

贾小辉, 王晓地, 杨文强. 广西大瑶山地区大进早古生代高分异 A 型花岗岩的厘定及成因[J]. 地球科学与环境学报, 2022, 44(2): 171-190.

JIA Xiao-hui, WANG Xiao-di, YANG Wen-qiang. Identification and Petrogenesis of Dajin Highly Fractionated A-type Granites Formed at Early Paleozoic in Dayaoshan Area of Guangxi, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2022, 44(2): 171-190.

DOI: 10.19814/j.jese.2021.09048

· 庆祝西安地质调查中心组建六十周年专辑 ·

# 广西大瑶山地区大进早古生代高分异 A 型花岗岩的厘定及成因

贾小辉<sup>1,2</sup>, 王晓地<sup>1,2</sup>, 杨文强<sup>1</sup>

(1. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 湖北 武汉 430223;

2. 中国地质调查局花岗岩成岩成矿地质研究中心, 湖北 武汉 430223)

**摘要:** 未分异 A 型花岗岩的判别指标、岩石成因及其构造意义已经取得了较大共识, 而高分异 A 型花岗岩的判别指标仍未有统一的认识。广西大瑶山地区大进花岗岩形成于早古生代(约 440 Ma), 具有高 Rb 含量( $>400 \times 10^{-6}$ )、Rb/Sr、Rb/Ba 值及相对低的 Zr/Hf 值等特征; 依据岩石具有高的初始锆石饱和温度(819 °C ~ 863 °C), 高 Ga/Al 值、Zr + Nb + Ce + Y 含量及特定地球化学指标的演化趋势等相关证据, 综合判定其为高分异 A 型花岗岩。元素地球化学及 Nd-Hf 同位素组成表明, 大进花岗岩可能源自镁铁质下地壳物质的部分熔融, 经历了分异结晶和少量地壳物质混染(AFC)过程。大进高分异 A 型花岗岩可能是后造山岩石圈拆沉的岩石学响应, 其年龄代表了桂东北地区广西运动由造山挤压向后造山伸展的构造转换时间。

**关键词:** A 型花岗岩; 岩石成因; 地球化学; 早古生代; 构造转换; 广西运动; 华南

**中图分类号:** P581; P597      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-6561(2022)02-0171-20

## Identification and Petrogenesis of Dajin Highly Fractionated A-type Granites Formed at Early Paleozoic in Dayaoshan Area of Guangxi, China

JIA Xiao-hui<sup>1,2</sup>, WANG Xiao-di<sup>1,2</sup>, YANG Wen-qiang<sup>1</sup>

(1. Wuhan Center of Geological Survey, China Geological Survey, Wuhan 430223, Hubei, China;

2. Research Center for Petrogenesis and Mineralization of Granitoid Rocks, China Geological Survey, Wuhan 430223, Hubei, China)

**Abstract:** The discriminant indexes, petrogenesis and tectonic significance of unfractionated A-type granites have been widely recognized, while there has not been a universal consensus on the discriminant criterion of highly fractionated A-type granites. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating shows that Dajin granites form at Early Paleozoic (~440 Ma), and have high Rb contents ( $>400 \times 10^{-6}$ ), Rb/Sr and Rb/Ba values, and relatively low Zr/Hf values, illustrating that they are highly fractionated. According to the high zircon saturation temperature (819 °C – 863 °C), and high Ga/Al (2.6 – 3.1), Zr + Nb + Ce + Y contents and the evolution trend of specific geochemical indexes, Dajin granites are comprehensively determined as highly fractionated A-type

granites. Combining with geochemical and Nd-Hf isotopic compositions, it is suggested that Dajin granites are mostly likely generated by partial melting of the mafic lower crustal rocks, and experienced high degree fractional crystallization and contamination of a small amount of the wall rock materials. As consequence to post-orogenic lithospheric delamination, the forming time of Dajin A-type granites represent the timing of geodynamic transition of Kwangsian orogeny from orogenic compression to post-orogenic extension in the northeastern Guangxi.

**Key words:** A-type granite; petrogenesis; geochemistry; Early Paleozoic; tectonic transition; Kwangsian orogeny; South China

## 0 引言

花岗质岩浆分异结晶机制和高分异花岗岩成因备受学者关注<sup>[1-15]</sup>。花岗质岩浆被认为可以经由重力沉降、热对流和岩浆流动等机制实现分异结晶<sup>[16]</sup>,有的学者则依据花岗质岩浆的高黏度特征对分异结晶机制提出质疑<sup>[17-19]</sup>。是否存在高分异花岗岩、如何判别高分异花岗岩、高分异花岗岩的成因及成矿作用等问题受到学者们的广泛关注<sup>[4,10,12,20-24]</sup>。其中,高分异 A 型花岗岩的判别仍未有统一的认识和明确的厘定指标<sup>[3]</sup>。

发生于华南早古生代的广西运动(或加里东运动)是世界上为数不多的板内造山运动实例<sup>[25]</sup>。近年来,对广西运动的构造属性和动力机制的研究取得了重大进展<sup>[26-36]</sup>,但关于板内造山运动的启动时间、构造转换时间和影响规模等问题仍存在较大争议,如由造山挤压向后造山伸展的构造转换时限就存在诸多认识,时间尺度横跨 445~410 Ma<sup>[37-43]</sup>。传统的 I 型和 S 型花岗岩划分主要依据其源区组分特征,通常不具有明确的构造意义,而 A 型花岗岩对于造山之后的区域伸展环境具有重要的指示意义<sup>[2,44-45]</sup>。华南早古生代花岗岩类以强过铝质的 S 型花岗岩为主,发育少量的 I 型花岗岩,主要源自加厚地壳岩石的深熔作用<sup>[26-27,32,46]</sup>,相对而言,同期 A 型花岗岩发育极少,目前相关报道有福建西芹花岗岩<sup>[43]</sup>、江西会同和鹅婆花岗岩<sup>[40]</sup>等,形成时代集中于 415~410 Ma,被认为是同碰撞地壳增厚后碰撞伸展转换的岩石学响应。

广西大瑶山地区大进花岗岩具有高分异的特征,关于其岩石成因类型的认识仍存在较大争议。李欢等依据  $K_2O-Na_2O$  图解认为其为 A 型花岗岩<sup>[47]</sup>;熊松泉等依据岩石地球化学特征将之判定为 I 型花岗岩<sup>[48]</sup>;而 Li 等则根据其过铝质特征认为它是一套高钾钙碱性 S 型花岗岩<sup>[49]</sup>。这种争议在华南早古生代和中生代花岗岩研究中相当普遍,主要

因为高分异花岗岩成因类型判别困难。本文通过对大进花岗岩的年代学和岩石地球化学进行研究,倾向于将之归属于高分异 A 型花岗岩;结合前人研究成果,试图对高分异 A 型花岗岩的判别指标进行总结,为华南早古生代 A 型花岗岩研究增添新的研究素材,进一步揭示广西运动在区域上由造山挤压向后造山伸展的构造转换时限。

## 1 岩体地质及岩石学特征

大进花岗岩位于广西壮族自治区金秀县长垌乡南大进村附近,岩体呈近圆形产出,出露面积约 4 km<sup>2</sup>,区域上寒武纪和泥盆纪地层广泛出露。岩体受控于 NW 向次级断层,侵入震旦系培地组泥质砂岩中(图 1),与围岩的侵入接触关系明显,接触面向四周倾向于围岩,倾角为 5°~65°。前人将之归属于晚白垩世和志留纪<sup>[47-50]</sup>。

大进花岗岩岩体风化严重,很难观察和采集到新鲜岩石样品,仅在金秀县长垌乡至滴水村新修公路沿途采集到新鲜岩石样品。大进花岗岩主要岩性为二云母花岗斑岩,呈灰白色,具斑状结构、块状构造。斑晶主要为石英(体积分数为 8%)、碱性长石(15%)、斜长石(10%);基质由石英(25%)、碱性长石(15%)、斜长石(25%)和少量黑云母和白云母(<1%)组成(图 2)。石英呈灰白色、无色他形粒状或等轴状,可见熔蚀结构边;钾长石主要为条纹长石,呈灰白色半自形板状,可见卡氏双晶和条纹结构;斜长石为钠长石,呈灰白色半自形柱板状,多为细密聚片双晶,绿帘石化、绢云母化强,个别与碱性长石聚集在一起形成聚斑结构。白云母多呈细小团块状集合体产出,有的集合体中残留有微细粒绿帘石、磁铁矿、锆石、榍石等微晶。副矿物组合为锆石、磁铁矿、榍石、萤石和独居石等。岩石蚀变较强,边缘部位常发生绢云母化、高岭石化、绿泥石化、硅化等。此外,区内及岩体边缘发育一些闪长岩和辉绿玢岩脉,但由于风化极为严重,本次工作未能采得岩

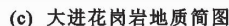
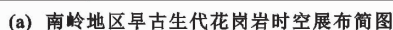


图1 华南南岭地区早古生代花岗岩时空展布简图及大进花岗岩地质简图

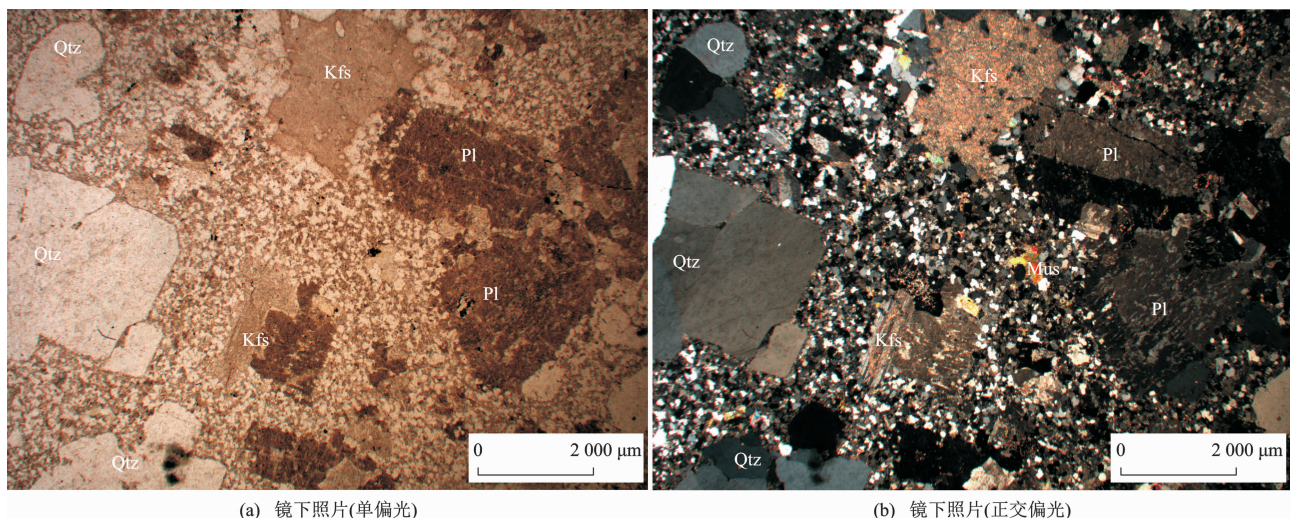
### Geological Map of Dajin Granites

和 N33-2, 采样位置在金秀县长垌乡至滴水村新修公路旁山坡处, 为开采修路所暴露的露头, 岩石样品新鲜可靠。地理坐标为 ( $24^{\circ}01'58.553''\text{N}$ ,  $110^{\circ}06'57.518''\text{E}$ )。

锆石阴极发光 (CL) 照相在中国地质大学 (武汉) 地质过程与矿产资源国家重点实验室 JXA-8100 电子探针仪上完成。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄

锆石阴极发光 (CL) 照相在中国地质大学 (武汉) 地质过程与矿产资源国家重点实验室 JXA-8100 电子探针仪上完成。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄

锆石阴极发光 (CL) 照相在中国地质大学 (武汉) 地质过程与矿产资源国家重点实验室 JXA-8100 电子探针仪上完成。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄



Qtz 为石英;Kfs 为钾长石;Pl 为斜长石;Mus 为白云母

图 2 大进花岗岩显微照片

Fig. 2 Microphotographs of Dajin Granites

测定在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。实验中采用氦气作为剥蚀物质的载气,用美国国家标准技术研究院研制的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST610 进行一起最佳化,锆石 U-Pb 年龄测定采用标准锆石 91500 作为外标标准物,元素含量采用 NIST SRM610 作为外标,<sup>29</sup>Si 作为内标。锆石 U-Pb 年龄测试仪器的运行条件、详细分析流程参见文献[51]。样品的同位素比值计算采用软件 ICPMS DataCal 完成<sup>[52]</sup>,相关结果按照 Anderson 提出的方法<sup>[53]</sup>进行年龄计算,谐和曲线的绘制采用 Isoplot 3.00<sup>[54]</sup>完成。LA-ICPMS 锆石 U-Pb 同位素分析结果见表 1。

## 2.2 主量、微量元素分析

主量元素分析在中国地质调查局武汉地质调查中心中南检测中心完成。分析方法为:Si 和烧失量采用重量法,Al 和 Fe<sup>2+</sup> 采用容量法,Fe<sup>3+</sup>、Ti 和 P 采用分光光度法,K、Na、Ca、Mg 和 Mn 采用原子吸收光谱法。稀土和微量元素分析在核工业北京地质研究院分析测试研究中心采用 ICP-MS 法完成,所用仪器为 HR-ICP-MS (Element I,德国 Finnigan-MAT 公司),工作温度、相对湿度分别为 20 ℃ 和 30%,分析精度优于 5%。主量、微量和稀土元素分析结果见表 2。

## 2.3 全岩 Sr-Nd 同位素分析

全岩 Sr-Nd 同位素分析在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。Sm 和 Nd 的分离使用常规两次离子交换技术,质谱分析使用 7 个接收器的 Finnigan MAT-62 质量分光计,Sr 用静态模

