

doi: 10.12029/gc20160307

许华, 倪战旭, 黄炳诚, 等. 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, 2016, 43(3): 780–796.
Xu Hua, Ni Zhanxu, Huang Bingcheng, et al. Determination of Early Paleozoic TTG intrusive rocks at the southeast edge of Dayao Mountain, Guangxi[J]. Geology in China, 2016, 43(3): 780–796(in Chinese with English abstract).

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

许 华 倪战旭 黄炳诚 韩淑朋 王翠云 陈 杨

(广西区域地质调查研究院, 广西 桂林 541003)

摘要: 文章对钦杭结合带西南段大瑶山东南缘地区发育的早古生代花岗岩进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年和岩石学、地球化学、TTG 岩石组合的研究。该系列岩体主要沿大瑶山隆起东南缘呈规模大小不等的岩株(脉)成群、成带产出, 大致呈北东向弧形带状展布。按其产出的时空分布特征, 可划分为 2 条构造-岩浆岩带: ①古龙-夏郢中-晚奥陶世辉长闪长岩+TTG 组合构造-岩浆岩带(445~475 Ma); ②罗平-古袍早志留世花岗岩闪长岩-花岗岩组合构造-岩浆岩带(432~436 Ma)。岩石 SiO₂ 含量 51.56%~73.12%, 总体具低 K₂O、高 CaO、相对富钠(Na₂O>K₂O)的特征; 以偏铝质-弱过铝质(A/CNK 值≈1)为主, 岩石化学系列由低钾系列→钙碱性系列→高钾钙碱性系列演化; 稀土总量低($\sum \text{REE} 67.82 \times 10^{-6} \sim 214.81 \times 10^{-6}$), 为弱-中等铈亏损的轻稀土富集型的稀土配分曲线特征; 富集大离子亲石元素 Rb、Th、U 和 LREE, 具明显 Ta、Nb 负异常, 总体反映了活动陆缘弧花岗岩组合的地球化学特征。结合区域地质特征分析认为, 该早古生代花岗岩属典型的活动大陆边缘弧环境岩浆岩组合, 以壳幔同熔 I 型花岗岩为主, 为大瑶山东南缘早古生代洋陆俯冲-碰撞的地质记录; 由 TTG 组合→花岗岩闪长岩-花岗岩组合的组成极性显示: 洋俯冲玄武岩板片由南东往北西方向俯冲, 其与东邻的华夏云开陆缘(由北西往南东俯冲)构成双向俯冲-碰撞的地球动力学机制。

关键词: 早古生代花岗岩; TTG 组合; 岩石地球化学; 双向俯冲; 大瑶山东南缘

中图分类号 P588.12; P597.3 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2016)03-0780-17

Determination of Early Paleozoic TTG intrusive rocks at the southeast edge of Dayao Mountain, Guangxi

XU Hua, NI Zhan-xu, HUANG Bing-cheng, HAN Shu-peng, WANG Cui-yun, CHEN Yang

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

Abstract: This paper presents the zircon LA-ICP-MS U-Pb age, petrology, geochemistry and TTG intrusive rock combination of the Early Paleozoic granite from southeast edge of Dayao Mountain on the southwestern margin of Qin Zhou-Hangzhou collision belt. The series of intrusive rock occurs as stocks or dikes with different sizes, which aligns in NE direction as an arc-like belt.

收稿日期: 2015-12-14; 改回日期: 2016-04-21

基金项目: 中国地质调查局“广西壮族自治区地质系列图件编制与综合研究”项目(1212011220240)及中国地质调查局地质矿产调查评价专项(1212011120815)联合资助。

作者简介: 许华, 男, 1969 年生, 硕士, 教授级高级工程师, 从事区域地质调查工作; E-mail: xuhua88131@163.com。

According to the distribution of time and space, the intrusive rocks can be divided into two tectonic-magmatic belts: i.e., Gulong-Xiacheng Middle-late Ordovician gabbro diorite + TTG intrusive rock combination (445–475 Ma) and Luoping-Gupao Early Silurian granodiorite-granite rock combination (432–436 Ma). The intrusion with wide range of SiO₂ (51.56%–73.12%) is mainly characterized by low K₂O, high CaO and relative enrichment of Na (Na₂O>K₂O) and is dominated by meta-aluminum and weak peraluminum (A/CNK value ≈ 1), which exhibits evolution trends from low-K, calc-alkaline to high-K calc-alkaline series. Furthermore, the rocks have low total REE ($\sum \text{REE}=67.82 \times 10^{-6}-214.81 \times 10^{-6}$), showing chondrite-normalized REE patterns with weak-middle negative Eu anomalies and enrichment of light REE. In addition, the MORB normalized multi-element variation diagram clearly displays intensive enrichment of large ion lithophile elements such as Rb, Th, U and LREE and obvious depletion of Ta, Nb. These petro-geochemical characteristics indicate that the intrusive rocks belong to active continental margin granite rock combination. Combined with regional geological characteristics, the authors hold that the granite series, dominated by I-type granite with crust-mantle mixing source, is the product of typical continental margin, which recorded Early Paleozoic ocean-continent subduction-collision event at the southeast edge of Dayao Mountain area. The polarity of the TTG intrusive rock combination and granodiorite-granite combination shows that, together with the Cathaysia Yunkai continental margin (subducting from northwest to southeast) adjacent to the east of Dayao Mountain, the oceanic subduction basalt slab, subducting from southeast to northwest, constitutes a bi-directional subduction-collision geodynamic mechanism.

Key words: Early Paleozoic granite; TTG intrusive rock combination; petrogeochemistry; Bi-directional subduction; southeast edge of Dayaoshan

About the first author: XU Hua, male, born in 1969, master, professor, senior engineer, mainly engages in the regional geological survey; E-mail: xuhua88131@163.com.

Fund support: Supported by China Geological Survey Programs (No. 1212011220240, No.1212011120815).

1 引言

广西大瑶山地区位于扬子板块与华夏板块结合带(称钦杭结合带)的西南段,区域构造上称“大瑶山隆起”^[1-3]。华夏板块与扬子板块结合带北东段以萍乡、江山、绍兴为界已成为共识,有“江绍缝合线”之称。但西南段(湘桂段)界线,由于界线被晚古生代地层覆盖,争议较大^[4-13]。

尽管诸学者推断的界线不尽相同,但已越来越多地将目光聚焦于大瑶山东南缘和云开地块北缘的结合部。程浴淇等^[10]认为华夏古陆与南华活动带的界线在绍兴—萍乡—北海一线(在广西境内对应于云开地块北缘的北海—博白—岑溪—梧州断裂带);吴浩若等^[14]、殷鸿福等^[15]根据钦州地区存在志留纪—中泥盆世等深流沉积及晚泥盆世—中二叠世深水放射虫硅质岩而认为云开地块西北部的“钦防海槽”是华夏板块与扬子板块的南段界线(缝合线)。钦防加里东海槽是否向广东延伸,目前有争议^[16],但是,近来在两广交界罗定、云浮一带发现了中晚古生代的枕状熔岩和二叠—三叠纪的构造混杂岩,有学者主张钦防海槽与之相连,构成钦州—

岑溪—罗定—云浮构造混杂岩^[17],亦即以云开地块的北界为界线^[15]。

扬子陆块东南缘的华南洋是晋宁期俯冲消亡还是早古生代晚期消亡?以及华南新元古代—早古生代的构造演化等,一直是华南地质研究的难点和争论的焦点。有学者认为扬子和华夏板块在新元古代(大约820 Ma)拼合之后直到晚古生代—早中生代华南地区再无新的洋壳打开,华南自大约820 Ma后进入板内或陆内演化阶段^[18-19],但是板内或陆内演化亦有不同见解^[18-21];也有学者认为华南存在不同时代的沟—弧—盆体系^[6-7,22]、多岛洋体系^[15]以及早古生代碰撞造山带^[8]等,认为华南存在江南古陆与华夏古陆,两者在晋宁期沿江山—绍兴断裂带碰撞缝合,但向湘、粤、桂方向开启,形成“加里东”残余小洋盆,自晋宁期—加里东期盆地沉积中心不断向南西迁移^[9,23]。华夏与扬子之间曾有过2次开合,第1次张裂是在晚震旦世—寒武纪,造成古南华洋的打开,其后奥陶纪时开始拼合,志留纪时北端与扬子陆壳相连,南端仍保持张开(钦防海槽);第2次张裂是在石炭—二叠纪,可能延续到早三叠世(赣湘桂裂陷槽),至中三叠世印支运动才最终拼合^[15]。

华南早古生代构造-岩浆作用是华南地质演化研究的关键环节,而华南加里东期花岗岩研究相对薄弱,对其构造背景的认识也存在明显分歧^[5, 24-27],这在一定程度上影响和左右了对华南早古生代构造演化的认识。笔者试图从大瑶山东南缘地区加

里东期花岗岩的TTG岩石组合及其构造-岩浆演化方面作些肤浅的研究,为华南西段早古代的构造演化研究提供基础的地质资料。TTG岩类(英云闪长岩-奥长花岗岩-花岗闪长岩)是花岗质岩石中非常重要的一个岩类或岩石组合,它广泛分布于太古宙

