

https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.030



# 苏门答腊岛北部 Takengon 早志留世 S 型花岗片麻岩 年代学、地球化学特征及构造意义

徐 畅<sup>1,2</sup>, 王岳军<sup>1,2</sup>, 钱 鑫<sup>1,2\*</sup>, 张玉芝<sup>1,2</sup>, 余小清<sup>1,2</sup>

1. 中山大学地球科学与工程学院, 广东省地球动力作用与地质灾害重点实验室, 广东广州 510275  
2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东珠海 519000

**摘 要:** 苏门答腊岛位于巽他大陆西南缘, 被中苏门答腊构造带分隔为东、西苏门答腊两地体. 其中东苏门答腊地体的基底年龄和构造归属均未得到很好地约束. 在东苏门答腊北部 Takengon 地区新识别出的花岗片麻岩进行了锆石 U-Pb 年代学、原位 Hf 同位素和全岩地球化学研究. 年代学结果表明该套花岗片麻岩的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为  $442 \pm 5 \text{ Ma}$  (MSWD = 1.03), 代表其结晶年龄. 锆石的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  介于 -1.3 至 -7.8 之间. 地球化学研究表明, 样品富  $\text{SiO}_2$  (69.97%~74.30%) 和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (13.90%~15.93%), 相对贫  $\text{TiO}_2$  (0.48%~0.61%)、 $\text{MgO}$  (0.54%~0.93%) 和  $\text{CaO}$  (0.11%~0.25%). 样品具高的 A/CNK 值 (2.58~3.06) 和 CIPW 刚玉体积百分含量 (10.0%~11.4%), 具有 S 型花岗岩的特征. 其轻重稀土分异明显, 富集 LILE (Rb、Th、U), 亏损 HFSE (Nb、Ta、Ti). 地球化学研究表明 Takengon 花岗片麻岩是变沉积岩部分熔融形成的. 该套花岗片麻岩的发现证实了在东苏门答腊地块发育有前志留世基底岩石, 其形成与原特提斯洋的演化有关.

**关键词:** 花岗片麻岩; 早志留世; 苏门答腊; 原特提斯; 锆石年代学; 锆石 Hf 同位素; 地球化学.

中图分类号: P545

文章编号: 1000-2383(2020)06-2077-14

收稿日期: 2019-12-21

## Geochronological and Geochemical Characteristics of Early Silurian S-Type Granitic Gneiss in Takengon Area of Northern Sumatra and Its Tectonic Implications

Xu Chang<sup>1,2</sup>, Wang Yuejun<sup>1,2</sup>, Qian Xin<sup>1,2\*</sup>, Zhang Yuzhi<sup>1,2</sup>, Yu Xiaoqing<sup>1,2</sup>

1. Guangdong Provincial Key Lab of Geodynamics and Geohazards, School of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China  
2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519000, China

**Abstract:** Sumatra Island is located in the southwestern margin of the Sundaland, and is divided into East/West Sumatra by the Medial Sumatran Zone. While East Sumatran basement affinity and tectonic evolution are not well defined. The Early Paleozoic granitic gneisses have been identified from the East Sumatra Terrane, with providing zircon U-Pb age, in-situ Hf isotopic and geochemical results. Geochronological result yields a  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  mean age of  $442 \pm 5 \text{ Ma}$  (MSWD = 1.03), representing the crystalline age. Zircon  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  values range from -1.3 to -7.8. The whole-rock geochemical characteristics show that our samples

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (Nos.41830211, U1701641); 国家重点研发计划项目 (No.2016YFC0600303); 广东省基础与应用基础研究基金 (Nos.2018B030312007, 2019B1515120019).

**作者简介:** 徐畅 (1996-), 男, 硕士研究生, 从事岩石大地构造和岩石地球化学的研究. ORCID: 0000-0001-9590-9329. E-mail: xuch33@mail2.sysu.edu.cn

\* 通讯作者: 钱鑫, E-mail: qianx3@mail.sysu.edu.cn

**引用格式:** 徐畅, 王岳军, 钱鑫, 等. 2020. 苏门答腊岛北部 Takengon 早志留世 S 型花岗片麻岩年代学、地球化学特征及构造意义. 地球科学, 45 (6): 2077-2090.

are characterized by high  $\text{SiO}_2$  (69.97%–74.30%) and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (13.90%–15.93%), but poor in  $\text{TiO}_2$  (0.48%–0.61%),  $\text{MgO}$  (0.54%–0.93%) and  $\text{CaO}$  (0.11%–0.25%). These samples have high A/CNK (2.58–3.06) and CIPW-normalized corundum (10.0%–11.4%), similar to those of the S-type granite. They have obvious fractionation between LREEs and HREEs. These samples are characterized by enrichment in LILEs (Rb, Th, U) and depletion in HFSEs (Nb, Ta, Ti). The geochemical results indicate that the Takengon granitic gneisses are originated from the partial melting of the meta-sediments during the evolution of the Prototethyan Ocean. This study confirms the existing of Early Silurian basement rocks in the East Sumatra Terrane, which were related to the Prototethyan evolution.

**Key words:** granitic gneiss; Early Silurian; Sumatra; prototethyan; zircon U-Pb geochronology; zircon Hf isotopes; geochemistry.

## 0 引言

东南亚地区众多块体的构造属性及相互之间的拼合历史一直是特提斯—环南海构造地质学研究的热点 (Barber and Crow, 2009; Wang *et al.*, 2018). 自古生代起这些地块从冈瓦纳大陆北缘逐次裂离, 并随着特提斯洋的演化, 在中生代时期逐步拼贴于欧亚大陆的南缘 (如, Wang *et al.*, 2013, 2016; 解超明等, 2019). 已有的研究表明, 特提斯洋的演化存在原、古、新三个阶段 (如 Zhong *et al.*, 1998; Wang *et al.*, 2018), 其中古特提斯和新特提斯构造演化的研究较多, 并认识到古特提斯缝合带从青藏高原腹地的龙木错—双湖向东南延伸至昌宁—孟连—因他暖—文冬—劳勿地区 (图 1a; 如 Qian *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2016, 2018; Zhang *et*

*al.*, 2016), 而拉萨地体南部的印度河—雅鲁藏布缝合带则被认为是新特提斯主缝合带 (如 Metcalfe, 1996). 但相对于古特提斯和新特提斯的研究, 对原特提斯构造演化的研究相对较少. 原特提斯洋被认为是特提斯演化历史中最早的一期大洋, 在早古生代存在于冈瓦纳超大陆北缘并可能存在多个分支洋盆 (如 Stampfli *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2013; Zhao *et al.*, 2018). 前人研究发现, 在青藏高原及其东缘和东南亚地区普遍发育有一期早古生代晚期的构造—岩浆事件 (如, Chen *et al.*, 2007; Liu *et al.*, 2009; 董美玲等, 2012; 李再会等, 2012; 林仕良等, 2012; 刘琦胜等, 2012; 熊昌利等, 2012; Zhang *et al.*, 2012; 蔡志慧等, 2013; Wang *et al.*, 2013; 邢晓婉等, 2015; 康欢等, 2016; Shi *et al.*, 2016; 崔晓琳等, 2017). 这次事件被认为和原特提斯洋的俯冲闭合有

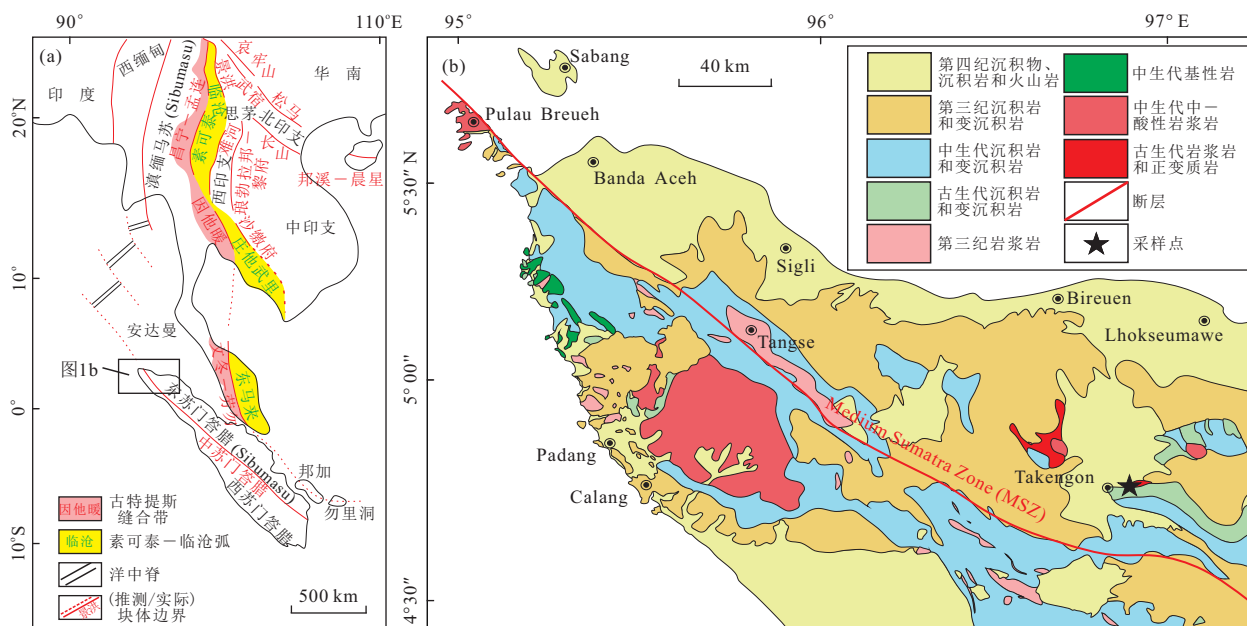


图 1 区域构造简图(a)和苏门答腊北部地质简图与采样点位置(b)

