

地温计在桂东南韧性剪切带花岗质糜棱岩中的适用性

杜沁岳

桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

收稿日期: 2025年2月24日; 录用日期: 2025年4月2日; 发布日期: 2025年4月14日

摘 要

研究区位于云开地体西北侧, 经历了板块俯冲 - 碰撞和陆内造山过程, 构造变形复杂, 多种韧性剪切带十分发育。文章对桂东南韧性剪切带区域前人已采集的花岗质糜棱岩样品数据进行讨论, 利用白云母钛温度计和黑云母钛温度计获得的温度值分别为 $478^{\circ}\text{C}\sim 615^{\circ}\text{C}$ 和 $539^{\circ}\text{C}\sim 678^{\circ}\text{C}$, 得出桂东南韧性剪切带的平均变形温度在 557°C 左右。结合运动学和 $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ 年代学分析, 认为桂东南韧性剪切带是印支期印支地块与华南板块汇聚碰撞作用的产物, 是古特提斯洋构造演化的一部分。

关键词

韧性剪切带, 糜棱岩, 地温温度计, 桂东南

Applicability of Geometers in Granitic Mylonite of the Southeast Guangxi Resilient Shear Zone

Qinyue Du

Academy of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

Received: Feb. 24th, 2025; accepted: Apr. 2nd, 2025; published: Apr. 14th, 2025

Abstract

The study area is located on the northwest side of the Yunkai terrane. It has experienced a long and complex plate subduction-collision and later intracontinental orogenic processes. The tectonic deformation is extremely complex, and various types of ductile shear zones are well developed. This

article discusses the data from granite mylonite samples collected by previous researchers in the southeastern Guangxi ductile shear zone. The temperature values obtained using muscovite Ti thermometer and biotite Ti thermometer are 478°C~615°C and 539°C~678°C, respectively. The average deformation temperature of the southeastern Guangxi ductile shear zone is around 557°C. Combined with the analysis of kinematics and $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ chronology, it is believed that the Rong County shear zone is the product of the convergence and collision of the Indosinian block and the South China plate during the Indosinian period, and is a part of the tectonic evolution of the Paleo-Tethys Ocean.

Keywords

Ductile Shear Zone, Mylonite, Geothermometer, Southeastern Guangxi

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

岩石在定向压力影响下, 经历剧烈的剪切带变形而形成了高级应变带, 成为造山运动研究中一个重要焦点。糜棱岩, 作为韧性剪切带中的独特特征性岩石, 其在剪切带的固态塑性流变和剪切变形过程中, 为地质学家提供了丰富的数据。这种现象使得糜棱岩在当前的研究中成为其最适宜的目标。同步地, 由于一系列难以解决的构造问题, 如矿物的变形机制、岩石的构造演化以及同位素定年结果解释, 越来越多的地质学家对估算糜棱岩的形成温度产生了兴趣[1]-[4]。近年来, 部分研究人员已经探讨了多种地质温度计的应用, 以估计糜棱岩的变质变形温度[5]-[8]。

2. 区域地质特征

2.1. 地质背景

在华南钦-杭成矿带的西南部, 桂东南地区位于大地构造位置上, 处于扬子与华夏地块的融合地带。燕山晚期构造岩浆活动显著, 东北向的区域大断裂对区内白垩纪沉积盆地和岩浆岩的分布具有重要影响。自显生宙以来, 华南大陆经历了多期次的构造-热事件, 其中中生代阶段最为显著。在这期间, 出现广大的构造变形, 这与断裂活动密不可分。这些沉积盆地, 大规模岩浆岩形成了众多独特的地质构造。在我国研究区内, 广泛分布着新元古代到中生代的花岗岩, 其中出露面积达到了研究区总面积的 70%以上(见图 1) [9]。

2.2. 区域构造

研究区位于华夏古陆与钦-杭结合带的交汇地带, 它位于西南边缘, 地质构造变化多端。区内韧性剪切带和褶皱、断裂现象较为显著。容县位于一系列大型断裂带中, 其中一部分为成群中小型断层。这些断裂与成群的中小型断层通过不同方式相互结合, 导致断裂带逐渐向西延伸, 呈现出蜿蜒曲折的形态。此外, 还有配套或迭加的北西向断裂, 以及派生的旋扭断裂等。早加里东运动之前区内多为多期次板块俯冲形成的碰撞连接, 从而确定了主体是古岛弧和混杂带的构造特征; 到了印支运动, 以隆坳分异为主体, 形成隆起带和坳陷带相伴的构造格局。根据报告《广西玉林市地质调查报告(2004)》的 1:25 万玉林市区域调区地质调查分析, 该区域至少经历了五次中深层的脆性、韧性构造变形, 以及一期多次脆性变