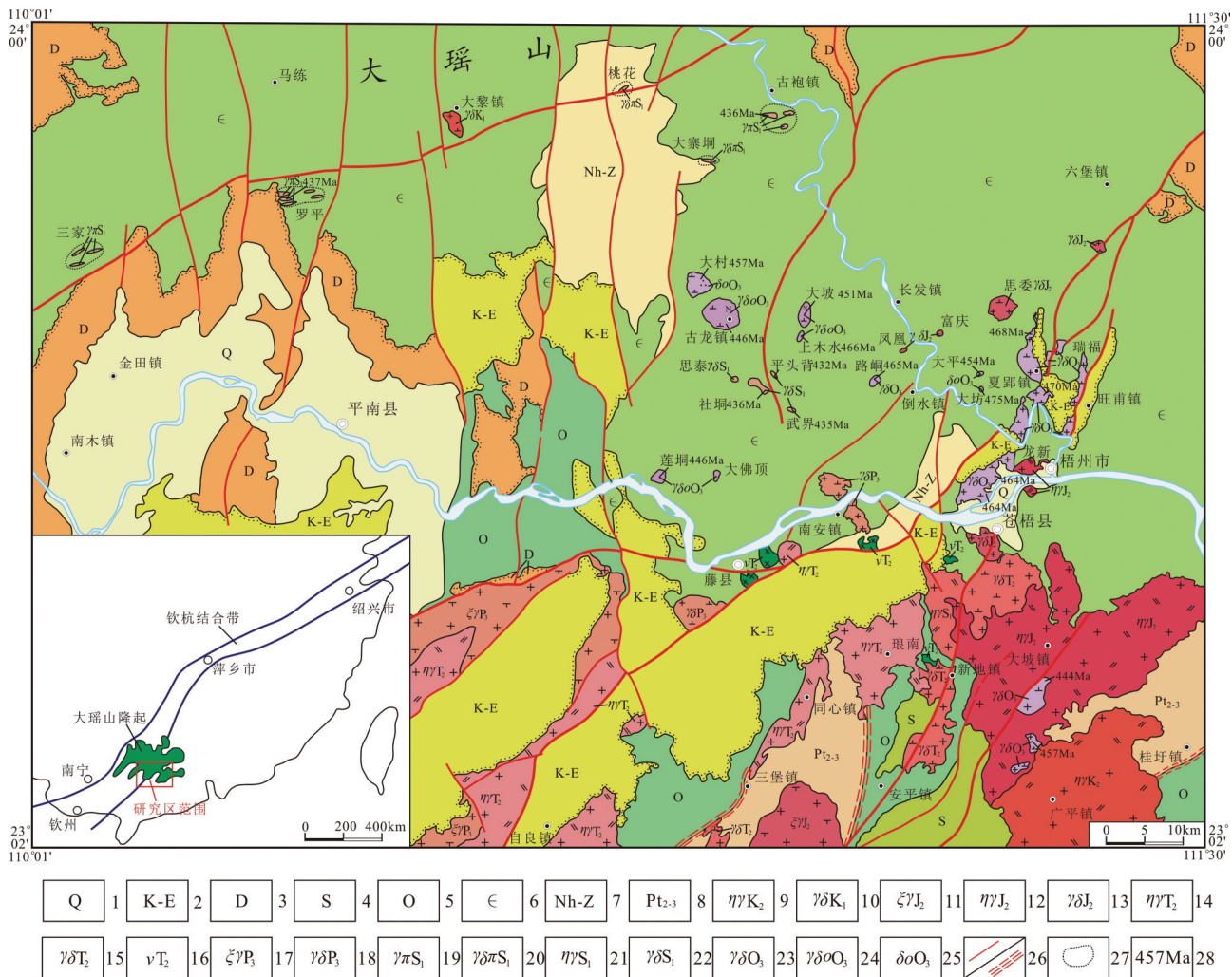


图1 大瑶山东南缘早古生代花岗岩分布地质简图

- 1—第四系; 2—白垩—古近系; 3—泥盆系; 4—志留系; 5—奥陶系; 6—寒武系; 7—南华—震旦系; 8—中新元古界; 9—晚白垩世二长花岗岩; 10—早白垩世花岗闪长岩; 11—中侏罗世正长花岗岩; 12—中侏罗世二长花岗岩; 13—中侏罗世花岗闪长岩; 14—中三叠世辉长岩; 15—中三叠世二长花岗岩; 16—中三叠世石英闪长岩; 17—中三叠世花岗闪长岩; 18—晚二叠世正长花岗岩; 19—晚二叠世花岗闪长岩; 20—早志留世二长花岗岩; 21—早志留世花岗闪长岩; 22—早志留世花岗斑岩; 23—早志留世花岗闪长斑岩; 24—晚奥陶世花岗闪长岩; 25—晚奥陶世石英闪长岩; 26—晚奥陶世英云闪长岩; 27—断层/韧性剪切带; 28—推测隐伏岩体; 29—同位素年龄值

Fig.1 Simplified geological map of the Early Paleozoic granite from the southeast edge of Dayao Mountain area

- 1—Quaternary; 2—Cretaceous- Paleogene; 3—Devonian; 4—Silurian; 5—Ordovician; 6—Cambrian; 7—Nanhua system—Sinian; 8—Meso-Neoproterozoic; 9—Late Cretaceous monzonitic granite; 10—Early Cretaceous granodiorite; 11—Middle Jurassic syenogranite; 12—Middle Jurassic monzonitic granite; 13—Middle Jurassic granite diorite; 14—Middle Triassic gabbro; 15—Middle Triassic monzonitic granite; 16—Middle Triassic quartz diorite; 17—Middle Triassic granitic diorite; 18—Late Permian syenogranite; 19—Late Permian granodiorite; 20—Early Silurian monzonitic granite; 21—Early Silurian granodiorite; 22—Early Silurian granite porphyry; 23—Early Silurian granite diorite porphyry; 24—Late Ordovician granite diorite; 25—Late Ordovician quartz diorite; 26—Late Ordovician tonalite; 27—Fault/ductile shear zone; 28—Infered concealed rock mass; 29—Isotopic age

—古元古代的花岗—绿岩带和显生宙的岛弧—活动大陆边缘岩浆弧^[28-30]。一般认为, TTG岩类形成于洋俯冲作用的构造环境, 是洋俯冲玄武岩板片脱水熔融的产物^[31-32]。Condie and Benn^[29]提出, TTG岩类是现存太古宙地壳中最丰富的岩类, 研究它的源区和成因, 可以更好地理解大陆成因及其早期演化; 即使在古近—新近纪, TTG岩类也是添加于安第斯和其他大陆边缘弧的大陆地壳的重要新生组分。TTG岩类不但是不成熟的新生陆壳的组成部分, 而且是成熟陆壳花岗岩(狭义)的源区岩石^[30, 33]。Barker^[34]曾经提出, 英云闪长岩—奥长花岗岩岩套大部分产于: (1)太古宙灰色片麻岩地区; (2)太古宙绿岩带的周边; (3)元古宙、古生代、中生代和新生代的大陆边缘; (4)岛弧潜火山地区; (5)蛇绿岩带中。另外, 板片熔融作用(slab melting)与金(Au)及金铜(Au—Cu)矿床的形成密切相关。

因此, 本文依托广西区域地质志修编(2012—2014年)和广西1:25万贵县幅区域地质调查(2010—2012年), 对大瑶山东南缘早古生代花岗岩进行了野外调查, 同时收集了大量近年来该区加里东期花岗岩的同位素测年及岩石地球化学数据, 尝试着从大量岩石地球化学数据中提取有效信息, 对该区早古生代花岗岩的岩石组合特征进行TTG岩石组合的识别, 进而探讨其岩石成因和构造背景。这些新资料对于更好地揭示扬子板块与华夏板块结合带西南段早古生代的地球动力学环境及其构造演化过程具有重要意义。

2 区域地质背景

大瑶山地区位于广西中东部, 面积近1800 km²。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EW向, 局部NE向。在大地构造上属于湘桂断陷盆地之大瑶山隆起^[11], 或大瑶山地体^[5]。

该地区在南华纪—志留纪时期是古南华洋盆的组成部分, 沉积了一套厚达万米的类复理石砂页岩、硅质岩建造, 杂砂岩和含砾砂岩较多, 鲍马层序特征明显。至早奥陶世的郁南运动后, 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, 发生了强烈的加里东运动, 广西运动褶皱造山遭受剥蚀, 其后下沉接受晚古生代盖层沉积。下泥盆统滨岸相碎屑岩不整合其上, 沿隆起周边分布。印支期—喜山期均处于隆升状态, 边缘有燕山期和喜山期断陷盆地分布。丁文江^[35]根据大瑶山地区泥盆系莲花山组与下伏的下古生界龙山系之间的不整合, 建议以“广西运动”代表华南与加里东运动相应的地壳运动。因此, 大瑶山地区是“广西运动”的命名地, 广西被认为是加里东运动的典型地区。目前, 一般都把广西运动的原因归为扬子板块与华夏板块的汇聚和碰撞, 但吴浩若^[36]认为, 广西运动的主幕为早奥陶世, 云开地块与桂滇—北越地块、扬子地块的汇聚挤压形成了大瑶山东西向的线形褶皱带, 湘、赣两省晚奥陶世—早志留世的崇余运动才真正使华夏板块与扬子板块完全拼合。因此, 广西加里东运动的时限、构造背景尚存在争议。

大瑶山隆起以近东西向的大瑶山复背斜及同方向的大黎深断裂带为格架, 基底构造以紧密线状复式褶皱为主, 断裂不很发育。晚期叠加有NE向、NW向及近NS向构造, 断裂构造纵横交错十分发育。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, 并往NE延伸经贺街出鹰扬关(称梧州—贺街—鹰扬关断裂)。

该区岩浆活动频繁, 加里东期至喜山期均有活动。其岩浆岩主要发育有加里东期和燕山期, 前者主要分布于大瑶山隆起区内部, 多呈岩脉、岩墙、小岩株产出, 由闪长岩、花岗闪长岩和花岗闪长斑岩等中—酸性岩浆岩组成, 成因类型为幔源同熔型(I型)花岗岩。后者分布于大瑶山隆起的周边, 多呈岩株、岩基出现, 由花岗闪长岩、二长花岗岩和黑云母花岗岩等酸性岩浆岩组成, 成因类型属于改造型(S型)花岗岩^[1, 37-39]。这2期花岗岩浆活动, 代表了该区2次大的构造岩浆热事件, 相应形成了一系列的矿床, 即与加里东期同熔型(I型)花岗岩有关的Au、Cu多金属成矿系列, 以及与燕山期改造型(S型)花岗岩有关的W、Sn、Pb、Zn、Au成矿系列^[37]。

3 早古生代花岗岩的时空分布特征

大瑶山地区早古生代花岗岩在空间分布上, 由

①广西区域地质调查研究院. 1:25万贵县幅区域地质调查报告[R]. 2015.

于岩体剥露较浅(为浅伏一半隐伏岩体)或遭晚古生代及中生代沉积盖层覆盖, 出露多不完整。以往认为仅少量加里东期花岗岩以规模较小岩株产于大瑶山隆起区内部, 其实不然。随着近年来大量高精度同位素测年数据的获得, 以往划归为燕山期的花岗岩体中, 其实很多均属于加里东期花岗岩, 如古龙岩株群、夏郢岩体、龙新岩体等。它们既有呈规模较小岩株(脉)群产出, 也有规模较大的复式岩体, 且大致沿大瑶山隆起东南缘呈北东向弧形带状展布。

近年来, 一系列高精度测年数据(表1)表明: 大瑶山东侧及相邻地区早古生代花岗岩的形成年龄主要集中于475~410 Ma(中-晚奥陶世—早志留世), 与岩体的侵入上限顶寒武世和沉积下限早泥盆世的地质依据基本吻合。大致可以划分为早晚2个阶段, 早阶段(475~430 Ma, 加里东运动 I 幕): 俯冲

消减阶段, 以I型花岗岩(TTG+ G₁G₂组合)为主, 岩体规模小; 晚阶段(430~410 Ma, 相当于加里东运动 II 幕): 碰撞造山抬升阶段, 以QMG₂组合和S型花岗岩为主, 岩体规模大。大瑶山隆起的东南缘早古生代花岗岩的形成年龄主要为475~432 Ma(中-晚奥陶世—早志留世), 可进一步细分为475~445 Ma(中-晚奥陶世)和436~432 Ma(早志留世)2个年龄段(即两期), 两期花岗岩的大致时间界限, 相当于奥陶纪—志留纪的时间界限443.7 Ma^①。早期中-晚奥陶世花岗岩: 主要有古龙、大村、上木水、大坡、莲洞、路洞、太平、大坊、夏郢、龙新等岩体, 岩性组合为辉长闪长岩-石英闪长岩-英云闪长岩(或斜长花岗岩)-花岗闪长岩组合, 分布于大瑶山隆起东南缘古龙—莲洞—龙新一夏郢一带; 晚期早志留世花岗岩: 主要有社垌、罗平、桃花、古袍等岩体, 岩性组合为花岗闪长(斑)岩-花岗(斑)岩组合, 分布于大瑶山隆起

表1 大瑶山东南缘及邻区早古生代花岗岩同位素年龄一览

Table 1 Geochronological data of the Early Paleozoic granite from the southeast edge of Dayao Mountain and adjacent area

岩体	测年对象	测试方法	年龄/Ma	资料来源
加里东早阶段早期花岗岩类				
古龙岩体	英云闪长岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法	445.9±1.2	本文
大村岩体	石英闪长岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法	456.9±2.0	
莲洞岩体	英云闪长岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法	445.9±2.2	
上木水岩体	英云闪长岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法	465.5±2.3	
大坡岩体	英云闪长岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法	451.4±2.8	
太平	石英闪长岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法	454.2±3.0	
大坊	石英闪长岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法	475.4±2.4	②
路洞岩体	斜长花岗岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法	465.1±2.3	
夏郢岩体	斜长花岗岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法	468.2±1.4	
	花岗闪长岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法	469.6±1.2	
龙新岩体	英云闪长岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法	463.6±1.3	
	花岗闪长岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法	463.7±1.7	
加里东早阶段晚期花岗岩类				
罗平岩体	花岗斑岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法	436.8±1.1	本文
古袍岩体	花岗斑岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法	436.3±3.0	[40]
社垌岩体	花岗闪长岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法	435.8±1.3	
平头背岩体	花岗闪长斑岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法	432.0±1.7	[41]
武界岩体	花岗闪长岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法	434.5±0.8	
加里东晚阶段及邻区花岗岩				
大宁岩体	花岗闪长岩	SHRIMP 锆石 U-Pb 法	419.1	[42]
桂岭岩体	黑云母二长花岗岩	SHRIMP 锆石 U-Pb 法	424.4	[43]
岩鹰嘴岩体	花岗闪长斑岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法	426.9±2.3	[44]
苗儿山岩体	黑云母二长花岗岩	SHRIMP 锆石 U-Pb 法	443.5	[45]
都庞岭西体	黑云母二长花岗岩	锆石 U-Pb 法	407~422	[46]
钦甲岩体	黑云母花岗岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法	412.4~424.4	[47]
那蓬岩体	黑云母花岗岩	锆石 U-Pb 法	418	[48]
云开地区	条带、眼球状花岗岩	SHRIMP 锆石 U-Pb 法	465~413	[49]
壶洞岩体	片麻状花岗闪长岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法	443.1±2.0	[50]
宁潭岩体	片麻状花岗岩	SHRIMP 锆石 U-Pb 法	421.9±9.8	[51]

①国际地层委员会(ICS). 国际地层表. 2004.

