

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.193>



# 粤西北印支期太保岩体的锆石 U-Pb 年代学、地球化学及岩石成因

李 响<sup>1,2</sup>, 王令占<sup>1,2</sup>, 涂 兵<sup>1,2</sup>, 田 洋<sup>1,2</sup>, 谢国刚<sup>1</sup>, 张健钰<sup>1</sup>, 张宗言<sup>1</sup>

1. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 湖北武汉 430205

2. 中国地质调查局花岗岩成岩成矿研究中心, 湖北武汉 430205

**摘要:** 华南早中生代构造—岩浆演化还存在不同的争议。以广东西北部连山地区晚三叠世含暗色微粒包体(MMEs)的太保岩体为研究对象, 进行了岩石学、锆石U-Pb年代学、地球化学和Sr-Nd-Hf同位素组成研究。4个花岗岩样品的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄分别为 $219.8 \pm 1.8$  Ma、 $220.5 \pm 1.0$  Ma、 $221.5 \pm 1.7$  Ma和 $220.2 \pm 1.1$  Ma, 为印支晚期岩浆作用的产物。地球化学分析显示, 寄主花岗岩为高钾钙碱性花岗岩, 低硅、高碱, 铝饱和指数A/CNK值为0.79~1.16。包体 $\text{SiO}_2$ 含量为55.13%~62.56%, 铁、镁含量明显高于寄主花岗岩,  $\text{MgO}$ 和 $\text{FeO}^\text{T}$ 含量分别为2.31%~4.60%和5.53%~6.63%。包体与寄主花岗岩均富集轻稀土, 并表现出显著的Ba、Sr、Ti负异常。寄主花岗岩和包体均具有较高的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值( $-3.42 \sim -2.60$ 和 $-0.90 \sim -0.52$ )和较小的二阶段Nd模式年龄( $T_{\text{DM2}}$ 分别为 $1.30 \sim 1.35$  Ga、 $1.10 \sim 1.13$  Ga)。寄主花岗岩具有较宽泛的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值( $-2.6 \sim +4.3$ , 平均值为+0.7)和两阶段Hf模式年龄(0.95~1.39 Ga)变化范围, 指示太保岩体形成于中元古代下地壳变基性岩物质的熔融, 并与亏损地幔物质发生岩浆混合作用。基于以上数据, 笔者认为太保岩体是印支晚期伸展条件下亏损地幔和下地壳物质混合的产物。结合近年来报道的邻近区域的基性岩浆活动, 认为华南古特提斯构造域向古太平洋构造域的转换可能开始于晚三叠世(233 Ma)。

**关键词:** 太保岩体; 闪长质包体; 年代学; Sr-Nd-Hf同位素; 中生代构造转换; 华南板块。

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2021)04-1199-13

收稿日期: 2020-05-13

## Zircon Geochronology, Geochemistry and Petrogenesis of the Taibao Pluton in Northwest Guangdong Province

Li Xiang<sup>1,2</sup>, Wang Lingzhan<sup>1,2</sup>, Tu Bing<sup>1,2</sup>, Tian Yang<sup>1,2</sup>, Xie Guogang<sup>1</sup>, Zhang Jianyu<sup>1</sup>, Zhang Zongyan<sup>1</sup>

1. Wuhan Center of China Geological Survey, Wuhan 430205, China

2. Research Center for Petrogenesis and Mineralization of Granitoids Rocks, China Geological Survey, Wuhan 430205, China

**Abstract:** The tectono-magmatic evolution of the South China block during Early Mesozoic remains controversial. In this paper, it conducts the comprehensive study of petrology, zircon U-Pb geochronology, whole-rock element and Sr-Nd-Hf isotopic geochemistry for Late Triassic Taibao pluton with mafic microgranular enclaves (MMEs) in the Lianshan area, located in the northwest Guangdong Province. LA-ICP-MS U-Pb zircon analysis yielded  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  weighted mean ages of  $219.8 \pm 1.8$  Ma,  $220.5 \pm 1.0$  Ma,  $221.5 \pm 1.7$  Ma and  $220.2 \pm 1.1$  Ma for four granite samples respectively, indicating that the pluton was formed during the Late Indosinian period. The host rocks are high K calc-alkaline granite, with lower  $\text{SiO}_2$ , higher total alkalis and A/CNK values ranging in 0.79~1.16. The mafic microgranular enclaves show lower  $\text{SiO}_2$ , higher  $\text{FeO}$ ,  $\text{MgO}$  with contents of

基金项目: 中国地质调查局项目(Nos.12120113063200, DD20201121)。

作者简介: 李响(1983—), 男, 副研究员, 从事成因矿物学、岩石地球化学研究。ORCID: 0000-0001-5874-2056. E-mail: lixiang\_503@163.com

引用格式: 李响, 王令占, 涂兵, 等, 2021. 粤西北印支期太保岩体的锆石U-Pb年代学、地球化学及岩石成因. 地球科学, 46(4):1199~1216.

55.13%–62.56%, 2.31%–4.60% and 5.53%–6.63%, respectively. Both of them show enrichment in light rare earth elements, and depletion in Ba, Sr, and Ti. They have relatively low  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  values (−3.42 to −2.60 and −0.90 to −0.52) and younger Nd model ages ( $T_{\text{DM2}} = 1.30$ –1.35 Ga and 1.10–1.13 Ga, respectively). Zircon  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  values of the host rocks are scattered (−2.6 – +4.3, with average value of +0.7) and the corresponding two-stage model ages are 0.95–1.39 Ga. The results suggest that the Taibao host granodioritic rocks and the MMEs were likely produced by mixing of depleted mantle and lower crust-derived magmas, under the post-orogenic (Indosinian) extensional tectonic setting. These results, considered with the coetaneous basic magmatic activities in the adjacent area, indicate that the transition from the Paleo-Tethys to the Paleo-Pacific tectonic regimes of the South China block occurred during the Late Triassic (233 Ma).

**Key words:** Taibao pluton; mafic microgranular enclave; geochronology; Sr-Nd-Hf isotope; Mesozoic tectonic transition; South China block.

华南在中生代发生了大规模的、多期次花岗岩浆活动，并伴有大量的有色、稀有、稀土等金属矿床，长期以来都是国内外地质学家研究的热点区域（陈培荣等，2002；王德滋和周新民，2002；Zhou et al., 2006；李献华等，2007；蒋少涌等，2008；毛景文等，2008；Gao et al., 2017；程顺波等，2018；Wang et al., 2018a；李剑锋等，2020）。根据形成时代，这些花岗岩浆活动分别归属于早中生代印支期（ $T_1$ – $T_3$ , 251~205 Ma）和晚中生代燕山期（ $J_2$ – $K_2$ , 180~66 Ma）（Zhou et al., 2006）。印支期和燕山期岩浆岩类型、构造样式、矿产类型均有较大差别（Zhou et al., 2006；张岳桥等，2009；Mao et al., 2013a；Wang et al., 2013a），结合华南广泛发育的中一晚三叠世地层之间的区域不整合（徐先兵等，2009；舒良树，2012），暗示华南在印支期和燕山期经历了不同的地球动力学过程。普遍认为华南在印支期受控于古特提斯洋的闭合（Zhou et al., 2006；张岳桥等，2009；张岳桥等，2009；Wang et al., 2018b），燕山期则与古太平洋板块的俯冲有关（Zhou and Li, 2000；Shu et al., 2009；Xu et al., 2016），但对于两大构造域转换的起始时间还存在不同的认识，如晚二叠世（Li and Li, 2007；Li et al., 2017；Shen et al., 2018）、晚三叠世（Wang et al., 2013a；Xu et al., 2016, 2019）以及晚侏罗世（舒良树等，2006；Zhou et al., 2006；张岳桥等，2009）。

华南早中生代印支期岩浆活动主要集中发育于三叠纪（Zhou et al., 2006；Li and Li, 2007；Mao et al., 2013b；Gao et al., 2017；Xu et al., 2019），在桂、湘、粤、海南和赣、闽、浙部分地区均有广泛发育，二叠纪岩浆活动则主要局限于海南岛（图 1a）。近年来陆续报道的少量正长岩（Wang et al., 2005；谢才富等，2005；Mao et al., 2013b）、辉绿（玢）岩（唐立梅等，2013；Wang et al., 2013b；刘勇等，2012；金

鑫镖等，2017；时毓等，2019）及少量的铁镁质包体（郭峰等，1997；Chen et al., 2007；Dai et al., 2008；Xu et al., 2014）极大地丰富了之前对印支期岩浆活动的类型和构造背景的认识。

本次报道的广东西北部的太保岩体是新发现的印支期花岗岩，发育铁镁质包体。该岩体位于前人划分的华南北北东向中生代高  $\epsilon_{\text{Nd}}$ 、低  $T_{\text{DM}}$  花岗岩带（图 1b）（Gilder et al., 1996；Zhou et al., 2006；蒋少涌等，2008；朱金初等，2008）。本文旨在通过高精度的锆石 U-Pb 定年、元素地球化学以及 Sr-Nd 同位素研究，探讨太保岩体的岩石成因、形成机制及动力学过程。结合前人资料，进一步揭示华南中生代构造演化的有关信息。

## 1 区域地质概况及岩体特征

华南板块由华夏陆块与扬子陆块在新元古代（~825 Ma）拼贴而成（Liu et al., 2015）。北界是秦岭一大别造山带，西南与青藏高原和印支板块相邻，在中生代时先后濒临现已消亡的东特提斯海和延续至今的古太平洋（Zhou et al., 2006）。研究区位于华南内陆南岭东西向花岗岩带西段，大地构造位置处于扬子陆块与华夏陆块的结合带附近。区内出露青白口纪至寒武纪的褶皱基底和泥盆纪、石炭纪以及白垩纪的沉积盖层（图 2）。区内经历了多期构造运动，其中尤以加里东运动最为强烈。加里东运动使区内青白口纪至寒武纪地层发生浅变质和紧闭褶皱作用，随后的泥盆纪地层呈角度不整合覆盖在前泥盆纪地层之上（Feng et al., 2011）。研究区内岩浆活动频繁，除形成太保岩体外，还有加里东期大宁岩体、永和岩体、燕山期禾洞岩体、连阳岩体等，这些岩体均侵位于青白口纪、南华纪、震旦纪和寒武纪的地层中。

