



移动阅读

王硕, 方乙, 唐晓源, 等, 2025. 滇西腾冲地块芒章花岗岩年代学、岩石地球化学、锆石 Hf 同位素组成及其地质意义[J]. 沉积与特提斯地质, 45(1): 187–199. doi: [10.19826/j.cnki.1009-3850.2024.12008](https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2024.12008)

WANG S, FANG Y, TANG X Y, et al., 2025. Geochemistry, U-Pb dating and Hf isotope characteristics of Mangzhang granite in Tengchong block[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 45(1): 187–199. doi: [10.19826/j.cnki.1009-3850.2024.12008](https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2024.12008)

滇西腾冲地块芒章花岗岩年代学、岩石地球化学、锆石 Hf 同位素组成及其地质意义

王 硕¹, 方 乙^{1,2*}, 唐晓源¹, 代君瑶¹, 王孟旭¹

(1. 西南石油大学 地球科学与技术学院, 四川 成都 610500; 2. 成都理工大学 自然资源部构造矿成藏重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要: 位于三江特提斯构造带的腾冲地区中生代—新生代岩浆活动频繁, 发育大量花岗岩。本文通过对腾冲地块的芒章花岗岩进行岩相学、全岩地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素分析, 探讨其岩石成因及地质意义。结果表明, 区内岩石以正长花岗岩为主要类型, 具有高硅 (74.41%~76.55%)、富钾 (K_2O/Na_2O 值均大于 1)、过铝质 ($A/CNK=1.34\sim 1.48$) 特征, 属于 S 型花岗岩。Eu、Sr 等元素强烈负异常, Rb、Pb 等元素明显富集, 同时在芒章地区古近纪花岗岩 $Al_2O_3/(MgO+FeO)-CaO/(MgO+FeO)$ 图解中, 样品投点分别落于变质泥质岩、变质杂砂岩和富黏土源岩区域内。研究样品具有变化范围较小的锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值为 $-9.14\sim -7.73$, 对应的二阶段模式年龄 (t_{DM2}) 值为 $1\ 699\sim 1\ 613$ Ma。测得锆石 U-Pb 加权平均年龄为 (49.81 ± 0.35) Ma, 表明岩浆侵位时间属于早始新世。上述特征表明区内花岗岩可能是中元古代变质基底发生部分熔融的产物, 来源于古老富黏土的变质泥质岩及部分变质杂砂岩。结合前人研究成果, 认为研究区内正长花岗岩与拉萨地块广泛发育的 60~50 Ma、50~40 Ma 的岩浆岩一致, 形成于同碰撞环境, 表明腾冲内部具有同碰撞特征的花岗岩是该时期印度板块与腾冲-拉萨地块俯冲碰撞活动的响应。

关键词: 花岗岩类; 锆石 U-Pb 年代学; 地球化学; 锆石 Hf 同位素; 腾冲地块

中图分类号: P597+.3; P548

文献标识码: A

Geochemistry, U-Pb dating and Hf isotope characteristics of Mangzhang granite in Tengchong block

WANG Shuo¹, FANG Yi^{1,2*}, TANG Xiaoyuan¹, DAI Junyao¹, WANG Mengxu¹

(1. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 2. Key Laboratory of Tectonic Controls on Mineralization and Hydrocarbon Accumulation, Ministry of Natural Resources, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The Tengchong area, situated within the Sanjiang Tethys tectonic belt, exhibits frequent Mesozoic-Cenozoic magmatic activity and a significant presence of granite. This study investigates the petrogenesis and geological significance of Mangzhang granite in the Tengchong block through petrography, whole rock geochemistry, zircon U-Pb chronology, and Hf isotope analyses. The results show that the main types of rocks in this area are syenite granite with high SiO_2 contents (from 74.41% to 76.55%) and

收稿日期: 2023-10-20; 改回日期: 2024-01-15; 责任编辑: 黄春梅; 科学编辑: 张向飞

作者简介: 王硕 (1999—), 硕士研究生, 地质学专业。E-mail: 1143949623@qq.com

通信作者: 方乙 (1985—), 副教授, 主要从事热液矿床成因与勘查方面的研究。E-mail: prdwfhy@hotmail.com

资助项目: 自然资源部构造矿成藏重点实验室开放基金 (gzck202004)