②Zhang Z Q, Chen M H, et al. Geochronology of the ingenous intrusions in the Dayaoshan uplift southeastern GuangXi: implicatian on the Paleozoic Wuyi-Yunkai orogeny and related metallogy (未发表).

区的内陆腹地。总体显示由靠海沟(糯洞—苍梧早古生代钦防残余海槽)的南东缘往北西大瑶山隆起区的内陆腹地,岩体有由中基性—中酸性向酸性演化,形成年龄由老变新的趋势。

4 岩石组合及岩相特征

各岩株、岩脉群及各侵入体出露的岩性不尽相同,但总体仍显示了自(辉长)闪长岩→石英闪长岩→英云闪长岩(斜长花岗岩或奥长花岗岩)→花岗闪长岩→花岗岩(或二长花岗岩)的岩石组合及岩相变化特征。在大瑶山隆起的东南缘古龙—夏郢一带,主要为早期(中—晚奥陶世)的辉长闪长岩—石英闪长岩—英云闪长岩(或斜长花岗岩)—花岗闪长岩组合,如古龙、大村、莲洞、上木水、大坡、路峒、夏郢、龙新、大平、大坊等岩体。各侵入体因基岩露头有限,出露的岩性大同小异,岩性主要为石英闪长岩—英云闪长岩(或斜长花岗岩)—花岗闪长岩组合。各岩体具有明显的岩相分带,一般岩体边缘相为石英闪长岩、英云闪长岩,中心相为花岗闪长岩或二长花岗岩。如古龙岩体,中心相为细—中粒黑云母花岗闪长岩和英云闪长岩,边缘相为中—细粒石英闪长岩;社洞岩体中心相为中—细粒黑云母花岗闪长岩或二长花岗岩,边缘相为花岗闪长斑岩。石英闪长岩、英云闪长岩、花岗闪长岩中富含暗色(辉长)闪长质包体,呈浑圆状、长条状或不规则状,大小2~20 cm,包体与寄主岩界线清楚。

往北西大瑶山隆起区内陆腹地,主要为花岗闪长(斑)岩—花岗(斑)岩组合,如罗平、桃花、古袍、大寨垌等岩株、岩脉群。由于岩体剥露较浅,多为浅伏—半隐伏岩体,地表出露主要为规模较小的浅成—超浅成花岗岩株(脉),成群成带分布。如罗平—六岑岩脉群为由诸多小岩脉组成的超浅成相火山—侵入杂岩,主要由一系列近东西向平行的岩脉群组成,岩脉群侵入寒武系浅变质砂泥岩中,大多顺层侵入或与地层小角度斜交呈指状交叉,单岩脉宽几米至几十米不等,岩性主要为花岗闪长斑岩—花岗斑岩,部分岩脉边缘尚发育流纹斑岩、隐爆角砾岩等。

5 岩石地球化学特征

笔者选取了新鲜的代表性岩石进行了岩石地球化学分析。主、微量元素及稀土元素分析测试均

由武汉综合岩矿测试中心完成,图件采用GeoKit软件^[52]制作。

岩石主量元素含量及相关特征参数列于表2。早期的(辉长)闪长岩—石英闪长岩—英云闪长岩—花岗闪长岩组合, SiO₂含量在51.56%~70.16%变化;晚期的花岗闪长(斑)岩→花岗斑岩(或二长花岗岩)组合, SiO₂含量在65.92%~73.12%变化,反映了由基性→中酸性演化。K₂O(0.88%~3.83%)、CaO(0.39%~7.82%)等含量变化较大,可能与岩浆演化过程或源区成分的差异有关。总体具低钾、高钙、相对富钠(Na₂O>K₂O)、低镁铁质含量和低Mg[#]值(21.64~62.31)等特征。在SiO₂—(Na₂O+K₂O)(TAS)图解(图2)中,早期(中—晚奥陶世)岩石投点主要落于

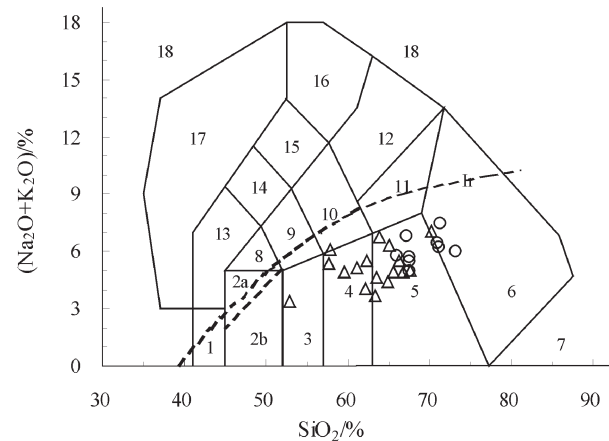


图2 早古生代花岗岩 TAS 图解(底图据[53])

△—古龙—夏郢地区(早期); ○—罗平—古袍地区(晚期)
Ir—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

Fig. 2 TAS diagram of the Early Paleozoic granite from the southeast edge of Dayao Mountain area (after [53])

△—Gulong—Xiacheng area (early period); ○—Luoping—Gupao area (late period);

Ir—Boundary: upper—alkaline, lower—subalkaline. 1—Peridot gabbro; 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

表2 大瑶山东南缘早古生代花岗岩主元素含量(%)及特征参数
Table 2 Major element (%) compositions of the Early Paleozoic granite from the southeast edge of Dayao Mountain area

岩体	岩性	样号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	H ₂ O ⁺	CO ₂	total	Q	Or	Ab	An	A/CNK
古龙	石英闪长岩	古龙-1	62.15	0.35	16.97	2.33	3.27	0.13	2.57	6.72	2.88	1.16	0.10	1.15	0.06	99.84	22.19	6.95	24.70	30.36	0.93
古龙	英云闪长岩	2352-1	63.31	0.34	16.73	1.85	3.60	0.13	2.58	6.27	2.66	1.03	0.09	1.13	0.10	99.82	25.03	6.17	22.82	31.01	0.99
大村	英云闪长岩	2060-2	63.55	0.39	16.51	2.29	2.90	0.12	2.15	5.28	2.93	1.73	0.16	1.59	0.11	99.71	24.90	10.42	25.29	25.76	1.01
大坡	英云闪长岩	2263-1	64.81	0.36	16.45	1.73	2.90	0.10	2.13	4.46	2.55	1.86	0.13	2.26	0.04	99.78	29.62	11.27	22.13	21.91	1.15
莲洞	辉长闪长岩	2271-1	51.56	1.17	17.94	2.04	8.65	0.21	4.45	7.82	2.53	0.88	0.21	2.35	0.04	99.85	5.55	5.33	21.96	35.90	0.93
莲洞	英云闪长岩	2270-1	67.69	0.43	15.69	1.13	3.12	0.09	1.49	3.57	3.05	1.97	0.11	1.46	0.02	99.82	31.41	11.83	26.24	17.35	1.15
大佛顶	石英闪长岩	2277-1	63.76	0.38	18.85	1.48	1.63	0.07	0.87	4.72	4.70	2.09	0.14	0.90	0.07	99.66	17.02	12.51	40.29	22.89	1.01
三家	英云闪长岩	2363-1	65.52	0.44	15.72	1.01	2.90	0.03	3.53	2.16	3.51	1.40	0.15	2.61	0.85	99.83	29.57	8.58	30.81	10.20	1.40
三家	斜长花岗岩	YQ3244	65.00	0.35	16.11	1.77	1.98	0.07	2.94	2.85	4.48	1.80	0.09	烧失量 2.13		99.58	21.57	10.91	38.89	13.94	1.11
上木水	石英闪长岩	上木水村*	59.57	0.55	16.57	2.47	4.95	0.13	3.31	5.75	2.66	2.27	0.13	烧失量 1.87		100.20	16.11	13.63	22.87	27.01	0.96
上木水	英云闪长岩	上木水村**	61.17	0.49	16.15	2.46	4.15	0.13	2.83	5.32	2.95	2.17	0.15	烧失量 2.27		100.20	18.81	13.08	25.47	24.92	0.96
路响	斜长花岗岩	路响 9-1*	62.22	0.49	16.49	1.93	4.55	0.11	4.73	0.44	4.58	0.90	0.13	烧失量 3.62		100.20	22.45	5.49	40.12	1.50	1.77
夏郢	英云闪长岩	夏郢 5-1*	66.68	0.34	15.60	2.72	2.00	0.09	1.61	4.16	2.90	2.05	0.11	烧失量 2.00		100.30	31.01	12.32	24.97	20.35	1.07
大平	石英闪长岩	大平 10-1*	57.89	0.94	15.89	3.27	4.10	0.13	4.09	4.72	3.59	2.49	0.29	烧失量 2.91		100.30	11.10	15.10	31.18	20.42	0.92
大坊	石英闪长岩	大坊 11-1*	57.62	0.92	15.84	2.81	4.15	0.10	4.01	5.70	3.33	2.01	0.27	烧失量 3.51		100.30	12.60	12.27	29.11	23.08	0.88
龙新	英云闪长岩	龙新 14-1*	66.20	0.38	15.72	2.31	2.45	0.10	1.85	4.12	3.06	2.42	0.10	烧失量 1.53		100.20	27.19	14.48	26.23	20.11	1.04
龙新	花岗岩闪长岩	龙新 14-2*	70.16	0.19	15.45	0.60	1.90	0.05	0.68	2.67	3.56	3.46	0.07	烧失量 1.23		100.00	28.75	20.68	30.48	12.98	1.07
社垌	二长花岗岩	2253-1	71.13	0.26	14.63	0.45	2.10	0.07	1.07	2.11	2.47	3.77	0.10	1.33	0.31	99.80	35.69	22.68	21.29	10.06	1.22
社垌	花岗岩闪长岩	2254-1	70.91	0.25	14.72	0.34	2.23	0.08	1.09	2.18	2.61	3.83	0.10	1.23	0.23	99.80	33.99	23.00	22.45	10.40	1.19
社垌	花岗岩闪长岩	3004#	67.42	0.21	15.55	1.32	2.28	0.05	1.35	3.85	2.92	2.10	0.08	1.74	0.54	99.41	31.97	12.77	25.43	19.17	1.10
社垌	花岗岩闪长岩	1104#	65.92	0.32	15.35	1.50	2.51	0.09	1.82	4.29	3.01	2.76	0.10	1.56	0.13	99.36	25.53	16.69	26.07	20.70	0.98
古袍	花岗岩闪长岩	古袍-1	67.49	0.28	14.51	0.76	2.93	0.03	2.53	0.86	3.07	2.46	0.08	2.19	2.67	99.86	34.56	15.29	27.34	3.99	1.56
古袍	花岗岩闪长岩	2054-1	67.39	0.29	15.08	1.91	1.33	0.06	1.29	1.97	2.44	3.27	0.10	1.63	3.06	99.82	36.34	20.30	21.70	9.65	1.35
罗平	花岗岩闪长岩	罗平-1	73.12	0.21	15.40	1.51	0.27	0.01	0.68	0.39	3.24	2.80	0.06	1.94	0.21	99.84	42.86	16.93	28.06	1.62	1.70
罗平	花岗岩闪长岩	罗平-2	71.18	0.24	15.08	0.94	0.80	0.04	0.76	1.70	3.91	3.55	0.09	1.30	0.21	99.80	30.67	21.33	33.65	8.04	1.13

注: 样号加“*”者据 Zhang, et al.^①, 加“#”据 [41]; 饱和度 A/CNK=Al₂O₃/(K₂O+Na₂O+CaO) 分子数比值。

① Zhang ZQ, Chen MH, et al. Geochronology of the ingenuous intrusions in the Dayaoshan uplift southeastern Guangxi: implication on the Paleozoic Wuyi-Yunkai orogeny and related metallogeny (待发表).