太保岩体分布于广东省西北部的连山县，呈椭

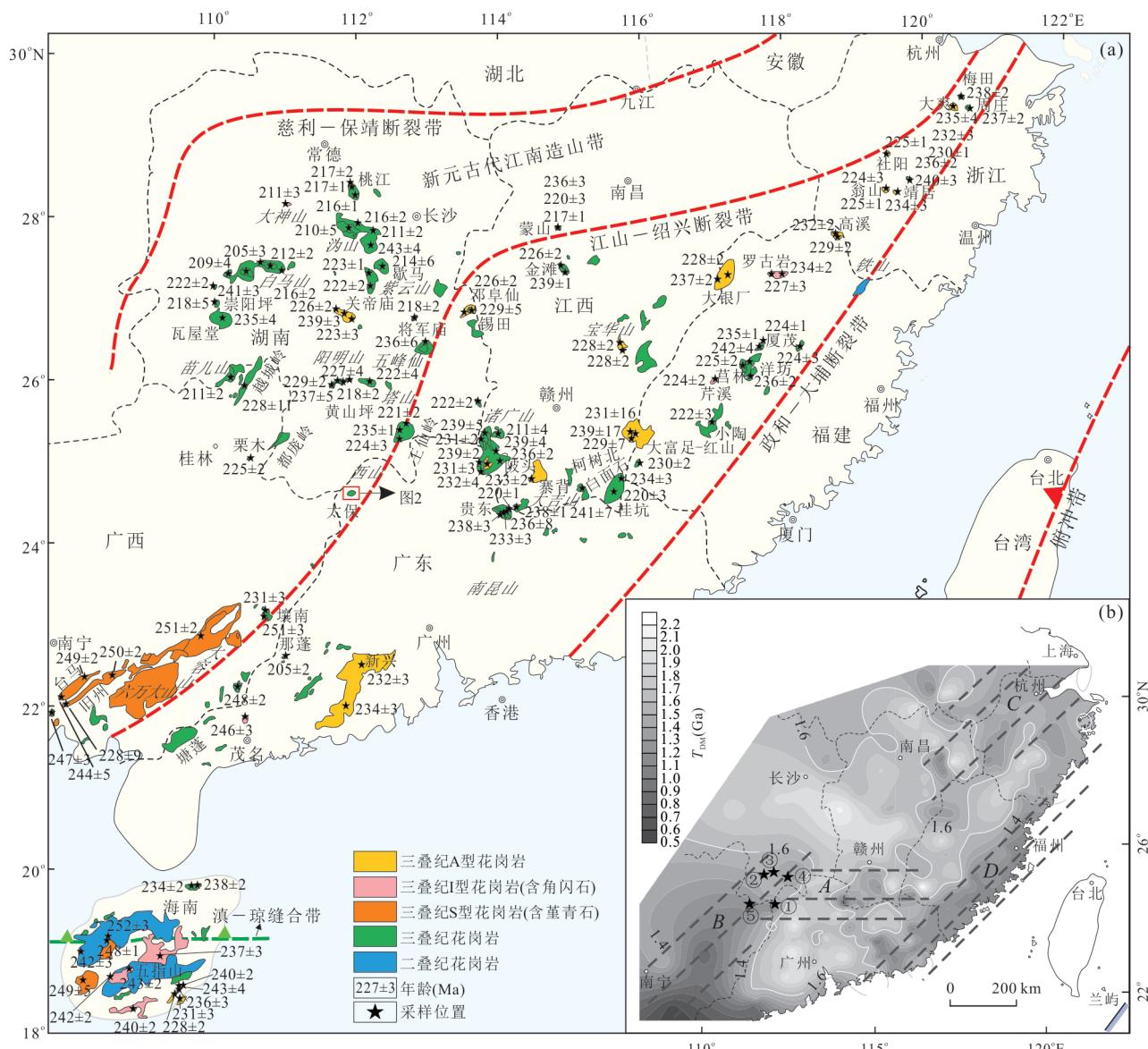


图1 华南早中生代花岗岩分布及太保岩体大地构造位置示意图

Fig.1 Sketch map showing the distribution of the Early Mesozoic granites and tectonic location of Taibao pluton in South China. Fig. b中,①太保岩体花岗岩(220~222 Ma),②道县虎子岩基性包体(220~223 Ma),③宁远保安坪碱性玄武岩(206~212 Ma),④宜章长城岭辉绿岩(227 Ma),⑤富川鲁洞辉绿玢岩(208 Ma);a. 华南早中生代花岗岩分布(修改自 Xu et al., 2019);b. 华南中生代花岗岩—火山岩Nd同位素模式年龄等值线图(修改自 Zhou et al., 2006),字母A、B、C、D分别代表4条低Nd模式年龄带

圆状出露于禾洞岩体的中心偏南位置,出露面积约 $125 \text{ km}^2$ 。据最新的区域地质调查成果(武汉地质调查中心,2016,广西1:5万富川县、涛圩、桂岭圩、太保圩幅区域地质矿产调查报告),太保岩体主体岩性为粗中粒、中细粒(斑状)二长花岗岩( $\gamma\gamma S_1$ )和粗中粒斑状花岗闪长岩( $\gamma\delta S_1$ )。粗中粒、中粒二长花岗岩分布于太保镇、相坪山一带,在与禾洞岩体的接触部位渐变为粗中粒、中粒斑状二长花岗岩。在水口至下百丈一带以及芦荻冲一带被禾洞岩体细中粒斑状花岗闪长岩呈岩株状侵入,外围其他地方则

被禾洞岩体中粗粒斑状二长花岗岩所围限。太保岩体粗中粒斑状花岗闪长岩与粗中粒斑状二长花岗岩为渐变过渡接触,富含钾长石斑晶(图3a),局部达25%以上,个别具斜长石环边(图3b)。岩体暗色微粒包体发育,成分为闪长质,含量1%~3%,大小一般为 $2 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ ,呈浑圆状、长条状及不规则状,与寄主岩呈突变或渐变接触,包体中常见捕获的来自寄主岩的钾长石斑晶,捕获斑晶排列方向与包体长轴方向一致(图3c,图3d)。

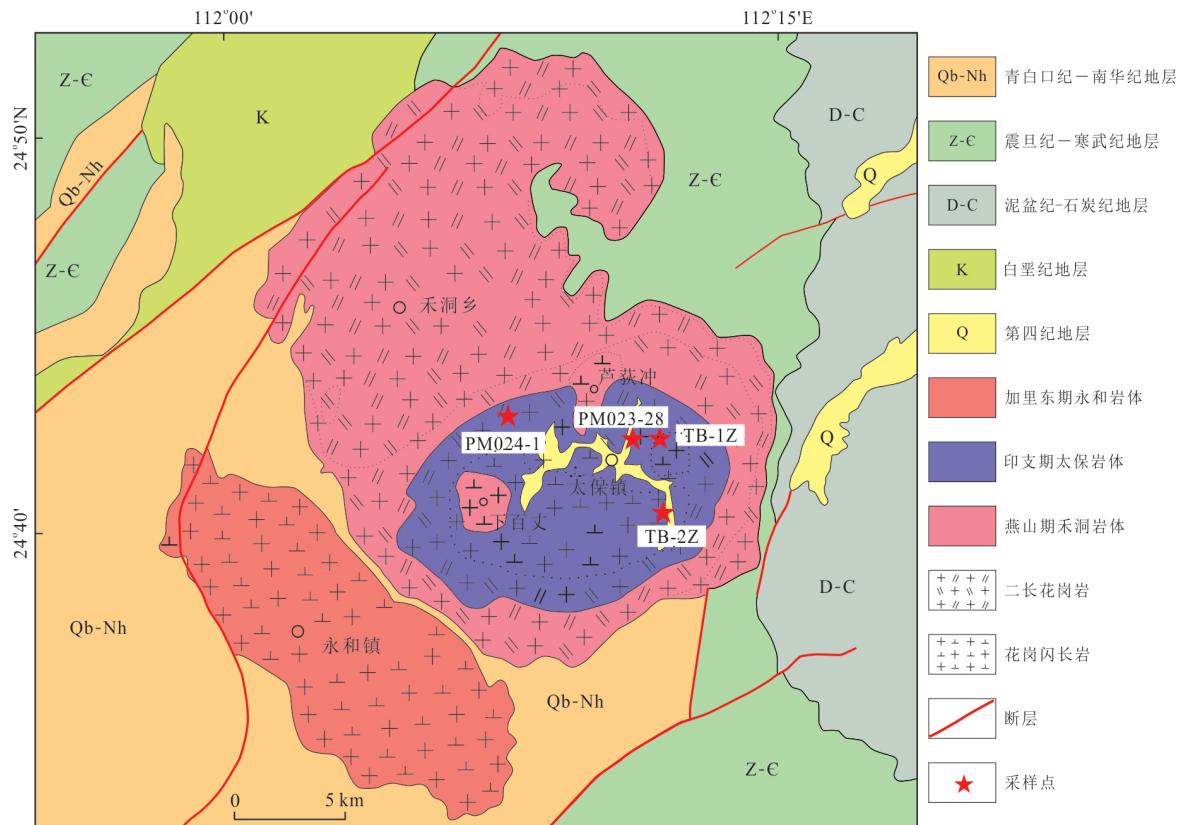


图 2 太保岩体地质简图

Fig.2 Geological sketch of Taibao pluton

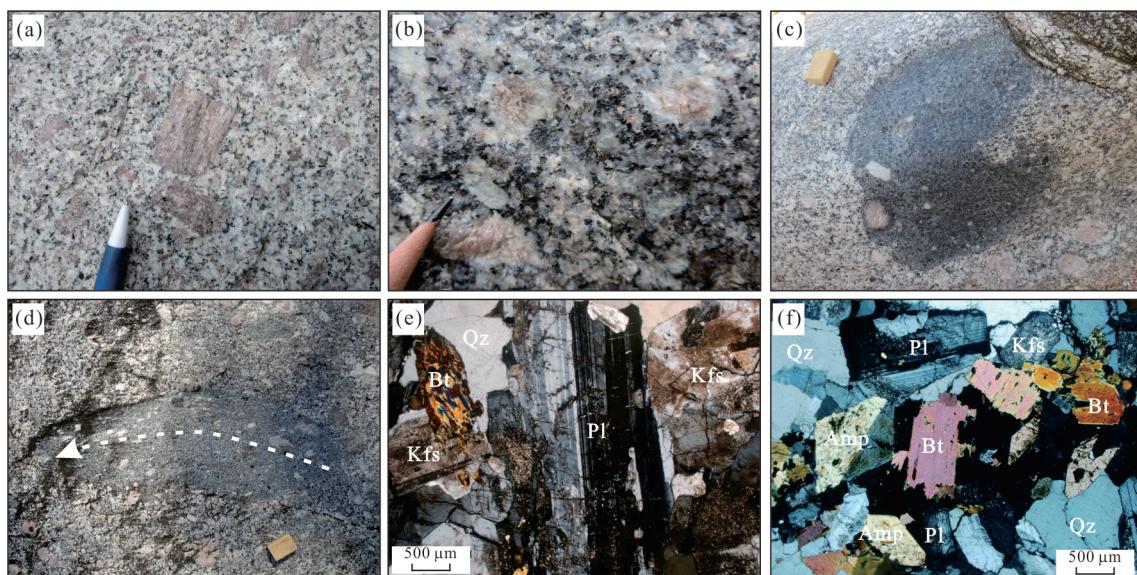


图 3 太保岩体野外和显微镜下典型照片

Fig.3 Representative field photos and micrographs of Taibao pluton

a. 中细粒斑状二长花岗岩野外露头,似斑状结构,斑晶为钾长石; b. 中粒斑状花岗闪长岩,偶见环斑;c,d. 暗色微粒包体,寄主岩为花岗闪长岩,包体中见捕获的寄主岩的钾长石斑晶,钾长石斑晶定向排列方向与包体长轴方向一致;e. 二长花岗岩镜下照片,斜长石绢云母化,黑云母绿泥石化(正交偏光);f. 花岗闪长岩镜下照片,角闪石见垂直C轴的菱形切面(正交偏光).矿物缩写:Qz.石英;Kfs.钾长石;Pl.斜长石;Bt.黑云母;Amp.角闪石

## 2 样品采集与分析方法

本次研究分别采集2个花岗闪长岩(TB-1Z、TB-2Z)和2个二长花岗岩样品(PM023-28、PM024-1)进行锆石U-Pb年龄测试,样品采集位置见图2.TB-1Z(112°12'42.5"E, 24°41'39.8"N)岩性为细中粒斑状花岗闪长岩,TB-2Z(112°12'24.1"E, 24°40'04.2"N)岩性为粗中粒斑状花岗闪长岩,分别采自国道G323旁的四米东和乡道682路边的新鲜露头.PM023-28(112°12'17.1"E, 24°41'26.8"N)岩性为中粒二长花岗岩,PM024-1(112°09'29.2"E, 24°43'21.9"N)岩性为粗中粒斑状二长花岗岩,分别采自太保镇保城候车亭北东40 m国道G323路边和太保镇屋地充电站.用于全岩地球化学分析的7件寄主花岗岩样品和3件暗色微粒包体样品采自太保河沿岸的新鲜露头,选择其中的5件寄主花岗岩样品和2件包体样品进行Sr-Nd同位素测试.

测年样品和地球化学分析样品首先在河北廊坊区调研究所实验室无污染粉碎至200目干燥后备用.锆石的挑选在河北廊坊区调研究所实验室利用传统重、磁分选方法完成.锆石制靶、阴极发光显微照相在北京锆年领航科技有限公司完成.LA-ICP-MS锆石U-Pb定年工作在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室开展,使用Agilent HP4500 ICP-MS连接的New Wave 213 nm激光取样系统完成.分析过程中,激光束斑直径采用32 μm,样品经剥蚀后由He气作为载气,再和Ar气混合后进入ICP-MS进行分析.每个测试单元包含了10~12个未知样品点的分析以及前后各两次的标样GJ-1 608.5±1.5 Ma(Jackson *et al.*, 2004)来校正,Mud Tank 截距年龄为732±5 Ma(Black and Gulson, 1978)被插入其中分析以保证测试分析精度.U-Pb年龄和U、Th和Pb的计数由GLITTER软件(4.4版本)在线获得.详细的分析方法和流程参见Griffin *et al.*(2004).之后应用Andersen(2002)编写的嵌入Excel的ComPbCorr#3\_15G程序来进行普通铅校正,最后采用ISOPLT(2.49版)(Ludwig, 2001)做锆石年龄谐和图.