形。在后期构造活动中，往往是在前期活动的基础上发展，同时也会对前期活动进行叠加和改善。因此，总体构造形态表现得更为复杂和多样。

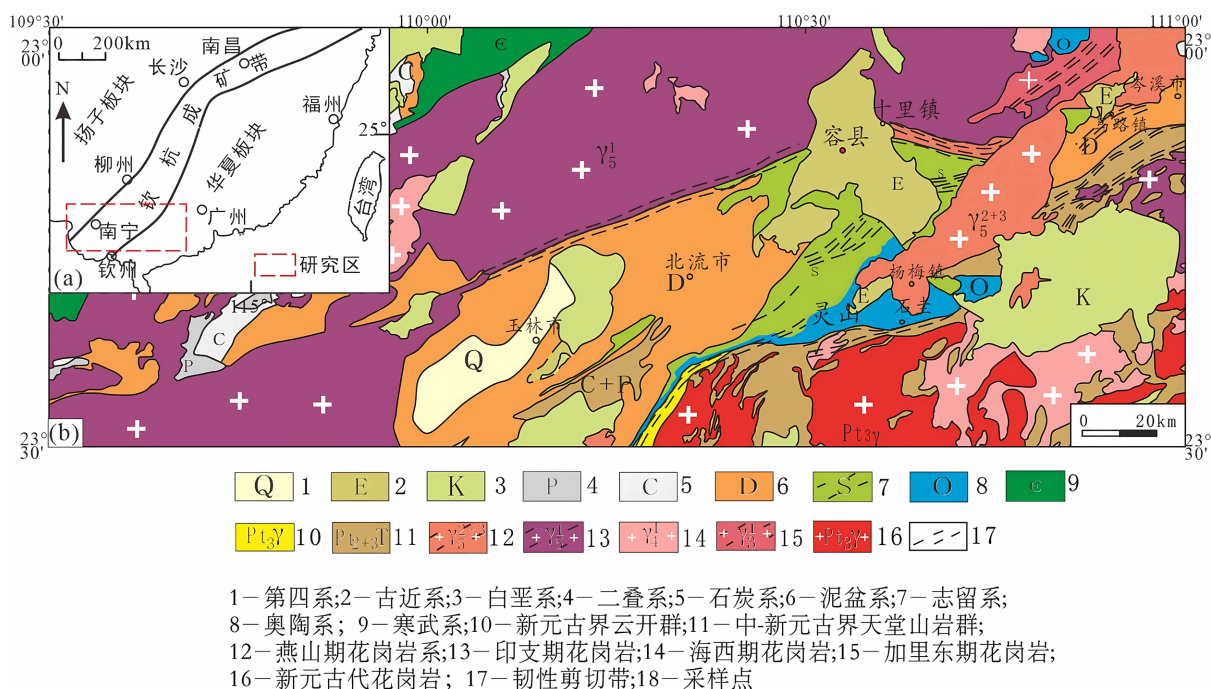


Figure 1. Distribution map of rock strata and geological structures in southeast Guangxi

图 1. 广西东南地区岩层分布简图和地质构造分布图

3. 矿物化学成分特征

在实施电子探针测试之前，首先需要在显微镜下详细观察并标记基质中细颗粒之间紧密接触的共生矿物，如白云母与黑云母。这些信息将为后续电子探针成分分析提供依据。在黑云母和白云母的阳离子数中，以 11 为起始值，作为黑云母图解数据系数的铁离子值，是根据中国古代文献中提出的待定阳离子数法计算得到的值[10]。

3.1. 白云母化学成分

白云母化学成分变化主要是通过类质同象替代来实现[11]，其种类变化依次为白云母 - 钠云母 - 绿磷石。根据前人的研究数据[12]，随着硅含量的持续增加，白云母将由普通白云母向多硅白云母和绿磷石的转化的趋势(见图 2)。