辉长闪长岩-闪长岩-花岗闪长岩区;晚期(早志留世)岩石主要落于花岗闪长岩-花岗岩区,岩石化学分类命名与镜下定名基本一致。在岩石化学系列SiO₂-K₂O图解(图3)中,岩石主要落于钙碱性系列,少量(三家、路垌斜长花岗岩)落于低钾(拉斑)系列及其界线附近,少量演化晚期样品落于高钾钙碱性系列,显示由低钾系列→钙碱性系列→高钾钙碱性系列演化特征。岩石铝饱和指数A/CNK值多接近于1(图4),以偏铝质—弱过铝质为主,仅少部分浅成相花岗闪长斑岩、花岗斑岩和分异程度较高的二长花岗岩为强过铝质(A/CNK值>1.1),其可能与岩浆分异或受浅部围岩物质混染有关。其CIPW标准矿物组合主要为正常类型Q+Or+Ab+An+Di+Hy组合和铝过饱和类型C+Q+Or+Ab+An+Hy组合。尽管CIPW标准矿物计算结果中部分样品出现刚玉(C),但在其岩石矿物组成中,一般极少见到过铝质标型矿物。

岩石稀土元素及微量元素含量列于表3。岩石稀土总量($\sum REE$) $67.82 \times 10^{-6} \sim 214.81 \times 10^{-6}$,不同侵入体不同岩石的稀土含量有所差异, $\sum REE$ 与酸度(SiO₂)无明显的线性演化关系,总体含量偏低。 δEu 值0.52~1.05,中等—弱Eu负异常,个别(大佛顶石英闪长岩)具弱Eu正异常。轻、重稀土分馏程度高,轻、重稀土比值(LREE/HREE)为3.85~13.31。稀土

配分曲线为弱—中等铈亏损轻稀土富集型曲线(图5),不同侵入体及不同岩性的稀土曲线有所差异,如早期的古龙、莲洞、夏郢、龙新等地的石英闪长岩、英云闪长岩、花岗闪长岩或斜长花岗岩,由于岩浆分异程度较低或较少地壳物质的加入,呈弱铈亏损或铈异常不明显右倾稀土曲线特征(图5-a);而晚期的罗平、桃花、古袍等地的浅成相花岗闪长斑岩-花岗斑岩,由于岩浆分异程度较高(斜长石分离结晶作用)或较多地壳物质的加入,呈中等铈亏损稀土曲线特征(图5-b)。总体上,各侵入体代表性样品的稀土配分曲线基本相似,相同侵入体不同岩性的稀土曲线显示为协调的演化性,表明该系列侵入体具有相同或相似的岩浆源区和成岩环境。而稀土总量($\sum REE$)及其他化学成分之间的差异,说明它们的源区组成并非完全相同。

微量元素原始地幔标准化蛛网图(图6-a、b)可看出:与原始地幔相比,不相容元素均不同程度地富集,尤其是不相容元素Rb、Th、U强烈富集。在不相容元素总体富集的背景上,Ba、Ta、Nb、Sr、P、Ti显示出不同程度的负异常,而相邻的Rb、Th、U、LREE、Zr、Hf则出现不同程度的富集隆起。晚期的岩石随酸度(SiO₂)和岩浆分异程度(DI)增高,Ba、Sr、P、Ti负异常进一步增强,部分样品出现强烈的U正异常,峰谷效应进一步加剧。不同岩石间存在差

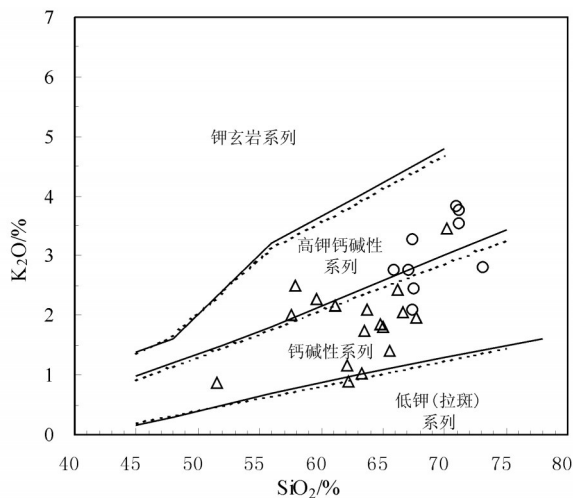


图3 早古生代花岗岩SiO₂-K₂O图解
(底图据[54];虚线据[55])

Fig.3 SiO₂-K₂O diagram of the Early Paleozoic granite (solid lines from [54]; dashed lines from [55])

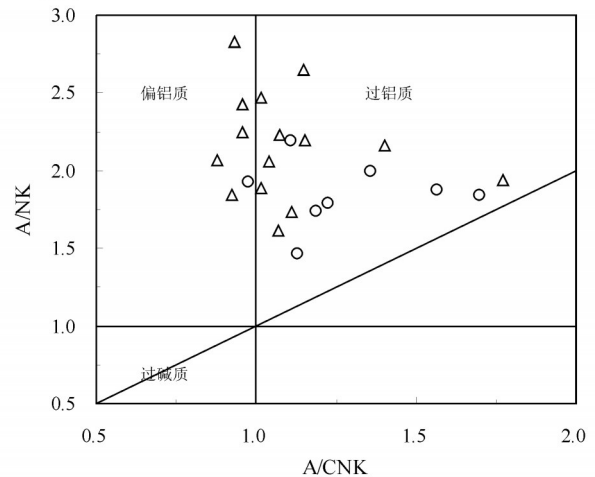


图4 早古生代花岗岩A/CNK-A/NK图解
(底图据[56])

Fig.4 A/CNK-A/NK diagram of the Early Paleozoic granite (base diagram from [56])

表3 大瑶山东南缘早古生代花岗岩稀土及微量元素含量(10^{-6})
Table 3 Rare earth element (10^{-6}) and trace element compositions of the Early Paleozoic granite from the southeast edge of Dayao Mountain area

样品号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	Σ REE	δ Eu	Rb	Nb	Ta	Th	U	Pb	Zr	Sr	Ba	Hf
古龙-1	13.47	26.72	3.07	11.00	2.52	0.68	2.44	0.42	2.61	0.58	1.81	0.28	1.95	0.29	15.99	67.82	0.82	49	4.83	1.19	6.49	1.34	10.6	76	201	356	2.31
2352-1	35.57	61.71	7.31	26.23	4.58	1.13	4.49	0.66	3.49	0.68	1.93	0.30	1.78	0.36	19.53	150.21	0.75	58	5.60	0.61	7.16	1.36	10.6	71	179	330	2.40
2060-2	33.16	56.53	5.89	19.05	3.03	0.86	3.07	0.43	2.74	0.58	1.74	0.27	1.91	0.31	16.73	129.55	0.85	62	6.83	0.82	15.9	1.96	25.8	113	269	729	3.45
2263-1	25.80	45.81	5.26	18.52	3.23	0.77	2.75	0.45	2.63	0.54	1.66	0.26	1.73	0.27	15.12	109.68	0.77	84	8.84	0.90	18.8	4.39	20.2	148	316	683	4.39
2271-1	14.52	32.16	4.45	20.19	5.00	1.27	4.98	0.89	5.50	1.13	3.48	0.50	3.21	0.49	30.37	97.76	0.77	49	7.80	0.70	3.69	1.01	8.38	112	250	176	4.58
2270-1	27.14	49.00	5.75	20.49	3.60	0.90	3.33	0.52	3.21	0.64	1.92	0.29	1.99	0.29	17.71	119.06	0.78	82	7.94	0.92	15.7	2.46	19.2	112	151	520	5.12
2277-1	17.50	32.89	4.18	16.06	3.19	0.99	2.41	0.36	1.97	0.38	1.08	0.16	1.04	0.15	10.49	82.35	1.05	58	7.23	0.91	13.12	1.89	13.7	126	131	921	4.47
2363-1	38.01	77.23	10.38	42.25	8.17	2.27	7.86	1.18	5.81	1.13	3.01	0.47	2.62	0.54	29.89	200.93	0.85	77	7.73	0.65	15.2	3.39	6.4	161	290	262	5.10
上木水村*	25.10	47.40	5.67	21.40	4.23	1.02	4.18	0.83	4.73	0.90	2.77	0.49	3.17	0.48	25.90	122.38	0.73	112	8.19	0.69	13.5	3.06	24.6	52	349	774	2.06
上木水矿*	22.90	42.00	4.84	18.00	3.38	0.85	3.33	0.65	3.74	0.74	2.22	0.40	2.62	0.39	20.80	106.06	0.77	93	7.69	0.68	13.5	2.77	32.2	43	312	642	1.51
路崎9-1*	24.50	46.00	5.39	19.20	3.11	0.62	2.59	0.50	3.05	0.61	1.88	0.34	2.25	0.36	15.80	110.39	0.64	34	10.1	0.82	22.9	4.15	8.5	73	110	222	2.23
夏路5-1*	30.80	49.60	5.70	19.70	3.35	0.86	2.98	0.55	3.00	0.54	1.61	0.26	1.66	0.26	16.10	120.87	0.82	117	10.2	1.09	22.8	2.93	29.6	57	253	649	1.79
大平10-1*	48.30	84.10	10.50	40.90	7.17	1.90	7.03	1.16	5.97	1.09	3.04	0.47	2.77	0.41	36.40	214.81	0.81	101	13.1	0.80	10.2	1.37	15.4	264	565	813	5.85
大坊11-1*	42.10	78.40	9.51	36.20	6.18	1.56	5.39	0.91	4.89	0.84	2.34	0.38	2.29	0.35	26.20	191.34	0.81	69	12.4	0.74	9.6	1.30	30.2	244	473	760	5.41
龙新14-1*	28.50	45.00	4.65	16.20	3.07	0.80	2.99	0.60	3.38	0.69	2.22	0.41	2.68	0.41	19.50	111.60	0.80	113	7.79	0.89	21.7	2.86	23.7	81	193	809	2.60
龙新14-2*	40.20	70.90	8.26	30.10	5.62	1.13	5.29	1.08	6.27	1.25	3.90	0.69	4.36	0.67	37.50	179.72	0.62	170	8.48	0.93	27.5	5.42	35.9	117	170	873	3.88
2253-1	26.25	45.84	4.92	17.24	3.16	0.68	2.80	0.51	2.99	0.65	1.99	0.33	2.28	0.36	18.58	109.99	0.68	175	9.42	1.40	24.0	7.69	53.8	120	157	817	3.39
2254-1	25.98	45.12	4.74	16.29	2.78	0.68	2.69	0.44	2.73	0.59	1.87	0.31	2.19	0.36	16.71	106.77	0.74	216	8.90	1.34	25.7	9.70	69.7	121	151	726	3.57
3004#	28.20	46.40	5.15	16.90	2.88	0.60	2.55	0.44	2.49	0.54	1.67	0.25	1.72	0.29	17.00	110.08	0.66	92	8.63	1.00	23.9	6.33	28.3	115	222	908	3.44
1104#	19.40	37.20	4.00	14.20	2.83	0.63	2.62	0.49	2.85	0.64	1.92	0.29	2.07	0.32	20.40	89.46	0.70	156	8.04	0.81	17.3	5.28	28.3	148	270	772	3.86
古袍-1	14.77	30.98	3.59	13.59	2.96	0.53	3.25	0.53	3.47	0.75	2.29	0.39	2.61	0.43	21.89	80.14	0.52	99	17.0	1.5	9.4	5.01	13.9	131	90.2	332	4.42
2054-1	17.20	30.95	3.76	14.40	3.01	0.65	2.91	0.51	3.30	0.72	2.24	0.39	2.73	0.46	20.08	83.22	0.67	140	12.6	1.26	10.1	3.62	96.2	121	146	693	3.46
罗平-1	15.09	27.56	3.38	12.50	2.84	0.56	2.57	0.39	2.29	0.48	1.34	0.21	1.30	0.19	13.72	70.68	0.62	166	10.2	1.26	6.2	6.05	9.6	112	104	237	3.69
罗平-2	27.08	52.37	5.94	20.71	3.85	0.83	3.32	0.51	2.83	0.59	1.74	0.26	1.66	0.26	15.90	121.97	0.69	151	10.2	0.99	15.4	6.82	31.2	153	306	654	4.96