high potassium abundances (K_2O/Na_2O ratio is greater than 1), peraluminous (A/CNK value varies from 1.34 to 1.48), and belong to S-type granite. Eu and Sr are strongly negative anomalies, Rb and Pb are obviously enriched. At the same time, in the $Al_2O_3/(MgO+FeO)-CaO/(MgO+FeO)$ diagram of Paleogene granite in the Mangzhang area, the samples fall in the metamorphic argillaceous rocks, metamorphic gritstone, and clay-rich source rocks. Zircon $\epsilon_{Hf}(t)$ values in this study range from -9.14 to -7.73 , corresponding to a two-stage model age (t_{DM2}) of 1 699–1 613 Ma. The weighted average age of zircon U-Pb is (49.81 ± 0.35) Ma, indicating that the magma emplacement time belongs to the early Eocene. The above characteristics suggest that the granite in this area may be the product of partial melting of the Mesoproterozoic metamorphic basement, which is derived from the ancient clay-rich metamorphic argillaceous rocks and some metamorphic greywackes. Combined with previous research results, it is believed that the syenite granite in the study area, as well as the 60–50 Ma and 50–40 Ma magmatic rocks that widely developed in the Lhasa block formed in the same collision environment, which indicating that the Eocene granite with the characteristics of the same collision in Tengchong is a response to the subduction and collision between the Indian plate and Tengchong-Lhasa block in this period.

Key words: granitoid; zircon U-Pb dating; geochemistry; zircon Hf isotope; Tengchong block

0 引言

新特提斯洋的俯冲消减作用造成了印度-欧亚大陆碰撞, 青藏高原抬升隆起, 同时对全球构造、大洋循环和全球气候变化等事件也有着极大的影响(Miller et al., 1987), 近年来, 该事件一直是重要的地质学热点问题之一(Achache et al., 1984; Besse et al., 1984)。青藏高原及其东南缘是研究俯冲作用、板块碰撞的重要区域, 腾冲地块及贡山地块一直被学者们认为是青藏高原东南缘的延伸(季建清, 1998), 出露不同变质程度的地层, 地块内部岩浆活动频繁, 发育大量以中生代-新生代为主的花岗岩, 这些花岗岩的主要形成年龄为 124~30 Ma(吕伯西等, 1993; 董方浏等, 2006; 杨启军等, 2006; 洪大卫等, 2007), 对新特提斯洋向东俯冲消减和陆陆碰撞的时代和过程有着很好的约束作用。

腾冲地块花岗岩根据时空关系可大致分为: 早白垩世东河花岗岩, 主要发育在腾冲地块东部; 晚白垩世古永花岗岩, 主要发育在腾冲地块中部; 古近纪槟榔江花岗岩, 主要发育在腾冲地块西部。前人对早始新世的花岗岩研究较少, 尤其是对芒章地区研究更为匮乏。本文以芒章地区花岗岩体为研究对象, 通过全岩地球化学、锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素分析, 确定花岗岩的形成时代, 并追溯其岩石成因及岩浆源区, 探讨其形成的动力学背景, 以期为腾冲地块中新世代花岗岩的地质演化背景研究提供科学依据。

1 区域地质背景

腾冲地块位于云南省西南部, 班公湖-怒江缝

合带和雅鲁藏布江缝合带之间的东南部(高永娟等, 2012; 张璋等, 2011)。它与滇缅泰马地块接壤, 临近保山地块, 以怒江-瑞丽断裂带为界, 也是东喜马拉雅构造带的南侧翼(图 1; 莫宣学和潘桂棠, 2006; 尹福光等, 2021)。

班公湖-怒江缝合带(班怒带)分割了拉萨地块和南羌塘地块(Hu et al., 2022; 潘桂棠等, 2020), 形成于晚侏罗世到早白垩世, 是拉萨与缅甸地块在晚三叠世北移过程中, 新特提斯洋形成, 中特提斯洋俯冲闭合的结果。腾冲地块在中生代燕山期与位于其东部的保山地块发生了俯冲-碰撞作用, 后又在新生代早期与印度板块发生俯冲-碰撞。这一过程导致造山带中的块体旋转和走滑, 使腾冲地块成为青藏高原东南缘大型走滑断层的一部分。

新特提斯洋的北向俯冲致使印度-欧亚板块发生碰撞, 导致三江特提斯构造带的腾冲地块内部于中生代-新生代时期发生多期次岩浆活动, 区域内出露大面积岩浆岩, 与岩浆作用有关的矿床广泛发育(如腾冲梁河地带发育大量锡矿床)。滇西地区夹持于古特提斯缝合带与新特提斯缝合带之间, 形成于新生代时期印度板块与欧亚板块之间的碰撞造山作用(曹华文等, 2013; 张伟等, 2014)。