锆石原位Lu-Hf同位素组成分析在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室完成.该项分析是在锆石LA-ICP-MS U-Pb定年的基础上,参照锆石阴极发光图像,选择在原年龄测定点位置或附近进行,所用仪器为New Wave UP193激

光剥蚀系统及与其相连接的Thermo Neptune Plus多接收等离子体质谱仪(MC-ICP-MS),以He作为载气,分析中使用的激光束斑直径为35 μm,剥蚀频率为8 Hz,剥蚀时间为26 s,采用锆石91500和MT作为外部标样,本次实验获得的上述5个标样的<sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf比值分别为0.282 320±0.000 024(*n*=5, 2σ)和0.282 513±0.000 020(*n*=5, 2σ),详细分析方法见Yuan *et al.*(2008).

主量元素在湖北省地质实验研究所采用X射线荧光光谱仪(XRF-1800)测试,全岩FeO含量采用滴定法测量.国际标样GSR-1与GSR-3用于检测测试精度,精度优于5%.微量及稀土元素在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)采用ICP-MS仪器进行测试,制样及测试方法参照Liu *et al.*(2008)进行,精度优于3%.全岩Sr、Nd同位素分析分别在自然资源部中南矿产资源监督检测中心的Triton Ti和MAT261多接收质谱仪上完成.采用国家一级标准物质CBW04411(Rb-Sr)和CBW 04419(Sm-Nd)监控分析流程,分析精度<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr优于1%,<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd优于0.5%.

## 3 分析结果

### 3.1 LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄

本次研究对4件寄主花岗岩样品(TB-1Z、TB-2Z、PM023-28、PM024-1)进行了LA-ICP-MS锆石U-Pb定年分析,每件样品均选取了20颗锆石颗粒进行分析,分析点都位于锆石边部,各样品锆石的U-Th-Pb同位素分析结果见附表1,代表性锆石的CL图像见图4.

测年样品中锆石多为自形至半自形,以长柱状或短柱状(长90~240 μm,宽60~120 μm)为主,长宽比介于1.5:1~3:1.CL图像显示(图4),这些锆石具有清晰的振荡环带,Th/U介于0.27~1.72,为典型的岩浆锆石.2件花岗闪长岩样品(TB-1Z、TB-2Z)所测定的20颗锆石的Th/U比值分别为0.27~0.46和0.44~1.72,其对应的<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U年龄值分别介于213~226 Ma和218~223 Ma,<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U加权平均年龄分别为219.8±1.8 Ma(MSWD=1.6)和220.5±1.0 Ma(MSWD=0.5)(图5a,图5b),该年龄代表细中粒斑状花岗闪长岩和粗中粒斑状花岗闪长岩的结晶年龄;2件二长花岗岩样品(PM023-28、PM024-1)所测定的20颗锆石的Th/U比值分

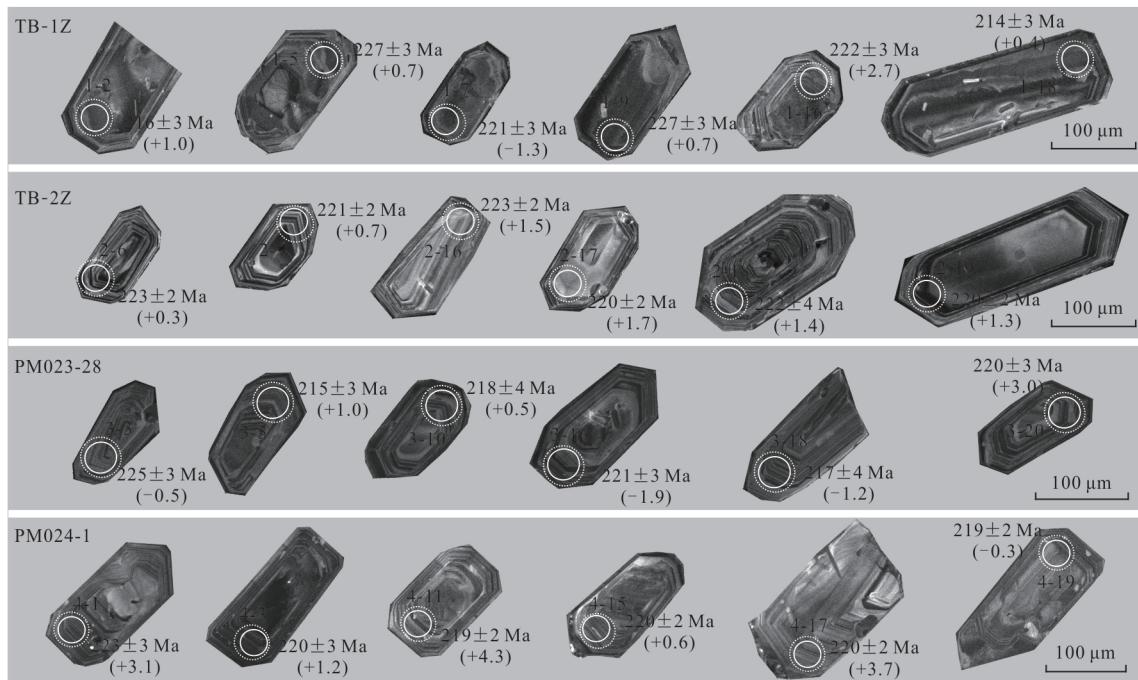


图4 太保岩体代表性锆石CL图像和分析点位

Fig.4 CL images and analytical locations of representative zircons from the Taibao pluton  
小的实线圈为原位U-Pb定年分析点,大的虚线圈为原位Hf同位素分析点,括号内数值为 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值

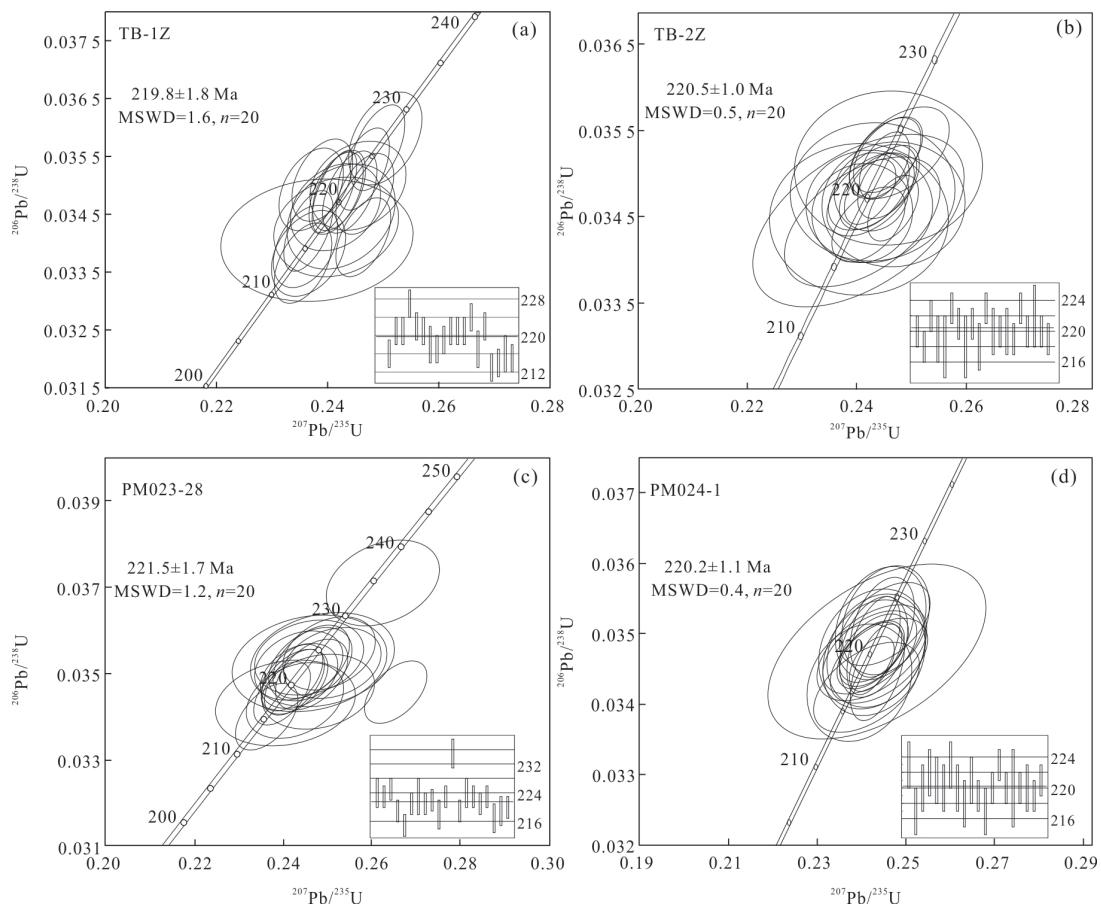


图5 太保岩体花岗岩锆石U-Pb年龄谐和图

Fig.5 Zircon U-Pb concordia age plots of granitic samples from Taibao pluton

别为0.47~0.75和0.29~0.69,其对应的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值分别介于215~235 Ma和217~223 Ma, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄分别为 $221.5\pm1.7$  Ma(MSWD=1.2)和 $220.2\pm1.1$  Ma(MSWD=0.4)(图5c,图5d),该年龄代表中粒二长花岗岩和粗中粒斑状二长花岗岩的结晶年龄.

### 3.2 全岩地球化学

在主量元素组成上(表1),太保岩体主体花岗岩的 $\text{SiO}_2$ 含量为63.10%~66.42%,平均值64.86%. $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量较高,在13.66%~16.18%(平均值为

15.37%)之间.铝饱和指数A/CNK值为0.79~1.16,为准铝质至过铝质.样品13-24#较低的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量(13.66%)和A/CNK值(0.79)可能与其发生的较强蚀变有关,较高的烧失量(4.35%)也印证了这一点.碱含量( $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ )变化于7.20%~9.58%,AKI值为0.60~0.78,均属钙碱性花岗岩(按洪大卫等(1987)分类). $\text{K}_2\text{O}$ 含量变化于3.79%~5.76%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值介于1.06~1.51,在 $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ 协变图解上,除一个样品落在钾玄岩系列,其余样品均落在高钾钙碱性系列范围内(图6).

表1 太保岩体花岗岩样品的主量元素(%)和微量元素( $10^{-6}$ )分析结果

Table 1 Major element(%) and trace element( $10^{-6}$ ) compositions of granitic samples from Taobao pluton

岩性 样号	主体							包体		
	13-24 #	13-25 #	TB-1H	TB-2H	TB-3H	TB-4H	TB-5H	TB-B1	TB-B5	TB-B6
$\text{SiO}_2$	63.10	64.28	65.88	65.11	65.00	64.20	66.42	56.01	55.13	62.56
$\text{TiO}_2$	0.58	0.66	0.59	0.66	0.62	0.63	0.46	1.11	1.14	0.86
$\text{Al}_2\text{O}_3$	13.66	15.59	15.50	15.19	15.32	16.18	16.15	16.02	16.93	16.11
$\text{Fe}_{\text{2}}$ $\text{O}_3$	0.61	1.40	1.46	1.38	1.64	1.96	0.69	1.79	2.02	2.45
FeO	3.99	3.41	2.51	3.14	2.74	2.47	1.96	5.02	4.82	3.32
MnO	0.09	0.10	0.09	0.10	0.09	0.09	0.06	0.21	0.12	0.11
MgO	1.53	1.94	1.68	2.01	1.96	1.76	1.17	4.60	3.03	2.31
CaO	3.99	3.48	2.51	3.54	3.49	2.33	2.41	5.77	4.43	4.41
$\text{Na}_2\text{O}$	3.61	3.53	3.49	3.39	3.51	3.30	3.82	4.13	5.30	4.98
$\text{K}_2\text{O}$	3.81	3.80	4.01	3.96	3.79	3.90	5.76	3.53	1.69	1.44
$\text{P}_2\text{O}_5$	0.22	0.27	0.27	0.27	0.26	0.25	0.18	0.52	0.50	0.29
LOI	4.35	1.13	1.71	0.89	1.24	2.60	0.70	0.72	4.28	0.77
总量	99.53	99.60	99.69	99.63	99.66	99.67	99.78	99.43	99.39	99.61
$\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$	1.06	1.08	1.15	1.17	1.08	1.18	1.51	0.85	0.32	0.29
AKI	0.74	0.64	0.65	0.65	0.65	0.60	0.78	0.66	0.62	0.61
A/CNK	0.79	0.96	1.06	0.93	0.94	1.16	0.95	0.76	0.91	0.91
A/NK	1.36	1.57	1.54	1.54	1.55	1.68	1.29	1.51	1.61	1.65
Li	19.2	29.7	36.7	36.4	45.1	43.5	32.4	60.6	102.0	48.6
Be	2.90	2.91	3.31	3.32	3.75	3.78	3.35	4.77	5.80	4.85
Sc	6.4	9.3	9.5	11.3	12.8	8.8	5.4	20.7	21.8	13.3
V	58.2	94.9	79.9	105.0	107.0	89.9	52.3	162.0	150.0	124.0
Cr	19.3	20.7	17.2	23.5	26.1	21.1	15.0	133.0	87.7	13.3
Co	10.5	13.9	12.1	14.3	15.7	13.7	7.2	27.4	23.8	16.6
Ni	11.9	13.1	12.1	16.0	17.1	13.5	9.1	56.6	38.8	10.6
Cu	13.8	21.9	14.7	5.7	10.5	14.1	1.3	10.9	7.1	9.3
Zn	49.8	58.1	50.6	61.2	56.1	56.9	35.8	94.2	89.2	68.3
Ga	13.9	17.4	16.9	17.7	18.6	18.3	16.6	20.7	25.7	19.5
Rb	223	168	181	165	180	180	212	217	123	133
Sr	208	340	333	313	353	305	395	273	366	325
Y	19.4	17.7	16.2	18.4	19.0	15.9	14.0	26.6	29.0	22.9
Nb	24.8	16.2	17.4	20.0	19.1	18.5	18.5	27.0	40.2	26.3
Cs	16.7	5.6	7.0	6.7	8.7	8.3	5.8	11.7	11.2	9.3
Ba	568	745	597	568	707	730	1370	405	126	132