注: 样品加“”者引据Zhang, et al^①; 加“#”引据[4]。

① Zhang ZQ, Chen MH, et al. Geochronology of the ingenuous intrusions in the Dayaoshan uplift southeastern Guangxi: implication on the Paleozoic Wuyi-Yunkai orogeny and related metallogeny (待发表).

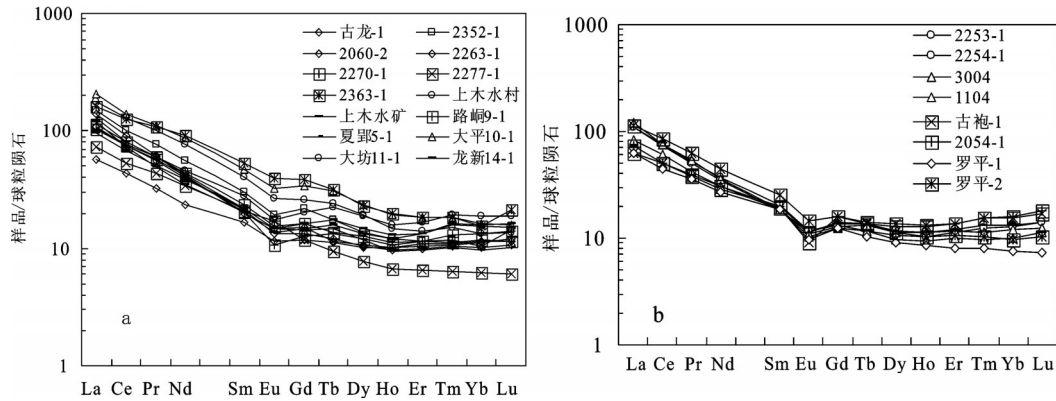


图5 早古生代花岗岩稀土元素配分曲线图(a, b)
(球粒陨石标准数据据[57])

Fig.5 Chondrite-normalized REE patterns of the Early Paleozoic granite from the southeast edge of Dayao Mountain area (chondritic normalization from [57])

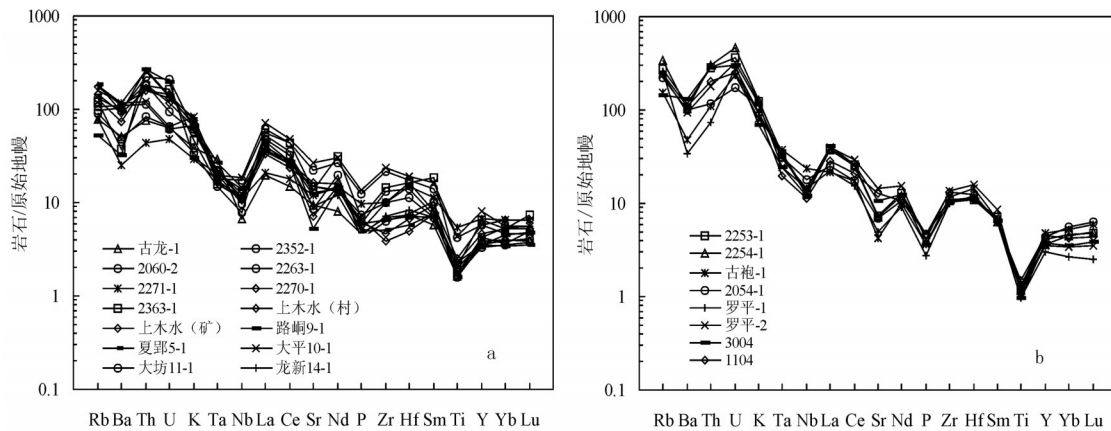


图6 早古生代花岗岩微量元素蛛网图(a, b)
(原始地幔标准数据据[57])

Fig.6 Mantle-normalized trace element spidergrams of the Early Paleozoic granite from the southeast edge of Dayao Mountain area (N-MORB normalization values from [57])

异,但总体均具明显 Ta、Nb 负异常,反映了活动陆缘火山弧花岗岩组合的微量元素特征。

6 TTG 岩石组合的判别

结合研究区早古生代花岗岩的岩性岩相特征、岩石地球化学基本参数分析结果,采用 O'Connor CIPW-norm An-Ab-Or 标准矿物分类系统进行 TTG 岩石组合识别。主要步骤如下:①在干的质量百分含量条件下,选择 TAS 主元素分类图解为闪长岩、花岗闪长岩、花岗岩的样品,进行 CIPW-norm 计算;②CIPW-norm 计算中对样品均采用侵入岩公式进行 Fe₂O₃、FeO 校正;③对石英标准分子(Qz-

norm)大于 10%的样品折算成 An+Ab+Or=100%,然后在 An-Ab-Or 三角图中进行投影。

CIPW 标准矿物计算结果列于表 2。在 O'Connor^[58]CIPW 标准矿物分类命名 An-Ab-Or 三角图(图 7)投影结果:早期(中-晚奥陶世)的古龙-夏郢地区岩石样品主要落于 T₁T₂G₁(英云闪长岩-奥长花岗岩-花岗闪长岩)组合,晚期(早志留世)的罗平-古袍样品落于 G₁G₂(花岗闪长岩-花岗岩)组合,而相邻的大宁-桂岭地区(中-晚志留世)样品则落于 QMG₂(石英二长岩-花岗岩)组合。

投影结果表明:大瑶山东南缘地区存在古龙-夏郢辉长闪长岩+T₁T₂G₁组合(靠近俯冲内带)、罗平

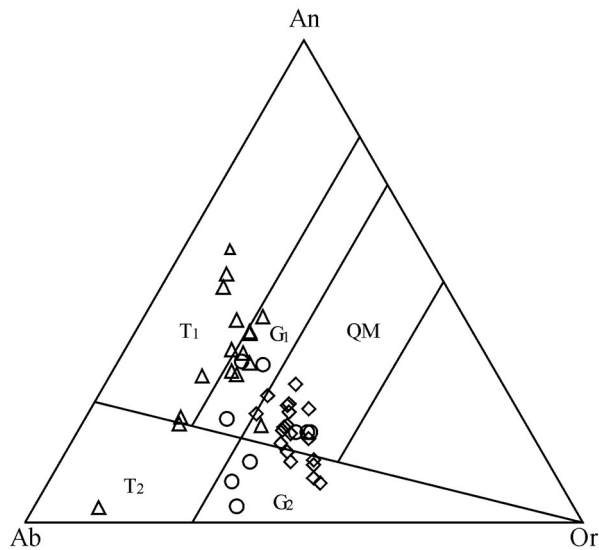


图7 早古生代花岗岩TTG组合的An-Ab-Or图解
(底图据[58])

△—古龙—夏郢地区(早期); ○—罗平—古袍地区(晚期); ◇—大宁—桂岭地区; T₁—英云闪长岩; T₂—奥长花岗岩; G₁—花岗闪长岩; QM—石英二长岩; G₂—花岗岩(狭义)

Fig.7 An-Ab-Or diagram of the Early Paleozoic granite
(after [58])

T₁—Tonalite; T₂—Trondhjemite; G₁—Granodiorite; QM—Quartz monzonite; G₂—Granite (narrow sense)

△—Gulong—Xiacheng area (early period); ○—Luoping—Gupao area (late period); ◇—Daning—Guiling area

一古袍G₁G₂组合(远离俯冲外带)和大宁—桂岭QMG₂组合(远离俯冲外带)等3条早古生代侵入岩组合构造—岩浆带,共同构成指示洋壳俯冲方向的TTG岩石组合岩浆带。

在Batchelor花岗岩R₁-R₂构造图解(图8)中,古龙—夏郢和罗平—古袍地区岩石样品部分落于地幔斜长花岗岩区,部分落于破坏性活动板块边缘(俯冲阶段)花岗岩区,也有个别落于同碰撞花岗岩或晚造山区;而相邻的大宁—桂岭地区的岩石则主要落于破坏性活动板块边缘(俯冲阶段)花岗岩区,少量落于同碰撞花岗岩和晚造山区。其表明大瑶山东南缘早古生代侵入岩浆具地幔分离→板块俯冲→同碰撞→后造山演化趋势,其中古龙—夏郢地区的岩体侵位环境为板块碰撞前的活动陆缘(洋壳俯冲阶段),与O'Connor分类图解结果一致。从而确定该区存在因洋壳俯冲形成的早古生代(辉长闪长岩)+T₁T₂G₁侵入岩石组合构造—岩浆带(靠近俯冲内带),其与罗平—古袍G₁G₂组合(远离俯冲外带),以

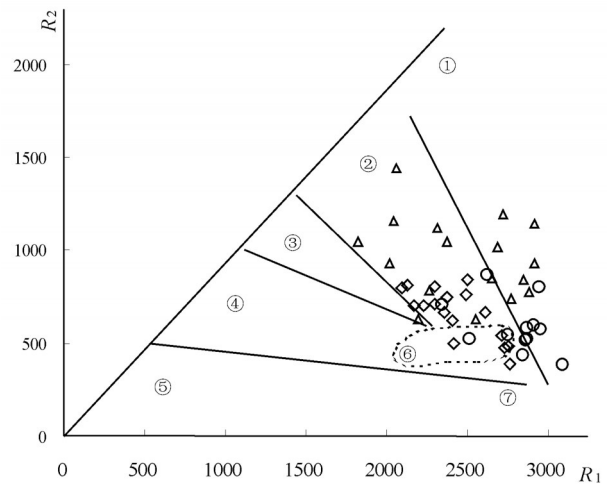


图8 早古生代花岗岩R₁-R₂构造图解
(底图据[59])

