

桂东北大宁岩体锆石 SHRIMP 年代学和地球化学研究

程顺波 付建明 徐德明 陈希清 马丽艳 王晓地 庞迎春

(宜昌地质矿产研究所, 湖北 宜昌 443003)

摘要: 大宁岩体位于扬子板块与华夏板块结合带, 岩性组合为二长闪长岩-花岗闪长岩-二长花岗岩-钾长花岗岩。岩体中广泛存在壳幔混合包体。本文利用锆石 SHRIMP-U-Pb 法, 获得大宁岩体成岩年龄上限为 (419.1 ± 6.4) Ma (MSWD=1.03), 属加里东晚期。岩体的地球化学研究显示, 大宁岩体属弱过铝高钾钙碱性岩石, 富大离子亲石元素和轻稀土, 显 Nb、Ba、Sr、Eu 组合异常。岩石具有较高的 I_{Sr} 值 (0.7112~0.7196), 较低的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 (-6.77~-7.53) 和 T_{DM} 值 (1.40~1.71 Ga)。结合邻区加里东花岗岩壳幔混合特征, 本文认为, 大宁岩体为幔源岩浆底侵诱发的下地壳变砂屑岩部分熔融形成, 形成过程中有显著的幔源组分加入。

关键词: 加里东; 大宁; 花岗岩; SHRIMP 测年; 地球化学特征

中图分类号: P597 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2009)06-1278-11

20 世纪 80 年代末, 随着板块构造学说的引入, 国内掀起了一场针对华南加里东期构造属性的大讨论, 产生的代表性观点有加里东期海沟-岛弧系^[1]、古生代多岛海^[2]、早古生代碰撞造山带^[3]等。其中的俯冲-碰撞造山理论, 对其后的加里东期花岗岩研究产生了深远的影响。如楼法生等^[4]认为赣中武功山地区山庄岩体产生于大陆边缘弧环境; 曾勇和廖群安^[5]提出西武夷山地区加里东造山作用经历了碰撞前-主碰撞-碰撞后伸展-走滑等 4 个阶段; 许德如等^[6]认为早古生代可能的陆-弧-陆碰撞是导致湘东板杉铺埃达克质花岗闪长岩产生的重要机制等。可是, 近年来不少的年代学研究将该体系重要支撑点——“加里东”蛇绿岩套和岛弧火山岩系归并入晋宁期^[7-8], 使华南加里东碰撞造山理论遭遇瓶颈问题。舒良树等^[9]进一步总结发现带内花岗岩以 S 型花岗岩为主, 沉积岩具有稳定大陆边缘的属性, 高压变质岩匮乏, 构造事件穿时性明显等, 并依此提出华

南加里东期为陆内褶皱造山带, 给学者从其他角度思考华南加里东造山过程提供了新的窗口。

大宁岩体是加里东期代表性花岗岩岩基之一, 位于扬子板块和华夏板块结合带, 因岩体哑铃柄部位两侧产有张公岭和龙水等金矿床(点)而备受瞩目^[10]。从上世纪 80 年代起, 就有多个地质单位和学者对其进行了详细的岩体地质工作和研究^[11-12], 主题涵盖花岗岩成因、花岗岩与成矿的关系和其中的暗色包体等方面^[10, 12-13]^①, 同时获得了 398~445 Ma 的成岩年龄^[13-14]^②。笔者在详细剖析前人资料后发现, 已有的“I 型”花岗岩成因^[12]支撑主要来自于矿物学和岩石学证据, 地球化学方面仅涉及主量元素, 缺乏微量元素和同位素方面的详细论证; 而且, 前人获得的岩体年龄数据主要是采用 K-Ar 和 Rb-Sr 法获得的。由于早期同位素实验室仪器设备、实验条件和技术方法的局限性, 不同实验室和方法之间所测得的年龄结果不能很好地吻合, 给精细厘定岩浆活动时代带

收稿日期: 2009-03-27; 改回日期: 2009-09-01

基金项目: 中国地质调查局地质大调查项目 (1212010533307、1212010813061) 资助。

作者简介: 程顺波, 男, 1983 年生, 助理研究员, 从事矿床学和地球化学研究; E-mail: chsb2007@qq.com。

① 广西地调院. 1:25 万贺州市幅区域地质调查报告. 2004: 187-211.

② 广西壮族自治区地质局. 1:20 万贺县幅区域地质矿产报告. 1985: 128.

来了一定的困难^[15]。据此,本文利用高精度锆石 SHRIMP U-Pb 测年,对大宁岩体成岩时代进行重新厘定,并在前人地球化学研究^[12-13]的基础之上补做部分地球化学测试,从花岗岩的源区出发,对岩体成因进行了探讨。

1 岩体地质概况

大宁岩体位于广西贺州市与广东省的交界处,呈 NW-SE 向带状分布,面积为 492 km²。岩体的北东侧为永和岩体、太保岩体及禾洞岩体,西侧为姑婆山岩体,南侧为连阳岩体,前两者侵入时代为中一晚志留世,后三者为晚侏罗世。大宁岩体侵入于寒武纪、震旦纪和南华纪的地层中(图 1)。

岩体主要由中粒斑状角闪石黑云母花岗闪长岩(S₃γδ),次为中粒斑状(角闪石)黑云母二长花岗岩(S₃ηγ)和中粒斑状黑云母角闪石石英二长闪长岩(S₃ηδ)组成,三者之间为渐变过渡关系。在岩体东南部南乡镇到福堂镇一带有较多钾长花岗岩(S₃γ)的岩株和岩脉出露。主要组成矿物为斜长石、钾长石与石英,次要矿物为黑云母和普通角闪石。斜长石呈灰白色,板状,多出现在岩石的基质中;常见钠长石双晶与卡钠复合双晶,环带结构不发育,An 值为 28~40,轻度绢云母化,并有蠕英石和净边现象。钾长

石为灰白到肉红色,厚板状,常呈斑晶出现,少量在基质中,镜下鉴定为微斜条纹长石;斑晶一般为 2×4~3×5 cm²,其中常见到斜长石、普通角闪石、黑云母和石英的包裹体。石英为无色,他形粒状,常呈聚粒结构,显波状消光。普通角闪石为黑色短柱状,2~3 mm,局部被绿泥石和绿帘石交代。黑云母为自形片状,一般在 1.5 mm 左右,轻度绿泥石化。副矿物组合简单,为锆石、榍石、磁铁矿、褐帘石、磷灰石等^[12]。

岩体内广泛分布着数量较多的细粒暗色闪长质包体,其形态各异,有浑圆状、长条椭圆状、不规则状等,直径一般为数十厘米。寄主岩石的钾长石斑晶常在暗色包体周围富集,部分横切包体和寄主岩石边界^[10]。从岩体边部至中心,包体的含量、大小及钾长石斑晶的含量均有明显增加,形成钾长石斑晶和包体的组合流面,并与寄主岩石的角闪石流线一起构成岩体的三维空间流形^[13]。

2 样品分析方法

本次研究采集的样品包括年龄样品 DN-1 (钾长花岗岩)和地球化学样品 DN-2-7 (花岗闪长岩),DN-1-5、DN-1-11、DN-4-4(钾长花岗岩),采样位置见图 1。