续表1

岩性 样号	主体								包体		
	13-24 #	13-25 #	TB-1H	TB-2H	TB-3H	TB-4H	TB-5H	TB-B1	TB-B5	TB-B6	
La	41.6	42.4	36.7	37.6	49.7	37.5	28.7	52.8	62.3	38.6	
Ce	72.5	66.9	58.2	61.7	74.3	66.0	55.2	102.0	126.0	70.8	
Pr	7.10	6.89	6.33	6.89	7.61	7.00	6.26	11.00	13.70	8.64	
Nd	26.5	24.6	23.7	27.8	28.5	24.8	23.6	46.0	59.9	35.9	
Sm	5.06	4.66	3.87	4.49	4.70	4.39	3.84	7.61	8.80	5.71	
Eu	0.99	1.18	1.03	1.08	1.17	1.06	0.86	2.11	2.15	1.47	
Gd	4.03	4.20	3.37	3.66	4.27	4.04	3.19	6.93	7.49	4.59	
Tb	0.67	0.63	0.54	0.63	0.66	0.60	0.49	1.06	1.14	0.79	
Dy	3.41	3.34	3.01	3.56	3.54	3.09	2.49	5.24	5.75	4.61	
Ho	0.66	0.63	0.54	0.60	0.66	0.57	0.45	0.95	0.98	0.80	
Er	2.22	1.83	1.47	1.68	1.88	1.66	1.27	2.72	2.82	2.14	
Tm	0.36	0.29	0.25	0.29	0.30	0.26	0.20	0.41	0.45	0.37	
Yb	2.21	1.91	1.68	2.01	2.01	1.65	1.34	2.66	3.05	2.70	
Lu	0.35	0.28	0.24	0.26	0.30	0.26	0.19	0.39	0.42	0.36	
Ta	2.36	1.09	1.28	1.65	1.37	1.34	1.35	1.59	2.89	2.10	
Tl	0.83	0.64	0.72	0.70	0.67	0.73	0.72	0.74	0.47	0.51	
Pb	20.4	20.5	22.3	20.7	20.3	21.5	27.4	20.3	39.7	15.5	
Th	25.9	19.4	20.4	19.0	22.8	19.4	15.4	13.2	20.5	17.1	
U	9.19	5.07	4.72	7.43	4.71	4.33	6.53	4.05	9.33	8.10	
Zr	72.7	67.9	42.1	54.4	43.7	61.2	55.0	98.9	98.1	94.9	
Hf	2.35	2.14	1.43	1.67	1.48	2.14	1.61	3.03	3.21	2.65	
$\Sigma$ REE	167.7	159.7	140.9	152.3	179.6	152.9	128.1	241.9	295.0	177.5	
LREE	153.8	146.6	129.8	139.6	166.0	140.8	118.5	221.5	272.9	161.1	
HREE	13.9	13.1	11.1	12.7	13.6	12.1	9.6	20.4	22.1	16.4	
LREE/HREE	11.1	11.2	11.7	11.0	12.2	11.6	12.3	10.9	12.3	9.9	
(La/Yb) <sub>N</sub>	13.5	15.9	15.7	13.4	17.7	16.3	15.4	14.2	14.7	10.3	
$\delta$ Eu	0.65	0.80	0.85	0.79	0.78	0.76	0.73	0.87	0.79	0.85	
$\delta$ Ce	0.95	0.87	0.86	0.87	0.84	0.93	0.96	0.98	1.01	0.91	

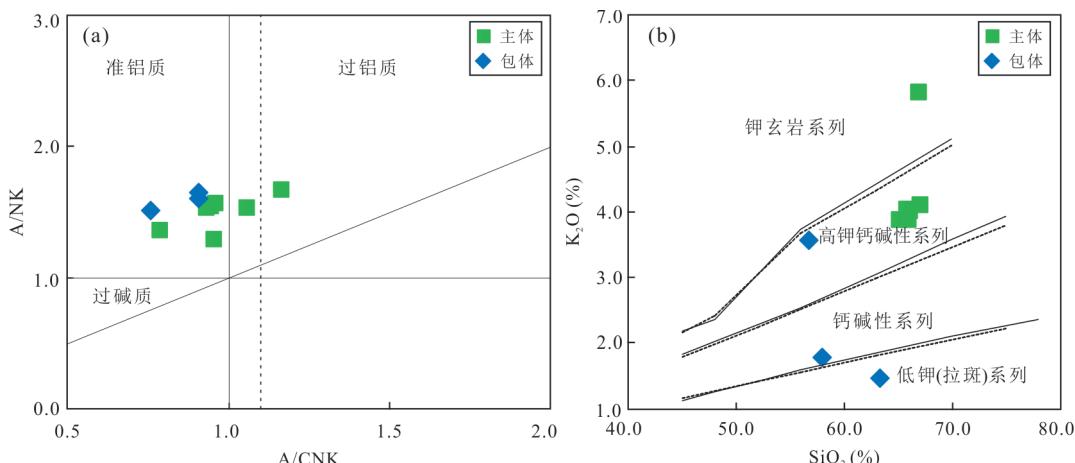
暗色微粒包体  $\text{SiO}_2$  含量为 55.13%~62.56%，铝饱和指数 A/CNK 值为 0.76~0.91.  $\text{FeO}^\text{T}$  和  $\text{MgO}$  含量分别为 5.53%~6.63% 和 2.31%~4.60%，铁、镁含量明显高于寄主岩， $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})$  比值为 0.29~0.46. AKI 值为 0.61~0.66，包体均属钙碱性花岗岩(按洪大卫等(1987)分类). 包体的  $\text{K}_2\text{O}$  含量变化于 1.44%~3.53%，碱含量( $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ )变化于 6.42%~7.66%.  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  比值介于 0.29~0.85，在  $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$  协变图解上，样品分别落在低钾系列、钙碱性系列和钾玄岩系列范围内(图 6).

在主量元素 Harker 图解中(图 7)，太保岩体主体花岗岩和包体的  $\text{SiO}_2$  与  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$  均具良好的线性关系，表现为随  $\text{SiO}_2$  含量的增加而降低；在同分母氧化物比值协变图  $\text{K}_2\text{O}/\text{CaO}-\text{SiO}_2/\text{CaO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{CaO}-\text{Na}_2\text{O}/\text{CaO}$

(图 7)上也表现出良好的线性关系，这种线性关系是岩浆混合作用的一种重要标志(周瑜若, 1994).

在稀土元素组成上，主体花岗岩的稀土总量( $\Sigma$ REE)为  $128.1 \times 10^{-6}$ ~ $179.6 \times 10^{-6}$ ，低于暗色微粒包体( $177.5 \times 10^{-6}$ ~ $295.0 \times 10^{-6}$ )，LREE/HREE 比值为 11.0~12.3，高于暗色微粒包体(9.9~12.3). 总体上二者均为轻稀土元素富集型， $(\text{La}/\text{Yb})_N$  分别变化于 13.4~17.7 和 10.3~14.7. 二者具有微弱的铕负异常， $\delta$ Eu 值分别为 0.65~0.85 和 0.79~0.87. 在球粒陨石标准化稀土配分图上，寄主花岗岩与包体具有十分相似的稀土配分曲线，均呈右倾的稀土配分型式(图 8a).

在微量元素原始地幔标准化蛛网图上(图 8b)，太保花岗岩明显富集大离子亲石元素 Rb、K 和放射性生热元素 Th、U，亏损高场强元素 Nb、Ta、Zr、Hf，并表现出显著的 Ba、Sr、Ti 负异常. 包体样品具有与

图6 太保岩体花岗岩A/CNK—A/NK图解(a)和SiO<sub>2</sub>—K<sub>2</sub>O图解(b)Fig.6 A/CNK—A/NK (a) and SiO<sub>2</sub>—K<sub>2</sub>O (b) diagrams for granitic samples of Taibao pluton

寄主花岗岩相似的微量元素分布型式,Nb、Ta、Zr、Hf等高场强元素的含量较主体花岗岩高,Ba的负异常更加明显,而Sr和Ti的负异常则相对较弱。微量元素相关图及同分母比值图显示(图9),寄主花岗岩和包体的微量元素投影点均构成线性关系,表明二者之间可能有相关的成因联系。

### 3.3 全岩 Sr-Nd 同位素

对5个花岗岩和2个暗色微粒包体样品进行了全岩Sr-Nd同位素分析。结果显示(表2),花岗岩和包体的 $I_{\text{Sr}}$ 分别为0.706 14~0.707 64,0.705 38~0.706 55, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 分别为-3.42~-2.60和-0.90~-0.52,显示低 $I_{\text{Sr}}$ 和高 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 的特征。在 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ - $t$ 图解上(图10a),所有样品都位于华夏元古代—太古代基底演化域(Chen and Jahn,

1998)上方。采用两阶段Nd模式年龄,计算得到太保岩体花岗岩以及包体的两阶段Nd模式年龄分别为1.30~1.35 Ga、1.10~1.13 Ga,明显低于华夏陆块基底变质岩的Nd模式年龄(主要为1.8~2.2 Ga,陈江峰等,1999),表明太保岩体的源区物质主要为中元古代地壳,在成岩过程中有幔源物质的加入。

### 3.4 锆石 Hf 同位素组成

4件花岗岩样品(TB-1Z、TB-2Z、PM023-28、PM024-1)中的锆石Hf同位素的分析结果列于附表2。78个锆石微区Hf同位素的分析表明,太保岩体的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值介于0.282 580~0.282 775, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于-2.6~+4.3(平均值为+0.7)。Hf同位素亏损地幔两阶段模式年龄 $T_{\text{DM2}}$ 介于0.95~1.39 Ga(平均值为1.18 Ga)。

表2 太保岩体Sr-Nd同位素组成

Table 2 Sr and Nd isotopic compositions of samples from Taibao pluton

样品号	花岗岩					包体	
	13-24#	13-25#	TB-1H	TB-3H	TB-5H	TB-B1	TB-B6
Rb( $10^{-6}$ )	223	168	181	180	212	217	133
Sr( $10^{-6}$ )	208	340	333	353	395	273	325
$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	3.10	1.43	1.57	1.48	1.55	2.30	1.18
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.715 85	0.711 55	0.712 56	0.711 85	0.711 15	0.712 58	0.710 26
$I_{\text{Sr}}$	0.706 14	0.707 08	0.707 64	0.707 23	0.706 29	0.705 38	0.706 55
Sm( $10^{-6}$ )	5.06	4.66	3.87	4.70	3.84	7.61	5.71
Nd( $10^{-6}$ )	26.5	24.6	23.7	28.5	23.6	46.0	35.9
$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	0.116 2	0.115 3	0.099 4	0.100 4	0.099 0	0.100 7	0.096 8
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0.512 347	0.512 360	0.512 356	0.512 349	0.512 364	0.512 473	0.512 448
$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	-3.4	-3.1	-2.7	-2.9	-2.6	-0.5	-0.9
$T_{\text{DM2}}(\text{Ga})$	1.38	1.35	1.29	1.31	1.28	1.10	1.13