在桂东南韧性剪切带花岗质糜棱岩中，白云母以两种不同形式存在：黑云母共生的白云母以及残斑白云母[13]。我们选择的基质多为普通白云母。在图 3 中，基质中的细粒白云母全部聚集在了次生白云母的范围。

依据白云母的生成机制，可以将变质岩中与花岗岩相关的白云母划分为两类：原始白云母和次生白云母。

3.2. 黑云母化学成分

在中酸性花岗岩中，黑云母的分布极为普遍，是主要的造岩矿物。尤其是新生黑云母的形成，表明其变质变形程度至少达到了中绿片岩相。同时，重结晶黑云母的形成对变形环境要求也相对较高。桂东

南韧性剪切带中花岗质糜棱岩中的新生或重结晶黑云母主要以与细粒白云母共生的状态存在，说明了黑云母在构造-热液事件中经过了重结晶过程，而且也由于糜棱岩中流体的主要沿糜棱面理运动。因此，沿糜棱面理定向分布的基质黑云母可能是自流体中结晶产生的，也可能是原有的岩浆成因黑云母在糜棱岩化过程中受到后期的热构造作用而形成的重结晶产物[5] [14]-[15]。

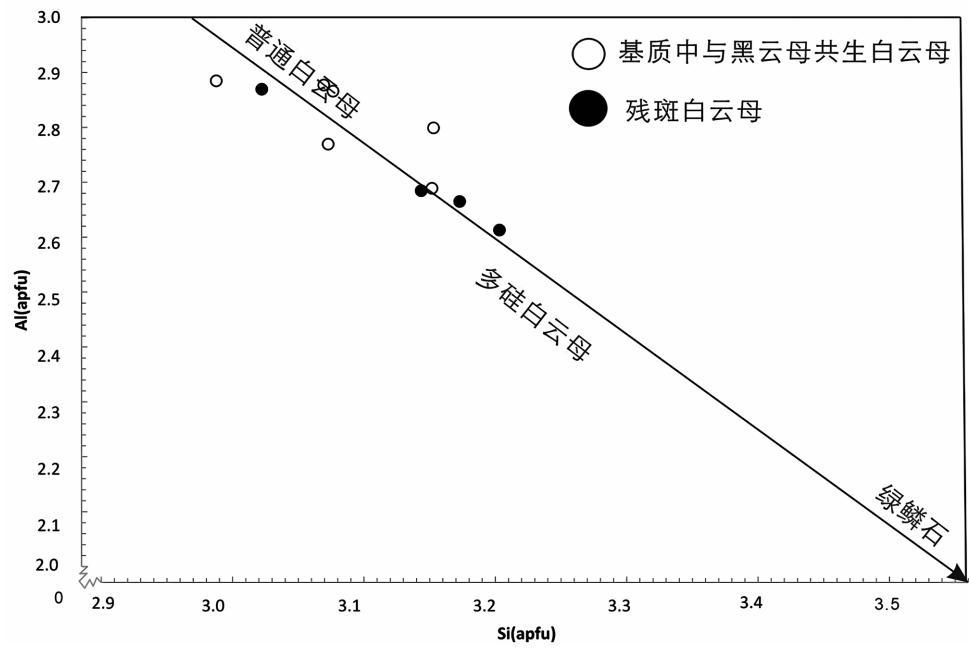


Figure 2. Composition diagram of muscovite in granitic mylonite of the ductile shear zone
图 2. 韧性剪切带花岗质糜棱岩白云母成分图