用于年龄测定的岩石样品破碎成粉末后,经人

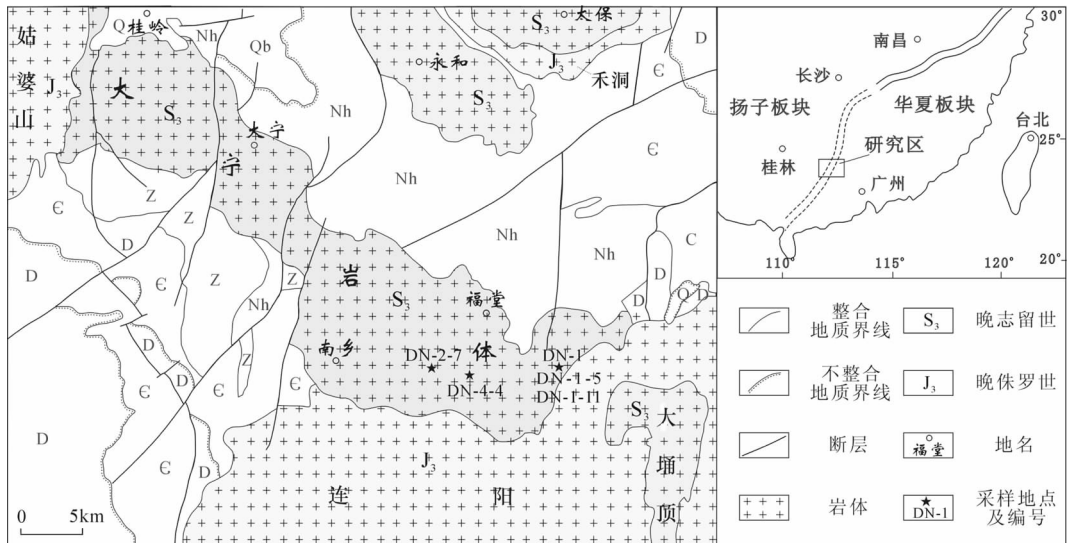


图 1 桂东北大宁岩体地质简图(据文献[10]修改)

Q—第四系;E—古近系;C—石炭系;D—泥盆系;ε—寒武系;Z—震旦系;Nh—南华系;Qb—青白口系

Fig.1 Simplified geological map of the Xuehuading batholith in northeastern Guangxi (modified from reference [10])

Q—Quaternary;E—Neogene;C—Carboniferous;D—Devonian;ε—Cambrian;Z—Sinian;Nh—Nanhuanian;Qb—Qingbaikouian System

① 广西地调院.1:25 万贺州市幅区域地质调查报告,2004.

工淘洗后保留重砂部分,将重砂部分进行电磁分选和重液分选,得到一定纯度的锆石样品,然后在双目镜下人工挑选出晶形完好、透明度高的锆石晶体。然后按照北京离子探针中心的要求进行样品靶制备和锆石 SHRIMP U-Pb 年龄测定。样品靶制备和实验条件见宋彪等^[16]的描述。制靶时,将待测样品与标准样品 TEM 一起安放。锆石阴极发光图像扫描和 SHRIMP U-Pb 年龄测定分别在中国地质科学院矿产资源研究所电子探针实验室和北京离子探针中心的 SHRIMP II 上进行。由 SHRIMP 得到的未知样品实验数据用与其同时测定的标准样品 (SL13 和 TEM) 的实验数据进行校正,其中 SL13 用于校正 U 含量,TEM 用于校正 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 比值。数据处理和 U-Pb 谐和图绘制使用 ISOPLOT 3.0 程序^[17-18]。样品 DN-1 的年龄测定结果见表 1。其每个点的数值是 5 次扫描的平均值,同位素质比为 1σ 相对误差,年龄值为 1σ 绝对误差, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值则是 95%置信度。

主元素分析在中国地质调查局宜昌地质矿产研究所中南检测中心完成,分析方法为:Si 和烧失量采用重量法;Al 和 Fe^{2+} 采用容量法; Fe^{3+} 、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。微量元素和稀土元素测试在中国科学院地球化学研究所测试分析中心完成,以 AMH-1 和 GBPC-1 为参考标样,相对偏差(RSD)均小于 10%。

Sr 和 Nd 同位素分析在中国地质调查局宜昌地质矿产研究所同位素实验室完成。全岩样品采用 HF+HClO₄ 混合酸进行分解,采用直径 6 mm、长

100 mm 的 Dowex 50×8 阳离子树脂交换柱,用 HCl 作为淋洗液分离 Rb、Sr 和 REE,Sm、Nd 的进一步分离采用直径 6 mm、长 120 mm 的 P₂₀₄ 萃淋树脂柱,用 HCl 作为淋洗液。全部化学分离流程均在超净化实验室中进行,全流程本底 Sr 为 $1\times 10^{-9}\text{g}$,Nd 为 $2.13\times 10^{-10}\text{g}$,质谱分析在 MAT261 多接收质谱仪上完成,用 $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=8.3752$ 和 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.7219$ 对 Sr 和 Nd 作质量分馏校正,计算机自动进行数据采集,采用美国标准样 NBS987(Sr)和本实验室标准样 ZkbzNd(Nd)监测仪器工作状态,国家一级标准物质 GBW 04411(Rb-Sr)和 GBW 04419(Sm-Nd) 监测分析流程。精度 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 优于 1%, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 优于 0.5%,衰变常数采用 $\lambda(^{87}\text{Rb})=1.42\times 10^{-11}\text{a}^{-1}$, $\lambda(^{147}\text{Sm})=6.54\times 10^{-12}\text{a}^{-1}$ 。地球化学参数计算与图解生成使用 GeoKit 软件^[19]完成。

3 锆石 SHRIMP 年代学

进行实验分析的锆石浅黄色,颗粒中等,粒径为 $30\times 100\mu\text{m}^2\sim 100\times 300\mu\text{m}^2$ 。形态较简单,以柱状为主,长宽比值为 1~4。颗粒晶形较好,柱面、锥面均可见。从被测锆石的阴极发光图像可以看出,所有锆石颜色略深,但都具有比较清晰的环带(图 2-b),Th/U 值也均大于 0.4,为典型的岩浆成因锆石^[20]。在 5 和 8 号锆石中存在老的继承核,已基本圆化,粒径不超过锆石直径的 1/2。1、3、6 和 9 号锆石边部有切割正常环带的条带状或斑点状高亮区域,说明样品受到了成岩后构造事件的影响^[20]。

本次测年共选取了 9 个测试点,其 SHRIMP

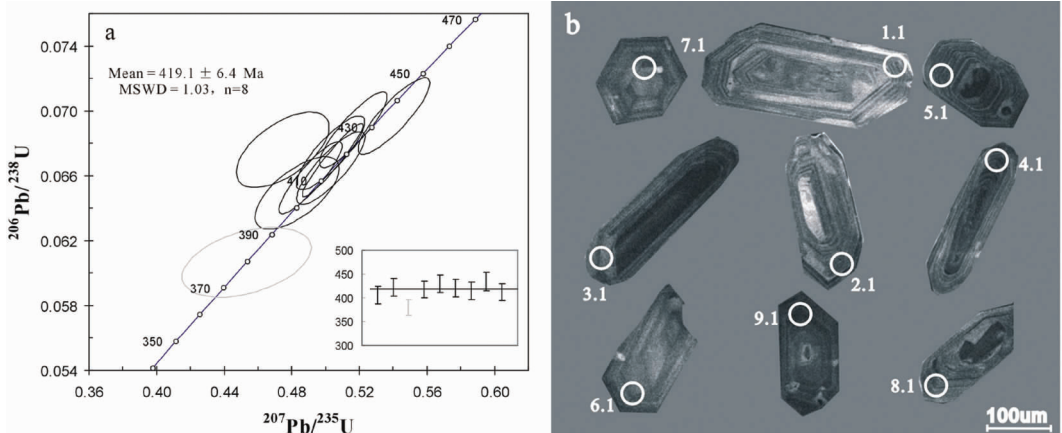


图 2 DN-1 样品锆石 SHRIMP U-Pb 年龄谐和图(a)和阴极发光图像(b)