①—地幔斜长花岗岩; ②—破坏性活动板块边缘(俯冲阶段)花岗岩; ③—板块碰撞后隆起期花岗岩; ④—晚造山区花岗岩; ⑤—非造山区A型花岗岩; ⑥—同碰撞(S型)花岗岩; ⑦—造山区后A型花岗岩

Fig.8 R₁-R₂ tectonic diagram of the Early Paleozoic granite
(after [59])

①—Mantle plagiogranite; ②—Destructive active plate margin granite (pre-plate collision); ③—Caledonian "permitted" plutons (post-collision uplift); ④—Sub-alkaline plutons (late orogenic); ⑤—Anorogenic alkaline suite A type granite; ⑥—Syn-collision (S type) granite; ⑦—Postorogenic A type granite

及大宁—桂岭QMG₂组合(远离俯冲外带)共同构造造成了大瑶山东南缘早古生代完整的(辉长闪长岩+T₁T₂G₁组合→G₁G₂组合或QMG₂组合)俯冲—碰撞造山的构造—岩浆岩带。

7 讨论

7.1 岩石成因

早古生代侵入岩的岩石组合为辉长闪长岩—石英闪长岩—英云闪长岩—花岗闪长岩—花岗岩或二长花岗岩,岩石普遍含角闪石;岩石化学系列包括了低钾系列—(中钾)钙碱性系列—高钾钙碱性系列,主量元素总体具高CaO低K₂O的特征,Na₂O>K₂O或基本相当,Na₂O/K₂O比值均大于0.7,显示了壳幔同熔I型花岗岩特征。稀土总量(ΣREE)低,轻稀土富集,弱—中等Eu亏损,Y元素含量相对偏高;微量元素原始地幔标准化蛛网显示右倾模式,Th、U、La、Ce、Zr、Hf、Sm不同程度富集,在弱富集背景上,Ta、Nb、Sr、P、Ti显示“谷”形,具明显的Nb、Ta负异常,

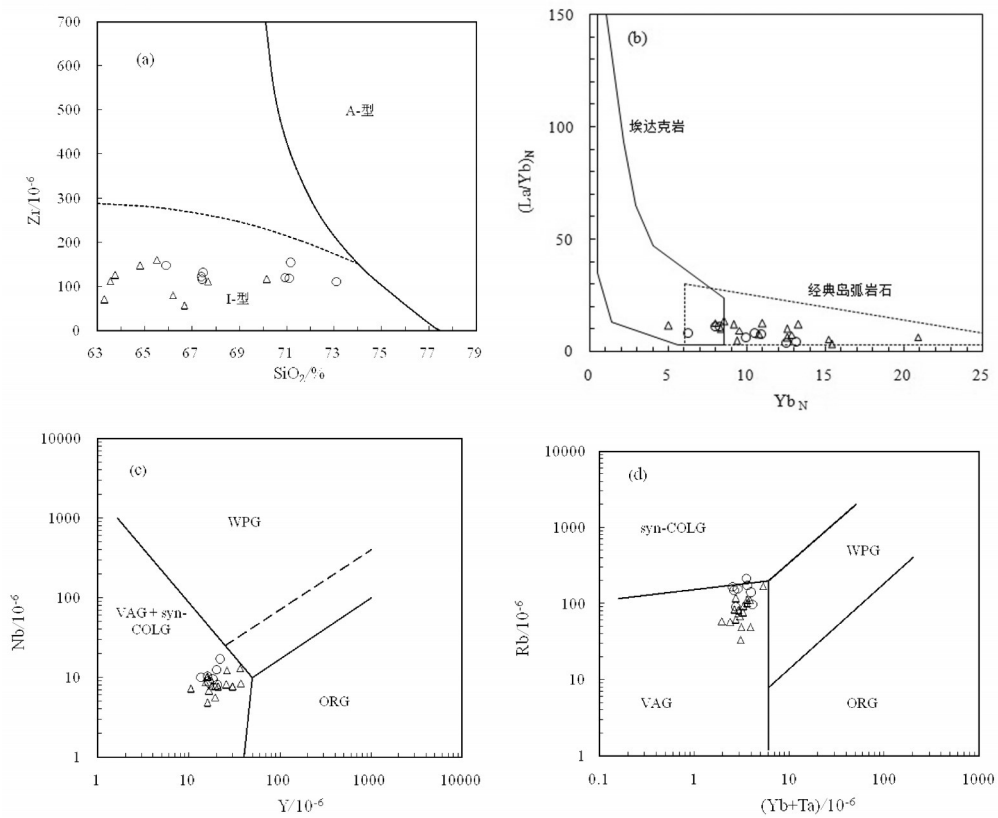


图9 岩浆成因及构造环境判别图 (a, b, c, d)

(图a底图据[60]; 图b底图据[61]; 图c、d底图据[62])

Syn-COLG—同碰撞花岗岩; VAG—火山弧花岗岩; WPG—板内花岗岩; ORG—洋中脊花岗岩

△—古龙—夏郢地区(早期T₁T₂G₁组合); ○—罗平—古袍地区(晚期G₁G₂组合)

Fig. 9 Determination diagram of magic genesis and tectonic environment of the Early Paleozoic intrusive (a—after[60]; b—after[61]; c, d—after[62])

Syn-COLG—Syn-Collision Granite; VAG—Volcanic Arc Granite; WPG—Within Plate Granite; ORG—Ocean Ridge Granite

△—Gulong—Xiacheng area (early period T₁T₂G₁ rock); ○—Luoping—Gupao area (late period G₁G₂ rock)

总体显示为火山弧I型花岗岩特征。

在岩浆成因SiO₂-Zr判别图(图9-a)中, 岩石均落于I型花岗岩区。在Defant的经典岛弧岩石与埃达克岩判别图(图9-b)上, 岩石主要落于经典岛弧岩石区域, 仅个别(大佛顶2277-1)落于埃达克岩区。在Pearce的花岗岩构造环境判别图中, Y-Nb微量元素判别图(图9-c)落于火山弧+同碰撞花岗岩区, 而(Yb+Ta)-Rb微量元素判别图(图9-d)则主要落于火山弧花岗岩区, 仅晚期岩石个别投点靠近同碰撞花岗岩过渡区。

综上所述表明: 大瑶山东南缘早古生代侵入岩主要为与岛弧或活动大陆边缘弧有关的壳幔同熔I型花岗岩(科迪勒拉型或安第斯型), 形成于俯冲-碰撞的挤压构造背景, 岩浆物质来源主要来自于俯冲

带幔源岩浆和地壳较深部位火成岩区, 可能受到了围岩物质的混染。尽管其中部分岩浆演化晚期的斜长花岗岩或浅成-超浅成相的花岗斑岩表现为强过铝(A/CNK值>1.1, 通常被判定为S型花岗岩)特征, 但从其岩石组合及岩浆演化特征来看, 其仍属于I型花岗岩强分异演化的产物或由于同熔岩浆上侵至地壳浅表过程中捕掳和重熔了较多的围岩物质所致。

7.2 构造意义

一直以来, 关于华南地区加里东期花岗岩的成因背景争议颇多。以往多认为加里东期花岗岩主要为S型花岗岩, 且呈面状展布, 并以此为依据之一推断华南早古生代时期已转为陆内造山阶段^[20, 27]。舒良树^[20]将华南(主要是浙、闽、粤地区)加里东晚阶段花岗(闪长)岩细分为2期: 早期属I型花岗岩, 形

成时代 430~460 Ma, 以含角闪石、数量少、规模小为特征; 晚期属 S 型花岗岩, 形成时代 400~430 Ma, 规模大、数量多, 并认为花岗岩是陆内造山作用的产物。刘宝珺等^[9]认为华南加里东期盆地消亡过程中, 虽然发生过有限俯冲作用, 但没有形成典型的岛弧型或科迪勒拉型或地体拼贴型造山带, 也不同于拗拉槽造山作用形成的陆内造山带, 而是华夏板块向北西漂移导致华南盆地脉动式发育形成的一种独特的“南华型”造山带。陈懋弘等^[63]、Zhang et al.(2013, 未发表)^①、肖柳阳等^[40]近年来在大瑶山东侧对与成矿有关的花岗岩体也做了大量的工作, 取得了较多的地质成果, 并认为该区至少存在加里东期斑岩-矽卡岩-石英脉型铜钨钼矿和燕山期斑岩型铜钨金矿两个不同的成矿系列。但其对加里东期花岗岩的成因背景认识上仍囿于“陆内造山”的观点。

由于华夏—扬子板块结合带(称之为“钦—杭结合带”)经历了长期复杂的构造演化历史, 目前有关结合带两侧陆块的碰撞拼贴过程、陆块之间的盆地性质及其最终关闭时间等存在严重分歧。由于华南地区普遍缺失部分志留纪地层, 泥盆系与下古生界呈角度不整合接触, 因而普遍认为扬子板块与华夏板块是在中—晚志留世沿着现在的钦杭结合带发生碰撞, 形成加里东期碰撞造山带^[15, 64]。然而, 作为加里东期造山过程中最重要阶段的板块俯冲过程形成的花岗岩却少有报道。

近几年来, 覃小锋等^[65-67]先后报道了云开地区云开群上部沙湾坪组中的变质基性岩为弧火山岩和石窝、清水口等中新元古代的古洋壳残片(锆石 SHRIMP U-Pb 年龄(1462 ± 28) Ma, 在距今约 455 Ma 时经历了一期变质作用)。彭松柏等^[49]在两广云开隆起区识别出有加里东期基性侵入岩(Sm-Nd 等时线年龄(392 ± 53) Ma), 并认为其形成于俯冲-碰撞大陆边缘的火山弧构造背景, 可作为华南地区存在加里东期扬子板块向华夏板块的俯冲-碰撞和海南新元古代-早古生代洋盆的存在、闭合的证据。许华等^[68]在大瑶山隆起的东南缘厘定出活动陆缘

性质的加里东期科迪勒拉 I 型古龙花岗岩株群(LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄(445.9 ± 1.2) Ma)。覃小锋等(2015, 待发表)^②及 1:25 梧州幅区调(2013)^③先后在大瑶山隆起(湘桂陆块)东南缘与云开陆块的拼贴带上(即相邻的岑溪糯洞、安平地区)识别出 N-MORB、E-MORB 及 IAB 型的中基性火山岩组合(溢流相-潜火山岩相), 并获得其 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 441~443 Ma, 表明该地区有早古生代古洋盆的存在。

本次工作识别的古龙—夏郢早古生代辉长闪长岩+T₁T₂G₁组合构造-岩浆带, 位于与云开地块毗邻的大瑶山隆起的东南缘, 带内岩石形成年龄集中于 445~475 Ma(中-晚奥陶世), 其可能属于俯冲-碰撞早期形成的靠近俯冲内带的岩浆岩组合; 而罗平—古袍 G₁G₂组合则位于前者的北西往大瑶山隆起内陆腹地, 带内岩石形成年龄集中于 432~436 Ma(早志留世), 其可能属于稍晚形成的远离俯冲内带的岩浆岩组合。

TTG 组合→花岗闪长岩-花岗岩组合, 被称为组成极性(或方向性), 它一方面指示俯冲的方向, 另一方面指示地壳的成熟度与厚度的不断增加^[30]。早古生代“钦防海槽”的北东端即从大瑶山南东缘的岑溪糯洞、安平一带通过, 该地区尚保留奥陶纪—志留纪完整的半深海—浅海相沉积。从靠近海沟的古龙—夏郢辉长闪长岩+T₁T₂G₁组合→远离海沟的罗平—古袍 G₁G₂组合以及大宁—桂岭地区的 QMG₂组合(另文发表), 其岩石在相同 SiO₂ 条件下, K₂O 增加, K₂O/Na₂O 比值增加, 在 SiO₂-K₂O 图(图 3)上清晰显示由低钾系列→钙碱性系列→高钾钙碱性系列演化特征, 明确指示了洋俯冲玄武岩板片为由 SE 往 NW 方向俯冲, 至罗平—古袍以及大宁—桂岭一带, 逐渐远离海沟, 且形成时间稍晚, 地壳的成熟度与厚度不断增加。

需要指出的是, 东邻的云开地块北西缘亦存在加里东期俯冲-碰撞型的基性岩和中酸性侵入岩, 其指示的俯冲方向由北西往南东俯冲^[49-50]。因此, 早古代大瑶山—云开地区可能存在双向俯冲的地

① Zhang Z Q, Chen M H, et al. Geochronology of the ingenous intrusions in the Dayaoshan uplift southeastern Guangxi: implication on the Paleozoic Wuyi-Yunkai orogeny and related metallogeny (待发表).