式,Nd 用动态模式。Nd 同位素比值测定以<sup>146</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd 值为 0.721 9 进行标准化,<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd 值为 0.511 554±0.000 007(误差类型为 2σ,样品数(*n*)为 8 个);Sr 同位素比值测定采用<sup>86</sup>Sr/<sup>88</sup>Sr 值为 0.119 4 进行质量分馏校正,Sr 同位素标准参考物质为 NBS607,<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 值为 1.200 35±0.000 01(误差类型为 2σ,*n*=6)。Rb、Sr 全流程本底为 (0.1~1.0)×10<sup>-10</sup> g,Sm、Nd 全流程本底为 (0.01~0.10)×10<sup>-10</sup> g。Sr-Nd 同位素分析结果见表 3。

## 2.4 锆石原位 Hf 同位素分析

在进行锆石 U-Pb 年龄测定的同时,在 LA-MC-ICP-MS 上获得锆石原位 Hf 同位素组成。测定时采用标样 91500 和 GJ-1、MON-1 作为外标。在 ε<sub>Hf</sub>(*t*) 计算中,采用 Blichert-Toft 等推荐的球粒陨石值<sup>[55]</sup>,半衰期 λ=1.867×10<sup>-11</sup> 年,<sup>176</sup>Lu/<sup>177</sup>Hf 值为 0.033 2±0.000 2。亏损地幔模式年龄(*T*<sub>MD</sub>) 计算采用 Griffin 等推荐的值<sup>[56]</sup>,<sup>176</sup>Lu/<sup>177</sup>Hf 值为 0.038 4。锆石 Lu-Hf 同位素分析数据列于表 4。

# 3 结果分析

## 3.1 锆石 U-Pb 年龄

广西大瑶山地区大进花岗岩样品 N33-1 和 N33-2 中锆石多呈棕褐色、褐黄色,少量为浅玫瑰色,呈透明—半透明。锆石颗粒较小,一般为 50 μm×100 μm,大部分晶形不完整,呈短柱状或不规则的三角形,韵律环带发育不明显。大部分锆石颗粒阴极发光图像灰暗不清晰,对比不明显(图3),为



表 1 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素分析结果

Table 1 Analysis Results of LA-ICP-MS Zircon U-Pb Isotope

分析点	Th/U 值	w(Th)/10 <sup>-6</sup>	w(U)/10 <sup>-6</sup>	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb 值	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U 值	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U 值	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb 年龄/Ma	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U 年龄/Ma	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U 年龄/Ma
N33-1-01	0.36	4 378	12 073	0.061 2±0.000 9	0.360 7±0.006 0	0.042 6±0.000 3	647±33	313±4	269±2
N33-1-02	0.70	11 953	17 049	0.062 8±0.001 1	0.597 3±0.015 3	0.069 0±0.001 5	701±29	475±10	430±9
N33-1-03	0.36	4 920	13 850	0.057 9±0.001 2	0.558 2±0.011 1	0.069 6±0.000 4	525±42	450±7	434±3
N33-1-04	0.25	3 138	12 353	0.055 5±0.001 2	0.546 1±0.015 0	0.071 0±0.001 3	432±48	442±10	442±8
N33-1-05	0.61	664	1 082	0.058 7±0.001 6	0.729 9±0.019 6	0.089 6±0.000 8	558±57	557±11	553±5
N33-1-06	0.26	3 606	13 724	0.060 0±0.002 1	0.591 1±0.021 1	0.071 1±0.000 8	603±75	472±13	443±5
N33-1-07	0.23	3 363	14 496	0.065 5±0.001 6	0.649 2±0.018 6	0.071 2±0.001 0	790±53	508±11	443±6
N33-1-08	0.28	4 447	15 963	0.054 6±0.001 2	0.535 5±0.013 0	0.070 8±0.001 0	394±45	435±9	441±6
N33-1-09	0.27	3 115	11 663	0.059 3±0.001 5	0.579 2±0.016 0	0.070 3±0.001 0	578±53	464±10	438±6
N33-1-10	0.23	3 078	13 511	0.061 3±0.001 8	0.595 5±0.017 3	0.070 2±0.000 8	562±75	457±12	436±5
N33-1-11	0.24	585	2 443	0.054 2±0.002 4	0.671 3±0.029 1	0.089 7±0.001 5	377±93	521±18	554±9
N33-1-12	0.44	3 541	8 016	0.055 6±0.001 6	0.547 5±0.016 5	0.071 1±0.001 1	435±59	443±11	443±6
N33-1-13	0.25	3 396	13 559	0.057 1±0.001 6	0.543 9±0.017 2	0.068 8±0.001 3	495±58	441±11	429±8
N33-1-14	0.21	2 913	13 625	0.057 2±0.001 5	0.557 5±0.016 3	0.070 2±0.001 1	497±55	450±11	437±7
N33-1-15	0.25	2 613	10 636	0.055 1±0.001 3	0.537 5±0.015 1	0.070 3±0.001 4	417±45	437±10	438±9
N33-1-16	0.24	3 477	14 398	0.063 3±0.002 0	0.631 1±0.018 7	0.071 9±0.000 7	717±61	497±12	448±4
N33-1-17	0.44	681	1 560	0.069 6±0.001 6	0.408 6±0.010 6	0.042 5±0.000 9	470±96	286±9	264±5
N33-1-18	0.29	2 704	9 299	0.053 7±0.001 2	0.510 6±0.013 5	0.068 6±0.001 3	356±43	419±9	427±8
N33-2-01	0.36	3 873	10 702	0.050 3±0.001 0	0.496 4±0.009 8	0.071 0±0.000 7	211±41	409±7	442±4
N33-2-02	0.69	12 165	17 724	0.058 4±0.001 9	0.578 8±0.021 9	0.070 3±0.000 6	543±82	464±14	438±4
N33-2-03	0.30	3 937	12 983	0.050 1±0.000 9	0.494 0±0.008 6	0.071 0±0.000 7	201±34	408±6	442±4
N33-2-04	0.26	3 180	12 347	0.051 3±0.000 9	0.520 8±0.009 4	0.073 0±0.000 7	255±36	426±6	454±4
N33-2-05	0.27	3 695	13 921	0.050 1±0.000 9	0.487 7±0.008 6	0.070 0±0.000 6	198±36	403±6	436±4
N33-2-06	0.26	3 172	12 325	0.050 8±0.001 0	0.503 0±0.009 6	0.071 2±0.000 7	231±39	414±6	443±4
N33-2-07	0.24	3 283	13 825	0.050 1±0.001 0	0.496 0±0.009 1	0.071 4±0.000 9	199±31	409±6	444±6
N33-2-08	0.25	3 673	14 986	0.052 0±0.001 0	0.514 6±0.011 9	0.071 1±0.001 0	283±44	422±8	443±6
N33-2-09	0.29	4 156	14 291	0.051 9±0.000 8	0.500 2±0.008 1	0.069 5±0.000 7	280±29	412±5	433±4
N33-2-10	0.23	2 906	12 634	0.052 6±0.001 2	0.506 4±0.008 6	0.070 1±0.001 0	312±21	416±6	437±6
N33-2-11	0.58	3 746	6 453	0.051 6±0.000 9	0.519 2±0.008 6	0.072 5±0.000 5	269±35	425±6	451±3
N33-2-12	0.29	2 704	9 299	0.052 7±0.000 9	0.572 7±0.010 2	0.078 4±0.000 6	316±38	460±7	486±13
N33-2-13	0.25	3 412	13 747	0.081 9±0.005 9	0.861 8±0.092 6	0.070 4±0.003 6	896±346	509±59	427±22
N33-2-14	0.21	2 617	12 512	0.052 1±0.000 8	0.509 0±0.009 0	0.070 5±0.000 8	291±31	418±6	439±5
N33-2-15	0.32	363	1 124	0.051 7±0.000 8	0.596 1±0.008 8	0.083 2±0.000 6	272±30	475±6	515±4
N33-2-16	0.24	3 312	13 614	0.052 8±0.000 8	0.527 3±0.008 4	0.072 2±0.000 8	319±26	430±6	449±5
N33-2-17	0.46	1 259	2 729	0.086 1±0.004 0	0.822 5±0.037 7	0.069 0±0.001 0	878±149	499±27	420±16
N33-2-18	0.61	664	1 082	0.056 2±0.001 7	0.551 2±0.015 4	0.071 1±0.000 7	461±59	446±10	443±4

注:比值及年龄数据为经普通铅校正值;误差类型为1σ;w(•)为元素或化合物含量。

锆石中过高的 U 含量所致<sup>[57]</sup>。所测锆石的 36 个分析点中, Th 含量(质量分数,下同)为(664~12 165)×10<sup>-6</sup>, U 含量为(1 080~17 724)×10<sup>-6</sup>, Th/U 值为 0.21~0.70, 显示典型岩浆锆石的特点。样品 N33-1 中 14 个分析点的<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄为 448~427 Ma, 投于 U-Pb 年龄谐和曲线上及其附近[图 4(a)、(b)], 得到<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 加权平均年龄为(438.6±2.9)Ma(平均标准权重偏差(MSWD)为 1.14)。样品 N33-2 中 14 个分析点的<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄为 454~433 Ma, 投于 U-Pb 年龄谐和曲线上及其附近[图 4(c)、(d)], 得到<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 加权平均年龄为(442.9±9.9)Ma(MSWD 值为 0.11)。因此, 约 440 Ma 应为侵入体的形成年龄。样品 N33-2 中 3 个分析点(N33-2-12、13、17)<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄相对主

表 2 主量、微量和稀土元素分析结果

Table 2 Analysis Results of Major, Trace and Rare Earth Elements

样品编号	N33-1	N33-2	N33-3	N34-1	N34-2	N34-3	N34-4	样品编号	N33-1	N33-2	N33-3	N34-1	N34-2	N34-3	N34-4
$w(\text{SiO}_2)/\%$	76.12	77.14	76.60	77.11	77.29	75.29	75.66	$w(\text{Ba})/10^{-6}$	65.0	241.0	209.0	126.0	128.0	36.7	95.7
$w(\text{Al}_2\text{O}_3)/\%$	12.67	12.08	12.63	11.88	11.87	12.71	12.52	$w(\text{La})/10^{-6}$	25.8	32.1	22.4	24.8	23.1	25.0	28.4
$w(\text{Fe}_2\text{O}_3)/\%$	0.29	0.59	0.72	0.34	0.11	0.27	0.19	$w(\text{Ce})/10^{-6}$	59.3	75.7	51.6	56.0	51.7	58.7	67.7
$w(\text{FeO})/\%$	0.97	0.83	1.02	1.39	1.65	2.16	1.42	$w(\text{Pr})/10^{-6}$	7.64	9.74	7.00	7.23	6.98	7.47	8.12
$w(\text{CaO})/\%$	0.45	0.23	0.08	0.18	0.14	0.49	0.96	$w(\text{Nd})/10^{-6}$	32.1	40.6	30.3	29.4	28.1	30.4	32.4
$w(\text{MgO})/\%$	0.16	0.31	0.27	0.18	0.26	0.10	0.20	$w(\text{Sm})/10^{-6}$	10.50	12.70	9.88	9.76	9.52	10.00	9.69
$w(\text{K}_2\text{O})/\%$	5.15	5.41	5.52	5.17	5.33	4.72	5.24	$w(\text{Eu})/10^{-6}$	0.06	0.21	0.09	0.07	0.09	0.05	0.06
$w(\text{Na}_2\text{O})/\%$	3.44	2.72	2.50	3.14	2.80	3.79	3.38	$w(\text{Gd})/10^{-6}$	11.20	12.40	10.50	10.60	10.20	10.90	9.65
$w(\text{TiO}_2)/\%$	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	$w(\text{Tb})/10^{-6}$	2.62	2.86	2.35	2.52	2.27	2.61	2.29
$w(\text{P}_2\text{O}_5)/\%$	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	$w(\text{Dy})/10^{-6}$	17.2	17.9	13.8	16.6	14.9	17.5	14.7
$w(\text{MnO})/\%$	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.04	0.02	$w(\text{Ho})/10^{-6}$	3.48	3.59	2.83	3.33	2.98	3.67	2.99
烧失量/ $\%$	0.48	0.52	0.44	0.36	0.28	0.10	0.17	$w(\text{Er})/10^{-6}$	10.90	11.20	8.34	10.40	9.28	11.90	9.34
$w_{\text{total}}/\%$	99.80	99.90	99.86	99.82	99.79	99.72	99.82	$w(\text{Tm})/10^{-6}$	1.97	2.09	1.48	2.01	1.75	2.24	1.88
$w(\text{Sc})/10^{-6}$	7.70	7.49	5.37	7.76	6.93	8.97	7.64	$w(\text{Yb})/10^{-6}$	12.30	12.30	8.50	13.00	10.90	14.80	11.50
$w(\text{V})/10^{-6}$	5.07	6.12	4.73	5.45	4.78	4.11	4.93	$w(\text{Lu})/10^{-6}$	2.07	2.01	1.36	2.14	1.73	2.42	1.89
$w(\text{Cr})/10^{-6}$	1.47	11.20	7.73	18.00	11.20	12.50	5.84	$w(\text{Hf})/10^{-6}$	9.34	10.40	8.56	12.00	9.32	11.90	11.40
$w(\text{Co})/10^{-6}$	0.65	2.73	2.15	0.90	1.06	1.48	0.95	$w(\text{Ta})/10^{-6}$	6.93	7.45	5.12	8.07	7.17	8.19	7.69
$w(\text{Ni})/10^{-6}$	1.55	5.13	2.05	2.93	2.15	2.86	3.36	$w(\text{Pb})/10^{-6}$	45.60	17.00	13.40	13.90	8.65	46.70	14.80
$w(\text{Ga})/10^{-6}$	19.5	18.3	18.0	17.8	16.4	20.7	19.3	$w(\text{Th})/10^{-6}$	50.6	51.1	43.2	51.3	44.6	57.2	45.4
$w(\text{Rb})/10^{-6}$	406	400	436	330	285	493	427	$w(\text{U})/10^{-6}$	19.4	22.1	21.7	23.8	18.2	24.1	22.6
$w(\text{Sr})/10^{-6}$	9.63	11.90	9.25	20.10	18.20	9.86	9.28	A/CNK 值	1.05	1.12	1.23	1.07	1.12	1.04	0.97
$w(\text{Y})/10^{-6}$	103.0	97.2	72.1	94.2	80.6	107.0	87.1	$w_{\text{REE}}/10^{-6}$	197.1	235.4	170.4	187.9	173.5	197.7	200.6
$w(\text{Zr})/10^{-6}$	158	182	168	217	159	207	188	(La/Yb) <sub>N</sub> 值	1.59	1.63	1.46	1.64	1.57	1.61	1.89
$w(\text{Nb})/10^{-6}$	67.6	68.9	56.8	72.7	60.7	69.5	65.8	(La/Sm) <sub>N</sub> 值	1.50	1.87	1.89	1.37	1.52	1.21	1.77
$w(\text{Cs})/10^{-6}$	8.47	5.76	10.90	3.20	3.66	7.00	4.59	温度/ $^{\circ}\text{C}$	823	847	848	863	836	846	819