Fig.2 SHRIMP U-Pb concordia diagram(a) and cathodoluminescence images(b) of zircons from sample DN-1

表 1 大宁岩体 DN-1 样品锆石 SHRIMP U-Pb 测试分析结果
Table 1 SHRIMP U-Th-Pb data of zircon sample DN-1 from Daning batholith

| 点号 | U /10 ⁻⁶ | Th /10 ⁻⁵ | ²³² Th/ ²³⁸ U | ²⁰⁶ Pb* /10 ⁻⁶ | ²⁰⁶ Pb ^c /1% | ²⁰⁷ Pb*/ ²³⁵ U* /1% | 误差 /1% | ²⁰⁶ Pb*/ ²³⁸ U | 误差 /1% | 误差 相关系数 | ²⁰⁶ Pb*/ ²³⁸ U 年龄 /Ma | 误差 /Ma |
|----------|------------------------|-------------------------|-------------------------------------|---|---------------------------------------|--|-----------|--------------------------------------|-----------|------------|--|-----------|
| DN-1-1.1 | 614.63 | 315.31 | 0.53 | 34.4 | 0.44 | 0.483 | 3.4 | 0.0649 | 2.3 | 0.666 | 405.6 | 8.9 |
| DN-1-2.1 | 623.13 | 293.65 | 0.49 | 36.4 | 0.51 | 0.475 | 3.8 | 0.0676 | 2.3 | 0.593 | 421.7 | 9.2 |
| DN-1-3.1 | 441.19 | 265.56 | 0.62 | 23.3 | 1.28 | 0.453 | 5.6 | 0.0607 | 2.3 | 0.419 | 379.6 | 8.6 |
| DN-1-4.1 | 2235.03 | 524.75 | 0.24 | 129 | 0.10 | 0.504 | 2.3 | 0.0670 | 2.2 | 0.949 | 417.8 | 9.0 |
| DN-1-5.1 | 996.73 | 651.18 | 0.68 | 59.0 | 0.14 | 0.516 | 2.5 | 0.0688 | 2.2 | 0.876 | 429.2 | 9.2 |
| DN-1-6.1 | 1002.86 | 1028.26 | 1.06 | 58.2 | 0.27 | 0.503 | 2.6 | 0.0674 | 2.2 | 0.840 | 420.5 | 9.1 |
| DN-1-7.1 | 1136.69 | 1323.09 | 1.20 | 65.1 | 0.28 | 0.503 | 2.7 | 0.0665 | 2.2 | 0.841 | 414.9 | 9.0 |
| DN-1-8.1 | 1044.57 | 756.55 | 0.75 | 62.6 | 0.19 | 0.541 | 2.6 | 0.0697 | 2.2 | 0.862 | 434.2 | 9.4 |
| DN-1-9.1 | 1450.07 | 1751.61 | 1.25 | 82.2 | 0.16 | 0.491 | 2.5 | 0.0659 | 2.2 | 0.887 | 411.2 | 8.8 |

注: Pb^c 为普通铅, Pb* 为放射成因铅。

U-Pb 年龄的分析结果见表 1。在 ²⁰⁷Pb/²³⁵U-²⁰⁶Pb/²³⁸U 图(图 2-a)上绝大多数样品投影点位于谐和曲线上或者附近,且比较集中,指示被测锆石同位素体系未受后期地质热事件的明显干扰。利用 8 个谐和分析数据获得 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为 (419.1±6.4)Ma(95%的置信度,MSWD=1.03)(图 2-a)。相比其他锆石颗粒,3 号测试点跨越岩浆锆石区和热液锆石区,其略低的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄(379.6 Ma)可能为混合年龄。

4 岩石地球化学特征

大宁岩体的主量和微量元素分析结果(表 2)显示:岩体的岩性略为复杂,导致其 SiO₂ 含量有较大变动,为 62.81%~76.88%。样品的碱含量普遍较高,(K₂O+Na₂O) 值为 6.50%~8.06%,K₂O/Na₂O 值大于 1; A/CNK 值介于 0.95~1.15,平均 1.06,总体属弱过铝质;F/(F+M)值为 0.65~0.87。在 SiO₂-(K₂O+Na₂O)图(图 3-a)上,所有样品都投影在亚碱性系列区;将亚碱性系列进一步分类,样品无一例外地分布在高钾钙碱性系列区(图 3-b)。在以 SiO₂ 为横坐标的 Harker 图解(图 4)上,大宁岩体各岩性相关性良好,随岩石酸性增加,Al₂O₃、Fe₂O₃、TiO₂、CaO、MgO 等元素含量有明显的下降趋势,而 Na₂O 基本保持不变。

绝大多数样品的稀土总量中等(ΣREE=(139.17×10⁻⁶~363.63)×10⁻⁶),具有轻-中等的铈负异

常(δEu=0.33~0.70),轻重稀土分馏中等偏低((La/Yb)_N=8.82~14.64)。所有样品都具有相似的稀土元素标准化分布型式,均呈右倾的配分曲线(图 5-b)。在微量元素上,相对于平均地壳丰度^[2],绝大多数样品大离子亲石元素 Rb、Ba、Th 和 U 含量偏高,Sr 含量明显偏低;高场强元素 Hf 含量高,Nb、Y 含量略低,Zr、Ta、Yb(1.69×10⁻⁶~3.49×10⁻⁶)上下振荡(表 2)。在微量元素蛛网图上(图 5-a),所有样品皆具有明显的 Ba、Sr、Nb 负异常。从早期的二长闪长岩到晚期的钾长花岗岩,样品 REE 和 HFSE 含量逐渐降低,很有可能是磷灰石、褐帘石等副矿物结晶分异的结果。样品 DN-4-4 与其他样品具有类似的稀土、微量元素配分型式,但其偏低的稀土总量和强烈的 Ba、Sr 负异常又与它们相区别,由于该样品为本期样品的酸性端元,因此它的离群特征可能为岩浆分异演化和后期蚀变联合作用的结果。

样品的 ¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd 比值介于 0.0815~0.1136,处在平均大陆上部地壳(0.118±0.034)的误差范围内^[23]。因此,样品的单阶段 Nd 同位素模式年龄(T_{DM})是有意义的,为了更准确地反映源区特征,同时计算了两阶段 Nd 同位素模式年龄(T_{2DM})。样品年龄取值 419.1Ma,计算结果(表 3)显示:样品的 I_{Sr} 值为 0.7112~0.7196,ε_{Sr}(t) 值为 102.2~221.9,ε_{Nd}(t) 值为 -6.77~-7.53,T_{DM} 为 1.40~1.71Ga。与华南古生代花岗岩的平均值(I_{Sr}=0.7128,ε_{Nd}(t)=-8.2,T_{DM}=1.84Ga)^[24]相比,样品的 I_{Sr} 值相似或者偏高,ε_{Nd}(t)

