

https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.191



北羌塘宁多地区三叠纪过铝质花岗岩的成因及其地球动力学背景

刘彬^{1,2}, 徐雨¹, 马昌前^{2,3*}, 李福林⁴, 赵少卿¹, 湛君明¹, 孙洋¹, 黄坚³

1. 长江大学地球科学学院, 湖北武汉 430100
2. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430078
3. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074
4. 中国地质调查局武汉地质调查中心(中南地质科技创新中心), 湖北武汉 430205

摘要: 青藏高原中部(包括北羌塘地区)出露了大规模三叠纪中酸性岩浆活动。然而,目前人们对于这些岩浆的起源、岩石成因及其地球动力学机制等问题至今还存在较多分歧。本文以北羌塘宁多地区过铝质花岗岩体为研究对象,开展锆石 U-Pb 年代学、全岩和同位素地球化学等综合研究,为深入认识与理解过铝质花岗岩形成机制及青藏高原中部三叠纪构造-岩浆演化过程等提供新的线索。宁多过铝质花岗岩的岩性为黑云母花岗闪长岩,主要由斜长石(35%~40%)、石英(25%~30%)、碱性长石(15%~20%)和黑云母(5%~10%)组成。宁多花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为 248 ± 1 Ma,为早三叠世岩浆活动的产物。样品均具有中等程度的 SiO_2 和 MgO 含量,相对富钾和铝,总体上与强过铝质花岗岩成分特征类似。所有岩石样品相对原始地幔要明显富集 Rb、K 等大离子亲石元素和轻稀土元素,亏损 Nb、Ta、Ti 和 P 等高场强元素。岩石样品具有相对高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值(I_{Sr} 为 0.720~0.722)、相对低的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(-12.4~-12.3)以及古老的两阶段模式年龄(T_{DM} 为 2.02~2.03 Ga),可与北羌塘地体东南部元古代片麻岩及由前寒武纪变质基底熔融形成的 S 型花岗岩特征类比。宁多过铝质花岗岩具有显著高的锆饱和温度(806~845 °C)和锆石 Ti 温度(830~1 033 °C),可与世界上典型高温花岗岩类的结晶温度类比。研究结果表明,这些过铝质花岗岩的形成与北羌塘前寒武纪基底物质(变杂砂岩和少量变泥质岩组分)的高温熔融有关。结合区域上多学科研究资料可以判断,在龙木错-双湖古特提斯洋北向俯冲的背景下,板片回撤引发弧后伸展和大量玄武质岩浆底侵,进而导致这一时期古老基底物质发生高温熔融。

关键词: 过铝质花岗岩;高温花岗岩;岩石成因;三叠纪;北羌塘;岩石学;地球化学。

中图分类号: P581

文章编号: 1000-2383(2023)09-3296-16

收稿日期: 2022-03-22

Petrogenesis and Geodynamic Setting of the Ningduo Peraluminous Granites from the North Qiangtang Terrane

Liu Bin^{1,2}, Xu Yu¹, Ma Changqian^{2,3*}, Li Fulin⁴, Zhao Shaoqing¹, Zhan Junming¹, Sun Yang¹, Huang Jian³

1. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430100, China

2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430078, China

3. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

基金项目: 国家自然科学基金项目(Nos. 42130309, 41972066, 41502050); 中国地质调查局项目(Nos. 12120115026901, 1212011121270)。

作者简介: 刘彬(1987-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 从事火成岩岩石学与地球化学研究。ORCID: 0000-0003-1372-6006。E-mail: binliu@yangtzeu.edu.cn

* 通讯作者: 马昌前, E-mail: cqma@cug.edu.cn

引用格式: 刘彬, 徐雨, 马昌前, 李福林, 赵少卿, 湛君明, 孙洋, 黄坚, 2023. 北羌塘宁多地区三叠纪过铝质花岗岩的成因及其地球动力学背景. 地球科学, 48(9): 3296-3311.

Citation: Liu Bin, Xu Yu, Ma Changqian, Li Fulin, Zhao Shaoqing, Zhan Junming, Sun Yang, Huang Jian, 2023. Petrogenesis and Geodynamic Setting of the Ningduo Peraluminous Granites from the North Qiangtang Terrane. *Earth Science*, 48(9): 3296-3311.

4. Wuhan Center, China Geological Survey (Central South China Innovation Center for Geosciences), Wuhan 430205, China

Abstract: Triassic intermediate to acid magmatism is widely distributed in the central Tibetan Plateau (including the North Qiangtang terrane). However, the magma origin, petrogenesis and geodynamic mechanism of the magmas are still poorly understood. This paper presents an integrated study of zircon U-Pb geochronology, whole-rock and isotopic geochemistry for the Ningduo peraluminous granites from the North Qiangtang terrane, aiming to provide new insights into the generation of peraluminous granites and the Triassic tectonic-magmatic evolution of the central Tibetan Plateau. The lithology of the Ningduo peraluminous granites is biotite granodiorite, which is mainly composed of plagioclase (35%–40%), quartz (25%–30%), K-feldspar (15%–20%), and biotite (5%–10%). The crystallization age of the Ningduo granites is 248 ± 1 Ma, which could be considered as the products of the Early Triassic magmatism. The Ningduo granites have moderate contents of SiO_2 and MgO, and relatively high contents of K and Al, which can be comparable to those of typical strongly peraluminous granites. All the samples are featured with enrichment of large ion lithophile elements (e.g., Rb, K) and light rare earth elements, and depletion of high field strength elements (e.g., Nb, Ta, Ti, and P), relative to the primitive mantle. They have relatively high I_s ratios of 0.720–0.722, low $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ values of -12.4 to -12.3 , and old T_{ZDM} ages of 2.02–2.03 Ga, similar to those of the Proterozoic gneisses and Precambrian basement-derived S-type granites. The Ningduo granites have remarkable high zirconium saturation temperatures (806–845 °C) and Ti-in-zircon temperatures (830–1 033 °C), similar to those of typical high-temperature granites worldwide. The results indicate that the Ningduo granites were derived from partial melting of Precambrian basement rocks (greywacke and minor pelite rocks) under a high temperature condition. During the subduction of the Longmuco-Shuanghu Ocean, slab rollback triggered the back-arc extension and intense basaltic underplating, and then induced the high-temperature melting of Precambrian basement rocks.

Key words: peraluminous granites; high-temperature granite; petrogenesis; Triassic; North Qiangtang; petrology; geochemistry.

0 引言

花岗岩(或花岗质岩石)不仅是地球陆壳的重要组成部分,而且是地球岩石圈区别于太阳系其他行星的重要标志(翟明国等, 2016; 吴福元等, 2017)。花岗岩是大陆形成与演化过程的直接产物,常常与内生金属矿床等存在密切的成因联系,因此花岗岩一直是固体地球科学的研究热点(翟明国等, 2016; 王孝磊, 2017; 马昌前等, 2020; 徐夕生等, 2020)。“过铝质花岗岩”这一概念最初由 Shand (1927) 提出,主要是指全岩的 A/CNK 分子值大于 1.0, 出现标准的刚玉分子, 含有富铝黑云母及其他含铝矿物(如白云母、堇青石、石榴子石、矽线石和红柱石等)的铝硅酸盐类岩石(Shand, 1927; Clarke, 1981; 林广春和马昌前, 2003)。该类花岗岩在地球不同时期的造山带内均可出现,对于示踪区域板块构造演化历史能起到非常关键的作用(Sylvester, 1998; Chappell *et al.*, 2012; 刘彬等, 2012)。经历了高度分异的过铝质花岗岩通常还被认为是衡量陆壳成熟度的重要指标之一(吴福元等, 2017)。然而,目前国内学者关于过铝质花岗岩成因机制的认识还存在较多分歧。过铝质花岗岩究竟是直接起源于变沉积物(S型)源区,还是直接起源于变火成岩(I型)源区(Clemens and Stevens, 2012)?岩石高铝饱和

指数值(A/CNK)究竟是继承源区的特征,或者是受控于角闪石或辉石分离结晶,或者是围岩沉积岩成分的混染,还是由晚期风化和蚀变作用导致碱金属的丢失造成的(Zen, 1988; 吴福元等, 2017; Wu *et al.*, 2018)?这些问题仍有待开展更为深入的研究。

作为世界“第三极”的青藏高原在形成过程中经历了 500 Ma 以来与原特提斯、古特提斯、中特提斯和新特提斯洋盆密切相关的复合演化历史(图 1),一直被公认为是研究特提斯构造-岩浆演化与成矿、大陆动力学的天然实验室(Yin and Harrison, 2000; 莫宣学, 2010)。青藏高原中部地区以发育古特提斯造山系为特征,其构造格架涉及到多条缝合带、高压变质带、条带状地体群和岛弧群等(Metcalf, 2013; 许志琴等, 2013)。伴随着有关古特提斯洋盆的板块构造演化,青藏高原中部地区(包括北羌塘地体内部)出露了大规模三叠纪中酸性岩浆活动。然而,目前对于这些岩浆的起源、岩石成因及其地球动力学机制等问题还缺乏统一的认识。例如,三叠纪花岗质岩浆活动究竟是起源于北羌塘陆壳源区(例如前寒武纪基底物质),还是与可可西里-巴颜喀拉-松潘-甘孜(HBSG)浊积岩组分的熔融有关(Peng *et al.*, 2015; Lu *et al.*, 2017, 2019)?对于地球动力学机制的认识还存在板块俯冲与碰撞后伸展两种截然不同的观点(Zhai *et al.*, 2013a; Peng *et al.*

