

# 广西大瑶山东南缘侏罗纪埃达克质花岗岩的特征、成因及构造意义

许 华, 韩淑朋, 钟锋运, 黄启明, 白 晓, 陈子龙

(广西区域地质调查研究院, 广西 桂林 541003)

**摘要:** 对钦杭结合带西南段大瑶山东南缘的中晚侏罗世埃达克质花岗岩(165~153 Ma)进行了岩石学、地球化学研究,并探讨了埃达克质和TTG岩类的特征属性。岩石SiO<sub>2</sub>含量63.76%~72.13%,总体具高Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>≥15%)、低MgO(<3%),亏损重稀土元素(HREE)、正Eu异常或弱的负Eu异常,低Y(≤18×10<sup>-6</sup>)和Yb(≤1.9×10<sup>-6</sup>),高Sr(>300×10<sup>-6</sup>)和Sr/Y值(>20)等埃达克岩独特的地球化学特征。结合区域构造演化分析认为,该侏罗纪埃达克质花岗岩形成于陆内伸展构造背景,为大陆板内加厚(隆起区)的下地壳底部岩石部分熔融的产物,属大陆板内环境I型花岗岩。具有类似于低镁安山岩/闪长岩系列(LMA)和镁安山岩/闪长岩系列(MA)两种高压型TTG亚类的属性,为古俯冲增生带下地壳弧型岩石熔融的继承性特征,与中生代古太平洋俯冲板片熔融过程无关,属非俯冲成因的埃达克/TTG岩类。其空间上与大瑶山东南缘早古生代俯冲增生带高度重合,且与早古生代TTG侵入岩组合紧密相邻,提示它们可能源自于早古生代洋壳俯冲带或大陆边缘弧下地壳玄武质岩石的部分熔融,因而具有洋俯冲成因的特征属性。

**关键词:** 侏罗纪花岗岩;埃达克质;TTG岩类;非俯冲成因;大瑶山东南缘

中图分类号:P588.12<sup>+1</sup>

文献标识码:A

文章编号:1000-6524(2021)06-1074-19

## Characteristics, petrogenesis and tectonic implications of the Jurassic adakitic granites at southeast edge of Dayao Mountain, Guangxi

XU Hua, HAN Shu-peng, ZHONG Feng-yun, HUANG Qi-ming, BAI Xiao and CHEN Zi-long

(Guangxi Institute of Regional Geological Survey, Guilin 541003, China)

**Abstract:** This paper presents the petrology and geochemistry of the middle-late Jurassic adakitic granites (165~153 Ma) in the southeast edge of Dayao Mountain in the southwestern part of the Qinhang junction zone, and discusses its characteristic attribute of adakitic and TTG rocks. The SiO<sub>2</sub> content of the rocks varies from 63.76% to 72.13%. The rocks show adakitic features with high Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(≥15%), low MgO(<3%), depleted HREE, positive Eu anomaly (some of them are weakly negative Eu anomaly), low Y(≤18×10<sup>-6</sup>) and Yb(≤1.9×10<sup>-6</sup>), high Sr(>300×10<sup>-6</sup>) and Sr/Y(>20). Combined with the study of regional tectonic evolution, it is considered that the Jurassic adakitic granite was formed in the intracontinental extensional tectonic setting, which is the product of partial melting of the thickened lower crust in the continental intraplate (uplift area), and belongs to the intracontinental non-arc environment I-type granite. The Jurassic adakitic granites are similar to the two high-pressure TTG subclasses of low-Mg andesite/diorite series (LMA) and Mg andesite/diorite series (MA). They are the inheritance

收稿日期:2021-05-09;接受日期:2021-09-24;编辑:尹淑苹

基金项目:中国地质调查局项目(1212011220240, 1212011120815);广西关键矿产资源深部勘查人才小高地基金课题

作者简介:许 华(1969-),男,硕士,教授级高级工程师,主要从事区域地质调查与研究工作, E-mail: xuhua88131@163.com。

characteristics of arc-type rocks melting in the lower crust of the Paleozoic subduction accretion zone, and belong to non-subduction genesis, which has nothing to do with the Mesozoic Paleo-Pacific subduction slab melting process. They are highly coincident with the early Paleozoic subduction accretion zone in the southern margin of Dayao Mountain, and closely adjacent to the early Paleozoic TTG intrusive rock assemblage, suggesting that they may have originated from the partial melting of basaltic rocks in the oceanic subduction zone or the lower crust of the continental margin arc in the early Paleozoic, so they have the characteristic attributes of oceanic subduction.

**Key words:** Jurassic granite; adakite; TTG; non-subduction origin; southeast edge of Dayao Mountain

**Fund support:** Project of China Geological Survey(1212011220240, 1212011120815); The Talent Highland for Deep Exploration of Key Mineral Resources in Guangxi

埃达克岩(adakite)最早是由美国学者 Defant 等(1990)提出的。原始定义是其具有独特的地球化学特征:  $\text{SiO}_2 \geq 56\%$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 15\%$ (很少低于此值)、 $\text{MgO} < 3\%$ (很少 $> 6\%$ ); 亏损重稀土元素(HREE)、低 Y 和 Yb(如  $\text{Yb} \leq 1.9 \times 10^{-6}$ 、 $\text{Y} \leq 18 \times 10^{-6}$ )、高 Sr( $> 400 \times 10^{-6}$ , 很少 $< 400 \times 10^{-6}$ )、一般具有正铷异常(少数具有极弱负铷异常); 为产生于岛弧环境由年轻( $\leq 25$  Ma)、热的俯冲板片部分熔融形成的一套中酸性岩浆岩组合(Defant and Drumond, 1990)。

板片熔融形成埃达克岩的概念提出之后, 研究者发现一些具有埃达克岩的地球化学成分特征的中酸性火成岩不一定产出在岛弧环境, 也不全是俯冲板片熔融产生的。如 Atherton 等(1993)注意到一些富钠的中酸性侵入岩也具有埃达克岩的组成特征, 但不是板片熔融的产物, 而提出是新底侵的玄武质下地壳部分熔融形成的。又如 Castillo 等(1999)指出菲律宾南部的一套具有埃达克岩成分特征的火山岩, 可能是玄武岩浆高压分异的产物。之后中国的科学家(如, 张旗等, 2001; 王强等, 2001)也发现中国东部的一些具有埃达克岩成分特征的中酸性火成岩, 是大陆下地壳物质部分熔融的产物。因此, 也有学者将具有埃达克质地球化学组成特征但不是板片熔融形成的火成岩统称为埃达克质岩(adakitic rock)。

埃达克质岩因具有独特的地球化学特征和独特的地球动力学意义而备受地学界的关注。近年来, 埃达克质岩的研究取得较大进展, 但关于埃达克质岩的成因机制及地球动力学背景仍存在较多争议(张旗等, 2001, 2020; 王强等, 2001, 2008, 2020;

杨文平等, 2005; 汪洋等, 2010; 许继峰等, 2014)。在钦-杭结合带北东段(赣-杭带)分布着众多中生代埃达克质岩体及与其有成因联系的大型铜铁金矿床(周永章等, 2012; 毛建仁等, 2013; 梁锦等, 2015)。但西南段(广西段)尚未见有埃达克质岩的相关报道。特别是广西侏罗纪花岗岩成因类型众多, 但以往研究报道的多以富碱的高钾钙碱性花岗岩和钾玄质侵入岩为主, 认为是华南岩石圈伸展-减薄的产物(李献华等, 1999; 华仁民, 2005; 朱金初等, 2006); 而同时期的一些富钠花岗岩因出露较少且分布局限, 以往研究较少, 仅仅将其归为普通的“钙碱性 I 型花岗岩”(广西区域地质调查研究院, 2017<sup>①</sup>), 其成因机制是伸展还是挤压(胡升奇等, 2013)尚存在疑义。

笔者在广西 1:25 万贵县幅区域地质调查(2010~2012)和广西区域地质志修编(2012~2014)的工作中发现, 在两广交界的广西大瑶山东南缘地区广泛发育的花岗岩株(脉)群中, 既有早古生代 TTG 侵入岩组合(许华等, 2012, 2016), 也有一些中晚侏罗世富钠的花岗闪长岩体, 二者在空间上相邻产出, 但彼此均为独立侵入体, 无相互侵入的接触关系。后者具高 Sr 和低 Y、Yb 特征, 明显区别于前者形成于早古生代活动陆缘弧的花岗岩组合, 也不同于桂东(南岭地区)和桂东南地区广泛发育的同时代(侏罗纪)的高钾钙碱性花岗岩和钾玄质侵入岩。本文对该系列侏罗纪富钠花岗岩(本文称“埃达克质花岗岩”)的岩石学、地球化学进行了系统研究, 并对其岩石成因、构造背景进行了探讨, 为华南地区燕山早期的构造-岩浆演化和成矿研究提供新的资料。

① 广西区域地质调查研究院. 2017. 广西区域地质志.

## 1 区域地质背景

大瑶山位于广西东部的两广交界地区(图1),面积近1 800 km<sup>2</sup>。是一个由南华系-寒武系组成的

隆起区,加里东期褶皱带广泛发育,其褶皱为紧密线状复式褶皱,构造线主要为东西向,局部北东向。在大地构造上属于湘桂断陷盆地之大瑶山隆起(潘桂棠等,2009)或大瑶山地体(郭令智等,1980)。

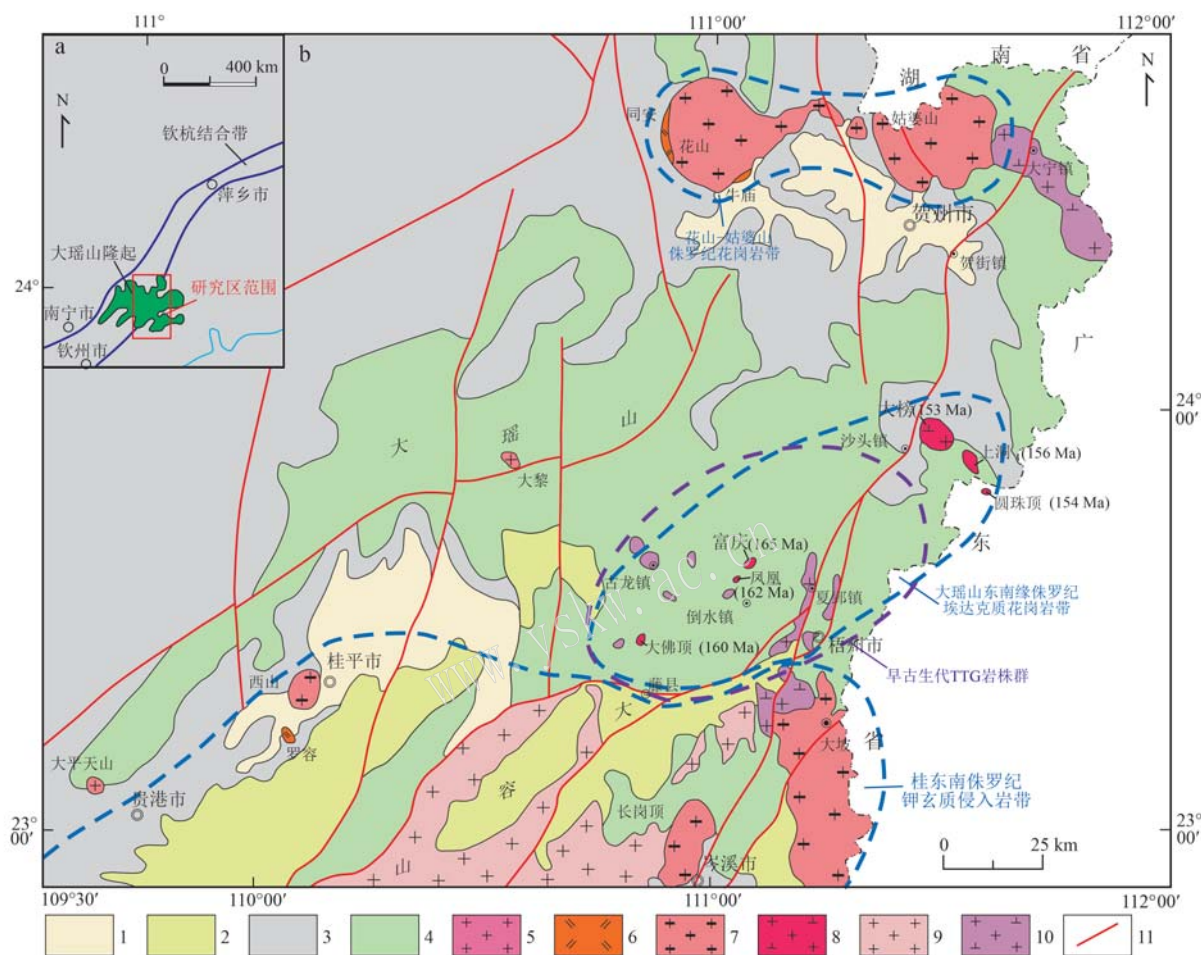


图1 大瑶山地区大地构造位置略图(a)和地质简图(b)(据广西区域地质调查研究院,2017<sup>①</sup>)

Fig. 1 Geotectonic location map (a) and simplified geological map (b) of Dayao Mountain area(after Guangxi Institute of Regional Geological Survey, 2017<sup>①</sup>)

- 1—新生界; 2—中生界; 3—上古生界; 4—新元古界-下古生界; 5—白垩纪花岗岩; 6—侏罗纪钾玄质侵入岩; 7—侏罗纪富碱花岗岩; 8—侏罗纪埃达克质花岗岩; 9—印支期花岗岩; 10—加里东期花岗岩; 11—断层
- 1—Cenozoic; 2—Mesozoic; 3—Upper Paleozoic; 4—Neoproterozoic-Lower Paleozoic; 5—Cretaceous granite; 6—Jurassic shoshonite intrusions; 7—Jurassic alkali-rich granite; 8—Jurassic adakitic granite; 9—Indosinian granite; 10—Caledonian granite; 11—fault

该地区在南华纪-志留纪时期是古南华洋盆的组成部分,沉积了一套巨厚的复理石、类复理石砂页岩、硅质岩建造,杂砂岩和含砾砂岩较多,鲍马层序特征明显。早奥陶世郁南运动该地区逐步抬升,致使奥陶纪时沉积环境发生了很大变化,甚至缺失

志留系。志留纪末,发生了强烈的广西运动(加里东造山旋回最重要的一幕构造运动),广西运动褶皱造山后遭受剥蚀。早泥盆世,海侵自西南往北东,本区开始接受晚古生代盖层沉积,下泥盆统滨岸相碎屑岩沉积不整合于寒武系之上,沿隆起周

① 广西区域地质调查研究院. 2017. 广西区域地质志.



