

doi: 10.12029/gc20210115

王峰. 2021. 闽西南宣和加里东期花岗岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及对华南造山的启示[J]. 中国地质, 48(1): 207-228.

Wang Feng. 2021. Zircon U-Pb geochronology, geochemical characteristics and tectonic implications of Caledonian granites from the Xuanhe area, Southwestern Fujian Province[J]. Geology in China, 48(1): 207-228(in Chinese with English abstract).

闽西南宣和加里东期花岗岩锆石 U-Pb 年龄、 地球化学特征及对华南造山的启示

王峰

(福建省地质调查研究院, 福建 福州 350013)

摘要: 龙岩宣和岩体是闽西南地区呈北东向弧形出露, 最大的燕山期—加里东期复式岩体, 但是有关该岩体的形成时代及成岩环境的认识仍存在分歧, 进而制约了对闽西南地区构造环境的探讨。文章以出露于闽西南地区的宣和正长花岗岩为研究对象, 在详细野外地质调查基础上, 开展了岩石学、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 地质年代学、岩石地球化学及 Sr-Nd 同位素测试等工作, 在此基础上探讨了宣和岩体的岩石类型、岩浆来源和成岩构造环境。宣和岩体主要由含斑细粒、少斑中细粒、似斑状中粒、似斑状中粗粒及斑状细粒正长花岗岩等组成, 4 个样品的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 (424.6 ± 2.8) Ma、 (426.7 ± 2.6) Ma、 (435.5 ± 2.4) Ma 及 (447 ± 3.6) Ma, 表明其形成时代不是原来认为的印支期, 而是加里东期。地球化学特征上, 具有高硅、高钾 ($K_2O > Na_2O$), 低 TiO_2 、FeO、MgO 的特征, A/CNK 平均值 1.23, 属高钾钙碱性过铝质系列岩石; 稀土元素含量高, 稀土配分曲线右陡倾, 轻重稀土分馏明显, Eu 中等负异常; 富集大离子亲石元素 K、Rb、Pb、Nd 及高场强元素 Th、U, 相对亏损 Sr、Ba、Nb、Ce, 显示高分异的 S 型花岗岩的特征。其 Sr 同位素初始比值介于 0.71291~0.71399, $\epsilon_{Nd}(t)$ 值变化于 -9.1~-13.4, 对应的二阶段 Nd 模式年龄为 1.91~2.27 Ga, 推测宣和岩体是由与麻源群变质岩相当的地壳物质部分熔融形成的, 为华南加里东期板内造山作用的产物。

关键词: 闽西南地区; 锆石 U-Pb 年龄; 加里东; 地球化学; 高分异 S 型花岗岩; 板内造山; 地质调查工程
中图分类号: P597.3 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2021)01-0207-22

Zircon U-Pb geochronology, geochemical characteristics and tectonic implications of Caledonian granites from the Xuanhe area, Southwestern Fujian Province

WANG Feng

(Fujian Institute of Geological Survey, Fuzhou 350013, Fujian, China)

Abstract: The NE-trending Xuanhe granitic mass is the largest Yanshanian-Caledonian complex rock mass in southwestern Fujian, which is exposed in southwestern Fujian Province in the arc form. However, there are still different opinions in the formation age of rock mass and its petrogenetic environment, which restricts the discussion of the tectonic environment of southwestern Fujian. Based on detailed field geological survey, the authors investigated the Xuanhe syenogranites, mainly on the basis of the LA-ICP-MS

收稿日期: 2018-03-27; 改回日期: 2018-06-04

基金项目: 中国地质调查局项目 (12120113071100) 和福建省地质勘查专项资金项目 (GY20200302) 联合资助。

作者简介: 王峰, 男, 1985 年生, 工程师, 长期从事区域地质调查工作; E-mail: 441076842@qq.com。

zircon U-Pb geochronology, petrochemistry and Sr-Nd isotope analysis, and discussed the rock types, magma source and tectonic environment. The Xuanhe granites are mainly composed of syenogranites in the forms of speckle fine grain, oligophyric medium-fine grain, porphyritic fine grain, porphyritic fine coarse grain and porphyritic fine grain. The LA-ICP-MS zircon U-Pb age of four samples from the granites are $(424.6 \pm 2.8)\text{Ma}$, $(426.7 \pm 2.6)\text{Ma}$, $(435.5 \pm 2.4)\text{Ma}$ and $(447 \pm 3.6)\text{Ma}$ respectively, indicating that the formation age of Xuanhe granite is Caledonian instead of Indosinian as previously held. The rocks belong to high-K calc alkaline peraluminous rock series, characterized geochemically by high Si, high K ($K_2O > Na_2O$), low TiO_2 , low FeO and low MgO, with average A/CNK value being 1.23. The rocks are S-type granite, with the characteristics of high content of rare earth elements, obvious right steeply inclined REE fractionation curve, middle negative Eu anomaly, enrichment of large ion lithophile elements such as K, Rb, Pb and Nd and high field strength elements of Th, U and Ba, and relative depletion of Sr, Nb and Ce. The initial Sr isotope ratios are from 0.71291 to 0.71399, the values of $\epsilon Nd(t)$ vary from -9.1 to -13.4, and two stage Nd model ages correspond to 1.91-2.27 Ga. It is inferred that the granites were formed by partial melting of crustal material of Mayuan Group metamorphic rocks, being probably a product of intraplate Caledonian orogeny in South China.

Key words: southwestern Fujian; LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronology; Caledonian; geochemistry; high fractionation S-type granite; intraplate orogeny; geological survey engineering

About the author: WANG Feng, male, born in 1985, engaged in regional geological Survey; E-mail: 441076842@qq.com.

Fund support: Supported by the project of China Geological survey (No. 12120113071100) and Fujian Provincial Geological Exploration Special fund project (No. GY20200302).

1 引 言

加里东运动是以英国苏格兰加里东山命名, 1888年由休斯(E. Suess)创用, 主要指欧洲西北部晚志留世至泥盆纪形成北东向山地的褶皱运动。其现在已经成为早古生代地壳运动的总称, 时间跨度从寒武纪到泥盆纪。加里东运动在华南表现为震旦纪及早古生代地层遭受不同程度的变质作用、强烈变形、花岗质岩浆侵入以及泥盆纪地层及更新的地层不整合在志留系或更老地层之上。华南地区加里东期花岗岩主要沿两个带分布: 武夷山—云开大山地区加里东期花岗岩侵位时代集中在425~450 Ma, 而沿诸广山—大瑶山分布的加里东期花岗岩年龄集中在400~420 Ma (徐先兵等, 2009), 并提出华南加里东期花岗质岩浆活动年龄由东南至西北方向变年轻的趋势, 同华南加里东造山运动从南东向北西再转向南西的迁移规律相一致(袁正新等, 1997; 舒良树等, 2006)。但是, 这些花岗岩很少发现与之相伴生的火山岩或者浅成侵入岩, 仅Chen et al. (2010)报道了台湾省澎湖列岛花屿地区出露时代为 $(437 \pm 13)\text{Ma}$ 的安山岩。近年来随着同位素地质年代学的进步, 越来越多的加里东期花岗岩被识别出来(邓访陵, 1987; 王一先等, 1997; 王江海等, 1998; 舒良树等, 1999; 谢明明等, 2000; 黄圭成等, 2000; 谢振东等, 2000; 吴富江等, 2003; 楼法生等,

2005; 彭松柏等, 2006; 许德如等, 2006; 李文杰等, 2006; 陈正宏等, 2008; 刘锐等, 2008; 沈渭洲等, 2008; 徐先兵等, 2009; 李晓峰等, 2009; 张爱梅等, 2010; Jacques et al., 2010; Yu et al., 2012; 胡艳华等, 2012; 郭爱民等, 2017), 但是仍然缺乏系统的年代学、地球化学和岩石成因等方面的研究工作。

武夷山加里东期构造-岩浆作用十分强烈, 主要表现为地壳重熔型岩浆活动、混合岩化作用以及基底变质作用, 造山作用峰期在425~450 Ma (徐先兵等, 2009)。加里东期花岗岩非常发育, 岩石类型主要有花岗岩和花岗闪长岩, 少数为英云闪长岩, 呈北东向、北北东向分布, 被认为是新元古代变质岩经部分熔融形成的壳源(S型)花岗岩(周新民, 2003; 王德滋等, 2004)。同时, 多数研究者认为加里东早期片麻状花岗岩形成于同造山碰撞挤压环境, 而晚期块状花岗岩形成于造山后或后造山伸展拉伸背景(李文杰等, 2006; Yang et al., 2010; 华仁民等, 2013), 也有学者提出了不同的认识, 如朱清波等(2015)认为, 片麻状花岗岩和块状花岗岩在华南加里东早、晚期均有。因此, 有关华南加里东期花岗岩的岩石成因、岩浆来源及成岩构造环境等方面还存在较多争论, 从而也制约了对华南加里东期构造事件属性及其动力学机制的研究。

政和—大埔断裂带以西、南平—宁化构造带以南的闽西南地区, 是中国东南构造-岩浆活动带的

重要组成部分,是花岗岩产出最为丰富的地区。闽西南龙岩地区的宣和岩体出露于清流玮埔—连城新泉一带,任纪舜(1990)和孙涛(2006)通过构造分析和K-Ar年代学资料认为其是印支运动强烈活动的产物;福建省地质调查研究院(2002)^①和福建省地质调查研究院(2013)^②认为其为以印支期为主的多期复式杂岩体,福建地质调查研究院(2016)将其主体归于华力西—印支期。而陈正宏等(2008)利用EMP独居石定年法测得宣和岩体南段花岗岩的年龄集中在(418.7±16.4)Ma和(360.5±15.3)Ma;徐先兵等(2009)获得了(447.1±4)Ma和(440.8±3.4)Ma的锆石LA-ICP-MS U-Pb年龄;蒋婷等(2014)测得黑云母花岗岩锆石LA-ICP-MS U-Pb年龄为(445.4±3.6)Ma;因此宣和岩体的成岩时代仍然存在争议。李真(2011)、福建省地质调查研究院(2013)^②认为宣和岩体为I型花岗岩,其形成过程有明显的地幔物质加入;福建省地质调查研究院(2002)^①、蒋婷(2014)则认为其为S型花岗岩,形成过程没有明显的地幔物质加入;形成构造环境上也存在较大的分歧,福建省地质调查研究院(2002)^①等认为其形成于同碰撞和板内构造环境;李真(2011)、蒋婷(2014)等认为其形成于造山后或后造山伸展拉张背景下;福建省地质调查研究院(2013)^②认为其形成于岛弧或活动陆源的构造环境。本文是在对宣和岩体进行了详细野外地质调查的基础上,开展了系统的LA-ICP-MS锆石U-Pb年代学、岩石地球化学和Sr-Nd同位素研究工作,在此基础上讨论其岩石成因、物质源区及其形成的构造背景。

2 地质背景

宣和岩体区域上位于华南造山系之华夏地块之武夷山—云开隆起带内(熊盛青等,2018),处于闽西南拗陷带之明溪—武平拗陷带与胡坊—永定隆起带交界处(福建省地质调查研究院,2016)^②,北北东向—近南北向展布(图1),呈岩基状产出,面积达600 km²,研究区出露约330 km²。区域上东部多被晚侏罗世正长花岗岩体侵入,西南端被晚侏罗世二长花岗岩体侵入。主体与周围地层呈构造接触,围岩主要为晚泥盆—早石炭世近岸滨海—河口沉积物;晚新元古代—早古生代滨—浅海环境下形成的含火山沉积物,普遍经历了低绿片岩相的变质作

用和相应的变形作用;另在岩体的西南侧有古远古代桃溪岩组变质岩,普遍经历了角闪岩相的变质作用,与古元古代麻源群层位相当。

该侵入体受印支期推覆与滑脱构造的影响,与东西两侧古生代地层呈断层接触(图2),局地可见其呈构造窗产出,内外接触带上均发育有强烈的片理化、碎裂岩化等(福建省地质调查研究院,2016^②),岩体边缘发育的糜棱岩化片麻状叶理走向与围岩中片理化砂砾岩的片理走向一致,倾角较缓,片理化砂砾岩中砾石压扁拉长呈“牛舌”状及其长轴方向,均显示出推覆与滑脱的构造特征。通过福建1:5万隔川等四幅区域地质矿产调查项目对其进行了详细的调研,并进行了充分的解体。该岩体分异明显,相带发育,具垂直和水平分带现象,根据矿物成分、结构构造、接触关系及同位素测年样等资料,将研究区内宣和岩体进一步厘定为含斑细粒—少斑中细粒—似斑状中粒—似斑状中粗粒正长花岗岩及斑状细粒正长花岗岩等6个侵入体,边缘相为含斑细粒正长花岗岩,过渡相为少斑中细粒、似斑状中粒正长花岗岩,中心相为似斑状中粗粒正长花岗岩,末期为斑状细粒正长花岗岩。

3 岩石学特征

从岩石学、矿物学角度分析宣和岩体各侵入体具如下特征:(1)新鲜岩石均呈肉红色;(2)矿物组合相似,主要造岩矿物为石英(27%~28%)、钾长石(51.2%~57%)、斜长石(14.2%~17.2%)、黑云母(0.5%~3.6%)等(图3);(3)矿物特征相近,石英含量介于半自形—他形晶,等轴粒状或不规则状外形,强波状消光;钾长石似斑晶呈半自形晶,宽板状外形,基质呈他形晶,不规则状外形,具格子状双晶,部分钾长石矿物被绢云母矿物交代,受动力作用影响,钾长石矿物裂缝发育,裂缝内充填物为绢云母矿物;斜长石呈半自形晶,宽板状、板状外形,具聚片双晶、卡钠复合双晶,部分晶体中包裹有石英矿物;黑云母呈片状、鳞片状,颗粒边缘被稍晚结晶矿物熔蚀,普遍被绢云母、铁质矿物交代;(4)具斑状结构的中细粒、中粒、中粗粒花岗岩斑晶成分均为钾长石,且粒径较大呈大斑—巨斑产出,宽板状、板状外形,受同期或后期构造应力作用棱角多不甚清晰,具卡氏双晶、格子状双晶,晶体中包裹有石英、

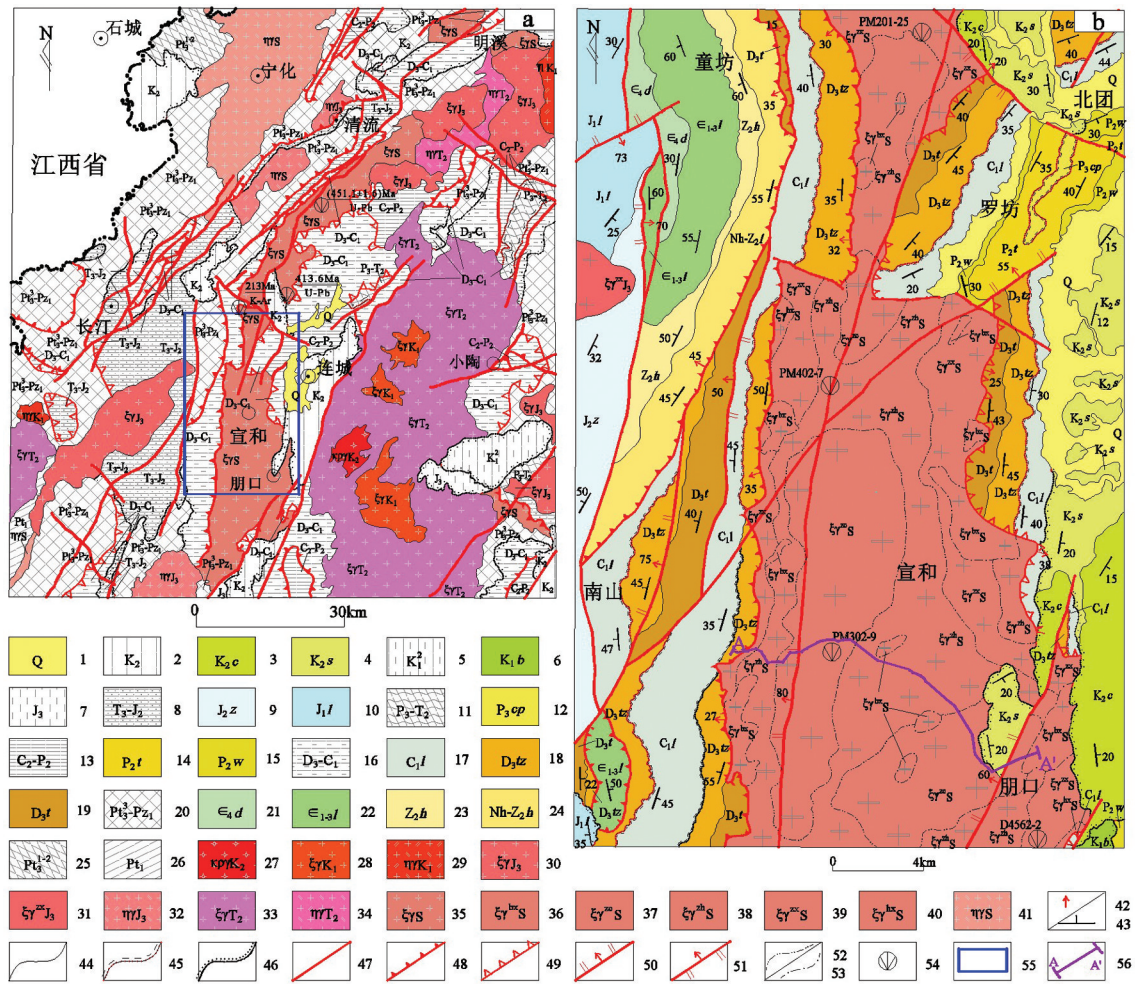


图1 宣和岩体区域纲要图(a)及研究区地质简图(b)