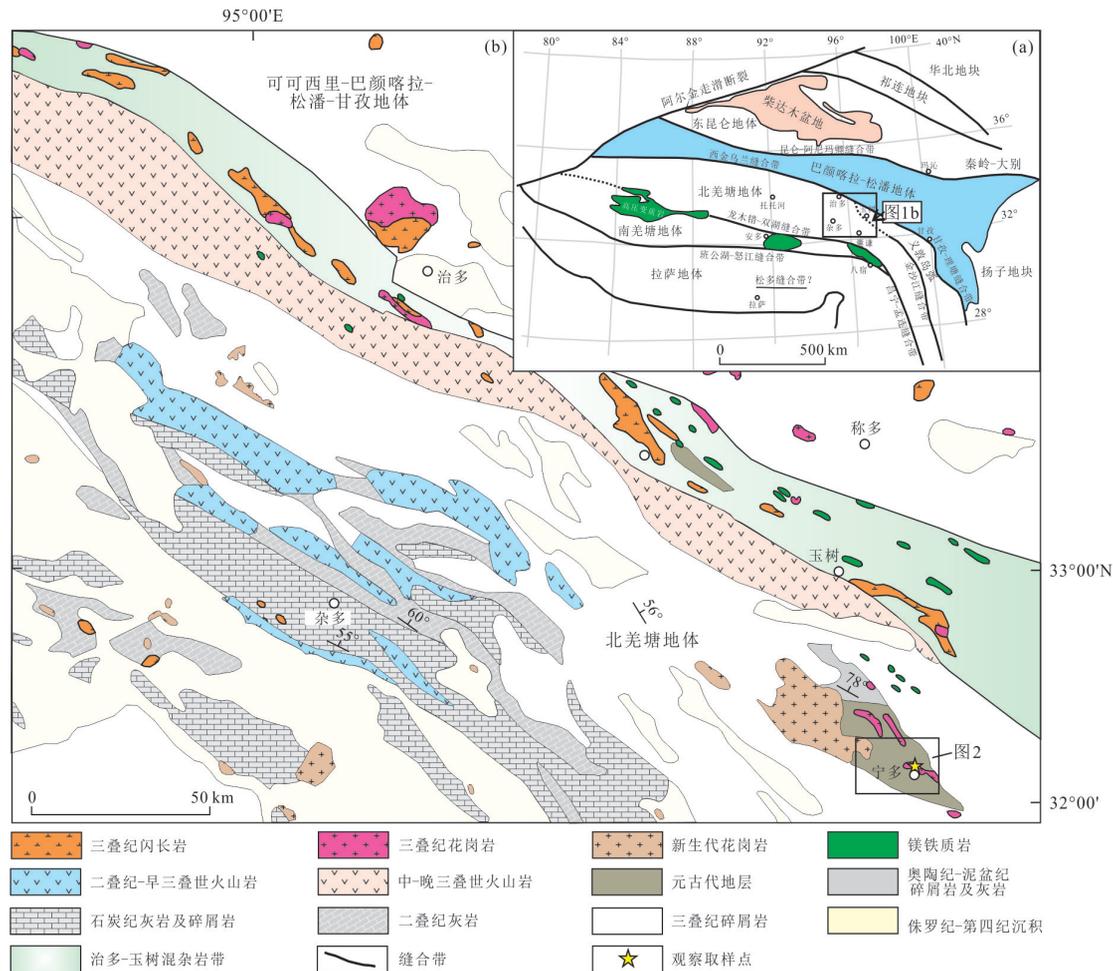


图 1 北羌塘北部玉树-治多地区所在大地构造位置(a)及其岩浆岩地质分布简图(b)

Fig.1 Tectonic location (a) and simplified geological map (b) of the Yushu-Zhiduo magmatic rocks in the north part of the North Qiangtang terrane

al., 2015; 刘彬等, 2016).

基于上述考虑,本文以项目组最近在北羌塘宁多地区厘定的过铝质花岗岩体为研究对象(图 1),通过开展高精度锆石 U-Pb 年代学、岩石学、地球化学和同位素地质学等研究,细致剖析过铝质花岗质岩浆的源区组成、岩石成因及其地球动力学环境,进而为深入认识与理解过铝质花岗岩的成因机制、羌塘北部前寒武纪基底演化以及青藏高原中部三叠纪构造演化过程等提供重要的岩石学证据。

1 区域地质背景与岩体地质

以甘孜-理塘缝合带和龙木错-双湖缝合带为界,可将青藏高原中部地区从北往南划分为可可西里-巴颜喀拉-松潘-甘孜(HBSG)地体、北羌塘地体和南羌塘地体(图 1)。

其中,HBSG 地体被认为是中国大陆内部规模

最大的一个构造结(图 1;张国伟等,2004),以一个东宽西窄且沿东西向延展的三角形形态产出在青藏高原中部位置.该地块除了西部和东部部分地区出露少量的二叠纪沉积外,其余大部分地区被巨厚的三叠纪复理石沉积(约 $2.2 \times 10^6 \text{ km}^3$; Nie *et al.*, 1994)所覆盖,掩盖了大量的地质信息.该地体中发育大量晚三叠世-早侏罗世花岗质岩石(包括 I 型、A 型、S 型和埃达克质岩等;Li *et al.*, 2021).北羌塘地体位于甘孜-理塘缝合带西段与龙木错-双湖缝合带之间(图 1).该地体主要由前石炭纪浅变沉积岩系、石炭纪-二叠纪陆缘碎屑岩-火山岩以及三叠纪火山岩-陆缘碎屑岩-碳酸盐岩等组成,还发育有少量的新生代山间盆地沉积物.该地体晚古生代地层中发育暖水生物群,显示与扬子陆块的亲缘性(李才等,2006).近年来前人在北羌塘地体中已经厘定出前寒武纪变质地层(例如中-新元古代宁多群),并

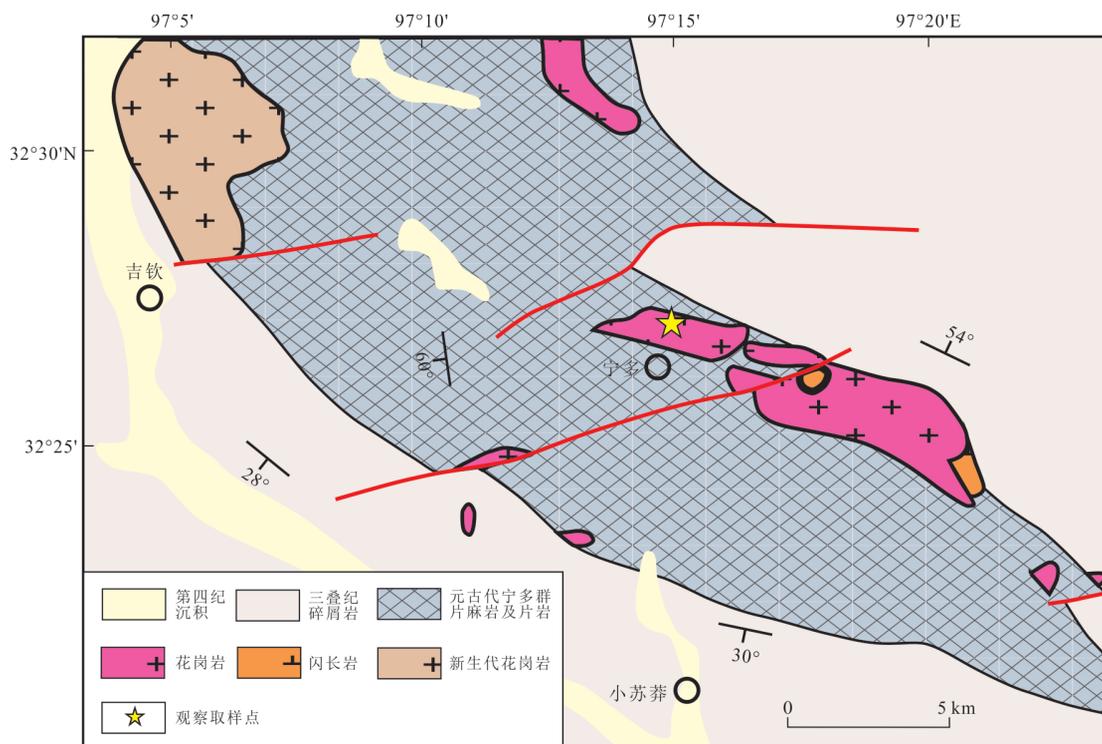


图 2 宁多花岗岩体地质图

Fig.2 Geological map of the Ningduo granitic intrusion

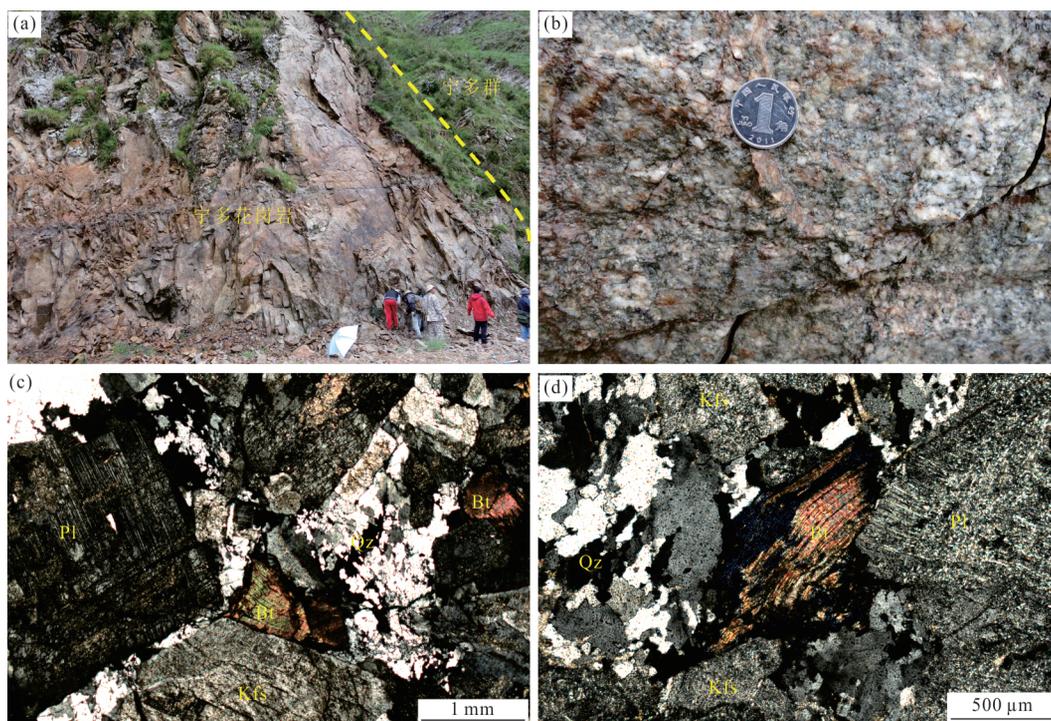


图 3 宁多花岗岩野外露头(a~b)及显微镜下照片(c~d)

Fig.3 Field photographs (a-b) and microscope photographs (c-d) of the Ningduo granites

矿物缩写: Bt. 黑云母; Kfs. 碱性长石; Pl. 斜长石; Qz. 石英

且在 这些 地层 中 找到 了 约 4.0 Ga 的 古老 锆 石 (He *et al.*, 2011), 指 示 北 羌 塘 地 体 下 部 应 该 存 在 前 寒 武 纪

的 变 质 基 底 . 伴 随 着 有 关 古 特 提 斯 洋 盆 的 构 造 演 化 , 晚 二 叠 世 - 三 叠 纪 岩 浆 岩 在 该 地 体 中 广 泛 分 布

(Liu *et al.*, 2016a; 刘彬等, 2016). 南羌塘地体主要由石炭纪、二叠纪和侏罗纪沉积地层构成. 该地体晚古生代地层中发育冷水型生物群及冰海杂砾岩, 显示与冈瓦纳大陆的亲缘性(李才等, 2006).

本文研究的宁多过铝质花岗岩位于北羌塘地体内(图 1), 侵入到中-新元古代宁多群片麻岩中(图 2 和图 3a). 该过铝质花岗岩体的岩石类型主要为黑云母花岗闪长岩(图 3b), 样品为浅灰白色, 中细粒花岗结构, 块状构造. 岩石主要由斜长石(35%~40%)、石英(25%~30%)、碱性长石(15%~20%)和黑云母(5%~10%)组成, 还含有少量不透明副矿物. 斜长石呈自形-半自形板状晶, 粒径为 0.8~2.0 mm, 可见聚片双晶, 部分斜长石发生绢云母化(图 3c). 石英以他形粒状为主, 无色透明, 表面相对干净. 碱性长石呈他形-半自形板柱状, 粒径 0.5~2.0 mm, 局部被绢云母和粘土矿物所替代(图 3c~3d). 黑云母呈红褐色半自形片状(0.5~1.0 mm), 发育一组完全解理, 干涉色较为鲜艳, 少量矿物表面发生绿泥石化蚀变(图 3d).