边分布。印支期至喜山期均处于隆升状态,边缘有中生代断陷盆地分布。区域性大断裂博白-岑溪断裂带、灵山-藤县断裂带均于大瑶山东南缘苍梧一带汇合,而后往北东贺街-鹰扬关一带延伸(称梧州-贺街-鹰扬关断裂)。该断裂带也被认为是钦杭结合带广西段的东南边界,也是扬子克拉通与云开岛弧(华夏板块)汇聚碰撞带(潘桂棠等,2009;广西区域地质调查研究院,2017<sup>①</sup>)。

本区岩浆活动频繁,加里东期至喜山期均有岩浆活动。大瑶山隆起区主要发育有加里东期和燕山期岩浆活动,多呈规模大小不等的岩株(或岩脉)状星散或成群产出。前者岩石类型丰富多样,在大瑶山隆起区的东南缘形成以(辉长)闪长岩-石英闪长岩-英云闪长岩-斜长花岗岩(奥长花岗岩)-花岗闪长岩(+少量角闪石黑云二长花岗岩)组合的加里东期(475~432 Ma)岩浆岩带,具TTG侵入岩组合的特征(许华等,2016);后者包括燕山早、晚两期,燕山早期以中晚侏罗世富钠的英云闪长岩、斜长花岗岩(奥长花岗岩)、花岗闪长岩为主(即本文所称的“埃达克质花岗岩”),空间上与古龙-倒水-夏郢一带的早古生代TTG岩株群紧密相邻产出。燕山晚期以白垩纪花岗闪长岩、花岗岩等I型花岗岩为主,呈规模较小的岩株或岩脉状星散分布,代表性岩体有大黎、大平天山等岩体。

在大瑶山隆起区南侧的桂东南地区,广泛发育有呈北东向展布的十万大山-大容山印支期花岗岩带和燕山早期富碱花岗岩或钾玄质侵入岩带(李献华等,1999);北侧贺州-钟山地区发育有呈近东西向展布的花山-姑婆山燕山早期富碱的高钾钙碱性花岗岩带,也称为“A型花岗质杂岩带”(朱金初等,2006)。

## 2 岩石组合及时空分布特征

### 2.1 岩石组合及岩石学特征

侏罗纪埃达克质花岗岩主要分布于大瑶山隆起区东南缘的藤县大佛顶-梧州倒水-沙头镇一带(图1),由一系列富钠的花岗闪长岩体组成,包括有大佛顶、凤凰、富庆、大榜、上洞等5个侵入体,大致沿梧州-贺街-鹰扬关断裂呈北东向串珠状展布。岩体规模大小不等,西南部的大佛顶、凤凰、富庆等岩

体,地表出露面积仅0.6~1.2 km<sup>2</sup>,在古龙-倒水-夏郢一带与早古生代TTG岩株群相邻产出;东北部的上洞、大榜岩体出露面积较大,分别达到16.5 km<sup>2</sup>和60 km<sup>2</sup>,与粤西园珠顶铜钼矿床的侏罗纪花岗斑岩体(154 Ma,胡升奇等,2013)相邻。

岩体多侵入于寒武系砂、泥岩中,其中最北端的大榜岩体侵入至泥盆系碎屑岩中,岩体外接触带围岩均具热接触变质-角岩化。岩石组合为石英闪长岩-英云闪长岩-斜长花岗岩-花岗闪长岩组合,其中大佛顶岩体以中细粒英云闪长岩、石英闪长岩为主;凤凰、富庆岩体以中细粒斜长花岗岩、花岗闪长岩为主;大榜、上洞岩体以中细粒含角闪石黑云母花岗闪长岩为主,少量二长花岗岩和石英闪长岩。岩石中暗色包体不常见,偶见少量细粒暗色闪长质包体,个体较小。

主要岩石类型及岩石学特征:①英云闪长岩/石英闪长岩:浅灰色,中细粒结构,主要矿物成分为斜长石(60%~65%,体积分数)、石英(18%~22%)、钾长石(5%~7%)、普通角闪石(6%~9%)、黑云母(2%~6%)。斜长石为中长石( $An=31\sim36$ ),半自形板状晶体,略具环带结构;钾长石(主要为微斜长石)、石英呈他形充填于其间,普通角闪石呈半自形长柱状,黑云母鳞片多与普通角闪石相伴,但多已绿泥石化。常见于大佛顶岩体,以英云闪长岩为主,少量石英闪长岩。②斜长花岗岩/花岗闪长岩:浅灰白色,中细粒结构,主要矿物成分为斜长石(56%~60%)、石英(26%~28%)、钾长石(4%~6%)、黑云母(6%~8%)、白云母(1%±)。斜长石为中长石( $An=35\sim38$ ),呈半自形-他形,略具环带结构,多绢云母、绿帘石化;钾长石(主要为微斜长石)、石英呈他形充填于其间,黑云母较自形,多绿泥石化。常见于凤凰、富庆岩体,以斜长花岗岩(奥长花岗岩)为主,少量花岗闪长岩。③含角闪石黑云母花岗闪长岩/二长花岗岩:浅灰白色,中细粒花岗结构,主要矿物成分为斜长石(38%~46%)、钾长石(17%~22%)、石英(25%~30%)、黑云母(3%~6%),角闪石(1%±)。斜长石为中长石或更长石( $An=21\sim39$ ),呈半自形-自形板状,聚片双晶、环带结构发育;钾长石主要为微斜长石,呈他形-半自形板状,具钠长石显微条纹及不明显的格子双晶;石英呈他形粒状充填于长石间。常见于上洞、大榜

① 广西区域地质调查研究院,2017. 广西区域地质志.



岩体,以花岗闪长岩为主,含少量二长花岗岩和石英闪长岩。

## 2.2 时空分布特征

大瑶山东南缘埃达克质花岗岩体的形成年龄165~153 Ma(表1),其中,西南部的大佛顶、凤凰、富庆等岩体可能形成稍早(165~160 Ma),而东北部的大榜、上洞岩体稍晚(156~153 Ma)。从区域上现有高精度同位素年龄资料看(表1),广西侏罗纪

花岗岩的形成年龄主要集中于165~151 Ma,其中以163 Ma左右(即中、晚侏罗世之交)的花岗岩体居多,区域上华南陆壳重熔型花岗岩最广泛发育,与其侵位的时期(160 Ma左右;华仁民,2005)基本吻合。而且,埃达克质花岗岩与隆起区南、北两侧的花山-姑婆山花岗岩带及桂东南钾玄质侵入岩带在形成时间上也基本一致,均形成于燕山早期(即中、晚侏罗世之交)。

表1 大瑶山东南缘及相邻地区侏罗纪花岗岩体同位素年龄一览表

Table 1 The geochronological data of the Jurassic granites from the southeast edge of Dayao Mountain and adjacent area

岩浆岩带	岩体	岩性	年龄/Ma	测试方法及测试对象	资料来源
大瑶山东南缘埃达克质花岗岩带	大佛顶	英云闪长岩	160.2±1.2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	时毓,于津海*
	富庆	斜长花岗岩	165±2.6	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	陈懋弘等,2015
	凤凰	斜长花岗岩	162.6±1.1	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	
	大榜	花岗闪长岩	156.5±3.8	SHRIMP 锆石 U-Pb	广东省地质调查院,2012 <sup>①</sup>
	大榜	花岗闪长岩	153.3±2.3	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	广西区域地质调查研究院,2020 <sup>②</sup>
	上洞	花岗闪长岩	156.0±1.5	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	
	圆珠顶	花岗斑岩	154.3±1.7	SHRIMP 锆石 U-Pb	胡升奇等,2013
花山-姑婆山花岗岩带	花山	角闪黑云二长花岗岩	162±1.0	SHRIMP 锆石 U-Pb	朱金初等,2006
	牛庙	辉石闪长岩	163±4	SHRIMP 锆石 U-Pb	
	同安	石英二长岩	160±4	SHRIMP 锆石 U-Pb	
	里松	角闪黑云二长花岗岩	162±3	SHRIMP 锆石 U-Pb	
	姑婆山	黑云母二长花岗岩	163±4	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	
	新路	细粒花岗岩	151±6	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	
桂东南钾玄质侵入岩带	南渡	正长岩	162±1.0	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	陈新跃等,2013
	罗容	角闪辉石二长岩	163.40±0.40	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	广西区域地质调查研究院,2012 <sup>③</sup>
	马山	二长闪长岩	153.8±0.6	全岩 <sup>40</sup> Ar/ <sup>39</sup> Ar法	劳妙姬等,2015
	大坡	黑云母二长花岗岩	160±3	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	广东省地质调查院,2012 <sup>④</sup>
	清湖	石英二长岩	160±1.0	SIMS 锆石 U-Pb	李献华等,2009

注:\*数据由桂林理工大学时毓教授和南京大学于津海教授提供(未发表)。

从燕山早期花岗岩的空间分布及岩石组合上看,本区(也即是广西侏罗纪花岗岩的集中分布区)自北而南可划分为3条侏罗纪花岗岩带:①花山-姑婆山花岗岩带,产于大瑶山隆起北侧的凹陷区,沿中生代断陷盆地边缘发育,呈近东西向展布,以酸性富碱的高钾钙碱性花岗岩为主,少量中基性的碱性杂岩(牛庙、同安岩体),也称为“A型花岗质杂岩带”(朱金初等,2006);②大瑶山东南缘埃达克质花岗岩带,仅局限分布于大瑶山隆起区东南缘,沿梧州-贺街断裂呈北东向串珠状展布,岩体规模较小,以富钠的花岗闪长岩、英云闪长岩或斜长

花岗岩为主;③桂东南钾玄质侵入岩带,分布于大瑶山隆起南侧的桂东南地区,沿北东向中生代断陷盆地及深大断裂带产出,由南而北发育有香山、清湖、马山、罗容、南渡等碱性杂岩体以及西山、杨梅、长岗顶、大坡等壳-幔相互作用形成的浆混花岗岩体。

花山-姑婆山花岗岩带及桂东南钾玄质侵入岩带的岩石类型众多,既有酸性的富碱高钾钙碱性花岗岩(二长花岗岩-正长花岗岩组合),也有中基性的碱性杂岩(二长闪长岩-二长岩-正长岩组合为主,极少量辉石岩、辉长岩)。它们既有呈独立的侵入杂

① 广东省地质调查院. 2012. 1:25 万梧州幅区域地质调查报告.

② 广西区域地质调查研究院. 2020. 1:5 万樟木街幅区域地质调查报告.

③ 广西区域地质调查研究院. 2012. 1:25 万贵县幅区域地质调查报告.

④ 广东省地质调查院. 2012. 1:5 万大坡幅区域地质调查报告.