腾冲地块的地层存在缺失, 连续性较差, 出露地层主要有古元古界高黎贡山岩群杨家寨组、新元古界梅家山岩群、泥盆系、新近系和第四系。变质基底主要为古元古界高黎贡山岩群杨家寨组, 包括片岩段、片麻岩段和变粒岩段: 片岩段(Pt_{1Y}^{sch})主要为片岩、二云片岩、二云石英片岩, 变质程度达到绿片岩相-角闪岩相; 片麻岩段(Pt_{1Y}^{gn})主要为片麻岩、黑云斜长片麻岩; 变粒岩段(Pt_{1Y}^{gn})主要由

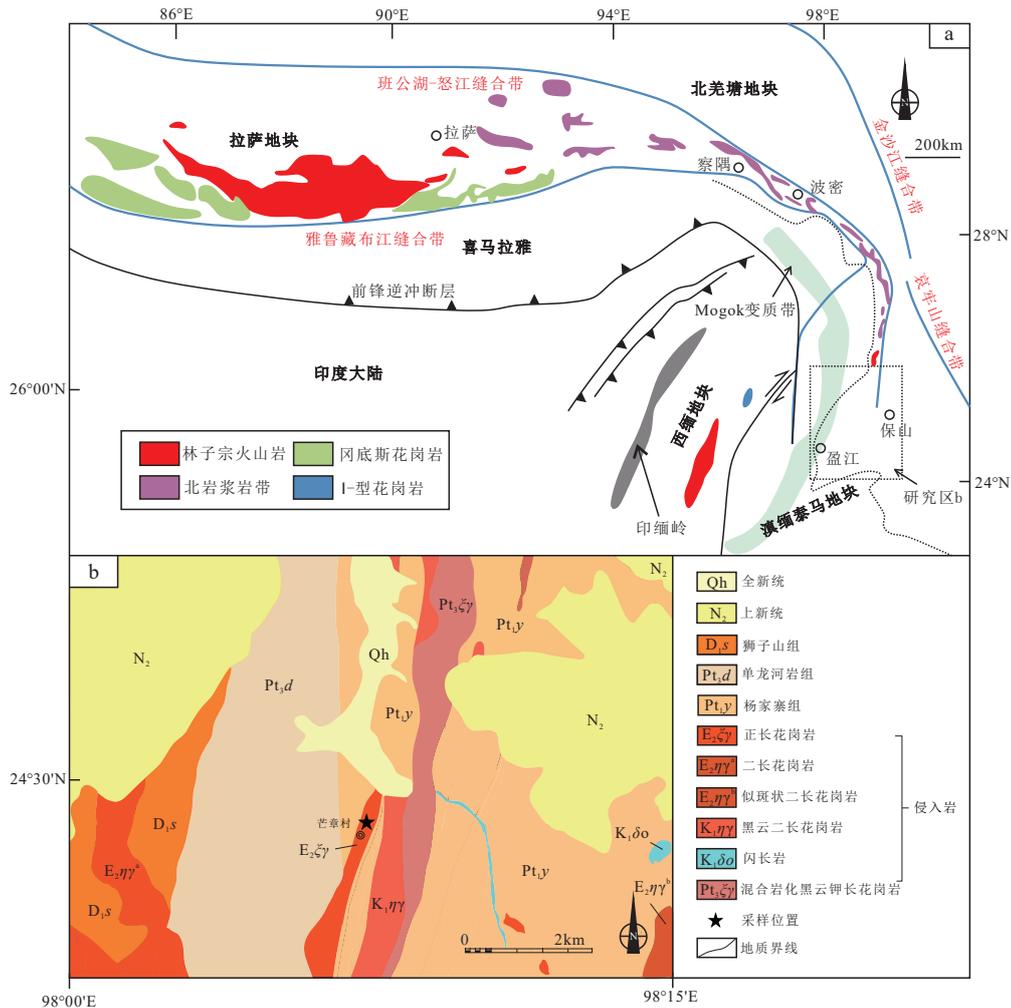


图 1 青藏高原地区大地构造简图 (a, 据 Xu et al., 2012 修改) 和芒章地区地质简图^① (b)

Fig. 1 Simplified tectonic map of the Qingzang Plateau (a, modified after Xu et al., 2012) and simplified geological map of the Mangzhang area^① (b)

变粒岩、黑云斜长变粒岩组成。上覆出露地层由老到新依次为:

新元古界梅家山岩群: 单龙河岩组 a 段 (Pt_{3d}^a) 主要发育含砾泥质板岩、粉砂质绢云板岩; 单龙河岩组 b 段 (Pt_{3d}^b) 以变质砂岩、变质石英砂岩夹含砾板岩为主要岩石类型。