2 测试方法

在详细野外地质调查和岩相学分析基础上, 选择代表性样品进行锆石矿物分选. 通过机械粉碎、重磁电分选和双目镜下手工提纯后, 选取晶形相对良好的代表性锆石来制靶. 制靶完成后, 进行阴极发光(CL)、反射光和透射光照相, 在此基础上对锆石进行形貌学和成因初步分析, 然后筛选出合适的分析点位. 与此同时, 选择新鲜、无裂隙和缺少后期穿插脉体的岩石样品进行粗碎-细碎, 将其粉碎至 200 目以下, 用于岩石主量元素、微量元素及 Sr-Nd 同位素成分分析.

锆石 U-Pb 测年分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室采用激光剥蚀电感耦合等离子质谱仪(LA-ICP-MS)完成. 其中, ICP-MS 为 Agilent 7500a, 激光剥蚀装置为 GeoLas 2005. 实验过程中使用氦气和氦气分别作为补偿气和载气来调节激光剥蚀的灵敏度. U-Pb 同位素比值、元素含量及年龄计算等数据处理方法及具体仪器操作条件等详见 Liu *et al.* (2010). 另外, 锆石 U-Pb 谐和图及平均年龄计算采用 ISOPLOT 软件完成. 岩石主量元素含量是在武汉上谱分析科技有限责任公司采用波长色散 X 射线荧光光谱仪(ZSXPrimus II)完成, 测试过程中使用 GBW07103、

GBW07111 和 GBW07112 三个标样来监控测试仪器及方法的准确度. 微量元素及稀土元素含量的测定是在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室使用 Agilent 7500a ICP-MS (Musashinoshi, Nakacho, Tokyo, Japan) 仪器完成. 测试中, 需要称取 50 mg 岩石粉末样品放入 Teflon 溶样弹中, 用 HF 和 HNO₃ 在 195 °C 条件下消解样品 48 h. 样品前处理、实验测试条件及数据处理方法等可见 Liu *et al.* (2008). 岩石 Sr 和 Nd 同位素比值的测定在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室分别使用热电离同位素质谱仪(TIMS, Triton T1)和多接收等离子体质谱仪(MC-ICP-MS)完成. 分析过程中, 采用标样 NBS987 和 La Jolla 来监测仪器的准确度. 具体的样品前处理、仪器条件及上机测试方法等详见 Gao *et al.* (2004).

3 测试结果

3.1 锆石 U-Pb 年代学

本次利用 LA-ICP-MS 方法对宁多花岗岩体中的典型样品(ND01-2)开展锆石 U-Pb 同位素年代学测试, 共分析 31 颗锆石、31 个测试点. 具体的测试结果及计算得到的相关参数见附表 1.

该样品中绝大多数锆石均为自形-半自形柱状晶, 无色透明, 但部分锆石中含有少量的包裹体, 其粒径多分布在 60~170 μm 范围内. 这些锆石在阴极发光图像上均显示清晰的岩浆韵律振荡环带, 很少发育古老的继承核(图 4a). 31 个锆石测点给出相对高的 Th/U 值, 主要分布在 0.3~0.6 之间. 这些总体上均可与典型岩浆结晶成因锆石特征类比(Belousova *et al.*, 2002). 其中的 29 个锆石测点给出了一组基本一致并且相对年轻的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄(243~253 Ma; 图 4b), 其加权平均年龄为 248±1 Ma (MSWD=1.07), 代表了宁多过铝质花岗岩的结晶年龄. 此外, 还有 2 个锆石测点给出了相对古老的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄, 分别为 291 Ma 和 297 Ma (图 4), 很可能代表花岗岩浆在上升侵位中从围岩中捕获锆石的年龄.

3.2 岩石地球化学成分

全岩主量元素、稀土元素和微量元素测定结果及计算的相关参数见附表 2. 研究结果显示, 除了样品 ND01-6 具有较高的烧失量(LOI), 多数岩石样品具有相对低的烧失量(为 1.55%~2.87%), 表明岩

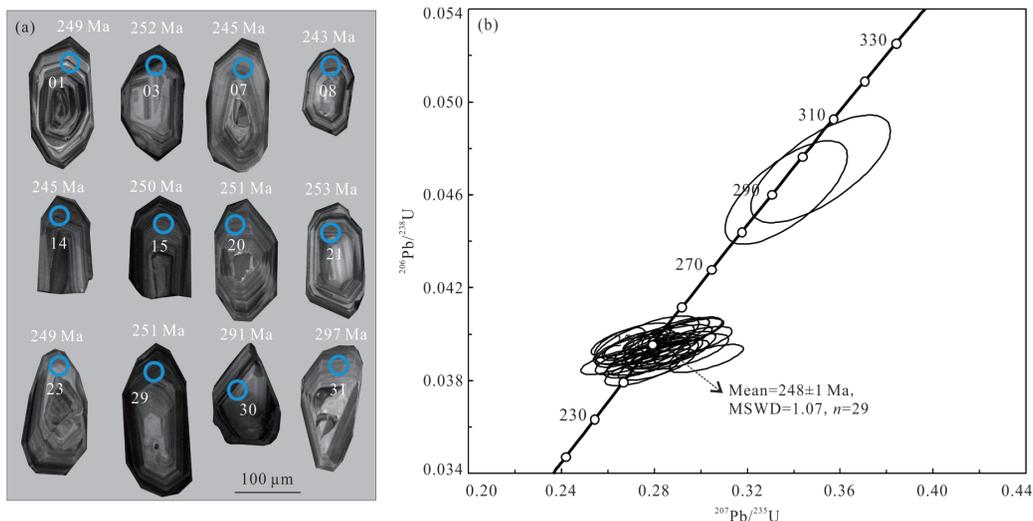


图 4 宁多花岗岩典型锆石 CL 图像特征(a)以及锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄谐和图(b)

Fig.4 CL images (a) and zircon U-Pb concordant diagrams (b) of zircon grains for the Ningduo granites

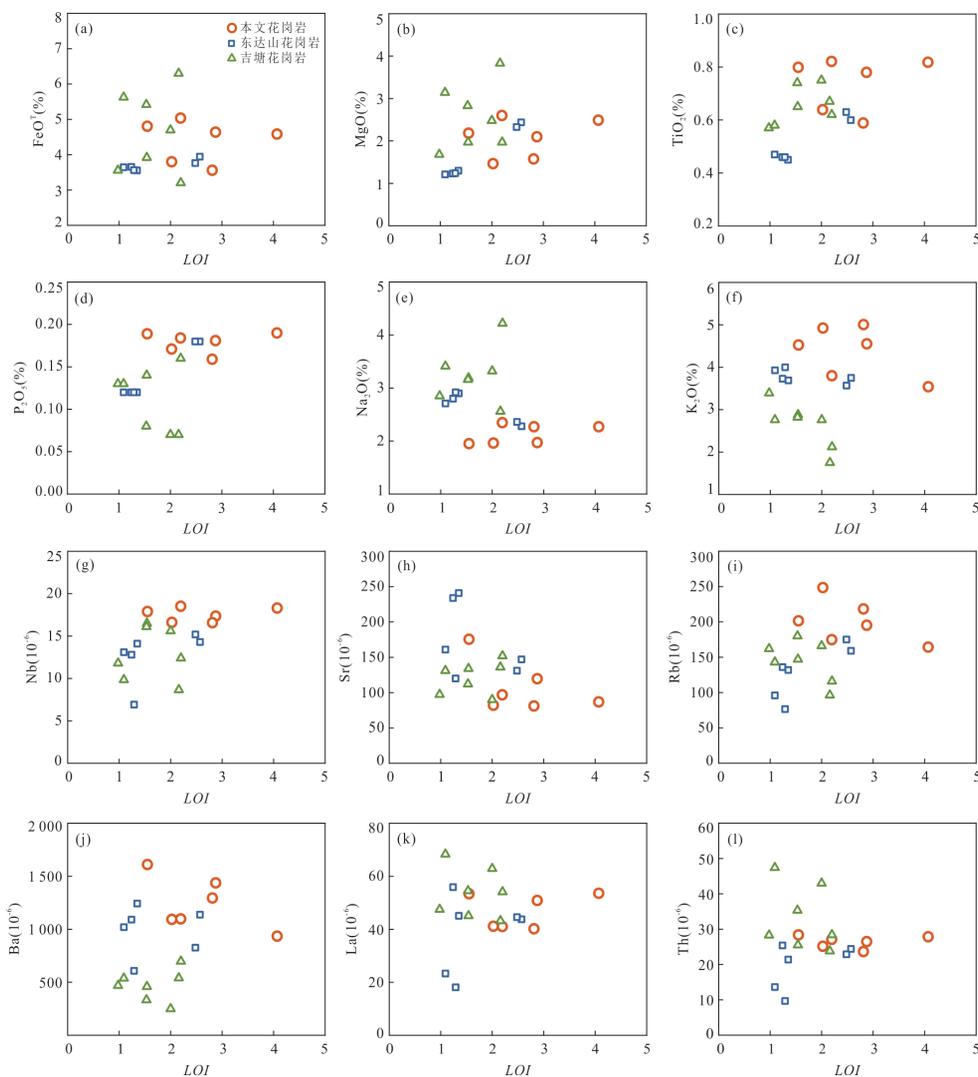


图 5 宁多花岗岩样品 FeO^T 、 MgO 、 TiO_2 、 P_2O_5 、 Na_2O 、 K_2O 、 Nb 、 Sr 、 Rb 、 Ba 、 La 和 Th 与 LOI 之间的协变图解

Fig.5 Plots of FeO^T , MgO , TiO_2 , P_2O_5 , Na_2O , K_2O , Nb , Sr , Rb , Ba , La , and Th versus LOI for the Ningduo granites

图 5 及本文其他部分用到的东达山和吉塘花岗岩的数据分别据 Peng *et al.* (2015) 和 Tao *et al.* (2014)