岩体产出, 也有相互共生呈复式岩体产出(如花山、姑婆山复式岩体), 有的则由中基性钾玄质岩浆与酸性高钾钙碱性岩浆混合而形成典型的浆混花岗岩(如西山、里松等岩体)。而埃达克质花岗岩仅局限分布于大瑶山隆起区东南缘, 多呈独立侵入体产出, 与同时期的富碱高钾钙碱性花岗岩、钾玄质侵入岩等没有紧密的共生关系, 空间上与早古生代 TTG 岩株群紧密相邻。

### 3 测试方法

选取新鲜的代表性岩石进行岩石地球化学测试。共对 5 个岩体采集主、微量元素分析样品 9 件, 基本涵盖了各侵入体不同岩性的代表性岩石(表 2)。岩石样品风化程度较低, 新鲜且无氧化、无污染、无明显的蚀变。

表 2 大瑶山东南缘侏罗纪埃达克质花岗岩主量元素 ( $w_B/\%$ ) 和微量元素 ( $w_B/10^{-6}$ ) 含量

Table 2 Major ( $w_B/\%$ ) and trace element ( $w_B/10^{-6}$ ) compositions of the Jurassic adakitic granites

侵入体	大佛顶	大佛顶	大佛顶	富庆	凤凰	大榜	大榜	大榜	大榜	上洞	上洞
岩性	石英闪长岩	英云闪长岩	英云闪长岩	斜长花岗岩	斜长花岗岩	花岗闪长岩	花岗闪长岩	花岗闪长岩	花岗闪长岩	花岗闪长岩	花岗闪长岩
样品编号	2277-1	DA-20-1*	LT-21-1*	富庆 6-1	凤凰 7-1	2001-2	2010-2	2012-2	2015-1	2026-1	上洞-1
SiO <sub>2</sub>	63.76	65.08	64.11	72.13	71.85	70.07	69.98	69.68	69.02	69.34	70.46
TiO <sub>2</sub>	0.38	0.41	0.34	0.24	0.31	0.43	0.33	0.27	0.37	0.45	0.41
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.85	17.75	17.82	15.38	15.02	14.76	15.39	15.75	15.07	15.39	14.98
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.48	3.36	3.26	0.18	0.77	1.39	1.11	1.22	1.14	1.45	1.24
FeO	1.63	-	-	1.25	1.40	1.65	1.48	1.05	1.72	1.65	1.48
MnO	0.07	0.08	0.08	0.03	0.05	0.05	0.04	0.04	0.05	0.04	0.05
MgO	0.87	0.87	0.90	0.69	1.04	1.40	0.95	0.99	1.49	1.21	1.08
CaO	4.72	4.30	4.07	1.55	2.56	2.25	2.52	2.21	2.91	1.71	2.07
Na <sub>2</sub> O	4.70	4.71	4.73	4.37	3.60	3.80	4.17	3.94	4.08	3.64	3.85
K <sub>2</sub> O	2.09	2.49	2.66	2.24	2.59	2.51	2.73	3.30	3.00	2.96	2.95
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.14	0.16	0.12	0.06	0.11	0.14	0.14	0.09	0.16	0.14	0.13
LOI	0.96	0.20	1.00	1.91	0.76	0.91	0.53	1.06	0.53	1.58	0.90
total	99.65	99.41	99.09	100.03	100.06	99.36	99.37	99.60	99.54	99.56	99.60
A/CNK	1.01	0.97	0.99	1.24	1.12	1.13	1.07	1.12	0.99	1.25	1.13
Mg <sup>#</sup>	34.39	33.95	35.40	46.56	47.01	46.27	40.61	45.13	49.19	42.22	42.61
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	2.25	1.89	1.78	1.95	1.39	1.51	1.53	1.19	1.36	1.23	1.31
C	0.58	-	0.01	3.13	1.90	2.04	1.31	1.90	0.17	3.46	2.00
Q	17.02	17.50	16.19	33.75	33.80	31.73	28.55	28.32	25.24	31.85	30.97
Or	12.51	14.82	16.01	13.48	15.40	15.06	16.31	19.78	17.89	17.84	17.65
Ab	40.29	40.16	40.79	37.68	30.67	32.65	35.69	33.82	34.86	31.43	33.00
An	22.89	20.09	19.88	7.51	12.11	10.50	11.81	10.59	13.63	7.82	9.63
La	17.50	25.97	18.53	14.00	12.70	49.55	35.90	35.45	38.25	43.08	37.31
Ce	32.89	52.38	37.90	21.20	22.20	74.72	59.54	73.35	65.04	71.70	64.24
Pr	4.18	5.71	4.32	2.88	2.77	8.38	6.20	6.97	7.21	7.85	7.14
Nd	16.06	21.72	16.18	10.90	11.00	26.93	20.32	23.14	24.51	26.01	24.47
Sm	3.19	4.13	3.08	1.80	2.28	3.70	3.07	3.58	3.84	3.69	3.94
Eu	0.99	1.17	0.93	0.55	0.75	0.95	0.75	0.90	0.89	1.00	0.96
Gd	2.41	3.47	2.60	1.16	1.97	3.13	2.57	3.05	2.98	2.70	3.48
Tb	0.36	0.48	0.35	0.17	0.35	0.45	0.34	0.41	0.45	0.37	0.48
Dy	1.97	2.61	1.93	0.81	1.86	2.36	1.88	2.21	2.33	1.88	2.57
Ho	0.38	0.51	0.36	0.12	0.32	0.46	0.35	0.42	0.44	0.35	0.48
Er	1.08	1.51	1.07	0.32	0.93	1.29	0.93	1.08	1.12	0.90	1.25
Tm	0.16	0.22	0.16	0.05	0.16	0.21	0.16	0.19	0.19	0.16	0.20
Yb	1.04	1.50	1.05	0.35	1.05	1.44	1.01	1.22	1.18	1.06	1.33

续表 2

Continued Table 2

侵入体	大佛顶	大佛顶	大佛顶	富庆	凤凰	大榜	大榜	大榜	大榜	上洞	上洞
岩性	石英闪长岩	英云闪长岩	英云闪长岩	斜长花岗岩	斜长花岗岩	花岗岩长岩	花岗岩长岩	花岗岩长岩	花岗岩长岩	花岗岩长岩	花岗岩长岩
样品编号	2277-1	DA-20-1*	LT-21-1*	富庆 6-1	凤凰 7-1	2001-2	2010-2	2012-2	2015-1	2026-1	上洞-1
Lu	0.15	0.23	0.16	0.05	0.15	0.24	0.15	0.19	0.17	0.15	0.20
Y	10.49	16.19	11.23	3.26	9.67	14.74	9.83	10.63	11.83	8.54	13.09
ΣREE	82.35	121.61	88.62	54.36	58.49	173.81	133.17	152.16	148.60	160.9	148.05
L/HREE	9.92	10.55	10.54	16.96	7.62	17.14	17.02	16.35	15.77	20.25	13.82
(La/Yb) <sub>N</sub>	12.04	12.42	12.66	28.86	8.68	24.68	25.50	20.84	23.25	29.15	20.12
δEu	1.05	0.92	0.98	1.10	1.06	0.83	0.79	0.81	0.78	0.93	0.78
Rb	58.30	68.13	86.05	67.30	87.10	116.70	89.51	107.02	97.38	112.79	105.16
Nb	7.23	8.99	7.34	4.08	5.85	14.19	9.98	12.08	10.78	10.83	13.47
Ta	0.91	0.51	0.41	0.19	0.42	1.30	0.97	1.51	1.29	1.01	1.47
Pb	13.70	13.10	14.53	26.50	19.40	29.18	24.67	44.80	33.41	21.9	26.52
Th	3.12	5.58	5.78	2.30	2.91	22.49	17.20	25.13	16.03	17.54	14.29
U	1.89	3.66	3.55	1.18	3.06	4.17	3.04	4.23	2.90	3.05	3.35
Sr	1 313	1 124	1 091	848	773	238	271	272	325	261	254
Ba	921	997	1 000	1 019	1 272	712	803	960	801	816	717
Zr	126	139	120	48	52	132	162	136	137	167	163
Hf	4.47	3.30	2.90	1.53	1.63	3.72	4.65	3.53	3.72	4.09	4.37
Cr	12.80	3.12	3.45	7.72	13.40	19.17	9.02	22.75	25.54	20.79	13.55
Ni	4.02	2.36	2.39	4.95	5.51	16.05	8.87	13.84	19.73	12.47	9.94
Nb/Ta	7.95	17.63	17.90	21.70	13.96	10.92	10.29	8.00	8.36	10.72	9.16
Rb/Sr	0.04	0.06	0.08	0.08	0.11	0.49	0.33	0.39	0.30	0.43	0.41

注: \* 数据由桂林理工大学时毓教授提供(未发表)。

主、微量及稀土元素分析测试由武汉综合岩矿测试中心完成。首先将样品粗碎至 2~4 cm, 采用 3%~5% 的稀盐酸经超声波清除表面杂质, 再碎至 200 目备用。全岩主量元素采用 X 射线荧光光谱法 (XRF) 分析 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、<sup>T</sup>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、MgO、K<sub>2</sub>O、Na<sub>2</sub>O、MnO、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、TiO<sub>2</sub> 等, 重铬酸钾滴定法分析 FeO, 高温加热-浓硫酸吸收-重量法分析 H<sub>2</sub>O<sup>+</sup>, 非水滴定容量法分析 CO<sub>2</sub>, 高温加热-重量法分析灼失量 (LOI), 分析精度优于 2%; 全岩稀土元素、微量元素采用电感耦合等离子体质谱法 (ICP-MS) 分析完成, Nb、Ta、Zr 和 Hf 的测试精度为 9%, 其它元素测试精度优于 5%。

#### 4 岩石地球化学特征

岩石主、微量元素含量及相关特征参数列于表 2。主、微量元素地球化学图件采用 GeoKit 软件 (路远发, 2004) 制作。

##### 4.1 主量元素特征

SiO<sub>2</sub> 含量为 63.76%~72.13%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量 14.76%

~18.85%, 其中以大佛顶岩体 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (17.75%~18.85%) 含量最高。总体上均具高 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 特征 (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ≥ 15%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 与 SiO<sub>2</sub> 呈负相关; 低 MgO (0.69%~1.49%)、CaO (1.55%~4.72%) 和低 Mg<sup>#</sup> 值 (33.95~49.19); 相对富 Na, Na<sub>2</sub>O (3.60%~4.73%) > K<sub>2</sub>O (2.09%~3.3%), Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O 值为 1.19~2.25, 部分岩体 (如大佛顶、富庆) 属钠质系列 (Na<sub>2</sub>O - 2.0 > K<sub>2</sub>O) 的火成岩类。在侵入岩 SiO<sub>2</sub> - (Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O) (TAS) 图解 (图 2) 中, 岩石主要落于花岗闪长岩区和花岗岩区, 均属于亚碱性系列, 岩石化学分类命名与镜下定名基本一致。在岩石化学系列 K<sub>2</sub>O - SiO<sub>2</sub> 图解 (图 3a) 中, 岩石主要落于中钾钙碱性系列, 少部分落于高钾钙碱性系列。

岩石铝饱和指数 A/CNK 值多接近于 1, 以偏铝质-弱过铝质为主 (图 3b), 部分为强过铝质 (A/CNK 值 > 1.1)。其 CIPW 标准矿物组合主要为铝过饱和类型 C+Q+Or+Ab+An+Hy 组合, 个别为正常类型 Q+Or+Ab+An+Di+Hy 组合。尽管 CIPW 标准矿物计算结果中大多数出现刚玉 (C), 但在其岩石矿物组成中, 一般极少见到过铝质标型矿物。



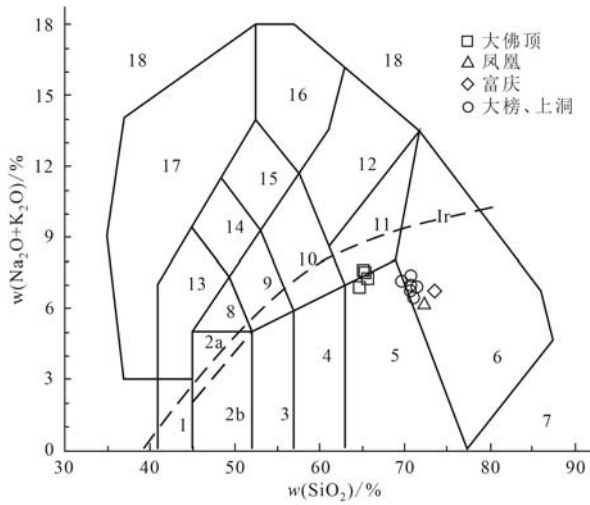


图 2 大瑶山东南缘侏罗纪埃达克质花岗岩 TAS 图解 (底图据 Middlemost, 1994)

Fig. 2 TAS diagram of the Jurassic adakitic granites from the southeast edge of Dayao Mountain (after Middlemost, 1994)

Ir. Irvine 分界线, 上方为碱性, 下方为亚碱性; 1—橄榄辉长岩; 2a—碱性辉长岩; 2b—亚碱性辉长岩; 3—辉长闪长岩; 4—闪长岩; 5—花岗闪长岩; 6—花岗岩; 7—石英岩; 8—二长辉长岩; 9—二长闪长岩; 10—二长岩; 11—石英二长岩; 12—正长岩; 13—副长石辉长岩; 14—副长石二长闪长岩; 15—副长石二长正长岩; 16—副长正长岩; 17—副长深成岩; 18—霓方钠岩/磷霞岩/粗白榴岩

Ir. Irvine boundaries: above-alkaline, below-subalkaline; 1—peridotgabbro; 2a—alkaline gabbro; 2b—subalkaline gabbro; 3—gabbroic diorite; 4—diorite; 5—granodiorite; 6—granite; 7—quartzite; 8—monzogabbro; 9—monzodiorite; 10—monzonite; 11—quartz monzonite; 12—syenite; 13—foid gabbro; 14—foid monzodiorite; 15—foid monzosyenite; 16—foid syenite; 17—foidolite; 18—tawite/urtite/italite