注： $w_{\text{total}}$ 为主量元素总含量； $w_{\text{REE}}$ 为稀土元素总含量。

表 3 Sr-Nd 同位素分析结果

Table 3 Analysis Results of Sr-Nd Isotope

样品编号	$w(\text{Sm})/10^{-6}$	$w(\text{Nd})/10^{-6}$	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 值	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	$T_{\text{DM}2}/\text{Ga}$
N033-2H	12.70	40.6	0.190	$0.512\,424\pm0.000\,008$	-3.80	1.52
N033-3H	9.88	30.3	0.198	$0.512\,442\pm0.000\,007$	-3.93	1.53
N034-2H	9.52	28.1	0.206	$0.512\,651\pm0.000\,006$	-0.31	1.23
N034-4H	9.69	32.4	0.182	$0.512\,442\pm0.000\,006$	-2.95	1.45
样品编号	$w(\text{Rb})/10^{-6}$	$w(\text{Sr})/10^{-6}$	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 值	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值	$t/\text{Ma}$
N033-2H	400	11.90	28.074	$1.191\,933\pm0.000\,013$	1.005 1	440
N033-3H	436	9.25	29.074	$1.214\,611\pm0.000\,017$	1.021 2	440
N034-2H	285	18.20	30.074	$0.924\,274\pm0.000\,012$	0.724 2	440
N034-4H	427	9.28	31.074	$1.250\,122\pm0.000\,019$	1.043 4	440

注：误差类型为  $2\sigma$ ； $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  为年龄  $t$  对应的  $\epsilon_{\text{Nd}}$  值； $T_{\text{DM}2}$  为 Nd 同位素两阶段模式年龄。

体年龄有所偏差,存在较大误差,未计入加权平均年龄的计算。样品 N33-1 和 N33-2 中存在 3 颗年龄偏老的锆石(554~515 Ma)(表 1 和图 3),其颗粒结构复杂,具有较明显的核幔分界(如分析点 N33-2-15),可能是源区继承锆石或捕获的围岩锆石。样品

N33-1 中还获得两颗偏年轻的锆石年龄, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄为 269~264 Ma,这两颗锆石粒度偏小且呈近圆状,具有分明的核幔结构,幔部呈扇形环带,所获得的年龄可能代表后期变质作用的时间或是核幔混合时间。

表 4 锆石 Lu-Hf 同位素分析结果  
Table 4 Analysis Results of Zircon Lu-Hf Isotope

分析点	<sup>176</sup> Yb/ <sup>177</sup> Hf 值	<sup>176</sup> Lu/ <sup>177</sup> Hf 值	<sup>176</sup> Hf/ <sup>177</sup> Hf 值	<i>t</i> /Ma	ε <sub>Hf</sub> ( <i>t</i> )	<i>T</i> <sub>M1</sub> /Ga	<i>T</i> <sub>M2</sub> /Ga
N33-2-01	0.141 638	0.003 379	0.282 55±0.000 09	442	0.7	1.07	1.60
N33-2-02	0.239 402	0.005 480	0.282 61±0.000 09	438	2.3	1.03	1.45
N33-2-03	0.129 536	0.003 223	0.282 56±0.000 08	442	1.2	1.04	1.57
N33-2-04	0.153 967	0.003 772	0.282 56±0.000 07	454	1.3	1.06	1.57
N33-2-05	0.156 115	0.003 709	0.282 52±0.000 08	436	−0.4	1.12	1.65
N33-2-06	0.134 184	0.003 188	0.282 54±0.000 08	443	0.7	1.07	1.60
N33-2-07	0.123 764	0.002 921	0.282 59±0.000 07	444	2.4	0.99	1.51
N33-2-08	0.139 945	0.003 311	0.282 54±0.000 07	443	0.5	1.08	1.62
N33-2-09	0.295 725	0.006 309	0.282 63±0.000 09	433	2.8	1.02	1.40
N33-2-10	0.141 876	0.003 240	0.282 49±0.000 009	437	−1.2	1.14	1.72
N33-2-11	0.227 086	0.004 979	0.282 57±0.000 09	451	1.4	1.07	1.53
N33-2-12	0.199 739	0.004 708	0.282 57±0.000 09	486	2.0	1.07	1.55
N33-2-13	0.320 309	0.006 394	0.282 62±0.000 09	427	2.1	1.05	1.44
N33-2-14	0.126 088	0.003 035	0.282 56±0.000 01	439	1.3	1.03	1.56
N33-2-15	0.179 595	0.003 855	0.282 60±0.000 07	515	4.1	0.99	1.46
N33-2-16	0.169 134	0.003 602	0.282 54±0.000 08	449	0.6	1.08	1.61
N33-2-17	0.180 575	0.004 085	0.282 76±0.000 09	420	7.6	0.76	1.12
N33-2-18	0.036 310	0.00 0852	0.282 60±0.000 06	443	3.3	0.93	1.49

注: Hf 同位素测试样品为 N33-2; 误差类型为 1σ; ε<sub>Hf</sub>(*t*) 为年龄 *t* 对应的 ε<sub>Hf</sub> 值; *T*<sub>M1</sub> 为 Hf 同位素一阶段模式年龄; *T*<sub>M2</sub> 为 Hf 同位素两阶段模式年龄。

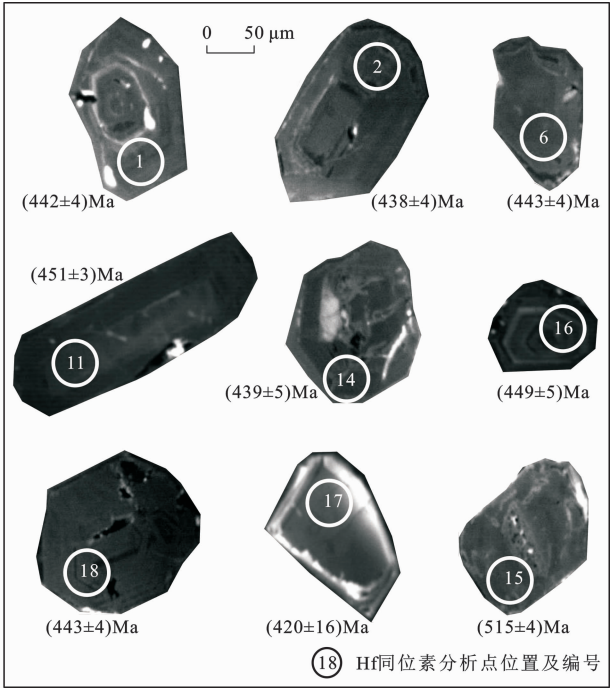


图 3 样品 N33-2 锆石阴极发光图像

Fig. 3 CL Images of Zircons from Sample N33-2

3.2 主量和微量元素特征

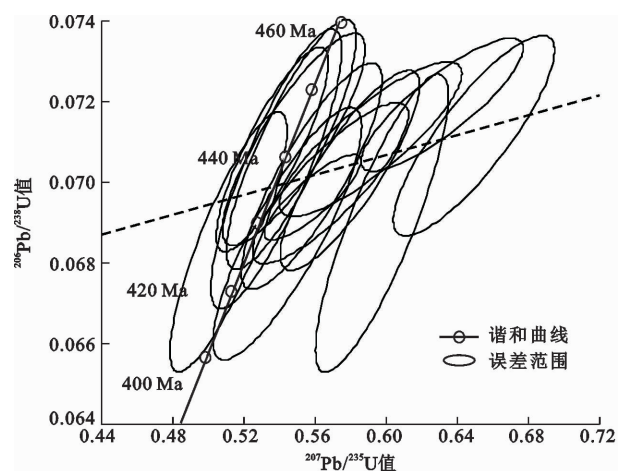
大进花岗岩具有高 Si(SiO<sub>2</sub> 含量为 75.29%~77.29%)、低 Al (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量为 11.87%~12.71%)、准铝—强过铝质(A/CNK 值为 0.97~

1.23)的特征[图 5(a)],富碱、更富 K(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O 含量为 8.02%~8.62%,K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O 值为 1.25~2.21),属于高钾钙碱性系列[图 5(b)],富 Fe、贫 Mg(FeO<sup>T</sup> 含量为 1.25%~2.43%,FeO<sup>T</sup>/(FeO<sup>T</sup>+MgO)值为 0.82~0.96),低 P(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量低于 0.01%)、Ti、Ca 等。

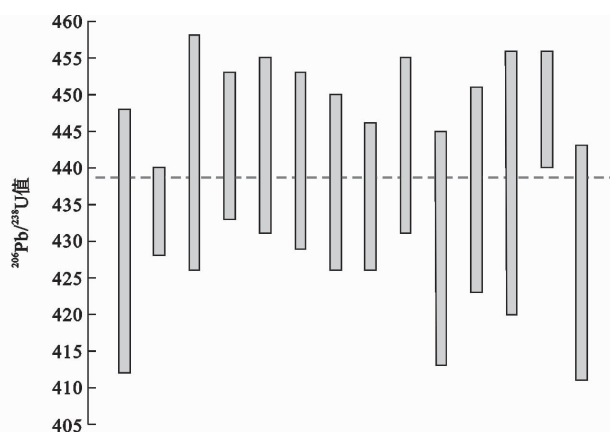
大进花岗岩具有相对偏低的稀土元素总含量((170.4~235.4)×10<sup>-6</sup>),球粒陨石标准化稀土元素配分模式为平坦型((La/Yb)<sub>N</sub> 值为 1.21~1.89),(La/Sm)<sub>N</sub> 值为 1.46~1.89[图 6(a)],具有弱的 M 型四分组效应,极强烈的 Eu 负异常(0.01~0.05)。大进花岗岩明显亏损 Sr、Ba、P 和 Ti 以及过渡族元素(Sc、V、Cr、Co 和 Ni 等)[图 6(b)和表 2],而没有明显的 Nb、Ta 亏损。样品富 Rb(含量为(285~493)×10<sup>-6</sup>),贫 Sr 和 Ba,Rb/Sr、Rb/Ba 值分别为 15.7~50.0 和 1.66~13.40(表 2);具有相对高的 Zr/Hf 值((16.5~19.6)×10<sup>-6</sup>)及 Nb/Ta 值(8.47~11.10);富 Ga 和高场强元素,10 000Ga/Al 值为 2.6~3.1,Zr+Nb+Ce+Y 含量为(349~442)×10<sup>-6</sup>。

3.3 Sr-Nd-Hf 同位素特征

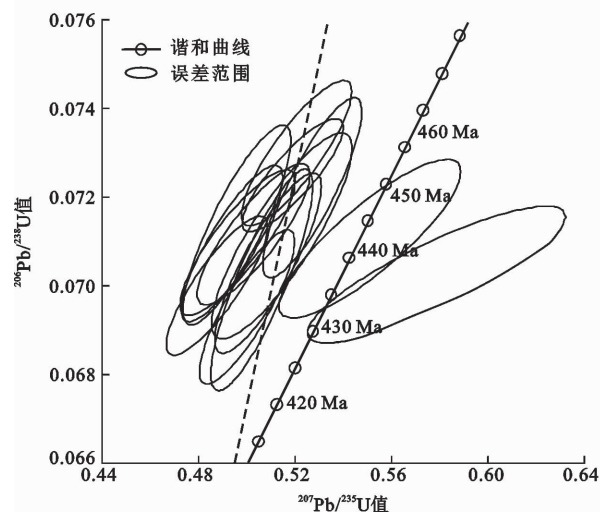
大进花岗岩 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 初始值((<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>i</sub>) 为 0.724 2~1.043 0,ε<sub>Nd</sub>(*t*) 值为 −3.93~−0.31,相



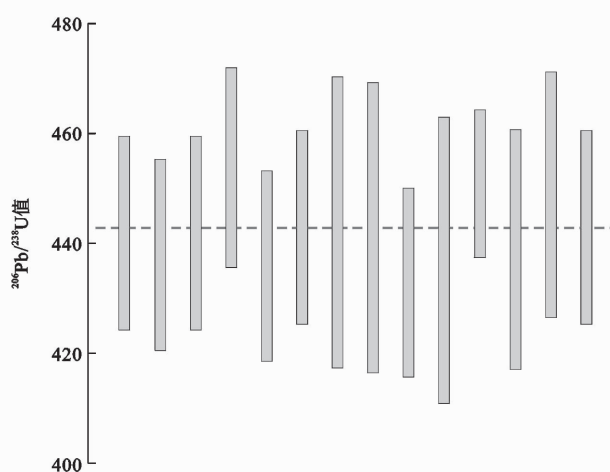
(a) 样品N33-1年龄谐和曲线



(b) 样品N33-1年龄分布



(c) 样品N33-2年龄谐和曲线



(d) 样品N33-2年龄分布

图4 锆石 U-Pb 年龄谐和曲线及年龄分布

Fig. 4 Concordia Diagrams and Distributions of Zircon U-Pb Ages

应的 Nd 同位素一阶段模式年龄 ( $T_{DM1}^{Nd}$ ) 和两阶段模式年龄 ( $T_{DM2}^{Nd}$ ) 分别为 1.00~0.47 Ga 和 1.52~1.23 Ga。总体上,大进花岗岩的 Sr-Nd 同位素组成与同期次花岗岩、桂东北地区变质基底有所差别,而与桂东北地区新元古代基性岩相似[图 7(a)]。其中,样品 N34-2 具有低得多的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  初始值 (0.724 2)、相对高的  $\epsilon_{Nd}(t)$  值 (-0.31) 和低的  $T_{DM1}^{Nd}$  值 (1.00 Ga), 表现出一定的差异。特别高的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  初始值 (表 3) 可能为岩浆高分异或遭受后期流体作用所致, 从而使得 Sr 同位素组成没有成因意义。