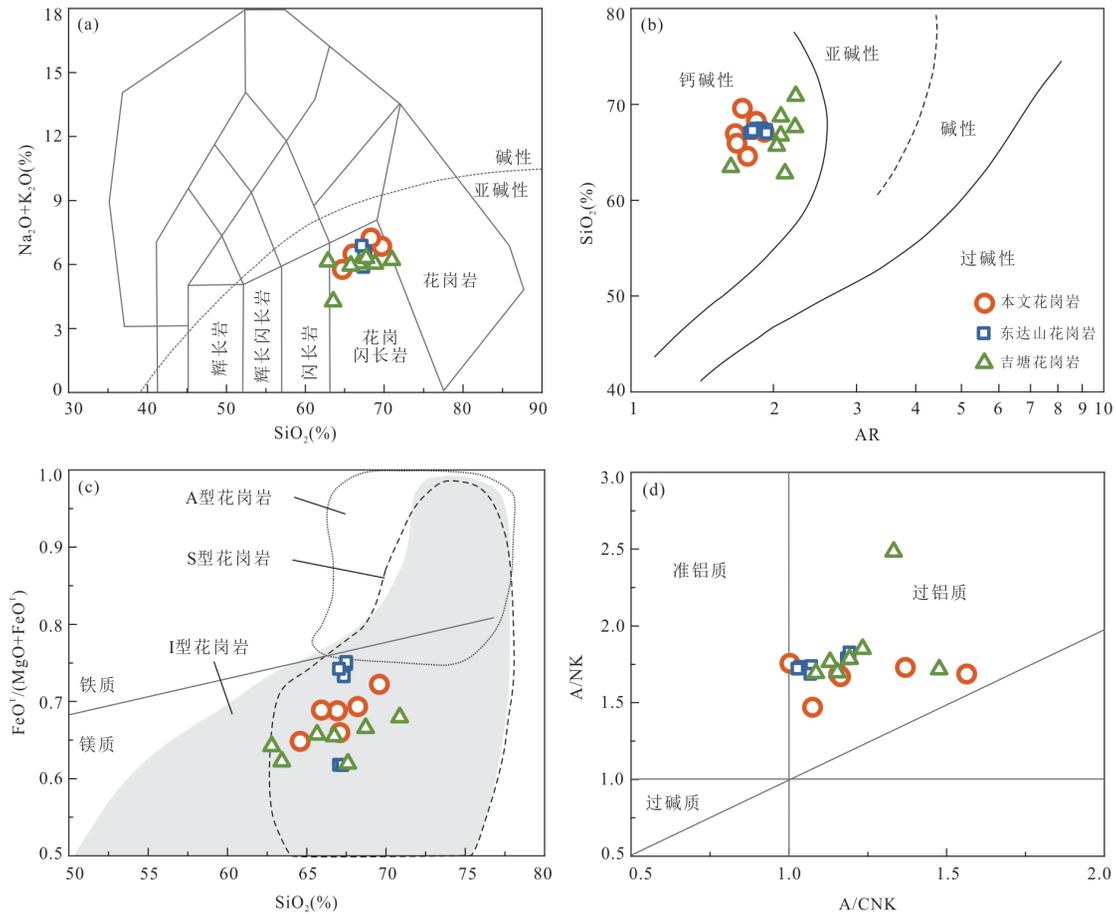


图 6 宁多花岗岩样品成分判别图解

Fig.6 Geochemical classification plots for the Ningduo granites

a. $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ vs. SiO_2 图解, 据 Irvine and Baragar (1971)、Middlemost (1994); b. SiO_2 vs. AR 图解, 据 Wright (1969); c. $\text{FeO}^{\text{T}}/(\text{FeO}^{\text{T}} + \text{MgO})$ vs. SiO_2 图解, Frost *et al.* (2001); d. A/NK vs. A/CNK 图解, 据 Maniar and Piccoli (1989)

石样品经历了较低程度的蚀变或低级变质作用. 在以 LOI 为横坐标构建的协变图上(图 5), 主要氧化物(例如, FeO^{T} 、 MgO 、 TiO_2 、 P_2O_5 、 Na_2O 、 K_2O)和典型微量元素(例如, Nb、Sr、Rb、Ba、La 和 Th)等与 LOI 之间不存在任何线性相关性, 表明后期蚀变及其低级变质作用对岩石地化成分的影响相对较小.

宁多过铝质花岗岩样品具有中等程度的 SiO_2 (64.59%~67.10%) 和碱含量 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 为 5.81%~7.28%), 在侵入岩 TAS 分类命名图解中落入花岗闪长岩范围内(图 6a). 岩石样品具有相对高的 K_2O (3.80%~5.01%) 含量, 在 SiO_2 -AR 图解中投影落在钙碱性成分系列内(图 6b). 岩石样品具有中等程度的 MgO (1.47%~2.60%) 和 $\text{Mg}^{\#}$ (41~49), 显示镁质花岗岩类的成分特征(图 6c; Frost *et al.*, 2001). 所有花岗岩样品相对富铝, Al_2O_3 含量为 13.30%~14.45%, 其 A/CNK 值多数大于或者等于 1.1, 总体显示强过铝质成分特征(图 6d).

岩石样品具有相对高的稀土元素总量 (ΣREE 为 $191.41 \times 10^{-6} \sim 254.04 \times 10^{-6}$), 相对于球粒陨石要明显富集轻稀土、亏损重稀土(图 7a; $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 10.46~11.74). 此外, 样品在稀土元素球粒陨石标准化图解上均显示较为明显的 Eu 负异常, 其 δEu 为 0.40~0.75. 所有岩石样品相对原始地幔要明显富集 Rb、Th 和 U 等大离子亲石元素和轻稀土元素, 亏损 Nb、Ta、Ti 和 P 等高场强元素(图 7b).

3.3 岩石 Sr-Nd 同位素组成

岩石 Sr-Nd 同位素初始比值以 $t=249$ Ma 为基准来进行计算, 具体测定结果及计算的相关参数见附表 2. 结果显示, 宁多过铝质花岗岩样品的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值 (I_{Sr}) 为 0.720~0.722, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 $-12.4 \sim -12.3$, 其两阶段模式年龄 ($T_{2\text{DM}}$) 为 2.02~2.03 Ga. 宁多花岗岩样品在 Sr-Nd 同位素组成及 $T_{2\text{DM}}$ 模式年龄上总体可与北羌塘地体东南部元古代片麻岩及由前寒武纪变质基底熔融形成的 S 型花岗

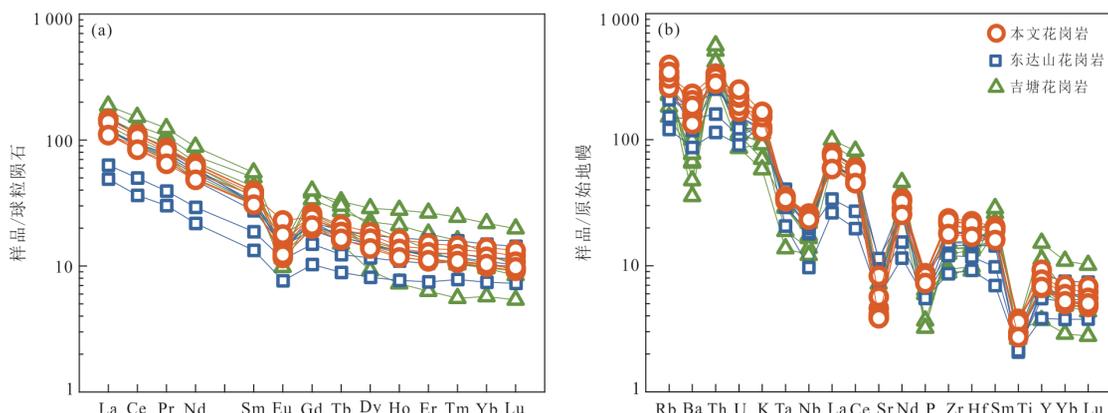


图7 宁多花岗岩样品的稀土元素球粒陨石标准化分布图(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)

Fig.7 Chondrite-normalized REE distribution patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element spider diagrams for the Ningduo granites

原始地幔和球粒陨石标准化值据 Sun and McDonough (1989) 和 Taylor and McLennan (1985)

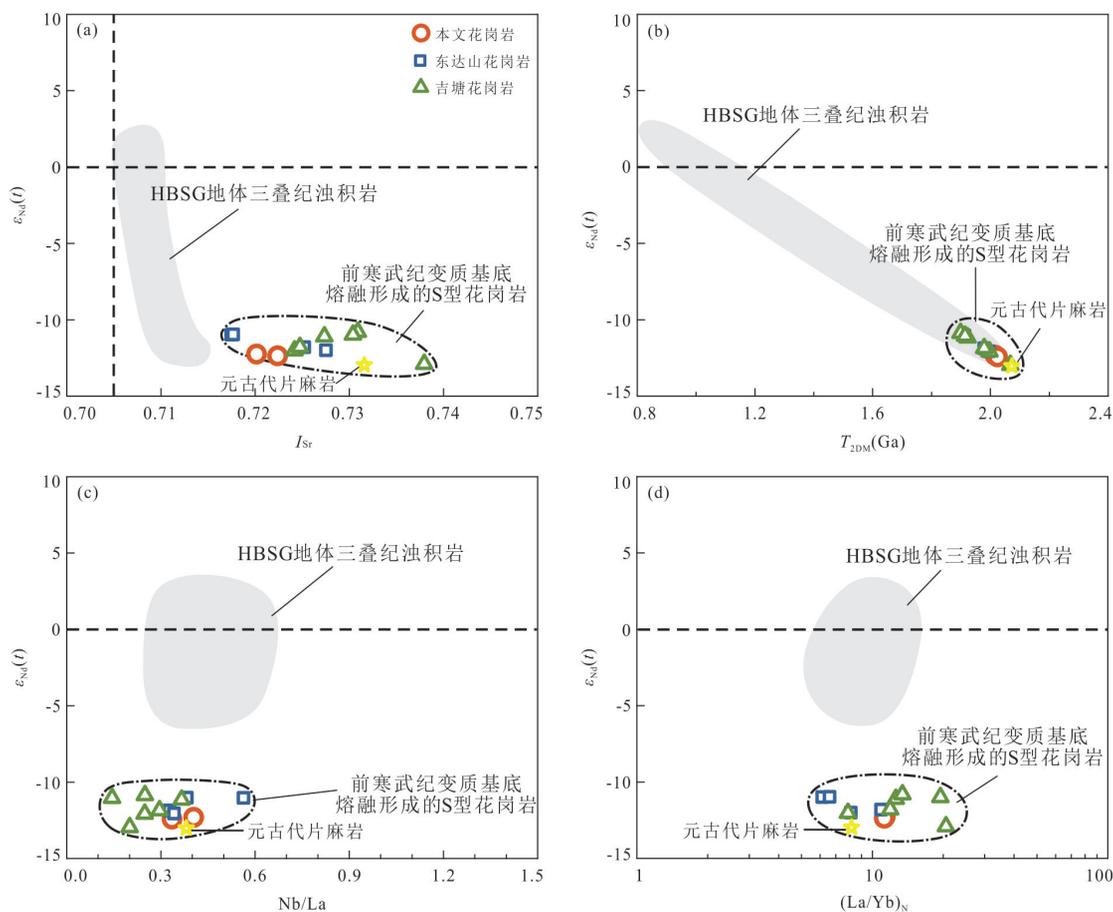


图8 宁多花岗岩样品的 $\epsilon_{Nd}(t)$ vs. I_{Sr} 图解(a); $\epsilon_{Nd}(t)$ vs. T_{2DM} 图解(b); $\epsilon_{Nd}(t)$ vs. Nb/La 图解(c)和 $\epsilon_{Nd}(t)$ vs. $(La/Yb)_N$ 图解(d)

Fig.8 Plots of $\epsilon_{Nd}(t)$ vs. I_{Sr} (a), $\epsilon_{Nd}(t)$ vs. T_{2DM} (b), $\epsilon_{Nd}(t)$ vs. Nb/La (c), and $\epsilon_{Nd}(t)$ vs. $(La/Yb)_N$ (d) for the Ningduo granites