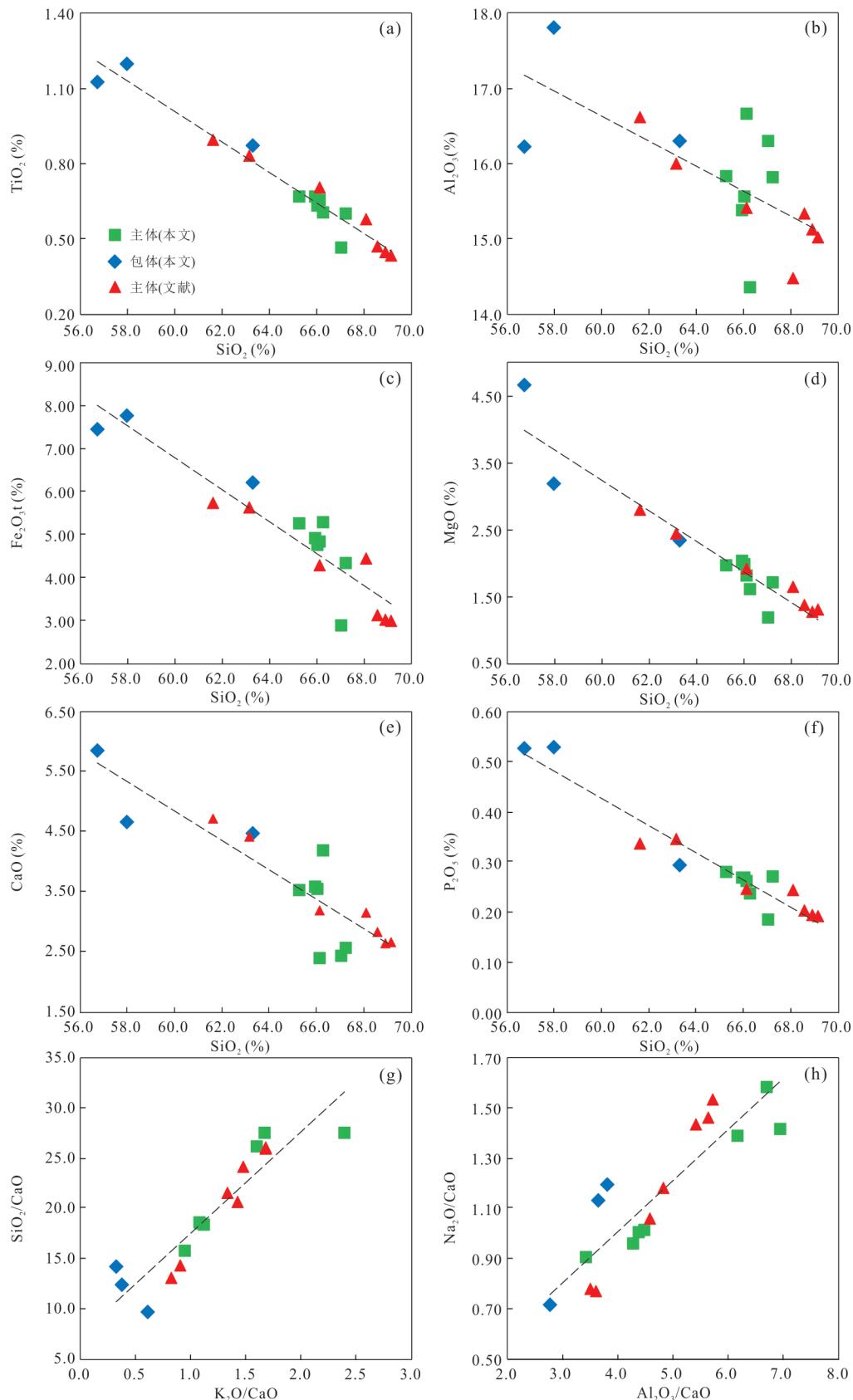


图 7 太保岩体主量元素哈克图解和同分母氧化物比值协变图

Fig.7 Harker variation diagrams and  $K_2O/CaO$  vs.  $SiO_2/CaO$ ,  $Al_2O_3/CaO$  vs.  $Na_2O/CaO$  plots for samples from Taibao pluton

文献数据引自鲁学悟等(2008)

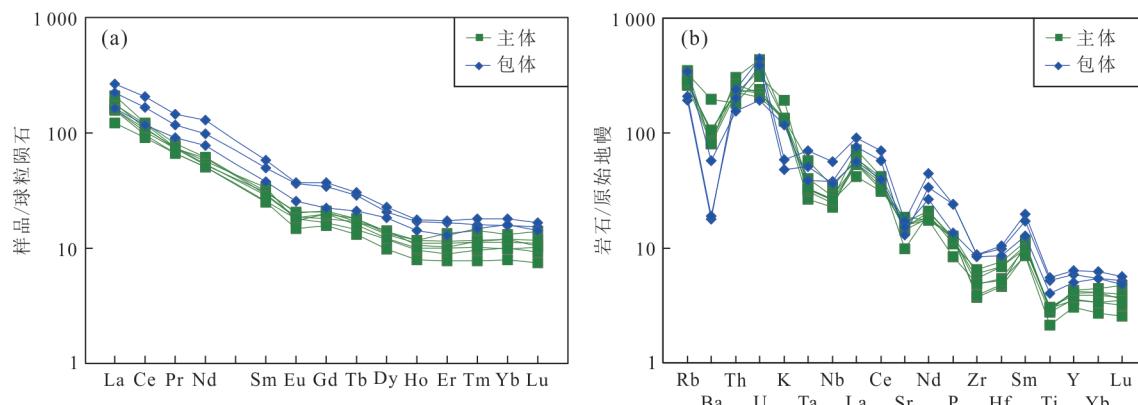


图8 太保岩体花岗岩的球粒陨石标准化稀土配分模式(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)

Fig.8 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element spider diagrams (b) for the samples from Taibao pluton

球粒陨石和原始地幔标准化值据 Sun and McDonough(1989)

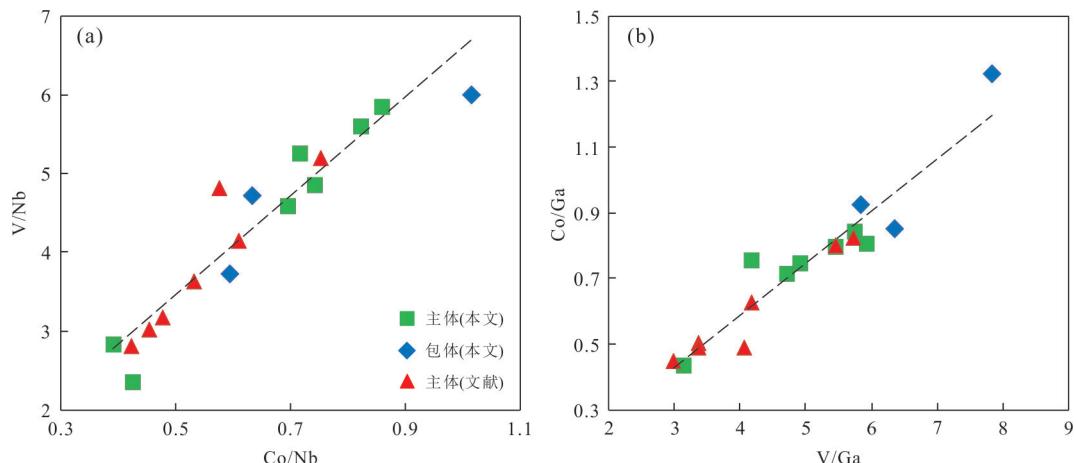


图9 太保岩体中与岩浆混合作用相关的微量元素相关图及同分母比值图

Fig.9 Correlation diagram and ration diagram in the same denominator of trace elements for rocks related to magma mixing in Taibao pluton

文献数据引自鲁学悟等(2008)

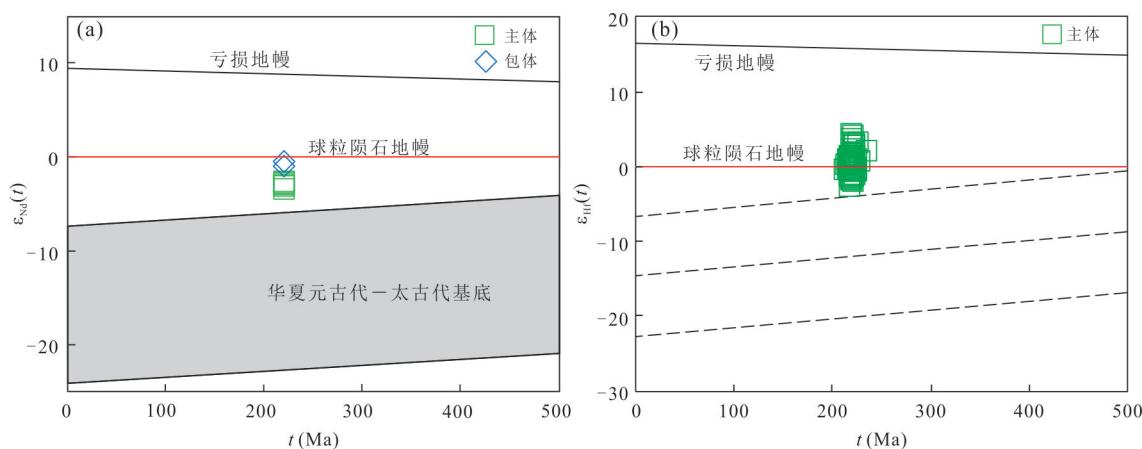
图10 太保岩体花岗岩  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)-t$  (a) 和  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)-t$  (b) 关系图解

Fig.10  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)-t$  (a) and  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)-t$  (b) plots for samples from Taibao pluton

## 4 讨论

### 4.1 太保岩体的侵位时代

太保岩体外围为禾洞岩体所包围,未直接与地层接触,给根据野外接触关系判断岩体的形成时代带来了一定的困难。据前人区调资料,永和—太保岩体 K-Ar 同位素年龄为 370~453 Ma, U-Pb 同位素年龄为 390 Ma(广东省地质局区域地质调查队 3 分队,1973,连县幅 1:20 万区域地质调查报告;广西区域地质调查研究院,2005,贺县幅 1:25 万区域地质调查报告)。广西区域地质调查研究院(2005,贺县幅 1:25 万区域地质调查报告)根据太保岩体岩性与邻近的大宁岩体、永和岩体相近,综合确定其为加里东晚期(晚志留世)侵入岩。杨锋等(2016)获得太保寄主花岗岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 158.4~151.5 Ma, 闪长质包体的年龄为 160.5 Ma。Wang *et al.*(2018a)报道的太保岩体正长花岗岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 150.0±1.8 Ma, 据此认为太保岩体的形成时代为晚侏罗世。

在实施“广西 1:5 万富川县、涛圩、桂岭圩、太保圩幅区域地质矿产调查”项目(2013—2015 年)过程中,笔者在太保岩体内实测了多条岩体剖面,既对太保岩体与外围禾洞岩体的接触界线进行了限定,又开展了太保岩体的锆石 U-Pb 同位素定年研究。详细的野外调查表明,太保岩体在水口至下百丈一带以及芦荻冲一带被禾洞岩体细中粒斑状花岗闪长岩呈岩株状侵入(锆石 U-Pb 年龄也指示其与外围的禾洞岩体一致,数据另文发表),外围其他地方则被禾洞岩体中粗粒斑状二长花岗岩侵入。本文样品中锆石显示清晰的振荡生长环带以及较高的 Th/U 比值(0.53~1.94),暗示其岩浆成因,因此锆石的 U-Pb 定年结果代表了岩体的结晶年龄。2 件花岗闪长岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 219.8±1.8 Ma 和 220.5±1.0 Ma, 2 件二长花岗岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄 221.5±1.7 Ma 和 220.2±1.1 Ma, 指示其结晶年龄为晚三叠世。Wang *et al.*(2018a)报道的太保岩体晚侏罗世正长花岗岩应以岩株形式侵入到太保岩体内的禾洞岩体的年龄,其岩性也与禾洞岩体一致,而与太保岩体相差较大。据此笔者认为,太保岩体的主体形成时代为晚三叠世,而不是前人认为的加里东期和燕山期,而且在太保岩体的内部还发育多处后期禾洞岩体侵位形成的岩株。