表 2 大宁岩体主量元素和微量元素分析结果
Table 2 Major elements and trace elements of Daning batholith

| 岩性 | 钾长花岗岩 | | | 二长花岗岩 | | 花岗闪长岩 | | 二长闪长岩 |
|------------------------------------|--------|---------|--------|---------|---------|--------|---------|---------|
| | DN-1-5 | DN-1-11 | DN-4-4 | 9063-1* | 5091-1* | DN-2-7 | 9084-2* | 9086-1* |
| SiO ₂ / % | 74.10 | 74.15 | 76.88 | 70.05 | 67.89 | 65.2 | 67.54 | 62.81 |
| TiO ₂ | 0.16 | 0.15 | 0.06 | 0.33 | 0.42 | 0.76 | 0.54 | 0.74 |
| Al ₂ O ₃ | 12.59 | 12.76 | 12.44 | 14.3 | 14.76 | 14.3 | 14.83 | 15.72 |
| Fe ₂ O ₃ | 0.58 | 0.59 | 0.56 | 0.59 | 1.12 | 0.91 | 0.91 | 1.48 |
| FeO | 1.75 | 1.60 | 1.15 | 1.75 | 2.15 | 4.45 | 2.72 | 3.85 |
| MnO | 0.03 | 0.03 | 0.02 | 0.06 | 0.06 | 0.08 | 0.06 | 0.12 |
| MgO | 0.53 | 0.33 | 0.06 | 0.73 | 1.37 | 2.36 | 1.57 | 2.78 |
| CaO | 0.83 | 0.81 | 0.36 | 1.60 | 2.76 | 3.51 | 2.27 | 3.15 |
| Na ₂ O | 2.81 | 2.72 | 3.53 | 3.11 | 3.28 | 2.88 | 2.89 | 3.06 |
| K ₂ O | 5.02 | 5.34 | 4.03 | 4.85 | 4.04 | 3.62 | 4.29 | 3.80 |
| P ₂ O ₅ | 0.05 | 0.04 | 0.01 | 0.08 | 0.12 | 0.22 | 0.15 | 0.21 |
| S (除水) | 98.45 | 98.52 | 99.1 | 97.45 | 97.97 | 98.29 | 97.77 | 97.72 |
| ALK | 7.83 | 8.06 | 7.56 | 7.96 | 7.32 | 6.50 | 7.18 | 6.86 |
| K ₂ O/Na ₂ O | 1.79 | 1.96 | 1.14 | 1.56 | 1.23 | 1.26 | 1.48 | 1.24 |
| A/CNK | 1.09 | 1.09 | 1.15 | 1.08 | 1 | 0.95 | 1.09 | 1.06 |
| F/F+M | 0.81 | 0.87 | 0.97 | 0.76 | 0.70 | 0.69 | 0.69 | 0.65 |
| Rb/10 ⁻⁶ | 249.7 | 284.9 | 334.8 | 208 | 181 | 214.4 | 177 | 171 |
| Sr | 78.91 | 80.62 | 14.51 | 103 | 173 | 172.4 | 142 | 147 |
| Ba | 421.1 | 585.6 | 9.41 | 729 | 773 | 827.6 | 827 | 671 |
| Th | 40.2 | 40.95 | 24.33 | 35.4 | 40.4 | 42.93 | 32.6 | 47.2 |
| U | 9.53 | 5.36 | 9.08 | 7.94 | 8.74 | 7.83 | 5.86 | 7.94 |
| Ta | 2.17 | 1.53 | 1.00 | 1.27 | 2.21 | 2.07 | 1.08 | 2.7 |
| Nb | 15.86 | 11.34 | 8.79 | 12.63 | 9.78 | 18.02 | 9.57 | 15.98 |
| Zr | 139.9 | 94.66 | 67.45 | 218 | 204 | 305.6 | 236 | 283 |
| Hf | 4.46 | 2.88 | 3.08 | 5.13 | 5.82 | 8.04 | 6.06 | 6.92 |
| Y | 26.03 | 16.24 | 5.72 | 26.79 | 17.5 | 29.88 | 20.32 | 33.3 |
| Nb/Ta | 7.3 | 7.44 | 8.78 | 9.94 | 4.43 | 8.71 | 8.86 | 5.92 |
| Zr/Hf | 31.36 | 32.91 | 21.93 | 42.5 | 35.05 | 38.01 | 38.94 | 40.9 |
| La/10 ⁻⁶ | 39.57 | 33.94 | 12.99 | 39.49 | 42.26 | 61.35 | 43.64 | 59.24 |
| Ce | 74.79 | 61.85 | 22.46 | 70.32 | 76.07 | 115.3 | 76.8 | 100.9 |
| Pr | 8.04 | 6.57 | 2.47 | 8.24 | 8.02 | 12.64 | 8.87 | 12.5 |
| Nd | 27.14 | 22.11 | 7.45 | 29.4 | 27.17 | 44.86 | 31.76 | 44.83 |
| Sm | 4.89 | 3.38 | 1.02 | 5.41 | 4.33 | 7.54 | 5.21 | 8.04 |
| Eu | 0.52 | 0.56 | 0.20 | 0.97 | 0.93 | 1.25 | 1.07 | 1.37 |
| Gd | 4.58 | 3.22 | 0.80 | 4.76 | 3.6 | 6.23 | 4.31 | 6.75 |
| Tb | 0.73 | 0.49 | 0.13 | 0.81 | 0.58 | 0.92 | 0.7 | 1.08 |
| Dy | 4.29 | 2.76 | 0.78 | 5.05 | 3.31 | 5.26 | 3.99 | 6.22 |
| Ho | 0.89 | 0.56 | 0.18 | 1.04 | 0.7 | 1.08 | 0.83 | 1.29 |
| Er | 2.57 | 1.54 | 0.61 | 3.01 | 2 | 3.06 | 2.33 | 3.53 |
| Tm | 0.43 | 0.25 | 0.12 | 0.5 | 0.33 | 0.49 | 0.37 | 0.55 |
| Yb | 2.99 | 1.69 | 0.97 | 3.21 | 2.07 | 3.15 | 2.35 | 3.49 |
| Lu | 0.48 | 0.27 | 0.19 | 0.5 | 0.34 | 0.49 | 0.37 | 0.54 |
| Σ REE | 171.91 | 139.17 | 50.39 | 172.71 | 171.71 | 263.63 | 182.6 | 250.33 |
| (La/Yb) _N | 9.49 | 14.39 | 9.58 | 8.82 | 14.64 | 13.95 | 13.32 | 12.18 |
| δ Eu | 0.33 | 0.51 | 0.67 | 0.57 | 0.7 | 0.54 | 0.67 | 0.55 |

注: * 数据引自广西地质调查院(2004)^①。

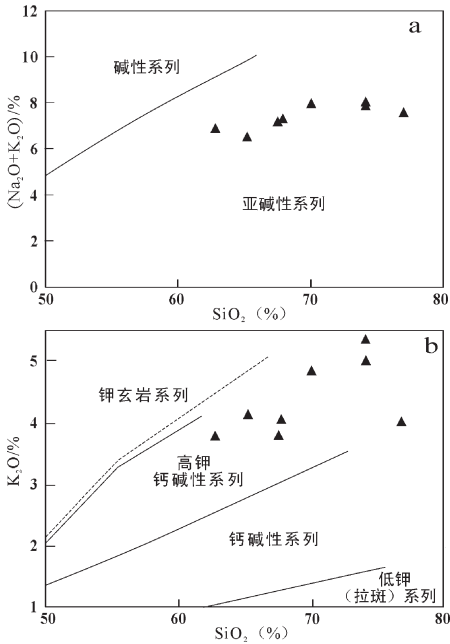


图 3 大宁花岗岩的 SiO_2 - $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ 图解(a)和 SiO_2 - K_2O 图解(b)
 Fig.3 SiO_2 - $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ diagram(a) and SiO_2 - K_2O diagram(b) of Daning batholith