HBSG 地体三叠纪浊积岩数据来源于 de Sigoyer *et al.* (2014)、She *et al.* (2006)、Zhang *et al.* (2007)

岩的特征类比(图8),暗示着这些地质体之间可能存在较为密切的成因联系。

4 讨论

4.1 岩石成因

M-I-S-A 型分类法是目前最常用的花岗岩成因

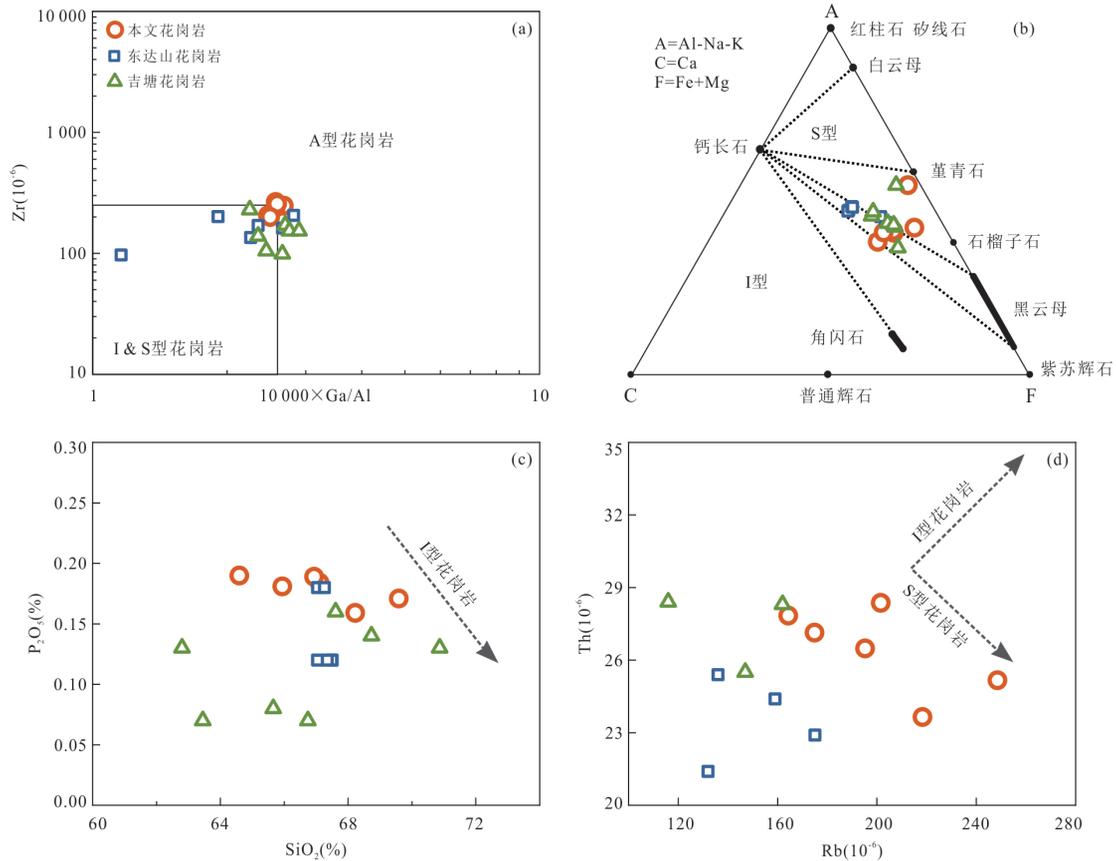


图9 宁多花岗岩样品 Zr vs. $10\,000 \times \text{Ga}/\text{Al}$ (a; Whalen *et al.*, 1987)、ACF (b; Chappell and White, 1992)、 P_2O_5 vs. SiO_2 (c) 和 Th vs. Rb (d)图解

Fig.9 Plots of Zr vs. $10\,000 \times \text{Ga}/\text{Al}$ diagram (a; Whalen *et al.*, 1987), ACF diagram (b; Chappell and White, 1992), P_2O_5 vs. SiO_2 , (c) and Th vs. Rb (d) for the Ningduo granites

分类方案,对于深入认识宁多过铝质花岗岩的成因及其构造背景具有重要意义.宁多花岗岩样品均具有较高的 K_2O 与 A/CNK 值,相对富集的Sr-Nd同位素组成以及古老的 $T_{2\text{DM}}$ 模式年龄(2.02~2.03 Ga),基本可以排除其属于M型花岗岩的可能性.这些样品具相对低的 $10\,000 \times \text{Ga}/\text{Al}$ 比值(多数小于2.6)、较低的Zr含量(多数小于 250×10^{-6})和 $\text{FeO}^{\text{T}}/(\text{FeO}^{\text{T}}+\text{MgO})$ 比值(0.65~0.72),与典型A型花岗岩成分存在显著区别(图6c和图9a; Whalen *et al.*, 1987; 刘彬等, 2013).岩石样品具有相对低的 Na_2O 含量(小于3.2%),明显不同于I型花岗岩特征(Chappell and White, 2001),并且在ACF分类图解(Chappell and White, 1992)中投影均落入S型花岗岩的范围内(图9b).由于磷灰石和富Th矿物(如独居石)等在准铝质-弱过铝质和强过铝质花岗质熔体中的溶解度存在明显差异,因此I型花岗岩的 P_2O_5 - SiO_2 往往呈现明显的负相关关系,其Th-Rb呈现正相关关系,而S型花岗岩的 P_2O_5 随着 SiO_2 增加

无明显降低的趋势,并且其Th-Rb呈现负相关关系(Chappell and White, 2001).宁多过铝质花岗岩样品的 P_2O_5 随着 SiO_2 的升高基本保持不变(图9c),Th与Rb之间呈现较为明显的线性负相关趋势(图9d),进一步表明这些花岗岩很可能具有与S型花岗岩类似的成分演化趋势.

本文研究的宁多花岗岩样品具有较高的 A/CNK 值,含较多富铝矿物(例如黑云母等),表现强过铝质成分特征,可与典型的过铝质花岗岩成分类比(Chappell *et al.*, 2012).然而,目前国内外学者对于过铝质花岗岩中高 A/CNK 值的来源认识还存在直接继承源区成分特征、受控于角闪石或辉石分离结晶、围岩沉积岩成分的混染以及晚期风化和蚀变作用导致碱金属的丢失等多种不同的观点(Zen, 1988; 吴福元等, 2017; Wu *et al.*, 2018).尽管岩相学分析结果显示宁多花岗岩中的黑云母和斜长石等矿物经历了少量的蚀变或者变质作用,但是样品的碱金属含量 Na_2O 和 K_2O 与烧失量LOI之间并不

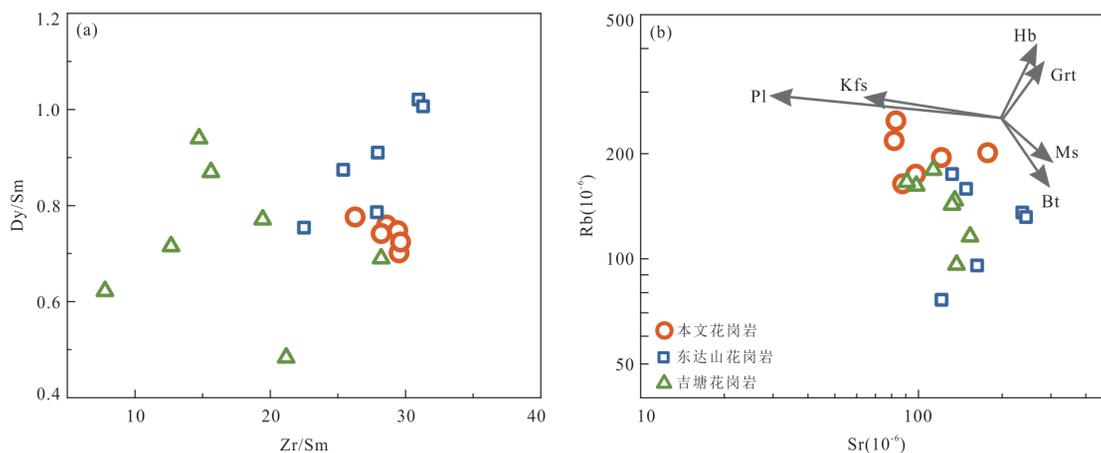


图10 宁多花岗岩 Dy/Sm vs. Zr/Sm (a; Wu *et al.*, 2003)和 Rb vs. Sr (b; Sisson, 1994)图解

Fig.10 Plots of Dy/Sm vs. Zr/Sm (a; Wu *et al.*, 2003) and Rb vs. Sr (b; Sisson, 1994) for the Ningduo granites

Bt. 黑云母;Grt. 石榴子石;Hb. 角闪石;Kfs. 碱性长石;Ms. 白云母;Pl. 斜长石

存在线性关系,表明晚期风化和蚀变作用对岩石成分及其铝饱和指数的影响不大(图5e~5f).所有样品均具有类似的稀土与微量元素分布型式以及相对一致的Sr-Nd同位素特征(图7和图8),并且其Nb/La比值随着 $Mg^{\#}$ 值的降低而基本保持不变(附表2),指示围岩沉积岩成分的混染作用并不是造成岩石高A/CNK值的主因.由于不同元素在角闪石中的配分系数不同($D_{Dy}=13$, $D_{Sm}=7.76$, $D_{Zr}=0.27$; $D^{Dy/Sm}>1$, $D^{Zr/Sm}<1$),角闪石分离结晶在Dy/Sm-Zr/Sm图解上往往表现为线性负相关特征(Sisson, 1994).宁多花岗岩样品在Dy/Sm-Zr/Sm图解上相关性趋势不明显(图10a),并且样品在Rb-Sr判别图解投影也不符合角闪石分离结晶的趋势(图10b),因此宁多花岗岩样品具有相对高的A/CNK值与角闪石分离结晶无关.

花岗岩成分的多样性与其岩浆源区组成存在密切的成因联系,地壳尺度内不同类型源岩发生部分熔融可以形成不同成分的花岗质岩浆(Altherr and Siebel, 2002; 张旗等, 2008).过铝质花岗质岩浆的源区相对复杂,通常认为其主要源自变沉积物(S型)或者变火成岩(I型)的源区,涉及到富铝变沉积岩(变泥质岩)、基性变火成岩(角闪岩)、长英质变火成岩(正片麻岩和杂砂岩)多种岩石类型(Chappell *et al.*, 2012; Clemens and Stevens, 2012).与贫粘土、富长石源区的过铝质花岗岩成分相比,来自富粘土、贫长石源区的过铝质花岗岩往往具有更高的Rb/Ba、Rb/Sr以及更低的CaO/Na₂O比值(Sylvester, 1998).宁多花岗岩样品具有相对低的Rb/Ba和Rb/Sr比值(分别为0.13~0.23和

1.15~3.03),在Rb/Ba-Rb/Sr图解中投影落入贫粘土的范围内(图11a).这些样品具有相对高的CaO/Na₂O比值,多数分布在0.49至1.38之间,与单纯由变泥质岩熔融形成的过铝质花岗岩成分(CaO/Na₂O小于0.3)存在显著的区别.岩石样品在基于实验岩石学资料构建的多种图解(例如, $K_2O/Na_2O-CaO/(MgO+FeO^T)$ 和 $K_2O/Na_2O-A/CNK$)中多数落在变杂砂岩范围或者变杂砂岩-变泥质岩重叠范围内(图11b和11c).以上这些资料指示宁多花岗岩样品应该起源于一个相对贫粘土、富长石的源区,并且其源区成分很可能由变杂砂岩和少量变泥质岩组成.此外,当源区物质发生熔融时,地壳源区的不均一性有可能被继承下来而传递到岩浆中(王孝磊, 2017).对于S型或I型花岗岩来说,其岩浆源区H₂O含量较高,岩浆粘度大并且岩浆温度相对较低,源区不均一性对这些花岗岩成分的影响往往很难完全消除掉.因此,变沉积物源区成分的不均一性应该是导致宁多花岗岩A/CNK值较高且变化范围相对较大的关键因素.