Fig.1 Simplified geological map with tectonic frame of the region (a) and simplified geological map of northern Sumatra (b)

据 Wang *et al.* (2016, 2018) 修改

关(Wang *et al.*, 2013; Zhao *et al.*, 2018). 目前, 对于原特提斯洋主缝合带的位置还未能很好地界定, 但原特提斯洋的存在已被学者们证实(Metcalf, 1996; Yin and Harrison, 2000; Wang *et al.*, 2013; Zhao *et al.*, 2018). 在昆仑—三江地区发现的残余洋壳和活动大陆边缘岩石组合被认为属于原特提斯洋的残余(如 Yin and Harrison, 2000), 以及在滇缅泰板块内零星报道有与原特提斯洋演化有关的岩浆和变质记录(如 Chen *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2013; 邢晓婉等, 2015). 但是对这些岩浆岩的研究仍然不够, 对东南亚地区的南部, 如苏门答腊是否存在原特提斯地质记录仍鲜有报道(Metcalf, 2000), 东南亚地区原特提斯洋的演化及延伸仍是亟待解决的问题. 苏门答腊岛位于巽他大陆西南缘, 介于印度—澳大利亚板块和欧亚大陆之间(图 1a), 其基底被认为是一套石炭—二叠纪的沉积岩或浅变质沉积岩, 是特提斯构造域的延伸(Booi *et al.*, 2008; Zhang *et al.*, 2018), 但是缺少岩浆岩及基底属性研究. 最近, 我们的野外地质调查发现, 在苏门答腊岛北部的 Takengon 地区识别出了一套花岗片麻岩(图 1b), 通过对其系统的锆石 U-Pb 年代学和 Lu-Hf 同位素及全岩主—微量元素研究, 得出其为早志留世 S 型花岗岩. 以此为依据, 结合区域地质资料认为其代表了原特提斯地质记录, 这为原特提斯构造域的向南延伸提供重要依据.

## 1 地质背景与样品描述

苏门答腊岛是印度尼西亚最西侧的岛屿, 位于马来半岛以南、印度洋以东. 现有的地质资料显示: 苏门答腊岛被中苏门答腊构造带(MSZ) 分为东苏门答腊地体(EST) 和西苏门答腊地体(WST). 东

苏门答腊地体出露了与滇缅泰板块相似的下二叠统冰碛含砾泥岩和与冈瓦纳具有亲缘性的冷水动物化石, 因此被认为是滇缅泰板块的一部分(Barber and Crow, 2009).

现有研究表明, 苏门答腊晚古生代沉积地层的碎屑锆石发育 ~510 Ma、~590 Ma、~935 Ma、~1 070 Ma、~1 170 Ma、~1 700 Ma 和 ~2 500 Ma 的年龄峰值, 类似滇缅泰、拉萨、西缅甸和西澳大利亚地块(Zhang *et al.*, 2018). 地理上苏门答腊岛向北与泰国普吉岛可以连接, 也反映其可能属于滇缅泰的一部分. 但滇缅泰板块由显生宙沉积岩、岩浆岩和变质岩组成, 其岩浆岩继承锆石和沉积碎屑锆石的研究推测该地块可能具有太古宙陆核和前寒武纪基底(Zhang *et al.*, 2018). 然而, 在苏门答腊地区目前仅在钻孔资料中发现有疑似泥盆纪的地层出露(Barber and Crow, 2009), 区域出露最古老的岩浆岩被认为是晚古生代的火山岩系(Barber and Crow, 2009), 未发现前石炭纪的地层或岩浆岩. 因此其基底被认为是一套石炭—二叠纪的石英岩、硅质岩、页岩及片岩组合(Zhang *et al.*, 2018). 其中石炭系地层为打努巴里群, 其下段为砂页岩, 中段为灰岩, 上段为伯赫洛克组含砾泥岩和冰碛岩(Barber, 2000). 打努巴里群可以和马来西亚兰卡威岛的辛哈群、泰国西部的普吉群和印度尼西亚班达楠榜的古高卡斯杂岩相对应. 二叠系彭汗群与下伏石炭系呈角度不整合关系, 其下段为一套含火山岩夹层的砂岩、页岩、灰岩, 中段为灰岩, 上段为含燧石的砂岩、页岩. 中生界沃伊拉群与下伏地层呈平行不整合接触, 主要为侏罗系—下白垩统, 其下段为含蛇纹岩、枕状熔岩、硅质岩和硬砂岩的推覆体, 中段为礁灰岩, 上段为中—酸性火山岩(McCarthy *et al.*, 2001). 苏门答腊岛报道的岩浆岩 K-Ar 年龄主要为

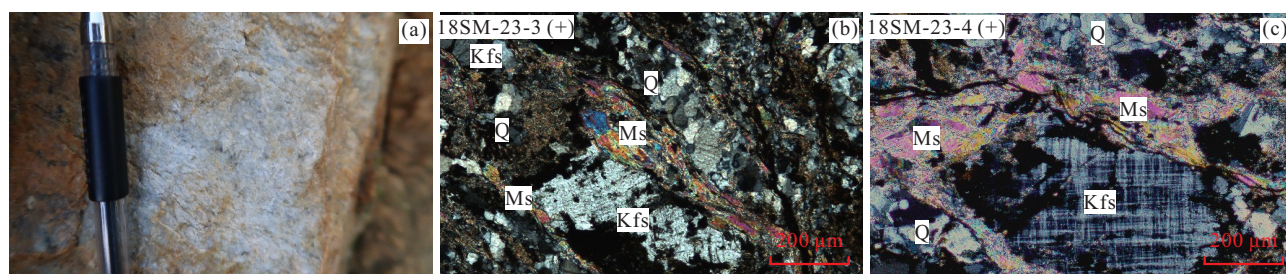


图2 苏门答腊 Takengon 花岗片麻岩样品野外照片(a)和显微照片(b, c)

Fig.2 Outcrop (a) and microphotographic photos (b, c) of granitic gneissic samples from Takengon in Sumatra

Q. 石英; Kfs. 钾长石; Ms. 白云母



海西期(290~256 Ma)火山岩、印支—燕山早期(224~180 Ma)火山/侵入岩、燕山晚期(149~146 Ma)火山岩、喜山早期(60~48 Ma)火山/侵入岩、喜山中期(24~15 Ma)火山/侵入岩以及喜山晚期(<6 Ma)火山岩。

本文采样点位于印度尼西亚苏门答腊岛北部亚齐特别行政区 Takengon 地区(图 1b)。野外观察为灰白色花岗片麻岩,具片麻状构造、线理和面理发育(图 2a)。镜下观察其主要矿物有石英(~51%)、长石(~35%)和白云母(~12%),副矿物可见磁铁矿和绢云母等,其中石英大多具波状消光,发生膨突或亚颗粒旋转重结晶(图 2b),可见旋转的长石斑晶和拉长云母,以及细小的石英、长石和云母的定向排列(图 2c)。

## 2 分析方法

选取新鲜的样品进行年代学和 Hf 同位素测试。锆石的挑选采用传统的重液法和磁选法,在双目镜下挑选出无裂隙、无包体、透明干净的锆石颗粒,将其粘贴在环氧树脂靶上,并抛光至露出锆石中心。用透反射光照片和阴极发光(CL)照片观察锆石内部结构。锆石的 CL 照片在中山大学地球科学与工程学院拍摄,采用 Carl Zeiss Sigma™ 场发射扫描电子显微镜完成。锆石原位 U-Pb 同位素、Hf 同位素和微量元素含量测试在中山大学地球科学与工程学院广东省地球动力作用与地质灾害重点实验室完成。锆石 U-Pb 定年分析和微量元素测定所采用的仪器包括 iCAP RQ 型电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)和 GeolasHD 型 193 nm ArF 激光剥蚀系统。实验过程中激光束斑直径 32 μm,频率 5 Hz,详细的分析测试过程见 Wang *et al.*(2020)。采用标准锆石 91500 (1 062.4±0.6 Ma; Wiedenbeck *et al.*, 1995)和 Plešovice (337.13±0.37 Ma; Sláma *et al.*, 2008)进行 U-Pb 同位素分馏校正,<sup>29</sup>Si 作为内标,采用玻璃标准物质 NIST 610 进行微量元素校正。数据的离线处理采用 Glitter4.4.5 进行(Griffin *et al.*, 2008),谐和图、均值年龄图的绘制采用 Isoplot 完成(Ludwig, 2001)。锆石原位 Lu-Hf 同位素分析所用仪器由 NeptunePlus 型多接收电感耦合等离子体质谱(MC-ICP-MS)和 GeolasHD 型 193 nm ArF 激光剥蚀系统组成。激光束斑直径和频率分别为 44 μm 和 6 Hz,详细的分析流程类似于 Hu *et al.*(2012)。采用标准锆石 91500 校正同位素的分馏效应,标准锆石 Plešovice

监控仪器。采用 <sup>172</sup>Yb 和 <sup>175</sup>Lu 扣除 <sup>176</sup>Hf 的同质异位素 <sup>176</sup>Yb 和 <sup>176</sup>Lu 的干扰。分别使用 <sup>176</sup>Yb/<sup>172</sup>Yb=0.588 6(Chu *et al.*, 2002)和 <sup>176</sup>Lu/<sup>175</sup>Lu=0.026 56(de Bièvre and Taylor, 1993)进行校正。计算  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值的各项参数中,<sup>176</sup>Lu 的衰变常数采用  $1.867 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ (Scherer *et al.*, 2001),现今球粒陨石的 <sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf 和 <sup>176</sup>Lu/<sup>177</sup>Hf 值分别采用 0.282 772 和 0.033 2(Blichert-Toft and Albarede, 1997),亏损地幔的 <sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf 采用 0.283 25(Vervoort and Blichert-Toft, 1999);二阶段模式年龄计算中,平均地壳的 <sup>176</sup>Lu/<sup>177</sup>Hf 值采用 0.015, $f_{\text{cc}}$  采用 -0.55(Griffin *et al.*, 2002)。