② 覃小峰, 等. 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(待发表). 2016.

③ 广东省地质调查院. 1:25 万梧州幅区域地质调查报告(内部资料). 2013.

球动力学机制。

8 结 论

(1)大瑶山东南缘早古生代花岗岩形成年龄主要集中在430~475 Ma(中-晚奥陶世—早志留世),按其产出的时空分布特征,可划分为2条构造-岩浆岩带:①古龙—夏郢中—晚奥陶世辉长闪长岩+TTG组合构造-岩浆岩带(445~475 Ma);②罗平—古袍早志留世花岗闪长岩-花岗岩组合构造-岩浆岩带(432~436 Ma)。

(2)大瑶山东南缘早古生代花岗岩属典型的活动大陆边缘弧环境的岩浆岩组合,以壳幔同熔I型花岗岩为主,为大瑶山东南缘早古生代洋陆俯冲-碰撞的地质记录。

(3)大瑶山隆起东南缘地区早古生代存在洋陆俯冲-碰撞机制,由TTG组合→花岗闪长岩-花岗岩组合的组成极性显示洋俯冲玄武岩板片由南东往北西方向俯冲,其与东邻的华夏云开陆缘(由北西往南东俯冲)构成双向俯冲-碰撞的地球动力学机制。

致谢: 本文成文过程中得到了中山大学周永章教授和桂林理工大学覃小锋博士的指导;成文后中国地质调查局发展研究中心肖庆辉研究员和成都地质矿产研究所潘桂棠研究员审阅了全文并提出修改建议;审稿专家及责任编辑杨艳老师对论文提出了宝贵修改意见,在此一并表示感谢!

参考文献(References):

- [1] 广西壮族自治区地质矿产局. 广西壮族自治区区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社, 1985, 1-853.
Bureau of Geology and Mineral Resources of Guangxi Zhuang Autonomous Region. Regional Geology of Guangxi Zhuang Autonomous Region. Beijing: Geological Publishing House, 1985. 1-853 (in Chinese).
- [2] 广西壮族自治区地质矿产勘查开发局. 广西壮族自治区数字地质图及说明书(1:50万). 南宁: 广西壮族自治区地质矿产局, 1999.
Bureau of Geology and Mineral Resources of Guangxi Zhuang Autonomous Region. Digital Geological Map and Specification of Guangxi Zhuang Autonomous Region. Nanning: Bureau of Geology and Mineral Resources of Guangxi Zhuang Autonomous Region, 1999. 1-137 (in Chinese).
- [3] 广西壮族自治区地质矿产勘查开发局. 广西壮族自治区数字地质图及说明书(1:50万). 南宁: 广西壮族自治区地质矿产局, 2006: 1-137.
Bureau of Geology and Mineral Resources of Guangxi Zhuang

- Autonomous Region. Digital Geological Map and Specification of Guangxi Zhuang Autonomous Region. Nanning: Bureau of Geology and Mineral Resources of Guangxi Zhuang Autonomous Region, 2006: 1-137 (in Chinese).
- [4] 任纪舜, 姜春发, 张正坤. 中国大地构造及其演化 [M]. 北京: 科学出版社, 1980: 1-140.
Ren Jishun, Jiang Chunfa, Zhang Zhengkun, et al. Geotectonic Evolution of China [M]. Beijing: Science Press, 1980: 1-124 (in Chinese).
- [5] 郭令智, 施央申, 马瑞士. 华南大地构造格架和地壳演化 [C]//国际交流地质学术论文集(I). 北京: 地质出版社, 1980:109-116.
Guo Lingzhi, Shi Yangshen, Ma Ruishi. Geotectonic Framework and Crustal Evolution of the South China [C]//Scientific Paper on Geology for International Exchange (I). Beijing: Geological Publishing House, 1980:109-116 (in Chinese).
- [6] 郭令智. 华南板块构造 [M]. 北京: 地质出版社, 2001: 1-264.
Guo Lingzhi. The Plate Tectonics of South China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2001: 1-264 (in Chinese).
- [7] 王鸿祯, 杨巍然, 刘本培. 华南地区古大陆边缘构造史 [M]. 武汉: 武汉地质学院出版社, 1986: 372.
Wang Hongzhen, Yang Weiran, Liu Benpei. Tectonic History of the Ancient Continental Margins of South China [M]. Wuhan: Wuhan College of Geology Press, 1986: 372 (in Chinese with English abstract).
- [8] 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: 27-33.
Li Jiliang. Lithospheric Structure and Geological Evolution of the Southeast China [M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 1993: 27-33 (in Chinese with English abstract).
- [9] 刘宝珺, 许效松, 潘杏南, 等. 中国南方古大陆沉积、地壳演化与成矿 [M]. 北京: 科学出版社, 1993: 1-263.
Liu Baojun, Xu Xiaosong, Pan Xingnan, et al. Paleo Continental Sediments, Crust Evolution and Ore Deposits of South China [M]. Beijing: Science Press, 1993: 1-236 (in Chinese).
- [10] 程裕淇, 沈永和, 曹国权, 等. 中国区域地质概论 [M]. 北京: 地质出版社, 1994.
Cheng Yuqi, Shen Yonghe, Cao Guoquan, et al. Outline of Regional Geology in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994 (in Chinese).
- [11] 潘桂棠, 肖庆辉, 陆松年, 等. 中国大地构造单元划分 [M]. 中国地质, 2009, 36(1): 1-28.
Pan Guitang, Xiao Qinghui, Lu Songnian, et al. Subdivision of Tectonic Units in China[J]. Geology in China. 2009, 36(1): 1-28 (in Chinese with English abstract).
- [12] 万天丰. 新编亚洲大地构造区划图 [J]. 中国地质, 2013, 40(5): 1351-1365.
Wan Tianfeng. A new Asian tectonic unit map [J]. Geology in China, 2013, 40(5): 1351-1365 (in Chinese with English abstract).
- [13] 周永章, 曾长育, 李红中, 等. 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, 2012, 31(2/3): 486-491.
Zhou Yongzhang, Zeng Changyu, Li Hongzhong. et al. Geological evolution and ore prospecting targets in southern segment of Qinzhou Bay-Hangzhou Bay juncture orogenic belt, southern China [J]. Geological Bulletin of China, 2012, 1(2/3): 486-491.
- [14] 吴浩若, 邝国敦, 王忠诚. 志留纪以来的云开地块[J]. 古地理学报, 2001, 3(3): 32-40.
Wu Haoruo, Kuang Guodun, Wang Zhongcheng. The Yunkai block since Silurian [J]. Journal of Palaeogeography, 2001, 3(3): 32-40 (in Chinese with English abstract).
- [15] 殷鸿福, 吴顺宝, 杜永生. 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): 1-11.
Ying Hongfu, Wu Shunbao, Du Yuansheng, et al. South China defined as part of Tethy an archipelagic ocean system [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 1999, 24: 1-11 (in Chinese with English abstract).
- [16] 赵汝旋. 论“钦州加里东海槽向广东延伸”问题[J]. 广东地质, 1996, 11(4): 1-7.
Zhao Ruxuan. On the extension of Qinzhou Caledonian relict sea trough into Guangdong [J]. Guangdong Geology, 1996, 11(4): 1-7 (in Chinese with English abstract).
- [17] 张伯友, 石满全, 杨树锋, 等. 古特提斯造山带在华南两广交界地区的新证据[J]. 地质论评, 1995, (1): 1-6.
Zhang Boyou, Shi Manquan, Yang Shufeng. et al. New evidence of the Paleotethyan orogenic belt on the Guangdong-Guangxi border region, South China [J]. Geological Review, 1995, (1): 1-6(in Chinese with English abstract).
- [18] 舒良树. 华南前泥盆纪构造演化: 从华夏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. Geological [J]. Journal of China Universities, 2006, 12 (4): 418-431 (in Chinese with English abstract).
- [19] Li Z X, Li X H, Wartho J A. Magmatic and metamorphic events during the Early Paleozoic Wuyi-Yunkai Orogeny, south-eastern South China: new age constraints and $P-T$ conditions[J]. GSA Bull, 2010, 122(516)-236: 722-793.
- [20] 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 Ddong, 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).
- [21] 舒良树. 华南构造演化的基本特征[J]. 地质通报, 2012, 31(7): 1035-1053.
Shu Liangshu. An analysis of principal features of tectonic evolution in South China Block [J]. Geological Bulletin of China, 2012, 31 (7): 1035-1053 (in Chinese with English abstract).
- [22] 郭令智, 施央申, 马瑞士. 中国东南部地体构造的研究[J]. 南京大学学报, 1984, 20(4): 732-739.
Guo Lingzhi, Shi Yangshen, Ma Ruishi. Tectonostratigraphic terranes of southeast China [J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences Edition), 1980, 20(4): 732-739(in Chinese with English abstract).
- [23] 水涛. 中国东南大陆基底构造格局[J]. 中国科学(B辑), 1987, (4): 414-422.
Shui Tao. Tectonic framework of the continental basement of southeast China [J]. Science in China (Series B), 1987, (4): 414-422 (in Chinese).
- [24] 莫柱孙, 叶伯丹, 等. 南岭花岗岩地质学[M]. 北京: 地质出版社, 1980.
Mo Zhusun, Ye Bodan, et al. Nanling Granitic Geology [M]. Beijing: Geological Publishing. House, 1980 (in Chinese with English abstract).
- [25] 孙明志, 徐克勤. 华南加里东期花岗岩及其形成的地质环境浅析[J]. 南京大学学报: 地球科学版, 1990, 2(4): 10-22.
Sun Mingzhi, Xu Keqing. On the Caledonian granitoid and their geotectonic environments of South China [J]. Journal of Nanjing University: Earth Sciences Edition, 1990, 2(4): 10- 22 (in Chinese).
- [26] 周新民. 对华南花岗岩研究的思考[J]. 高校地质学报, 2003, 9(4): 556-565.
Zhou Xinmin. My thinking about granites genesis of South China [J]. Geological Journal of China Universities, 2003, 9(4): 556-565 (in Chinese).
- [27] 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 Fangrong, Shu Liangshu, Wang Dezi, 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(in Chinese with English abstract).
- [28] Condie K C. Plate Tectonics and Crustal Evolution[M]. New York: Pergamon, 1982.
- [29] Condie K C, Benn K. Archean geodynamics: similar to different from Modern geodynamics [J]? AGU, Geophys. Monograph. Series, 2006, 164: 47-59.
- [30] 邓晋福, 罗照华, 苏尚国, 等. 岩石成因、构造环境与成矿作用[M]. 北京: 地质出版社, 2004.
Deng Jinfu, Luo Zhaohua, Su Shangguo, et al. Petrogenesis, Tectonic Setting and Mineralization [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004 (in Chinese with English abstract).
- [31] Drummond M S, Defant M J, Kepezhinskias. Petrosenesis of slab-derived trondhjemite-tonalite-dacite/adakite magmas[J]. Trans. Royal Soc. Edinburgh, Earth Sci., 1996, 87: 205-215.
- [32] 邓晋福, 肖庆辉, 苏尚国, 等. 火成岩组合与构造环境: 讨论[J]. 高校地质学报, 2007, 13(3): 392-402.
Deng Jinfu, Xiao Qinghui, Su Shangguo, et al. Igneous petrotectonic assemblages and tectonic settings: A discussion [J]. Geological Journal of. China Universities, 2007, 13(3): 392-402

