.
- 吴福元, 刘小驰, 纪伟强, 等. 2017. 高分异花岗岩的识别与研究[J]. *中国科学: 地球科学*, 47(7): 745~765.
- 章邦桐, 吴俊奇, 凌洪飞, 等. 2010. 花岗岩中原生与次生白云母的鉴别特征及其地质意义——以赣南富城强过铝质花岗岩体为例[J]. *岩石矿物学杂志*, 29(3): 225~234.
- 赵葵东, 李吉人, 凌洪飞, 等. 2013. 江西省峡江钨矿床两期印支期花岗岩的年代学、岩石地球化学和岩石成因——对华南印支期构造背景和产钨花岗岩成因的指示[J]. *岩石学报*, 29(12): 4 349~4 361.

附中文参考文献

- 柏道远, 贾宝华, 马铁球, 等. 2007a. 湘东南印支期与燕山早期花岗岩成矿能力差异与岩石地球化学特征关系探讨[J]. *岩石矿物学杂志*, 26(5): 387~398.
- 柏道远, 周 亮, 马铁球, 等. 2007b. 湘东南印支期花岗岩成因及构造背景[J]. *岩石矿物学杂志*, 26(3): 197~212.