1—第四系；3—晚白垩世崇安组；4—晚白垩世沙县组；5—早白垩世晚期构造层；6—早白垩世垆头组；7—晚侏罗世构造层；8—晚三叠世—中侏罗世构造层；9—中侏罗世漳平组；10—早侏罗世梨山组；11—晚二叠世—中三叠世构造层；12—晚二叠世翠屏山组；13—晚石炭世—中二叠世构造层；14—中二叠世童子岩组；15—中二叠世文笔山组；16—晚泥盆世—早石炭世构造层；17—早石炭世梨山组；18—晚泥盆世桃子垌组；19—晚泥盆世天瓦寮组；20—晚新元古代—早古生代构造层；21—末寒武世东坑口组；22—早—晚寒武世林田组；23—晚震旦世黄连组；24—南华—晚震旦世南岩组；25—中新元古代构造层；26—古元古代构造层；27—晚白垩世晶洞花碱长花岗岩；28—早白垩世正长花岗岩；29—早白垩世二长花岗岩；30—晚侏罗世正长花岗岩；31—晚侏罗世少斑中细粒正长花岗岩；32—晚侏罗世二长花岗岩；33—中三叠世正长花岗岩；34—中三叠世二长花岗岩；35—志留纪正长花岗岩；36—志留纪斑状中细粒正长花岗岩；37—志留纪似斑状中粗粒正长花岗岩；38—志留纪似斑状中粗粒正长花岗岩；39—志留纪少斑中细粒正长花岗岩；40—志留纪含斑细粒正长花岗岩；41—志留纪二长花岗岩；42—断层产状；43—层理产状；44—地质界线；45—平行不整合界线；46—角度不整合界线；47—断层；48—推覆断层；49—滑脱断层；50—正断层；51—逆断层；52—脉动界线；53—涌动界线；54—测年样位置；55—研究区；56—剖面位置

Fig.1 Geological map of Xuanhe granite mass (a) and sketch geological map of the study area (b)

1—Quaternary; 2—Late Cretaceous tectonic layer; 3—Late Cretaceous Chongan Formation; 4—Late Cretaceous Shaxian Formation; 5—Early Cretaceous tectonic layer; 6—Early Cretaceous Bantou Formation; 7—Late Jurassic tectonic layer; 8—Late Triassic–Middle Jurassic tectonic layer; 9—Middle Jurassic tectonic layer; 10—Early Jurassic Nishan Formation; 11—Late Permian–Middle Triassic tectonic layer; 12—Late Permian Cuipingshan Formation; 13—Late Carboniferous–Middle Permian structural layer; 14—Middle Permian Tongziyan Formation; 15—Middle Permian Wenbishaan Formation; 16—Late Devonian–Early Carboniferous tectonic layer; 17—Early Carboniferous Lishan Formation; 18—Late Devonian Taozikeng Formation; 19—late Devonian Tianwadong Formation; 20—Late Neoproterozoic–Early Palaeozoic tectonic layer; 21—Late Cambrian Dongkengkou Formation; 22—Early–Late Cambrian lingtian Formation; 23—Late Sinian Huanglian Formation; 24—Nanhua Period–Late Sinian Nanyan Formation; 25—Middle–Late Proterozoic tectonic layer; 26—Paleoproterozoic tectonic layer; 27—late Cretaceous miarolitic alkali feldspar syenite; 28—Early Cretaceous syenite; 29—Early Cretaceous monzogranite; 30—Late Jurassic syenite; 31—Late Jurassic oligophyric fine-grained syenite; 32—Late Jurassic Monzogranite; 33—Middle Triassic syenite; 34—Middle Triassic monzogranite; 35—Silurian syenite; 36—Silurian porphyritic fine-grained syenite; 37—Silurian like macular middle-coarse grained syenite; 38—Silurian like macular middle-grained syenite; 39—Silurian littel macular middle-fine grained syenite; 41—Silurian macular-bearing fine-grained syenite; 42—Fault attitude; 43—Bedding attitude; 44—Geological boundary; 45—Parallel unconformity boundary; 46 Angular unconformity boundary; 47—Fault; 48—Nappe fault; 49—Slip fault; 50—Normal fault; 51—Reverse fault; 52—Pulsation boundary; 53—Inrush boundary; 54—Dating sample position; 55—Study area; 56—Profile position

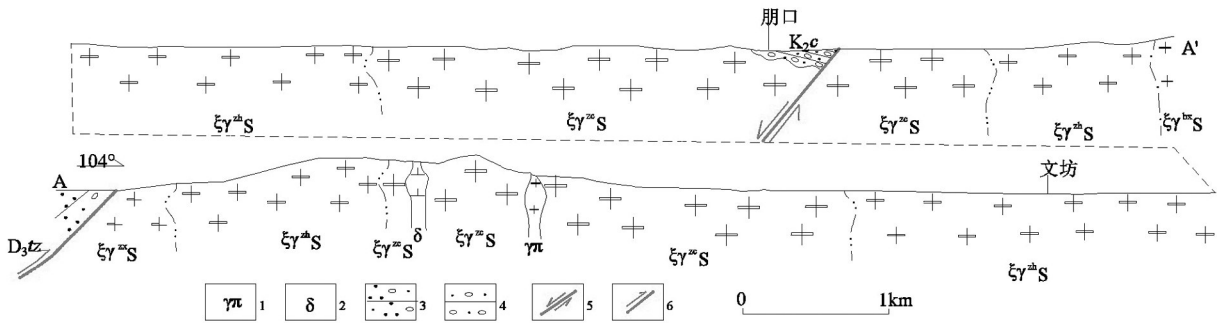


图2 长汀县下坑—连城县小坑志留纪宣和岩体剖面图(图1b中A-A'剖面)

1—花岗斑岩脉;2—闪长岩脉;3—石英砂砾岩;4—砂砾岩;5—正断层;6—逆冲断层;其他图例见图1

Fig.2 Geological section of Silurian Xuanhe granite mass in Xiakeng of Changding County - Xiaokeng of Liancheng County (A-A' profile in Fig. 1b)

1-Granite-porphry dyke; 2-Diorite dyke; 3-Quartzose glutenite; 4-Glutenite; 5-Normal fault; 6-Thrust fault (other legends as for Fig. 1)

黑云母、斜长石矿物。(5)岩石结构类型有序变化,除末期斑状细粒正长花岗岩外从早到晚基质矿物粒度具增大趋势;钾长石斑状含量递增尤为明显,从含斑(3%~5%)→少斑(8%~10%)→似斑状(15%~25%),且粒度也有增大的趋势。(6)副矿物组合类型为锆石-锐钛矿-磷灰石型,以富含锆石、锐钛矿、赤褐铁矿、磷灰石为特征;显示宣和岩体为同一岩浆侵入活动不同阶段的产物。

4 测试方法

4.1 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测试

新鲜的全岩样品通过人工重砂法分选出锆石,然后在双目显微镜下挑选出晶形好,无裂隙、透明干净的自形锆石颗粒,在玻璃板上用环氧树脂固定,并抛光至锆石中心,然后进行反射光和透射光照相,并用扫描电子显微镜上的阴极发光仪详细检查锆石内部结构,以选择最佳分析点。LA-ICP-MS 锆石微区 U-Pb 年龄测定在西北大学大陆动力学国家重点实验室 Agilent7500 型 ICPMS 和德国 Lambda Physik 公司的 ComPex102 ArF 准分子激光器(工作物质 ArF, 波长 193 nm)以及 MicroLas 公司的 GeoLas200M 光学系统的联机上进行。激光束斑直径为 30 μm , 激光剥蚀深度为 20~40 μm 。实验中采用 He 作为剥蚀物质的载气,用美国国家标准技术研究院研制的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST SRM610 进行仪器最佳化调试,采样方式为单

点剥蚀,数据采集选用一个质量峰一点的跳峰方式,每完成 4~5 个待测样品测定,插入标样测一次。在所测锆石样品 15~20 个点前后各测 2 次 NIST SRM610。锆石年龄采用标准锆石 91500 作为外部标准物质,元素含量采用 NIST SRM610 作为外标。详细的实验流程和仪器参数可参见文献 (Yuan et al., 2004)。锆石微区原位测试点的同位素比值和 U-Pb 年龄计算采用 GLITTER (ver4.0, Macquarie University) 软件,加权平均年龄及谐和图的绘制采用 Isoplot3.0 完成,分析及计算误差均为 1σ 。

4.2 全岩地球化学测试

选取 16 件新鲜的具代表性的岩石样品进行地球化学成分测试,主元素、微量元素及稀土元素分析均在国土资源部福州矿产资源监督检测中心完成。其中,主元素用 X 射线荧光光谱仪测定(XRF),并用等离子光谱法进行验证,微量和稀土元素采用等离子质谱仪(Xseries II)测定。

4.3 全岩 Sr-Nd 同位素测试

全岩 Sr-Nd 同位素测试分析在核工业北京地质研究院的热电离质谱仪上完成,仪器型号为 ISOPROBE-T, M+, 可调多法拉第接收器接收。样品溶解后,将溶液离心分离,清液载入阳离子交换柱($\varphi 0.5 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$, AU50W $\times 8(\text{H}^+)$ 0.071~0.154 mm(100~200 目)),用 1.75 mol/L 的盐酸溶液淋洗 Rb,用 2.5 mol/L 的盐酸溶液淋洗 Sr,蒸干后进行质谱分析。Sm、Nd 用 P507 萃淋树脂分离,蒸干后转

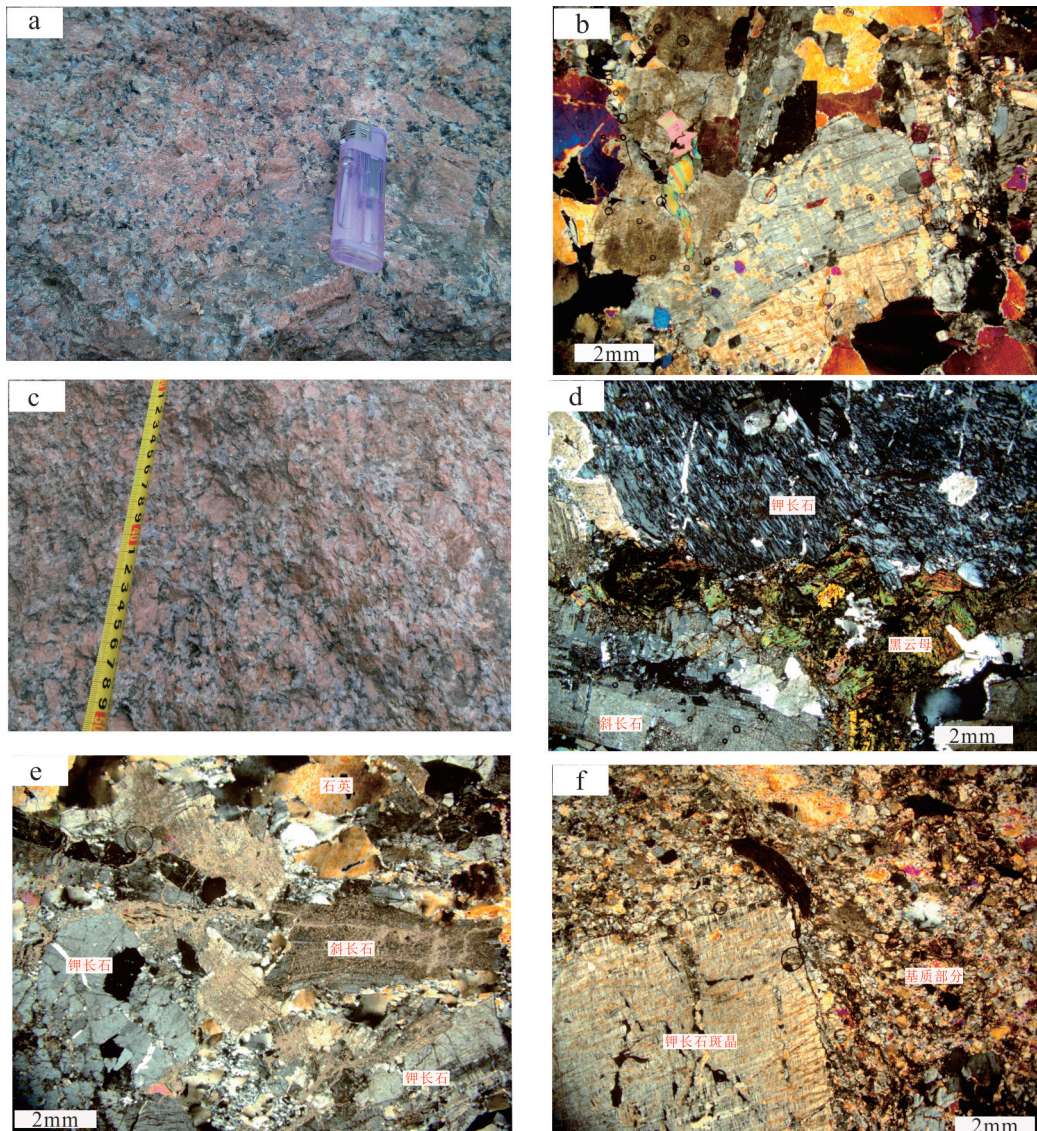


图3 宣和岩体野外露头及正交偏光显微照片

a、b—似斑状中粒正长花岗岩；c、d—似斑状中粗粒正长花岗岩；e—少斑中细粒正长花岗岩花岗岩；f—斑状细粒正长花岗岩

Fig.3 Microphotograph of Xuanhe granites mass (crossed nicols)

a, b—Oligophyric fine grained syenite; c, d—Porphyritoid medium grained syenite; e—Porphyritoid medium-coarse grained syenite; f—Porphyritic fine grained syenite

为硝酸盐进行质谱分析。Sr、Nd同位素校正分别用 $N(^{86}\text{Sr})/N(^{88}\text{Sr})=0.1194$ 和 $N(^{146}\text{Nd})/N(^{144}\text{Nd})=0.7219$ 校正。

5 测试结果

5.1 LA-ICP-MS 锆石U-Pb年代学

对宣和岩体选取了4件代表性样品进行LA-ICP-MS锆石U-Pb测年,D4562-2岩性为肉红色少斑中细粒花岗岩；PM201-25岩性为肉红色少斑中

细粒花岗岩；PM402-7岩性为肉红色似斑状中粒花岗岩；PM302-9岩性为肉红色似斑状中粗粒花岗岩。本次测年的4个样品的锆石多呈浅玫瑰色、玫瑰色、褐黄色、浅橙黄色，半透明-透明状，伸长系数多为1:1.5~1:3，少数达1:4，晶体外形呈柱状，多以四方晶类为主，复四方晶类次之，晶体四方柱和四方双锥均较为发育，阴极发光图像显示具有多而清晰的震荡生长环带和相对明亮的阴极荧光，显示典型岩浆成因锆石特征(图4)。

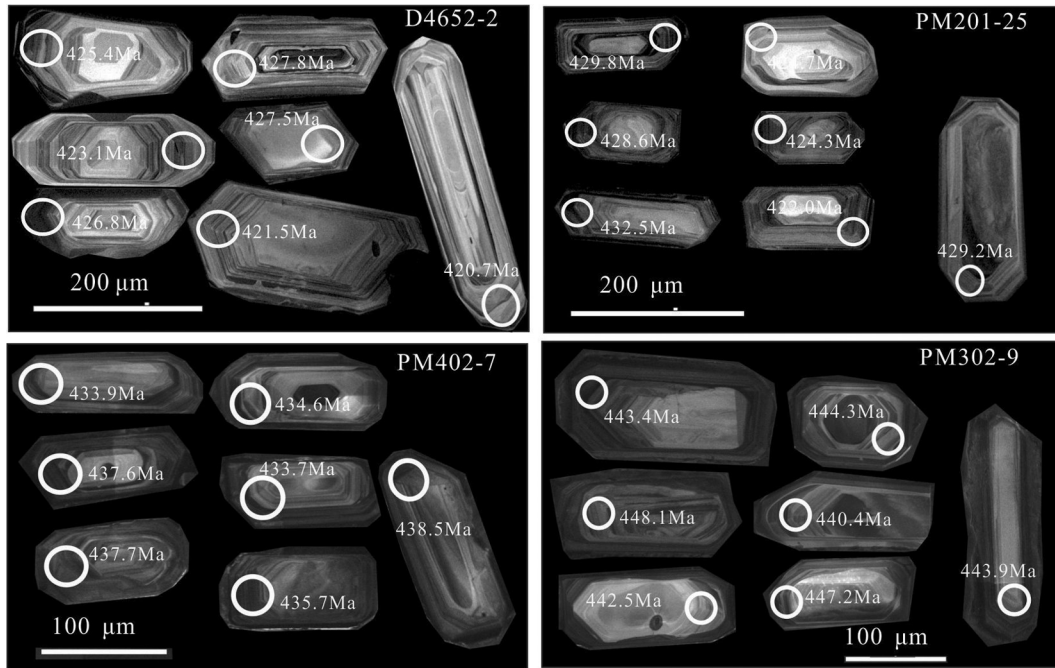


图4 宣和岩体锆石阴极发光图像及测点位置

Fig.4 CL images of Xuanhe granite mass and spot test position

宣和岩体4个测试样品的锆石LA-ICP-MS U-Pb年龄数据见表1:

样品D4652-2: 25个测点的Th含量变化于 $82.57 \times 10^{-6} \sim 372.71 \times 10^{-6}$, U含量变化于 $176.95 \times 10^{-6} \sim 2314.66 \times 10^{-6}$, Th/U比值为0.14~0.52, 显示岩浆锆石的特征, 其中由于第6、16两个点分析结果偏离谐和线太远而未参与加权平均年龄计算, 其余23个分析点具有一致的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄(图5), 其加权平均年龄值为 $(424.6 \pm 2.8) \text{Ma}$ ($N=23$, MSWD=0.39), 这一年龄代表了该样品的结晶年龄。

样品PM201-25: 25个测点的Th含量变化于 $93.27 \times 10^{-6} \sim 469.63 \times 10^{-6}$, U含量变化于 $208.25 \times 10^{-6} \sim 1003.77 \times 10^{-6}$, Th/U比值为0.15~0.86, 显示岩浆锆石的特征, 25个分析点具有一致的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄(图5), 其加权平均年龄值为 $(426.7 \pm 2.6) \text{Ma}$ ($N=25$, MSWD=0.27), 这一年龄代表了该样品的结晶年龄。

样品PM402-7: 24个测点的Th含量变化于 $27.09 \times 10^{-6} \sim 393.34 \times 10^{-6}$, U含量变化于 $114.62 \times 10^{-6} \sim 1606.34 \times 10^{-6}$, Th/U比值除第15个分析点外, 其余均介于0.12~1.22, 显示岩浆岩锆石的特征, 其中由于第7、9、15三个分析点分析结果偏离谐和线太远而未参与加权平均年龄计算, 其余21个分析点具有一致的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄(图5), 其加权平均年龄值为

$(435.5 \pm 2.4) \text{Ma}$ ($N=21$, MSWD=0.16), 这一年龄代表了该样品的结晶年龄。

样品PM302-9: 10个测点的Th含量变化于 $41.09 \times 10^{-6} \sim 209.08 \times 10^{-6}$, U含量变化于 $117.47 \times 10^{-6} \sim 532.09 \times 10^{-6}$, Th/U比值介于0.12~1.03, 显示岩浆锆石的特征, 10个分析点具有一致的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄(图5), 其加权平均年龄值为 $(447 \pm 3.6) \text{Ma}$ ($N=10$, MSWD=0.22), 这一年龄代表了该样品的结晶年龄。

5.2 地球化学

5.2.1 主量元素

宣和岩体的主量元素、CIPW标准矿物及主要的岩石化学参数见表2。其特征如下: ① SiO_2 含量变化范围较小, 介于67.54%~74.14%; ②碱含量较高, 介于6.67%~8.49%; K_2O 大于 Na_2O , $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 介于0.28~0.71; 在TAS图解中基本投影于花岗岩区域(图6a), 在CIPW标准矿物QAP分类图中投影于碱长花岗岩-花岗岩的交界区域(图6b), 属于高钾钙碱性系列岩石(图6c); ③A/CNK值较高, 介于1.02~1.64, CIPW标准矿物中出现刚玉分子, 且含量 $>1\%$ (D2527样品除外), 属于强过铝质花岗岩, 在A/CNK-A/NK图上投影于过铝质花岗岩区域(图6d)。

5.2.2 稀土元素地球化学

宣和岩体稀土元素含量及主要参数见表3, 稀

表1 宣和岩体锆石U-Pb同位素分析结果

Table 1 Zircon U-Pb isotope data of Xuanhe granite mass

测试点	$^{232}\text{Th}/10^{-6}$	$^{238}\text{U}/10^{-6}$	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	同位素比值						年龄/Ma			
				$\text{Pb}^{207}/\text{Pb}^{206}$	1σ	$\text{Pb}^{207}/\text{U}^{235}$	1σ	$\text{Pb}^{206}/\text{U}^{238}$	1σ	$\text{Pb}^{207}/\text{U}^{235}$	1σ	$\text{Pb}^{206}/\text{U}^{238}$	1σ
D4562-2 少斑中细粒正长花岗岩													
1	82.57	292.91	0.28	0.05516	0.00199	0.51883	0.01332	0.06821	0.00117	424.4	8.90	425.4	7.07
2	118.31	388.60	0.30	0.05560	0.00180	0.52583	0.0107	0.06857	0.00114	429.0	7.12	427.5	6.90
3	99.75	263.42	0.38	0.05621	0.00190	0.53192	0.01203	0.06862	0.00116	433.1	7.97	427.8	6.98
4	91.24	176.95	0.52	0.05563	0.00305	0.51734	0.02484	0.06744	0.00135	423.4	16.62	420.7	8.18
5	136.56	502.28	0.27	0.05530	0.00204	0.51529	0.01378	0.06757	0.00117	422.0	9.23	421.5	7.04
6	185.47	677.07	0.27	0.05619	0.00179	0.55534	0.01093	0.07167	0.00119	448.5	7.13	446.2	7.15
7	138.37	511.45	0.27	0.05541	0.00178	0.51836	0.01043	0.06784	0.00113	424.1	6.97	423.1	6.79
8	182.75	476.51	0.38	0.05913	0.00272	0.54417	0.02067	0.06673	0.00125	441.2	13.59	416.4	7.55
9	155.82	468.36	0.33	0.05514	0.00206	0.51267	0.01401	0.06742	0.00116	420.2	9.40	420.6	7.03
10	185.23	398.10	0.47	0.05499	0.00194	0.50234	0.01231	0.06624	0.00112	413.3	8.32	413.5	6.79
11	170.11	484.96	0.35	0.05668	0.00208	0.52836	0.01403	0.06760	0.00116	430.7	9.32	421.7	7.00
12	244.48	1044.27	0.23	0.05528	0.00172	0.52184	0.00950	0.06845	0.00112	426.4	6.34	426.8	6.77
13	93.56	480.71	0.19	0.05511	0.00191	0.51531	0.01219	0.06781	0.00114	422.0	8.17	422.9	6.88
14	130.15	497.20	0.26	0.05543	0.00181	0.52347	0.01079	0.06848	0.00113	427.5	7.19	427.0	6.83
15	83.41	241.60	0.35	0.05613	0.00211	0.53063	0.01467	0.06855	0.00118	432.2	9.73	427.4	7.11
16	308.66	1358.73	0.23	0.05726	0.0018	0.62517	0.01171	0.07917	0.00130	493.1	7.32	491.1	7.74
17	170.84	1122.97	0.15	0.05521	0.00178	0.52440	0.01057	0.06888	0.00113	428.1	7.04	429.4	6.84
18	103.39	338.22	0.31	0.05505	0.00196	0.52054	0.01295	0.06856	0.00116	425.5	8.65	427.5	6.98
19	305.21	1505.44	0.20	0.05578	0.00170	0.52454	0.00901	0.06819	0.0011	428.2	6.00	425.2	6.66
20	169.99	330.82	0.51	0.05591	0.00195	0.51905	0.01243	0.06732	0.00113	424.5	8.31	420.0	6.81
21	103.51	735.87	0.14	0.05549	0.00189	0.52157	0.01185	0.06815	0.00113	426.2	7.91	425.0	6.84
22	254.65	1460.09	0.17	0.05573	0.00176	0.53177	0.01002	0.06919	0.00113	433.0	6.64	431.2	6.79
23	182.70	1324.05	0.14	0.05583	0.00175	0.5313	0.00989	0.06901	0.00112	432.7	6.56	430.2	6.77
24	372.71	2314.66	0.16	0.05624	0.00170	0.52942	0.00886	0.06825	0.0011	431.4	5.88	425.6	6.63
25	109.96	323.57	0.34	0.05534	0.00181	0.52150	0.01075	0.06833	0.00112	426.2	7.17	426.1	6.75
PM201-25 少斑中细粒正长花岗岩													
1	151.87	484.69	0.31	0.05544	0.00168	0.51863	0.00891	0.06781	0.00110	424.2	5.96	422.9	6.62
2	210.05	1003.27	0.21	0.05531	0.00165	0.51836	0.00848	0.06794	0.00110	424.1	5.67	423.7	6.61
3	469.63	714.61	0.66	0.05694	0.00174	0.53314	0.00927	0.06788	0.00110	433.9	6.14	423.4	6.64
4	126.88	351.66	0.36	0.05585	0.00174	0.53124	0.00987	0.06896	0.00112	432.6	6.54	429.9	6.78
5	121.71	237.59	0.51	0.05686	0.00175	0.53403	0.00956	0.06809	0.00111	434.5	6.33	424.7	6.69
6	103.08	679.50	0.15	0.05543	0.00167	0.52612	0.00871	0.06882	0.00111	429.2	5.79	429.0	6.72
7	159.99	243.36	0.66	0.05593	0.00192	0.52078	0.01214	0.06751	0.00113	425.7	8.10	421.1	6.84
8	223.85	684.24	0.33	0.05589	0.00168	0.52504	0.00872	0.06811	0.00111	428.5	5.81	424.8	6.67
9	143.71	948.97	0.15	0.05646	0.00170	0.52542	0.00880	0.06747	0.00110	428.8	5.86	420.9	6.62
10	93.27	208.05	0.45	0.05546	0.00171	0.52293	0.00938	0.06838	0.00112	427.1	6.26	426.4	6.74
11	147.79	829.07	0.18	0.05569	0.00168	0.52251	0.00871	0.06804	0.00111	426.8	5.81	424.3	6.68
12	150.27	348.28	0.43	0.05568	0.00170	0.53098	0.00924	0.06916	0.00113	432.5	6.13	431.1	6.81
13	136.34	665.17	0.20	0.05589	0.00169	0.52976	0.00897	0.06875	0.00113	431.7	5.95	428.6	6.79
14	216.23	993.52	0.22	0.05642	0.00171	0.53634	0.00914	0.06895	0.00113	436.0	6.04	429.8	6.81
15	129.51	534.38	0.24	0.05644	0.00175	0.52622	0.00957	0.06762	0.00111	429.3	6.37	421.8	6.73
16	137.20	439.65	0.31	0.05643	0.00173	0.53187	0.00928	0.06836	0.00112	433.0	6.15	426.3	6.78
17	136.37	518.85	0.26	0.05634	0.00174	0.53903	0.00957	0.06940	0.00114	437.8	6.32	432.5	6.89
18	193.76	924.65	0.21	0.05541	0.0017	0.51694	0.00902	0.06766	0.00111	423.1	6.04	422.0	6.73
19	117.20	579.65	0.20	0.05567	0.00171	0.52702	0.00927	0.06866	0.00113	429.8	6.16	428.1	6.84
20	214.65	446.71	0.48	0.05548	0.00171	0.51664	0.00911	0.06755	0.00112	422.9	6.10	421.4	6.74
21	112.74	431.44	0.26	0.05584	0.00178	0.53008	0.01025	0.06885	0.00115	431.9	6.80	429.2	6.92
22	265.33	307.41	0.86	0.05559	0.00172	0.52213	0.00930	0.06813	0.00113	426.6	6.21	424.9	6.81
23	119.39	722.55	0.17	0.05521	0.00169	0.51951	0.00910	0.06825	0.00113	424.8	6.08	425.6	6.82
24	204.27	904.81	0.23	0.05626	0.00171	0.53111	0.00912	0.06848	0.00113	432.5	6.05	427.0	6.84
25	133.62	514.45	0.26	0.05656	0.00173	0.54016	0.00944	0.06928	0.00115	438.5	6.22	431.8	6.93

续表1

测试点	²³² Th/10 ⁻⁶	²³⁸ U/10 ⁻⁶	²³² Th/ ²³⁸ U	同位素比值						年龄/Ma			
				Pb ²⁰⁷ /Pb ²⁰⁶	1σ	Pb ²⁰⁷ /U ²³⁵	1σ	Pb ²⁰⁶ /U ²³⁸	1σ	Pb ²⁰⁷ /U ²³⁵	1σ	Pb ²⁰⁶ /U ²³⁸	1σ
PM402-7 似斑状中粒正长花岗岩													
1	375.36	674.51	0.56	0.05554	0.00176	0.53649	0.00819	0.07004	0.00093	436.1	5.41	436.4	5.62
2	236.91	927.00	0.26	0.05537	0.00174	0.53103	0.00774	0.06954	0.00092	432.5	5.13	433.4	5.56
3	175.92	799.94	0.22	0.05684	0.00179	0.55064	0.00814	0.07024	0.00093	445.4	5.33	437.6	5.62
4	103.04	512.69	0.20	0.05508	0.00176	0.53119	0.00836	0.06992	0.00093	432.6	5.54	435.7	5.63
5	113.44	318.51	0.36	0.05592	0.00192	0.53983	0.01074	0.06999	0.00096	438.3	7.08	436.1	5.80
6	109.74	552.36	0.20	0.05654	0.00183	0.54130	0.00900	0.06942	0.00093	439.3	5.93	432.6	5.63
7	156.45	127.76	1.22	0.05712	0.00203	0.62200	0.01372	0.07896	0.00111	491.1	8.59	489.9	6.61
8	294.62	748.36	0.39	0.05663	0.00179	0.53789	0.00819	0.06887	0.00092	437.0	5.40	429.4	5.55
9	196.29	1606.34	0.12	0.05539	0.00176	0.52400	0.00812	0.06859	0.00092	427.8	5.41	427.7	5.54
10	393.34	726.57	0.54	0.05468	0.00173	0.52889	0.00809	0.07013	0.00094	431.1	5.37	437.0	5.66
11	197.73	570.07	0.35	0.05523	0.00176	0.53262	0.00832	0.06992	0.00094	433.5	5.51	435.7	5.66
12	144.49	283.68	0.51	0.05975	0.00224	0.57480	0.01428	0.06975	0.00101	461.1	9.21	434.6	6.06
13	115.79	230.29	0.50	0.05568	0.00188	0.54059	0.01034	0.07040	0.00097	438.8	6.82	438.6	5.84
14	158.79	270.14	0.59	0.05686	0.00185	0.54661	0.00936	0.06970	0.00095	442.8	6.14	434.4	5.71
15	27.09	726.27	0.04	0.05578	0.00176	0.54483	0.00817	0.07083	0.00095	441.6	5.37	441.1	5.73
16	146.54	856.03	0.17	0.05504	0.00173	0.53298	0.00796	0.07022	0.00094	433.8	5.27	437.5	5.68
17	161.07	383.51	0.42	0.05517	0.00177	0.53059	0.00861	0.06974	0.00094	432.2	5.71	434.6	5.69
18	166.23	506.55	0.33	0.05560	0.0018	0.53979	0.00897	0.07040	0.00096	438.3	5.92	438.5	5.76
19	122.90	647.59	0.19	0.05507	0.00176	0.52883	0.00837	0.06963	0.00094	431.0	5.56	433.9	5.68
20	195.07	1082.34	0.18	0.05471	0.00173	0.52821	0.00804	0.07001	0.00094	430.6	5.34	436.2	5.69
21	110.89	521.88	0.21	0.05444	0.00175	0.52736	0.00865	0.07025	0.00096	430.1	5.75	437.7	5.75
22	86.21	114.62	0.75	0.05461	0.00208	0.52983	0.01376	0.07036	0.00101	431.7	9.14	438.3	6.09
23	134.61	363.46	0.37	0.05675	0.00182	0.54462	0.00888	0.06959	0.00095	441.5	5.84	433.7	5.71
24	120.02	504.46	0.24	0.05547	0.00179	0.53267	0.00880	0.06963	0.00095	433.6	5.83	433.9	5.72
PM302-9 似斑状中粗粒正长花岗岩													
1	97.09	338.48	0.29	0.05581	0.00180	0.54804	0.00901	0.07120	0.00096	443.7	5.91	443.4	5.75
2	144.71	261.95	0.55	0.05773	0.00187	0.56570	0.00937	0.07106	0.00095	455.2	6.08	442.5	5.74
3	152.37	271.28	0.56	0.05596	0.00185	0.54571	0.00972	0.07070	0.00096	442.2	6.38	440.4	5.76
4	41.09	335.68	0.12	0.05665	0.00183	0.55742	0.00901	0.07135	0.00095	449.8	5.87	444.3	5.73
5	110.58	182.49	0.61	0.05682	0.00189	0.56498	0.01026	0.07210	0.00097	454.8	6.66	448.8	5.85
6	109.86	153.34	0.72	0.05781	0.00196	0.56830	0.01095	0.07128	0.00097	456.9	7.09	443.9	5.83
7	112.61	346.15	0.33	0.06065	0.00195	0.60078	0.00951	0.07183	0.00096	477.7	6.03	447.2	5.75
8	171.05	532.09	0.32	0.05596	0.00178	0.55260	0.00844	0.07161	0.00095	446.7	5.52	445.8	5.70
9	209.08	271.77	0.77	0.05601	0.00183	0.55606	0.00949	0.07199	0.00096	449.0	6.19	448.1	5.78
10	121.22	117.47	1.03	0.05570	0.00211	0.54574	0.01387	0.07105	0.00101	442.2	9.11	442.5	6.05