锆石原位 Hf 同位素分析结果显示 (样品 N33-2), 大进花岗岩的岩浆结晶锆石  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  初始值 ( $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$ ) 为 0.282 50~0.282 64,  $\epsilon_{Hf}(t)$  值为 -1.2~3.3, Hf 同位素一阶段模式年龄 ( $T_{DM1}^{Hf}$ ) 和两阶段模式年龄 ( $T_{DM2}^{Hf}$ ) 分别为 1.14~0.93 Ga 和

1.72~1.40 Ga。在  $\epsilon_{Nd}(t)$ - $\epsilon_{Hf}(t)$  图解 [图 7(b)] 中, 岩石样品投影于全球下地壳区域。

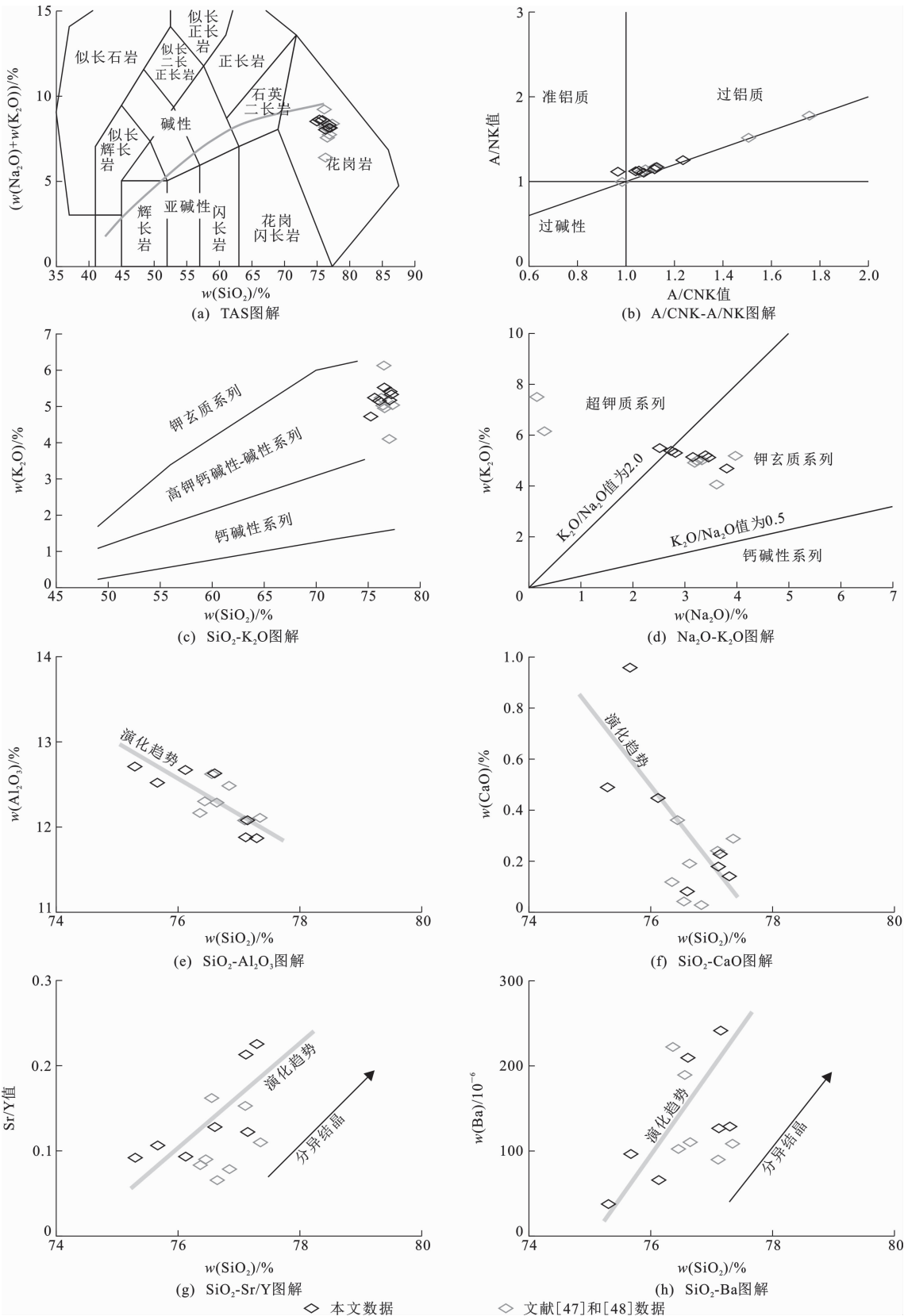
## 4 讨论

### 4.1 岩石成因

#### 4.1.1 高分异花岗岩

吴福元等从岩体地质、岩石学、矿物学及地球化学等角度对高分异花岗岩进行了系统总结<sup>[3]</sup>: ①常呈补体或晚期岩枝产出于岩体的中心部位、或单独产出, 常与伟晶岩或细晶岩共生; ②岩性为二云母花岗岩、白云母花岗岩、微斜长石花岗岩、锂云母花岗岩和钠长石花岗岩等淡色花岗岩; ③常出现白云母、石榴子石、黄玉、锂云母、萤石、独居石、富铈磷铀钍锆石、绿柱石、铌钽矿等; ④铝过饱和, 高 Li、Rb、Cs 含量, 低 Cr、Co、Ni、Sr、Ba、Zr 等含量, 以及高 Rb/Sr、Rb/Ba、Zr/Hf 和 Nb/Ta 值等。稀土元素则表

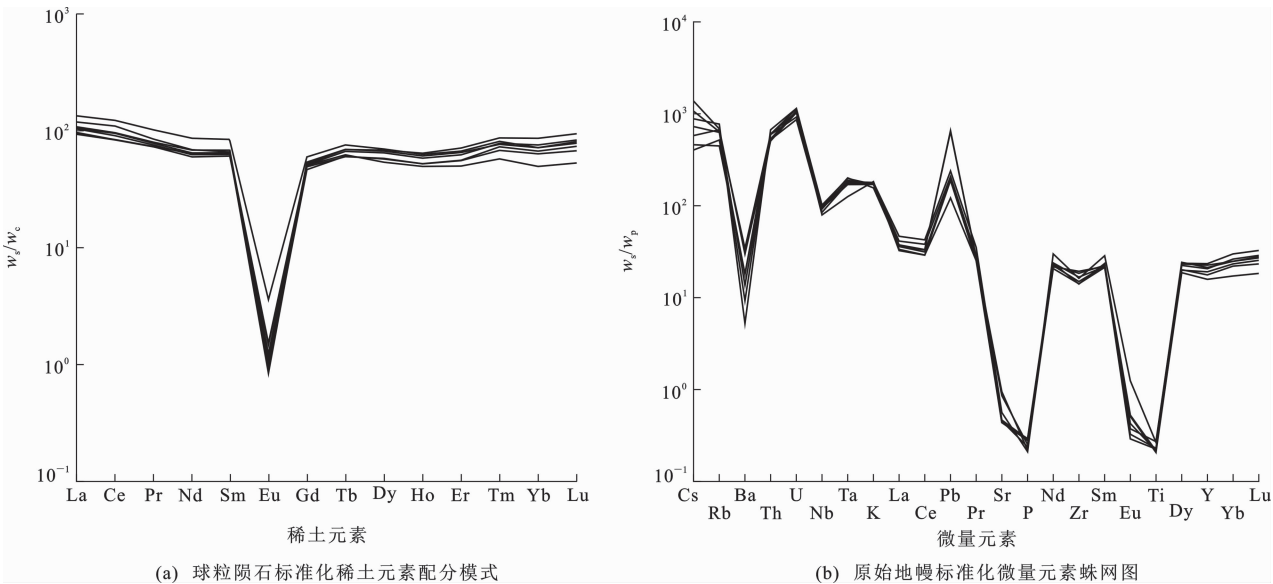




图(a)引自文献[58];图(b)引自文献[59];图(c)引自文献[60];图(d)引自文献[61]

图 5 TAS 图解、A/CNK-A/NK 图解、 $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$  图解、 $\text{Na}_2\text{O-K}_2\text{O}$  图解、 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  图解、 $\text{SiO}_2\text{-CaO}$  图解、 $\text{SiO}_2\text{-Sr/Y}$  图解和  $\text{SiO}_2\text{-Ba}$  图解

Fig. 5 Diagrams of TAS, A/CNK-A/NK,  $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O-K}_2\text{O}$ ,  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2\text{-CaO}$ ,  $\text{SiO}_2\text{-Sr/Y}$  and  $\text{SiO}_2\text{-Ba}$



$w_s$  为样品含量;  $w_c$  为球粒陨石含量;  $w_p$  为原始地幔含量; 同一图中相同线条对应不同样品; 球粒陨石标准化值和原始地幔标准化值引自文献[62]

图 6 球粒陨石标准化稀土元素配分模式和原始地幔标准化微量元素蛛网图

Fig. 6 Chondrite-normalized REE Pattern and Primitive Mantle-normalized Trace Element Spider Diagram

现为总含量趋低,轻、重稀土元素比值趋小,Eu 异常大和四分组效应等。就大进花岗岩而言,岩体呈小岩体单独产出,矿物组合出现白云母、萤石、独居石,锆石具有异常高的 U、Th、Hf 含量(分别高达  $17\,724\times10^{-6}$ 、 $12\,165\times10^{-6}$  和  $39\,103\times10^{-6}$ )。花岗岩中出现少量白云母,个别样品铝饱和度高(A/CNK 值高至 1.23)[图 5(b)],亏损 Sr、Ba 以及过渡族元素(Sc、V、Cr、Co 和 Ni 等)[图 6(b)];Rb 含量(多大于  $400\times10^{-6}$ )高,高于 King 等认为的高分异花岗岩 Rb 含量( $>270\times10^{-6}$ )[63];Rb/Sr 值( $>15$ )、Rb/Ba 值(1.7~13.0)高,全岩 Zr/Hf 值( $<20$ )、Nb/Ta 值( $<11$ )相对低;轻、重稀土元素分馏不明显,(La/Yb)<sub>N</sub> 值为 1.21~1.89,Eu 负异常(0.01~0.05)显著和稀土元素四分组效应弱。此外,在部分哈克图解中,大进花岗岩也表现出明显的分异结晶趋势[图 5(c)~(h)]。因此,大进花岗岩具有典型的高分异花岗岩特征。

另一个问题是,这套具有高分异特征的花岗岩代表着岩浆演化哪个阶段的产物? 其可能代表初始岩浆或经历高度分异结晶后的残余岩浆,前者可能源自极度成熟的地壳组部分熔融或地壳物质经历多次部分熔融的产物,代表了花岗质岩浆的初始组分,自身具有高分异花岗岩相似的矿物学和地球化学特征。大进高分异花岗岩具有富铀钍锆锆石以及弱的稀土元素 M 型四分组效应等特征,岩体岩性为花岗斑岩,呈小岩株形式浅层产出,不同于初始熔体

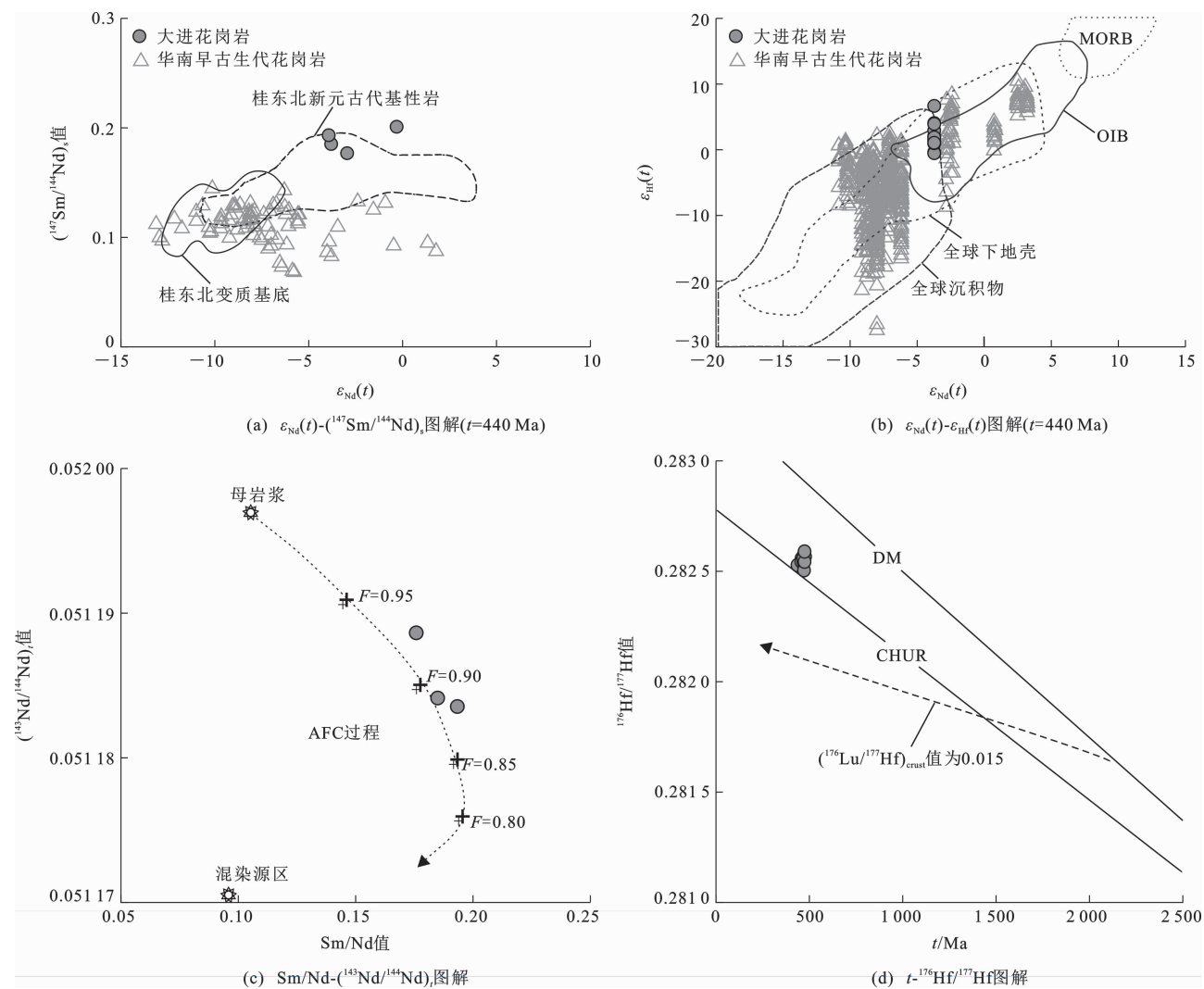
常以浅色体赋存于源岩之中[3]。因此,大进花岗岩应为花岗质岩浆经历高度分异结晶的残余熔体结晶固结的产物,即为传统的高分异花岗岩。