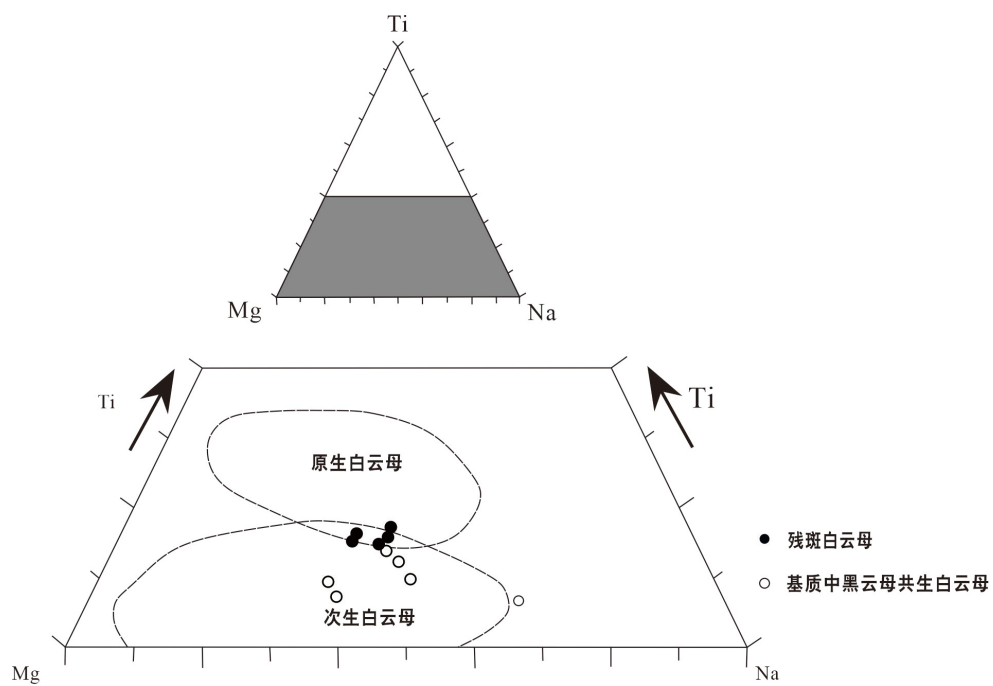


Figure 3. Identification diagram of primary and secondary muscovite
图 3. 原生白云母和次生白云母的鉴别图

4. 地质温度计的应用

4.1. 白云母钛温度计

近年来,一些以微量元素命名的单矿物地温计,经过校准后用于各种变质温度条件下进行计算。历史学家们指出,在白云母中,钛原子具有一定程度的记录变质温度条件的作用。所以,根据变泥质岩中白云母的 Ti 百分比,前人提出了一种变质温压的计算公式:

$$\ln[T(^{\circ}\text{C})] = 7.258 + 0.289(\text{Ti}) + 0.158[\text{Mg}/(\text{Fe} + \text{Mg})] + 0.031\ln[P/10(\text{GPa})]$$

该公式的应用条件为: Ti = 0.01~0.07 (根据 11 个 O 原子的计算结果,下同), Fe = 0.03~0.16, Mg = 0.01~0.32, [Mg/(Fe + Mg)] = 0.05~0.73, 温度在 450~850 摄氏度。在压力为 0.10 至 1.40 GPa 的条件下,误差温度范围为 $\pm 65^{\circ}\text{C}$ 。本文探讨其在适用性方面的应用,在数学中引入了压力这一变量,所以,在这里我们用以硅含量为依据的多硅白云母压力计算公式:

$$P(\text{GPa}) = [-2.6786\text{Si}^2 + 43.975\text{Si} + 0.01253T(^{\circ}\text{C}) - 113.9995]/10$$

由于压力计中还添加了一个温度参数,因此我们将它和白云母钛压力计共同应用,在 Excel 中输入好公式后通过迭代法将公式适用范围内的一个热值代入硅压力计的公式,再将计算出来的数值代入硅压力计的数值中,同时重复上述过程直到两个温度值一致,这样可以准确得到两个温度值一致的结果,然后进行比较。一般 3 次左右即可。

4.2. 黑云母 Ti 温度计

研究者主张,对变质岩的温度和压力条件具有显著敏感性的矿物组合,能够精确地记录变质体的结构变化过程,并提供真实的信息。前人利用变泥质岩中黑云母的 Ti 含量并采用对变泥质岩中钛的地温计进行修正,提出了一个变质温压的表达式:

$$\ln[T(^{\circ}\text{C})] = 6.313 + 0.224\ln(X_{\text{Ti}}) - 0.288\ln(X_{\text{Fe}}) - 0.449\ln(X_{\text{Mg}}) + 0.015[P/10(\text{GPa})]$$

该方法的适用条件为: Ti = 0.02~0.14 (以 11 个 O 原子的计算结果,下同), X_{Ti} = 0.02~0.14, X_{Fe} = 0.19~0.55, X_{Mg} = 0.23~0.67, 温度在 450~840 摄氏度,压力在 1 GPa 以内的实验中得到的条件。考虑到白云母与黑云母间的共生关系,该公式中的压力值采用共生白云母的压力值来替代[11]。