### 4.2 微量元素特征

岩石  $\Sigma \text{REE}$  为  $54.36 \times 10^{-6} \sim 173.81 \times 10^{-6}$ , 不同侵入体不同岩石的稀土元素含量有所差异,  $\Sigma \text{REE}$  与酸度无明显的线性演化关系, 总体上大榜、上洞岩体  $\Sigma \text{REE}$  略高。轻、重稀土元素分馏程度高,  $\text{LREE}/\text{HREE}$  为  $7.62 \sim 20.25$ , 亏损重稀土元素、低 Y ( $3.26 \times 10^{-6} \sim 16.19 \times 10^{-6}$ ) 和 Yb ( $0.35 \times 10^{-6} \sim 1.5 \times 10^{-6}$ ),  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  值为  $8.68 \sim 29.15$ ;  $\delta \text{Eu}$  值为  $0.78 \sim 1.10$ , 具弱 Eu 负异常或正异常, 其中大榜、上洞岩体普遍具弱 Eu 负异常 ( $\delta \text{Eu}$  值  $0.78 \sim 0.93$ ), 而大佛顶、凤凰、富庆等岩体 Eu 异常不明显或具弱 Eu 正异常 ( $\delta \text{Eu}$  值  $0.92 \sim 1.10$ )。岩石稀土元素配分曲线均为右倾轻稀土元素富集型曲线 (图 4), 不同侵入体及不同岩性的稀土元素曲线有所差异, 大致可细分为 3 类: ① 以富庆岩体为代表 (图 4a), HREE 强烈亏损, 具 Eu 正异常 ( $\delta \text{Eu}$  值  $1.10$ ), 暗示源区由石榴子石+辉石组成, 残留相为榴辉岩; ② 以大佛顶、凤凰岩体为代表 (图 4a), HREE 平坦型的分布, 无明显 Eu 异常, 说明源区可能有角闪石残留 (石榴子石+辉石+角闪石), 残留相为角闪榴辉岩或含角闪石的辉石岩; ③ 以大榜、上洞岩体 (图 4b) 为代表, HREE 平坦型, 有弱的 Eu 负异常 ( $\delta \text{Eu}$  值  $0.78 \sim 0.93$ ), 说明残留相可能有少量斜长石存在, 残留相为含斜长石的榴辉岩或麻粒岩; 或残留相中无斜长石存在, 而熔融体中的斜长石发生了分离结晶作用。

岩石微量元素 Sr、Ba 含量普遍较高, 而过渡金

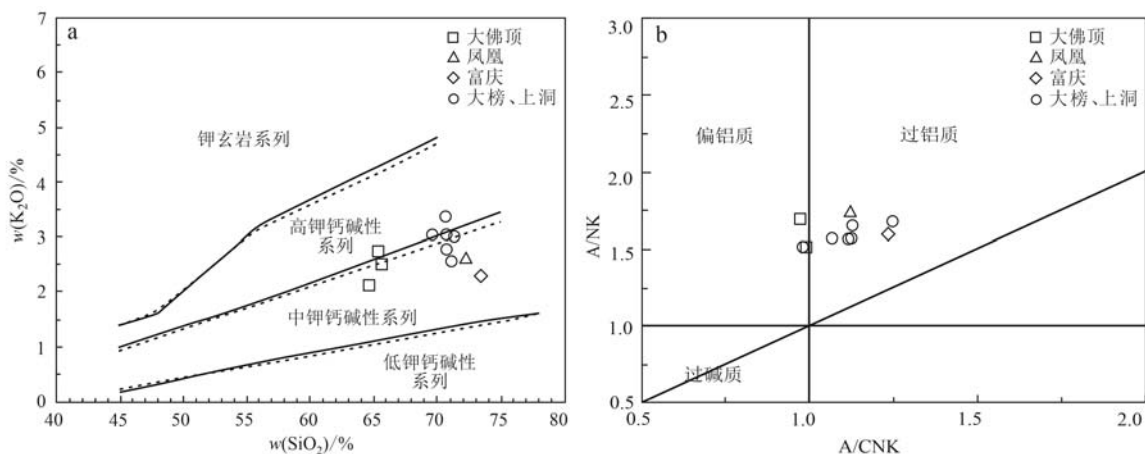


图 3 大瑶山东南缘侏罗纪埃达克质花岗岩  $\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$  图解 (a, 底图据 Peccerillo and Taylor, 1976; 虚线据 Middlemost, 1985) 和  $\text{A}/\text{NK} - \text{A}/\text{CNK}$  图解 (b, 底图据 Maniar and Piccoli, 1989)

Fig. 3  $\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$  (a, after Peccerillo and Taylor, 1976; dashed lines from Middlemost, 1985) and  $\text{A}/\text{NK} - \text{A}/\text{CNK}$  (b, after Maniar and Piccoli, 1989) diagrams of the Jurassic adakitic granites from the southeast edge of Dayao Mountain

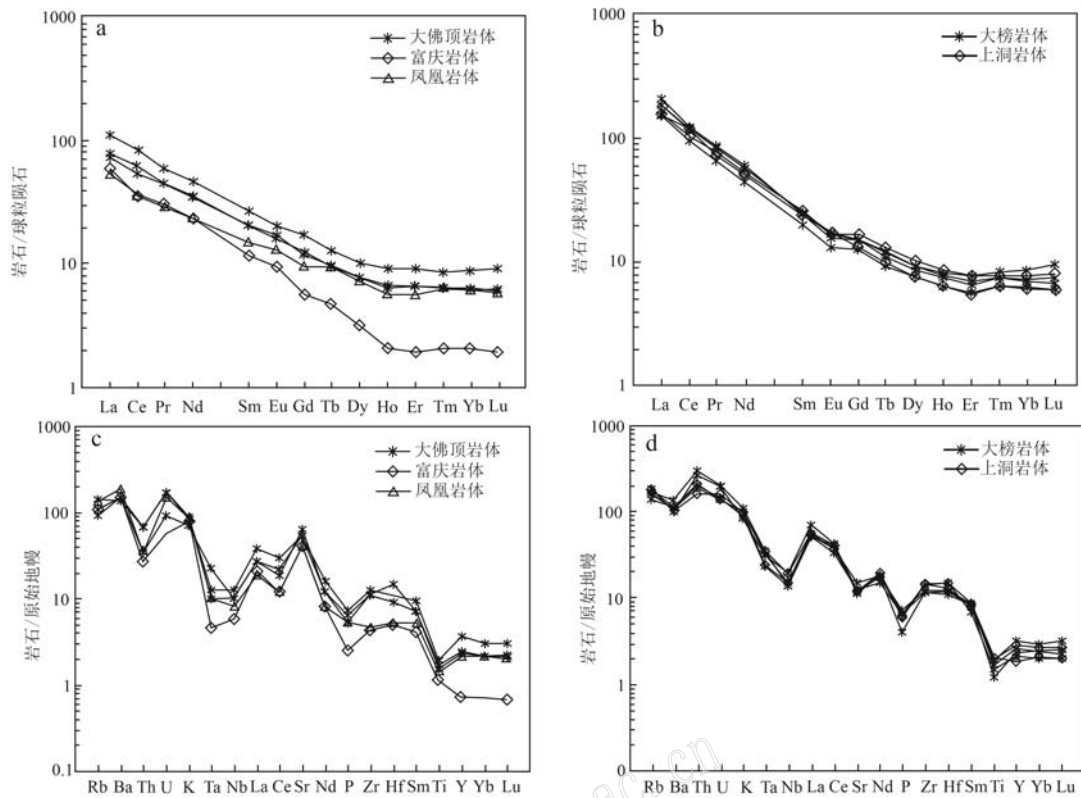


图4 大瑶山东南缘侏罗纪埃达克质花岗岩稀土元素配分曲线图(a,b)和微量元素蛛网图(c,d)(球粒陨石和原始地幔标准数据据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 4 Chondrite-normalized REE distribution patterns (a, b) and mantle-normalized trace element spidergrams (c, d) of the Jurassic adakitic granites from the southeast edge of Dayao Mountain (chondritic and N-MORB normalization values from Sun and McDonough, 1989)

属元素 Cr、Ni 含量较低。其中大佛顶、凤凰、富庆等岩体的 Sr 含量高达  $773 \times 10^{-6} \sim 1313 \times 10^{-6}$ ，而大榜、上洞岩体 Sr 含量 ( $237.85 \times 10^{-6} \sim 324.54 \times 10^{-6}$ ) 相对偏低，但 Ba 含量 ( $712 \times 10^{-6} \sim 1217 \times 10^{-6}$ ) 普遍都较高。在微量元素原始地幔标准化蛛网图(图4)上，相对富集大离子亲石元素(LILE) Rb、K、Ba、Sr，亏损高场强元素(HFSE) Nb、Ta、P、Ti。不同侵入体的微量元素配分曲线具明显的差异性特征，总体上高场强元素(HFSE) Nb、Ta、P、Ti 均显示出不同程度的负异常，而 Th、Sr 异常差别较大。其中，大佛顶、凤凰、富庆等岩体具明显 Sr、Ba 正异常，而 Th 表现为负异常(图4c)；大榜、上洞岩体具弱 Sr、Ba 负异常，而 Th 则表现为正异常(图4d)。

## 5 讨论

### 5.1 岩石成因

#### 5.1.1 I型弧花岗岩属性

大瑶山东南缘侏罗纪埃达克质花岗岩，岩石组

合为石英闪长岩-英云闪长岩-斜长花岗岩(奥长花岗岩)-花岗闪长岩组合，岩石普遍含角闪石；岩石化学系列主要为中钾钙碱性系列，少部分达到高钾钙碱性系列，相对富钠( $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$ )，且部分岩体(如大佛顶、富庆)属钠质系列的火成岩类，显示了壳-幔同熔 I 型花岗岩特征。从铝饱和指数 A/CNK 值看，岩石多数仍为偏铝质-弱过铝质，尽管部分表现为强过铝质(A/CNK 值  $> 1.1$ ，通常被判定为 S 型花岗岩)，但在其岩石矿物组成中，一般极少见到过铝质标型矿物，且普遍含角闪石。因此，岩石总体仍表现为 I 型花岗岩特征，而部分岩石具高 A/CNK 值，也正反映了埃达克质岩石普遍具有高  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的特征。

岩石富集大离子亲石元素(LILE)，亏损高场强元素(HFSE)，具明显 Nb、Ta 负异常。Nb/Ta 值 (7.95~21.70) 变化较大，多数介于下地壳(8.3)与原始地幔(17.4)之间；Rb/Sr 值 0.04~0.49，均低于华南同熔 I 型花岗岩的 Rb/Sr 值(0.50)。反映了其源岩主要来自于下地壳和地幔来源基性火成岩物质

的部分熔融, 具壳-幔同熔 I 型弧花岗岩的地球化学特征。

Nb/Zr 值通常被认为是判别构造背景的灵敏指示标志, 一般认为火山弧环境岩石的 Nb/Zr < 0.1, 而板内环境一般 Nb/Zr > 0.1。本区埃达克质花岗岩的 Nb/Zr 值在 0.06~0.11 间, 绝大多数 < 0.1, 显示其绝大部分仍具有弧花岗岩的地球化学特征。在 Whalen 的岩浆成因 Zr-SiO<sub>2</sub> 判别图(图 5a)中, 岩石均落于 I 型花岗岩区。在 (Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)/CaO -

(Zr+Nb+Ce+Y) 判别图(图 5b)中, 埃达克质花岗岩均落于未分异的 I & S 型花岗岩区; 而同时期的桂东南钾玄质侵入岩(二长岩、正长岩)及浆混花岗岩、花山-姑婆山高钾钙碱性花岗岩则落于 A 型花岗岩区(或分异花岗岩区)。总体反映了侏罗纪埃达克质花岗岩与同时期邻区的桂东南钾玄质侵入岩及花山-姑婆山高钾钙碱性花岗岩具有明显不同的成因特征。前者兼具 I 型弧花岗岩的地球化学特征, 而后两者则为典型的板内 A 型花岗岩组合。