4.1.2 岩石成因类型

对于高分异花岗质岩浆而言,当经历高度分异结晶作用之后,其矿物组成和化学成分都趋近于低共结的花岗岩,从而使得岩石成因类型鉴定出现困难[44]。大进高分异花岗岩既无区域上同期次同源未分异岩浆岩的出露,也未见标志性矿物,如碱性暗色矿物(霓辉石、钠闪石、钠铁闪石、铁锂云母等)、富铝矿物(堇青石、石榴子石等)、角闪石。这也是华南分异型花岗岩的典型特征,常常造成同一个岩体被识别为多种成因类型。

通常而言,I 型和 S 型花岗岩偏重于其源区组成的反演,而 A 型花岗岩则侧重于花岗岩本身,如碱性、高温、无水、非造山等。因此,本文从花岗岩的形成温度和地球化学指标来探讨高分异 A 型花岗岩的特有性质。

(1)形成温度。在源区组成上,A 型花岗岩与 I 型、S 型花岗岩的区别主要在于其低的水含量和相对高的卤族元素(F、Cl 等)含量,这也是其有显著高岩浆温度的主要原因[64]。根据 Waston 等实验所得的锆石饱和温度计[65],计算得到大进花岗岩的岩浆温度为  $819\,^{\circ}\text{C}\sim863\,^{\circ}\text{C}$ (表 2),高于通常判别为未分异 I 型和 S 型花岗岩的形成温度[8]。事实上,该估算温度代表了岩浆经历高度分异后残余熔体的结晶



AFC 为同化混染和分离结晶作用;  $F$  为 AFC 过程的模拟百分比;  $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_s$  为校正后的  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  值;  $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_t$  为年龄  $t$  对应的  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  值;  $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{crust}}$  为地壳的  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  值; 图(b)引自文献[32]; 早古生代花岗岩 Nd-Sr-Hf 同位素数据引自文献[32]、[66]~[72]; 广西地区基底岩石同位素数据引自文献[66], 新元古代基性岩数据引自文献[73]和[74]; DM 为亏损地幔, CHUR 为球粒陨石均一储库

图 7  $\epsilon_{Nd}(t)$ - $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_s$  图解、 $\epsilon_{Nd}(t)$ - $\epsilon_{Hf}(t)$  图解、 $\text{Sm}/\text{Nd}$ - $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_t$  图解和  $t-^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  图解

Fig. 7 Diagrams of  $\epsilon_{Nd}(t)$ - $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_s$ ,  $\epsilon_{Nd}(t)$ - $\epsilon_{Hf}(t)$ ,  $\text{Sm}/\text{Nd}$ - $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_t$  and  $t-^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$

温度,而非岩浆初始形成温度,意味着岩浆的形成温度要高得多(应大于  $900^{\circ}\text{C}$ )。需要说明的是,花岗岩岩浆分异过程中,随着锆石等副矿物的分异结晶,熔体结晶温度呈降低趋势,表征温度的 Zr 含量也呈降低趋势,故 Zr 在高分异花岗岩中含量较低。Whalen 等认为 A 型花岗岩判别指标为  $10\,000\text{Ga}/\text{Al}$  值高于 2.6 和 Zr 含量高于  $250\times 10^{-6}$  [64],大进花岗岩的  $10\,000\text{Ga}/\text{Al}$  值为  $2.6\sim 3.1$ ,而 Zr 含量相对较低( $(158\sim 217)\times 10^{-6}$ ),但是该值代表了锆石等矿物分异结晶后残余熔体中 Zr 含量,在初始岩浆中则不止于此。那么形成大进 A 型花岗岩高熔融温度的热源来自哪里? A 型花岗岩的源区组分具有低的水含量和高的卤族元素含量,其部分熔融要

求较高的熔融温度,而一般的地热梯度或放射性元素生成的热不能满足这个条件,需要一个额外的热源,如玄武质岩浆持续长时间的底侵作用可以在区域上形成一个高的地热梯度,进而不断产生岩浆 [75]。大进花岗岩附近发育一些基性岩脉(图 1),尽管因风化导致详尽的定年工作未开展,但据这些岩脉侵入到寒武纪—震旦纪地层中,且研究区东部大宁等地发育同期次的煌斑岩脉(约 440 Ma)等地质事实,本文倾向于桂东北地区存在一期早志留世的玄武质岩浆活动,并为大进花岗岩的形成提供了热源。

(2)地球化学指标。通常而言,在无相关镁铁质端元岩浆岩共生,又无标志性矿物发育的情况下,特

定的地球化学指标是高分异花岗岩岩石成因类型判别的必要手段。吴福元等通过大量数据统计分析认为,随着岩浆分异演化,A型花岗岩的Ga/Al值及Zr含量逐渐降低<sup>[3]</sup>,具有如图8所示的演化趋势,而I型和S型花岗岩与之相反,随着分异程度增高,其Ga/Al值逐渐升高。分异的I型和S型花岗岩可以具有高Ga/Al值的原因在于:一方面,花岗岩在经历高度斜长石分异结晶的过程中,由于Al倾向进入晶出的斜长石中,熔体中Al含量相对降低<sup>[76]</sup>;另一方面,随着岩浆分异F含量增加,Ga与F生成更为稳定的GaF<sub>3</sub><sup>-</sup>,熔体中Ga/Al值增加。鉴于此,冯尚杰等提出应用10 000Ga/Al-Zr+Nb+Ce+Y图解来判别高分异A型花岗岩<sup>[5]</sup>,并依据经历分异的花岗质岩浆因锆石的分异结晶,导致Zr含量降低的速率明显高于I型和S型花岗岩的特点,提出SiO<sub>2</sub>-Zr图解[图8(b)]。大进高分异花岗岩在上述图解中,均与A型花岗岩的分异演化趋势相同(图8、9)。此外,高分异I型花岗岩的FeO<sup>T</sup>含量通常小于1.00%<sup>[77]</sup>,而大进花岗岩的FeO<sup>T</sup>含量为1.25%~2.43%,且FeO<sup>T</sup>/(FeO<sup>T</sup>+MgO)值为0.82~0.96,与铁质A型花岗岩相当<sup>[78]</sup>。高分异S型花岗岩通常具有高P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>含量(>0.1%),且随着岩浆分异结晶,熔体中P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>含量呈增加的趋势。而A型花岗岩具有相对低得多的P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>含量(<0.05%)<sup>[45,63,79]</sup>,大进高分异花岗岩具有极低的

P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>含量(<0.01%),远低于高分异S型花岗岩P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>平均含量(约0.42%)<sup>[45,64]</sup>。因此,本文更加倾向于将大进高分异花岗岩归属于A型花岗岩。

结合前人研究成果,对于高分异A型花岗岩的判别,归纳为以下几个层次/方面:①野外地质,找寻岩石组合中更基性的端元组分<sup>[44,63,80]</sup>,结合岩相学和地球化学特征加以综合分析。例如,东准噶尔喀拉萨依高分异花岗岩在时空分布和地球化学特征等方面均与区域上的老鸦泉A型花岗岩具有内在的成因联系,是后者岩浆分异晚期的产物<sup>[81]</sup>。事实上,分异花岗岩相应的基性端元一般出露很少,高分异花岗岩体往往单独产出。②标志性矿物,高分异A型花岗岩也可能存在少量的碱性暗色矿物,如钠闪石/钠铁闪石、铁锂云母、锂云母等。Huang等在对川西南冕宁地区新元古代高分异花岗岩进行研究时,发现了少量钠闪石(Riebeckite)<sup>[12]</sup>,为A型花岗岩的厘定提供了有力佐证。孙佳琪等对中国东南部晚中生代高分异A型花岗岩进行了系统的电子探针工作,发现Ba主要富集于钾长石斑晶边缘,钾长石斑晶中心和基质中钾长石Ba含量较低,斜长石中则极低<sup>[82]</sup>,表明在岩浆晚期快速晶出时,Ba大量进入钾长石,熔体中Ba含量降低,A型花岗岩Ba含量降低的原因在于岩浆经历了高分异。精细的矿物学研究对于高分异A型花岗岩的判别意义重大,但相关成果十分稀少。③形成温度,这是高分异A

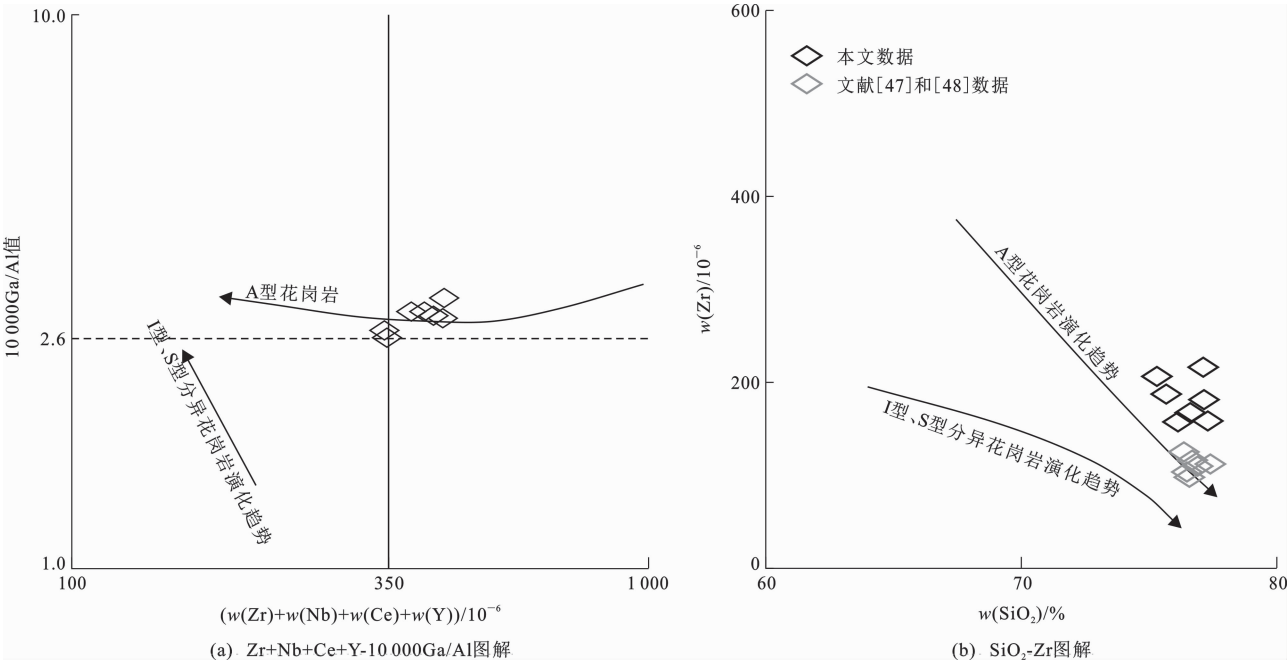
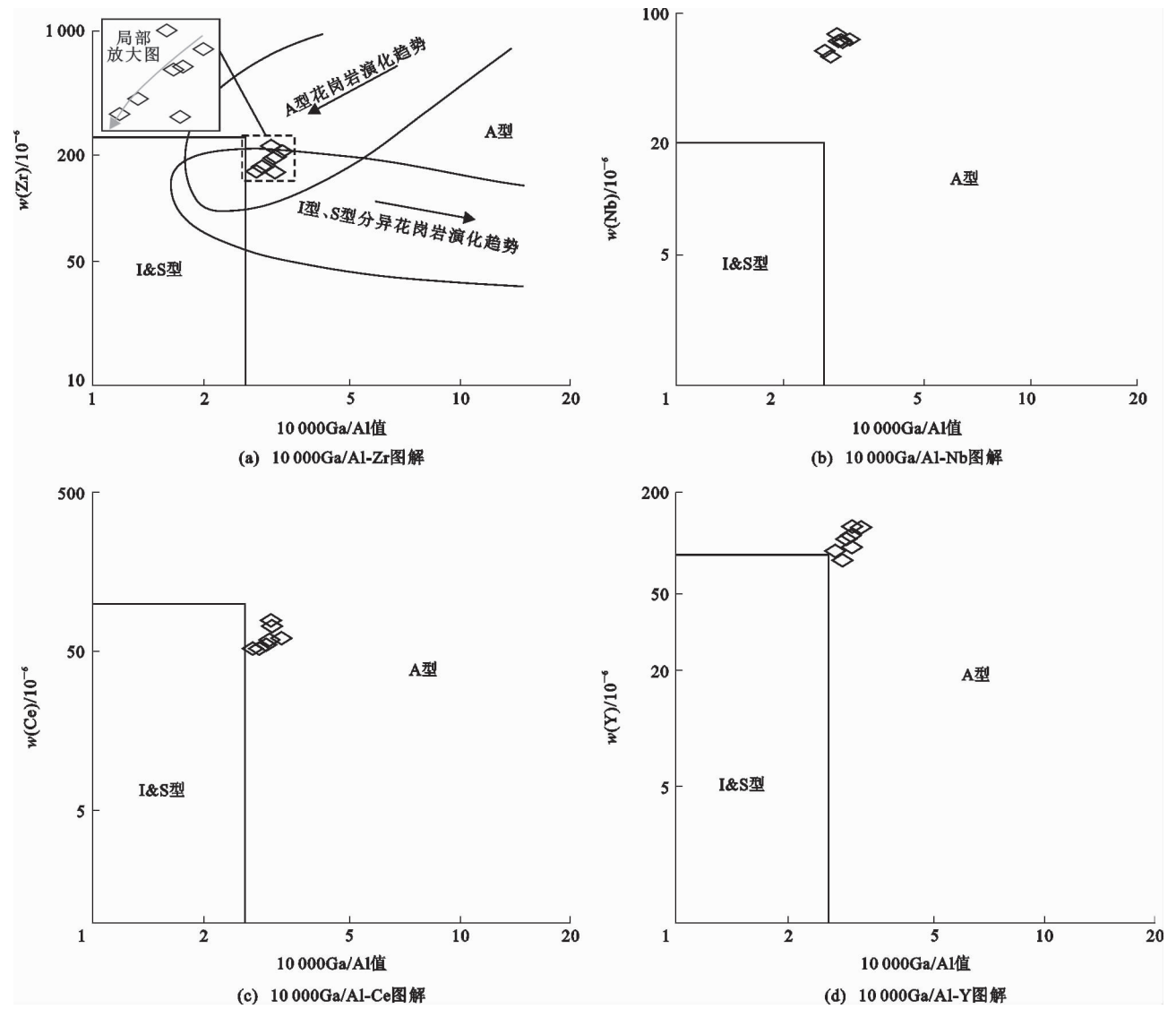