选取代表性样品进行全岩主微量元素测试。将样品粉碎至 200 目待测。全岩主量元素测试在中山大学地球科学与工程学院广东省地球动力作用与地质灾害重点实验室完成,采用 ARL Perform'X 4200 型 X 射线荧光光谱仪(XRF)进行测试。使用熔片法,将烘干后的样品与硼酸锂混合熔剂称量至坩埚中,加入饱和碘化铵(NH<sub>4</sub>I)溶液,在铂金坩埚中加热至 1 050 °C 共熔制成熔片,熔片方法参考 Claisse and Blanchette(2007),分析精度优于 5%。详细的实验方法见 Wang *et al.*(2020)。全岩微量元素前处理测试在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室进行,将样品在 1:1 混合的 HF 和 HNO<sub>3</sub> 溶液中 185 °C 消解 3 天,蒸干后再加入 HNO<sub>3</sub> 溶液消解 8 小时。微量元素溶液分析在中山大学地球科学与工程学院广东省地球动力作用与地质灾害重点实验室完成,采用 Thermo Scientific™ iCAP RQ ICP-MS 进行测试,分析精度优于 10%。详细的测试流程见 Wang *et al.*(2020)。

## 3 测试结果

### 3.1 锆石 U-Pb 年代学和 Lu-Hf 同位素组成

本文对样品(18SM-23-3)选取了 30 颗锆石进行 LA-ICP-MS 定年测试。锆石呈透明至半透明、无色至浅褐色、自形至半自形,长度大致在 50~150 μm 之间,可见明显的震荡环带。少数锆石存在核一边结构(图 3)。锆石 U-Pb 年代学测试结果见附表 1,锆石元素测试结果见附表 2。30 个锆石分析点的年龄谐和图见图 4a,其中 22 个年龄谐和分析点的 <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄介于 422~444 Ma,加权平均年龄为 442 ± 5 Ma(MSWD = 1.03),代表其结晶年龄。其 Th/U 值介于 0.03~0.66,大部分大于 0.10(图

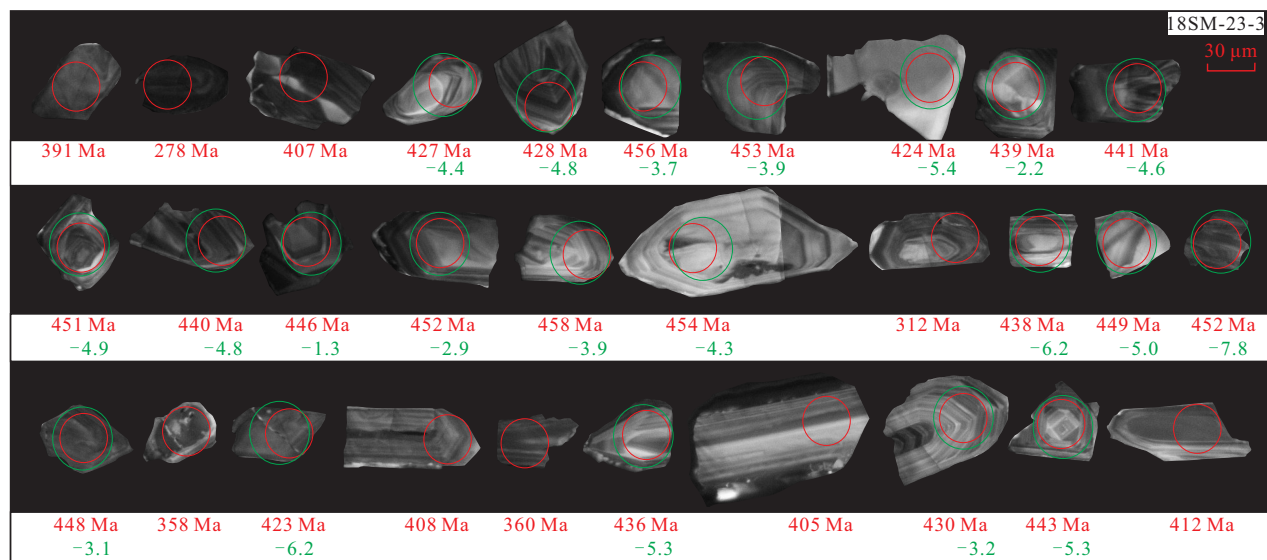


图3 苏门答腊 Takengon 花岗片麻岩代表性锆石颗粒的阴极发光图像及其  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄和  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值

Fig.3 Cathodoluminescence (CL) image of representative zircon grains with their  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  ages and  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  values from the Takengon granitic gneissic samples in Sumatra

4b). 在锆石稀土元素球粒陨石标准化图解中(图4c), 绝大部分锆石具显著的Ce正异常和Pr及Eu的负异常, 呈亏损的轻稀土元素(LREE)的左倾型, 具典型的岩浆岩锆石的配分特点. 对其中21个谐和测试点进行了锆石原位的Lu-Hf同位素分析(图3), 分析数据见附表3. 其中 $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值范围分别为0.0525 64~0.141 751和0.001 868~0.004 844.  $f_{\text{Lu}/\text{Hf}}$ 介于-0.94至-0.85, 平均值为-0.91.  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化于-1.3至-7.8, 二阶模式年龄 $T_{\text{DM}2}$ 介于1.5~1.9 Ga.

### 3.2 全岩地球化学特征

样品矿物组合在镜下显示出一定的定向排列, 指示了样品发生过后期的变形变质作用, 但是无明显的矿物相变, 因此, 可以利用样品的全岩主微量元素数据来反映样品的地球化学特征. 样品的全岩主微量元素分析结果见表1. 样品富 $\text{SiO}_2$ (69.97%~74.30%), 具较高的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量(13.90%~15.93%), 相对贫 $\text{TiO}_2$ (0.48%~0.61%)、 $\text{MgO}$ (0.54%~0.93%) 和 $\text{CaO}$ (0.11%~0.25%). 样品的烧失量(LOI)与REE、Y、Zr和Hf含量无明显相关关系, 而Zr含量与Y、Yb、Nb、La、Th含量均呈正相关关系(表1), 表明岩石未遭受明显的后期低温蚀变作用. 样品的CIPW标准矿物计算表明, 样品主要含石英(体积百分含量, 54.3%~62.2%)、正长石(体积百分含量, 25.1%~30.5%)、刚玉(体积百分含量,

10.0%~11.4%), QAP图解投在了富石英花岗岩类区域(图5a). 样品的A/CNK值介于2.58~3.06, 属强过铝质花岗岩. 样品在 $\text{CaO}-\text{FeO}^{\text{T}}+\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ 图解中归为S型花岗岩类(图5b). 此外, 样品在 $\text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO}-10\,000\times\text{Ga}/\text{Al}$ 图解和 $10\,000\times\text{Ga}/\text{Al}-(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})$ 图解中也都落入非A型花岗岩区内(图5c, 5d).

全岩REE球粒陨石标准化图解中(图6a), 样品都表现出显著的右倾特征, 总稀土元素含量达 $56\times 10^{-6}\sim 230\times 10^{-6}$ , 轻重稀土分异明显,  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}=4.94\sim 8.43$ ,  $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}=1.14\sim 1.47$ , Eu负异常显著( $\text{Eu}/\text{Eu}^*=0.35\sim 0.44$ ). 在不相容元素原始地幔标准化图解中(图6b), 样品呈现富集大离子亲石元素和亏损高场强元素(HFSE), Nb、Ta、Ti等负异常明显, Zr和Hf亏损不明显. 其配分型式与早古生代(~490 Ma)喜马拉雅和滇西北花岗质岩石相类似(图6a, 6b).

## 4 讨论

### 4.1 岩石成因

样品的锆石多为自形一半自形且具有明显的震荡环带, REE配分特征与典型岩浆岩类似. Watson *et al.* (2006)归纳了锆石中Ti与其形成温度之间对应关系, 并广泛被用于岩浆岩特别是运用于中一

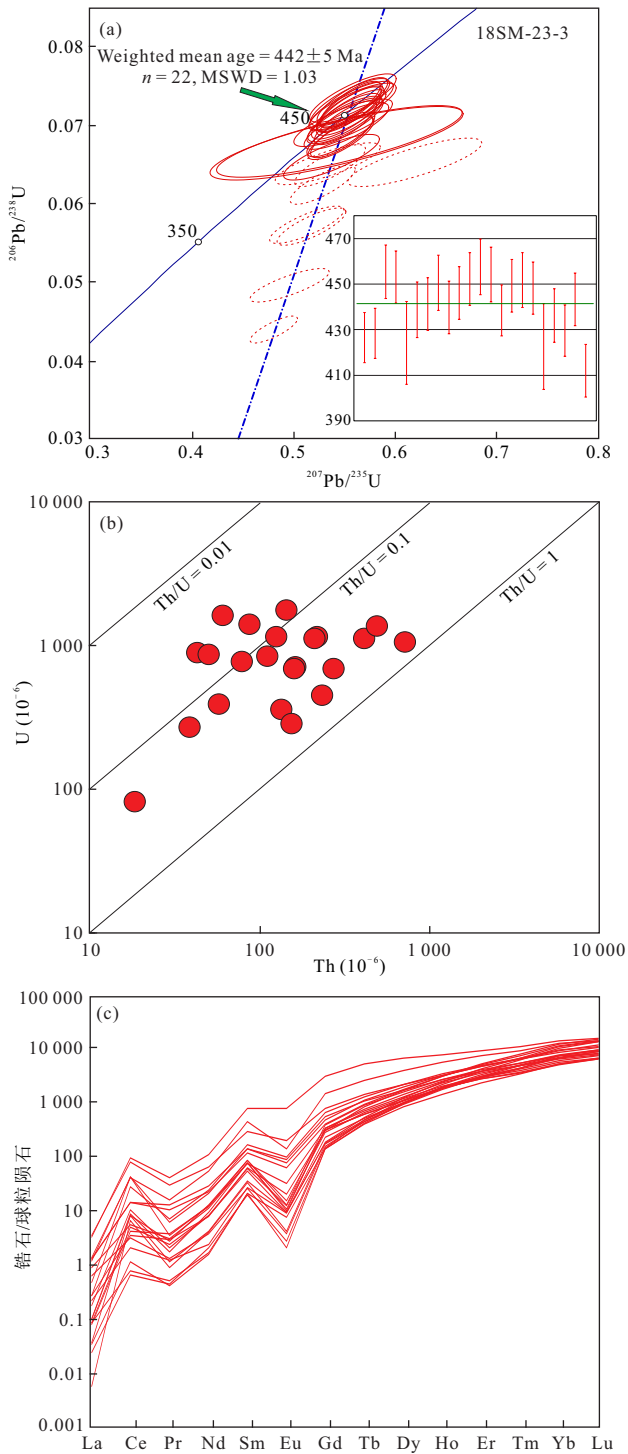


图4 Takengon 花岗片麻岩的锆石 U-Pb 年龄谐和图和加权平均年龄图(a)、锆石 U-Th 图解(b)和锆石稀土元素球粒陨石标准化图解(c)