泥盆系: 下部出露狮子山组 (D_{1s}), 主要岩性为不等粒石英杂砂岩、石英砂岩夹绢云板岩; 上部出露关山组: 以(深)灰色灰岩夹泥质粉砂质板岩、绢云板岩为主, 含软锰矿层。

新近系: 主要出露安山岩 (N_{2α})、安山玄武岩 (N_{2αβ})、英安岩 (N_{2ξ}) 及少量凝灰岩 (N_{2f})。

第四系: 该时期沉积物以砂岩、砾岩、粗土质砂岩为主。

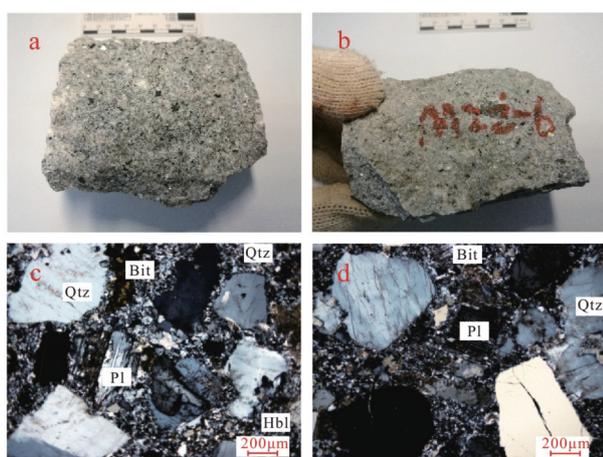
腾冲地块内部岩浆活动频繁, 发育大量花岗岩,

研究区内发育的花岗岩以早始新世侵入岩为主, 如正长花岗岩 (E_{2ξγ})、细-中粒似斑状二长花岗岩 (E_{2ηγ^b})、细-中粒二长花岗岩 (E_{2ηγ^a})、似斑状二长花岗岩 (K_{2ηγ^b})、黑云二长花岗岩 (K_{1ηγ})、少量闪长岩 (K_{1δo}) 和混合岩化黑云钾长花岗岩 (Pt_{3ξγ})。

2 样品特征及分析方法

2.1 样品特征

研究区位于腾冲地块东部内云南省西部的芒章村, 采取样品为正长花岗岩。样品表面呈灰白色, 风化后呈浅褐色, 中-粗粒结构、似斑状结构, 块状构造 (图 2a-b)。主要矿物为: 石英 (约 28%~40%), 钾长石 (>40%), 斜长石 (约 9%~12%), 黑云母 (约 3%~5%)。镜下可见石英颗粒呈一级灰白干涉色, 他形粒状, 自形程度较差 (图 2c), 粒径



Qtz—石英；Bit—黑云母；Pl—斜长石；Hbl—普通角闪石
图2 腾冲芒章地区花岗岩手标本(a、b)及显微(c、d)照片

Fig. 2 Rock photographs (a, b) and microphotographs (c, d) of the Mangzhang granitoids

约为1.5~4.5 mm,发育波状消光,内部相对干净,可见条状裂纹。钾长石颗粒呈一级灰白干涉色,他形一半自形板状结构,部分颗粒表面浑浊,存在轻微蚀变。斜长石呈一级灰白干涉色,大部分为半自形-自形板状结构,自形程度较高,可见具有细密双晶纹的聚片双晶(图2c),部分颗粒内部存在裂隙,被破碎的石英小颗粒充填。黑云母呈棕褐色,大部分为半自形短柱状,少量为鳞片状,发育一组极完全解理,边缘可见轻微的弯曲变形现象。

2.2 分析测试方法

本文对样品进行的实验均在武汉上谱分析科技有限责任公司进行。其中主量元素检测项目主要有:SiO₂、Al₂O₃、TFe₂O₃、MgO、CaO、Na₂O、K₂O、TiO₂、P₂O₅、MnO、烧失量等,检测数量为8件样品和4件标样监控。主要分析仪器为波长色散X射线荧光光谱仪(ZSXPrimus II),波长色散X射线荧光光谱法《硅酸盐岩石化学分析方法第28部分:16个主次成分测定》(GB/T 14506.28—2010)作为本论文样品的分析方法及依据,分析流程详细描述据文献(Liu et al., 2008),结果见附表1*。