- (in Chinese with English abstract).
- [33] Johannes, Holtz. Petrogenesis and Experimental Petrology of Granitic Rocks [M]. Minerals and Rocks, 22. Springer-Verlag, Berlin, 1996, 335.
- [34] Barker F. Trondhjemites, Dacites and Related Rocks [M]. New York: Elsevier Sci. Pub. Comp., 1979.
- [35] Ting Wenjiang(丁文江). The orogenic movements in China [J]. Bull. Geol. Soc. China, 1929, 8(2): 151-170.
- [36] 吴浩若. 重新解译广西运动 [J]. 科学通报, 2000, 45(5): 555-558.
Wu Haoruo. Reinterpreting Guangxi movement[J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(5): 555-558 (in Chinese).
- [37] 黄惠民, 和志军, 崔彬. 广西大瑶山地区花岗岩成矿系列 [J]. 地质与勘探, 2003, 39(4): 12-16.
Huang Huimin, He Zhijun, Cui Bin. Metallogenic series of granite in Dayaoshan of Guangxi [J]. Geology and Prospecting, 2003, 39(4): 12-16 (in Chinese with English abstract).
- [38] 骆靖中. 桂东地区花岗岩类与金银成矿的关系 [J]. 桂林冶金地质学院学报, 1993, 13(4): 329-339.
Luo Jinzhong. Gold and Silver ore deposits associated to granitoid in east Guangxi [J]. Journal of Guilin College of Geology, 1993, 13(4): 329-339 (in Chinese with English abstract).
- [39] 刘腾飞. 桂东花岗岩类特征及其与金矿关系 [J]. 广西地质, 1993, 6(4): 877-886.
Liu Tengfei. The characteristics of Grantoid in east Guangxi and its relation with gold deposit [J]. Guangxi Geology, 1993, 6(4): 877-886 (in Chinese with English abstract).
- [40] 肖柳阳, 陈懋弘, 张志强, 等. 广西昭平湾岛金矿矿床类型、成矿时代及其地质意义 [J]. 地学前缘, 2015, 22(2): 118-130.
Xiao Liuyang, Chen Maohong, Zhang Zhiqiang, et al. The deposit type, mineralization age and their geological significance of the Wandao gold deposit in Zhaoping County, Guangxi Province[J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(2): 118-130 (in Chinese with English abstract).
- [41] 陈懋弘, 莫次生, 黄智忠. 广西苍梧县社洞钨钼矿床花岗岩类锆石 LA-ICP-MS 和钨钼矿 Re-Os 年龄及其他地质意义 [J]. 矿床地质, 2011, 30(6): 963-978.
Chen Maohong, Mo Cisheng, Huang Zhizhong, et al. Zircon LA-ICP-MS U-Pb ages of granitoid rocks and molybdenite Re-Os age of Shedong W-Mo deposit district in Cangwu County, Guangxi and its geological significance[J]. Mineral Deposits, 2011, 30(6): 963-978 (in Chinese with English abstract).
- [42] 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 Shunbo, Fu Jianming, Xu Deming, 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 (in Chinese with English abstract).
- [43] 李晓峰, 冯佐海, 李容森, 等. 华南志留纪钨的矿化: 白石顶钨矿锆石 SHRIMP U-Pb 年龄和辉钨矿 Re-Os 年龄证据 [J]. 矿床地质, 2009, 28(4): 403-41.
Li Xiaofeng, Feng Zuohai, Li Rongseng, et al. Silurian Mo mineralization at Baishiding molybdenum deposit in northern Guangxi: Constraints from zircon SHRIMP U-Pb and molybdenite Re-Os ages [J]. Mineral Deposits, 2009, 28(4): 403-412 (in Chinese with English abstract).
- [44] 刘伟, 曾佐勋, 李绍凡, 等. 广西富川岩鹰嘴 W-Mo-Cu 多金属矿区斑岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其地质意义 [J]. 中国地质, 2014, 41(3): 797-813.
Liu Wei, Zeng Zuoxun, Li Shaofan, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the granitic and granodioritic porphyries from the Yanyingzui W-Mo-Cu polymetallic ore district in Fuchuan area, Guangxi, and its geological implications [J]. Geology in China, 2014, 41(3): 797-813 (in Chinese with English abstract).
- [45] 倪艳军, 陈必河, 陈文斌, 等. 湖南苗儿山白钨矿床的发现及其找矿意义 [J]. 华南地质与矿产, 2009, (3): 37-42.
Ni Yanjun, Chen Bihe, Chen Wenbin, et al. The finding and prospecting signification of the new style scheelite deposit in Miaoershan, Hunan Province [J]. Geology and Mineral Resources of South China, 2009, (3): 37-42 (in Chinese with English abstract).
- [46] 黄海波. 广西都庞岭花岗岩体基本特征 [J]. 中国区域地质, 1990, (3): 231-236.
Huang Haibo. Basic characteristics of the Dupangling granite in Guangxi [J]. Regional Geology of China, 1990, (3): 231-236 (in Chinese with English abstract).
- [47] 王永磊, 王登红, 张长青, 等. 广西钦甲花岗岩体单颗粒锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其地质意义 [J]. 地质学报, 2011, 85(4): 475-481.
Wang Yonglei, Wang Denghong, Zhang Changqing, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the Qinjia granite in Guangxi Province and its geologic significance [J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(4): 475-481 (in Chinese with English abstract).
- [48] 王江海, 孙大中, 常向阳, 等. 云开地块西北缘那蓬岩体的锆石 U-Pb 年龄 [J]. 矿物学报, 1998, 18(2): 130-133.
Wang Jianghai, Sun Dazhong, Chang Xiangyang. U-Pb dating of the Napeng granite at the NW margin of the Yunkai block, Guangdong, south China [J]. Acta Mineralogica Sinica, 1998, 18(2): 130-133 (in Chinese with English abstract).
- [49] 彭松柏, 金振民, 付建明. 两广云开隆起区基性侵入岩的地球化学特征及其构造意义 [J]. 地质通报, 2006, 25(4): 434-441.
Peng Songbai, Jin Zhenmin, Fu Jianmin, et al. Geochemical characteristics of basic intrusive rocks in the Yunkai uplift, Guangdong-Guangxi, China, and their tectonic significance[J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25(4): 434-441 (in Chinese with English abstract).
- [50] 覃小锋, 王宗起, 胡昂贵, 等. 两广交界地区壶洞片麻状复式岩体的年代学和地球化学: 对云开地块北缘早古生代构造-岩浆作用的启示 [J]. 岩石学报, 2013, 29(9): 3115-3130.
Qin Xiaofeng, Wang Zongqi, Hu Anggui, et al. Geochronology

- and geochemistry of Hudong gneissic composite pluton in the junction of Guangdong and Guangxi Provinces: Implications for Early Paleozoic tectono-magmatism along the northern margin of Yukai massif [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29 (9): 3115–3130 (in Chinese with English abstract).
- [51] 王磊, 龙文国, 周岱. 云开地区加里东期花岗岩锆石 U-Pb 年龄及其地质意义 [J]. *中国地质*, 2013, 40(4): 1016–1029.
Wang Lei, Long Wenguo, Zhou Dai. Zircon LA-ICP-MS U-Pb age of Caledonian granites from Precambrian basement in Yunkai area and its geological implications [J]. *Geology in China*, 2013, 40(4): 1016–1029 (in Chinese with English abstract).
- [52] 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).
- [53] Eric A K M. Naming materials in the magma/igneous rock system [J]. *Earth-Science-Reviews*, 1994, 37: 215–224.
- [54] Peccerillor R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey [J]. *Contribution of Mineral Petrology*, 1976, 58: 63–81.
- [55] Middlemost et al. *Magma and Magmatic Rocks* [M]. London: Longman, 1985: 1–266.
- [56] Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1989, 101(5): 635–643.
- [57] Sun S S, McDonough W. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [J]. *Geological Society London Special Publications*, 1989, 42: 313–345.
- [58] O' Connor J T. A classification for quartz-rich igneous rock based feldspar ratios [R]. USGS Prof. Paper, 1965, 525B, B79–B84.
- [59] Batchelor R A, Bowden P. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters [J]. *Chemical Geology*, 1985, 48(1/4): 43–55.
- [60] Whalen J B, et al. A type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1987, 95.
- [61] Defant M J, Drummond M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subduction lithosphere [J]. *Nature*, 1990, 662–665.
- [62] Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks [J]. *Petrol*, 1984, 25, 956–983
- [63] 陈懋弘, 黄智忠, 李斌, 等. 广西苍梧县社洞钨铋矿床花岗岩类岩石的地球化学特征及其与成矿的关系 [J]. *岩石学报*, 2012, 28 (1): 199–212.
Chen Maohong, Huang Zhizhong, Li Bing, et al. Geochemistry of granitoid rocks of Shedong W-Mo deposit district in Cangwu County, Guangxi and its relation to mineralization [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28 (1): 199–212 (in Chinese with English abstract).
- [64] 杨明桂, 梅勇文, 等. 钦-杭古板块结合带与成矿带的主要特征 [J]. *华南地质与矿产*, 1997, 9(3): 52–59.
Yang Minggui, Mei Yongwen, et al. Characteristics of geology and metallization in the Qinzhou-Hangzhou paleoplatae juncture [J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 1997, 9(3): 52–59 (in Chinese with English abstract).
- [65] 覃小锋, 周府生, 胡昂贵, 等. 云开地块北缘 MORB 型火山岩的首次发现及其大地构造意义 [J]. *地质科技情报*, 2005, 24(3): 20–24.
Qin Xiaofeng, Zhou Fusheng, Hu Anggui, et al. First discovery of MORB volcanic rock and its tectonic significance on the north margin of the Yunkai Block, southeastern Guangxi [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2005, 24 (3): 20–24 (in Chinese with English abstract).
- [66] 覃小锋, 潘元明, 李江, 等. 桂东南云开地区变质杂岩锆石 SHRIMP U-Pb 年代学 [J]. *地质通报*, 2006, 25(5): 553–559.
Qin Xiaofeng, Pan Yuanmin, Li Jiang, et al. Zircon SHRIMP U-Pb geochronology of the Yunkai metamorphic complex in southeastern Guangxi, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2006, 25 (5): 553–559 (in Chinese with English abstract).
- [67] 覃小锋, 夏斌, 周府生, 等. 广西云开地区元古代不整合事件的确定及其构造意义 [J]. *现代地质*, 2007, 21(1): 22–30.
Qin Xiaofeng, Xia Bin, Zhou Fusheng, et al. Confirm of Proterozoic unconformity event in the Yunkai area of Guangxi and its tectonic significance [J]. *Geoscience*, 2007, 21(1): 22–30.
- [68] 许华, 黄炳诚, 倪战旭, 等. 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*, 2012, 28(4): 331–339.
Xu Hua, Huang Bingcheng, Ni Zhanxu, et al. Petrography, geochemistry and chronology of Gulong granite stock group in west segment of QinHang metallogenic belt [J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 2012, 28 (4): 331–339 (in Chinese with English abstract).