Fig.4 Concordia and weighted mean age diagram of zircon U versus Pb data (a), Th-U diagram of zircon trace elements data (b) and chondrite-normalized REE diagram of zircons (c) for the representative samples of Takengon granitic gneissic

表 1 苏门答腊 Takengon 花岗片麻岩样品全岩主量元素 (%)和微量元素( $10^{-6}$ )分析结果

Table 1 Major and trace elements analytical results for the Takengon granitic gneissic samples in Sumatra

样品号	18SM-23-3	18SM-23-4	18SM-23-5	18SM-23-6	18SM-23-7
SiO <sub>2</sub>	71.80	69.97	70.12	74.30	71.14
TiO <sub>2</sub>	0.53	0.61	0.48	0.58	0.53
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.62	15.76	13.93	13.90	15.26
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>T</sup>	3.54	3.80	5.20	3.65	3.65
MnO	0.04	0.05	0.06	0.02	0.07
MgO	0.61	0.85	0.93	0.54	0.55
CaO	0.18	0.24	0.25	0.11	0.17
Na <sub>2</sub> O	0.10	0.10	0.10	0.02	0.09
K <sub>2</sub> O	4.77	4.68	4.25	3.97	4.79
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.15	0.17	0.15	0.07	0.15
LOI	3.44	3.62	3.83	3.08	3.58
Total	99.80	99.85	99.31	100.24	99.97
A/CNK	2.58	2.77	2.66	3.06	2.70
A/NK	2.71	2.98	2.89	3.20	2.85
Sc	8.04	10.1	8.40	8.57	7.74
V	48.0	60.0	45.0	51.0	48.0
Cr	18.0	22.0	17.0	36.0	16.0
Co	4.63	5.57	5.36	7.12	4.99
Ni	4.62	5.55	7.18	5.81	5.16
Ga	18.9	23.8	18.5	19.7	19.8
Rb	167	202	167	147	173
Sr	27.2	14.0	27.1	52.3	24.0
Y	26.1	35.2	31.9	28.8	32.8
Zr	207	229	201	238	202
Nb	13.2	16.6	12.2	13.9	13.4
Cs	8.70	11.6	12.6	5.03	7.00
Ba	634	539	598	711	554
La	32.4	33.2	28.8	46.0	45.1
Ce	66.4	70.2	60.1	94.6	91.1
Pr	8.29	8.81	7.62	11.8	11.4
Nd	31.3	33.7	28.9	44.4	42.1
Sm	5.89	6.88	5.96	7.97	8.23
Eu	0.84	0.88	0.88	0.88	1.04
Gd	5.43	6.54	5.78	6.94	7.30
Tb	0.91	1.16	1.00	1.08	1.19
Dy	5.39	7.19	6.05	6.04	6.86
Ho	1.11	1.52	1.29	1.25	1.39
Er	3.31	4.58	3.95	3.77	4.10
Tm	0.54	0.72	0.64	0.58	0.63
Yb	3.51	4.73	4.18	3.91	4.12
Lu	0.53	0.74	0.65	0.59	0.61
Hf	7.46	8.40	7.11	8.66	7.28
Ta	1.32	1.60	1.24	1.17	1.40
Pb	2403	2737	3041	1239	1316
Th	16.5	18.0	15.7	13.6	16.1
U	3.41	3.31	2.78	3.48	2.33

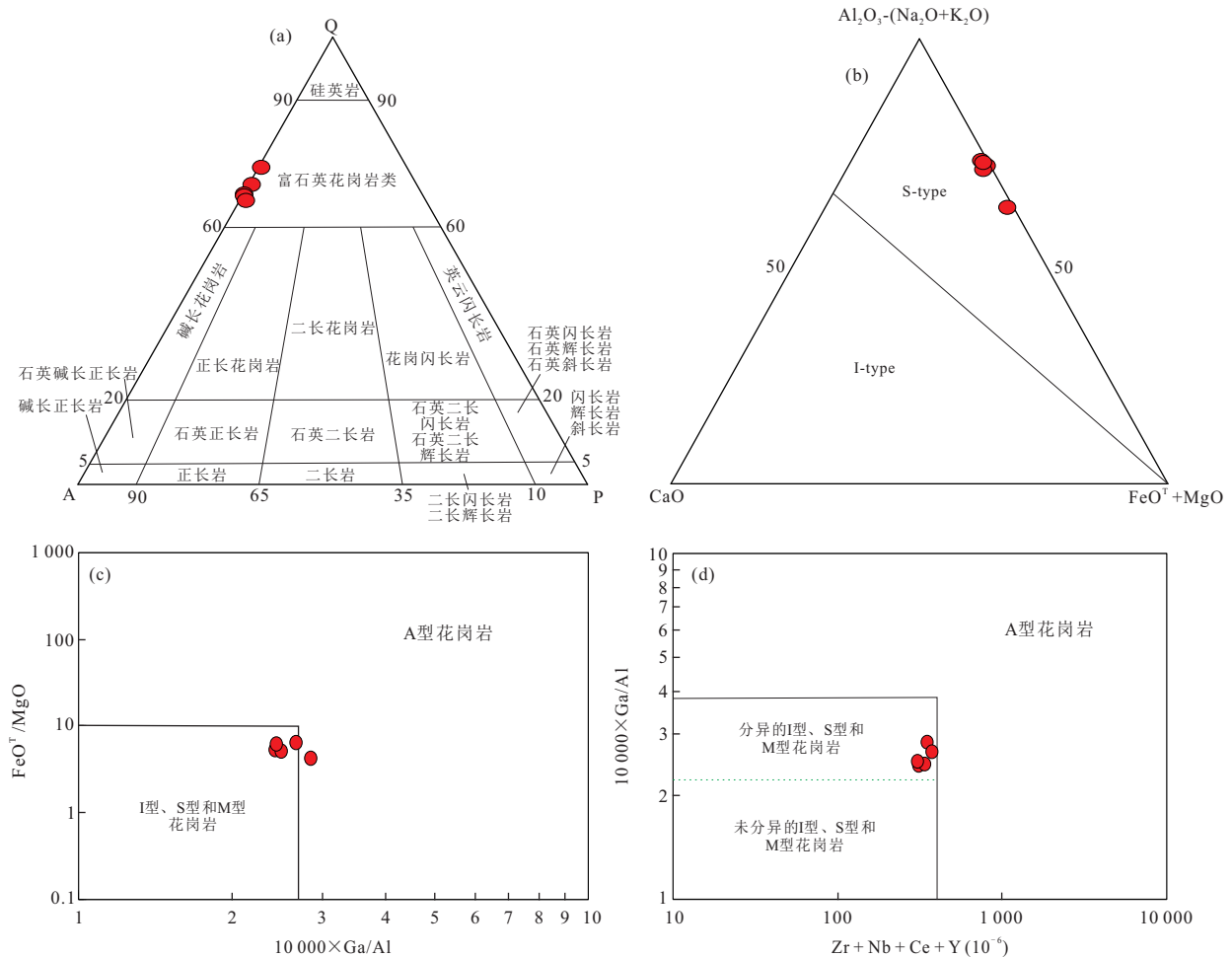


图 5 苏门答腊 Takengon 花岗片麻岩样品的 QAP 图解(a)、CaO-FeO<sup>T</sup>+MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)图解(b)、FeO<sup>T</sup>/MgO-10 000×Ga/Al 图解(c)和 10000×Ga/Al-(Zr+Nb+Ce+Y)图解(d)

Fig. 5 QAP diagram (a), CaO-FeO<sup>T</sup>+MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O) diagram (b), FeO<sup>T</sup>/MgO-10 000×Ga/Al diagram (c) and 10 000×Ga/Al-(Zr+Nb+Ce+Y) diagram (d) diagrams for the Takengon granitic gneissic samples in Sumatra