利用ICP-MS技术对样品的微量元素含量进行分析,检测数量为8件样品和4件国际标样监控,主要仪器型号是Agilent 7900e(电感耦合等离子体质谱仪),激光系统为GeoLas HD,激光束斑为32 μm,频率为5 Hz。微量元素校正、同位素比值校正和

检测均参照国际标准物质,推荐值引自GeoRem数据库。数据处理软件为ICPMSDATA CAL10.8。具体的分析条件和流程请参考文献(Liu et al., 2008, 2010)。

用于锆石U-Pb定年的仪器采用相干193 nm准分子激光剥蚀系统GeoLas HD,安捷伦电感耦合等离子体质谱仪为Agilent 7900。激光能量80 mJ,频率5 Hz,激光束斑直径32 μm,样品数量为30件,处理软件为ICPMSDATA CAL10.8。微量元素校正标准样品:NIST 610,同位素比值校正标准样品:91500,同位素比值监控标准样品:GJ-1。详细流程参考文献(Liu et al., 2008, 2010),结果见附表2*。

锆石的Hf同位素分析采用LA-MC-ICP-MS技术,主要仪器设备为Neptune Plus,其中的新型X截取锥提高了对Hf、Yb和Lu元素的灵敏度数倍(Hu et al., 2012)。激光剥蚀系统采用Geolas HD,选择单点剥蚀模式,束斑固定为44 μm,详情可参照文献(Hu et al., 2015),分析结果见附表3*。

3 分析结果

3.1 全岩地球化学

根据样品SiO₂和Na₂O+K₂O值(表1),所有样品均位于TAS图解(图3)中的花岗岩类区域内。此外,结合对岩石的野外特征和显微镜下的观察,可以确定芒章地区的岩石为正长花岗岩。

研究区内岩石SiO₂含量最高(74.41%~76.55%),平均含量为75.33%;Al₂O₃含量较高(12.12%~13.16%);全碱含量次之(ALK值为7.97%~8.25%);K₂O/Na₂O值均大于1(1.42~2.12),表现为该岩石相对富K元素的特征,倾向于钾玄岩系列(图4a)。样品的CaO含量低,介于0.63%~1.05%。 σ (里特曼指数)介于1.98~2.17,均小于3.3,说明样品为钙碱性岩石。同时根据计算结果(图4b),所有样品的铝饱和指数值A/CNK均在1.0~1.5之间,Na₂O含量相对偏低,表现出S型花岗岩的特征。A/NK值均落在1.5~2.0之间,综合以上特征判断芒章地区花岗岩为过铝质钾玄岩类。

岩体稀土元素总量较高($\sum\text{REE}=289.24\times 10^{-6}\sim 921.95\times 10^{-6}$),变化范围较大。在腾冲芒章花岗岩稀土元素球粒陨石标准化图(图5a)中,样品(La/Yb)_N比值在8.68~16.48之间,(Gd/Yb)_N比值

*数据资料请联系编辑部或登录期刊网站<https://www.cjyttdz.com.cn/>。

表 1 腾冲地块古近纪来利山花岗岩年龄统计表
Table 1 Statistical table of the age of Paleogene granite in Tengchong block

序号	岩石名称	位置	定年矿物	定年方法	年龄/Ma	资料来源
1	正长花岗岩	芒章村	锆石	U-Pb	49.81±0.35	本文
2	中粒黑云母花岗岩	老熊窝	锆石	U-Pb	50.01±0.43	林进展等, 2015
3	等粒正长花岗岩	淘金处	黑云母	Ar-Ar	50.1	董方浏等, 2006
4	中粗粒黑云母二长花岗岩	三个硐	锆石	U-Pb	50.2±0.2	曹华文等, 2013
5	粗粒黑云母花岗岩	淘金处	锆石	U-Pb	50.33±0.47	林进展等, 2015
6	二长花岗岩	淘金处	锆石	U-Pb	50.4±0.4	林进展等, 2015
7	中粗粒黑云母二长花岗岩	三个硐	锆石	U-Pb	50.6±0.2	曹华文等, 2013
8	细粒黑云母花岗岩	淘金处	锆石	U-Pb	51.31±0.55	曹华文等, 2013
9	中粒正长花岗岩	梁河县	锆石	U-Pb	52.0±0.3	孙转荣等, 2017
10	等粒正长花岗岩	淘金处	黑云母	Ar-Ar	52.3	董方浏等, 2006
11	似斑状黑云母二长花岗岩	淘金处	锆石	U-Pb	52.34±0.68	孙转荣等, 2017
12	粗粒花岗岩	淘金处	锆石	U-Pb	52.7±0.2	林进展等, 2015
13	似斑状花岗岩	淘金处	锆石	U-Pb	53.0±0.2	林进展等, 2015