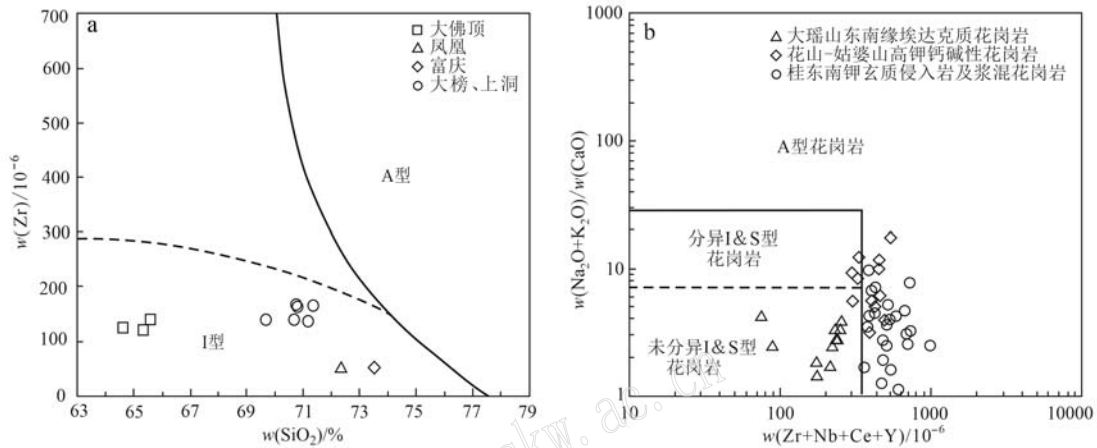


图 5 大瑶山东南缘侏罗纪埃达克质花岗岩 Zr-SiO<sub>2</sub> 图解(a)和 (Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)/CaO-(Zr+Nb+Ce+Y) 图解(b) (底图据 Whalen *et al.*, 1987; 部分数据引自广西区域地质调查研究院, 2017<sup>①</sup>)

Fig. 5 Zr-SiO<sub>2</sub> and (Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)/CaO-(Zr+Nb+Ce+Y) diagram of the Jurassic adakitic granites from the southeast edge of Dayao Mountain (after Whalen *et al.*, 1987; data are from Guangxi Institute of Regional Geological Survey, 2017<sup>①</sup>)

### 5.1.2 埃达克质属性

本区侏罗纪埃达克质花岗岩普遍具高 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (绝大多数 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ≥ 15%)、低 MgO (< 3%), 亏损重稀土元素(HREE)、Eu 异常不明显或具正 Eu 异常(部分具弱负 Eu 异常), 低 Y (≤ 18 × 10<sup>-6</sup>) 和 Yb (≤ 1.9 × 10<sup>-6</sup>), 高 Sr (大部分岩体 Sr > 300 × 10<sup>-6</sup>)、高 Sr/Y 值 (> 20) 和 La/Yb 值 (> 15) 等埃达克岩独特的地球化学特征。在 Defant 的经典岛弧岩石与埃达克岩判别 (La/Yb)<sub>N</sub> - Yb<sub>N</sub> 图(图 6a) 和 Sr/Y - Y 图(图 6b) 上, 岩石绝大部分落于埃达克岩区或埃达克岩与岛弧岩石叠合区。

Sr/Y 值通常用于判别在岩石成因体系中长石和石榴子石是以分离结晶相还是残留相存在。如, 高 Sr/Y 值 (> 40) 暗示源区是在含石榴子石角闪岩相或榴辉岩相(残留相矿物以含石榴子石、无长石为特

征)条件下发生部分熔融; 低 Sr/Y 值 (< 20) 表明熔融体是无石榴子石的物源区的部分熔融(以长石分离结晶、无石榴子石为标志) (Haschke *et al.*, 2010)。本区侏罗纪埃达克质花岗岩均具较高的 Sr/Y 值 (> 20), 西南部大佛顶、凤凰、富庆岩体的 Sr/Y 值 (> 40) 总体较高, 东北部大榜、上洞岩体略低(大部分仅 > 20)。表明本区侏罗纪埃达克质岩浆熔融体可能是来自于下地壳深部含石榴子石角闪岩相或榴辉岩相源区部分熔融的结果。大榜、上洞岩体的 Sr/Y 值略低, 说明其源区可能有少量斜长石残余; 或残留相中无斜长石存在, 而熔融体中的斜长石发生了分离结晶作用。

许继峰等(2014)总结提出了非板片熔融的埃达克质岩的 4 种成因类型: ① 下地壳部分熔融的埃达克质岩; ② 拆沉下地壳部分熔融形成的埃达克质岩;

① 广西区域地质调查研究院. 2017. 广西区域地质志.



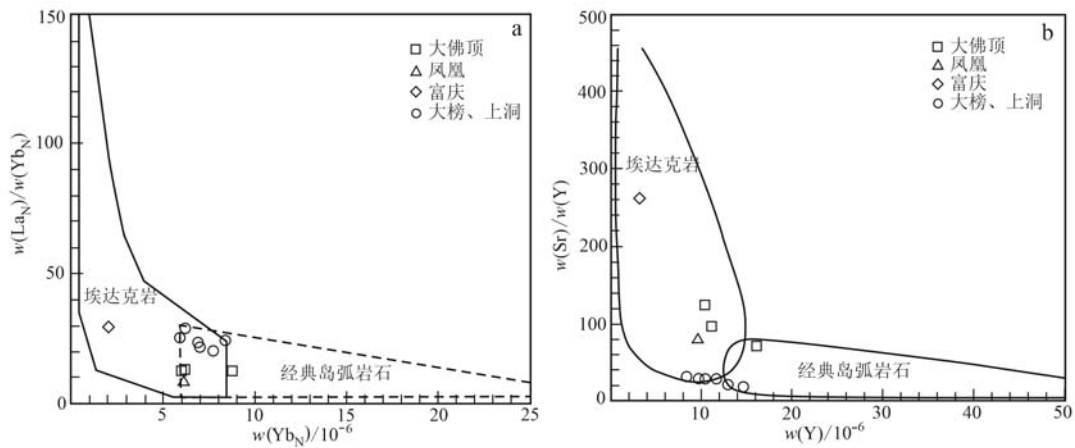


图6 大瑶山东南缘侏罗纪埃达克质花岗岩 $(La/Yb)_N - Yb_N$ 图解(a)和 $Sr/Y - Y$ 图解(b)(底图据 Defant and Drummond, 1990)

Fig. 6  $(La/Yb)_N - Yb_N$  (a) and  $Sr/Y - Y$  (b) diagrams of the Jurassic adakitic granites from the southeast edge of Dayao Mountain (after Defant and Drummond, 1990)

③ 基性岩浆高压分异的埃达克质岩；④ 混合成因的埃达克质岩(许继峰等, 2014)。从岩石的低 $MgO$  (0.69%~1.49%)和低 $Mg^\#$ 值( $<50$ )特征看, 本区侏罗纪埃达克质花岗岩应属于下地壳部分熔融形成的埃达克质岩(相对低镁)而非拆沉下地壳部分熔融形成的埃达克质岩(相对高镁)。从埃达克质花岗岩产出的地质特征看, 各花岗岩体均呈独立的侵入体产出, 其间并无有成因联系的中基性岩石密切共生, 暗色包体也极少见。因此, 也不属于基性岩浆高压分异的埃达克质岩或混合成因的埃达克质岩。

### 5.1.3 TTG 岩类属性

本区侏罗纪埃达克质花岗岩与早古生代TTG侵入岩组合在空间上相邻产出, 且二者在岩石组合及岩石地球化学特征上都具相似性。在O'Connor (1965) CIPW标准矿物分类命名An-Ab-Or三角图中(图7), 侏罗纪埃达克质花岗岩(标准矿物石英含量16.19%~33.80%, 均大于10%)亦主要落于 $T_1T_2G_1$ 和 $G_1G_2$ 组合岩区, 其中西南部的大佛顶、凤凰、富庆岩体组合显示为 $T_1T_2G_1$ (英云闪长岩-奥长花岗岩-花岗闪长岩)组合, 而北东部的大榜、上洞岩体组合显示为 $G_1G_2$ (花岗闪长岩-花岗岩)组合。

一般认为, TTG岩类形成于洋俯冲作用的构造环境(邓晋福等, 2007; 肖庆辉等, 2016), 是洋俯冲玄武岩板片脱水熔融的产物(Martin, 1999); TTG岩类与俯冲成因的埃达克岩相同, 也是俯冲板片熔融的产物(Defant and Drummond, 1990; Drummond *et al.*, 1996)。但也有学者认为TTG性质岩浆并非俯

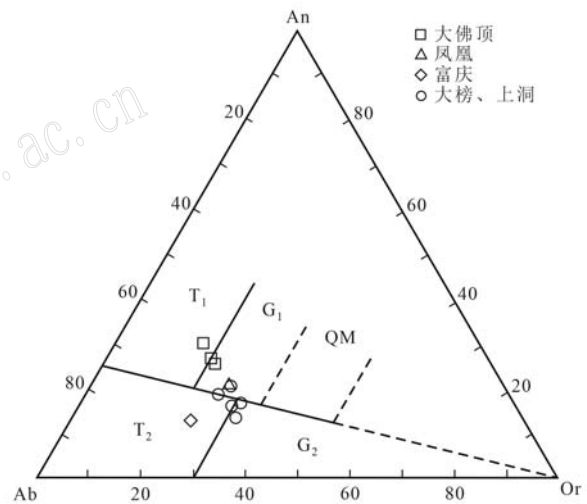


图7 大瑶山东南缘侏罗纪埃达克质花岗岩An-Ab-Or图解(底图据O'Connor, 1965)

Fig. 7 An-Ab-Or diagram of the Jurassic adakitic granites from the southeast edge of Dayao Mountain (after O'Connor, 1965)

$T_1$ —英云闪长岩;  $T_2$ —奥长花岗岩;  $G_1$ —花岗闪长岩; QM—石英二长岩;  $G_2$ —花岗岩(狭义)

$T_1$ —tonalite;  $T_2$ —trondhjemite;  $G_1$ —granodiorite; QM—quartz monzonite;  $G_2$ —granite (narrow sense)

冲成因, 而是镁铁质下地壳部分熔融形成, 其成因与加厚地壳底部岩石部分熔融形成的埃达克岩熔体类似(Smithies, 2000; Smithies *et al.*, 2003, 2009)。

邓晋福等(2018)研究提出TTG岩类可分4个亚类: 镁安山岩系列(MA)低压型TTG亚类、镁安山岩系列(MA)高压型TTG亚类、低镁安山岩系列(LMA)低压型TTG亚类、低镁安山岩系列(LMA)高

压型 TTG 亚类。并指出, LMA 系列的高压型 TTG 亚类常形成于具山根的大陆边缘弧, MA 系列的高压型 TTG 亚类形成于洋壳俯冲带, 二者的压力均  $\geq 1.5 \sim 1.6$  GPa,  $>50 \sim 60$  km 的榴辉岩形成深度(邓晋福等, 2018)。本区侏罗纪埃达克质花岗岩具低 MgO(0.69%~1.49%) 和低  $Mg^{\#}$  值( $<50$ ) 特征。在  $MgO-SiO_2$  图解上(图 8), 大佛顶、凤凰、富庆岩体落于低镁安山岩/闪长岩系列(LMA), 大榜、上洞岩体落于镁安山岩/闪长岩系列(MA), 靠近低镁安山岩/闪长岩系列(LMA) 界线附近。上述提示, 本区侏罗纪埃达克质花岗岩可能具有来自于岩浆弧下地壳和洋壳俯冲带两种不同源岩的 TTG 岩类属性。

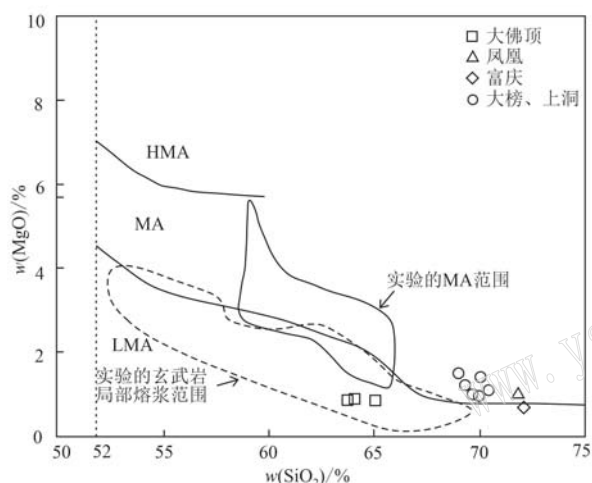


图 8 大瑶山东南缘侏罗纪埃达克质花岗岩  $MgO-SiO_2$  图解(底图据邓晋福等, 2018, 有修改)

Fig. 8  $MgO-SiO_2$  diagram of the Jurassic adakitic granites from the southeast edge of Dayao Mountain (after Deng Jinfu *et al.*, 2018)

HMA—高镁安山岩/闪长岩系列; MA—镁安山岩/闪长岩系列; LMA—低镁安山岩/闪长岩系列

HMA—high-Mg andesite/diorite series; MA—Mg andesite/diorite series; LMA—low-Mg andesite/diorite series

从稀土元素和微量元素特征看, 大佛顶、凤凰、富庆岩体均具陡倾斜的 REE 分布形态(高分离的 REE 分布样式), 无明显的 Eu 异常(或具正 Eu 异常), 具低 HREE 和较高 Sr/Y 值, 反映了其源区无斜长石残余及难熔残余矿物为石榴子石+角闪石+辉石的熔体, 它们是压力  $\geq 1.5 \sim 1.6$  GPa 时(榴辉岩相), 高压条件下产生的岩浆, 属高压型 TTG 或埃达克岩。而大榜、上洞岩体具弱的负 Eu 异常和略低的 Sr/Y 值, 说明其源区可能有少量斜长石残余; 或残留相中无斜长石存在, 而熔融体中的斜长石发生了分离结晶作用。