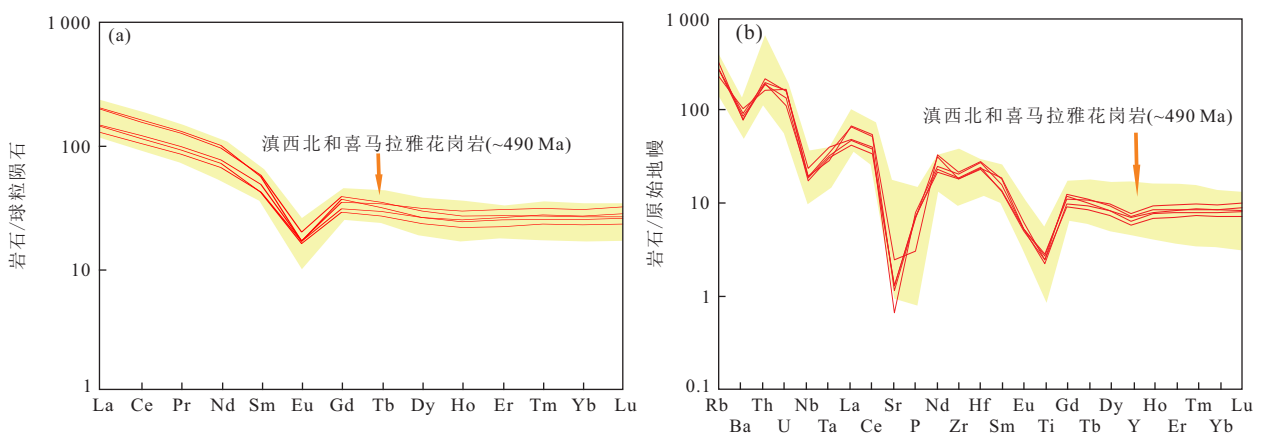


图 6 苏门答腊 Takengon 花岗片麻岩的稀土元素球粒陨石标准化配分图(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)

Fig. 6 The patterns of the chondrite-normalized REE diagram (a) and primitive mantle-normalized trace elements spidergram (b) for the Takengon granitic gneissic in Sumatra

球粒陨石标准化数据据 Sun and McDonough(1989);原始地幔标准化数据据 Taylor and McLennan(1985);滇西北和喜马拉雅早古生代花岗岩数据据 Chen *et al.*(2007),张泽明等(2008),Liu *et al.*(2009),时超等(2010)和 Zhang *et al.*(2012)



酸性岩浆岩的形成温度的计算,被称为锆石 Ti 温度计. 使用 22 个谐和年龄点的锆石 Ti 温度计计算出成岩温度平均值为 740 °C, 大致与典型 S 型花岗岩的形成温度相同, 可以代表其成岩温度. 锆石 CL 图中明显的自形一半自形特征和未见磨圆、LA-ICP-MS  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄较为集中(图 4a)、薄片下自形的钾长石斑晶等均暗示其为长英质正片麻岩而非副片麻岩. 此外, 样品较高的白云母含量、铝饱和指数(2.58~3.06)、CIPW 中刚玉体积百分含量高(10.0%~11.4%), 均指示其为 S 型花岗质岩石.

过铝质 S 型花岗岩的成因通常被认为是贫铝岩浆的分离结晶或地壳(变)沉积岩或(变)火成岩的深熔作用形成的(如 Sylvester, 1998; 马超等, 2019). Takengon 花岗片麻岩样品具较高的  $\text{K}_2\text{O}$  含量(3.97%~4.79%), 且  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  值远大于 1. 样品较低的 Sr、Ba 含量暗示了变泥质岩或沉积岩中的白云母脱水熔融过程. 此外, 样品富  $\text{SiO}_2$  (69.97%~74.30%), 贫  $\text{TiO}_2$  (0.48%~0.61%) 和  $\text{MgO}$  (0.54%~0.93%),  $\text{A}/\text{CNK}$  远大于 1.1(2.58~3.06), 富集 Rb、Th、U 等元素, 亏损 Nb、Ta、Ti、Sr 等元素(图 6b). 这些特征结合负的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值(-1.3~-7.8)均表明该套 S 型花岗岩为变沉积岩部分熔融形成的(Sylvester, 1998; Wang *et al.*, 2013, 2016; 邢晓婉等, 2015).

变沉积岩部分熔融形成的过铝质 S 型花岗质岩石可以通过全岩  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 、Rb/Sr 和 Rb/Ba 值等指标判别其源区性质. 滇西北和青藏腹地早古生代的花岗质岩石大多具有较高的  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  值、Rb/

Sr 值和 Rb/Ba 值(Chen *et al.*, 2007; 张泽明等, 2008; Liu *et al.*, 2009; 时超等, 2010; Zhang *et al.*, 2012). 在 Rb/Sr-Rb/Ba 图解中(图 7a), 我们的样品大部分落入富粘土贫斜长石的页岩衍生熔体源区, 类似喜马拉雅强过铝质花岗岩. 这种特征通常指示变沉积岩为主的源区在较低温度下发生部分熔融的过程(如 Sylvester, 1998). 本文使用同属东基梅里陆块的南羌塘上地壳沉积岩 REE 含量代替源区成分. 使用批式部分熔融模型代表熔融过程. 利用 Hanson(1980) 给出的沉积岩源区矿物平均组分及分配系数进行计算. 具体公式为:

$$C_i/C_o = 1/(D_o + F(1-D_o)), \quad (1)$$

式(1)中  $C_i$  和  $C_o$  分别代表熔体和源区中的元素浓度,  $D_o$  代表源区的总分配系数,  $F$  代表熔融程度. 模拟计算结果见图 7b. 结果表明, Takengon 花岗质岩石可由上地壳沉积岩发生 30%~40% 部分熔融形成. 前人在滇缅泰板块识别出的早古生代花岗质岩石均具有负的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值, 且具有较为古老的 Hf 二阶段模式年龄(大多介于 1.5~2.0 Ga), 综合指示了滇缅泰板块的早古生代花岗质岩石可能由古-中元古代的地壳岩石再造形成(图 8). Zhang *et al.* (2018) 分析了苏门答腊晚古生代碎屑锆石的年代学和 Hf 同位素数据, 发现其二阶段模式年龄均指向了一个 1.1~3.0 Ga 的地幔源区. 上述特征均指示了区域早古生代岩浆作用并没有新生幔源物质的参与. 综合上述特征判断, Takengon 花岗片麻岩的原岩可能是上地壳富粘土贫斜长石的沉积岩发生中-低比例的部分熔融所形成的过铝质 S 型花岗质岩石.

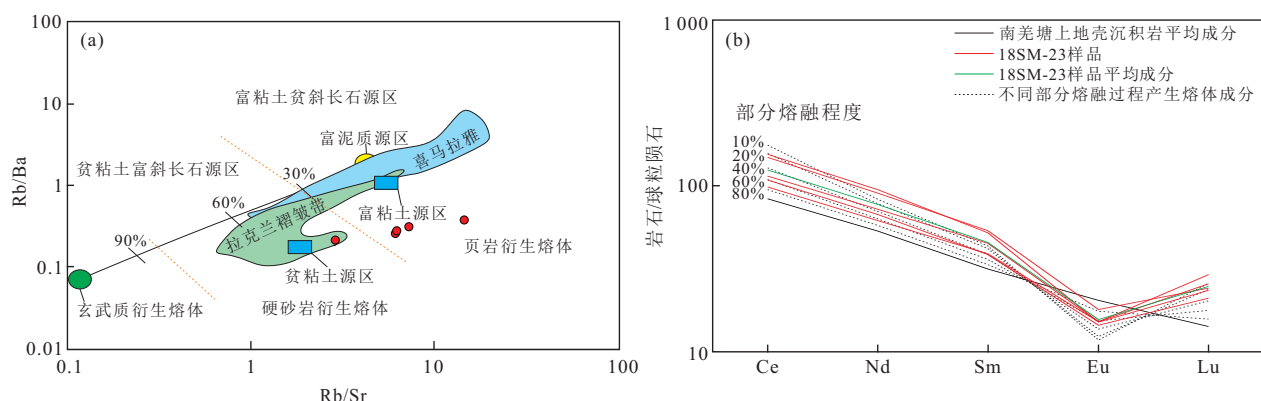


图 7 苏门答腊 Takengon 花岗片麻岩样品的 Rb/Sr-Rb/Ba 图解(a)和稀土元素部分熔融模拟(b)

Fig. 7 Rb/Sr versus Rb/Ba (a) and simulation of partial melting for REE (b) for the Takengon granitic gneissic samples in Sumatra

Lachlan 褶皱带和喜马拉雅强过铝花岗岩数据和端元混合曲线据 Sylvester (1998); 南羌塘平均上地壳沉积岩数据据 Gao *et al.* (1998), 元素配分系数和矿物含量百分比数据据 Hanson (1980); (a)中底图转引自 Wang *et al.* (2016)



4.2 构造意义

Zhang *et al.* (2018) 对苏门答腊岛碎屑锆石的研究给出了~510 Ma、~590 Ma、~935 Ma、~1070 Ma、~1 170 Ma、~1 700 Ma 和~2 500 Ma 等多个年龄峰值,说明苏门答腊岛很可能存在着前寒武纪的结晶基底(Zhang *et al.*, 2018). 但是目前的研究还未发现前石炭纪的岩石出露,因此苏门答腊岛的基底通常被认为是一套石炭—二叠纪的变质岩(Booi *et al.*, 2008; Barber and Crow, 2009; Zhang *et al.*, 2018). 苏门答腊 Takengon 花岗片麻岩样品的 LA-ICP-MS 锆石 <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 加权平均年龄为 442±5 Ma (MSWD=1.03),首次证实了在东苏门答腊地体北部存在有由(变)沉积岩部分熔融而成的早志留世 S 型花岗片麻岩,同时也证实了苏门答腊岛的基底

并非以往所认为的石炭—二叠系 S 型花岗岩可形成于板内、岛弧、同碰撞/碰撞后等多种构造背景. 苏门答腊 Takengon 花岗片麻岩样品的全岩 REE 球粒陨石标准化图解表现出显著右倾特征(图 6a),具 Eu 负异常 (Eu/Eu\* = 0.35~0.44). 样品富集 LILE、亏损 HFSE (图 6b), (Hf/Sm)<sub>PM</sub> = 1.27~1.82, 与弧岩浆类似. 苏门答腊 Takengon 花岗片麻岩为强过铝质的 S 型花岗质岩石,也具负的 ε<sub>Hf</sub>(t) 值 (-1.3~-7.8) 和较老的二阶模式年龄 (T<sub>DM2</sub> = 1.5~1.9 Ga) (图 6a、6b 和图 8),明显不同于含有中基性岩浆残余矿物(角闪石等)和较低的 A/CNK 值 (通常小于 1.1) 的 I 型花岗岩和与弧相关的酸性岩浆岩.