### 4.2 花岗岩成因类型和包体成因

前人研究表明,华南印支期花岗岩约 60% 为全岩 A/CNK 值在 1.10 以上,含白云母和石榴子石等富铝矿物的强过铝质 S 型花岗岩(Zhou *et al.*, 2006)。物源组分多为泥质岩石,除少部分形成于印支运动早阶段同构造期地壳深熔作用的片麻状花岗岩外,其他大多为在印支期碰撞运动之后的伸展构造环境条件下,由当时被加厚的华南地壳在减薄、降压、导水条件下,先后部分熔融而成的 S 型花岗岩(Zhou *et al.*, 2006; 张岳桥等, 2009)。与此同时,具 I 型亲缘性的弱过铝—准铝质花岗岩的分布则较为有限,大多分布于华南板块西部的内陆地区,且多被认为形成于印支运动早期(245~230 Ma)(Shu *et al.*, 2008)。

本次研究发现,太保岩体花岗岩形成于 219.8~221.5 Ma, 属于后造山阶段(Xu *et al.*, 2019; Qing *et al.*, 2020)。在岩相学上缺乏 S 型花岗岩的典型标志性矿物(如堇青石、红柱石、石榴子石等),并且都具有偏低的 A/CNK 值(除 TB-4H 外,都小于 1.1,表 1 和图 6a), SiO<sub>2</sub> 与 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 呈明显的负相关(图 7),表现出相对平坦的重稀土配分型式(图 8a),明显区别于典型的印支期强过铝质 S 型花岗岩类,排除了它们属于 S 型花岗岩的可能。AKI 值(0.60~0.78, A 型花岗岩平均值为 0.95)和 Nd、Ta、Zr、Hf 等高场强元素含量较 A 型花岗岩明显偏低,10 000 Ga/Al(1.8~2.3)和 Zr+Nb+Ce+Y(134~189)低于 A 型花岗岩下限值(2.6 和 350)(Whalen *et al.*, 1987),排除了其属于 A 型花岗岩的可能。因此,太保岩体花岗岩应属于 I 型花岗岩。同时,暗色矿物出现角闪石,化学组成上富钾,K<sub>2</sub>O 含量变化于 3.79%~5.76%,AKI 值为 0.60~0.78,按洪大卫等(1987)的分类,属于钙碱性花岗岩。综上所述,太保岩体花岗岩应为高钾钙碱性的 I 型花岗岩。

野外产出特征显示,太保岩体暗色微粒包体呈浑圆状、长条状及不规则状,与寄主岩呈突变或渐变接触,包体中常见捕获的来自寄主岩的钾长石斑晶,斑晶排列方向与包体长轴方向一致(图 3c,3d),显示岩浆混合的特征。在主量元素方面,花岗岩与包体的 TiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>t、MgO、CaO、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 等主要氧化物与 SiO<sub>2</sub> 呈明显的线性关系,在同分母氧化物比值协变图 K<sub>2</sub>O/CaO—SiO<sub>2</sub>/CaO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/CaO—Na<sub>2</sub>O/CaO(图 7)上也表现出良好的线性关系,暗示着闪长质包体与寄主花岗岩之间可能发生过岩浆

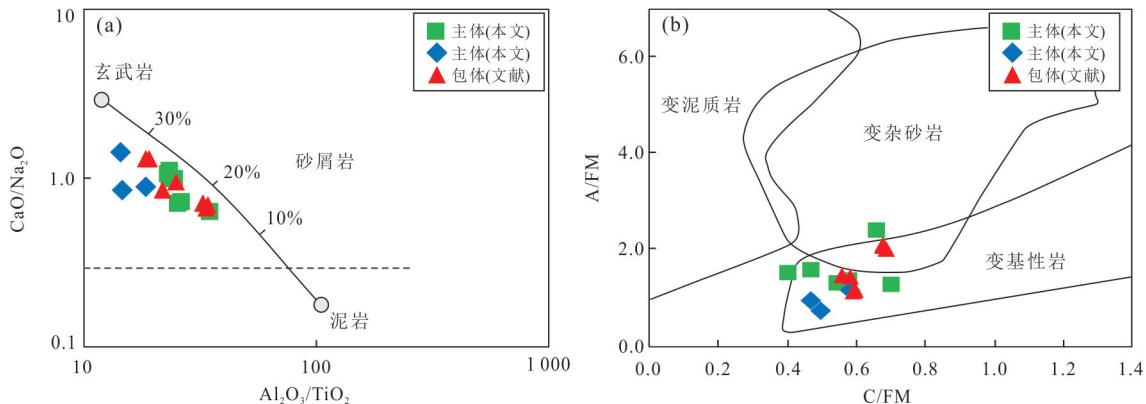


图11 太保岩体花岗岩  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2-\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$  图解(a)(Sylvester, 1998)和  $\text{C}/\text{FM}-\text{A}/\text{FM}$  源区判别图解(b)(Altherr *et al.*, 2000)

Fig.11  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2-\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$  diagram (a, after Sylvester, 1998) and  $\text{C}/\text{FM}-\text{A}/\text{FM}$  diagram (b, after Altherr *et al.*, 2000) for samples from Taibao pluton

图例同图7

混合作用或分异结晶作用(Langmuir *et al.*, 1978).包体的稀土总量( $\sum \text{REE}$ )为 $177.47 \times 10^{-6} \sim 294.96 \times 10^{-6}$ , 高于寄主花岗岩的稀土总量( $\sum \text{REE}$ 为 $128.07 \times 10^{-6} \sim 179.60 \times 10^{-6}$ ), 表明包体可能不是寄主岩浆早期结晶分异产物的堆积体.这是因为REE为强不相容元素, 如果闪长质包体是寄主花岗岩的母岩浆早期结晶分异的产物, 其 $\sum \text{REE}$ 应低于寄主花岗岩, 事实却与之相反, 因此可以证明包体不是寄主岩浆结晶分异的产物. 包体和寄主花岗岩的 $\delta \text{Eu}$ 值差别不大(分别为0.65~0.85和0.79~0.87), 指示在成岩过程中斜长石的分离结晶作用不显著. 因此主体花岗岩与包体不是同源演化的产物, 不存在时间和成分上的演化关系. Sm-Nd、Co-V、Nb-Ta等微量元素相关图及同分母比值图也可以指示岩浆混合作用(周瑜若, 1994). 在Sm-Nd、Co-V、Nb-Ta、La-Ce元素相关图解(图略)及V/Nb-Co/Nb、Co/Ga-V/Ga同分母比值图解中(图9), 主体花岗岩与包体均呈良好的线性关系, 反映岩浆混合的地球化学特征.

### 4.3 岩浆源区

主体花岗岩和包体均具有低的 $I_{\text{Sr}}$ 值(0.706 14~0.707 64、0.705 38~0.706 55)、较高的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(-3.42~-2.60和-0.90~-0.52)和较低的二阶段Nd模式年龄, $T_{\text{DM2}}$ 分别为1.30~1.35 Ga、1.10~1.13 Ga, 较华夏基底变质岩的Nd模式年龄(主要为1.8~2.2 Ga, 陈江峰等, 1999)明显偏低. 在 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2-\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 和 $\text{C}/\text{MF}-\text{A}/\text{MF}$ 花岗岩源区判别图解中(图11), 样品落入变基性岩及其附近区

域, 表明太保岩体的源区物质主要为中元古代下地壳变火山岩物质, 在成岩过程中有较多的亏损地幔组分参与了其成岩过程. 寄主花岗岩具有较宽的 $\epsilon_{\text{HF}}(t)$ 值变化范围(-2.6~+4.3, 平均值为+0.7)及两阶段Hf模式年龄(0.95~1.39 Ga), 也指示其形成于岩浆混合作用, 且基性端员为亏损地幔.

已有研究表明, 同时代邻近区域的道县虎子岩基性岩包体、桃江江石桥辉绿岩形成于下地壳和亏损地幔的混合源区(Dai *et al.*, 2008; 金鑫镖等, 2017). 在 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)-^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ 图解上(图12), 太保花岗岩和包体的投点均位于亏损地幔演化线上, 与道县虎子岩基性岩包体和桃江江石桥辉绿岩的投影区域接近或重叠, 指示太保花岗岩和包体也可能形成于下地壳和亏损地幔的混合.

### 4.4 构造背景

Xu *et al.*(2019)对近年来发表的花岗岩统计结果显示, 华南印支期A型花岗岩主要形成于230~225 Ma. 这些花岗岩均具有相同的地球化学特征和岩石成因, 显示后造山的构造属性. 结合云开地块变形的片麻状花岗岩(233~230 Ma)和未变形正常花岗岩(232~229 Ma)(Chen *et al.*, 2017)的形成年龄认为, 华南印支期从同造山到后造山阶段的转变发生在230 Ma左右. Qing *et al.*(2020)最新的研究认为, 华南在258~231 Ma处于同碰撞造山阶段, 231 Ma之后转变为后造山阶段. 太保岩体花岗岩的侵位年龄约为220 Ma, 在(Y+Nb)-Rb花岗岩构造环境判别图解中(图13), 太保花岗岩及其包体投影于后碰撞花岗岩区域, 表明其形成于印支期碰撞

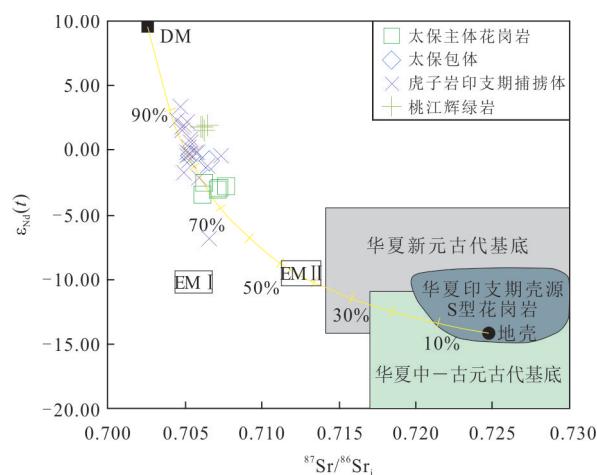


图 12  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ — $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  图解  
Fig.12  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ — $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  diagram

底图据 Zhao et al. (2013), 华夏印支期壳源 S 型花岗岩引自 Hsieh et al. (2008), 虎子岩印支期捕掳体数据引自 Dai et al. (2008); 桃江辉绿岩数据引自金鑫镖等(2017). 亏损地幔和地壳端员成分据 Xia and Xu (2020)

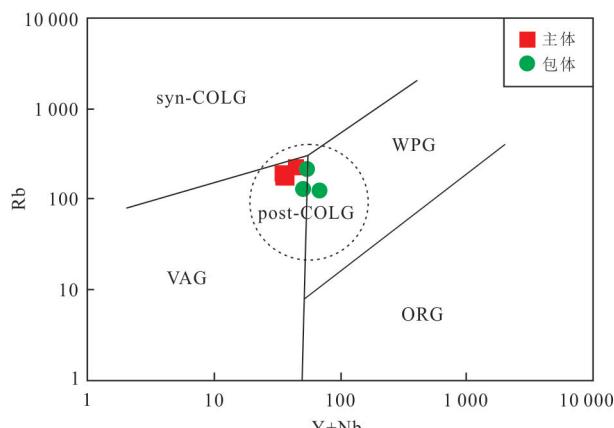


图 13 太保岩体构造环境判别图解(Pearce et al., 1996)  
Fig.13 Discrimination diagram of tectonic environments for the samples from Taibao pluton (Pearce et al., 1996)

VAG. 火山弧花岗岩; WPG. 板内花岗岩; syn-COLG. 同碰撞花岗岩; post-COLG. 后碰撞花岗岩; ORG. 洋中脊花岗岩

造山后的伸展环境。太保岩体在构造位置上位于北东向的郴州—临武断裂附近, 在此构造环境下, 软流圈地幔上涌及诱发的幔源岩浆沿郴州—临武超壳深断裂底侵, 导致了强烈的壳幔岩浆混合作用, 形成了太保花岗岩和其中的暗色微粒包体。与太保岩体形成于亏损地幔来源的基性岩浆底侵不同, 同时期湖南桃江 I 型花岗岩中发现的镁铁质包体(Xu et al., 2014)形成于富集地幔来源的基性岩浆的底侵作用, 反映了地幔源区的不均一性, 也从一个侧