4.3. 云母钛温度计的适用性

通过分析糜棱岩中矿物的重结晶过程和石英 c 轴组构特性,可以推算出桂东南韧性剪切带的变质变形温度区间在 450℃~650℃,而利用白云母钛温度计与黑云母钛温度计所得到的结果为 478℃~615℃和 439℃~678℃,大部分地点都位于估算出来的温度范围内,进而可以看出它们之间存在着良好的相互关联性。

云母钛温度计与另一种常用的石榴石-黑云母温度计的温度结果相比具有较高的拟合性,在基岩多为变泥质岩的地区更为精确。同时云母温度计具备广泛的应用条件,前人的研究揭示,大容山岩体属于早古生代物质重熔作用为主而形成的花岗岩侵入体。这类花岗岩属于过铝 S 型花岗岩的代表,云母钛温度计则是针对变泥质岩提出的,计算结果较为可靠。

在研究区附近,花岗岩体和剪切带的年代学研究整理出一个年龄汇总表(表 1)。通过对表 1 的数据分析,可以发现研究区的构造变形事件主要发生在 202 至 237 Ma 这段时间。这一时刻显示,桂东南韧性剪切带可能在印支期形成,并与印支运动存在关联。

在晚二叠世至早三叠世这个时间段,印支地块与华南地块在这一时期分别形成了各自的构造形态。地层经历了褶皱现象,桂西海槽被关闭,从而形成了印支褶皱带。自此,海相沉积物开始取代陆相沉积物成为主导阶段。与此同时,古特提斯洋发生了闭合现象。早中生代印支造山运动在地质时期形成了特

提斯洋，这一运动引起了华南板块南北边缘的俯冲和碰撞。在晚二叠世至中三叠世的时期，华南地块南侧边缘，古特提斯洋开始闭合。这一时期，华南地块与印支地块产生了碰撞现象。这种俯冲 - 碰撞的历史在空间和时间上与华南地块的早期印支期挤压相结合。

Table 1. Summary table of age of granite belt and resilient shear zone in southeastern Guangxi [9] [16] [17]
表 1. 桂东南花岗岩带与韧性剪切带年龄汇总表[9] [16] [17]

剪切带	分析方法	年龄(Ma)	引用文献
罗定 - 广宁剪切带	$^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$	$208.9 \pm 1.4 \text{ Ma}$	Wang <i>et al.</i> , 2007
吴川 - 四会剪切带	$^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$	$229.9 \pm 0.5 \text{ Ma}$	Wang <i>et al.</i> , 2007
凤山 - 岑溪剪切带	$^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$	$227.9 \pm 0.3 \text{ Ma}$	Wang <i>et al.</i> , 2007
灵山 - 黄凌韧性剪切带	$^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$	$222.45 \pm 1.27 \text{ Ma}$	赵国英, 2017
西村 - 那卜韧性剪切带	$^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$	$232.38 \pm 1.70 \text{ Ma}$	赵国英, 2017
三堡韧性剪切带	$^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$	$231.9 \pm 2.2 \text{ Ma}$	郭尚宇等, 2020

根据历史研究，华南地区的前三叠世岩浆活动频繁，其中加里东期和印支期形成了广泛的岩浆活动 [18]。因此，我们推断，古特提斯洋的封闭以及印支期与华南地块的碰撞是促使三叠纪华南陆内造山作用的关键因素，同时这一作用还导致了包含研究区剪切带在内的广泛发育。

5. 结论

- (1) 云母铀温度计的测量结果反映了桂东南韧性剪切带花岗质糜棱岩的变质变形温度，进而推测该剪切带的形成温度在 557℃ 左右。
- (2) 在桂东南地区，剪切带具有强烈的韧性剪切作用，它是左行平移性质的剪切带，同时具有逆冲剪切性质的特征。
- (3) 通过对前人关于华南云开大山构造带的印支期高应变变形运动学研究和 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学分析，我们推断桂东南韧性剪切带是印支作用在华南板块形成的产物，也是古特提斯洋构造演化的一部分。

参考文献

[1] Stipp, M., Stünitz, H., Heilbronner, R. and Schmid, S.M. (2002) The Eastern Tonale Fault Zone: A ‘Natural Laboratory’ for Crystal Plastic Deformation of Quartz over a Temperature Range from 250 to 700°C. *Journal of Structural Geology*, **24**, 1861-1884. [https://doi.org/10.1016/s0191-8141\(02\)00035-4](https://doi.org/10.1016/s0191-8141(02)00035-4)

[2] 向必伟, 朱光, 王勇生, 谢成龙, 胡召齐. 糜棱岩化过程中矿物变形温度计[J]. 地球科学进展, 2007, 22(2): 126-135.