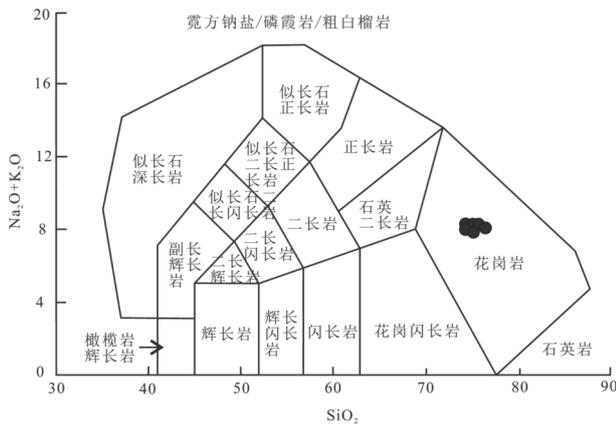


图 3 侵入岩 TAS 图解 (据 Rickwood, 1989)

Fig. 3 TAS classification diagram of intrusions (after Rickwood, 1989)

介于 1.60~2.91, 平均值为 1.87。其中轻稀土元素表现为强分馏, 重稀土元素分馏程度较弱。Eu 含量(0.16~0.19)呈“V”字形展布, 总体配分模式左侧陡右侧缓, 呈现右倾型不对称的“海鸥型”, 可见花岗岩的分异程度较高。个别样品还显示微弱的 Ce 负异常, 表明稀土元素的分异程度和富集程度存在差异。

3.2 微量元素

在微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 5b)中, 样品表现为不同程度地富集 Th、La、Pb、Nd、Tb 等元素, 其中 Rb 值介于 $373 \times 10^{-6} \sim 403 \times 10^{-6}$, Th 值介于 $70 \times 10^{-6} \sim 82.1 \times 10^{-6}$, 而 Sr、Ba、Eu、Lu 等元素表现为相对亏损的特征。地球化学活动性较强的大离子亲石元素(LILE)中的 Pb 显示明显正异

常, Sr 和 Eu 具有明显负异常的特点, 总体上表明源区存在斜长石的残留(DeCelles et al., 2015; Jaeger et al., 1989; 聂飞等, 2015; 杨启军等, 2009; 董美玲等, 2013; 高永娟等, 2014)。

3.3 锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素

3.3.1 锆石 U-Pb 年代学

本文在详细调查的基础上, 选取了正长花岗岩样品 MZ2-1 中 30 个锆石并对不同部位进行了测定分析, 分析结果见附表 2*。

在阴极发光(CL)图像下(图 6), 锆石无色透明, 具有长柱状的晶体形态, 自形程度较高。其长度介于 100~250 μm , 长宽比介于 1:1~3:1。根据锆石内部结构的观察结果, 将锆石分为三类: 第一类是无核部结构, 内部呈现简单清晰的特征; 第二类是核部及边部都具有韵律环带, 内部相对复杂; 第三类是核部被生长环带包裹的继承锆石(丛峰等, 2009, 2010)。样品的 U 含量变化较大, U 的含量介于 $199 \times 10^{-6} \sim 1780 \times 10^{-6}$, Th 的含量比较平均, 为 $153 \times 10^{-6} \sim 953 \times 10^{-6}$, Th/U 的值为 0.38~1.15, 比值均高于 0.1, 可以判断锆石是典型的岩浆成因。将数据异常的点去除, 选择数据较好的点进行分析。除了一个点落在一致曲线下的分析点外(图 7), 其他分析点均在谐和线上或附近, 一致性特征明显(李再会等, 2012)。研究结果显示, 锆石形成后的 U-Pb 同位素体系具有良好的封闭性, 没有明显的 U、Pb 缺失或进入现象。最终测得的样品锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 (49.81 ± 0.35) Ma, 统计加权平均标准偏差(MSWD)为 1.6。结果表明样品锆