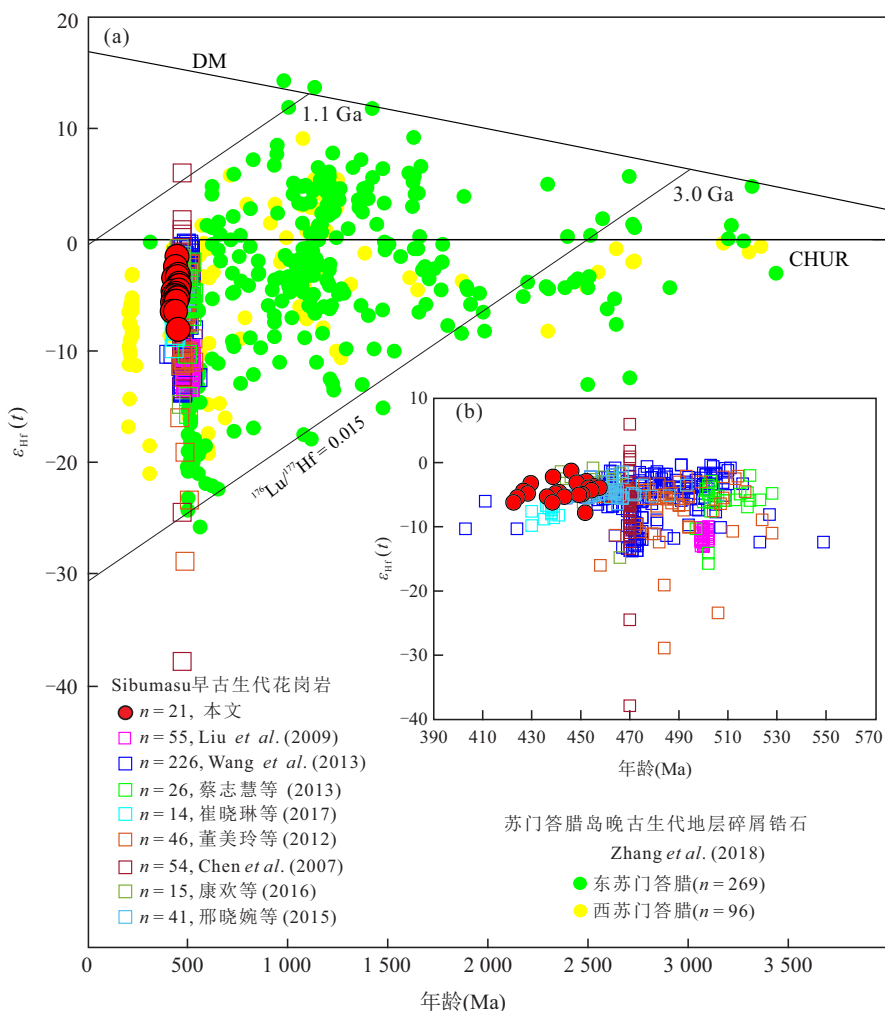


图 8 苏门答腊 Takengon 花岗片麻岩的锆石 ε<sub>Hf</sub>(t)-年龄图解(a,b)

Fig. 8 Zircon ε<sub>Hf</sub>(t) versus age diagram of Takengon granitic gneiss in Sumatra (a, b)

苏门答腊碎屑锆石数据据 Zhang *et al.* (2018); 滇缅泰板块早古生代花岗质岩石数据据 Chen *et al.* (2007); Liu *et al.* (2009); 董美玲等 (2012); Wang *et al.* (2013); 蔡志慧等 (2013); 邢晓婉等 (2015); 康欢等 (2016); 崔晓琳等 (2017)

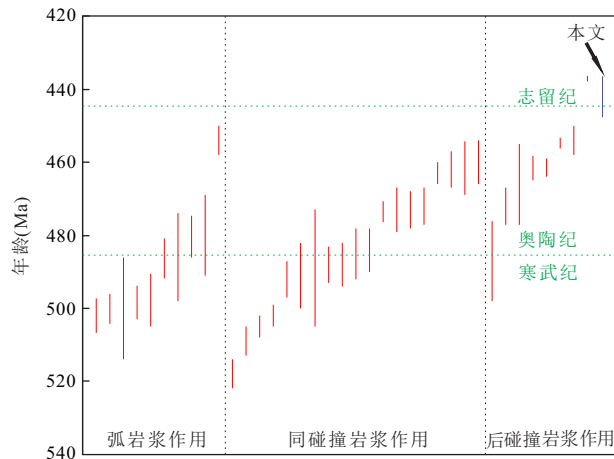


图9 滇缅泰板块早古生代花岗质岩石年龄及构造背景

Fig. 9 Summary of age and tectonic settings data of the Early Paleozoic granitic rocks in the Sibumasu block

图中数据参考文献见 Chen *et al.* (2007); Liu *et al.* (2009); 董美玲等 (2012); 李再会等 (2012); 刘琦胜等 (2012); 熊昌利等 (2012); Wang *et al.* (2013); 蔡志慧等 (2013); 邢晓婉等 (2015); Shi *et al.* (2016); 康欢等 (2016); 崔晓琳等 (2017)

早古生代时期,印支板块、北美塘地体、南美塘地体、拉萨地体、西缅甸地体和滇缅泰板块等都位于冈瓦纳大陆的北缘 (Wang *et al.*, 2013; Zhao *et al.*, 2018). 而随着原特提斯洋的俯冲及闭合,在上述板块均保留了原特提斯有关的地质记录 (如, Chen *et al.*, 2007; Liu *et al.*, 2009; 董美玲等, 2012; 蔡志慧等, 2013; Wang *et al.*, 2013; 邢晓婉等, 2015; 康欢等, 2016; 崔晓琳等, 2017). 近年来,在青藏高原腹地 (主要是羌塘地体、拉萨地体和喜马拉雅地体)、北印度、尼泊尔和滇缅泰板块相继识别出了寒武纪和奥陶纪的花岗质岩石 (如, Chen *et al.*, 2007; 董美玲等, 2012; 刘琦胜等, 2012; Zhang *et al.*, 2012; 康欢等, 2016), 及同期的花岗片麻岩 (如李再会等, 2012; 林仕良等, 2012; Wang *et al.*, 2013; 邢晓婉等, 2015; 崔晓琳等, 2017), 且上述区域均可见寒武—奥陶系地层和上覆地层间的角度不整合现象 (如, Brookfield, 1993). 而这一些的研究均反映出这些区域存在一次广泛的早古生代构造—岩浆事件. 一些学者认为该次事件可能是~570~520 Ma 泛非造山事件的响应 (如许志琴等, 2005; 林仕良等, 2012). 但是滇缅泰板块识别出的早古生代花岗质岩石形成的年龄集中在 520~435 Ma, 与~570~520 Ma 的造山事件缺乏时间上的相关性. 此外, 青藏高原南部到滇缅泰板块出露有寒武纪玄武质凝灰岩、玄武

岩、安山岩和酸性火山岩 (Brookfield, 1993). 如印度西北部高喜马拉雅 496 ± 14 Ma 的基性岩显示为汇聚边界背景 (Miller *et al.*, 2001); 拉萨地体申扎晚寒武世双峰式火山岩指示其为主动大陆边缘相关背景 (计文化等, 2009); 保山地块下奥陶统底砾岩之下覆盖的公养河群镁铁质熔岩呈弧火山岩特征 (如杨学俊等, 2012); 保山地块 473.0 ± 3.8 Ma 和 444.0 ± 4.0 Ma 辉长岩显示弧后盆地背景 (Wang *et al.*, 2012). Wang *et al.* (2013) 统计了冈瓦纳北缘早古生代花岗质岩石的成岩年龄和相关变质岩的变质年龄, 发现年龄谱系自西向东逐渐变年轻. 这可能暗示了原特提斯洋在早古生代时期具有剪刀式的俯冲—闭合过程. 也有一些学者认为上述镁铁质岩石和同期花岗岩都指示在冈瓦纳北缘存在一个约 490 Ma 与原特提斯洋的俯冲闭合有关的安第斯型活动大陆边缘 (Chen *et al.*, 2007; 张泽明等, 2008; Liu *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2012; 蔡志慧等, 2013; Wang *et al.*, 2013). 我们对滇缅泰板块识别出的早古生代花岗质岩石的形成年龄进行的统计结果如图 9 所示. 这些数据表明滇缅泰板块上述花岗质岩石的年龄集中在 510~435 Ma, 结合区域地质情况, 可分为弧花岗岩 (510~480 Ma)、同碰撞花岗岩 (500~460 Ma) 和后碰撞花岗岩 (470~440 Ma) (图 9), 而苏门答腊 Takengon 花岗片麻岩大致处在后碰撞花岗岩集中的年龄范围内, 暗示其可能形成于后碰撞背景. 上述特征表明, 从青藏高原到滇西、缅甸直至苏门答腊, 绵延数千公里的特提斯构造域内存在着一次显著的早古生代构造—岩浆事件. 研究认为, 在后碰撞伸展背景下, 由于加厚的岩石圈拆沉和软流圈底侵可以导致岩石圈热界面升高, 上部岩石发生部分熔融可以形成花岗质岩石 (Huang *et al.*, 2019). 综合上述证据表明, 苏门答腊 Takengon 花岗片麻岩可以类比于滇缅泰板块同时代花岗质岩浆岩, 其形成可能并非孤立岩浆事件, 很可能是东冈瓦纳北缘早古生代原特提斯洋俯冲—闭合过程中地壳 (变沉积岩) 部分熔融产物.