近年来的研究揭示北美塘地体及周缘三叠纪中酸性岩浆岩很可能存在两个潜在的陆壳源区贡献,包括前寒武纪变质基底组分和来自HBSG地区的三叠纪浊积岩成分(Tao *et al.*, 2014; Peng *et al.*, 2015; Lu *et al.*, 2017).本文研究的宁多过铝质花岗岩样品具有相对高的 I_{Sr} (0.720~0.722),低的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值(-12.4~-12.3)以及较为古老的 T_{2DM} 模式年龄(2.02~2.03 Ga),总体可与北美塘地体东南部元古代片麻岩及由前寒武纪变质基底熔融形成的晚三叠世S型花岗岩成分(例如东达山和吉塘花岗

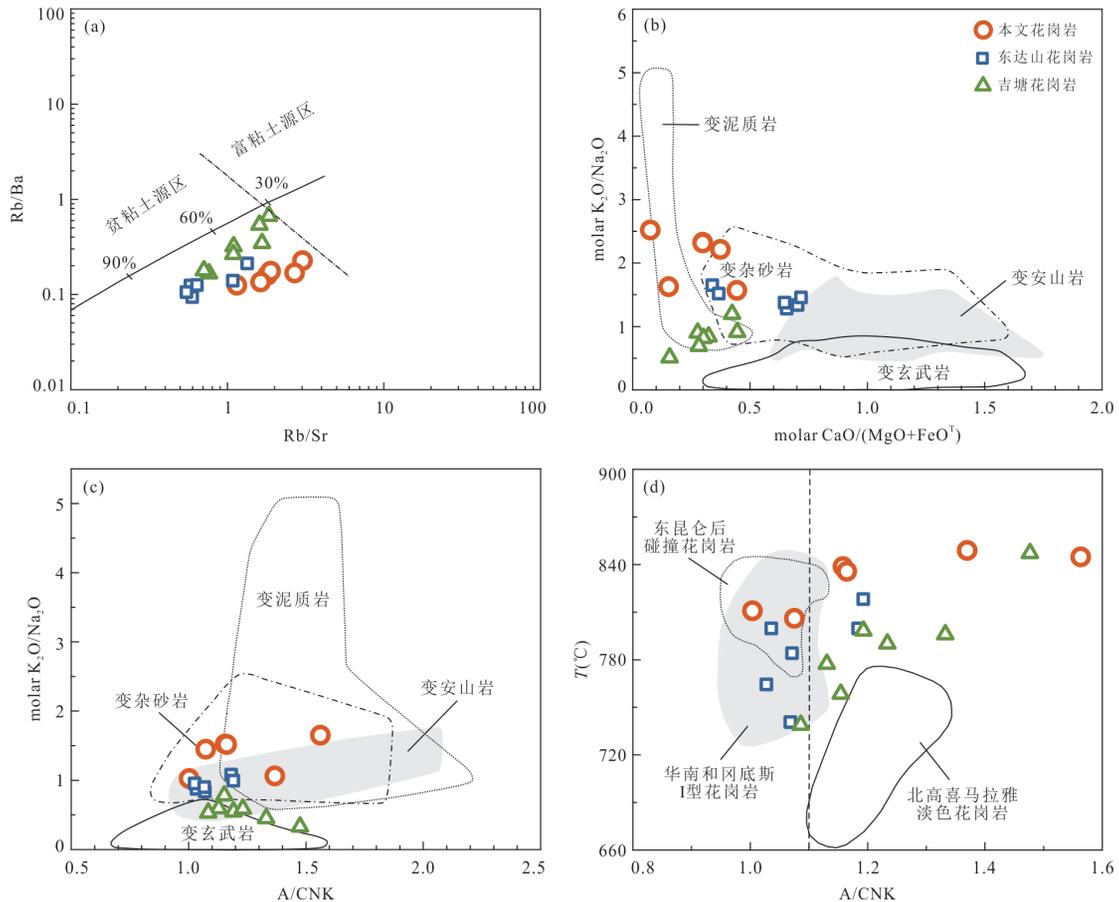


图 11 宁多花岗岩 Rb/Ba vs. Rb/Sr (a)、molar K_2O/Na_2O vs. $CaO/(MgO+FeO^T)$ (b)、molar K_2O/Na_2O vs. A/CNK (c) 和 $T(^{\circ}C)$ 、锆饱和温度) vs. A/CNK 图解 (d)

Fig.11 Plots of Rb/Ba vs. Rb/Sr (a), molar K_2O/Na_2O vs. $CaO/(MgO+FeO^T)$ (b), molar K_2O/Na_2O vs. A/CNK (c), and $T(^{\circ}C)$ vs. A/CNK (d) for the Ningduo granites

底图分别据 Altherr and Siebel (2002) 和刘彬等 (2012) 修改

岩) 类比 (图 8a 和 8b)。此外, 岩石样品在基于 Nd 同位素和微量元素比值构建的多种对比图解投影中也均落在北美塘地体东南部元古代片麻岩和晚三叠世 S 型花岗岩成分范围内, 与 HBSG 浊积岩成分存在较为明显的区别 (图 8c 和 8d)。这些特征指示宁多过铝质花岗岩的形成很可能与北美塘地体内部发育的前寒武纪变质基底成分的部分熔融有关。

Zr 元素是锆石矿物中最重要的结构组分, 不同成分岩浆中 Zr 的饱和程度取决于岩浆温度和岩浆成分, 因此可以根据岩石的 Zr 含量来估算岩浆初始温度 (Watson and Harrison, 1983)。基于岩石 Zr 含量及前人标定锆石饱和温度计估算的结果, 宁多花岗岩样品的初始岩浆温度为 $806\sim 845^{\circ}C$, 明显高于晚三叠世 S 型花岗岩的初始岩浆温度 (图 11d), 与高温花岗岩类的特征类似 (Miller *et al.*, 2003)。已有的研究也揭示使用岩石 Zr 含量及锆饱和温度计

算的温度实际上会低估源区熔体形成时的初始温度 (Miller *et al.*, 2003), 因此宁多花岗岩可能具有更高的初始岩浆温度。锆石的 Ti 元素含量通常与 TiO_2 活度、 SiO_2 活度及温度有关, 并且锆石中 Ti 替代 Si 的比例与温度变化关系明显, 因此锆石 Ti 元素含量能够有效地反映岩浆熔体的温度特征 (Ferry and Watson, 2007; Schiller and Finger, 2019)。为了更好地评价宁多过铝质花岗质岩浆形成温度, 本文进一步开展了锆石 Ti 含量温度计计算。结果显示, 宁多过铝质花岗岩样品的锆石 Ti 含量温度为 $830\sim 1033^{\circ}C$, 可与世界范围内现已报道的高温花岗岩锆石 Ti 温度类比 (例如, Grenville 地区高温花岗岩, $915\sim 1035^{\circ}C$; Moecher *et al.*, 2019)。

4.2 岩石形成的地球动力学背景

由于北美塘地体大多被中-新生代地层覆盖, 经历了至少两期不同古特提斯洋盆构造演化的叠

加影响,因此目前国内外学者对于该地体内部三叠纪岩浆作用的形成机制及其构造背景等问题还缺乏统一的认识(Zhai *et al.*, 2013a; Peng *et al.*, 2015; 刘彬等, 2016).本次将综合本文及区域上已报道的最新研究成果来揭示宁多过铝质花岗岩形成的地球动力学机制,以期为深入认识与理解北美塘地体三叠纪构造-岩浆演化过程提供重要依据.

从区域构造分布来看,北美塘地体夹持在甘孜-理塘缝合带西段和龙木错-双湖缝合带之间.近年来,众多学者们基于蛇绿岩、高压变质岩、地体属性、沉积建造、生物分区及地球物理等多学科研究成果,多次证实龙木错-双湖缝合带代表了古特提斯洋主洋盆,其可向东南进一步与昌宁-孟连古特提斯洋联系构成东亚古特提斯体系中一条规模最大的缝合带(李才等, 2008; Metcalfe, 2013; Zhai *et al.*, 2013b).目前在缝合带内已经厘定了石炭纪 MORB 型蛇绿岩(357~345 Ma; Zhai *et al.*, 2013b),表明该洋盆至少在早石炭世时期已经存在.早二叠世时期北美塘地体和南羌塘地体分别发育温水动物群和冷水群,说明这一时期已经形成一个规模巨大的古特提斯洋盆(Metcalfe, 2013).约 275 Ma 开始,龙木错-双湖洋盆开始向北俯冲,形成二叠纪-早三叠世埃达克岩和弧岩浆岩(Yang *et al.*, 2011).羌塘中部与洋壳深俯冲有关的榴辉岩相变质年龄为 237~230 Ma(Zhai *et al.*, 2011; Dan *et al.*, 2018),其退变质或者折返年龄为 203~222 Ma(Kapp *et al.*, 2003; Zhai *et al.*, 2011; Dan *et al.*, 2018).甘孜-理塘缝合带位于 HBSG 地体和北美塘-义敦地体之间,记录了羌塘地体北部古特提斯洋盆演化的重要信息.目前在缝合带西段中已经发现大量的三叠纪蛇绿混杂岩块,其中镁铁质岩块的锆石 U-Pb 年龄为 232~240 Ma(Liu *et al.*, 2016b),表明该洋盆至少在中三叠世时期已经存在.至少从 229 Ma 开始,甘孜-理塘洋向南俯冲,在北美塘地体北缘形成埃达克质岩、赞岐质高镁安山岩、富 Nb 玄武岩以及具有正 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值的英安岩(Wang *et al.*, 2008; Liu *et al.*, 2021).