注: A/CNK=Al₂O₃/(K₂O+Na₂O+CaO)(摩尔比); A/NK= Al₂O₃/(K₂O+Na₂O)(摩尔比); ALK= K₂O+Na₂O; AKI=(K₂O+Na₂O)/Al₂O₃(摩尔比); AR. 碱度率; K/N=K₂O/Na₂O。

土总量ΣREE为110.1×10⁻⁶~454.35×10⁻⁶,平均值308.21×10⁻⁶,略高于自然界花岗岩平均稀土总量288×10⁻⁶,高于上部陆壳的平均总量210.07×10⁻⁶,显示花岗岩类稀土特征。LREE变化于70.34×10⁻⁶~369.72×10⁻⁶,平均值为242.90×10⁻⁶;HREE变化于39.76×10⁻⁶~97.78×10⁻⁶,平均值为65.31×10⁻⁶;LREE/HREE比值变化于1.77~5.12,平均为3.67,反映轻、

重稀土分馏程度强烈;(La/Yb)_N=6.76~17.68,(Ce/Yb)_N=3.28~17.92,两者平均值分别为11.53和10.30,均大于5,亦反映出轻稀土相对重稀土强烈富集。(La/Sm)_N=2.92~5.14,(Sm/Eu)_N=1.88~5.73,均值分别为4.29、2.85,表明轻稀土分馏程度较强;(Gd/Yb)_N=1.09~2.17,均值为1.52,反映HREE部分分馏程度较弱。稀土配分模式图(图7a)为左高右

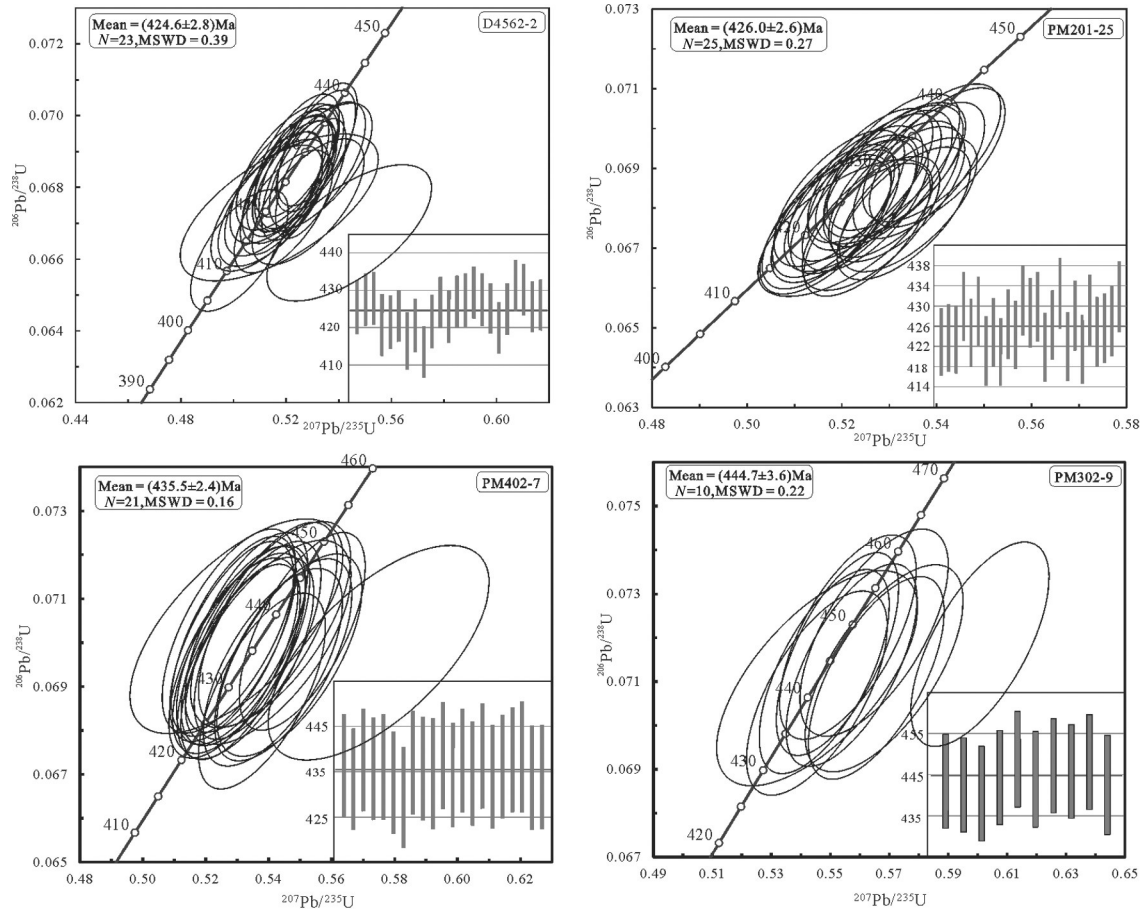


图5 宣和岩体锆石U-Pb年龄谐和图和加权平均值
Fig.5 Zircon U-Pb concordia diagrams of Xuanhe granite mass

低的曲线, 倾斜较高, 轻稀土部分陡倾, 重稀土部分平缓, 与上地壳稀土元素配分模式近于一致, δEu 变化于0.22~0.68, 均值为0.49, 具中等Eu负异常, 反映源岩可能有Eu亏损或熔融时有斜长石残留以及岩浆结晶过程中有斜长石的分离结晶; δCe 除样品D4562-2明显较低外, 其余变化于0.66~1.89, 平均值1.20, 具微弱的Ce正异常。以上各种相似特征反映不同侵入体岩石为同源岩浆演化的产物且为壳源型花岗岩。

5.2.3 微量元素地球化学

微量元素含量及特征值见表3, 原始地幔标准化蛛网图(图7b)上所有样品曲线特征相近, 明显富集大离子亲石元素K、Rb、Pb、Nd, 相对亏损Sr、Ba; 富集高场强元素Th、U, 相对亏损Nb、Ce; Ba、Sr的亏损及Pb、Th、U的富集表明其母岩浆经历了明显的斜长石分离结晶, 从而形成了高分异的高硅、高碱

的岩浆。

Rb/Sr 比值较大, 介于1.48~29.25, 符合壳源岩浆的范围(Rb/Sr 大于0.5); Th/U 比为0.99~7.25, 平均值为3.75, 与上地壳的Th/U 比值(3.89)相近。Rb/Nb 比值为4.31~21.26, 平均值为8.18, 据Hildreth et al. (1991) 研究, Rb/Nb 比值有规律地从地幔岩石向上地壳岩石增高的趋势: 平均上地壳的Rb/Nb 比值为4.5, 明显大于上地壳的平均值; Y 是在各类岩石中的丰度值较高, 而变化范围较小的高场强元素。因而可以利用Rb/Y、Nb/Y 比值来判明岩浆物质来源或受混染的程度。Rb/Y 比值为3.70~17.27, 平均值为7.36, 大于上地壳的值(3.25); Nb/Y 比值较低为0.59~1.25, 平均值为0.91, 高于上地壳的均值(0.57)。Rb/Y 值远大于上地壳值, Nb/Y 值明显高于上地壳值, 这也为花岗岩的地壳成因提供了一定的佐证。此外特征元素Rb/Li 比值与华南改造型花岗

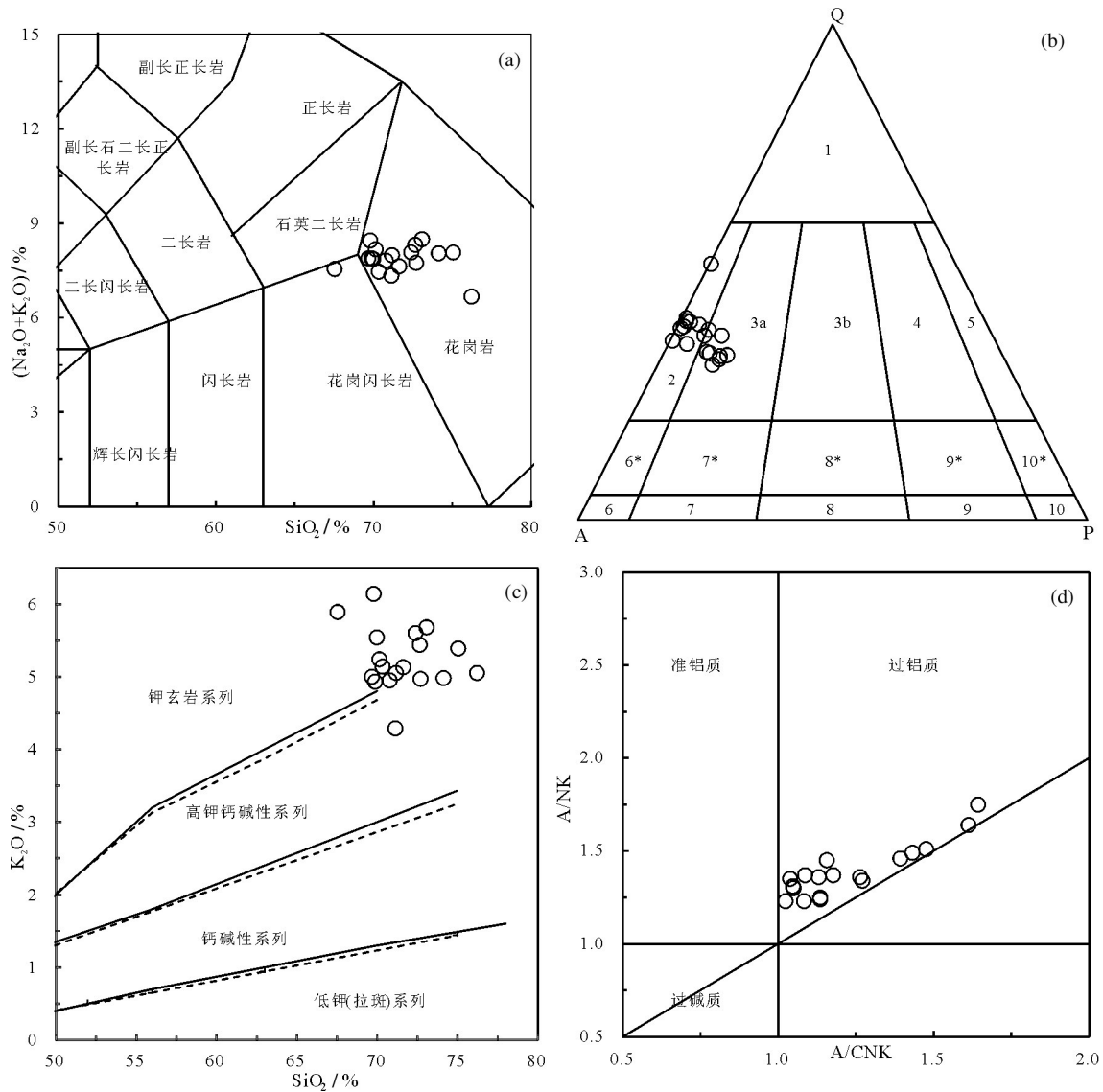


图6 宣和岩体 TAS图解(a)、QAP图解(b)、K₂O-SiO₂图解(c)及A/NK-A/CNK判别图解(d)

(a底图据 Middlemost, 1994; b底图据 TUGS, 1979; c底图中实线据 Peccerillo and Taylor, 1976.; 虚线据 Middlemost, 1985)

Fig.6 TAS diagram (a), QAP diagram (b), K₂O-SiO₂ diagram (c) and A/NK-A/CNK diagram (d) of Xuanhe granite mass

(a base map after Middlemost, 1994; b base map after TUGS, 1979; c base map solid line after Peccerillo R, Taylor, 1976; data of dashed line after Middlemost, 1985)

岩相近,因此从微量元素来看,宣和岩体为壳源型花岗岩。

5.3 Nd-Sr同位素

志留纪花岗岩Rb-Sr、Sm-Nd同位素组成见表4,由表可知Sr同位素初始比值(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i为0.71291~0.71399,大于0.708,在(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i-t图(图8a)中落于大陆壳增长线附近,表明形成宣和岩体的物质来源于地壳(邱家骧等,1993),显示区内其为壳源沉积岩熔融形成的S型花岗岩。 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值变化于

-9.1~-10.2,与华南典型加里东期过铝质花岗岩的Nd同位素组成相一致。其对应的二阶段Nd模式年龄(T_{2DM})为1.91~2.27 Ga,与华夏地块基底变质岩的Nd模式年龄(主要为1.8~2.2 Ga)(陈江峰等,1999)相当; $\epsilon_{Nd}(t)$ 及基底变质岩Nd同位素演化区域图(图8b)(凌洪飞等,1999)中 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值落在基底麻源群变质岩Nd同位素演化域内,暗示这些花岗岩主要由物质组分与麻源群变质岩相当的地壳物质部分熔融形成的。

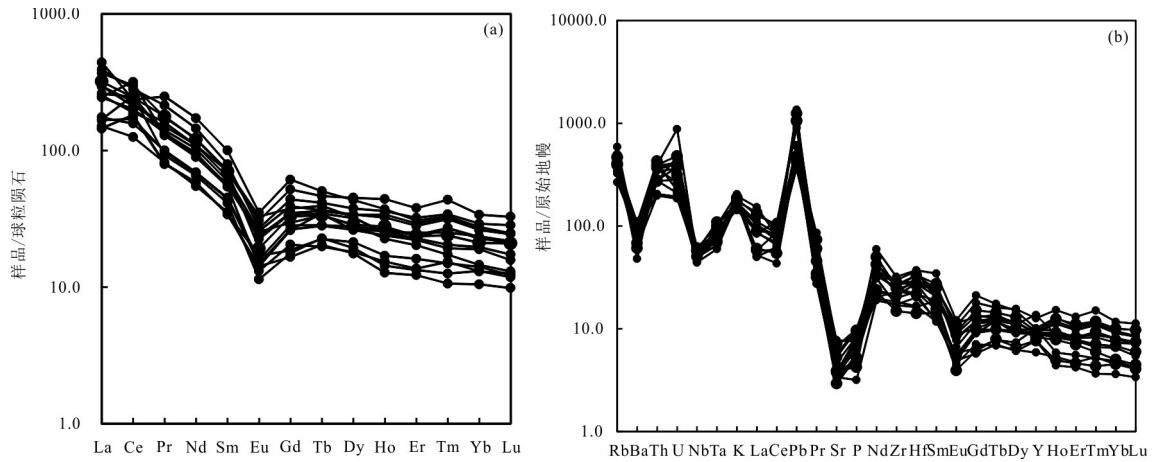


图7 宣和岩体稀土元素配分模式图(a)及微量元素蛛网图(b)
 (球粒陨石标准化值和原始地幔标准化值据 Sun and McDonough, 1989)
 Fig.7 REE patterns and spidergrams of Xuanhe granite mass
 (standardized value of chondrite and primitive mantle after Sun and McDonough, 1989)

6 讨论

6.1 形成时代

宣和岩体传统上被认为属于印支期花岗岩体(任纪舜, 1990; 福建省地质调查研究院, 2002^①; 周新民, 2003; 孙涛, 2006; 福建省地质调查研究院, 2013^②)。本文通过对该岩体4个代表性样品的锆石 U-Pb 测年工作, 测得其成岩年龄分别为(424.6±2.8) Ma、(426.7±2.6) Ma、(435.5±2.4) Ma 和(447±

3.6) Ma, 与陈正宏等(2008)利用 EMP 独居石定年法所获得的年龄(418.7±16.4) Ma、徐先兵等(2009)利用激光锆石 U-Pb 法对岩体所获得的年龄(447.1±4.7) Ma、蒋婷(2014)利用激光锆石 U-Pb 法对岩体所获得的年龄(445.4±3.6) Ma 相似, 表明宣和岩体主体形成于加里东期。

6.2 岩石成因

花岗岩的成因类型主要有 I 型、S 型、M 型和 A 型(邱检生等, 2008), 目前 Whalen et al.(1987)的指

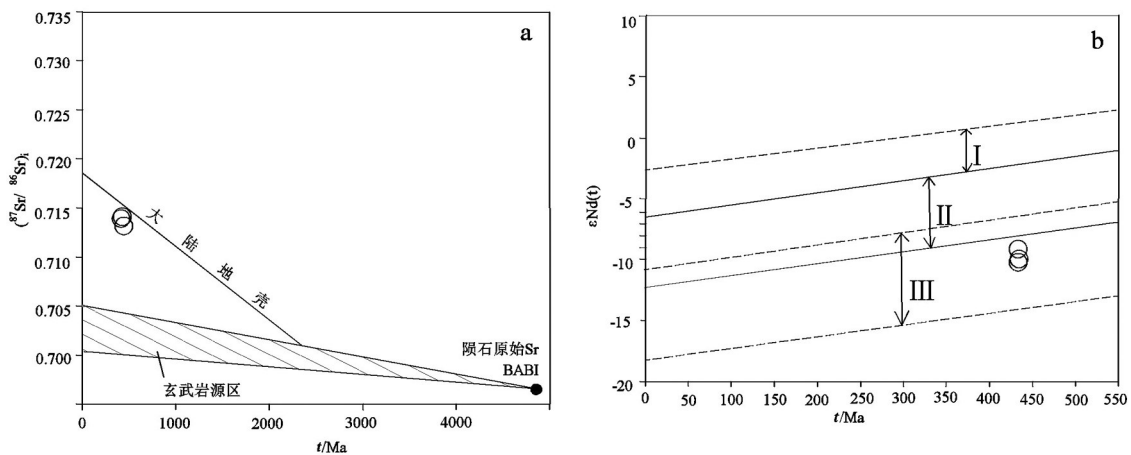


图8 宣和岩体 Sr 同位素的岩石源区识别图(a)及 $\epsilon_{Nd}(t)-t$ 及基底变质岩 Nd 同位素演化区域图(b)