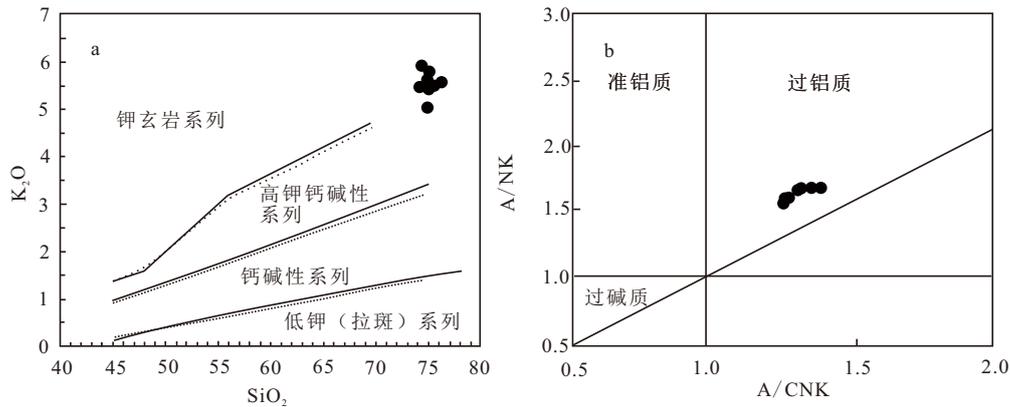


图4 芒章地区花岗岩 K_2O-SiO_2 (a, 据 Peccerillo and Taylor, 1976) 及 $A/NK-A/CNK$ 图解 (b)

Fig. 4 K_2O-SiO_2 (a, after Peccerillo and Taylor, 1976) and $A/NK-A/CNK$ (b) plots for granite of the Mangzhang area

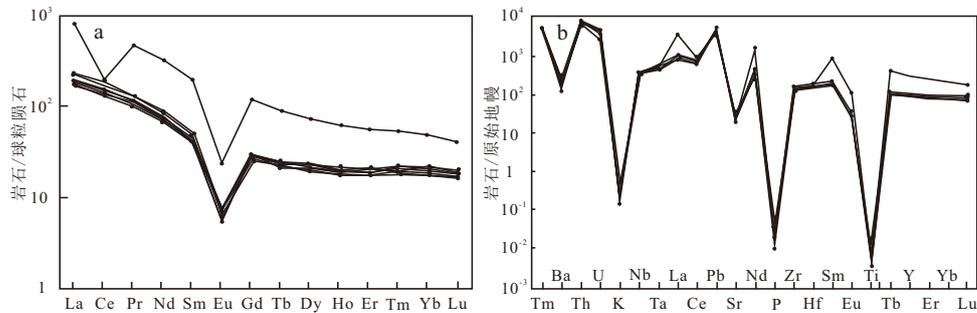
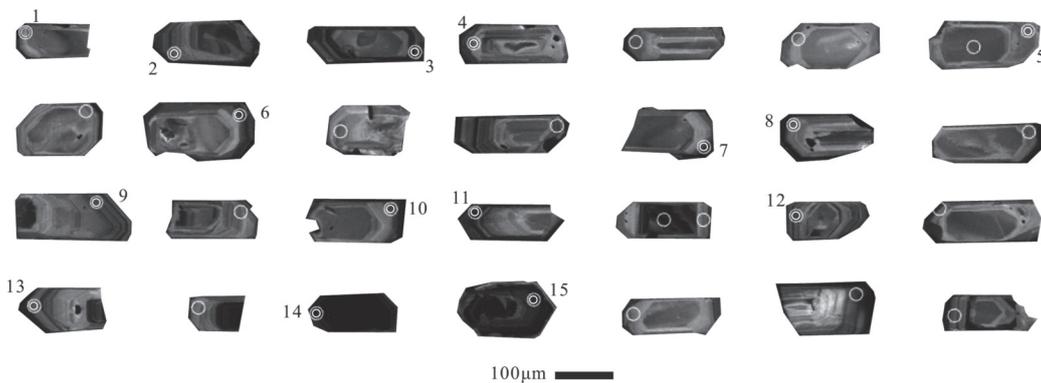


图5 芒章花岗岩稀土元素球粒陨石标准化图 (a, 标准化值据 Taylor et al., 1985) 和微量元素原始地幔标准化蛛网图 (b, 标准化值据 Sun et al., 1989)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE pattern (a, normalized values after Taylor et al., 1985) and primitive mantle-normalized trace element pattern (b, normalized values after Sun et al., 1989) of the Mangzhang granitoids