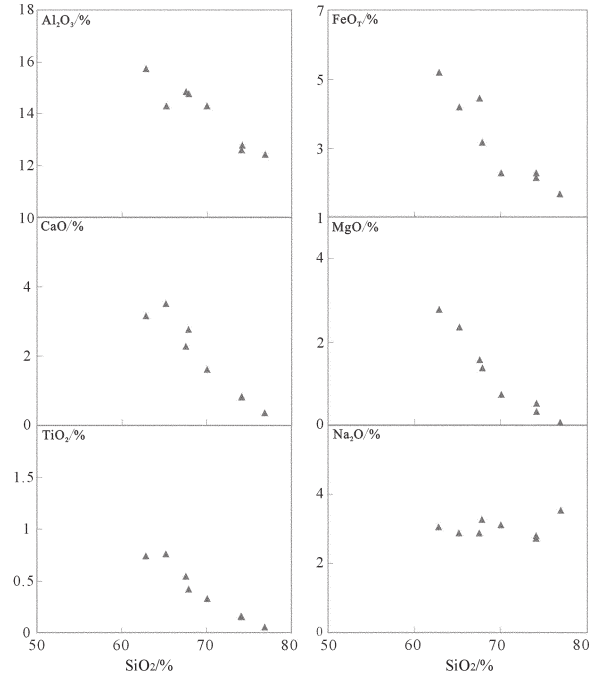


图 4 大宁岩体主量元素 Harker 图解
 Fig.4 Major elements Harker diagram of Daning batholith

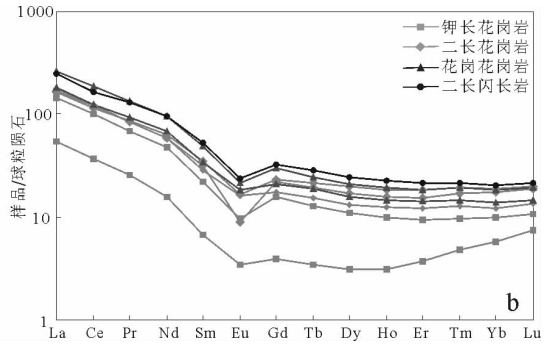
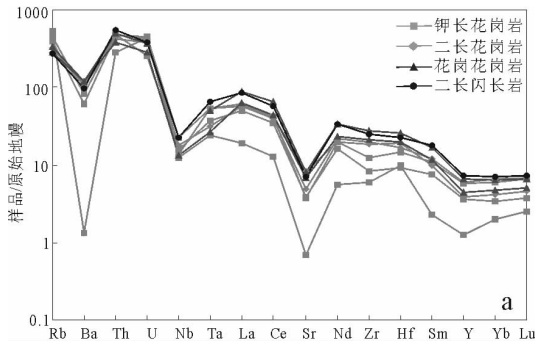


图 5 大宁岩体的微量元素蛛网图解(a)和稀土元素配分图解(b)
 (球粒陨石和原始地幔标准化值据 Sun S S and Mcdonough W F(1989)^[21])
 Fig.5 Primitive mantle-normalized spider diagram (a) and chondrite-normalized REE patterns of Daning batholith
 (Chondrite and PM standard from Sun S S and Mcdonough W F(1989)^[21])

值略高, T_{DM} 值比较稍低。在 $\epsilon \text{Sr}(t) - \epsilon \text{Nd}(t)$ 图中(图 6), 样品投影点比较分散, 总体呈较明显的水平方向展布, 并落入澳大利亚东南部 Lachlan 加里东造山带 S 型花岗岩 ($\epsilon \text{Sr}(t) = 77 \sim 204$, $\epsilon \text{Nd}(t) = -6.1 \sim -9.8$)^[25] 投影区, 显示地壳成因特征^[24]。

5 结果讨论

5.1 形成时代

笔者采用高精度的 SHRIMP 锆石 U-Pb 法, 对

大宁岩体晚期次钾长花岗岩的岩浆锆石进行了年龄测定, 获得了 $(419.1 \pm 6.4) \text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 1.03$) 的锆石结晶年龄, 从而限定了大宁岩体形成时代的上限。这与邻区雪花顶岩体 (432 Ma) ^[28]、桂东岩体 $(424 \sim 428 \text{ Ma})$ ^[29] 和汤湖岩体 (434 Ma) ^[30] 在误差范围内一致, 同属华南加里东晚期构造岩浆活动的产物。

5.2 花岗岩源区

从锆石的阴极发光图像来看, 有些锆石具有继承核; 样品碱质含量较高且 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} > 1$, 弱过铝质

表3 大宁岩体 Sr-Nd 同位素组成
Table 3 Nd-Sr isotopic composition of Daning batholith

| 样号 | t(Ma) | (⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr) _m | (⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) _m | 2σ | εSr(t) | I _{Sr} | (¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd) _m | (¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd) _m | 1σ | εNd(t) | (¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd) _i | T _{DM} (Ma) | T _{2DM} (Ma) |
|---------|-------|--|--|---------|--------|-----------------|--|--|----------|--------|--|----------------------|-----------------------|
| DN-1-5 | 419.1 | 9.896 | 0.77591 | 0.00004 | 182.3 | 0.7168 | 0.1136 | 0.51203 | 0.000008 | -7.42 | 0.512 | 1705 | 1763 |
| DN-1-11 | 419.1 | 10.95 | 0.78137 | 0.00002 | 170.5 | 0.716 | 0.1056 | 0.511992 | 0.000008 | -7.73 | 0.512 | 1632 | 1789 |
| DN-4-4 | 419.1 | 72.06 | 1.14975 | 0.00004 | 221.9 | 0.7196 | 0.0815 | 0.511936 | 0.000014 | -7.53 | 0.512 | 1400 | 1773 |
| DN-2-7 | 419.1 | 3.952 | 0.73479 | 0.00003 | 102.2 | 0.7112 | 0.1011 | 0.512029 | 0.000014 | -6.77 | 0.512 | 1517 | 1711 |

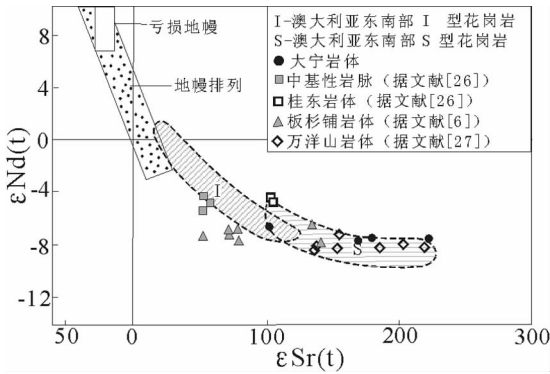


图6 大宁岩体 εNd(t)-εSr(t)相关关系图(底图据文献[26])
Fig.6 εNd(t)-εSr(t) diagram of Daning batholith (modified from reference [26])

(A/CNK 均值为 1.06);相比平均地壳丰度^[22],样品的大离子亲石元素(LILE)富集,高场强元素(HFSE)略为亏损,显示大宁岩体为地壳成因。原始地幔具有比较稳定的 Nb/Ta 值(17.8),在地幔熔融形成地壳过程中,由于相对富钽角闪石和榍石参加熔融,和以富 Nb 金红石作为难熔残留相,使 Nb/Ta 发生明显分馏,地壳岩石的 Nb/Ta 值明显下降至 11~12^[31]。大宁岩体的 Nb/Ta 值为 4.43~9.94,明显低于地壳平均值 11,也表明岩体的地壳来源。王德滋等^[32]指出,Rb 和 K 有相似的地球化学性质,随着壳幔的分离和陆壳的逐渐演化,Rb 富集于成熟度高的地壳中;Sr 和 Ca 有相似的地球化学行为,在成熟度低、演化不充分的地壳中富集。因此,Rb/Sr 值可以灵敏地记录源区物质的性质,当 Rb/Sr>0.9 时,为 S 型花岗岩;当 Rb/Sr<0.9 时,为 I 型花岗岩^[32]。大宁花岗岩的 Rb/Sr 值介于 1.05~3.53(DN-4-4 为离群值,不参入统计),表明其源区为演化充分的成熟陆壳。