面表明壳—幔相互作用和岩浆混合作用广泛存在于华南中生代的花岗岩中。

印支早期, 受控于古特提斯洋的俯冲, 华南板块南北边缘发生碰撞造山事件, 在内陆形成东西向褶皱和逆冲断层。NNE 向褶皱构造则与古太平洋板块向华南大陆之下的俯冲作用有关(Zhou et al., 2006; 张岳桥等, 2009; Xu et al., 2019)。太保岩体位于华南北北东向低 Nd 模式年龄花岗岩带(图 1b), 除上述提到的道县虎子岩基性包体(220~233 Ma)(Dai et al., 2008), 近年来在该带上陆续有基性岩浆的侵入活动报道, 如湘南宁远保安坪碱性玄武岩(206~212 Ma)(刘勇等, 2010)、宜章长城岭辉绿岩(227 Ma)(刘勇等, 2012)、富川鲁洞辉绿玢岩(207.8 Ma)(时毓等, 2019)。上述基性岩的发现暗示, 华南可能在印支晚期(233~206 Ma)就已经发生了北北东向的基性岩浆底侵作用。该北北东向的低 Nd 模式年龄花岗岩带垂直于古太平洋洋壳的消减方向, 沿该低 Nd 模式年龄带的基性岩浆活动可能指示古特提斯构造域向古太平洋构造域的转换始于晚三叠世(233 Ma)。

## 5 结论

(1) 本次利用 LA-ICP-MS 镶石 U-Pb 法获得太保岩体 2 件花岗闪长岩的 LA-ICP-MS 镶石 U-Pb 年龄为  $219.8 \pm 1.8$  Ma 和  $220.5 \pm 1.0$  Ma, 2 件二长花岗岩的 LA-ICP-MS 镶石 U-Pb 年龄为  $221.5 \pm 1.7$  Ma 和  $220.2 \pm 1.1$  Ma, 确定其成岩时代为晚三叠世。

(2) 地球化学和 Sr、Nd、Hf 同位素分析表明太保岩体形成于中元古代下地壳变基性岩物质的熔融, 并与亏损地幔物质发生岩浆混合作用。

(3) 太保岩体形成于印支晚期伸展背景, 北北东向的基性岩浆活动(233~206 Ma)指示古特提斯构造域向古太平洋构造域的转换可能开始于晚三叠世(233 Ma)。

致谢: 感谢中国地质大学(武汉)张克信教授、武汉地质调查中心张开明教授级高级工程师在项目实施过程中给予的指导; 感谢武汉地质调查中心贾小辉副研究员在野外样品采集时提供的帮助; 感谢两位匿名审稿人对本文提出的宝贵修改建议, 使本文增色不少。

附表见本刊官网(<http://www.earth-science.net>)。

## References

- Altherr, R., Holl, A., Hegner, E., et al., 2000. High-Potassium, Calc-Alkaline I-Type Plutonism in the European Variscides: Northern Vosges (France) and Northern Schwarzwald (Germany). *Lithos*, 50(1–3): 51–73. [https://doi.org/10.1016/s0024-4937\(99\)00052-3](https://doi.org/10.1016/s0024-4937(99)00052-3)
- Andersen, T., 2002. Correction of Common Lead in U-Pb Analyses That do Not Report  $^{204}\text{Pb}$ . *Chemical Geology*, 192 (1): 59–79.
- Black, L.P., Gulson, B.L., 1978. The Age of the Mud Tank Carbonatite, Strangways Range, Northern Territory. *BMR Journal of Australian Geology and Geophysics*, 3 (3):227–232.
- Chen, C.H., Liu, Y.H., Lee, C.Y., et al., 2017. The Triassic Reworking of the Yunkai Massif (South China): EMP Monazite and U-Pb Zircon Geochronologic Evidence. *Tectonophysics*, 694: 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.11.022>
- Chen, J.F., Guo, X.S., Tang, J.F., et al., 1999. Nd Isotopic Model Ages: Implications of the Growth of the Continental Crustal of Southeastern China. *Journal of Nanjing University (Natural Science)*, 35: 649–685 (in Chinese with English abstract).
- Chen, J.F., Jahn, B.M., 1998. Crustal Evolution of Southeastern China: Nd and Sr Isotopic Evidence. *Tectonophysics*, 284 (1): 101–133.
- Chen, P.R., Hua, R.M., Zhang, B.T., et al., 2002. Early Yanshanian Post-Orogenic Granitoids in the Nanjing Region: Petrological Constraints and Geodynamic Setting. *Science in China (Series D)*, 32 (4): 279–289 (in Chinese).
- Chen, W.F., Chen, P.R., Huang, H.Y., et al., 2007. Chronological and Geochemical Studies of Granite and Enclave in Baimashan Pluton, Hunan, South China. *Science in China (Series D)*, 50(11): 1606–1627. <https://doi.org/10.1007/s11430-007-0073-1>
- Cheng, S.B., Fu, J.M., Cui, S., et al., 2018. Zircon U-Pb Chronology, Geochemistry of the Indonesian Granitic Rocks from Northern Yuechengling Batholith in Guangxi-Hunan Junction. *Earth Science*, 43(7):2330–2349 (in Chinese with English abstract).
- Dai, B.Z., Jiang, S.Y., Jiang, Y.H., et al., 2008. Geochronology, Geochemistry and Hf-Sr-Nd Isotopic Compositions of Huizyan Mafic Xenoliths, Southern Hunan Province, South China: Petrogenesis and Implications for Lower Crust Evolution. *Lithos*, 102(1): 65–87.
- Feng, Z.H., Wang, C.Z., Liang, J.C., et al., 2011. The Emplacement Mechanisms and Growth Styles of the Guposhan-Huashan Batholith in Western Nanling Range, South China. *Science China Earth Sciences*, 54 (1): 45–60. <https://doi.org/10.1007/s11430-010-4143-4>
- Gao, P., Zheng, Y.F., Zhao, Z.F., 2017. Triassic Granites in South China: A Geochemical Perspective on Their Characteristics, Petrogenesis, and Tectonic Significance. *Earth-Science Reviews*, 173: 266–294. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.07.016>
- Gilder, S.A., Gill, J., Coe, R.S., et al., 1996. Isotopic and Paleomagnetic Constraints on the Mesozoic Tectonic Evolution of South China. *Journal of Geophysical Research*, 101: 16137–16154.
- Griffin, W.L., Belousova, E.A., Shee, S.R., et al., 2004. Archean Crustal Evolution in the Northern Yilgarn Craton: U-Pb and Hf-Isotope Evidence from Detrital Zircons. *Precambrian Research*, 131(3–4): 231–282.
- Guo, F., Fan, W.M., Lin, G., et al., 1997. Geochronology and Petrogenesis of Gabbroic Xenoliths from Daoxian, Southern Hunan Province, China. *Chinese Science Bulletin*, 42 (15): 1661–1664 (in Chinese).
- Hong, D.W., Duo, W.Q., Li, G.J., et al., 1987. Petrology and Genesis Evolution of Mirolitic Granite Belt in Fujian Coast. Science and Technology Publishing Co., Ltd., Beijing (in Chinese).
- Hsieh, P.S., Chen, C.H., Yang, H.J., et al., 2008. Petrogenesis of the Nanling Mountains Granites from South China: Constraints from Systematic Apatite Geochemistry and Whole-Rock Geochemical and Sr-Nd Isotope Compositions. *Journal of Asian Earth Sciences*, 33(5): 428–451.
- Jackson, S.E., Pearson, N.J., Griffin, W.L., et al., 2004. The Application of Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry to In Situ U-Pb Zircon Geochronology. *Chemical Geology*, 211(1): 47–69.
- Jiang, S.Y., Zhao, K.D., Jiang, Y.H., et al., 2008. Characteristics and Genesis of Mesozoic A-Type Granites and Associated Mineral Deposits in the Southern Hunan and Northern Guangxi Provinces along the Shi-Hang Belt, South China. *Geological Journal of China Universities*, 14 (4): 496–509 (in Chinese with English abstract).
- Jin, X.B., Wang, L., Xiang, H., et al., 2017. Petrogenesis of Diabase from Jiangshiqiao in Taojiang City, Hunan Province: Constraints from Geochemistry, Geochronology and Sr-Nd-Pb Isotopes. *Geological Bulletin of China*, 36(5): 750–760 (in Chinese with English abstract).
- Langmuir, C.H., Vocke, R.D., Hanson, G.N., et al., 1978. A General Mixing Equation with Applications to

- Icelandic Basalts. *Earth and Planetary Science Letters*, 37(3): 380–392.
- Li, J.F., Fu, J.M., Ma, C.Q., et al., 2020. Petrogenesis and Tectonic Setting of the Shaziling Pluton in Jiuyishan Area, Nanling: Evidence from Zircon U-Pb Geochronology, Petrogeochemistry, and Sr-Nd-Hf Isotopes. *Earth Science*, 45(2): 374–388 (in Chinese with English abstract).
- Li, J.H., Zhao, G., Johnston, S.T., et al., 2017. Permo-Triassic Structural Evolution of the Shiwindashan and Youjiang Structural Belts, South China. *Journal of Structural Geology*, 100: 24–44.
- Li, X.H., Li, W.X., Li, Z.X., 2007. On the Genetic Classification and Tectonic Implications of the Early Yanshanian Granitoids in the Nanling Range, South China. *Chinese Science Bulletin*, 62 (9): 981–991(in Chinese).
- Li, Z.X., Li, X.H., 2007. Formation of the 1 300 km-Wide Intracontinental Orogen and Postorogenic Magmatic Province in Mesozoic South China: A Flat-Slab Subduction Model. *Geology*, 35(2): 179–182. <https://doi.org/10.1130/g23193a.1>
- Liu, Y., Li, T.D., Xiao, Q.H., et al., 2010. New Chronology of the Ningyuan Alkali Basalt in Southern Hunan, China: Evidence from LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating. *Geological Bulletin of China*, 29(6): 833–841 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y., Li, T.D., Xiao, Q.H., et al., 2012. Formation Epoch and Origin of the Yizhang Andesite, Diabase and Granite-Porphyry in Yizhang County, Southern Hunan Province: Zircon U-Pb Age and Hf Isotopes. *Geological Bulletin of China*, 31(9): 1363–1378 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y.S., Hu, Z.C., Gao, S., et al., 2008. In Situ Analysis of Major and Trace Elements of Anhydrous Minerals by LA-ICP-MS without Applying an Internal Standard. *Chemical Geology: Isotope Geoscience Section*, 257(1–2): 34–43.
- Liu, Z., Jiang, Y.H., Wang, G.C., et al., 2015. Side of the Jiangshan – Shaoxing Suture, South China: Geochronology, Geochemistry, Petrogenesis and Tectonic Implications. *Precambrian Research*, 268: 212–226.
- Ludwig, K.R., 2001. Isoplot/Ex (Version 2.49): The Geochronological Toolkit for Excel. University of California Berkeley, Berkeley Geochronology Center, Special Publication, Berkeley.
- Mao, J.W., Cheng, Y.B., Chen, M.H., et al., 2013a. Major Types and Time-Space Distribution of Mesozoic Ore Deposits in South China and Their Geodynamic Settings. *Mineralium Deposita*, 48(3): 267–294. <https://doi.org/10.1007/s00126-012-0446-z>
- Mao, J.R., Ye, H.M., Liu, K., et al., 2013b. The Indosimian Collision-Extension Event between the South China Block and the Palaeo-Pacific Plate: Evidence from Indosimian Alkaline Granitic Rocks in Dashuang, Eastern Zhejiang, South China. *Lithos*, 172–173: 81–97. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.04.004>
- Mao, J.W., Xie, G.Q., Guo, C.L., et al., 2008. Spatial-Temporal Distribution of Mesozoic Ore Deposits in South China and Their Metallogenic Settings. *Geological Journal of China Universities*, 14(4): 510–526 (in Chinese with English abstract).
- Pearce, J., 1996. Sources and Settings of Granitic Rocks. *Episodes*, 19(4): 120–125. <https://doi.org/10.18814/epiiugs/1996/v19i4/005>
- Qing, L., Jiang, Y.H., Du, F.G., 2020. Petrogenesis and Tectonic Significance of Early Indosimian A-Type Granites in the Xinxing Pluton, Southern South China. *Mineralogy and Petrology*, <https://doi.org/10.1007/S00710-020-00701-3>
- Shen, L.W., Yu, J.H., O'Reilly, S.Y., et al., 2018. Tectonic Switching of Southeast China in the Late Paleozoic. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123 (10): 8508–8526. <https://doi.org/10.1029/2018jb015520>
- Shi, Y., San, Y.H., Guo, Z.C., et al., 2019. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating and Hf Isotope Compositions of the Sillite from Ludong in Fuchuan, Northeastern Guangxi. *Journal of Guilin University of Technology*, 39(2): 291–300(in Chinese with English abstract).
- Shu, L.S., 2012. An Analysis of Principal Features of Tectonic Evolution in South China Block. *Geological Bulletin of China*, 31(7): 1035–1053(in Chinese with English abstract).
- Shu, L.S., Faure, M., Wang, B., et al., 2008. Late Palaeozoic-Early Mesozoic Geological Features of South China: Response to the Indosimian Collision Events in Southeast Asia. *Comptes Rendus Geoscience*, 340(2–3): 151–165. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2007.10.010>
- Shu, L.S., Zhou, X.M., Deng, P., et al., 2006. Principal Geological Features of Nanling Tectonic Belt, South China. *Geological Review*, 52(2): 251–265(in Chinese with English abstract).
- Shu, L.S., Zhou, X.M., Deng, P., et al., 2009. Mesozoic Tectonic Evolution of the Southeast China Block: New Insights from Basin Analysis. *Journal of Asian Earth Sciences*