图8 Zr+Nb+Ce+Y-10 000Ga/Al图解和SiO<sub>2</sub>-Zr图解  
Fig. 8 Diagrams of Zr+Nb+Ce+Y-10 000Ga/Al and SiO<sub>2</sub>-Zr



型花岗岩有别于其他类型花岗岩的最大特点。依据锆石饱和温度计所估算的高分异 A 型花岗岩具有相对高的岩浆温度(一般高于800 ℃),其初始岩浆具有更高的形成温度,而 I 型和 S 型花岗岩由于源区富水,低熔点的源区物质部分熔融形成的岩浆初始温度相对偏低(一般低于 800 ℃),经历分异结晶

后则更低。④地球化学指标,对于高分异 A 型花岗岩的厘定,目前仍是以地球化学特征研究为基础<sup>[5,14,81]</sup>。最有效的指标是 10 000Ga/Al 值、Zr+Nb+Ce+Y 含量、Zr 含量及其相关判别图解(图 8、9),并与 I 型和 S 型花岗岩特征元素含量及其演化趋势进行综合对比分析。



图(a)中,A 型花岗岩,I 型、S 型分异花岗岩演化趋势引自文献[3];图件引自文献[64]

图 9 A 型花岗岩判别图解

Fig. 9 Discrimination Diagrams of A-type Granites

#### 4.1.3 AFC 过程

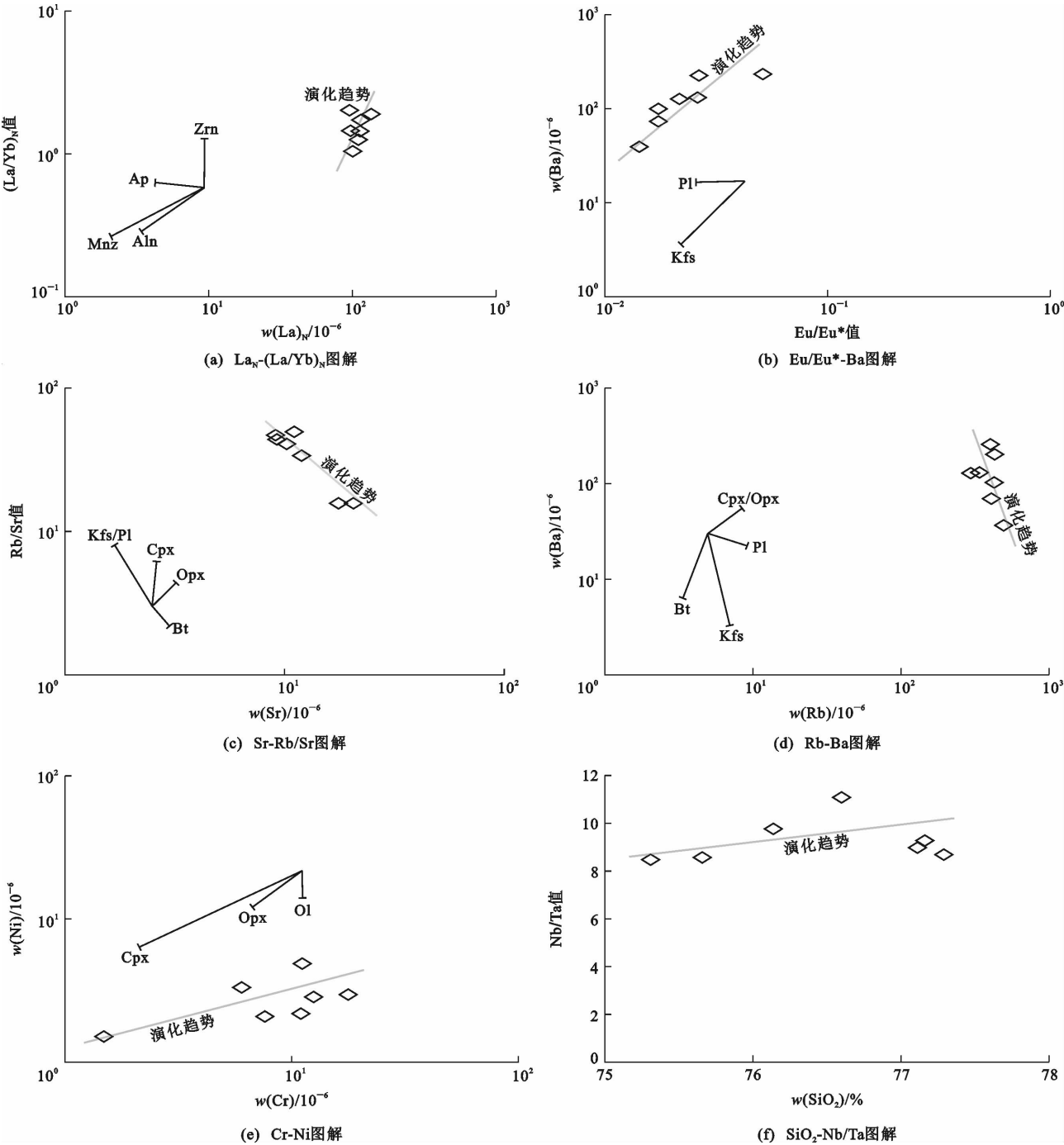
花岗岩的化学组成受控于诸多因素,其中最重要的是源区物质组成、构造背景和分异程度等<sup>[79]</sup>。此外,岩浆在形成和演化过程中的物理化学条件也起到关键作用<sup>[83]</sup>。例如,岩浆的碱度主要受控于压力,随压力的增加而增加,英安质-花岗闪长质地壳的部分熔融在低压下形成准铝质岩浆,在高压下形成过铝质岩浆<sup>[78]</sup>。大进花岗岩具有相对高的  $\text{FeO}^{\text{T}}$

含量(1.25%~2.43%)和  $\text{FeO}^{\text{T}}/(\text{FeO}^{\text{T}}+\text{MgO})$  值(0.82~0.96),结合岩石相对高的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值(-3.93~-0.31)和  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值(-1.2~3.3),在  $t\text{-}^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  图解[图 7(d)]中,花岗岩投影于亏损地幔与球粒陨石均一储库之间,暗示着它们可能是成熟度低的地壳组分或镁铁质下地壳岩石部分熔融的产物。在 Nd-Hf 同位素相关图解[图 7(a)、(c)]中,大进高分异 A 型花岗岩投影于桂东北新元古代基

性岩和全球下地壳区域,表明它们的源区组成可能与桂北地区新元古代基性岩组分相似,可能是新元古代时期新生幔源岩浆形成的镁铁质下地壳岩石在早古生代部分熔融所形成的。

对于 A 型花岗质岩浆来说,结晶分异在岩浆演化过程中起到至关重要的作用<sup>[83]</sup>。铁钛氧化物、斜方辉石、斜长石及一些副矿物(如磷灰石、锆石等)是

A 型花岗质岩浆较早结晶的矿物相,而残余岩浆的组分主要受控于斜方辉石和斜长石,角闪石和黑云母的结晶则相对较晚,主要受控于熔体的氧逸度( $f_{O_2}$ )和水含量<sup>[84]</sup>。从图 5、10 可以看出:大进 A 型花岗岩的  $Al_2O_3$ 、 $MnO$ 、 $FeO^T$ 、 $TiO_2$ 、 $P_2O_5$ 、 $Sr$ 、 $Ba$  等含量随着  $SiO_2$  含量的增加逐渐降低,而  $Ca/Al$  值则逐渐升高, $Eu$ ( $Eu$ 异常为 0.01~0.05)、 $Sr$ 、 $Ba$ 、 $P$ 、



$w(La)_N$  为元素  $La$  含量标准化后的值;Kfs 为钾长石;Pl 为斜长石;Opx 为斜方辉石;Cpx 为单斜辉石;Ol 为橄榄石;Bt 为黑云母;  
Zrn 为锆石;Ap 为磷灰石;Mnz 为独居石;Aln 为褐帘石

图 10  $La_N-(La/Yb)_N$  图解、 $Eu/Eu^*-Ba$  图解、 $Sr-Rb/Sr$  图解、 $Rb-Ba$  图解、 $Cr-Ni$  图解和  $SiO_2-Nb/Ta$  图解

Fig. 10 Diagrams of  $La_N-(La/Yb)_N$ ,  $Eu/Eu^*-Ba$ ,  $Sr-Rb/Sr$ ,  $Rb-Ba$ ,  $Cr-Ni$  and  $SiO_2-Nb/Ta$

Ti等强烈负异常,表明岩浆经历了铁钛氧化物、长石及辉石等矿物的结晶分异。花岗岩的Rb/Sr值高达50,Zr/Hf值低至16.5, Eu异常低至0.01,稀土元素含量相对低,暗示着发生了锆石、独居石、褐帘石等副矿物的分异结晶。稀土元素四分组效应及富氟矿物萤石的出现,表明大进A型花岗质岩浆在演化的晚阶段经历了流体作用,与自变质作用花岗岩相似。

大进花岗岩中存在一些继承锆石(554~515 Ma),可能是继承的源区锆石或捕获的围岩锆石。相对于岩浆锆石,这些老的锆石具有明显低的U含量( $(1\ 082\sim 2\ 443)\times 10^{-6}$ )和Th含量( $(363\sim 464)\times 10^{-6}$ ),以及显著低的锆石Hf含量( $(502\sim 6\ 307)\times 10^{-6}$ )和P含量( $(499\sim 1\ 621)\times 10^{-6}$ ),与高分异花岗岩新生锆石差别较大,表明它们更可能是捕获的围岩锆石。结合花岗岩具有变化的Nd-Hf同位素组成,暗示着大进花岗质岩浆遭受了一定程度的围岩物质混染作用。A型花岗质岩浆在形成初始阶段由于温度较高,几乎没有继承锆石,在经历高度分异结晶后,随着温度的降低,捕获的围岩不能“消化”,岩浆中残留了一些围岩锆石。大进高分异A型花岗岩可能经历了相似的演化过程。此外,在Sm/Nd-( $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ )<sub>t</sub>图解[图7(c)]中,岩石样品与AFC过程总体一致,暗示着大进花岗质岩浆经历了AFC过程。

#### 4.2 构造意义

诸多研究表明,发生于华南早古生代的广西运动更可能是陆内(板内)造山作用<sup>[25-27,35,85]</sup>,但其造山作用的具体过程仍未得到有效制约,其中由造山挤压向后造山伸展的构造转换时限仍众说纷纭。Feng等分别将福建西芹花岗岩和江西会同、鹅婆花岗岩厘定为A型花岗岩,形成年龄为415~410 Ma,该时代被认为是同碰撞地壳增厚向后碰撞伸展的转换时期<sup>[40,43]</sup>;Zhong等认为华南早古生代造山地壳增厚时间为460~425 Ma,随后的造山垮塌时间为425~400 Ma<sup>[38]</sup>;Wang等通过对武夷—云开地区花岗岩年龄及变质作用年龄的系统分析,认为约430 Ma是花岗质岩浆作用的峰期,代表了造山垮塌时间<sup>[33]</sup>;Yao等通过对粤北高镁玄武岩—安山岩系列火山岩的研究,认为约435 Ma华南发生了岩石圈拆沉,进而导致了造山垮塌作用<sup>[37]</sup>;Zhang等和Jia等分别对华南早古生代基性岩进行研究,认为这些基性岩石可能是岩石圈拆沉的岩石学响应,445~442 Ma则代表了由造山挤压向后造山伸

展的转换时间<sup>[41-42]</sup>。造成这种争议的原因可能有两点:①广西运动由造山挤压向后造山伸展的构造转换时限在不同地区发生的时间不尽相同;②一些形成于伸展环境的岩石更可能形成于造山作用晚阶段的板内伸展。

近年来,岩石圈拆沉作用及其形成的岩浆岩受到了学者们的广泛关注<sup>[39,41,72,86]</sup>,如粤北地区志留系地层中发育的一些435 Ma中基性火山岩,被认为是岩石圈拆沉所引发的造山垮塌岩石学响应,代表了区域构造转换的时限<sup>[37]</sup>,同时岩石圈地幔拆沉所导致的软流圈地幔上涌及其诱发的玄武质岩浆底侵为下地壳镁铁质岩的部分熔融提供了热源。大进A型花岗岩可能也是后造山拆沉作用的产物,暗示着桂北地区于440 Ma已由造山挤压向后造山伸展发生了构造转换。

## 5 结 语

(1)广西大瑶山地区大进高分异花岗岩具有A型花岗岩特征,形成于早志留世(440 Ma)。

(2)大进A型花岗岩可能源自镁铁质地壳的部分熔融,花岗质岩浆经历了AFC过程。

(3)桂北地区于早志留世已处于后造山拆沉阶段,已发生造山挤压向后造山伸展的构造转换。

万丈雪原风雨惶,

天山祁连腹中汤。

蛇绿岩顶格桑红,

九目梵音梁龙殇。

谨以此文庆祝西安地质调查中心组建六十周年!