饶家荣等(1993)^[33]对湖南境内岩石圈组成和结构研究表明,该区下地壳的纵波速度为 6.51 km/s,低于榴辉岩(>8.0 km/s)和石榴石麻粒岩(7.5~8.0

km/s),暗示本区下地壳成分可能为中酸性麻粒岩。大宁花岗岩同位素组成显示出高 Sr、低 Nd 特征,样品的 I_{Sr} 值、ε Sr(t) 值、ε Nd(t) 值总体与澳大利亚 Lanchlan 造山带 S 型花岗岩 (ε Sr(t) =77~ 204, ε Nd(t)=-6.1~-9.8)^[29] 和邻区万洋山复式岩体 S 型花岗岩 (ε Sr(t) =109.8~131.5, ε Nd(t)=-7.1~-8.3)^[27]类似,而与邻区同期板杉铺 I 型花岗岩 (ε Sr(t) =53~141, ε Nd(t)=-6.72~-7.98)^[6] 和诸广山中-基性岩脉 (ε Sr(t) =52.2~54.8, ε Nd(t)=-5.1~-6.9)^[26]相区别(图 6),很有可能为下地壳古老变沉积物重熔的产物。岩体的 T_{2DM} 为 1.71~1.79Ga,进一步揭示古元古代晚期地壳物质可能为大宁岩体的源区。

对于过铝质花岗岩,CaO/Na₂O 比值是判别源区成分的重要指标,泥质源区生成的花岗岩 CaO/Na₂O>0.3,而碎屑质源区生成的花岗岩 CaO/Na₂O>0.3^[34]。大宁岩体除 DN-4-4 外,其余样品 CaO/Na₂O 值 ≥0.3,在 Sylvester^[35]所提出的判别图解(图 7)上,主要落在澳大利亚 Lachlan 造山带内及

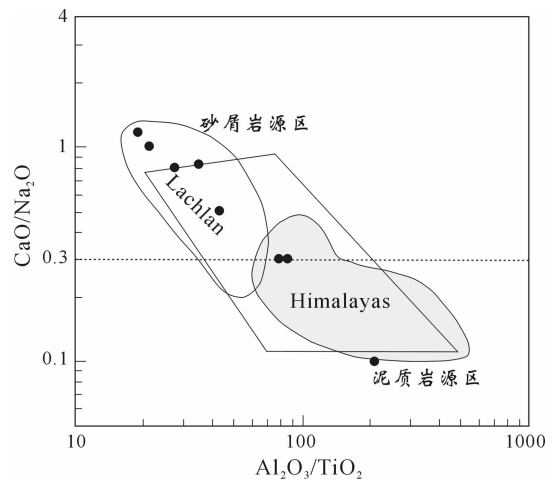


图7 大宁岩体的 CaO/Na₂O-Al₂O₃/TiO₂图解
(底图据文献[36])
Fig.7 CaO/Na₂O-Al₂O₃/TiO₂ diagram of Daning batholith (after reference [36])

其附近,指示大宁岩体起源于以碎屑岩为主的源区的部分熔融。同时,笔者还注意到,Sr、Eu 异常在大宁岩体早期次的二长闪长岩中就已经存在,岩石内斜长石主要以基质形式存在,说明在岩浆生成过程中没有发生明显斜长石的分离结晶作用,这种异常组合很有可能指示岩浆源区存在稳定的斜长石相,从而佐证了大宁岩体起源于碎屑岩源区。

5.3 壳幔相互作用及成因

张旗等^[17]指出,花岗质岩浆的黏度大,岩浆混合的能干性较差,如果发生壳幔混和作用,将会在生成的花岗岩中形成非常直观的岩相学证据,尤其是显微尺度(矿物和岩石结构)的混合证据。钟白云和骆靖中^[12]曾在大宁岩体哑铃柄部位发现丰富的、呈长条状-椭球状的暗色包体,其中含有寄主岩石的钾长石和石英斑晶。沙连堃和袁奎荣^[13]进一步发现,从岩体边部至中心,暗色包体的含量、大小均有明显增加,并与钾长石斑晶形成组合流面;包体中的斜长石明显分为两个时代,早世代呈中基性斜长石斑晶($An=40\sim 55$)出现,晚世代为钠更长石($An=5\sim 15$),呈基质出现;镜下可见大量针状磷灰石。暗色包体的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始值为 $0.7046\sim 0.7065$ ^[13],与寄主岩体的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始值($0.7112\sim 0.7196$)明显不同。这说明大宁岩体在岩浆形成过程中存在明显的壳幔相互作用。

大宁岩体的 $\varepsilon\text{Nd}(t)$ 值为 $-6.77\sim -7.53$,稍高于加里东期花岗岩 $\varepsilon\text{Nd}(t)$ 平均值(-8.2)^[24],也高于邻区同期万洋山 S 型花岗岩 $\varepsilon\text{Nd}(t)$ 值($-7.1\sim -8.3$);大宁岩体的 T_{DM} 为 $1.40\sim 1.71\text{Ga}$,低于华夏板块基底变质岩的 T_{DM} 值(主要为 $1.8\sim 2.26\text{Ga}$)^[38]和加里东期花岗岩 T_{DM} 平均值(1.84Ga)^[24]。陈江峰等^[38]在绘制华南地区花岗岩 Nd 同位素模式年龄分布图时,发现一条加里东期沿赣东北、湘南、粤西一线分布的低 T_{DM} 带。这条低 T_{DM} 值的花岗岩带理论上可以通过两种方式形成:其一为起源于年轻地壳物质的部分熔融,其二是成岩过程中有不同比例地幔物质的加入。由于本区基底岩系主要为古、中元古界^[24,38],不支持年轻地壳的存在,所以大宁岩体低的 T_{DM} 为成岩过程中地幔物质加入的重要表现。另外,大宁岩体早期次二长闪长岩-花岗闪长岩-二长花岗岩的 Zr/Hf 值变化于 $35.05\sim 42.50$,平均值为 39.08 ,高于原始地幔值(37.1)^[39],也指示在大宁岩体形成过程中存在明显的幔源组分的加入。

I-S 分类的贡献在于对不同花岗岩源区的鉴

别,I 型花岗岩源于硅镁质地壳,而 S 型花岗岩源于硅铝质地壳^[40]。但是,花岗岩成分是连续的,在各种端元之间存在很多过渡类型^[41]。早期钟白云和骆靖中(1983)^[13]根据岩性以花岗闪长岩为主,岩体内广泛发育壳幔混合包体,以及 $A/\text{CNK}<1.1$ 将大宁岩体归入 I 型花岗岩类。本文研究结果表明,大宁岩体锆石中存在较多继承核,地球化学上具有高 Rb/Sr 值以及高 Sr 低 Nd 的同位素组成,指示其为古元古代变沉积岩的部分熔融产物,明显带有 S 型花岗岩印记。将其归入 I 型花岗岩略显不妥,实际上它是介于 I 型和 S 型之间的过渡类型。

6 结论

大宁岩体为 I 型和 S 型之间的过渡类型,形成于 420Ma 左右,与湘南加里东晚期岩浆作用的的同时性和地球化学相似型,反映了它们在物质来源和成岩机制上的联系。

岩体的地球化学研究显示,大宁岩体属弱过铝高钾钙碱性岩石,富集大离子亲石元素和轻稀土,具 Nb、Ba、Sr、Eu 组合异常。高 Sr 低 Nd 的同位素组成说明大宁岩体主要来源于下地壳古元古代变砂屑岩的部分熔融,岩体内丰富的壳幔混合包体的存在指示在岩体形成过程中有显著的幔源组分加入。加里东晚期幔源岩浆底侵为花岗岩的形成提供了大量热和物质。