## 5 结论

(1) 苏门答腊 Takengon 花岗片麻岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 442 ± 5 Ma, 代表了其结晶年龄, 首次证实在苏门答腊岛存在志留纪的岩浆作用.

(2) 苏门答腊 Takengon 花岗片麻岩具高的铝饱

和指数(2.58~3.06) 和高的 CIPW 刚玉体积百分含量(10.0%~11.4%),其地球化学属性类似于 S 型花岗质岩石。

(3)苏门答腊 Takengon 地区的 S 型花岗片麻岩可能是早古生代东冈瓦纳北缘原特提斯洋俯冲-闭合过程中地壳(变沉积岩)部分熔融产物。

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

致谢:感谢广州海洋地质调查局的张立敏博士在野外工作中提供的帮助。感谢中国科学院地球化学研究所的胡静高级工程师、中山大学的甘成势、王玉琨和杨雪博士在实验分析中提供的帮助。两位审稿人和编辑部老师给出了详细且富有建设性的意见,使得本文质量得以提高,在此衷心感谢。

## References

- Barber, A. J., 2000. The Origin of the Woyla Terranes in Sumatra and the Late Mesozoic Evolution of the Sundaland Margin. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18(6): 713—738. [https://doi.org/10.1016/s1367-9120\(00\)00024-9](https://doi.org/10.1016/s1367-9120(00)00024-9)
- Barber, A. J., Crow, M. J., 2009. Structure of Sumatra and Its Implications for the Tectonic Assembly of Southeast Asia and the Destruction of Paleotethys. *Island Arc*, 18(1): 3—20.
- Blichert-Toft, J., Albarede, F., 1997. The Lu-Hf Geochemistry of Chondrites and the Evolution of the Mantle-Crust System. *Earth and Planetary Science Letters*, 148(1—2): 243—258.
- Booi, M., van Waveren, I. M., van Konijnenburg-van Cittert, J. H. A., et al., 2008. New Material of Macraethopteris from the Early Permian Jambi Flora (Middle Sumatra, Indonesia) and Its Palaeoecological Implications. *Review of Palaeobotany and Palynology* 152(3—4): 101—112. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2008.04.009>
- Brookfield, M. E., 1993. The Himalayan Passive Margin from Precambrian to Cretaceous Times. *Sedimentary Geology*, 84(1—4): 1—35. [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(93\)90042-4](https://doi.org/10.1016/0037-0738(93)90042-4)
- Cai, Z. H., Xu, Z. Q., Duan, X. D., et al., 2013. Early Stage of Early Paleozoic Orogenic Event in Western Yunnan Province, Southeastern Margin of Tibet Plateau. *Acta Petrologica Sinica*, 29(6): 2123—2140(in Chinese with English abstract).
- Chen, F. K., Li, X. H., Wang, X. L., et al., 2007. Zircon Age and Nd-Hf Isotopic Composition of the Yunnan Tethyan Belt, Southwestern China. *International Journal of Earth Sciences*, 96: 1179—1194.
- Chu, N. C., Taylor, R. N., Chavagnac, V., et al., 2002. Hf Isotope Ratio Analysis Using Multi-Collector Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry: An Evaluation of Isobaric Interference Corrections. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 17(12): 1567—1574. <https://doi.org/10.1039/b206707b>
- Claissé, F., Blanchette, J. S., 2007. Physics and Chemistry of Borate Fusion for X Ray Fluorescence Spectroscopists. East China University of Science and Technology Press, Shanghai(in Chinese).
- Cui, X. L., Deng, J., Zhang, D., et al., 2017. Chronological and Geochemical Characteristics of the Early Silurian Metamorphic Granites in Tengchong Block, Western Yunnan and Their Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 33(7): 2085—2098(in Chinese with English abstract).
- de Bievre, P., Taylor, P. D. P., 1993. Table of the Isotopic Compositions of the Elements. *International Journal of Mass Spectrometry and Ion Processes*, 123(2): 149—166. [https://doi.org/10.1016/0168-1176\(93\)87009-h](https://doi.org/10.1016/0168-1176(93)87009-h)
- Dong, M. L., Dong, G. C., Mo, X. X., et al., 2012. Geochronology and Geochemistry of the Early Palaeozoic Granitoids in Baoshan Block, Western Yunnan and Their Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 28(5): 1453—1464(in Chinese with English abstract).
- Gao, S., Luo, T. C., Zhang, B. R., et al., 1998. Chemical Composition of the Continental Crust as Revealed by Studies in East China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(11): 1959—1975. [https://doi.org/10.1016/s0016-7037\(98\)00121-5](https://doi.org/10.1016/s0016-7037(98)00121-5)
- Griffin, W. L., Powell, W. J., Pearson, N. J., et al., 2008. GLITTER: Data Reduction Software for Laser Ablation ICP-MS Laser Ablation-ICP-MS in the Earth Sciences. *Mineralogical Association of Canada, Short Course Series*, 40: 204—207.
- Griffin, W. L., Wang, X., Jackson, S. E., et al., 2002. Zircon Chemistry and Magma Mixing, SE China: In Situ Analysis of Hf Isotopes, Tonglu and Pingtan Igneous Complexes. *Lithos*, 61(3—4): 237—269. [https://doi.org/10.1016/s0024-4937\(02\)00082-8](https://doi.org/10.1016/s0024-4937(02)00082-8)
- Hanson, G. N., 1980. Rare Earth Elements in Petrogenetic Studies of Igneous Systems. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 8(1): 371—406. <https://doi.org/10.1146/annurev.ea.08.050180.002103>
- Hu, Z. C., Liu, Y. S., Gao, S., et al., 2012. Improved In Situ Hf Isotope Ratio Analysis of Zircon Using Newly Designed X Skimmer Cone and Jet Sample Cone in Combination with the Addition of Nitrogen by Laser Ablation Multiple Collector ICP-MS. *Journal of Analytical Atomic*

- Spectrometry*, 27(9):1391–1399.
- Huang, C.W., Li, H., Lai, C.K., 2019. Genesis of the Binh Do Pb-Zn Deposit in Northern Vietnam: Evidence from H-O-S-Pb Isotope Geochemistry. *Journal of Earth Science*, 30(4):679–688.
- Ji, W.H., Chen, S.J., Zhao, Z.M., et al., 2009. Discovery of the Cambiran Volcanic Rocks in the Xainza Area, Gangdese Orogenic Belt, Tibet, China and Its Significance. *Geological Bulletin of China*, 28(9):1350–1354 (in Chinese with English abstract).
- Kang, H., Li, D.P., Chen, Y.L., et al., 2016. Origin and Tectonic Implications of the Early Paleozoic High-Si Granite in the Eastern Baoshan Block, Yunnan. *Geoscience*, 30(5):1026–1037 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z.H., Lin, S.L., Cong, F., et al., 2012. U-Pb Ages of Zircon from Metamorphic Rocks of the Gaoligongshan Group in Western Yunnan and Its Tectonic Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 28(5):1529–1541 (in Chinese with English abstract).
- Lin, S.L., Cong, F., Gao, Y.J., et al., 2012. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Age of Gneiss from Gaoligong Mountain Group on the Southeastern Margin of Tengchong Block in Western Yunnan Province. *Geological Bulletin of China*, 31(2–3):258–263 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Q.S., Ye, P.S., Wu, Z.H., 2012. SHRIMP Zircon U-Pb Dating and Petrogeochemistry of Ordovician Granite Bodies in the Southern Segment of Gaoligong Mountain, Western Yunnan Province. *Geological Bulletin of China*, 31(2–3):250–257 (in Chinese with English abstract).
- Liu, S., Hu, R.Z., Gao, S., et al., 2009. U-Pb Zircon, Geochemical and Sr-Nd-Hf Isotopic Constraints on the Age and Origin of Early Palaeozoic I-Type Granite from the Tengchong-Baoshan Block, Western Yunnan Province, SW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 36(2–3):168–182. [https://doi.org/10.1016/s0016-7037\(98\)00121-5](https://doi.org/10.1016/s0016-7037(98)00121-5)
- Ludwig, K.R., 2001. Using Isoplot/EX, Version 2.49: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronological Center Special Publication, Berkeley, 1–55.
- Ma, C., Tang, Y.J., Ying, J.F., 2019. Magmatism in Subduction Zones and Growth of Continental Crust. *Earth Science*, 44(4):1128–1142 (in Chinese with English abstract).
- McCarthy, A.J., Jasin, B., Haile, N.S., 2001. Middle Jurassic Radiolarian Chert, Indarung, Padang District, and Its Implications for the Tectonic Evolution of Western Sumatra, Indonesia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 119(1–2):31–44. [https://doi.org/10.1016/s1367-9120\(00\)00009-2](https://doi.org/10.1016/s1367-9120(00)00009-2)
- Metcalf, I., 1996. Gondwanaland Dispersion, Asian Accretion and Evolution of Eastern Tethys. *Journal of the Geological Society of Australia*, 43(6):605–623.
- Metcalf, I., 2000. The Bentong-Raub Suture Zone. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18(6):691–712. [https://doi.org/10.1016/s1367-9120\(00\)00043-2](https://doi.org/10.1016/s1367-9120(00)00043-2)
- Miller, C., Thoni, M., Frank, W., et al., 2001. The Early Palaeozoic Magmatic Event in the Northwest Himalaya, India: Source, Tectonic Setting and Age of Emplacement. *Geological Magazine*, 138(3):237–251. <https://doi.org/10.1017/s0016756801005283>
- Qian, X., Wang, Y.J., Feng, Q.L., et al., 2016. Petrogenesis and Tectonic Implication of the Late Triassic Post-Collisional Volcanic Rocks in Chiang Khong, NW Thailand. *Lithos*, 248–251:418–431. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.01.024>
- Scherer, E., Munker, C., Mezger, K., 2001. Calibration of the Lutetium-Hafnium Clock. *Science*, 293:1766–1766.
- Shi, C., Li, R.S., He, S.P., et al., 2010. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating for Gneissic Garnet-Bearing Biotite Granodiorite in the Yadong Area, Southern Tibet, China and Its Geological Significance. *Geological Bulletin of China*, 29(12):1745–1753 (in Chinese with English abstract).
- Shi, Y.R., Lawford, A.J., Wu, Z.H., et al., 2016. Age and Origin of Early Paleozoic and Mesozoic Granitoids in Western Yunnan Province, China: Geochemistry, SHRIMP Zircon Ages, and Hf-in-Zircon Isotopic Compositions. *Journal of Geology*, 24(5):617–630.
- Sláma, J., Kostler, J., Condon, D.J., et al., 2008. Plešovice: A New Natural Reference Material for U-Pb and Hf Isotopic Analysis. *Chemical Geology*, 249(1–2):1–35. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.11.005>
- Stampfli, G.M., Hochard, C., Vèrard, C., et al., 2013. The Formation of Pangea. *Tectonophysics*, 593:1–19. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.02.037>
- Sun, 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. [https://doi.org/10.1016/s0024-4937\(98\)00024-3](https://doi.org/10.1016/s0024-4937(98)00024-3)
- Taylor, S.R., McLennan, S.M., 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Oxford Press Blackwell, Oxford.