I—东山岛—莆田忠门变质岩演化域; II—龙海深奥变质岩演化域; III—麻源群演化域

Fig.8 The Sr isotope diagram and $\epsilon_{Nd}(t)-t$ diagram of Xuanhe granite mass(b)

I—Evolution field of metamorphic rock from Dongshan Island-Putian Zhongmen; II—Evolution field of metamorphic rock from Longhai Shenao;

III—Evolution field of Mayuan Group

表2 宣和岩体主量元素含量(%)及特征值
Table 2 Major element compositions (%) of Xuanhe granite mass

测试项目	PM3	PM3	D7527	D2816	D2527	D1414	D4538	D1353	PM3	PM302	PM4	PM20	PM20	PM20	PM201-	D0129
	02-8	02-9	-1	-3		-1	-1	-2	02-2	-2-2	02-7	1-12	1-25	1-27	25-2	
	似斑状中粗粒正长花岗岩					似斑状中粒正长花岗岩					少斑中细粒正长花岗岩					
SiO ₂	71.14	71.18	73.08	69.99	72.65	70.34	70.78	74.14	72.70	69.79	70.14	67.54	69.88	72.39	69.68	71.63
TiO ₂	0.64	0.46	0.26	0.58	0.34	0.52	0.50	0.29	0.41	0.29	0.53	0.52	0.61	0.39	0.54	0.44
Al ₂ O ₃	13.24	13.51	13.36	14.6	13.08	13.64	13.58	12.85	13.56	15.82	13.69	15.95	13.85	13.61	13.91	14.12
Fe ₂ O ₃	1.59	0.69	0.65	1.82	0.52	1.85	1.01	0.81	1.48	1.43	1.02	1.85	1.79	1.88	0.76	1.85
FeO	2.1	2.06	1.52	1.33	1.8	1.62	2.2	1.24	1.16	0.69	2.32	1.72	1.8	0.78	2.12	0.92
FeOT	3.53	2.68	2.10	2.97	2.27	3.28	3.11	1.97	2.49	1.98	3.24	3.38	3.41	2.47	2.80	2.58
Fe ₂ O ₃ T	3.92	2.98	2.34	3.30	2.52	3.65	3.45	2.19	2.77	2.20	3.60	3.76	3.79	2.75	3.11	2.87
MnO	0.055	0.051	0.049	0.068	0.050	0.122	0.073	0.050	0.048	0.049	0.063	0.066	0.058	0.043	0.081	0.048
MgO	0.94	0.73	0.37	0.8	0.46	0.75	0.71	0.41	0.48	0.36	0.87	0.75	0.93	0.52	0.82	0.68
CaO	0.88	1.44	0.55	0.21	1.20	1.33	1.66	0.79	0.44	0.15	1.41	0.34	1.13	0.32	1.46	0.26
Na ₂ O	3.04	2.93	2.81	2.32	2.87	2.32	2.86	3.06	2.77	2.31	2.93	1.65	2.96	2.47	2.88	2.50
K ₂ O	4.29	5.05	5.68	5.54	5.44	5.14	4.95	4.98	4.97	6.14	5.24	5.89	4.93	5.60	5.00	5.13
P ₂ O ₅	0.215	0.163	0.114	0.092	0.138	0.170	0.209	0.104	0.178	0.069	0.189	0.154	0.217	0.139	0.181	0.123
LOI	1.26	1.11	1.04	2.14	0.9	1.69	0.9	0.8	1.28	2.42	0.94	2.99	1.24	1.38	1.99	1.8
Total	99.69	99.62	99.65	99.64	99.65	99.68	99.67	99.66	99.7	99.71	99.65	99.77	99.68	99.68	99.66	99.74
A/CNK	1.18	1.05	1.14	1.43	1.02	1.16	1.04	1.08	1.26	1.48	1.05	1.64	1.13	1.27	1.07	1.39
A/NK	1.37	1.31	1.24	1.49	1.23	1.45	1.35	1.23	1.36	1.51	1.30	1.75	1.36	1.34	1.37	1.46
ALK	7.33	7.98	8.49	7.86	8.31	7.46	7.81	8.04	7.74	8.45	8.17	7.54	7.89	8.07	7.88	7.63
AKI	0.73	0.76	0.81	0.67	0.81	0.69	0.74	0.81	0.73	0.66	0.77	0.57	0.74	0.75	0.73	0.69
AR	2.51	2.29	2.36	1.91	2.34	1.90	2.20	2.63	2.31	3.25	2.27	2.72	2.31	2.10	2.20	2.07
N/K	0.71	0.58	0.49	0.42	0.53	0.45	0.58	0.61	0.56	0.38	0.56	0.28	0.60	0.44	0.58	0.49
Q	37.56	36.57	36.58	35.16	33.66	30.52	34.29	29.56	31.63	34.46	35.73	32.76	28.50	33.23	30.48	34.28
C	2.56	1.01	1.89	4.75	0.63	2.30	1.01	1.25	3.31	5.43	1.10	6.86	2.15	3.30	1.58	4.38
Or	25.84	30.37	34.1	33.65	32.62	31.07	29.69	29.81	29.92	37.39	31.47	36.11	29.69	33.74	30.33	31.05
An	3.02	6.19	2.02	0.45	5.13	5.61	6.97	3.28	1.04	0.30	5.85	0.71	4.27	0.69	6.22	0.50
Ab	26.21	25.23	24.15	20.17	24.64	20.08	24.56	26.23	23.88	20.14	25.20	14.48	25.52	21.31	25.01	21.67
Hy	4.00	4.44	2.88	3.28	3.61	3.66	4.35	2.27	2.35	1.83	4.90	3.70	3.82	2.40	4.69	2.92
Il	1.24	0.89	0.50	1.13	0.66	1.01	0.96	0.56	0.79	0.57	1.02	1.02	1.18	0.76	1.05	0.86
Mt	2.35	1.02	0.96	2.06	0.77	2.21	1.49	1.19	1.72	1.42	1.50	2.30	2.35	1.74	1.13	1.77
Ap	0.51	0.38	0.27	0.22	0.32	0.40	0.49	0.24	0.42	0.16	0.45	0.37	0.51	0.33	0.43	0.29
σ	1.91	2.26	2.40	2.29	2.33	2.04	2.20	2.08	2.02	2.67	2.46	2.32	2.32	2.22	2.33	2.03
τ	15.94	23.00	40.58	21.17	30.03	21.77	21.44	33.76	26.32	46.59	20.3	27.50	17.85	28.56	20.43	26.41
DI	86.33	86.06	91.48	88.11	88.89	84.81	84.73	91.20	90.38	90.29	85.17	85.05	85.73	90.78	84.90	89.29
SI	7.86	6.37	3.35	6.80	4.15	6.44	6.05	3.90	4.43	3.31	7.03	6.34	7.51	4.65	7.08	6.17
FL	89.28	84.71	93.92	97.4	87.38	84.87	82.47	91.05	94.62	98.26	85.28	95.69	87.47	96.19	84.37	96.7
MF	79.7	79.02	85.43	79.75	83.45	82.23	81.89	83.33	84.62	85.48	79.33	82.64	79.42	83.65	77.84	80.29
Ox	22.6	23.87	26.97	24.82	25.68	23.10	22.99	26.47	25.74	26.87	23.04	23.86	22.69	26.38	23.06	25.43

注: A/CNK=Al₂O₃/(K₂O+Na₂O+CaO)(摩尔比); A/NK=Al₂O₃/(K₂O+Na₂O)(摩尔比); ALK=K₂O+Na₂O; AKI=(K₂O+Na₂O)/Al₂O₃(摩尔比); AR. 碱度率; N/K=K₂O/Na₂O。

表3 宣和岩体稀土元素、微量元素含量(10⁻⁶)及特征值表
Table 3 Trace elements (10⁻⁶) and rare elements (10⁻⁶) compositions of Xuanhe granite mass

测试项目	似斑状中粗粒正长花岗岩										似斑状中粒正长花岗岩										少斑中细粒正长花岗岩																																			
	PM302-8	PM302-9	D7527-1	D2816-3	D2527	D1414-1	D4538-1	D4545-1	D1353-2	PM302-2	PM302-2	PM302-2-2	PM402-7	PM201-12	PM201-25	PM201-27	PM201-25-2	D4562-2	D0129	PM302-8	PM302-9	D7527-1	D2816-3	D2527	D1414-1	D4538-1	D4545-1	D1353-2	PM302-2	PM302-2	PM302-2-2	PM402-7	PM201-12	PM201-25	PM201-27	PM201-25-2	D4562-2	D0129	PM302-8	PM302-9	D7527-1	D2816-3	D2527	D1414-1	D4538-1	D4545-1	D1353-2	PM302-2	PM302-2	PM302-2-2	PM402-7	PM201-12	PM201-25	PM201-27	PM201-25-2	D4562-2
La	59.85	69.90	39.89	87.18	34.23	34.39	61.62	17.80	58.33	41.37	35.64	92.64	104.60	57.86	39.39	70.00	24.65	75.72	59.85	69.90	39.89	87.18	34.23	34.39	61.62	17.80	58.33	41.37	35.64	92.64	104.60	57.86	39.39	70.00	24.65	75.72	59.85	69.90	39.89	87.18	34.23	34.39	61.62	17.80	58.33	41.37	35.64	92.64	104.60	57.86	39.39	70.00	24.65	75.72		
Ce	115.72	128.92	154.10	183.30	110.60	111.30	151.40	60.29	194.40	96.36	76.75	172.20	143.80	122.76	104.20	139.20	20.27	149.50	115.72	128.92	154.10	183.30	110.60	111.30	151.40	60.29	194.40	96.36	76.75	172.20	143.80	122.76	104.20	139.20	20.27	149.50	115.72	128.92	154.10	183.30	110.60	111.30	151.40	60.29	194.40	96.36	76.75	172.20	143.80	122.76	104.20	139.20	20.27	149.50		
Pr	14.25	15.19	8.76	16.57	7.54	7.60	12.57	4.46	12.24	9.52	7.75	20.28	23.61	12.77	9.25	13.34	5.00	16.85	14.25	15.19	8.76	16.57	7.54	7.60	12.57	4.46	12.24	9.52	7.75	20.28	23.61	12.77	9.25	13.34	5.00	16.85	14.25	15.19	8.76	16.57	7.54	7.60	12.57	4.46	12.24	9.52	7.75	20.28	23.61	12.77	9.25	13.34	5.00	16.85		
Nd	50.93	50.73	30.58	57.10	26.74	27.19	44.64	15.42	41.82	32.28	25.62	67.67	80.38	43.36	31.85	47.77	16.24	56.06	50.93	50.73	30.58	57.10	26.74	27.19	44.64	15.42	41.82	32.28	25.62	67.67	80.38	43.36	31.85	47.77	16.24	56.06	50.93	50.73	30.58	57.10	26.74	27.19	44.64	15.42	41.82	32.28	25.62	67.67	80.38	43.36	31.85	47.77	16.24	56.06		
Sm	10.80	9.77	6.30	10.95	5.20	5.26	8.31	3.93	8.32	6.90	5.41	12.13	15.30	8.64	6.77	9.12	3.85	10.74	10.80	9.77	6.30	10.95	5.20	5.26	8.31	3.93	8.32	6.90	5.41	12.13	15.30	8.64	6.77	9.12	3.85	10.74	10.80	9.77	6.30	10.95	5.20	5.26	8.31	3.93	8.32	6.90	5.41	12.13	15.30	8.64	6.77	9.12	3.85	10.74		
Eu	1.78	1.49	0.66	1.90	0.82	0.98	1.47	0.24	0.82	0.92	0.76	1.56	2.03	1.37	0.86	1.30	0.33	1.11	1.78	1.49	0.66	1.90	0.82	0.98	1.47	0.24	0.82	0.92	0.76	1.56	2.03	1.37	0.86	1.30	0.33	1.11	1.78	1.49	0.66	1.90	0.82	0.98	1.47	0.24	0.82	0.92	0.76	1.56	2.03	1.37	0.86	1.30	0.33	1.11		
Gd	10.65	8.02	3.63	7.74	3.41	3.83	6.07	2.97	5.36	5.80	4.20	9.01	12.56	7.15	5.42	7.13	2.63	6.77	10.65	8.02	3.63	7.74	3.41	3.83	6.07	2.97	5.36	5.80	4.20	9.01	12.56	7.15	5.42	7.13	2.63	6.77	10.65	8.02	3.63	7.74	3.41	3.83	6.07	2.97	5.36	5.80	4.20	9.01	12.56	7.15	5.42	7.13	2.63	6.77		
Tb	1.73	1.37	0.85	1.47	0.76	0.84	1.25	0.51	1.29	1.06	0.74	1.55	1.88	1.35	1.05	1.27	0.44	1.25	1.73	1.37	0.85	1.47	0.76	0.84	1.25	0.51	1.29	1.06	0.74	1.55	1.88	1.35	1.05	1.27	0.44	1.25	1.73	1.37	0.85	1.47	0.76	0.84	1.25	0.51	1.29	1.06	0.74	1.55	1.88	1.35	1.05	1.27	0.44	1.25		
Dy	11.46	8.63	4.90	8.27	4.46	5.41	7.20	3.07	8.14	7.04	4.58	9.57	10.98	8.58	6.68	6.64	2.25	7.28	11.46	8.63	4.90	8.27	4.46	5.41	7.20	3.07	8.14	7.04	4.58	9.57	10.98	8.58	6.68	6.64	2.25	7.28	11.46	8.63	4.90	8.27	4.46	5.41	7.20	3.07	8.14	7.04	4.58	9.57	10.98	8.58	6.68	6.64	2.25	7.28		
Ho	2.49	1.83	0.81	1.38	0.72	0.96	1.28	0.49	1.43	1.49	0.87	2.04	2.10	1.92	1.45	1.35	0.41	1.57	2.49	1.83	0.81	1.38	0.72	0.96	1.28	0.49	1.43	1.49	0.87	2.04	2.10	1.92	1.45	1.35	0.41	1.57	2.49	1.83	0.81	1.38	0.72	0.96	1.28	0.49	1.43	1.49	0.87	2.04	2.10	1.92	1.45	1.35	0.41	1.57		
Er	6.26	4.64	2.21	3.76	2.02	2.66	3.35	1.20	4.14	3.96	2.26	5.31	5.06	4.84	3.75	3.66	1.19	3.91	6.26	4.64	2.21	3.76	2.02	2.66	3.35	1.20	4.14	3.96	2.26	5.31	5.06	4.84	3.75	3.66	1.19	3.91	6.26	4.64	2.21	3.76	2.02	2.66	3.35	1.20	4.14	3.96	2.26	5.31	5.06	4.84	3.75	3.66	1.19	3.91		
Tm	1.11	0.80	0.32	0.52	0.27	0.38	0.44	0.19	0.64	0.69	0.39	0.87	0.84	0.83	0.69	0.49	0.20	0.61	1.11	0.80	0.32	0.52	0.27	0.38	0.44	0.19	0.64	0.69	0.39	0.87	0.84	0.83	0.69	0.49	0.20	0.61	1.11	0.80	0.32	0.52	0.27	0.38	0.44	0.19	0.64	0.69	0.39	0.87	0.84	0.83	0.69	0.49	0.20	0.61		
Yb	5.75	4.45	2.23	3.34	1.78	2.39	2.47	1.30	3.99	3.82	2.21	4.94	4.68	4.46	3.95	3.21	1.60	3.59	5.75	4.45	2.23	3.34	1.78	2.39	2.47	1.30	3.99	3.82	2.21	4.94	4.68	4.46	3.95	3.21	1.60	3.59	5.75	4.45	2.23	3.34	1.78	2.39	2.47	1.30	3.99	3.82	2.21	4.94	4.68	4.46	3.95	3.21	1.60	3.59		
Lu	0.83	0.63	0.30	0.44	0.25	0.31	0.33	0.18	0.55	0.55	0.32	0.72	0.63	0.62	0.52	0.40	0.24	0.53	0.83	0.63	0.30	0.44	0.25	0.31	0.33	0.18	0.55	0.55	0.32	0.72	0.63	0.62	0.52	0.40	0.24	0.53	0.83	0.63	0.30	0.44	0.25	0.31	0.33	0.18	0.55	0.55	0.32	0.72	0.63	0.62	0.52	0.40	0.24	0.53		
Y	57.50	40.70	34.82	42.77	34.56	45.79	37.79	37.76	61.95	41.70	26.70	43.20	45.90	41.00	41.60	40.60	30.80	44.80	57.50	40.70	34.82	42.77	34.56	45.79	37.79	37.76	61.95	41.70	26.70	43.20	45.90	41.00	41.60	40.60	30.80	44.80	57.50	40.70	34.82	42.77	34.56	45.79	37.79	37.76	61.95	41.70	26.70	43.20	45.90	41.00	41.60	40.60	30.80	44.80		
ΣREE	351.11	347.07	290.36	426.69	233.36	249.29	340.19	149.81	403.42	253.46	194.20	443.69	454.35	317.51	257.43	345.48	110.10	380.29	351.11	347.07	290.36	426.69	233.36	249.29	340.19	149.81	403.42	253.46	194.20	443.69	454.35	317.51	257.43	345.48	110.10	380.29	351.11	347.07	290.36	426.69	233.36	249.29	340.19	149.81	403.42	253.46	194.20	443.69	454.35	317.51	257.43	345.48	110.10	380.29		
LREE	253.33	276.00	240.29	357.00	185.13	186.72	280.01	102.14	315.93	187.35	151.93	366.48	369.72	246.76	192.32	280.73	70.34	309.98	253.33	276.00	240.29	357.00	185.13	186.72	280.01	102.14	315.93	187.35	151.93	366.48	369.72	246.76	192.32	280.73	70.34	309.98	253.33	276.00	240.29	357.00	185.13	186.72	280.01	102.14	315.93	187.35	151.93	366.48	369.72	246.76	192.32	280.73	70.34	309.98		
HREE	97.78	71.07	50.07	69.69	48.23	62.57	60.18	47.67	87.49	66.11	42.27	77.21	84.63	70.75	65.11	64.75	39.76	70.31	97.78	71.07	50.07	69.69	48.23	62.57	60.18	47.67	87.49	66.11	42.27	77.21	84.63	70.75	65.11	64.75	39.76	70.31	97.78	71.07	50.07	69.69	48.23	62.57	60.18	47.67	87.49	66.11	42.27	77.21	84.63	70.75	65.11	64.75	39.76	70.31		
LR/HR	2.59	3.88	4.80	5.12	3.84	2.98	4.65	2.14	3.61	2.83	3.59	4.75	4.37	3.49	2.95	4.34	1.77	4.41	2.59	3.88	4.80	5.12	3.84	2.98	4.65	2.14	3.61	2.83	3.59	4.75	4.37	3.49	2.95	4.34	1.77	4.41	2.59	3.88	4.80	5.12	3.84	2.98	4.65	2.14	3.61	2.83	3.59	4.75	4.37	3.49	2.95	4.34	1.77	4.41		
δEu	0.54	0.53	0.41	0.64	0.60	0.68	0.65	0.22	0.38	0.46	0.50	0.47	0.46	0.55	0.45	0.51	0.32	0.40	0.54	0.53	0.41	0.64	0.60	0.68	0.65	0.22	0.38	0.46	0.50	0.47	0.46	0.55	0.45	0.51	0.32	0.40	0.54	0.53	0.41	0.64	0.60	0.68	0.65	0.22	0.38	0.46	0.50	0.47	0.46	0.55	0.45	0.51	0.32	0.40		
δCe	0.92	0.90	1.89	1.08	1.58	1.58	1.23	1.57	1.65	1.12	1.06	0.91	0.66	1.03	1.26	1.02	0.41	0.96	0.92	0.90	1.89	1.08	1.58	1.58	1.23	1.57	1.65	1.12	1.06	0.91	0.66	1.03	1.26	1.02	0.41	0.96	0.92	0.90	1.89	1.08	1.58	1.58	1.23	1.57	1.65	1.12	1.06	0.91	0.66	1.03	1.26	1.02	0.41	0.96		
(La/Yb) _N	7.05	10.64	12.12	17.68	13.03	9.75	16.9	9.28	9.90	7.34	10.92	12.70	15.14	8.79	6.76	14.77	10.44	14.29	7.05	10.64	12.12	17.68	13.0																																	