致谢:杨之青、刘建辉等实验室工作人员对本次锆石 SHRIMP 测试中给予了细心指导,审稿人和编辑对本文提出了宝贵的意见,在此一并表示感谢。

参考文献(References):

- [1] Guo Lingzhi, Shi Yangshen, Lu Huafeng, et al. The pre-Devonian tectonic patterns and evolution of South China [J]. *Journal of Southeast Asian Earth Science*, 1989, 3(1/4):87-93.
- [2] 殷鸿福,吴顺宝,杜远生,等. 华南是特提斯多岛洋体系的一部分 [J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 1999, 24(1):1-12.
Yin Hongfu, Wu Shunbao, Du Yuansheng, et al. South China defined as part of Tethyan archipelagic ocean system [J]. *Earth Science——Journal of China University of Geosciences*, 1999, 24(1): 1-12(in Chinese with English abstract).
- [3] 李继亮. 东南大陆岩石圈结构与地质演化[M]. 北京:冶金工业出版社, 1993:1-17.
Li Jiliang. *Texture of lithosphere and geological evolution of southeastern China*[M]. Beijing:Metallurgic Industry Press, 1993:1-17(in Chinese with English abstract).

- [4] 楼法生, 舒良树, 于津海, 等. 江西武功山穹窿花岗岩岩石地球化学特征与成因[J]. 地质论评, 2002, 48(1):80-88.
Lou Fasheng, Shu Liangshu, Yu Jinhai, et al. Petrological and geochemical characteristics and origin of the Wugongshan dome granite, Jiangxi [J]. Geological Review, 2002, 48 (1):80-88 (in Chinese with English abstract).
- [5] 曾勇, 廖群安. 西武夷地区加里东期花岗岩与造山过程 [J]. 中国区域地质, 2000, 19(4):344-349.
Zeng Yong, Liao Qun'an. Caledonian granite in the western Wuyi area and inversion of the orogenic process [J]. Regional Geology of China, 2000, 19(4):344-349 (in Chinese with English abstract).
- [6] 许德如, 陈广浩, 夏斌, 等. 湘东地区板杉铺加里东期埃达克质花岗岩闪长岩的成因及地质意义[J]. 高校地质学报, 2006, 12(4):507-521.
Xu Deru, Chen Guanghao, Xia Bin, et al. The Caledonian adakite-like granodiorite in Banshanpu area, eastern Hunan: Petrogenesis and geological significance [J]. Geological Journal of China Universities, 2006, 12(4):507-521 (in Chinese with English abstract).
- [7] Li Wuxian, Li Xianhua, Li Zhengxiang. Neoproterozoic bimodal magmatism in the Cathaysia block of South China and its tectonic significance[J]. Precambrian Research, 2005, 136(1):51-66.
- [8] 舒良树. 华南前泥盆纪构造演化: 从华南地块到加里东期造山带 [J]. 高校地质学报, 2006, 12(4):418-431.
Shu Liangshu. Predevonian tectonic evolution of south China from Cathaysian block to Caledonian period folded orogenic belt [J]. Geological Journal of China Universities, 2006, 12 (4): 418-431 (in Chinese with English abstract).
- [9] 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 Liangshu, Yu Jinhai, 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 (in Chinese with English abstract).
- [10] 王建辉. 大宁岩体的基本特征及其与成矿作用的关系[J]. 矿产与地质, 2006, 20(6):618-622.
Wang Jianhui. Relationship between basic characteristics of Daning pluton and its mineralization [J]. Mineral Resources and Geology, 2006, 20(6): 618-622 (in Chinese with English abstract).
- [11] 莫柱孙, 叶伯丹, 潘维祖. 南岭花岗岩地质学[M]. 北京: 地质出版社, 1980:66-74.
Mo Zhusun, Ye Bodan, Pan Weigu. The Geology Feature of Granitoids in Nanling Range [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1980:66-74 (in Chinese with English abstract).
- [12] 钟自云, 骆靖中. 大宁花岗岩闪长岩体的成因类型与地质特征[J]. 桂林工学院学报, 1983 (4):21-32.
Zhong Ziyun, Luo Jingzhong. Geological feature and genesis of Daling granodiorite [J]. Journal of Guilin Institute of Technology, 1983 (4):21-32 (in Chinese with English abstract).
- [13] 沙连堃, 袁奎荣. 广西大宁花岗岩闪长岩中暗色微粒包体的地球化学及成因模式[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1991, 16 (4): 377-386.
Sha Liankun, Yuan Kuirong. The geochemistry and genetic model of dark-colored microgranular enclaves in daning granodiorite batholith, Guangxi[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 1991, 16 (4): 377-386 (in Chinese with English abstract).
- [14] 南京大学地质学系. 华南不同时代花岗岩类及其与成矿关系 [M]. 北京: 科学出版社, 1981: 49-59.
Geology Department of Nanjing University. Temporal distribution of granitoids and their metallogenic affinity of South China [M]. Beijing: Science Press, 1981:49-59 (in Chinese with English abstract).
- [15] 李华芹, 王登红, 梅玉萍, 等. 广西大厂拉么锌铜多金属矿床成岩成矿作用年代学研究[J]. 地质学报, 2008, 82(7):912-920.
Li Huaqin, Wang Denghong, Mei Yuping, et al. Lithogenesis and mineralization chronology study on the Lamo zinc-copper polymetallic ore deposit in Dachang orefield, Guangxi [J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82 (7): 912-920 (in Chinese with English abstract).
- [16] 宋彪, 张玉海, 万渝生, 等. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论[J]. 地质论评, 2002, 48(增刊):26-30.
Song Biao, Zhang Yuhai, Wang Yusheng, et al. Introduction of target making and analyze procedure of SHRIMP and geological explanation—a review[J]. Geological Review, 2002, 48(supp.): 26-30 (in Chinese).
- [17] Ludwig K R. Squid 1.02: A user's manual; Berkeley Geochronology Center Special Publication No. 2, 2001: 15-35.
- [18] Ludwig K R. Isoplot 3.0—A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Special Publication, 2003, (4):1-70.
- [19] 路远发. GeoKit: 一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包[J]. 地球化学, 2004, 33(5): 459-464.
Lu Yuanfa. GeoKit—A geochemical toolkit for Microsoft Excel [J]. Geochimica, 2004, 33 (5):459-464 (in Chinese with English abstract).
- [20] 吴元保, 郑永飞. 锆石成因矿物学和微量元素地球化学[J]. 科学通报, 2004, 49(16): 1589-1604.
Wu Yuanbao, Zheng Yongfei. Genetic mineralogy and trace element geochemistry of zircon[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(16): 1589-1604 (in Chinese with English abstract).
- [21] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. [C]//Saunders A D and Norry M J (eds.), Magmatism in ocean basins. London, Geological Society Special Publication, 1989, 42: 313-345.
- [22] Taylor S R. Abundance of chemical elements in the continental crust: a new table [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1964, 28 (8):1273-1285.
- [23] Jahn B M, Condie K C. Evolution of the Kaapvaal Craton as viewed from geochemical and Sm-Nd isotopic analyses of intracratonic pelites [J]. Geochim Cosmochim Acta, 1995, 59: 2239-2258.