岩浆弧下地壳产生的 TTG 岩浆虽然不是洋俯冲板片直接熔融出的岩浆, 但它仍然可表征岩浆弧的构造环境, 亦可以说它们仍与洋俯冲的环境有关, 是岩浆弧的另一种类型的 TTG 亚类(邓晋福等, 2018)。从区域构造演化上看, 印支期造山后, 华南地区已拼合为统一的华南陆块。本区处于华南大陆板内, 且远离古太平洋俯冲带, 其 TTG 岩类属性与中生代古太平洋俯冲板片熔融过程无关, 而可能与加厚下地壳底部岩石部分熔融形成的埃达克岩熔体的独特性质相关。从这个意义上说, 其应属于非俯冲成因的埃达克岩/TTG 岩类。但这种埃达克岩/TTG 质熔体的独特性质显然又带有洋俯冲成因的“基因”。因此, 本区侏罗纪埃达克质花岗岩具有类似于低镁安山岩/闪长岩系列(LMA) 和镁安山岩/闪长岩系列(MA) 两种高压型 TTG 亚类属性, 这两种属性均具有洋俯冲成因岩石的特征, 暗示其岩浆可能是来自于古洋壳俯冲带或古岩浆弧下地壳岩石部分熔融产生的埃达克岩/TTG 质熔体。

## 5.2 构造意义

### 5.2.1 构造背景

关于埃达克质岩的成因机制及地球动力学背景仍存在较多争议。有学者认为, 埃达克质岩可以形成于不同的构造背景并与不同类型的岩石同时出现(王强等, 2008); 但也有学者认为, 埃达克岩来自高压构造背景, 埃达克岩不与南岭型花岗岩共生(张旗等, 2020)。

岩石模拟和实验研究表明, 基性岩熔融产生埃达克质熔体的条件为压力  $>1.2 \sim 1.5$  GPa、温度  $800 \sim 1000^\circ\text{C}$ 、 $H_2O$  含量 1.5%~6.0%(Xiong *et al.*, 2005; 熊小林等, 2007; 王强等, 2020)。不同成因或构造背景的埃达克质熔体形成时源区残留矿物组合为石榴石+金红石, 很少或无斜长石(许继峰等, 2014; 王强等, 2020)。这表明埃达克质熔体起源或产生在一个约大于或等于  $40 \sim 50$  km 的地壳(下地壳)深处, 而明显不同于不具有埃达克质成分组成的中酸性岩, 后者很可能主要起源或形成于比埃达克质岩相对浅(如小于 40 km)的中上地壳内(许继峰等, 2014)。

张旗等(2006)利用 Sr-Yb 图解(图 9), 将中酸性岩( $SiO_2 \geq 56\%$ ) 分为埃达克型、喜马拉雅型、浙闽型、广西型、南岭型等 5 类花岗岩, 认为埃达克型来自于高压背景, 南岭型(大体相当于 A 型花岗岩)代表地壳减薄的产物, 而广西型(钾玄岩系列)则是在

正常或减薄的地壳(压力较低)和较高温下( $>900^{\circ}\text{C}$ )形成的(张旗等, 2006, 2020; 张旗, 2014)。在广西侏罗纪主要花岗岩( $\text{SiO}_2 \geq 56\%$ ) Sr-Yb 图解中(图9), 本区侏罗纪埃达克质花岗岩均明显落于低 Yb 高 Sr 的埃达克型岩区(其中, 大榜、上洞岩体部分因 Sr 含量略低而落于下部边线附近), 而同时期的桂东南钾玄质侵入岩(二长岩、正长岩)及浆混花岗岩则落于高 Yb 高 Sr 的广西型岩区; 花山-姑婆山高钾钙碱性花岗岩(二长花岗岩、正长花岗岩)落于高 Yb 低 Sr 的南岭型岩区。虽然该图解在岩石成因分类上尚有争议, 但也大致反映了广西侏罗纪花岗岩丰富多样的岩石成因类型和条件各异的成岩环境。

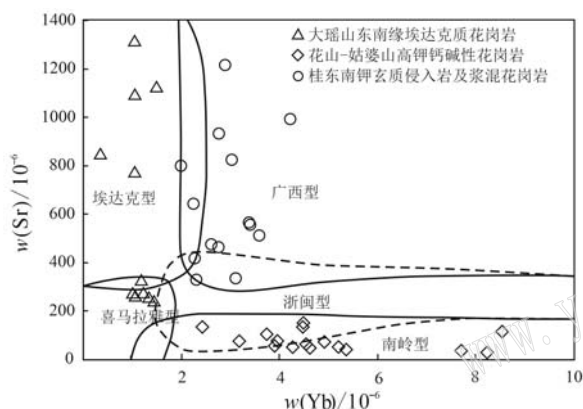


图9 广西侏罗纪主要花岗岩 Sr-Yb 图解(底图据张旗等, 2014; 部分数据引自广西区域地质调查研究院, 2017<sup>①</sup>)

Fig. 9 Sr-Yb diagram of the major Jurassic granites from Guangxi (after Zhang Qi *et al.*, 2014; part data from Guangxi Institute of Regional Geological Survey, 2017<sup>①</sup>)

从区域构造-岩浆演化上看, 本区埃达克质花岗岩产出的大瑶山隆起恰好处于北东向钦-杭结合带(成矿带)与东西向南岭成矿带(花岗岩带)的交汇结合部, 历经加里东期俯冲增生-碰撞造山和印支期褶皱回返造山。印支造山后, 拼合统一的华南陆块转入大陆地壳抬升、伸展减薄和裂谷发展(夭折)阶段。华仁民等(1999)认为, 燕山早期(180 Ma)开始, 华南尤其是南岭地区进入一个以岩石圈伸展-减薄为主的地球动力学环境, 并且呈现一种多阶段的伸展(华仁民等, 1999; 李献华等, 1999; 毛景文等, 2004; 华仁民, 2005)。地处南岭之南的

桂东及桂东南地区, 在中、晚侏罗世之交(165~151 Ma), 由于岩石圈持续的伸展-减薄, 地幔岩浆沿深大断裂底侵上涌, 并诱发下部地壳岩石发生重熔(及上部地壳垮塌重熔)形成了丰富多样的岩石成因类型。其中, 既有以地幔源区为主的钾玄质侵入岩(以中基性碱性杂岩为主,  $A_1$  亚型), 又有以重熔地壳源区为主的高钾钙碱性花岗岩( $A_2$  亚型)和壳-幔相互作用形成的浆混花岗岩(H型), 具典型的后造山岩浆岩组合特征(广西区域地质调查研究院, 2017<sup>①</sup>)。

而埃达克质花岗岩, 仅局限于大瑶山隆起区东南缘沿梧州-贺街断裂带分布, 空间上与早古生代俯冲增生带的 TTG 侵入岩组合(475~432 Ma)紧密相邻, 岩石组合上亦表现为英云闪长岩-斜长花岗岩(奥长花岗岩)-花岗闪长岩组合(TTG 侵入岩组合), 岩石地球化学具 I 型弧花岗岩的普遍特征, 同时又兼具有埃达克岩独特的地球化学特征。但从区域构造背景上看, 本区侏罗纪处于华南大陆板内, 远离古太平洋俯冲带, 也无证据显示存在中生代大陆弧或陆内俯冲环境。因此, 其与中生代大陆弧或洋俯冲环境无关, 应属于非弧环境的大陆板内 I 型花岗岩。

张旗等(2020)认为:埃达克岩与南岭型花岗岩, 一个是高压下形成的, 一个是低压下形成的, 二者不可能同时同地出现, 因为地壳不可能同时既加厚又减薄(张旗等, 2020)。本区埃达克质花岗岩与同时期(中晚侏罗世)的高钾钙碱性花岗岩(南岭型)和钾玄质侵入岩(广西型)虽然空间上没有紧密的共生关系, 但它们也都相距不远, 且同处于中晚侏罗世华南大陆岩石圈伸展-减薄的构造背景。所不同的是, 埃达克质花岗岩产出于加厚的大瑶山隆起区, 而高钾钙碱性花岗岩和钾玄质侵入岩则分布于隆起区南、北两侧的中新生代断陷盆地边缘。它们具有不同的岩石组合和不同的地球化学特征, 暗示它们可能来自于不同性质的岩浆源区和不同的成岩环境。埃达克质花岗岩的岩浆源区可能来自于相对较深( $>40$  或  $50$  km)的大陆下地壳底部岩石的部分熔融, 因而具有相对较高的压力( $>1.2$  或  $1.5$  GPa)背景; 而高钾钙碱性花岗岩主要源自于浅部(相对低压环境)上地壳的重熔; 钾玄质侵入岩、浆混花

① 广西区域地质调查研究院. 2017. 广西区域地质志.



岗岩则可能是在伸展-减薄(减压)机制下,地幔岩浆上涌,壳-幔相互作用的产物。因此,在中晚侏罗世陆内伸展构造背景下,也形成了本区燕山早期大规模岩浆-成矿作用的两种不同的成矿系列,即①与富碱的高钾钙碱性花岗岩(A型花岗岩)相关的W、Sn多金属及稀有、稀土成矿系列;②与埃达克质花岗岩(I型花岗岩)相关的Au-Cu-Mo成矿系列。

需要指出的是,胡升奇等(2013)报道了与大榜、上洞岩体相邻且同时期的粤西园珠顶铜钼矿床的花岗斑岩(154 Ma),认为园珠顶花岗斑岩属于壳-幔混源成因的I型花岗岩,花岗斑岩体及铜钼矿形成于受太平洋板块俯冲作用控制的大陆边缘,为俯冲挤压环境的产物(胡升奇等,2013)。该岩体(相对富钾)强烈亏损重稀土元素(HREE),具低Y、Yb的特征,但因具低的Sr含量而被认为“明显不同于埃达克岩”(胡升奇等,2013)。园珠顶花岗斑岩体及铜钼矿的形成是否受太平洋板块俯冲作用的控制(远程构造效应)尚值得商榷。但无疑,园珠顶花岗斑岩体及相邻同时期的埃达克质花岗岩体均同处于中晚侏罗世华南大陆岩石圈伸展-减薄的构造背景,其岩浆源区亦来自于相对较深的加厚大陆下地壳岩石的部分熔融,应同属于非弧环境的大陆板内I型花岗岩。

相比于西南部大佛顶、凤凰、富庆等岩体,北东部的大榜、上洞岩体Sr含量明显降低,仅接近或 $>300 \times 10^{-6}$ 左右,尤其是与大榜、上洞岩体相邻的园珠顶含矿花岗斑岩(相对富钾)。这种差异可能与岩浆分异作用斜长石的分离结晶或斜长石中Ca含量的减少(斜长石牌号降低)有关;也可能与源岩性质和源区温度、压力、 $H_2O$ 含量等环境条件,以及岩浆迁移侵位过程中的分离结晶、岩浆混合、混染作用等有关(张旗等,2004;王强等,2020)。因此,埃达克质花岗岩的岩浆演化及其金属成矿机理尚值得进一步的研究。

### 5.2.2 动力学

华南地区中生代动力机制经历了从特提斯构造域向滨太平洋构造域的转换,产生了强烈的陆内造山作用和岩浆活动。但是关于其地球动力学机制,特别是华南燕山早期的构造-岩浆作用,是古太平洋板块向华南大陆之下俯冲作用的结果,还是多向挤压、是陆-陆碰撞、还是陆内伸展-裂谷作用的产

物,仍存在不同的认识(吴福元等,2007;董树文等,2007;徐先兵等,2009;张岳桥等,2009,2012;肖庆辉等,2010;张国伟等,2013)。

华南中生代岩浆岩是多板块汇聚和多方向挤压-伸展的产物(毛建仁等,2013,2014;刘凯等,2016)。钦-杭结合带北东段(赣-杭带)广泛分布的中生代埃达克质岩体具有岛弧型岩石的特征,是古太平洋板块斜向俯冲导致位于扬子和华夏陆块结合部位的钦-杭带发生强烈挤压,致使下地壳增厚,促使下地壳深部新元古代的岛弧岩石部分熔融形成,因而“遗传”了新元古代岛弧岩石的地球化学基因,兼具埃达克质和岛弧型双重特征(周永章等,2012;毛建仁等,2013,2014;梁锦等,2015)。因此,也有学者认为具岛弧型特征的岩石不一定是洋壳俯冲引起地幔熔融的大洋弧或者大陆弧岩石。这取决于岩浆形成的时间,如果早期弧型岩石再次部分熔融,所形成的岩石也表现出弧型岩石的特征,这是火成岩岩石地球化学的“继承性”(毛建仁等,2014)。

大瑶山东南缘侏罗纪埃达克质花岗岩,产出于钦-杭结合带西南段(广西段)扬子克拉通与云开岛弧(华夏板块)汇聚碰撞带上,与早古生代TTG岩株群在空间上紧密相邻,且在岩石组合上具有类似于大陆边缘弧下地壳的低镁安山岩/闪长岩系列(LMA)和洋壳俯冲带的镁安山岩/闪长岩系列(MA)两种高压型TTG亚类属性。这两种“弧型”属性均与洋俯冲的环境有关,但本区侏罗纪处于华南大陆板内,且远离古太平洋俯冲带,显然已不存在大洋弧或者大陆弧环境。

近年来,在大瑶山东南缘及桂东鹰扬关地区陆续识别出早古生代的蛇绿岩残片、岛弧-弧后盆地型火山岩、TTG侵入岩组合等,认为扬子克拉通与华夏地块之间存在早古生代洋盆和俯冲增生-碰撞造山(覃小锋等,2015,2017;许华等,2016;彭松柏等,2016;广西区域地质调查研究院,2017<sup>①</sup>)。广西侏罗纪埃达克质花岗岩仅局限于沿大瑶山东南缘北东向梧州-贺街-鹰扬关断裂(早古生代俯冲增生带)分布,空间上与早古生代TTG侵入岩组合高度重合,且在岩石组合及岩石地球化学特征上具相似性,提示二者在成岩环境或源岩性质上可能存在继承性的联系。本区侏罗纪处于华南大陆板内,且远

① 广西区域地质调查研究院,2017. 广西区域地质志.