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 陈璟元,杨进辉. 佛冈高分异I型花岗岩的成因:来自Nb-Ta-Zr-Hf等元素的制约[J]. 岩石学报,2015,31(3):846-854.  
CHEN Jing-yuan, YANG Jin-hui. Petrogenesis of the Fogang Highly Fractionated I-type Granitoids: Constraints from Nb, Ta, Zr and Hf[J]. Acta Petrologica Sinica, 2015, 31(3): 846-854.
- [2] 王孝磊. 花岗岩研究的若干新进展与主要科学问题[J]. 岩石学报, 2017, 33(5): 1445-1458.  
WANG Xiao-lei. Some New Research Progress and Main Scientific Problems of Granitic Rocks[J]. Acta Petrologica Sinica, 2017, 33(5): 1445-1458.
- [3] 吴福元,刘小驰,纪伟强,等. 高分异花岗岩的识别与

- 研究[J]. 中国科学:地球科学, 2017, 47(7): 745-765.
- WU Fu-yuan, LIU Xiao-chi, JI Wei-qiang, et al. Highly Fractionated Granites: Recognition and Research [J]. Science China: Earth Sciences, 2017, 47(7): 745-765.
- [4] 舒徐洁, 陈志洪, 朱延辉, 等. 赣南兴国东固高分异花岗岩成因及地质意义[J]. 地质论评, 2018, 64(1): 108-126.
- SHU Xu-jie, CHEN Zhi-hong, ZHU Yan-hui, et al. Genesis of Donggu Highly Fractionated Granites, Xingguo, Southern Jiangxi, and Its Geological Significance[J]. Geological Review, 2018, 64(1): 108-126.
- [5] 冯尚杰, 陈卫锋, 王洪作, 等. 赣中地区晚中生代高分异 A 型花岗岩的厘定及其成因研究[J]. 地质学报, 2020, 94(4): 1227-1247.
- FENG Shang-jie, CHEN Wei-feng, WANG Hong-zuo, et al. Identification and Petrogenesis of a Highly Differentiated A-type Granite Formed in the Late Mesozoic, Central Jiangxi Province[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(4): 1227-1247.
- [6] 马鹏飞, 夏小平, 徐 健, 等. 腾冲早白垩世花岗岩的高分异成因及其构造意义[J]. 岩石学报, 2021, 37(4): 1174-1195.
- MA Peng-fei, XIA Xiao-ping, XU Jian, et al. Early-Cretaceous Highly Fractionated Granites from the Tengchong Terrane: Petrogenesis and Tectonic Implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 2021, 37(4): 1174-1195.
- [7] BHATTACHARJI S, SMITH C H. Flowage Differentiation[J]. Science, 1964, 145: 150-153.
- [8] KING P L, CHAPPELL B W, ALLEN C M, et al. Are A-type Granites the High-temperature Felsic Granites? Evidence from Fractionated Granites of the Wangrah Suite[J]. Australian Journal of Earth Sciences, 2001, 48(4): 501-514.
- [9] GLAZNER A F, BARTLEY J M, COLEMAN D S, et al. Are Plutons Assembled over Millions of Years by Amalgamation from Small Magma Chambers? [J] Geological Society of America Today, 2004, 14(4/5): 4-11.
- [10] BREITER K, FÖRSTER H J, SKODA R. Extreme P-, Bi-, Nb-, Sc-, U- and F-rich Zircon from Fractionated Perphosphorous Granites: The Peraluminous Podlesi Granite System, Czech Republic[J]. Lithos, 2006, 88(1/2/3/4): 15-34.
- [11] BREITER K, GARDENOVA N, KANICKY V, et al. Gallium and Germanium Geochemistry During Magmatic Fractionation and Post-magmatic Alteration in Different Types of Granitoids: A Case Study from the Bohemian Massif (Czech Republic) [J]. Geologica Carpathica, 2013, 64(3): 171-180.
- [12] HUANG X L, XU Y G, LI X H, et al. Petrogenesis and Tectonic Implications of Neoproterozoic, Highly Fractionated A-type Granites from Mianning, South China [J]. Precambrian Research, 2008, 165(3/4): 190-204.
- [13] LEE C T A, MORTON D M. High Silica Granites: Terminal Porosity and Crystal Settling in Shallow Magma Chambers [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2015, 409: 23-31.
- [14] XIONG F H, HOU M C, CAWOOD P A, et al. Neoproterozoic I-type and Highly Fractionated A-type Granites in the Yili Block, Central Asian Orogenic Belt: Petrogenesis and Tectonic Implications [J]. Precambrian Research, 2019, 328: 235-249.
- [15] CHEN Y J, CHEN B, DUAN X X, et al. Origin of Highly Fractionated Peraluminous Granites in South China: Implications for Crustal Anatexis and Evolution [J]. Lithos, 2021, 402/403: 106145.
- [16] WAGER L R, BROWN G M. Layered Igneous Rocks [M]. Edinburgh: Oliver and Boyd, 1968.
- [17] 张 旗. 花岗质岩浆能够结晶分离和演化吗? [J]. 岩石矿物学杂志, 2012, 31(2): 252-260.
- ZHANG Qi. Could Granitic Magmas Experience Fractionation and Evolution? [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2012, 31(2): 252-260.
- [18] SCAILLET B, HOLTZ F, PICHAVANT M, et al. Viscosity of Himalayan Leucogranites: Implications for Mechanisms of Granitic Magma Ascent [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1996, 101(B12): 27691-27699.
- [19] PETFORD N. Rheology of Granitic Magmas During Ascent and Emplacement [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2003, 31: 399-427.
- [20] PENG J T, HU R Z, BURNARD P G. Samarium-neodymium Isotope Systematics of Hydrothermal Calcites from the Xikuangshan Antimony Deposit (Hunan, China): The Potential of Calcite as a Geochronometer [J]. Chemical Geology, 2003, 200(1/2): 129-136.
- [21] BREITER K, LAMARÃO C N, BORGES R M K, et al. Chemical Characteristics of Zircon from A-type Granites and Comparison to Zircon of S-type Granites [J]. Lithos, 2014, 192/193/194/195: 208-225.
- [22] HU R Z, ZHOU M F. Multiple Mesozoic Mineralization Events in South China [J]. Mineralium Deposita, 2012, 47: 579-588.



- [23] YIN R, WANG R C, ZHANG A C, et al. Extreme Fractionation from Zircon to Hafnium in the Koktokay No. 1 Granitic Pegmatite, Altai, Northwestern China [J]. *American Mineralogist*, 2013, 98 (10): 1714-1724.
- [24] XU Y G, WANG R C, WANG C Y, et al. Highly Fractionated Granites and Rare-metal Mineralization [J]. *Lithos*, 2021, 398/399: 106262.
- [25] LI Z X, LI X H, WARTHON J A et al. Magmatic and Metamorphic Events During the Early Paleozoic Wuyi-Yunkai Orogeny, Southeastern South China: New Age Constraints and *P-T* Conditions [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2010, 122(5/6): 772-793.
- [26] 舒良树, 于津海, 贾东, 等. 华南东段早古生代造山带研究 [J]. *地质通报*, 2008, 27(10): 1581-1593.  
SHU Liang-shu, YU Jin-hai, JIA Dong, et al. Early Paleozoic Orogenic Belt in the Eastern Segment of South China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27 (10): 1581-1593.
- [27] 舒良树, 陈祥云, 楼法生. 华南前侏罗纪构造 [J]. *地质学报*, 2020, 94(2): 333-360.  
SHU Liang-shu, CHEN Xiang-yun, LOU Fa-sheng. Pre-Jurassic Tectonics of the South China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(2): 333-360.
- [28] FAURE M, SHU L S, WANG B, et al. Intracontinental Subduction: A Possible Mechanism for the Early Palaeozoic Orogen of SE China [J]. *Terra Nova*, 2009, 21(5): 360-368.
- [29] FAURE M, NGUYEN V V, THU H, et al. Early Paleozoic or Early-Middle Triassic Collision Between the South China and Indo China Blocks: The Controversy Resolved? Structural Insights from the Kon Tum Massif (Central Vietnam) [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 166: 162-180.
- [30] WAN Y S, LIU D Y, WILDE S M, et al. Evolution of the Yunkai Terrane, South China: Evidence from SHRIMP Zircon U-Pb Dating, Geochemistry and Nd Isotope [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2010, 37 (2): 140-153.
- [31] WANG Y J, FAN W M, ZHAO G C, et al. Zircon U-Pb Geochronology of Gneissic Rocks in the Yunkai Massif and Its Implications on the Caledonian Event in the South China Block [J]. *Gondwana Research*, 2007, 12(4): 404-416.
- [32] WANG Y J, ZHANG A M, FAN W M, et al. Kwang-sian Crustal Anatexis Within the Eastern South China Block: Geochemical, Zircon U-Pb Geochronological and Hf Isotopic Fingerprints from the Gneissoid Granites of Wugong and Wuyi-Yunkai Domains [J]. *Lithos*, 2011, 127(1/2): 239-260.
- [33] WANG Y J, FAN W M, ZHANG G W, et al. Phanerozoic Tectonics of the South China Block: Key Observations and Controversies [J]. *Gondwana Research*, 2012, 23(4): 1273-1305.
- [34] WANG Y J, WU C M, ZHANG A M, et al. Kwang-sian and Indosinian Reworking of the Eastern South China Block: Constraints on Zircon U-Pb Geochronology and Metamorphism of Amphibolites and Granulites [J]. *Lithos*, 2012, 150: 227-242.
- [35] WANG Y J, HE H Y, GAN C S, et al. Petrogenesis of the Early Silurian Dashuang High-Mg Basalt-andesite-dacite in Eastern South China: Origin from a Palaeosubduction-modified Mantle [J]. *Journal of Geological Society*, 2018, 175(6): 949-966.
- [36] KONG H, WU J H, LI H, et al. Early Paleozoic Tectonic Evolution of the South China Block: Constraints from Geochemistry and Geochronology of Granitoids in Hunan Province [J]. *Lithos*, 2021, 380/381: 105891.
- [37] YAO W H, LI Z X, LI W X, et al. Post-kinematic Lithospheric Delamination of the Wuyi-Yunkai Orogen in South China: Evidence from ca. 435 Ma High-Mg Basalts [J]. *Lithos*, 2012, 154: 115-129.
- [38] ZHONG Y F, MA C Q, ZHANG C, et al. Zircon U-Pb Age, Hf Isotopic Compositions and Geochemistry of the Silurian Fengdingshan I-type Granite Pluton and Taoyuan Mafic-felsic Complex at the Southeastern Margin of the Yangtze Block [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 74: 11-24.
- [39] WANG Y J, ZHANG A M, FAN W M, et al. Origin of Paleosubduction-modified Mantle for Silurian Gabbro in the Cathaysia Block: Geochronological and Geochemical Evidence [J]. *Lithos*, 2013, 160/161: 37-54.
- [40] FENG S J, ZHAO K D, LING H F, et al. Geochronology, Elemental and Nd-Hf Isotopic Geochemistry of Devonian A-type Granites in Central Jiangxi, South China: Constraints on Petrogenesis and Post-collisional Extension of the Wuyi-Yunkai Orogeny [J]. *Lithos*, 2014, 206/207: 1-18.
- [41] ZHANG Q, JIANG Y H, WANG G C, et al. Origin of Silurian Gabbros and I-type Granites in Central Fujian, SE China: Implications for the Evolution of the Early Paleozoic Orogen of South China [J]. *Lithos*, 2015, 216/217: 285-297.
- [42] JIA X H, WANG X D, YANG W Q. Petrogenesis and Geodynamic Implications of the Early Paleozoic Po-