- Vervoort, J.D., Blichert-Toft, J., 1999. Evolution of the Depleted Mantle: Hf Isotope Evidence from Juvenile Rocks through Time. *Geochimica et Cosmochimica*, 63(3-4): 553-556. [https://doi.org/10.1016/s0016-7037\(98\)00274-9](https://doi.org/10.1016/s0016-7037(98)00274-9)
- Wang, Y.J., Yang, T.X., Zhang, Y.Z., et al., 2020. Late Paleozoic Back-Arc Basin in the Indochina Block: Constraints from the Mafic Rocks in the Nan and Luang Prabang Tectonic Zones, Southeast Asia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 195: 104333. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2020.104333>
- Wang, Q., Zhu, D.C., Zhao, Z.D., et al., 2012. Magmatic Zircons from I-, S- and A-Type Granitoids in Tibet: Trace Element Characteristics and Their Application to Detrital Zircon Provenance Study. *Journal of Asian Earth Sciences*, 53:59-66.
- Wang, Y.J., He, H.Y., Cawood, P.A., et al., 2016. Geochronological, Elemental and Sr-Nd-Hf-O Isotopic Constraints on the Petrogenesis of the Triassic Post-Collisional Granitic Rocks in NW Thailand and Its Paleotethyan Implications. *Lithos*, 266-267: 264-286. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.09.012>
- Wang, Y.J., Qian, X., Cawood, P.A., et al., 2018. 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>
- Wang, Y.J., Xing, X.W., Cawood, P.A., et al., 2013. Petrogenesis of Early Paleozoic Peraluminous Granite in the Sibumasu Block of SW Yunnan and Diachronous Accretionary Orogenesis along the Northern Margin of Gondwana. *Lithos*, 182-183:67-85.
- Watson, E.B., Wark, E.D.A., Thomas, E.J.B., 2006. Crystallization Thermometers for Zircon and Rutile. *Contrib Mineral Petrol*, 151:413-433.
- Wiedenbeck, M., Alle, P., Corfu, F., et al., 1995. Three Natural Zircon Standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, Trace Element and REE Analyses. *Geost and Newslett*, 19(1):1-23.
- Xie, C.M., Song, Y.H., Wang, M., et al., 2019. Age and Provenance of Sumdo Formation in Central Gangdise, Tibetan Plateau: Detrital Zircon U-Pb Geochronological Evidence. *Earth Science*, 44(7):2224-2233(in Chinese with English abstract).
- Xing, X.W., Zhang, Y.Z., Wang, Y.J., et al., 2015. Zircon U-Pb Geochronology and Hf Isotopic Composition of the Ordovician Granitic Gneisses in Ximeng Area, West Yunnan Province. *Geotectonica et Metallogenia*, 39(3): 470-480(in Chinese with English abstract).
- Xiong, C.L., Jia, X.C., Yang, X.J., et al., 2012. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating of Ordovician Mengmao Monzogranite in Longling Area of Western Yunnan Province and Its Tectonic Setting. *Geological Bulletin of China*, 31(2-3):277-286(in Chinese with English abstract).
- Xu, Z.Q., Yang, J.S., Liang, F.H., et al., 2005. Pan-African and Early Paleozoic Orogenic Events in the Himalaya Terrane: Inference from SHRIMP U-Pb Zircon Ages. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1):1-12(in Chinese with English abstract).
- Yang, X.J., Jia, X.C., Xiong, C.L., et al., 2012. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Age of Metamorphic Basic Volcanic Rock in Gongyanghe Group of Southern Gaoligong Mountain, Western Yunnan Province, and Its Geological Significance. *Geological Bulletin of China*, 31(2-3):264-276 (in Chinese with English abstract).
- Yin, A., Harrison, T.M., 2000. Geologic Evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen. *Annual Review of Earth Planetary Science*, 28(1):211-280. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.28.1.211>
- Zhang, X.R., Chung, S.L., Lai, Y.M., et al., 2018. Detrital Zircons Dismember Sibumasu in East Gondwana. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(7): 6098-6110. <https://doi.org/10.1029/2018jb015780>
- Zhang, Y.Z., Wang, Y.J., Srithai, B., et al., 2016. Petrogenesis for the Chiang Dao Permian High-Iron Basalt and Its Implication on the Paleotethyan Ocean in NW Thailand. *Journal of Earth Science*, 27(3): 425-434. <https://doi.org/10.1007/s12583-015-0646-4>
- Zhang, Z.M., Dong, X., Santosh, M., et al., 2012. Petrology and Geochronology of the Namche Barwa Complex in the Eastern Himalayan Syntaxis, Tibet: Constraints on the Origin and Evolution of the North-Eastern Margin of the Indian Craton. *Gondwana Research*, 21(1):123-137. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2011.02.002>
- Zhang, Z.M., Wang, J.L., Shen, K., et al., 2008. Paleozoic and Geochronology of the Namche Barwa Complex in the Eastern Himalayan Syntaxis, Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 24(7): 1627-1637(in Chinese with English abstract).
- Zhao, G.C., Wang, Y.J., Huang, B.C., et al., 2018. Geological Reconstructions of the East Asian Blocks: From the Break up of Rodinia to the Assembly of Pangea. *Earth-Science Reviews*, 186:262-286.
- Zhong, D.L., Wu, G.Y., Ji, J.Q., et al., 1998. Discovery of the Ophiolite in Southeastern Yunnan, China. *Chinese Science Bulletin*, 43:1365-1370.

## 附中文参考文献

- 蔡志慧,许志琴,段向东,等,2013.青藏高原东南缘滇西早古生代早期造山事件.岩石学报,29(6):2123-2140.
- Claisse, F., Blanchette, J.S., 2007. 硼酸盐熔融的物理与化学: 献给 X 射线荧光光谱学工作者. 上海: 华东理工大学出版社.
- 崔晓琳,邓军,张铎,等,2017.滇西腾冲地块高黎贡山群早志留世变质花岗岩体的年代学、地球化学特征及意义.岩石学报,33(7):2085-2098.
- 董美玲,董国臣,莫宣学,等,2012.滇西保山地块早古生代花岗岩类的年代学、地球化学及意义.岩石学报,28(5):1453-1464.
- 计文化,陈守建,赵振明,等,2009.西藏冈底斯构造带申扎一带寒武系火山岩的发现及其地质意义.地质通报,28(9):1350-1354.
- 康欢,李大鹏,陈岳龙,等,2016.云南保山东缘早古生代高 Si 花岗岩的成因及构造意义.现代地质,30(5):1026-1037.
- 李再会,林仕良,丛峰,等,2012.滇西高黎贡山群变质岩的锆石年龄及其构造意义.岩石学报,28(5):183-195.
- 林仕良,丛峰,高永娟,等,2012.滇西腾冲地块东南缘高黎贡山群片麻岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义.地质通报,31(2-3):258-263.
- 刘琦胜,叶培盛,吴中海,2012.滇西高黎贡山南段奥陶纪花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年和地球化学特征.地质通报,31(2-3):250-257.
- 马超,汤艳杰,英基丰,2019.俯冲带岩浆作用与大陆地壳生长.地球科学,44(4):1128-1142.
- 时超,李荣社,何世平,等,2010.藏南亚东地区片麻状含石榴子石黑云花岗闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年及其地质意义.地质通报,29(12):1745-1753.
- 解超明,宋宇航,王明,等,2019.冈底斯中部松多岩组形成时代及物源:来自碎屑锆石 U-Pb 年代学证据.地球科学,44(7):2224-2233.
- 邢晓婉,张玉芝,王岳军,等,2015.西盟地区奥陶纪花岗岩片麻岩的锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素组成特征及其大地构造意义.大地构造与成矿学,39(3):470-480.
- 熊昌利,贾小川,杨学俊,等,2012.滇西龙陵地区勐冒奥陶纪二长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其构造环境.地质通报,31(2-3):277-286.
- 许志琴,杨经绥,梁凤华,等,2005.喜马拉雅地体的泛非—早古生代造山事件年龄记录.岩石学报,21(1):1-12.
- 杨学俊,贾小川,熊昌利,等,2012.滇西高黎贡山南段公养河群变质基性火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义.地质通报,31(2-3):264-276.
- 张泽明,王金丽,沈昆,等,2008.环东冈瓦纳大陆周缘的古生代造山作用:东喜马拉雅构造结南迦巴瓦岩群的岩石学和年代学证据.岩石学报,24(7):1627-1637.