续表3

测试项目	似斑状中粗粒正长花岗岩										似斑状中粒正长花岗岩										少斑中细粒正长花岗岩				
	PM302-8	PM302-9	D7527-1	D2816-3	D2527	D1414-1	D4538-1	D4545-1	DI353-2	PM302-2	PM302-2-2	PM402-7	PM201-12	PM201-25	PM201-27	PM201-25-2	D4562-2	D0129							
Pb	25.77	32.31	73.83	75.79	42.16	96.27	88.09	106.71	63.98	29.95	34.58	33.82	35.61	32.69	34.25	43.48	24.57	25.46							
Sr	119.0	163.5	61.6	82.2	74.9	73.3	111.3	27.7	82.1	79.6	71.6	151.3	78.7	141.0	74.5	97.9	18.2	65.0							
Zr	300.0	252.0	166.0	319.0	204.0	258.0	277.0	91.0	190.0	234.0	192.0	284.0	358.0	333.0	222.0	272.1	72.2	296.0							
Hf	10.19	9.24	4.36	8.17	5.15	6.70	6.71	2.78	5.03	8.52	6.23	10.27	11.46	11.22	7.06	8.53	3.10	9.12							
Li	0.57	0.75	0.70	0.42	0.78	0.47	0.69	0.62	0.60	0.44	0.33	0.69	0.48	0.50	0.29	0.74	0.40	0.33							
V	54.1	35.4	17.3	38.5	23.6	38.9	34.7	6.1	20.5	26.7	20.2	39.7	36.6	42.9	30.4	39.4	11.1	30.8							
Cr	12.6	10.3	18.3	18.7	17.5	11.2	16.0	11.8	9.8	9.6	6.0	12.5	11.3	10.9	9.5	13.9	7.3	9.5							
Co	6.42	4.98	2.41	5.95	2.92	5.13	5.14	1.04	2.94	3.88	3.44	5.73	7.49	6.53	3.38	6.43	1.81	4.66							
Ni	6.42	5.39	3.44	7.54	3.79	6.17	5.67	3.41	4.74	4.57	3.98	6.89	6.26	6.39	4.52	6.64	4.04	5.14							
W	4.17	1.98	3.09	3.54	1.16	3.41	4.08	5.32	1.48	3.89	3.32	2.00	1.66	2.38	2.78	2.25	5.57	3.70							
Sn	7.27	7.51	11.4	8.98	5.93	22.26	13.19	12.30	15.06	12.10	11.95	8.40	11.31	7.96	21.75	8.05	19.71	7.69							
Mo	0.62	2.68	1.84	0.86	3.51	0.39	1.33	2.39	1.38	0.98	0.43	0.64	0.98	0.44	1.82	2.08	0.52	0.36							
Bi	0.35	0.87	0.55	0.86	0.36	0.34	0.62	13.19	1.11	0.47	0.96	0.43	0.56	0.20	0.30	0.31	0.31	0.39							
Li	28.25	51.79	22.02	28.32	50.17	34.08	57.25	16.65	54.46	45.79	42.57	55.07	66.82	54.25	27.38	51.40	20.88	29.94							
Ag	0.10	0.06	0.15	0.12	0.06	0.12	0.17	0.67	0.13	0.14	0.04	0.04	0.1	0.06	0.13	0.35	0.04	0.07							
Cu	9.66	10.87	5.77	7.16	4.54	11.53	10.20	7.64	5.07	5.33	3.11	13.87	7.28	11.16	8.96	9.56	4.71	3.86							
Zn	66.86	49.73	98.54	114.34	54.35	99.02	101.4	150.74	66.23	58.59	44.72	65.04	74.40	67.48	42.02	65.98	35.55	48.57							
Th/U	3.88	1.81	2.33	3.76	4.33	4.28	3.01	0.99	3.52	3.31	3.92	5.50	7.25	3.71	5.33	5.34	1.41	3.89							
Ti/Y	66.71	67.74	44.75	81.28	58.96	68.06	79.30	15.87	28.06	58.93	65.1	73.53	67.90	89.17	56.19	79.72	23.35	58.86							
Ti/Zr	12.79	10.94	9.39	10.90	9.99	12.08	10.82	6.59	9.15	10.50	9.05	11.19	8.71	10.98	10.53	11.89	9.96	8.91							
Rb/Nb	5.24	6.85	8.32	6.09	5.86	4.31	6.07	11.24	7.74	7.20	11.20	5.96	7.31	5.28	9.99	9.47	21.26	7.81							
Rb/Y	3.74	5.95	8.59	5.92	5.96	3.70	6.54	9.36	4.59	7.02	14.02	5.99	6.88	5.65	7.63	7.32	17.27	6.37							
Nb/Y	0.71	0.87	1.03	0.97	1.02	0.86	1.08	0.83	0.59	0.97	1.25	1.00	0.94	1.07	0.76	0.77	0.81	0.82							
Ni/Co	1.00	1.08	1.43	1.27	1.3	1.2	1.10	3.28	1.61	1.18	1.16	1.20	0.84	0.98	1.34	1.03	2.23	1.10							
K/Rb	165.57	172.94	157.53	181.56	219.13	251.93	166.16	126.56	145.45	140.90	136.12	168.14	154.81	176.63	146.31	139.60	78.77	149.20							
Rb/Li	7.61	4.68	13.59	8.94	4.11	4.97	4.32	21.23	5.22	6.39	8.79	4.70	4.72	4.27	11.60	5.78	25.48	9.53							
Rb/Sr	1.81	1.48	4.85	3.08	2.75	2.31	2.22	12.76	3.46	3.68	5.23	1.71	4.01	1.64	4.27	3.03	29.25	4.39							
Li×10 ³ /Mg	5.01	11.82	9.92	5.90	18.18	7.57	13.44	13.88	22.14	15.90	19.71	10.55	14.85	9.72	8.78	10.45	14.50	7.34							

表4 志留纪侵入岩 Rb-Sr、Sm-Nd 同位素组成分析
Table 4 Rb-Sr and Sm-Nd isotope data of Silurian intrusive rock

样号	岩性	代号	t/Ma	Rb/10 ⁶	Sr/10 ⁶	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) _i	ε _{Sr} (t)
PM302-9	似斑状中粗粒正长花岗岩	γ ^S	447.0	242.3	163.5	4.2838	0.74027	0.71373	138.4
PM402-7	似斑状中粒正长花岗岩	γ ^S	435.5	258.6	151.32	4.9400	0.74356	0.71291	126.8
PM201-25	少斑中细粒正长花岗岩	γ ^S	426.7	231.6	141.00	4.7481	0.74341	0.71399	142.1
样号	岩性	代号	Sm/10 ⁶	Nd/10 ⁶	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	ε _{Nd} (t)	T _{DM}	T _{2DM}
PM302-9	似斑状中粗粒正长花岗岩	γ ^S	9.77	50.73	0.1167	0.511901	-10.0	1961	1981
PM402-7	似斑状中粒正长花岗岩	γ ^S	12.13	67.67	0.1087	0.511866	-10.2	1861	2000
PM201-25	少斑中细粒正长花岗岩	γ ^S	8.64	43.36	0.1208	0.511956	-9.1	1956	1912

标被视为判定花岗岩成因类型的最有效的依据,但是对于高程度分异的花岗岩,由于其矿物组成和化学成分都接近于低共熔花岗岩,导致分异的I型和S型和A型花岗岩成分上部分重叠(邱检生等,2008),因此需要综合各方面特征予以判断。虽然宣和岩体Zr+Nb+Ce+Y(均值 443×10^{-6})含量较高,显著高于Whalen et al.(1987)建议的A型花岗岩的下限值(350×10^{-6})。但样品的FeO*/MgO整体上比较低,介于3.42~7.50,均值为4.54,明显低于A型花岗岩FeO*/MgO值(FeO*/MgO > 10)特征;P₂O₅含量较高,均值为0.14,也明显不同于A型花岗岩贫磷的特征(贾小辉等,2009;张旗等,2012)。宣和岩体在地球化学成分上属高Si,富Al,贫Fe、Mg,高钾钙碱性系列,其A/CNK介于1.02~1.64,均大于1,显示偏铝质—强过铝质特征,CIPW标准矿物中出现刚玉分子,除1个样品外其余样品含量均大于1;P₂O₅含量较高,均值为0.14;K₂O含量介于4.2%~6.14%,均值为5.25%,而Na₂O含量低介于1.62%~3.06%,均低于3.2%;显示S型花岗岩的特征(徐夕生等,2010)。具微量元素Ba、Nb、Ta、Zr亏损的特征,与华南重熔型花岗岩相似(邱检生等,2008;王学求等,2010;周建等,2012),同时稀土元素分布模式及铅正异常也表明其壳源成因。Rb/Li与华南改造型花岗岩相近,显示具改造型花岗岩特征;岩石化学成分在A-C-F图解(图9)上样品均投于S型花岗岩区域(Setsuya et al., 1979)。以上特征表明宣和岩体并非特征的A型花岗岩,而是S型花岗岩。

6.3 物质源区

Sr同位素初始比值(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i为0.71291~0.71399,Sr同位素的岩石源区识别图中(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i比

值基本落于大陆壳增长线附近,表明形成宣和岩体的物质来源于地壳(邱家骧,1985);ε_{Nd}(t)值变化于-9.1~-13.4,与华南典型加里东期过铝质花岗岩的Nd同位素组成基本一致(沈渭洲等,1999;Mao et al., 2008;沈渭洲等,2008);其对应的二阶段Nd模式年龄(T_{2DM})为1.91~2.27 Ga,与华夏地块基底变质岩的Nd模式年龄(主要为1.8~2.2 Ga)相当(陈江峰等,1999);ε_{Nd}(t)-t及基底变质岩Nd同位素演化区域图(图8a)中投影于基底麻源群变质岩Nd同位素演化域内,暗示这些花岗岩主要由物质组分与麻源群变质岩相当的地壳物质部分熔融形成的(凌洪飞

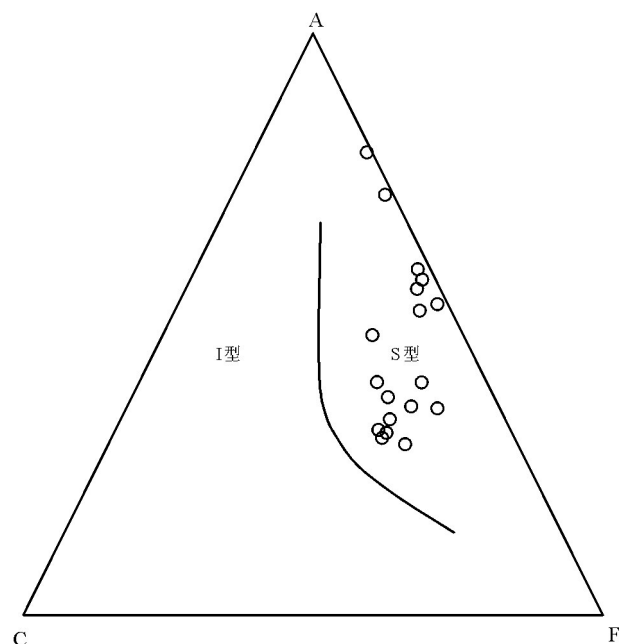


图9 宣和岩体A-C-F花岗岩类型判别图解
Fig.9 ACF discrimination diagram of granite type in Xuanhe granite mass

等, 1999)。

6.4 构造背景

华南早古生代褶皱造山带作为世界上8个主要的加里东期造山带之一占据了华南近1/3的空间, 区内广泛出露有前泥盆纪变质变形岩石、志留纪花岗岩和韧性剪切带, 反映古生代早期地球演化历史的珍贵记录(舒良树, 2006)。然而, 由于后期构造的叠加与改造, 其具体的构造属性、形成与演化

机制成为华南地质研究的难点和学术界认识分歧的焦点, 长期困扰着人们对华南构造演化的认识。华南早古生代构造属性观点有以下几种: (1) 弧-陆碰撞模式(丘元禧等, 1996, 1998; 曾勇等, 1999); (2) 陆-弧-陆碰撞模式等(许德如等, 2006), 这2种模式的基础是中国东南部存在早古生代蛇绿岩或火山岩, 但是在中国东南部迄今提出的早古生代蛇绿岩或者火山岩的具体形成时代值得商榷(舒良树等,