[3] 王勇生, 杨秉飞, 王海峰, 余顶杰. 石英 c 轴组构影响因素探讨: 以郯庐断裂带糜棱岩为例[J]. 岩石学报, 2016, 32(4): 965-975.

[4] 许志琴, 王勤, 梁风华, 陈方远, 许翠萍. 电子背散射衍射(EBSD)技术在大陆动力学研究中的应用[J]. 岩报, 2009, 25(7): 1721-1736.

[5] 王勇生, 朱光, 王道轩, 宋传中, 刘国生. 地质温度计在郯庐断裂带南段低温糜棱岩中的尝试[J]. 中国地质, 2005, 32(4): 625-633.

[6] Lanari, P., Wagner, T. and Vidal, O. (2014) Erratum to: A Thermodynamic Model for Di-Trioctahedral Chlorite from Experimental and Natural Data in the System $\text{MgO-FeO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$: Applications to *P-T* Sections and Geothermometry. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **168**, Article No. 1039. <https://doi.org/10.1007/s00410-014-1039-x>

[7] Liu, J., Chen, Y., Li, Z.M.G., Zhang, Q.W.L., Lan, T., Zhang, Q., *et al.* (2021) Temperature and Timing of Ductile Deformation of the Longquanguan Shear Zone, Trans-North China Orogen. *Precambrian Research*, **359**, Article 106217.

- <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2021.106217>
- [8] 胡荣国, 冯佐海, 吴杰, 等. 桂北元宝山韧性剪切带糜棱岩矿物化学特征及变质条件[J]. 地球化学, 2022, 51(2): 176-193.
- [9] 赵国英. 云开地块北缘韧性剪切带的变形特征及 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学研究[D]: [硕士学位论文]. 桂林: 桂林理工大学, 2017.
- [10] 林文蔚, 彭丽君. 由电子探针分析数据估算角闪石、黑云母中的 $\text{Fe}^{(3+)}$ 、 $\text{Fe}^{(2+)}$ [J]. 长春地质学院学报, 1994, 24(2): 155-162.
- [11] 辛良伟, 李赛赛, 冯佐海, 等. 地质温度计在桂东南那卜韧性剪切带花岗质糜棱岩中的适用性[J]. 地球科学, 2024, 49(6): 1946-1965.
- [12] Massonne, H. and Schreyer, W. (1987) Phengite Geobarometry Based on the Limiting Assemblage with K-Feldspar, Phlogopite, and Quartz. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **96**, 212-224. <https://doi.org/10.1007/bf00375235>
- [13] Miller, C.F., Stoddard, E.F., Bradfish, L.J., et al. (1981) Composition of Plutonic Muscovite: Genetic Implications. *Canadian Mineral*, **19**, 25-34.
- [14] Nachit, H., Ibhi, A., Abia, E.H. and Ben Ohoud, M. (2005) Discrimination between Primary Magmatic Biotites, Reequilibrated Biotites and Neoformed Biotites. *Comptes Rendus. Géoscience*, **337**, 1415-1420. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2005.09.002>
- [15] Holdaway, M.J. (2000) Application of New Experimental and Garnet Margules Data to the Garnet-Biotite Geothermometer. *American Mineralogist*, **85**, 881-892. <https://doi.org/10.2138/am-2000-0701>
- [16] Wang, Y., Fan, W., Cawood, P.A., Ji, S., Peng, T. and Chen, X. (2007) Indosinian High-Strain Deformation for the Yunkaidashan Tectonic Belt, South China: Kinematics and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Geochronological Constraints. *Tectonics*, **26**, TC6008. <https://doi.org/10.1029/2007tc002099>
- [17] 郭尚宇, 黄锡强, 农军年, 等. 云开地块西北缘三堡韧性剪切带变形特征及 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年代学研究[J]. 大地构造与成矿学, 2020, 44(3): 357-366.
- [18] 吴春明, 陈泓旭. 钛饱和变质泥质岩中黑云母 Ti 温度计的修正(英文) [J]. 科学通报: 英文版, 2015(1): 6.