- [24] 沈渭洲, 凌洪飞, 李武显, 等. 中国东南部花岗岩类 Nd-Sr 同位素研究[J]. 高校地质学报, 1999, 5(1): 22-32.
Shen Weizhou, Ling Hongfei, Li Wuxian, et al. Study on the Nd-Sr isotopic compositions in southeastern China [J]. Geological Journal of China Universities, 1999, 5 (1):22-32 (in Chinese with English abstract).
- [25] McCulloch M, Chappell B. Nd isotopic characteristics of S- and I-type granites [J]. Earth Planet Science Letters, 1982, 58(1):51-64.
- [26] 李献华, 桂训唐. 万洋山-诸广山加里东期花岗岩的物质来源—Sr-Nd-Pb-O 多元同位素体系示踪[J]. 中国科学(B辑), 1991, 5:533-540.
Li Xianhua, Gui Xuntang. Source rocks of Wanyangshan - Zhuguangshan Caledonian granitic Batholith, South China—evidence from Sr-Nd-Pb-O isotopic constraints [J]. Science in China(Series B), 1991, 5:533-540(in Chinese with English abstract).
- [27] 伍光英, 马铁球, 冯艳芳, 等. 南岭万洋山加里东期花岗岩地质地球化学特征及其成因[J]. 中国地质, 2008, 35(4):608-617.
Wu Guangying, Ma Tieqiu, Feng Yanfang, et al. Geological and geochemical characteristics and genesis of the Caledonian Wanyangshan granite in the Nanling range, Southeast China [J]. Geology in China, 2008, 35(4):608-617(in Chinese with English abstract).
- [28] 付建明, 马昌前, 谢才富, 等. 湖南九嶷山复式花岗岩体 SHRIMP 锆石定年及其地质意义 [J]. 大地构造与成矿学, 2004, 28 (4):370-378.
Fu Jiangming, Ma Changqian, Xie Caifu, et al. Zircon SHRIMP U-Pb dating of the Jiuyishan granite Complex and its geological significance, Hunan[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2004, 28 (4): 370-378(in Chinese with English abstract).
- [29] Li Xianhua. A comprehensive U-Pb, Sm-Nd, Rb-Sr and ^{40}Ar - ^{39}Ar geochronological study on Guidong Granodiorite, southeast China: Records of multiple tectonothermal events in a single pluton[J]. Chemical Geology, 1994, 115:283-295.
- [30] Li Xianhua, Tatsumoto M T, Premo W R, et al. Age and origin of the Tanghu granite, southeast China results from U-Pb single zircon and Nd isotopes[J]. Geology, 1989, 17:395-399.
- [31] 陈小明, 王汝成, 刘昌实, 等. 广东从化佛冈(主体)黑云母花岗岩定年和成因[J]. 高校地质学报, 2002, 8 (3):293-304.
Chen Xiaoming, Wang Rucheng, Liu Changshi, et al. Isotopic dating and genesis for the Fogang biotite granites of Conghua area, Guangdong [J]. Geological Journal of China University, 2002, 8 (3):293-304(in Chinese with English abstract).
- [32] 王德滋, 刘昌实, 沈渭洲, 等. 桐庐 I 和相山 S 型两类碎斑熔岩对比[J]. 岩石学报, 1993, 9 (1) : 44-53.
Wang Dezi, Liu Changshi, Shen Weizhou, et al. The contrast between Tonglu I-type and Xiangshan S-type clastoporphyritic lava[J]. Acta Petrologica Sinica, 1993, 9 (1):44-53(in Chinese with English abstract).
- [33] 饶家荣, 王纪恒, 曹一中. 湖南深部构造 [J]. 湖南地质, 1993, 7 (增刊):1-101.
Rao Jiarong, Wang Jiheng, Cao Yizhong. Deep structure in Hunan [J]. Hunan Geology, 1993, 7 (supplement):1-101(in Chinese).
- [34] Chapell B W, White A J R. I- and S-type granites in the Lachlan Fold Belt [J]. Transnation of Royal Society of Edinburgh: Earth Science, 1992, 83, 1-26.
- [35] Sylvester P J. Post-collisional strongly peraluminous granites [J]. Lithos, 1998, 45:29-44.
- [36] 王孝磊, 周金城, 邱检生, 等. 桂北新元古代强过铝花岗岩的成因: 锆石年代学和 Hf 同位素制约 [J]. 岩石学报, 2006, 22 (2): 326-342.
Wang Xiaolei, Zhou Jincheng, Qiu Jiansheng, et al. Petrogenesis of the Neoproterozoic strongly peraluminous granitoids from northern Guangxi: constrains from zircon geochronology and Hf isotopes[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22 (2):326-342 (in Chinese with English abstract).
- [37] 张旗, 潘国强, 李承东, 等. 花岗岩混合问题: 与玄武岩对比的启示——关于花岗岩研究的思考之一 [J]. 岩石学报, 2007, 23(5): 1141-1152.
Zhang Qi, Pan Guoqiang, Li Chengdong, et al. Granitic magma mixing versus basaltic magma mixing: New viewpoints on granitic magma mixing process; some crucial questions on granite study(1) [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23 (5): 1141-1152 (in Chinese with English abstract).
- [38] 陈江峰, 郭新生, 汤加富, 等. 中国东南地壳增长与 Nd 同位素模式年龄[J]. 南京大学学报, 1999, 35(6):649-658.
Chen Jiangfeng, Guo Xinsheng, Tang Jiafu, et al. Nd isotopic model ages; implications of the growth of the continental crust of southeastern China [J]. Journal of Nanjing University (Natural Science), 1995, 35(6):649-658(in Chinese with English abstract).
- [39] McDonough W F and Sun S S. The composition of the earth[J]. Chemical Geology, 1995, 120:223-253.
- [40] Clemens J D. S-type granitic magmas—petrogenetic issues, models and evidence[J]. Earth-Science Review, 2003, 61:1-18.
- [41] 马莫. V. 著, 袁廷佐译. 花岗岩岩石学与花岗岩问题[M]. 北京: 地质出版社, 1979:1-16.
Marmo V, translated by Yuan Tingzuo. Granite Petrology and Granite Prolem(Chinese edition)[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1979:1-16.

Zircon SHRIMP U–Pb dating and geochemical characteristics of Daning batholith in northeast Guangxi

CHENG Shun-bo, FU Jian-ming, XU De-ming,
CHEN Xi-qing, MA Li-yan, WANG Xiao-di, PANG Ying-chun

(Yichang Institute of Geology and Mineral Resource, Yichang 443003, Hubei, China)

Abstract: Daning batholith, located in the border area between Yangtze plate and Cathaysia plate, consists mainly of monzodiorite, granodiorite and monzogranite with minor granite. In this paper, zircon SHRIMP U–Pb dating and geochemical characteristics of Daning batholith are reported to discuss the magma source and genesis of this Caledonian intrusion in northern Guangxi of South China. Zircon SHRIMP U–Pb dating of the late stage granite yielded an age of (419.1 ± 6.4) Ma (MSWD=1.03), which provides the upper constraint of the batholith formation in Late Caledonian. The major element compositions show that the granites are weakly peraluminous and strongly potassic–calc–alkaline. Geochemical characteristics of the granites indicate that this pluton was derived from partial melting of metamorphosed feldspathic clastic lower crust. The granites are commonly enriched with large ion lithophile elements and light rare earth elements with high Rb/Sr and low Nb/Ta ratios, showing behaviors of high Sr and low Nd isotopic combination. However, T_{DM} of the granites are obviously lower than the average value of normal granite in this area, which is consistent with the regional linear distribution of lower T_{DM} of Caledonian granites. Combined with field observation of widely spread mafic microgranular enclaves in the batholith, the authors consider that an intense mantle–crust interaction probably occurred during the anatectic event in Late Caledonian. Mantle constituents were obviously involved in the formation of anatectite.

Key words: Caledonian; Daning; granite; SHRIMP U–Pb dating; geochemical characteristics

About the first author: CHENG Shun-bo, male, born in 1983, associate researcher, engages in the study of mineral deposit and geochemistry; E-mail: chsb2007@qq.com.