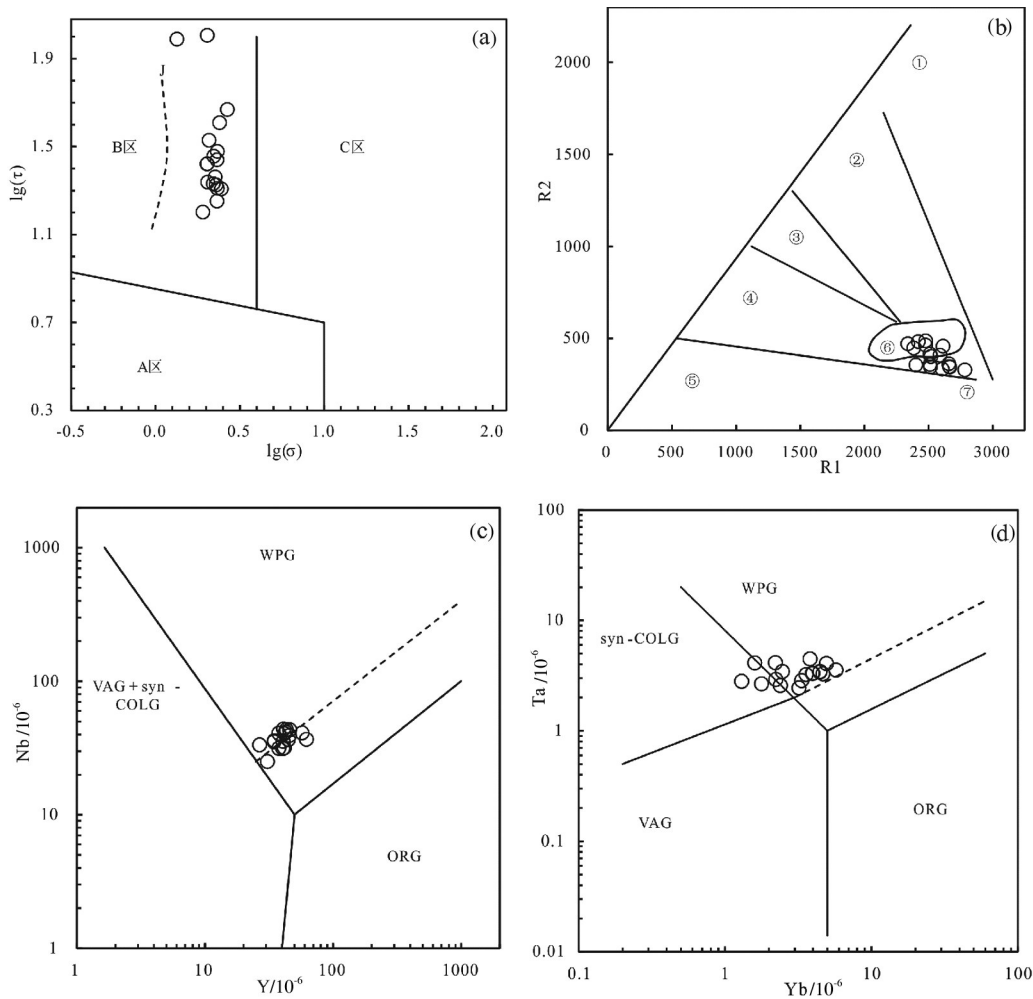


图 10 宣和岩体构造环境判别图解

a—特曼-戈蒂里图解; b—R1-R2图解(据 Batchelor and Bowden, 1985); c—Nb-Y图解; d—Ta-Yb图解

a图: A—非造山带火山岩, B—造山带火山岩, C—A、B区所派生的碱性、偏碱性火山岩; b图: ①—地幔斜长花岗岩; ②—破坏性活动板块边缘(板块碰撞前)花岗岩; ③—板块碰撞后隆起期花岗岩; ④—晚造山期花岗岩; ⑤—非造山区A型花岗岩; ⑥—同碰撞(S型)花岗岩; ⑦—造山期后A型花岗岩; c图、d图: WPG—板内花岗岩; ORG—洋中脊花岗岩; VAG—火山岩弧花岗岩; SYN-COLG—同碰撞花岗岩

Fig. 10 The discrimination diagram for tectonic setting of Xuanhe granite mass

a—Rittmann-Gottirry diagram; b—R1-R2 diagram (after Batchelor and Bowden, 1985); c—Nb-Y diagram; d—Ta-Yb diagram

Diagram a: A—Anorogenic volcanic rocks, B—Orogenic volcanic rocks, C—Alkaline and peralkaline rocks derived from series A and B; Diagram b: ①—Mantle plagiogranite; ②—Destructive plate boundary granite (pre-plate collision); ③—Post-plate collision uplift granite; ④—Late orogenic granite; ⑤—Anorogenic A-type granite; ⑥—S-type granite; ⑦—Post-orogenic granite; Diagram c and d: WPG—Intraplate granite; ORG—Mid-ocean ridge granite; VAG—Volcanic rocks-arc granite; SYN-COLG—Syn-collisional granite

2008);(3)华南加里东期早古生代构造环境可以与西欧比利牛斯地区相对比,是陆内造山作用的产物(舒良树等,2008);(4)张芳荣等(2009)将华南这种有褶皱造山、无深海洋壳地质事实归结于板块俯冲-陆陆碰撞的远程效应,或板内构造事件,并将加里东期花岗岩类的形成背景定为板内造山环境。

花岗岩类作为构成陆壳的主要岩石,其形成与大地构造环境和地球动力学条件密切相关,不同构造环境的花岗岩具有不同的地球化学特征,并对应于不同的成因类型,其岩石学、矿物学和地球化学特点应该记录下它们形成时的构造背景。在 $\log\sigma$ - $\log\tau$ 图解(图10a)中的投影点均落于造山带岩浆岩区;同时,造山带挤压构造背景下产出的花岗岩大多具有过铝质特征,其全岩A/CNK多在1.10以上,成因类型多属S型(Chappell et al., 1974),与 $\log\sigma$ - $\log\tau$ 图解的结果相一致;R1-R2图解(图10b)中样品多数投影于同碰撞期(Batchelor et al., 1985);Nb-Y图解(Pearce et al., 1984)(图10c)及Ta-Yb图解(Pearce et al., 1984)(图10d)中样品大部分投影于板内环境;因此可以认为区内的宣和岩体为陆内造山作用下形成的板内花岗岩。

近年来随着江绍拼合带早古生代俯冲杂岩的厘定(汪建国,2014;浙江省地质调查院,2015^①;董学发,2016;福建省地质调查研究院,2018^②)、政和一大埔断裂带早古生代俯冲杂岩的厘定(福建省地质调查研究院,2017^③),因此研究区早古生代构造格局的成因基质可能与板块俯冲-碰撞造山模式有关。据此推测宣和岩体的形成机制为:华夏地块与扬子地块之间,以及华夏地块与东南侧未知名地体群之间由板块俯冲演化为陆陆碰撞造山模式后,因强烈挤压而引起研究区地壳缩短加厚、地温升高,继而迅速减薄,使区内进入后碰撞的伸展环境。此时,花岗岩源区处于相对高温、低压,上地壳古元古代基底上以泥质岩为主的物源逐渐软化进而部分熔融,形成过铝质花岗岩浆。随后,在后碰撞造山伸展减压背景下,过铝质花岗岩浆上升侵位,形成了宣和加里东期花岗岩。

7 结 论

(1)宣和岩体主要由含斑细粒、少斑中细粒、似斑状中粒、似斑状中粗粒及斑状细粒正长花岗岩等

组成;岩体分异明显,相带发育。

(2)宣和岩体4个样品的锆石LA-ICP-MS U-Pb测年获得的年龄为(424.6±2.8)Ma、(426.7±2.6)Ma、(435.5±2.4)Ma及(447±3.6)Ma,证明这个岩体的形成年龄不是原来认为的印支期花岗岩,而是属于加里东期岩体。

(3)宣和岩体具高硅(SiO₂平均含量71.57%)、高钾(K₂O平均含量5.25%)、且K₂O>Na₂O(平均含量2.61),低TiO₂、FeO、MgO,高分异指数,A/CNK平均值1.23,属高钾钙碱性过铝质花岗岩;稀土总量高(平均值308.21×10⁻⁶),LREE/HREE平均为3.67,轻、重稀土分馏程度强烈;δEu均值为0.49,显示中等Eu负异常;富集大离子亲石元素K、Rb、Pb、Nd,相对亏损Sr、Ba;富集高场强元素Th、U,相对亏损Nb、Ce;显示S型花岗岩的特征。

(4)宣和岩体Sr同位素初始比值为0.71291~0.71399,显示其物质来源于地壳;ε_{Nd}(t)值变化于-9.1~-13.4,对应的二阶段Nd模式年龄为1.91~2.27 Ga,暗示这些花岗岩主要由物质组分由与麻源群变质岩相当的地壳物质部分熔融形成的。形成的构造背景为板内造山环境,制约成岩的主导机制是压扭应力下的板内造山作用。

注释

- ① 福建省地质调查研究院.2002.江西1:25万瑞金市幅区域地质调查报告[R].
- ② 福建省地质调查研究院.2013.福建1:5万新泉等四幅区域地质调查报告[R].
- ③ 福建省地质调查研究院.2016.福建1:5万隔川等四幅区域地质矿产调查报告[R].
- ④ 福建省地质调查研究院.2018.福建1:5万二十八都等两幅区域地质调查报告[R].
- ⑤ 浙江省地质调查院.2015.江山-绍兴拼合带地质构造研究成果报告[R].
- ⑥ 福建省地质调查研究院.2017.福建1:5万建瓯等四幅区域地质调查报告[R].

References

- Batchelor R A, Bowden P. 1985. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters[J]. *Chemical Geology*, 48(1/4): 43-55.
- Chappell B W, White A J R. 1974. Two contrasting granite types[J]. *Pacific Geology*, (8): 173-184.
- Charvet J, Shu Liangshu, Shi Yangshen, Guo Lingzhi, Faure M. 1996.

- The building of South China: Collision of Yangtzi and Cathaysia blocks, problems and tentative answers[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 13(3/5): 223–235.
- Chen Chenghong, Hsieh PeiShan, Wang Kuolung, Yang Huaijen, Lin Wayne, Liang Yuhuan, Lee Chiyu, Yang Hsiaochia. 2010. Zircon LA- ICPMS U- Pb ages and Hf isotopes of Huayu (Penghu Islands) volcanics in the Taiwan Strait and tectonic implication[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 37(1):17–30.
- Chen Chenghong, Lee Chiyu, Hsieh Peishan, Zeng Wen, Zhou Hanwen.2008. Approaching the age problem for some metamorphosed precambrian basement rocks and phanerozoic granitic bodies in the Wuyishan area: The application of EMP monazite Age Dating[J]. *Geological Journal of China Universities*, 14(1): 1–15(in Chinese with English abstract).
- Chen Jiangfeng, Guo Xinsheng, Tang Jiafu, Zhou Taixi. 1999. Nd isotopic model ages: Implications of the growth of the continental crust of southeastern China[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 35(6): 649– 658(in Chinese with English abstract).
- Den Fangling. 1987. Isotopic geochronology of the southern Zhuguangshan granite batholith[J]. *Geochimica*, 16(2): 141–153.
- Dong Xuefa, Yu Shengqiang, Tang Zengcai, Xiao Qinghui, Yuan Qiang, Chen Zhongda, Zhou Zongyao, Wu Xiaoyong. 2016. Geochemical characteristics of the intra- oceanic arc type metabasic- volcanics in Chencai accretion complex of Zhejiang Province and their geological significance[J]. *Geology in China*, 43 (3): 817–828(in Chinese with English abstract).
- Guo Aimin, Chen Bihe, Chen Jianfeng, Zhou Chao, Si Chengshang, Zheng Zhengfu. 2017. Zircon SHRIMP U- Pb geochronology of granitoids from northern Zhuguangshan granitic composite batholith, Hunan Province[J]. *Geology in China*, 44(4): 781– 792 (in Chinese with English abstract).
- Guo Lingzhi, Shi Yangshen, Lu Huaifu, Ma Ruishi, Dong Huogen, Yang Shufen.1989. The pre- Devonian tectonic patterns and evolution of South China[J]. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 3: 87–93.
- Hildreth W, Halliday A N, Christiansen R L. 1991. Isotopic and Chemical Evidence Concerning the Genesis and Contamination of Basaltic and Rhyolitic Magma Beneath the Yellowstone Plateau Volcanic Field[J]. *J. Petrology*, 32(1):63–138.
- Hu Yanhua, Gu Mingguang, Xu yan, Yu Shengqiang, Wang Jiaen, He Yue. 2011. The confirmation of the age of caledonian Chencai group in Zhuji area of Zhejiang Province and its geological significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 30(11):1661– 1670 (in Chinese with English abstract).
- Hu Yanhua, Qian Junfeng, Zhu Xianyao, Xu Yan, Li Jianfeng. 2012. The overview and origin analysis for the caledonian movement in the south China block[J]. *Bulletin of Science and Technology*, 28 (11):42–48,71(in Chinese with English abstract).
- Hua Renmin, Zhang Wenlan, Chen Peirong, Zhai Wei, LI Guanglai. 2013. Relationship between caledonian granitoids and large- scale mineralization in south China[J]. *Geological Journal of China Universities*, 19(1): 1–11(in Chinese with English abstract).
- Huang Guicheng, Wang Xiongwu, Yang Shiyi, Chen Longqing, Ling Jingsheng. 2000. Zircon U- Pb age and their geologic implication of porphyroid in west of Guangdong Province[J]. *Geology- geochemistry*, 28(4) : 48–53(in Chinese with English abstract).
- Jacques Charvet, Shu Liangshu, Michel Faure, Flavien Choulet, Wang Bo, Lu Huaifu , Nicole Lee Breton. 2010. Structural development of the Lower Paleozoic belt of South China: Genesis of an intracontinental orogen[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 39(4): 309–330.
- Jia Xiaohui, Wang Qiang, Tang Gongjian. 2009. A- type granites: research progress and implications[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 33(3) : 465–480(in Chinese with English abstract).
- Jiang Ting. 2014. Chronology and Geochemistry of Weipu, Hufang, Guiyantou and Gutian Plutons in the Southwestern Fujian Province[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 16–44(in Chinese with English abstract).
- Li Wenjie, Liang Jincheng, Feng Zuohai, Zhang Guilin, Cjem Maohong, Yuan Aiping. 2006. Judging for characteristics of geochemical and structural environment of several caledonian granitoids in northeast Guangxi[J]. *Mineral Resources and Geology*, 20(4):353–360(in Chinese with English abstract).
- Li Xianhua, Li Wuxian, Li Zhengxiang, Lo Chinghua, Wang Jian, Ye Meifan, Yang Yueheng. 2009. Amalgamation between the Yangtze and Cathaysia Blocks in South China: Constraints from SHRIMP U- Pb zircon ages, geochemistry and Nd- Hf isotopes of the Shuangxiwu volcanic rocks[J]. *Precambrian Research*, 174(1/2): 117–128.
- Li Xiaofeng, Feng Zuohai, Li Rongsen, Tang Zhuanhong, Qu Wenjun, Li Junzhao. 2009. Silurian Mo mineral ization at Baishiding molybdenum deposit in northern Guangxi: Constraints from zircon SHRIMP U- Pb and molybdenite Re- Os ages[J]. *Mineral Deposits*, 28(4):403–412(in Chinese with English abstract).
- Li Zhen. 2011. Petrogenesis of Palaeozoic- Mesozoic Granitoids and Related Rocks in Fujian: Implications For Tectono- Magmatic Evolution and Crust- Mantle Interaction[D]. Nanjing: Nanjing University, 89–111.
- Ling Hongfei, Shen Weizhou, Huang Xiaolong. 1999. Nd and Sr isotopic compositions of granitoids of Fujian and their significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 15(2): 255– 262(in Chinese with English abstract).
- Liu Rui, Zhou Hanwen, Zhong Zengqiu, Zeng Wen, Xiang Hua, Jin Song, Lu Xinqian, Li Chunzhong. 2008. Petrogenesis of the caledonian migmatites and related granites in northwestern Fujian Province, south China: Syn- deformational crustal anatexis[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(6):1205– 1222(in Chinese with English abstract).