本文研究的宁多过铝质花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为 248 ± 1 Ma,明显早于甘孜-理塘缝合带西段蛇绿岩的形成年龄,表明宁多花岗岩与甘孜-理塘洋盆构造演化并不存在紧密的成因联系,其形成应该受控于龙木错-双湖古特提斯洋盆的构造演化过程.宁多花岗岩的锆石 U-Pb 年龄要明显早于榴辉岩相

变质年龄,并且正好位于北美塘地体中部二叠纪-早三叠世弧岩浆岩的年龄范围内(248~275 Ma; Yang *et al.*, 2011),指示其很可能形成于一个与板块俯冲有关的环境中.宁多过铝质花岗岩具有显著高的锆饱和温度(806~845 °C)和锆石 Ti 温度(830~1 033 °C),可与世界上典型高温花岗岩类结晶温度(915~1 035 °C; Moecher *et al.*, 2014)类比.岩石成因分析结果也揭示这些过铝质花岗岩的形成与北美塘前寒武纪基底物质(主要是变杂砂岩及少量变泥质岩)的部分熔融有关.在这种情况下,古老基底物质发生高温熔融,必然要求其深部存在一个显著高的热异常.值得注意的是,最近关于北美塘二叠纪-三叠纪镁铁质岩类的研究成果揭示,至少从 258 Ma 开始,俯冲洋壳榴辉岩化引发板块回撤和软流圈地幔上涌,导致北美塘中北部地区处于弧后伸展的构造体制中,进而产生大量晚二叠世-中三叠世镁铁质岩浆活动(Liu *et al.*, 2016a, 2020).因此,弧后伸展背景下玄武质岩浆底侵供热很可能是造成这一时期古老基底物质发生高温熔融的主要因素.此外,近年来前人在北美塘地体东南缘东达山、吉塘地区陆续厘定了一系列晚三叠世过铝质花岗岩,其结晶年龄(219~220 Ma)与榴辉岩折返或者退变质年龄基本一致,表明其形成与碰撞后阶段板片断离作用有关(Tao *et al.*, 2014; Peng *et al.*, 2015).这些过铝质花岗岩在岩石化学成分和源区组成等多个方面均可与宁多花岗岩成分类比(图 5~图 11),但是其结晶年龄却明显晚于宁多花岗岩年龄,指示北美塘地体前寒武纪变质基底在晚三叠世再次发生熔融.

5 结论

(1)通过锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素测年确定宁多过铝质花岗岩的结晶年龄为 248 ± 1 Ma,表明其为早三叠世岩浆活动的产物.

(2)宁多过铝质花岗岩具有显著高的锆饱和温度(806~845 °C)和锆石 Ti 温度(830~1 033 °C),可与世界上典型高温花岗岩类的结晶温度类比.综合本文研究成果,可以确定这些过铝质花岗岩的形成与北美塘前寒武纪基底物质(变杂砂岩和少量变泥质岩组分)的高温熔融有关.

(3)结合区域上多学科研究资料可以判断,在龙木错-双湖古特提斯洋北向俯冲的背景下,板片回撤引发弧后伸展和大量玄武质岩浆底侵供热,进

而导致这一时期古老基底物质发生高温熔融形成了该地区的过铝质花岗岩。

致谢:研究工作得到了许志琴院士、杨经绥院士和李海兵研究员的关心与指导;野外地质考察及实验样品前处理工作得到郭盼、张鑫、洛桑塔青和索朗欧珠等的帮助;实验测试得到了中国地质大学(武汉)刘勇胜、宗克清、陈海红等老师的热情帮助与耐心指导。在此特表感谢!

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

References

- Altherr, R., Siebel, W., 2002. I-Type Plutonism in a Continental Back-Arc Setting: Miocene Granitoids and Monzonites from the Central Aegean Sea, Greece. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143(4): 397–415. <https://doi.org/10.1007/s00410-002-0352-y>
- Belousova, E., Griffin, W., O'Reilly, S. Y., et al., 2002. Igneous Zircon: Trace Element Composition as an Indicator of Source Rock Type. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143(5): 602–622. <https://doi.org/10.1007/s00410-002-0364-7>
- Chappell, B. W., Bryant, C. J., Wyborn, D., 2012. Peraluminous I-Type Granites. *Lithos*, 153: 142–153. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.07.008>
- Chappell, B. W., White, A. J. R., 1992. I- and S-Type Granites in the Lachlan Fold Belt. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh-Earth Sciences*, 83(1–2): 1–26. <http://dx.doi.org/10.1017/S0263593300007720>
- Chappell, B. W., White, A. J. R., 2001. Two Contrasting Granite Types: 25 Years Later. *Australian Journal of Earth Sciences*, 48(4): 489–499. <https://doi.org/10.1046/j.1440-0952.2001.00882.x>
- Clarke, D. B., 1981. The Mineralogy of Peraluminous Granites: A Review. *Canadian Mineralogist*, 19: 3–17
- Clemens, J. D., Stevens, G., 2012. What Controls Chemical Variation in Granitic Magmas? *Lithos*, 134–135: 317–329. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.01.001>
- Dan, W., Wang, Q., White, W. M., et al., 2018. Rapid Formation of Eclogites during a nearly Closed Ocean: Revisiting the Pianshishan Eclogite in Qiangtang, Central Tibetan Plateau. *Chemical Geology*, 477: 112–122. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2017.12.012>
- de Sigoyer, J., Vanderhaeghe, O., Duchêne, S., et al., 2014. Generation and Emplacement of Triassic Granitoids within the Songpan Ganze Accretionary-Orogenic Wedge in a Context of Slab Retreat Accommodated by Tear Faulting, Eastern Tibetan Plateau, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 88: 192–216. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2014.01.010>
- Ferry, J. M., Watson, E. B., 2007. New Thermodynamic Models and Revised Calibrations for the Ti-in-Zircon and Zr-in-Rutile Thermometers. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 154(4): 429–437. <https://doi.org/10.1007/s00410-007-0201-0>
- Frost, B. R., Barnes, C. G., Collins, W. J., et al., 2001. A Geochemical Classification for Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, 42(11): 2033–2048. <https://doi.org/10.1093/ptrology/42.11.2033>
- Gao, S., Rudnick, R. L., Yuan, H. L., et al., 2004. Recycling Lower Continental Crust in the North China Craton. *Nature*, 432: 892–897. <https://doi.org/10.1038/nature03162>
- He, S. P., Li, R. S., Wang, C., et al., 2011. Discovery of ~4.0 Ga Detrital Zircons in the Changdu Block, North Qiangtang, Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 56(7): 647–658. <https://doi.org/10.1007/s11434-010-4320-z>
- Irvine, T. N., Baragar, W. R. A., 1971. A Guide to the Chemical Classification of the Common Volcanic Rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8(5): 523–548. <https://doi.org/10.1139/e71-055>
- Kapp, P., Yin, A., Manning, C. E., et al., 2003. Tectonic Evolution of the Early Mesozoic Blueschist-Bearing Qiangtang Metamorphic Belt, Central Tibet. *Tectonics*, 22(4): 1043. <https://doi.org/10.1029/2002TC001383>
- Li, C., Huang, X. P., Zhai, Q. G., et al., 2006. The Longmu Co-Shuanghu-Jitang Plate Suture and the Northern Boundary of Gondwanaland in the Qinghai-Tibet Plateau. *Earth Science Frontiers*, 13(4): 136–147 (in Chinese with English abstract).
- Li, C., Zhai, Q. G., Dong, Y. S., et al., 2008. Oceanic Crust on the Northern Margin of Gondwana-Evidence from Early Paleozoic Ophiolite in Central Qiangtang, Qinghai-Tibet Plateau. *Geological Bulletin of China*, 27(10): 1605–1612 (in Chinese with English abstract).
- Li, S., Miller, C. F., Tao, W., et al., 2021. Role of Sediment in Generating Contemporaneous, Diverse “Type” Granitoid Magmas. *Geology*, 50(4): 427–431. <http://dx.doi.org/10.1130/G49509.1>
- Lin, G. C., Ma, C. Q., 2003. Genesis of Peraluminous Granitoids and Their Tectonic Settings. *Geology and Mineral Resources of South China*, 19(1): 65–70 (in Chinese with English abstract).
- Liu, B., Ma, C. Q., Guo, P., et al., 2013. Discovery of the Middle Devonian A-Type Granite from the Eastern Kun-

- lun Orogen and Its Tectonic Implications. *Earth Science*, 38(5): 947—962 (in Chinese with English abstract).
- Liu, B., Ma, C. Q., Guo, P., et al., 2016a. Evaluation of Late Permian Mafic Magmatism in the Central Tibetan Plateau as a Response to Plume-Subduction Interaction. *Lithos*, 264: 1—16. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.08.011>
- Liu, B., Ma, C. Q., Guo, Y. H., et al., 2016b. Petrogenesis and Tectonic Implications of Triassic Mafic Complexes with MORB/OIB Affinities from the Western Garzê-Litang Ophiolitic Mélange, Central Tibetan Plateau. *Lithos*, 260: 253—267. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.06.009>
- Liu, B., Ma, C. Q., Huang, J., et al., 2016. Petrogenetic Mechanism and Tectonic Significance of Triassic Yushu Volcanic Rocks in the Northern Part of the North Qiangtang Terrane. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 35(1): 1—15 (in Chinese with English abstract).
- Liu, B., Ma, C. Q., Tang, Y. J., et al., 2021. Triassic High-Mg Andesitic Magmatism Induced by Sediment Melt-Peridotite Interactions in the Central Tibetan Plateau. *Lithos*, 398—399: 106266. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2021.106266>
- Liu, B., Ma, C. Q., Zhang, J. Y., et al., 2012. Petrogenesis of Early Devonian Intrusive Rocks in the East Part of Eastern Kunlun Orogen and Implication for Early Palaeozoic Orogenic Processes. *Acta Petrologica Sinica*, 28(6): 1785—1807 (in Chinese with English abstract).
- Liu, B., Xu, Y., Li, Q. A., et al., 2020. Origin of Triassic Mafic Magmatism in the North Qiangtang Terrane, Central Tibetan Plateau: Implications for the Development of a Continental Back-Arc Basin. *Journal of the Geological Society*, 177(4): 826—842. <https://doi.org/10.1144/jgs2019-130>
- Liu, Y., Gao, S., Hu, Z., et al., 2010. Continental and Oceanic Crust Recycling-Induced Melt-Peridotite Interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb Dating, Hf Isotopes and Trace Elements in Zircons from Mantle Xenoliths. *Journal of Petrology*, 51: 537—571. <https://doi.org/10.1093/petrology/egp082>.
- Liu, Y., Zong, K., Kelemen, P. B., et al., 2008. Geochemistry and Magmatic History of Eclogites and Ultramafic Rocks From the Chinese Continental Scientific Drill Hole: Subduction and Ultrahigh-Pressure Metamorphism of Lower Crustal Cumulates. *Chemical Geology*, 247: 133—153. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.10.016>.
- Lu, L., Qin, Y., Li, Z. F., et al., 2019. Diachronous Closure of the Shuanghu Paleo-Tethys Ocean: Constraints from the Late Triassic Tanggula Arc-Related Volcanism in the East Qiangtang Subterrane, Central Tibet. *Lithos*, 328—329: 182—199. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.01.034>
- Lu, L., Zhang, K. J., Yan, L. L., et al., 2017. Was Late Triassic Tanggula Granitoid (Central Tibet, Western China) a Product of Melting of Underthrust Songpan-Ganzi Flysch Sediments? *Tectonics*, 36(5): 902—928. <https://doi.org/10.1002/2016tc004384>
- Ma, C. Q., Zou, B. W., Gao, K., et al., 2020. Crystal Mush Storage, Incremental Pluton Assembly and Granitic Petrogenesis. *Earth Science*, 45(12): 4332—4351 (in Chinese with English abstract).
- Maniar, P. D., Piccoli, P. M., 1989. Tectonic Discrimination of Granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635—643. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1989\)1010635:tdog>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1989)1010635:tdog>2.3.co;2)
- Metcalfe, I., 2013. Gondwana Dispersion and Asian Accretion: Tectonic and Palaeogeographic Evolution of Eastern Tethys. *Journal of Asian Earth Sciences*, 66: 1—33. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.12.020>
- Middlemost, E. A. K., 1994. Naming Materials in the Magma/Igneous Rock System. *Earth-Science Reviews*, 37(3—4): 215—224. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(94\)90029-9](https://doi.org/10.1016/0012-8252(94)90029-9)
- Miller, C. F., McDowell, S. M., Mapes, R. W., 2003. Hot and Cold Granites? Implications of Zircon Saturation Temperatures and Preservation of Inheritance. *Geology*, 31(6): 529. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2003\)0310529:haccio>2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2003)0310529:haccio>2.0.co;2)
- Mo, X. X., 2010. A Review and Prospect of Geological Researches on the Qinghai-Tibet Plateau. *Geology in China*, 37(4): 841—853 (in Chinese with English abstract).
- Moecher, D. P., McDowell, S. M., Samson, S. D., et al., 2014. Ti-in-Zircon Thermometry and Crystallization Modeling Support Hot Grenville Granite Hypothesis. *Geology*, 42(3): 267—270. <https://doi.org/10.1130/g35156.1>
- Nie, S. Y., Yin, A., Rowley, D. B., et al., 1994. Exhumation of the Dabie Shan Ultra-High-Pressure Rocks and Accumulation of the Songpan-Ganzi Flysch Sequence, Central China. *Geology*, 22(11): 999—1002. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1994\)0220999:eotdsu>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1994)0220999:eotdsu>2.3.co;2)
- Peng, T. P., Zhao, G. C., Fan, W. M., et al., 2015. Late Triassic Granitic Magmatism in the Eastern Qiangtang, Eastern Tibetan Plateau: Geochronology, Petrogenesis