- tassic and Ultrapotassic Rocks in the South China Block[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2017, 135: 80-94.
- [43] CAI D W, TANG Y, ZHANG H, et al. Petrogenesis and Tectonic Setting of the Devonian Xiqin A-type Granite in the Northeastern Cathaysia Block, SE China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2017, 141: 43-58.
- [44] 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. *岩石学报*, 2007, 23(6): 1217-1238.  
WU Fu-yuan, LI Xian-hua, YANG Jin-hui, et al. Discussions on the Petrogenesis of Granites[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(6): 1217-1238.
- [45] BONIN B. A-type Granites and Related Rocks: Evolution of a Concept, Problems and Prospects[J]. *Lithos*, 2007, 97(1/2): 1-29.
- [46] 周新民. 对华南花岗岩研究的若干思考[J]. *高校地质学报*, 2003, 9(4): 556-565.  
ZHOU Xin-min. My Thinking About Granite Geneses of South China[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2003, 9(4): 556-565.
- [47] 李 欢, 刘云华, 李 真, 等. 广西大瑶山大进花岗岩岩体的年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 2016, 39(1): 29-37.  
LI Hua, LIU Yun-hua, LI Zhen, et al. Geochemical Characteristics and Geological Significance of Granite Geochronology in Dayao Mountain Guangxi[J]. *Journal of East China University of Technology (Natural Science)*, 2016, 39(1): 29-37.
- [48] 熊松泉, 康志强, 冯佐海, 等. 广西大瑶山地区大进岩体的锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其意义[J]. *桂林理工大学学报*, 2015, 35(4): 736-746.  
XIONG Song-quan, KANG Zhi-qiang, FENG Zuo-hai, et al. Zircon U-Pb Age and Geochemistry of Dajin Granitic Pluton in Dayaoshan Area, Guangxi[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2015, 35(4): 736-746.
- [49] LI X F, YU Y, WANG C Z. Caledonian Granitoids in the Jinxiu Area, Guangxi, South China: Implications for Their Tectonic Setting[J]. *Lithos*, 2017, 272/273: 249-260.
- [50] 广西壮族自治区地质矿产局. 1: 50 000 桐木幅、头排幅、罗秀幅、金秀瑶族自治县幅区域地质调查报告[R]. 南宁: 广西壮族自治区地质矿产局, 1988.  
Guangxi Bureau of Geology and Mineral Resources. 1: 50 000 Regional Geological Survey Report of Tongmu, Toupai, Luoxiu and Jinxiu Yao Autonomous County Sheets[R]. Nanning: Guangxi Bureau of Geology and Mineral Resources, 1988.
- [51] YUAN H L, GAO S, LIU X M, et al. Accurate U-Pb Age and Trace Element Determinations of Zircon by Laser Ablation-inductively Coupled Plasma-mass Spectrometry[J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 2004, 28(3): 353-370.
- [52] LIU Y S, HU Z C, GAO S et al. *In-situ* Analysis of Major and Trace Elements of Anhydrous Minerals by LA-ICP-MS Without Applying an Internal Standard [J]. *Chemical Geology*, 2008, 257(1/2): 34-43.
- [53] ANDERSEN T. Correction of Common Lead in U-Pb Analyses That Do Not Report  $^{204}\text{Pb}$  [J]. *Chemical Geology*, 2002, 192(1/2): 59-79.
- [54] LUDWIG K R. User's Manual for Isoplot 3. 00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel [R]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center, 2003.
- [55] BLICHERT-TOFT J, ALBAREDE F. The Lu-Hf Isotope Geochemistry of Chondrites and the Evolution of the Mantle-crust System[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1997, 148(1/2): 243-258.
- [56] GRIFFIN W L, PEARSON N J, BELOUSOVA E, et al. The Hf Isotope Composition of Cratonic Mantle: LAM-MC-ICPMS Analysis of Zircon Megacrysts in Kimberlites [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64(1): 133-147.
- [57] 刘建辉. SHRIMP 锆石铀-铅同位素定年中普通铅  $^{204}\text{Pb}$  对实验结果的影响[J]. *岩矿测试*, 2012, 31(4): 597-601.  
LIU Jian-hui. SHRIMP Zircon U-Pb Dating: Effects of Common  $^{204}\text{Pb}$  on the Result[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2012, 31(4): 597-601.
- [58] MIDDLEMOST E A K. Naming Materials in the Magma/Igneous Rock System [J]. *Earth-science Reviews*, 1994, 37(3/4): 215-224.
- [59] MANIAR P D, PICCOLI P M. Tectonic Discrimination of Granitoids[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1989, 101(5): 635-643.
- [60] PECCERILLO R, TAYLOR S R. Geochemistry of Eocene Calcalkaline Volcanic Rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1976, 58: 63-81.
- [61] TURNER S, ARNAUD N, LIU J, et al. Postcollision, Shoshonitic Volcanism on the Tibetan Plateau: Implications for Convective Thinning of the Lithosphere and Source of Ocean Island Basalts[J]. *Journal of Petrology*, 1996, 37(1): 45-71.
- [62] SUN S S, MCDONOUGH W F. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for

- Mantle Composition and Processes[J]. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42: 313-345.
- [63] KING P L, WHITE A J R, CHAPPELL B W. Characterization and Origin of Aluminous A-type Granites of the Lachlan Fold Belt, Southeastern Australia [J]. Journal of Petrology, 1997, 38(3): 371-391.
- [64] WHALEN J B, CURRIE K L, CHAPPELL B W. A-type Granites: Geochemical Characteristics, Discrimination and Petrogenesis[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1987, 95: 407-419.
- [65] WATSON E B, HARRISON T M. Zircon Saturation Revisited: Temperature and Composition Effects in a Variety of Crustal Magma Types[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1983, 64(2): 295-304.
- [66] LI X H, MCCULLOCH M T. Secular Variation in the Nd Isotopic Composition of Neoproterozoic Sediments from the Southern Margin of the Yangtze Block: Evidence for a Proterozoic Continental Collision in Southeast China[J]. Precambrian Research, 1996, 76(1/2): 67-76.
- [67] 耿红燕, 徐夕生, 赵明, 等. 粤西白垩纪火山-侵入岩浆活动及其地质意义[J]. 中国科学: D辑, 地球科学, 2006, 36(7): 601-617.
- GENG Hong-yan, XU Xi-sheng, ZHAO Ming, et al. Cretaceous Volcanic-intrusive Magmatism in Western Guangdong and Its Geological Significance[J]. Science in China, Series D, Earth Sciences, 2006, 36(7): 601-617.
- [68] 李光来, 华仁民, 胡东泉, 等. 赣南地区石雷石英闪长岩的成因: 岩石化学, 副矿物微量元素, 锆石 U-Pb 年代学与 Sr-Nd-Hf 同位素制约[J]. 岩石学报, 2010, 26(3): 903-918.
- LI Guang-lai, HUA Ren-min, HU Dong-quan, et al. Petrogenesis of Shilei Quartz Diorite in Southern Jiangxi: Constraints from Petrochemistry, Trace Elements of Accessory Minerals, Zircon U-Pb Dating, and Sr-Nd-Hf Isotopes[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(3): 903-918.
- [69] 沈渭洲, 张芳荣, 舒良树, 等. 江西宁冈岩体的形成时代, 地球化学特征及其构造意义[J]. 岩石学报, 2008, 24(10): 2244-2254.
- SHEN Wei-zhou, ZHANG Fang-rong, SHU Liang-shu, et al. Formation Age, Geochemical Characteristics of the Ninggang Granite Body in Jiangxi Province and Its Tectonic Significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(10): 2244-2254.
- [70] 程顺波, 付建明, 徐德明, 等. 桂东北大宁岩体锆石 SHRIMP 年代学和地球化学研究[J]. 中国地质, 2009, 36(6): 1278-1288.
- CHENG Shun-bo, FU Jian-ming, XU De-ming, et al. Zircon SHRIMP U-Pb Dating and Geochemical Characteristics of Daning Batholith in Northeast Guangxi [J]. Geology in China, 2009, 36(6): 1278-1288.
- [71] 程顺波, 付建明, 徐德明, 等. 湖南雪花顶花岗岩及其包体的地质地球化学特征和成因分析[J]. 大地构造与成矿学, 2009, 33(4): 588-597.
- CHENG Shun-bo, FU Jian-ming, XU De-ming, et al. Geochemical Characteristics and Petrogenesis of Xuehuading Granitic Batholiths and Its Enclaves, South China [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2009, 33(4): 588-597.
- [72] XIA Y, XU X S, ZOU H B, et al. Early Paleozoic Crust-mantle Interaction and Lithosphere Delamination in South China Block: Evidence from Geochronology, Geochemistry, and Sr-Nd-Hf Isotopes of Granites[J]. Lithos, 2014, 184/185/186/187: 416-435.
- [73] 葛文春, 李献华, 梁细荣, 等. 桂北元宝山宝坛地区约 825 Ma 镁铁-超镁铁岩的地球化学及其地质意义[J]. 地球化学, 2001, 30(2): 123-130.
- GE Wen-chun, LI Xian-hua, LIANG Xi-rong, et al. Geochemistry and Geological Implications of Mafic-ultramafic Rocks with the Ages of ~825 Ma in Yuanbaoshan-Baotan Area of Northern Guangxi [J]. Geochimica, 2001, 30(2): 123-130.
- [74] 葛文春, 李献华, 李正祥, 等. 龙胜地区镁铁质侵入体: 年龄及其地质意义[J]. 地质科学, 2001, 36(1): 112-118.
- GE Wen-chun, LI Xian-hua, LI Zheng-xiang, et al. Mafic Intrusions in Longsheng Area: Age and Its Geological Implications[J]. Chinese Journal of Geology, 2001, 36(1): 112-118.
- [75] MOECHEER D P, MCDOWELL S M, SAMSON S D, et al. Ti-in-zircon Thermometry and Crystallization Modeling Support Hot Grenville Granite Hypothesis [J]. Geology, 2014, 42(3): 267-270.
- [76] DAHLQUIST J A, ALASINO P H, BELLO C. Devonian F-rich Peraluminous A-type Magmatism in the Proto-Andean Foreland (Sierras Pampeanas, Argentina): Geochemical Constraints and Petrogenesis from the Western-central Region of the Achala Batholith [J]. Mineralogy and Petrology, 2014, 108(3): 391-417.
- [77] 王强, 赵振华, 熊小林, 桐柏—大别造山带燕山晚期 A 型花岗岩的厘定[J]. 岩石矿物学杂志, 2000, 19(4): 297-306.
- WANG Qiang, ZHAO Zhen-hua, XIONG Xiao-lin.

- The Ascertainment of Late Yanshanian A-type Granite in Tongbai-Dabie Orogenic Belt[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2000, 19(4): 297-306.
- [78] FROST C D, FROST B. On Ferroan(A-type) Granitoids; Their Compositional Variability and Modes of Origin[J]. *Journal of Petrology*, 2011, 52(1): 39-53.
- [79] BREITER K. Nearly Contemporaneous Evolution of the A- and S-type Fractionated Granites in the Krušnéhory/Erzgebirge Mts., Central Europe[J]. *Lithos*, 2012, 151: 105-121.
- [80] CHAPPELL B W. Aluminium Saturation in I- and S-type Granites and the Characterization of Fractionated Haplogranites[J]. *Lithos*, 1999, 46(3): 535-551.
- [81] 吴魏伟, 廖群安, 陈 帅, 等. 东准噶尔喀拉萨依高分异 A 型花岗岩岩石成因及其地质意义[J]. *地质通报*, 2015, 34(2): 385-399.
- WU Wei-wei, LIAO Qun-an, CHEN Shuai, et al. Petrogenesis and Geological Significance of Highly Fractionated A-type Granites in Kalasayi, East Junggar [J]. *Geological Bulletin of China*, 2015, 34(2): 385-399.
- [82] 孙佳琪, 夏群科, 朱孔阳. 赣杭裂谷带早白垩世高分异 A 型花岗岩的形成机制: 来自浙江九华山岩体长石和全岩地球化学的制约[C]// 中国地质学会. 2017 年中国地球科学联合学术年会. 北京: 中国地质学会, 2017: 410-413.
- SUN Jia-qi, XIA Qun-ke, ZHU Kong-yang. Formation Mechanism of the Early Cretaceous Highly Fractionated A-type Granites in Gan-Hang Rift Zone: Constraints from the Feldspar and Geochemistry of Jiuhuashan Pluton in Zhejiang Province[C]// Geological Society of China. 2017 Annual Meeting of Chinese Geoscience Union. Beijing: Geological Society of China, 2017: 410-413.
- [83] DALL'AGNOL R, FROST C D, RAMO O T. IGCP Project 510 "A-type Granites and Related Rocks Through Time": Project Vita, Results, and Contribution to Granite Research[J]. *Lithos*, 2012, 151: 1-16.
- [84] KLIMM K, HOLTZ F, JOHANNES W, et al. Fractionation of Metaluminous A-type Granites: An Experimental Study of the Wangrah Suite, Lachlan Fold Belt, Australia[J]. *Precambrian Research*, 2003, 124(2/3/4): 327-341.
- [85] 张芳荣, 舒良树, 王德滋, 等. 华南东段加里东期花岗岩类形成构造背景探讨[J]. *地学前缘*, 2009, 16(1): 248-260.
- ZHANG Fang-rong, SHU Liang-shu, WANG De-zi, et al. Discussions on the Tectonic Setting of Caledonian Granitoids in the Eastern Segment of South China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(1): 248-260.
- [86] YU P P, ZHANG Y Z, ZHOU Y Z, et al. Melt Evolution of Crustal Anatexis Recorded by the Early Paleozoic Baiyunshan Migmatite-granite Suite in South China[J]. *Lithos*, 2019, 332/333: 83-98.

## 《地球科学与环境学报》入选 Scopus 数据库

近日,《地球科学与环境学报》(*Journal of Earth Sciences and Environment*, JESE)被 Scopus 数据库收录。这将进一步提升我刊发表论文在国际上的显示度、传播力和影响力,为我刊国际化迈出重要一步。

Scopus 数据库由荷兰 Elsevier 公司于 2004 年推出,是规模最大的同行评议文献(科学期刊、书籍和会议记录)的摘要和引文数据库,提供全球科学、技术、医学、社会科学、艺术和人文等领域研究成果的全面概述,并提供跟踪、分析和可视化研究。该数据库收录了来自全球 5000 余家出版商发行的科技、医学和社会科学方面的 25100 多种期刊,被全球很多重要的学术排名机构作为学科产出及学科发展评估的主要数据来源。