- abstract).
- Lou Fasheng, Shen Weizhou, Wang Dezi, Shu Liangshu, Wu Fujiang, Zhang Fangrong, Yu Jinhai. 2005. Zircon U–Pb isotopic chronology of the Wugongshan dome comopund granite in Jiangxi Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 79(5):636–644(in Chinese with English abstract).
- Maniar P D, Piccoli P M. 1985. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635–643.
- Mao Jianren, Zeng Qingtao, Li Zilong, Hu Qing, Zhao Xilin, Ye Haimin. 2008. Precise dating and geological significance of the Caledonian Shangyou pluton in south Jiangxi Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(2): 399–409.
- Middlemost E A K. 1985. *Magma and Magmatic Rocks*[M]. London: Longman.1–266
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 25(4): 956–983.
- Peccherillo R, Taylor S R. 1976. Geochemistry of eocene calc–alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 58(1): 63–81.
- Peng Songbai, Jin Zhenmin, Liu Yunhua, Fu Jianming, He Longqing, Cai Minghai, Wang Yanbin. 2006. Petrochemistry, chronology and tectonic setting of strong peraluminous anatectic garnitoids in Yunkai orogenic belt, western Guangdong Province, China[J]. 2006. *Earth Science–Journal of China University of Geosciences*, 31(1): 110–120(in Chinese with English abstract).
- Qiu Jiansheng, Xiao E, Hu Jian, Xu Xisheng, Jiang Shaoyong, Li Zhen. 2008. Petrogenesis of highly fractionated I–type graintes in the coastal area of northeastern Fujian Porvince: Constraints from zircon U–Pb geochronology, geochemistry and Nd–Hf isotopes[J]. *Acta Geologica Sinica*, 24(11):2468–2484(in Chinese with English abstract).
- Qiu Yuanxi, Ma Wenpu, Fan Xiaolin, Zhang Yuchang, Deng Jiarui, Xia Lianghui, Zhang Xuliang. 1996. Tectonic nature and tectonic evolution of the “Xuefeng Oldland” in the caledonian stage[J]. *Regional Geology of China*, 15(2):150–160(in Chinese with English abstract).
- Qiu Yuanxi, Zhang Yichang, Ma Wenpu. 1998. Tectonics and geological evolution of Xuefeng intra–continental orogene South China[J]. *Geological Journal of China Universities*, 4(4):73–84(in Chinese with English abstract).
- Setsuya Nakada, Masaki Takahashi. 1979. Regional variation in chemistry of the Miocene intermediate to felsic magmas in the Outer Zone and the Setouchi Province of Southwest Japan[J]. *The Geological Society of Japan*, 85(9):571–582.
- Shen Weizhou, Ling Hongfei, Li Wuxian, Huang Xiaolong, Wang Dezi. 1999. Study on the Nd–Sr isotopic compositions of granitoids in SE China[J]. *Geological Journal of China Universities*, 5(1):22–32(in Chinese with English abstract).
- Shen Weizhou, Zhang Fangrong, Shu Liangshu, Wang Lijuan, Xiang Lei. 2008. Formaiton age, geochemical characterisitics of the Ninggang granite body in Jiangxi Povince and its tectonic signiflcance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 24(10): 2244–2254(in Chinese with English abstract).
- Shu Liangshu, Lu Huafu, Jia Dong, Charvet Jacques, Faure Michel. 1999. Study of the $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ isotopic age for the early paleozoic tectonothermal event in the Wuyishan region, south China. [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 35(6):668–674 (in Chinese with English abstract).
- Shu Liangshu, Yu Jinhai, Jia Dong, Wang Bo, Shen Weizhou, Zhang Yueqiao. 2008. Early paleozoic orogenic belt in the eastern segment of south China [J]. *Geological Bulletin of China*, 27(10): 1581–1593(in Chinese with English abstract).
- Shu Liangshu. 2006. Predevonian tectonic evolution of south China: from cathaysian block to caledonian period folded orogenic belt[J]. *Geological Journal of China Universities*, 12(4):418–431(in Chinese with English abstract).
- Sun S S, Mcdonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processe[J]. *Geological Society Special Publication*, 42(1): 313–345.
- Sun Tao. 2006. A new map showing the distribution of granites in south China and its explanatory notes [J]. *Geological Bulletin of China*, 25(3): 332–335(in Chinese with English abstract).
- Wang Dezi. 2004. The study of granitic rocks in south China: looking back and forward [J]. *Geological Journal of China Universities*, 10(3): 305–314.
- Wang Jianghai, Sun Dazhong, Chang Xiangyang, Deng Shangxian, Zhang Hu, Zhou Hanwen. 1998. U–Pb dating of the Napeng granite at the NW margin of the Yukai block, Guangdong, south China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 18(2):130–134(in Chinese with English abstract).
- Wang Jianguo, Yu Shengqiang, Hu Yanhua, Zhao Xudong, Wu Ming, Gu Mingguang. 2014. The discovery, petrology and geochronology of the retrograde eclogite in Jiangshan–Shaoxing suture zone[J]. *Geology in China*, 41(4):1356–1363(in Chinese with English abstract).
- Wang Xueqiu, Xie Xuejing, Zhang Benren, Zhang Qin, CHI Qinghua, Hou Qingye, Xu Shanfa, Nie Lanshi, Zhang Bimin. 2010. China geochemical probe: Making ” Geochemical Earth” [J]. *Acta Geologica Sinica*, 84(6):854–864(in Chinese with English abstract).
- Wang Yixian, Zhao Zhenhua, Bao Zhiwei, Li Xianhua. 1997. Geochemistry of granitoids from Zhejiang Province and crustal evolution—I. phanerozoic granitoids[J]. *Geochimica*, 26(5):1–16 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yuejun, Fan Weiming, Zhao Guochun, Ji Shaocheng, Peng Touping. 2007. Zircon U–Pb geochronology of gneissic rocks in

- the Yunkai massif and its implications on the Caledonian event in the South China Block[J]. *Gondwana Research*, 12(4):404-416.
- Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. 1987. A-Type granites-geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 95(4): 407-419.
- Wu Fujiang, Zhang Fangrong. 2003. Features and genesis of Caledonian granites in the Wugongshan in the eastern segment of the northern margin of south China plate[J]. *Geology in China*, 30(2): 166-173(in Chinese with English abstract).
- Xie Mingming, Feng Guosheng, Liu Yihui. 2000. Geologic features and mechanism of emplacement of Fufang granite in Guangchang[J]. *Jiangxi Geology*, 14(1):21- 27(in Chinese with English abstract).
- Xie Zhendong, Yang Yongge. 2000. Isotopic age of zircon in Anxi pluton of Xinfeng, Jiangxi, and ITS geological implications [J]. *Jiangxi Geology*, 14(3):172-176(in Chinese with English abstract).
- Xiong Shengqing, Yang Hai, Ding Yanyun, Li Zhankui. 2018. Subdivision of tectonic units in China based on aeromagnetic data[J]. *Geology in China*, 45(4): 658- 680(in Chinese with English abstract).
- Xu Deru, Chen Guanghao, Xia Bin, Li Pengchun, He Zhuanli. 2006. The caledonian adakite-like granodiorites in Banshanpu area, eastern Hunan Province, south China: petrogenesis and geological significance [J]. *Geological Journal of China Universities*, 12(4): 507-521(in Chinese with English abstract).
- Xu Xianbing, Zhang Yueqiao, Shu Liangshu, Jia Dong, Wang Ruirui, Xu Huaizhi. 2009. Zircon LA-ICPMS U-Pb dating of the Weipu granitic pluton in southwest Fujian and the Changpu migmatite in South Jiangxi: constrains to the Timing of caledonian movement in Wuyi mountains [J]. *Geological Review*, 55(2):277- 285(in Chinese with English abstract).
- Yang Dongsheng, Li Xianhua, Li Wuxian, Liang Xinquan, Long Wenguo, Xiong Xiaolin. 2010. U- Pb and 40Ar- 39Ar geochronology of the Baiyunshan gneiss(centralGuangdong, south China): Constraints on the timing of early Palaeozoicand Mesozoic tectonothermal events in the Wuyun(Wuyi- Yunkai) Orogen[J]. *Geological Magazine*, 147(4): 481-496.
- Yu Xinqi, Wu Ganguo, Zhao Xixi, Zhang Da, Di Yongjun, Qiu Junting, Dai Yanpei, Li Chunlin. 2012. New geochronological data from the Paleozoic and Mesozoic nappe structures, igneous rocks, and molybdenite in the North Wuyi area, Southeast China[J]. *Gondwana Research*, 22(2):519-533.
- Yuan Honglin, Gao Shan, Liu Xiaoming, Li Huiming, Detlef Gunther, Wu Fuyuan. 2004. Accurate U- Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation- inductively coupled plasma- mass spectrometry[J]. *Geostandards Geoanalytical Res.*, 28(3): 353-370.
- Yuan zhengxin, Zhong Guofang, Xie Yunbao, Yu Jinneng. 1997. A new recognition on spacio- temporal characteristics of the caledonian orogeny happened in south China [J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 13(4):19- 25(in Chinese with English abstract).
- Zeng Yong , Yang Minggui. 1999. Central Jiangxi collision melange zone[J]. *Regional Geology of China*, 18(1): 17-23(in Chinese with English abstract).
- Zhang Aimei, Wang Yuejun, Fan Weiming, Zhang Feifei, Zhang Yuzhi. 2010. LA- ICPMS zircon U- Pb geochronology and Hf isotopic compositions of caledonian granites from the Qingliu area, southwest Fujian [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 34(3):408-418 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Fangrong, Shu Liangshu, Wang Dezi, Yu Jinhai, Shen Weizhou. 2009. Discussions on the tectonic setting of caledonian granitoids in the eastern segment of south China [J]. *Earth Science Frontiers*, 16(1): 248-260(in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Ran Hao, Li Chengdong. 2012. A- type granite: what is the essence? [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31(4):621-626.
- Zhou Jian, Xu Shanfa, Chi Qinghua, Chen Enke, Zhang Bimin, Wang Wei. 2012. Geochemical characteristics of the mesozoic volcanic belt in southeast coast of China [J]. *Earth Science Frontiers*, 19(3): 93-100(in Chinese with English abstract).
- Zhou Xinmin. 2003. My thinking about granite geneses of south China [J]. *Geological Journal of China Universities*, 9(4): 556-565.
- Zhu Qingbo, Huang Wencheng, Meng Qingxiu, Zhang Chuanlin. 2015. Caledonian tectonic event of cathaysia block: Constraints on zircon U - Pb geochronology and Lu - Hf isotope for two kinds of granite [J]. *Geology in China*, 42(6): 1715- 1739(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 曾勇,杨明桂. 1999. 赣中碰撞混杂岩带[J]. *中国区域地质*, 18(1): 17-23.
- 陈江峰, 郭新生, 汤加富, 周泰禧. 1999. 中国东南地壳增长与Nd同位素模式年龄[J]. *南京大学学报(自然科学版)*, 35(6): 649-658.
- 陈正宏, 李寄岷, 谢佩珊, 曾雯, 周汉文. 2008. 利用EMP独居石定年法探讨浙闽武夷山地区变质基底岩石与花岗岩的年龄[J]. *高校地质学报*, 14(1): 1-15.
- 邓访陵. 1987. 诸广山花岗岩复式岩基南部的同位素地质年代学[J]. *地球化学杂志*, 16(2): 141-153.
- 董学发, 余盛强, 唐增才, 肖庆辉, 袁强, 陈忠大, 周宗尧, 吴小勇. 2016. 浙江“陈蔡增生杂岩”中洋内弧型变基性火山岩的地球化学特征及其地质意义[J]. *中国地质*. 43(3):817-828.
- 郭爱民, 陈必河, 陈剑锋, 周超, 司程山, 郑正福. 2017. 南岭诸广山北体复式花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及多期岩浆活动[J]. *中国地质*, 44(4): 781-792.
- 胡艳华, 顾明光, 徐岩, 余盛强, 王加恩, 贺跃. 2011. 浙江诸暨地区陈蔡群加里东期变质年龄的确认及其地质意义[J]. *地质通报*, 30(11):1661-1670.
- 胡艳华, 钱俊锋, 褚先尧, 徐岩, 顾明光, 李建峰. 2012. 华南加里东运

- 动研究综述及其性质初探[J]. 科技通报, 28(11):42-48,71.
- 华仁民, 张文兰, 陈培荣, 翟伟, 李光来. 2013. 初论华南加里东花岗岩与大规模成矿作用的关系[J]. 高校地质学报, 19(1): 1-11.
- 黄圭成, 汪雄武, 扬世义, 陈龙清, 凌井生. 2000. 粤西残斑岩的锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地球与环境, 28(4): 48-53.
- 贾小辉, 王强, 唐功建. 2009. A 型花岗岩的研究进展及意义[J]. 大地构造与成矿学, 33(3): 465-480.
- 蒋婷. 2014. 闽西南地区玮埔、胡坊、桂岩头和古田岩体花岗岩年代学和地球化学[D]. 北京:中国地质大学(北京), 16-44.
- 李文杰, 梁金城, 冯佐海, 张桂林, 陈懋弘, 袁爱平. 2006. 桂东北地区几个加里东期花岗岩体的地球化学特征及其构造环境判别[J]. 矿产与地质, 20(4):353-360.
- 李晓峰, 冯佐海, 李容森, 唐专红, 屈文俊, 李军朝. 2009. 华南志留纪铀的矿化:白石顶铀矿锆石 SHRIMP U-Pb 年龄和辉钼矿 Re-Os 年龄证据[J]. 矿床地质, 28(4):403-412.
- 李真. 2011. 福建古生代—中生代花岗岩及相关岩石成因研究:对构造—岩浆演化与壳幔相互作用的启示[D]. 南京:南京大学, 89-111.
- 凌洪飞, 沈渭洲, 黄小龙. 1999. 福建省花岗岩类 Nd-Sr 同位素特征及其意义[J]. 岩石学报, 15(2): 255-262.
- 刘锐, 张利, 周汉文, 钟增球, 曾雯, 向华, 靳松, 吕新前, 李春忠. 2008. 闽西北加里东期混合岩及花岗岩的成因:同变形地壳深熔作用[J]. 岩石学报, 24(6):1205-1222.
- 楼法生, 沈渭洲, 王德滋, 舒良树, 吴富江, 张芳荣等. 2005. 江西武功山穹隆复式花岗岩的锆石 U-Pb 年代学研究[J]. 地质学报, 79(5): 636-644.
- 彭松柏, 金振民, 刘云华, 付建明, 何龙清, 蔡明海等. 2006. 云开造山带强过铝深熔花岗岩地球化学、年代学及构造背景[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 31(1):110-120.
- 丘元禧, 马文璞. 1996. “雪峰古陆”加里东期的构造性质和构造演化[J]. 中国区域地质, 15(2):150-160.
- 丘元禧, 张渝昌, 马文璞. 1998. 雪峰山陆内造山带的构造特征与演化[J]. 高校地质学报, 4(4):73-84.
- 邱检生, 肖娥, 胡建, 徐夕生, 蒋少涌, 李真. 2008. 福建北东沿海高分异 I 型花岗岩的成因: 锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Nd-Hf 同位素制约 [J]. 岩石学报, 24(11):2468-2484.
- 沈渭洲, 凌洪飞, 李武显, 黄小龙, 王德滋. 1999. 中国东南部花岗岩类 Nd-Sr 同位素研究[J]. 高校地质学报, 5(1):22-32.
- 沈渭洲, 张芳荣, 舒良树, 王丽娟, 向磊. 2008. 江西宁冈岩体的形成时代、地球化学特征及其构造意义[J]. 岩石学报, 24(10): 2244-2254.
- 舒良树, 卢华复, 贾东, 夏菲, 福赫. 1999. 华南武夷山早古生代构造事件的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素年龄研究[J]. 南京大学学报(自然科学版), 35(6):668-674.
- 舒良树, 于津海, 贾东, 王博, 沈渭洲, 张岳桥. 2008. 华南东段早古生代造山带研究[J]. 地质通报, 27(10): 1581-1593.
- 舒良树. 2006. 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, 12(4):418-431.
- 孙涛. 2006. 新编华南花岗岩分布图及其说明书[J]. 地质通报, 25(3): 332-335.
- 汪建国, 余盛强, 胡艳华, 赵旭东, 吴鸣, 顾明光. 2014. 江山—绍兴结合带榴闪岩的发现及岩石学、年代学特征[J]. 中国地质, 41(4): 1356-1363.
- 王德滋. 2004. 华南花岗岩研究的回顾与展望[J]. 高校地质学报, 10(3): 305-314.
- 王江海, 孙大中, 常向阳, 邓尚贤, 张湖, 周汉文. 1998. 云开地块西北缘那蓬岩体的锆石 U-Pb 年龄[J]. 矿物学报, 18(2):130-134.
- 王学求, 谢学锦, 张本仁, 张勤, 迟清华, 侯青叶, 徐善法, 聂兰仕, 张必敏. 2010. 地壳全元素探测——构建“化学地球”[J]. 地质学报, 84(6):854-864.
- 王一先, 赵振华, 包志伟, 李献华. 1997. 浙江花岗岩类地球化学与地壳演化——I. 显生宙花岗岩类[J]. 地球化学杂志, 26(5):1-16.
- 吴富江, 张芳荣. 2003. 华南板块北缘东段武功山加里东期花岗岩特征及成因探讨[J]. 中国地质, 30(2): 166-173.
- 谢明明, 冯国胜, 刘益辉. 2000. 广昌付坊花岗岩地质特征及侵位机制[J]. 江西地质, 14(1):21-27.
- 谢振东, 杨永革. 2000. 江西信丰安西岩体同位素年龄及其地质意义[J]. 江西地质, 14(3):172-176.
- 熊盛青, 杨海, 丁燕云, 李占奎. 2018. 中国航磁大地构造单元划分[J]. 中国地质, 45(4): 658-680.
- 徐先兵, 张岳桥, 舒良树, 贾东, 王瑞瑞, 许怀智. 2009. 闽西南玮埔岩体和赣南昌浦混合岩锆石 LA-ICPMS U-Pb 年代学:对武夷山加里东运动时代的制约[J]. 地质评论, 55(2):277-285.
- 许德如, 陈广浩, 夏斌, 李鹏春, 贺转利. 2006. 湘东地区板杉铺加里东期埃达克质花岗岩闪长岩的成因及地质意义[J]. 高校地质学报, 12(4): 507-521.
- 袁正新, 钟国芳, 谢岩豹, 余纪能. 1997. 华南地区加里东期造山运动时空分布的新认识[J]. 华南地质与矿产, 13(4):19-25.
- 张爱梅, 王岳军, 范蔚茗, 张菲菲, 张玉芝. 2010. 闽西南清流地区加里东期花岗岩锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素组成研究[J]. 大地构造与成矿学, 34(3):408-418.
- 张芳荣, 舒良树, 王德滋, 于津海, 沈渭洲. 2009. 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, 16(1): 248-260.
- 张旗, 冉皞, 李承东. 2012. A 型花岗岩的实质是什么?[J]. 岩石矿物学杂志, 31(4):621-626.
- 周建, 徐善法, 迟清华, 陈恩科, 张必敏, 王玮. 2012. 东南沿海中生代火山岩带地球化学特征[J]. 地学前缘, 19(3): 93-100.
- 周新民. 2003. 对华南花岗岩研究的若干思考[J]. 高校地质学报, 9(4): 556-565.
- 朱清波, 黄文成, 孟庆秀, 张传林. 2015. 华夏地块加里东期构造事件: 两类花岗岩的锆石 U-Pb 年代学和 Lu-Hf 同位素制约[J]. 中国地质, 42(6): 1715-1739.