- and Implications for the Tectonic Evolution of the Paleo-Tethys. *Gondwana Research*, 27(4): 1494–1508. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2014.01.009>
- Schiller, D., Finger, F., 2019. Application of Ti-in-Zircon Thermometry to Granite Studies: Problems and Possible Solutions. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 174(6): 1–16. <https://doi.org/10.1007/s00410-019-1585-3>
- Shand, S. J., 1927. *Eruptive Rocks* (1st Edition). John Wiley & Sons, Inc., New York. <http://dx.doi.org/10.1097/00010694-194807000-00012>
- She, Z. B., Ma, C. Q., Mason, R., et al., 2006. Provenance of the Triassic Songpan-Ganzi Flysch, West China. *Chemical Geology*, 231(1–2): 159–175. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2006.01.001>
- Sisson, T. W., 1994. Hornblende-Melt Trace-Element Partitioning Measured by Ion Microprobe. *Chemical Geology*, 117(1–4): 331–344. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)90135-X](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)90135-X)
- 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. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(98\)00024-3](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(98)00024-3)
- Tao, Y., Bi, X. W., Li, C. S., et al., 2014. Geochronology, Petrogenesis and Tectonic Significance of the Jitang Granitic Pluton in Eastern Tibet, SW China. *Lithos*, 184–187: 314–323. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.10.031>
- Taylor, S. R., McLennan, S. M., 1985. *The Continental Crust Its Composition and Evolution*. Blackwell Scientific Publications, Oxford. <https://doi.org/10.1002/gj.3350210116>
- Wang, Q., Wyman, D. A., Xu, J. F., et al., 2008. Triassic Nb-Enriched Basalts, Magnesian Andesites, and Adakites of the Qiangtang Terrane (Central Tibet): Evidence for Metasomatism by Slab-Derived Melts in the Mantle Wedge. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 155(4): 473–490. <https://doi.org/10.1007/s00410-007-0253-1>
- Wang, X. L., 2017. Some New Research Progresses and Main Scientific Problems of Granitic Rocks. *Acta Petrologica Sinica*, 33(5): 1445–1458 (in Chinese with English abstract).
- Watson, E. B., Harrison, T. M., 1983. Zircon Saturation Revisited: Temperature and Composition Effects in a Variety of Crustal Magma Types. *Earth and Planetary Science Letters*, 64(2): 295–304. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(83\)90211-X](https://doi.org/10.1016/0012-821X(83)90211-X)
- 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>
- Wright, J. B., 1969. A Simple Alkalinity Ratio and Its Application to Questions of Non-Orogenic Granite Genesis. *Geological Magazine*, 106(4): 370–384. <https://doi.org/10.1017/s0016756800058222>
- Wu, F. Y., Jahn, B. M., Wilde, S. A., et al., 2003. Highly Fractionated I-Type Granites in NE China (I): Geochronology and Petrogenesis. *Lithos*, 66(3–4): 241–273. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(02\)00222-0](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(02)00222-0)
- Wu, F. Y., Liu, X. C., Ji, W. Q., et al., 2017. Highly Fractionated Granites: Recognition and Research. *Science in China (Series D)*, 47(7): 745–765 (in Chinese).
- Wu, T., Zhou, J. X., Wang, X. C., et al., 2018. Identification of Ca. 850 Ma High-Temperature Strongly Peraluminous Granitoids in Southeastern Guizhou Province, South China: A Result of Early Extension along the Southern Margin of the Yangtze Block. *Precambrian Research*, 308: 18–34. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2018.02.007>
- Xu, X. S., Wang, X. L., Zhao, K., et al., 2020. Progresses and Tendencies of Granite Researches in last Decade: A Review. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 39(5): 899–911, 1069 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z. Q., Yang, J. S., Li, W. C., et al., 2013. Paleo-Tethys System and Accretionary Orogen in the Tibet Plateau. *Acta Petrologica Sinica*, 29(6): 1847–1860 (in Chinese with English abstract).
- Yang, T. N., Zhang, H. R., Liu, Y. X., et al., 2011. Permo-Triassic Arc Magmatism in Central Tibet: Evidence from Zircon U-Pb Geochronology, Hf Isotopes, Rare Earth Elements, and Bulk Geochemistry. *Chemical Geology*, 284(3–4): 270–282. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2011.03.006>
- Yin, A., Harrison, T. M., 2000. Geologic Evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28: 211–280. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.28.1.211>
- Zen, E. A., 1988. Phase Relations of Peraluminous Granitic Rocks and Their Petrogenetic Implications. *Annual Re-*

- view of Earth and Planetary Sciences*, 16: 21–51. <https://doi.org/10.1146/annurev.ea.16.050188.000321>
- Zhai, M. G., Zhang, Q., Chen, G. N., et al., 2016. Adventure on the Research of Continental Evolution and Related Granite Geochemistry. *Chinese Science Bulletin*, 61(13): 1414–1420 (in Chinese).
- Zhai, Q. G., Jahn, B. M., Su, L., et al., 2013a. Triassic Arc Magmatism in the Qiangtang Area, Northern Tibet: Zircon U-Pb Ages, Geochemical and Sr-Nd-Hf Isotopic Characteristics, and Tectonic Implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 63: 162–178. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.08.025>
- Zhai, Q. G., Jahn, B. M., Wang, J., et al., 2013b. The Carboniferous Ophiolite in the Middle of the Qiangtang Terrane, Northern Tibet: SHRIMP U-Pb Dating, Geochemical and Sr-Nd-Hf Isotopic Characteristics. *Lithos*, 168–169: 186–199. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.02.005>
- Zhai, Q. G., Zhang, R. Y., Jahn, B. M., et al., 2011. Triassic Eclogites from Central Qiangtang, Northern Tibet, China: Petrology, Geochronology and Metamorphic P-T Path. *Lithos*, 125(1–2): 173–189. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.02.004>
- Zhang, G. W., Guo, A. L., Yao, A. P., 2004. Western Qinling-Songpan Continental Tectonic Node in China's Continental Tectonics. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 23–32 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, K. J., Zhang, Y. X., Li, B., et al., 2007. Nd Isotopes of Siliciclastic Rocks from Tibet, Western China: Constraints on Provenance and Pre-Cenozoic Tectonic Evolution. *Earth and Planetary Science Letters*, 256(3–4): 604–616. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.02.014>
- Zhang, Q., Wang, Y., Pan, G. Q., et al., 2008. Sources of Granites: Some Crucial Questions on Granite Study (4). *Acta Petrologica Sinica*, 24(6): 1193–1204 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 李才, 黄小鹏, 翟庆国, 等, 2006. 龙木错-双湖-吉塘板块缝合带与青藏高原冈瓦纳北界. *地质前缘*, 13(4): 136–147.
- 李才, 翟庆国, 董永胜, 等, 2008. 冈瓦纳大陆北缘早期的洋壳信息: 来自青藏高原羌塘中部早古生代蛇绿岩的依据. *地质通报*, 27(10): 1605–1612.
- 林广春, 马昌前, 2003. 过铝花岗岩的成因类型与构造环境研究综述. *华南地质与矿产*, 19(1): 65–70.
- 刘彬, 马昌前, 郭盼, 等, 2013. 东昆仑中泥盆世A型花岗岩的确定及其构造意义. *地球科学*, 38(5): 947–962.
- 刘彬, 马昌前, 黄坚, 等, 2016. 北美塘北缘玉树三叠纪火山岩的成因机制及其构造意义. *岩石矿物学杂志*, 35(1): 1–15.
- 刘彬, 马昌前, 张金阳, 等, 2012. 东昆仑造山带东段早泥盆世侵入岩的成因及其对早古生代造山作用的指示. *岩石学报*, 28(6): 1785–1807.
- 马昌前, 邹博文, 高珂, 等, 2020. 晶粥储存、侵入体累积组装与花岗岩成因. *地球科学*, 45(12): 4332–4351.
- 莫宣学, 2010. 青藏高原地质研究的回顾与展望. *中国地质*, 37(4): 841–853.
- 王孝磊, 2017. 花岗岩研究的若干新进展与主要科学问题. *岩石学报*, 33(5): 1445–1458.
- 吴福元, 刘小驰, 纪伟强, 等, 2017. 高分异花岗岩的识别与研究. *中国科学(D辑)*, 47(7): 745–765.
- 徐夕生, 王孝磊, 赵凯, 等, 2020. 新时期花岗岩研究的进展和趋势. *矿物岩石地球化学通报*, 39(5): 899–911, 1069.
- 许志琴, 杨经绥, 李文昌, 等, 2013. 青藏高原中的古特提斯体制与增生造山作用. *岩石学报*, 29(6): 1847–1860.
- 翟明国, 张旗, 陈国能, 等, 2016. 大陆演化与花岗岩研究的变革. *科学通报*, 61(13): 1414–1420.
- 张国伟, 郭安林, 姚安平, 2004. 中国大陆构造中的西秦岭-松潘大陆构造结. *地质前缘*, 11(3): 23–32.
- 张旗, 王焰, 潘国强, 等, 2008. 花岗岩源岩问题: 关于花岗岩研究的思考之四. *岩石学报*, 24(6): 1193–1204.