- Sciences*, 34(3): 376–391. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2008.06.004>
- Sun, S.S., McDonough, W.F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313–345. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>
- Sylvester, P.J., 1998. Post-Collisional Strongly Peraluminous Granites. *Lithos*, 45(1–4): 29–44.
- Tang, L.M., Chen, H.L., Dong, C.W., et al., 2013. Middle Triassic Post-Orogenic Extension on Hainan Island: Chronology and Geochemistry Constraints of Bimodal Intrusive Rocks. *Science China Earth Sciences*, 56(5): 783–793(in Chinese).
- Wang, D.Z., Zhou, X.M., 2002. Origin of the Late Mesozoic Granitic Volcano Intrusive Complex Rocks and Crust Evolution in the Southeastern China. Science Press, Beijing(in Chinese).
- Wang, J.Q., Shu, L.S., Santosh, M., 2018a. Petrogenesis and Tectonic Significance of Late Mesozoic Granitic and Adakitic Rocks from Inland South China: Constraints from Geochemistry, Zircon U-Pb Geochronology and Hf Isotopes. *Journal of the Geological Society*, 175(4): 679–693. <https://doi.org/10.1144/jgs2017-081>
- Wang, K.X., Sun, T., Chen, P.R., et al., 2013a. The Geochronological and Geochemical Constraints on the Petrogenesis of the Early Mesozoic A-Type Granite and Diabase in Northwestern Fujian Province. *Lithos*, 179: 364–381.
- Wang, Q., Li, J.W., Jian, P., et al., 2005. Alkaline Syenites in Eastern Cathaysia (South China): Link to Permian-Triassic Transtension. *Earth and Planetary Science Letters*, 230(3–4): 339–354. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2004.11.023>
- Wang, Y.J., Fan, W.M., Zhang, G.W., et al., 2013b. Phanerozoic Tectonics of the South China Block: Key Observations and Controversies. *Gondwana Research*, 23(4): 1273–1305. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.02.019>
- Wang, Y.J., Qian, X., Cawood, P.A., et al., 2018b. Closure of the East Paleotethyan Ocean and Amalgamation of the Eastern Cimmerian and Southeast Asia Continental Fragments. *Earth-Science Reviews*, 186: 195–230. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.09.013>
- Whalen, J.B., Currie, K.L., Chappell, B.W., 1987. A-Type Granites: Geochemical Characteristics, Discrimination and Petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407–419. <https://doi.org/10.1007/BF00402202>
- Xia, Y., Xu, X.S., 2020. The Epilogue of Paleo-Tethyan Tectonics in the South China Block: Insights from the Triassic Aluminous A-Type Granitic and Bimodal Magmatism. *Journal of Asian Earth Sciences*, 190: 104129. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2019.104129>
- Xie, C.F., Zhu, J.C., Zhao, Z.J., et al., 2005. Zircon SHRIMP U-Pb Age Dating of Garnet-Acmite Syenite: Constraints on the Hercynian-Indosinian Tectonic Evolution of Hainan Island. *Geological Journal of China Universities*, 11 (1): 47–57 (in Chinese with English abstract).
- Xu, H.J., Ma, C.Q., Zhao, J.H., et al., 2014. Magma Mixing Generated Triassic I-Type Granites in South China. *The Journal of Geology*, 122(3): 329–351. <https://doi.org/10.1086/675667>
- Xu, X.B., Li, Q.M., Gui, L., et al., 2019. Early Mesozoic Tectonic Transition of the Eastern South China Block: Constraints from Late Triassic Dashuang Complex in Eastern Zhejiang Province. *International Geology Review*, 61(8): 997–1015. <https://doi.org/10.1080/00206814.2018.1490931>
- Xu, X.B., Tang, S., Lin, S.F., 2016. Paleostress Inversion of Fault-Slip Data from the Jurassic to Cretaceous Huangshan Basin and Implications for the Tectonic Evolution of Southeastern China. *Journal of Geodynamics*, 98: 31–52. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2016.03.013>
- Xu, X.B., Zhang, Y.Q., Jia, D., et al., 2009. Early Mesozoic Geotectonic Processes in South China. *Geology in China*, 36(3): 573–593 (in Chinese with English abstract).
- Yang, F., Feng, Z.H., Wang, Y.L., et al., 2016. LA-ICP-MS U-Pb Zircon Geochronology of Taibao Granite in Northwestern Guangdong. *Journal of Guilin University of Technology*, 36(1): 160–169 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, H.L., Gao, S., Dai, M.N., et al., 2008. Simultaneous Determinations of U-Pb Age, Hf Isotopes and Trace Element Compositions of Zircon by Excimer Laser-Ablation Quadrupole and Multiple-Collector ICP-MS. *Chemical Geology*, 247(1–2): 100–118
- Zhang, Y.Q., Xu, X.B., Jia, D., et al., 2009. Deformation Record of the Change from Indosinian Collision-Related Tectonic System to Yanshanian Subduction-Related Tectonic System in South China during the Early Mesozoic. *Earth Science Frontiers*, 16(1): 234–247 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, K.D., Jiang, S.Y., Chen, W.F., et al., 2013. Zircon U-Pb Chronology and Elemental and Sr-Nd-Hf Isotope

- Geochemistry of Two Triassic A-Type Granites in South China: Implication for Petrogenesis and Indosian Transtensional Tectonism. *Lithos*, 160–161:292–306.
- Zhou, X.M., Sun, T., Shen, W.Z., et al., 2006. Petrogenesis of Mesozoic Granitoids and Volcanic Rocks in South China: A Response to Tectonic Evolution. *Episodes*, 29(1): 26–33. <https://doi.org/10.18814/epiugs/2006/v29i1/004>
- Zhou, X.M., Li, W.X., 2000. Origin of Late Mesozoic Igneous Rocks in Southeastern China: Implications for Lithosphere Subduction and Underplating of Mafic Magmas. *Tectonophysics*, 326(3/4): 269–287. [https://doi.org/10.1016/s0040-1951\(00\)00120-7](https://doi.org/10.1016/s0040-1951(00)00120-7)
- Zhou, X.R., 1994. Hybridization in the Genesis of Granitoids. *Earth Science Frontiers*, 1(1–2): 87–97(in Chinese with English abstract).
- Zhu, J.C., Chen, J., Wang, R.C., et al., 2008. Early Yanshanian NE Trending Sn/W-Bearing A-Type Granites in the Western-Middle Part of the Nanling Mts Region. *Geological Journal of China Universities*, 14(4): 474–484(in Chinese with English abstract).
- 学及 Sr、Nd、Hf 同位素证据. 地球科学, 45(2):374–388.
- 李献华, 李武显, 李正祥, 2007. 再论南岭燕山早期花岗岩的成因类型与构造意义. 科学通报, 62(9): 981–991.
- 刘勇, 李廷栋, 肖庆辉, 等, 2010. 湘南宁远地区碱性玄武岩形成时代的新证据: 镓石 LA-ICP-MS U-Pb 定年. 地质通报, 29(6): 833–841.
- 刘勇, 李廷栋, 肖庆辉, 等, 2012. 湘南宜章地区辉绿岩、花岗斑岩、安山岩的形成时代和成因: 镓石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成. 地质通报, 31(9): 1363–1378.
- 鲁学悟, 冯佐海, 郭俊刚, 等, 2008. 南岭西段永和—太保花岗岩体的地球化学特征及其大地构造环境. 世界地质, 27(2): 156–163.
- 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 等, 2008. 华南地区中生代主要金属矿床时空分布规律和成矿环境. 高校地质学报, 14(4): 510–526.
- 时毓, 三元合, 郭智超, 等, 2019. 桂东北富川鲁洞辉绿玢岩 LA-ICP-MS 镓石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素组成. 桂林理工大学学报, 39(2): 291–300.
- 舒良树, 2012. 华南构造演化的基本特征. 地质通报, 31(7): 1035–1053.
- 舒良树, 周新民, 邓平, 等, 2006. 南岭构造带的基本地质特征. 地质论评, 52(2):251–265.
- 唐立梅, 陈汉林, 董传万, 等, 2013. 海南岛中三叠世造山后伸展作用: 双峰式侵入岩的年代学及地球化学制约. 中国科学(地球科学), 43(3): 433–445.
- 王德滋, 周新民, 2002. 中国东南部晚中生代花岗质火山—侵入杂岩成因与地壳演化. 北京:科学出版社.
- 谢才富, 朱金初, 赵子杰, 等, 2005. 三亚石榴霓辉石正长岩的镓石 SHRIMP U-Pb 年龄: 对海南岛海西—印支期构造演化的制约. 高校地质学报, 11(1): 47–57.
- 徐先兵, 张岳桥, 贾东, 等, 2009. 华南早中生代大地构造过程. 中国地质, 36(3): 573–593.
- 杨锋, 冯佐海, 汪钢龙, 等, 2016. 粤西北太保花岗岩体 LA-ICP-MS 镓石 U-Pb 年代学研究. 桂林理工大学学报, 36(1): 160–169.
- 张岳桥, 徐先兵, 贾东, 等, 2009. 华南早中生代从印支期碰撞构造体系向燕山期俯冲构造体系转换的形变记录. 地学前缘, 16(1): 234–247.
- 周瑜若, 1994. 花岗岩混合作用. 地学前缘, 1(1–2): 87–97.
- 朱金初, 陈骏, 王汝成, 等, 2008. 南岭中西段燕山早期北东向含锡钨 A 型花岗岩带. 高校地质学报, 14(4): 474–484.

## 附中文参考文献

- 陈江峰, 郭新生, 汤加富, 等, 1999. 中国东南地壳增长与 Nd 同位素模式年龄. 南京大学学报(自然科学版), 35(6): 649–658.
- 陈培荣, 华仁民, 章邦桐, 等, 2002. 南岭燕山早期后造山花岗岩类: 岩石学制约和地球动力学背景. 中国科学(D辑), 32(4): 279–289.
- 程顺波, 付建明, 崔森, 等, 2018. 湘桂边界越城岭岩基北部印支期花岗岩镓石 U-Pb 年代学和地球化学特征. 地球科学, 43(7):2330–2349.
- 郭锋, 范蔚茗, 林舸, 等, 1997. 湖南道县辉长岩包体的年代学研究及成因探讨. 科学通报, 42(15): 1661–1664.
- 洪大卫, 郭文歧, 李戈晶, 等, 1987. 福建沿海晶洞花岗岩带的岩石学和成因演化. 北京:北京科学技术出版社.
- 蒋少涌, 赵葵东, 姜耀辉, 等, 2008. 十杭带湘南—桂北段中生代 A 型花岗岩带成岩成矿特征及成因讨论. 高校地质学报, 14(4): 496–509.
- 金鑫镖, 王磊, 向华, 等, 2017. 湖南桃江地区印支期辉绿岩成因: 地球化学、年代学和 Sr-Nd-Pb 同位素约束. 地质通报, 36(5):750–760.
- 李剑锋, 付建明, 马昌前, 等, 2020. 南岭九嶷山地区砂子岭岩体成因与构造属性: 来自镓石 U-Pb 年代学、岩石地球化