离古太平洋俯冲带,与中生代古太平洋俯冲板片熔融过程无关。但可能正是由于古太平洋板块斜向俯冲,导致沿大瑶山东南缘早古生代俯冲增生带发生强烈挤压,下地壳增厚,其后软流圈上涌,岩石圈减薄,促使早古代洋壳俯冲带下地壳深部弧型岩石部分熔融,形成兼具埃达克质和岛弧型双重特征的TTG/埃达克质熔体,而后沿深大断裂上侵就位地壳浅部。

因此,无论是侏罗纪非俯冲成因的埃达克质花岗岩,还是俯冲成因的早古生代TTG侵入岩组合,它们可能均与大瑶山隆起东南缘的特殊构造位置——早古生代俯冲增生带密切相关,因而具有一脉相承的洋俯冲成因的特征属性。

## 6 结论

(1) 大瑶山东南缘中晚侏罗世(165~153 Ma)埃达克质花岗岩,具有壳-幔同熔I型弧花岗岩的普遍特征,同时又具有高 $Al_2O_3$ (绝大多数 $Al_2O_3 \geq 15\%$ )、低 $MgO$ ( $<3\%$ )、相对富钠( $Na_2O > K_2O$ )、亏损重稀土元素(HREE)、正Eu异常或弱的负Eu异常,低Y( $\leq 18 \times 10^{-6}$ )和Yb( $\leq 1.9 \times 10^{-6}$ ),高Sr(大部分 $Sr > 300 \times 10^{-6}$ )、高Sr/Y值( $>20$ )和La/Yb值( $>15$ )等埃达克岩独特的地球化学特征。

(2) 沿大瑶山东南缘分布的侏罗纪埃达克质花岗岩形成于陆内伸展构造背景,为大陆板内加厚(隆起区)的下地壳底部岩石部分熔融的产物,属非弧环境的大陆板内I型花岗岩。其与同时期大瑶山隆起区南北两侧在伸展-减薄(减压)机制下形成的桂东南钾玄质侵入岩和花山-姑婆山富碱的高钾钙碱性花岗岩(A型花岗岩),共同构成了华南燕山早期丰富多样的岩石类型和不同的成矿系列。

(3) 大瑶山东南缘侏罗纪埃达克质花岗岩具有类似于低镁安山岩/闪长岩系列(LMA)和镁安山岩/闪长岩系列(MA)两种高压型TTG亚类的属性,为古俯冲增生带下地壳深部弧型岩石熔融的继承性特征,与中生代古太平洋俯冲板片熔融过程无关,属非俯冲成因的埃达克/TTG岩类。其空间上与大瑶山东南缘早古生代俯冲增生带高度重合,且与早古生代TTG侵入岩组合紧密相邻,提示它们可能源自于早古生代洋壳俯冲带或大陆边缘弧下地壳玄武质岩石的部分熔融,因而具有洋俯冲成因的特征属性。

**致谢** 本文成文过程中,曾先后随同南京大学于津海教授、桂林理工大学时毓教授和东华理工大学谢才富教授在大瑶山地区野外考察交流,受益良多。时毓教授和于津海教授还为本文提供了部分尚未发表的原始数据。成文后,中国地质调查局肖庆辉研究员,中国地质大学(北京)邓晋福、刘翠教授,河南地质研究所卢欣祥高工审阅了全文并提出修改建议。编审过程中,两位审稿专家和责任编辑又提出了宝贵的意见和建议,在此一并表示衷心的感谢!

## References

- Atherton M P and Petford N. 1993. Generation of sodlium-rich magmas from newly underplated basaltic crust[J]. *Nature*, 362: 144~146.
- Castillo P R, Janney P E and Solidum R. 1999. Petrology and geochemistry of Camiguin Island, southern Philippines: Insights into the source of adakite and other lavas in a complex arc tectonic setting [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 134: 33~51.
- Chen Maohong, Li Zhongyang, Li Qing, *et al.* 2015. A preliminary study of multi-stage granitoids and related metallogenic series in Dayaoshan area of Guangxi, China[J]. *Earth Science Frontiers*, 22(2): 41~53(in Chinese with English abstract).
- Chen Xinyue, Wang Yuejun, Zhang Yuzhi, *et al.* 2013. Geochronology and geochemical characteristics of the Nandu syenite in SE Guangxi and its implications[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 37(2): 284~293(in Chinese with English abstract).
- Defant M J and Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subduction lithosphere [J]. *Nature*, 317: 662~665.
- Drummond M S, Defant M J and Kepezhinskas. 1996. Petrogenesis of slab-derived trondhjemite-tonalite-dacite/adakite magmas [J]. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh-Earth Sciences*, 87: 205~215.
- Deng Jinfu, Xiao Qinghui, Su Shangguo, *et al.* 2007. Igneous petro-tectonic assemblages and tectonic settings: A discussion [J]. *Geological Journal of China Universities*, 13(3): 392~402(in Chinese with English abstract).
- Deng Jinfu, Liu Cui, Di Yongjin, *et al.* 2018. Discussion on the tonalite trondhjemite granodiorite (TTG) petro-tectonic assemblage and its subtypes [J]. *Earth Science Frontiers*, 25(6): 42~50(in Chinese with English abstract).

- Dong Shuwen, Zhang Yueqiao, Long Changxing, *et al.* 2007. Jurassic tectonic revolution in China and new interpretation of the Yanshan movement[J]. *Acta Geologica Sinica*, 81(11): 1 449~1 461 (in Chinese with English abstract).
- Guo Lingzhi, Shi Yangshen and Ma Ruishi. 1980. Geotectonic framework and crustal evolution of the South China[A]. *Scientific Paper on Geology for International Exchange (I)* [C]. Beijing: Geological Publishing House, 109~116 (in Chinese).
- Haschke M, Ahmadian J, Murata M, *et al.* 2010. Coppermineralization prevented by arc-root delamination during alpine-himalayan collision in central Iran[J]. *Economic Geology*, 105(4): 855~865.
- Hu Shengqi, Zhu Qiang, Zhang Xianjin, *et al.* 2013. Geochronology, geochemistry and zircon Hf isotope of granite porphyry in Yuanzhuding Cu-Mo deposit, Guangdong Province[J]. *Mineral Deposits*, 32(6): 1 139~1 158 (in Chinese with English abstract).
- Hua Renmin. 2005. Differences between rock-forming and related ore-forming times for the Mesozoic granitoids of crust remelting types in the Nanling Range, South China, and its geological significance[J]. *Geological Review*, 51(6): 633~639 (in Chinese with English abstract).
- Hua Renmin and Mao Jingwen. 1999. A preliminary discussion on the Mesozoic metallogenic explosion in East China[J]. *Mineral Deposits*, 18(4): 300~308 (in Chinese with English abstract).
- Lao Miaoji, Zou Heping, Du Xiaodong, *et al.* 2015. Geochronology and geochemistry of the Mashan late Jurassic shoshonitic intrusives in Hengxian, Guangxi: With a discussion on Yanshanian tectonic settings of the southwestern segment of Qin Zhou-Hangzhou metallogenic belt[J]. *Earth Science Frontiers*, 22(2): 95~107 (in Chinese with English abstract).
- Li Xianhua, Li Wuxian, Wang Xuance, *et al.* 2009. Role of mantle-derived magma in genesis of early Yanshanian granites in the Nanling Range, South China: In situ zircon Hf-O isotopic constraints[J]. *Science China Series D—Earth Sciences*, 39(7): 872~887 (in Chinese with English abstract).
- Li Xianhua, Zhou Hanwen, Liu Ying, *et al.* 1999. The Shoshonitic intrusive belt of SE Guangxi and its petrological and geochemical characteristics[J]. *Chinese Science Bulletin*, 44(18): 1 992~1 998 (in Chinese with English abstract).
- Liang Jin, Zhou Yongzhang, Li Hongzhong, *et al.* 2015. Tectonic evolution of the Juncture between Yangze craton and Cathaysian block: Its significance for mineralization of porphyry copper deposits[J]. *Earth Science Frontiers*, 22(2): 144~159 (in Chinese with English abstract).
- Liu Kai, Li Zilong, Xu Weiguang, *et al.* 2016. The spatial-temporal distributions and migrations of Mesozoic magmatism in South China and subduction process of the paleo-pacific plate[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 35(6): 1 141~1 155 (in Chinese with English abstract).
- Lu Yuanfa. 2004. GeoKit: A geochemical toolkit for Microsoft Excel[J]. *Geochimica*, 33(5): 459~464 (in Chinese with English abstract).
- Maniar P D and Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635~643.
- Mao Jianren, Li Zilong and Ye Haimin. 2014. Mesozoic tectono-magmatic activities in South China: Retrospect and prospect[J]. *Science China: Earth Sciences*, 57: 2 853~2 877 (in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Li Xiaofeng, *et al.* 2004. Mesozoic large scale mineralization and multiple lithospheric extension in South China[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 45~55 (in Chinese).
- Martin H. 1999. Adakite magma: Modern analogues of Archean granitoids[J]. *Lithos*, 46: 411~429.
- Middlemost E A K. 1985. *Magma and magmatic rocks* [J]. London: Longman, 1~266.
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth—Science Reviews*, 37(3): 215~224.
- O'Connor J T. 1965. A classification for quartz-rich igneous rocks based on feldspar ratios[J]. *U. S. Geological Survey Professional Paper*, 525: 79~84.
- Pan Guitang, Xiao Qinghui, Lu Songnian, *et al.* 2009. Subdivision of tectonic units in China[J]. *Geology in China*, 36(1): 1~28 (in Chinese with English abstract).
- Peccerillo A and Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63~81.
- Peng Songbai, Liu Songfeng, Lin Musen, *et al.* 2016. Early Paleozoic subduction in Cathaysia (I): New evidence from Nuodong ophiolite[J]. *Earth Science*, 41(5): 765~778 (in Chinese with English abstract).
- Qin Xiaofeng, Wang Zongqi, Gong Jianghua, *et al.* 2017. The confirmation of Caledonian intermediate-mafic volcanic rocks in northern margin of Yunkai block: Evidence for early Paleozoic paleo-ocean basin in southwestern segment of Qin Zhou-Hangzhou joint belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(3): 791~809 (in Chinese with English abstract).
- Qin Xiaofeng, Wang Zongqi, Wang Tao, *et al.* 2015. The reconfirmation of age and tectonic setting of the volcanic rocks of Yingyanguan



- Group in the eastern Guangxi: Constraints on the structural pattern of the southwestern segment of Qinzhou-Hangzhou joint belt[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 36(3): 283~292 (in Chinese with English abstract).
- Smithies R H. 2000. The Archaean tonalite trondhjemite granodiorite (TTG) series is not an analogue of Cenozoic adakite[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 82(1): 115~125.
- Smithies R H, Champion D C and Cassidy K F. 2003. Formation of Earth's early Archaean continental crust [J]. *Precambrian Research*, 127(1): 89~101.
- Smithies R H, Champion D C and Van Kranendonk M J. 2009. Formation of Paleoproterozoic continental crust through infracrustal melting of enriched basalt[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 281(3): 298~306.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [A]. *Sandler A D and Norry M J. Magmatism in The Ocean Basins [C]. Geological Society London Special Publications*, 42: 313~345.
- Wang Qiang, Hao Lulu, Zhang Xiuzheng, *et al.* 2020. Adakitic rocks at convergent plate boundaries: Compositions and petrogenesis[J]. *Science China Earth Sciences*, 63(12): 1992~2016 (in Chinese with English abstract).
- Wang Qiang, Xu Jifeng, Zhao Zhenhua, *et al.* 2001. The petrogenesis and geodynamic significances of heavy rare earth element (HREE)-depleted granitoids during Yanshanian period in the Dabie Mountains [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17(4): 551~564 (in Chinese with English abstract).
- Wang Qiang, Xu Jifeng, Zhao Zhenhua, *et al.* 2008. Tectonic setting and associated rock suites of adakitic rocks[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 27(4): 344~350 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yang and Cheng Suhua. 2010. The "C-type adakite": A concept based on misunderstanding? [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 29(3): 284~292 (in Chinese with English abstract).
- Whalen J B, Currie K I and Chappell B W. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407~419.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Yang Jinhui, *et al.* 2007. Discussions on the petrogenesis of granites[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1217~1238 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Qinghui, Li Tingdong, Pan Guitang, *et al.* 2016. Petrologic ideas for identification of ocean-continent transition: Recognition of intra-oceanic arc and initial subduction[J]. *Geology in China*, 43(3): 721~737 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Qinghui, Liu Yong, Feng Yanfang, *et al.* 2010. A preliminary study of the relationship between Mesozoic lithosphere evolution in eastern China and the subduction of the Pacific plate[J]. *Geology in China*, 37(4): 1092~1101 (in Chinese with English abstract).
- Xiong X L, Adam J and Green T H. 2005. Rutile stability and rutile/melt HFSE partitioning during partial melting of hydrous basalt: Implications for TTG genesis[J]. *Chemical Geology*, 218: 339~359.
- Xiong Xiaolin, Han Jiangwei and Wu Jinhua. 2007. Phase equilibrium and trace element partitioning between minerals and melt in the metabasalt system: Constraints on the formation conditions of TTG/adakite magmas and the growth of early continental crust[J]. *Earth Science Frontiers*, 14(2): 149~158 (in Chinese with English abstract).
- Xu Jifeng, Wu Jianbin, Wang Qiang, *et al.* 2014. Research advances of adakites and adakitic rocks in China[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 27(4): 6~13 (in Chinese with English abstract).
- Xu Hua, Huang Bingcheng, Ni Zhanxu, *et al.* 2012. Petrography, geochemistry and chronology of Gulong granite stock group in west segment of Qinzhou-Hangzhou metallogenic belt[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 28(4): 331~339 (in Chinese with English abstract).
- Xu Hua, Ni Zhanxu, Huang Bingcheng, *et al.* 2016. Determination of Early Paleozoic TTG intrusive rocks at the southeast edge of Dayao Mountain, Guangxi[J]. *Geology in China*, 43(3): 780~796 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xianbing, Zhang Yueqiao, Jia Dong, *et al.* 2009. Early Mesozoic geotectonic processes in South China[J]. *Geology in China*, 36(3): 273~293 (in Chinese with English abstract).
- Yang Wenping, Zhang Zhaochong, Zhou Gang, *et al.* 2005. Discovery of the Xileketehalsu porphyry copper deposit on the southern margin of the Altay copper metallogenic belt[J]. *Geology in China*, 32(1): 107~114 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi. 2014. Geochemistry of the Guangxi-type granite and its tectonic implications[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 33(1): 199~210 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi and Jiao Shoutao. 2020. Adakite comes from a high-pressure background: A scientific, reliable, predictable scientific discovery [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 36(6): 1675~1683 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Wang Yan, Qian Qing, *et al.* 2001. The characteristics and

- tectonic-metallogenic significances of the adakites in Yanshan Period from eastern China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17(2): 236~244 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Xu Jifeng, Wang Yan, *et al.* 2004. Diversity of adakite[J]. *Geological Bulletin of China*, 23(9~10): 959~965 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Wang Yan, Li Chengdong, *et al.* 2006. Granite classification on the basis of Sr and Yb contents and its implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(9): 2249~2269 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Guowei, Guo Anlin, Wang Yuejun, *et al.* 2013. Tectonics of South China continent and its implications[J]. *Science China: Earth Sciences*, 56: 1804~1828 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yueqiao, Xu Xianbing, Jia Dong, *et al.* 2009. Deformation record of the change from Indosinian collision-related tectonic system to Yanshanian subduction-related tectonic system in South China during the Early Mesozoic[J]. *Earth Science Frontiers*, 16(1): 234~247 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yueqiao, Dong Shuwen, Li Jianhua, *et al.* 2012. The new progress in the study of Mesozoic Tectonics of South China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(3): 257~279 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Yongzhang, Zeng Changyu, Li Hongzhong, *et al.* 2012. Geological evolution and oreprospecting targets in southern segment of Qinzhou Bay-Hangzhou Bay juncture orogenic belt, southern China[J]. *Geological Bulletin of China*, 31(2~3): 486~491 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Jinchu, Zhang Peihua, Xie Caifu, *et al.* 2006. The Huashan-Guposhan A-type granitoid belt in the western part of the Nanling Mountains: Petrology, geochemistry and genetic interpretations[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(4): 529~542 (in Chinese with English abstract).
- 邓晋福, 刘 翠, 狄永军, 等. 2018. 英云闪长岩-奥长花岗岩-花岗闪长岩(TTG)岩石构造组合及其亚类划分[J]. *地质前缘*, 25(6): 42~50.
- 董树文, 张岳桥, 龙长兴, 等. 2007. 中国侏罗纪构造变革与燕山运动新诠释[J]. *地质学报*, 81(11): 1449~1461.
- 郭令智, 施央申, 马瑞士. 1980. 华南大地构造格架和地壳演化[A]. *国际交流地质学术论文集[C]*. 北京: 地质出版社, 109~116.
- 胡升奇, 朱 强, 张先进, 等. 2013. 广东园珠顶铜铅矿床花岗岩斑岩年代学、地球化学特征及锆石 Hf 同位素[J]. *矿床地质*, 32(6): 1139~1158.
- 华仁民. 2005. 南岭中生代陆壳重熔型花岗岩类成岩-成矿的时间差及其地质意义[J]. *地质论评*, 51(6): 633~639.
- 华仁民, 毛景文. 1999. 试论中国东部中生代成矿大爆发[J]. *矿床地质*, 18(4): 300~308.
- 劳妙姬, 邹和平, 杜晓东, 等. 2015. 广西横县马山晚侏罗世钾玄质侵入岩的年代学和地球化学研究: 兼论钦杭成矿带西南段燕山期构造背景[J]. *地质前缘*, 22(2): 95~107.
- 李献华, 李武显, 王选策, 等. 2009. 幔源岩浆在南岭燕山早期花岗岩形成中的作用: 锆石原位 Hf-O 同位素制约[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 39(7): 872~887.
- 李献华, 周汉文, 刘 颖, 等. 1999. 桂东南钾玄质侵入岩带及其岩石学和地球化学特征[J]. *科学通报*, 44(18): 1992~1998.
- 梁 锦, 周永章, 李红中, 等. 2015. 扬子-华夏构造结合带的演化阶段及对斑岩铜矿形成的控制机制[J]. *地质前缘*, 22(2): 144~159.
- 刘 凯, 厉子龙, 徐维光, 等. 2016. 华南中生代岩浆岩时空分布和迁移与古太平洋板块俯冲过程[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 35(6): 1141~1155.
- 路远发. 2004. GeoKit: 一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包[J]. *地球化学*, 33(5): 459~464.
- 毛建仁, 叶海敏, 厉子龙, 等. 2013. 钦杭结合带(东段)晚中生代挤压-伸展构造的岩浆活动与成矿记录[J]. *矿物学报*, 33(22): 30~31.
- 毛建仁, 厉子龙, 叶海敏. 2014. 华南中生代构造-岩浆活动研究: 现状与前景[J]. *中国科学: 地球科学*, 44(12): 2593~2617.
- 毛景文, 谢桂青, 李晓峰, 等. 2004. 华南地区中生代大规模成矿作用与岩石圈多阶段伸展[J]. *地质前缘*, 11(1): 45~55.
- 潘桂棠, 肖庆辉, 陆松年, 等. 2009. 中国大地构造单元划分[J]. *中国地质*, 36(1): 1~28.
- 彭松柏, 刘松峰, 林木森, 等. 2016. 华夏早古生代俯冲作用(I): 来自糯垌蛇绿岩的新证据[J]. *地球科学*, 41(5): 765~778.
- 覃小锋, 王宗起, 王 涛, 等. 2015. 桂东鹰扬关群火山岩时代和构

## 附中文参考文献

- 陈懋弘, 李忠阳, 李 青, 等. 2015. 初论广西大瑶山地区多期次花岗岩岩浆活动与成矿系列[J]. *地质前缘*, 22(2): 41~53.
- 陈新跃, 王岳军, 张玉芝, 等. 2013. 桂东南南渡正长岩年代学、地球化学特征及其构造意义[J]. *大地构造与成矿学*, 37(2): 284~293.
- 邓晋福, 肖庆辉, 苏尚国, 等. 2007. 火成岩组合与构造环境: 讨论[J]. *高校地质学报*, 13(3): 392~402.

- 造环境的重新厘定:对钦杭结合带西南段构造格局的制约[J]. 地球学报, 36(3): 283~292.
- 覃小锋, 王宗起, 宫江华, 等. 2017. 云开地块北缘加里东期中-基性火山岩的厘定: 钦-杭结合带南西段早古生代古洋盆存在的证据[J]. 岩石学报, 33(3): 791~809.
- 王 强, 许继锋, 赵振华, 等. 2001. 大别山燕山期亏损重稀土元素花岗岩类的成因及动力学意义[J]. 岩石学报, 17(4): 551~564.
- 王 强, 许继锋, 赵振华, 等. 2008. 埃达克质岩的构造背景与岩石组合[J]. 矿物岩石地球化学通报, 27(4): 344~350.
- 王 强, 郝露露, 张修政, 等. 2020. 汇聚板块边缘的埃达克质岩: 成分和成因[J]. 中国科学: 地球科学, 50(12): 1 845~1 873.
- 汪 洋, 程素华. 2010. “C型埃达克岩”: 一个基于误解的概念?[J]. 矿物岩石地球化学通报, 29(3): 284~292.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. 岩石学报, 23(6): 1 217~1 238.
- 肖庆辉, 李廷栋, 潘桂棠, 等. 2016. 识别洋陆转换的岩石学思路——洋内弧与初始俯冲的识别[J]. 中国地质, 43(3): 721~737.
- 肖庆辉, 刘 勇, 冯艳芳, 等. 2010. 中国东部中生代岩石圈演化与太平洋板块俯冲消减关系的讨论[J]. 中国地质, 37(4): 1 092~1 101.
- 熊小林, 韩江伟, 吴金花. 2007. 变质玄武岩体系相平衡及矿物-熔体微量元素分配: 限定 TTG/埃达克岩形成条件和大陆壳生长模型[J]. 地学前缘, 14(2): 149~158.
- 许 华, 黄炳诚, 倪战旭, 等. 2012. 钦杭成矿带西段古龙花岗岩株群岩石学、地球化学及年代学[J]. 华南地质与矿产, 28(4): 331~339.
- 许 华, 倪战旭, 黄炳诚, 等. 2016. 广西大瑶山东南缘早古生代 TTG 侵入岩石组合的确定及其区域构造意义[J]. 中国地质, 43(3): 780~796.
- 许继峰, 邬建斌, 王 强, 等. 2014. 埃达克岩与埃达克质岩在中国的研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 33(1): 6~13.
- 徐先兵, 张岳桥, 贾 东, 等. 2009. 华南早中生代大地构造过程[J]. 中国地质, 36(3): 273~293.
- 杨文平, 张招崇, 周 刚, 等. 2005. 阿尔泰铜矿带南缘希勒克特哈腊苏斑岩铜矿的发现及其意义[J]. 中国地质, 32: 107~114.
- 张 旗. 2014. 广西型花岗岩的地球化学特征及其构造意义[J]. 岩石矿物学杂志, 33(1): 199~210.
- 张 旗, 焦守涛. 2020. 埃达克岩来自高压背景——一个科学的、可靠的、有预见性的科学发现[J]. 岩石学报, 36(6): 1 675~1 683.
- 张 旗, 王 焰, 钱 青, 等. 2001. 中国东部燕山期埃达克岩的特征及其构造-成矿意义[J]. 岩石学报, 17(2): 236~244.
- 张 旗, 许继峰, 王 焰, 等. 2004. 埃达克岩的多样性[J]. 地质通报, 23(9~10): 959~965.
- 张 旗, 王 焰, 李承东, 等. 2006. 花岗岩的 Sr-Yb 分类及其地质意义[J]. 岩石学报, 22(9): 2 249~2 269.
- 张国伟, 郭安林, 王岳军, 等. 2013. 中国华南大陆构造与问题[J]. 中国科学: 地球科学, 43(10): 1 553~1 582.
- 张岳桥, 董树文, 李建华, 等. 2012. 华南中生代大地构造研究新进展[J]. 地球学报, 33(3): 257~279.
- 张岳桥, 徐先兵, 贾 东, 等. 2009. 华南早中生代从印支期碰撞构造体系向燕山期俯冲构造体系转换的形变记录[J]. 地学前缘, 16(1): 234~247.
- 周永章, 曾长育, 李红中, 等. 2012. 钦州湾-杭州湾构造结合带(南段)地质演化和找矿方向[J]. 地质通报, 31(2~3): 486~491.
- 朱金初, 张佩华, 谢才富, 等. 2006. 南岭西段花山-姑婆山 A 型花岗岩杂岩带: 岩石学、地球化学和岩石成因[J]. 地质学报, 80(4): 529~542.