双环圆圈表示同时测定 Hf 和 U-Pb 同位素, 单环圆圈表示仅测定 U-Pb 同位素

图6 样品 MZ2-1 的锆石 CL 图像

Fig. 6 CL images of the zircons from the sample MZ2-1

石的年龄约为 50 Ma, 具有一定的精确性和可靠性。

3.3.2 Hf 同位素组成

选择用于锆石定年的花岗岩样品 MZ2-1 中的

15 个锆石颗粒进行同位素分析, 测试结果如附表 3*

所示。对模式年龄进行计算时, 采用 $(^{176}Lu/^{177}Hf)_{CHUR}$

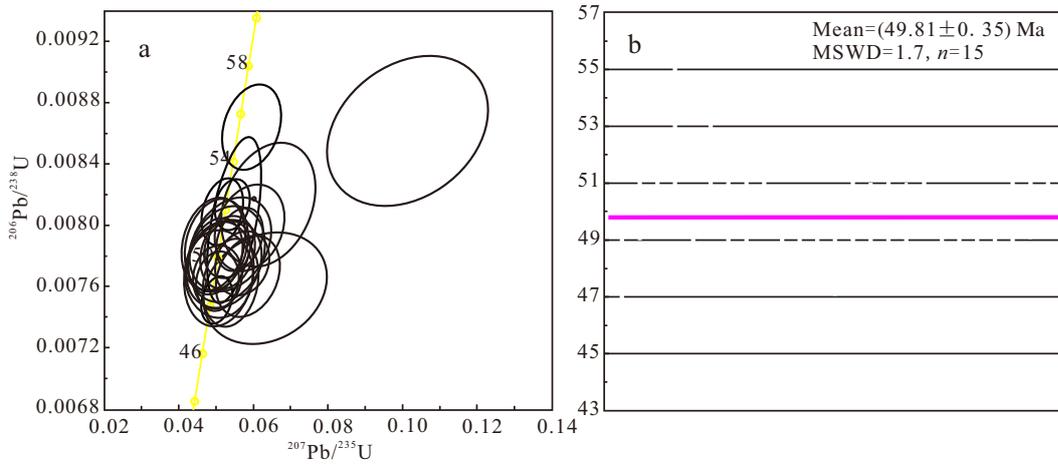


图7 锆石 U-Pb 年龄谐和图 (a) 和加权平均年龄图 (b)

Fig. 7 Zircon U-Pb concordia diagram (a) and weighted mean age diagram (b) of Mangzhang granitoids

值为 0.033 2(Griffin et al., 2000), $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}, 0}$ 值为 0.282 772; $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}$ 值为 0.038 4, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}$ 值为 0.283 25(Blichert-Toft et al., 1997); 地壳的 f_{CC} 值为 0.55, f_{DM} 值为 0.16 的标准数值(Söderlund et al., 2004)。所分析样品的 $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ 值介于 0.014 380~0.027 379, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值介于 0.000 545~0.001 020, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值介于 0.282 484~0.282 523。其中样品的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值均小于 0.002, 表明锆石在形成以后, 存在极少放射成因 Hf 的积累(吴福元等, 2007), 因而可以用初始 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值代表锆石形成时的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值, 以反映初始组成特征。镁铁质地壳的 $f_{\text{Lu/Hf}}$ 值=-0.34(Amelin et al., 2000), 硅铝质地壳的 $f_{\text{Lu/Hf}}$ 值=-0.72(Vervoort et al., 1996), 样品的 $f_{\text{Lu/Hf}}$ 值平均值为 -0.98, 远小于上述二者, 故二阶段模式年龄更能够代表其源区物质在地壳的平均存留年龄。15 颗锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(0)=-10.18\sim-8.79$, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)=-9.14\sim-7.73$, Hf 同位素单阶段模式年龄(t_{DM1})为 1 086~1 018 Ma, 平均值为 1 044 Ma, 相应的二阶段模式年龄(t_{DM2})介于 1 699~1 613 Ma, 表明芒章花岗岩的初始物质来源于中元古代。

4 讨论

4.1 花岗岩形成时代

腾冲地区的新生代侵入岩较为发育, 研究程度较高。根据前人研究结果, 腾冲地块岩浆作用可分三期(刘军平等 2017): 早白垩世东河花岗岩

(131~115 Ma): 主要发育在腾冲地块东部; 晚白垩世古永花岗岩(77~70 Ma): 主要发育在腾冲地块中部, 古近纪槟榔江花岗岩(65~50 Ma): 主要发育在腾冲地块西部。其中腾冲地块西部以古近纪来利山含锡矿花岗岩体为代表, 是主碰撞造山早期挤压阶段与壳源花岗岩有关的典型代表(侯增谦等, 2006; 马莉燕等, 2013; 毛英等, 2017)。其同位素年龄介于 53~50 Ma, 主要集中在 51~50 Ma(表 1; Rage et al., 1995; Rowley et al., 1996; 陈永清等, 2013; 林进展等, 2015; 孙转荣等, 2017), 以正长花岗岩和二长花岗岩为主。

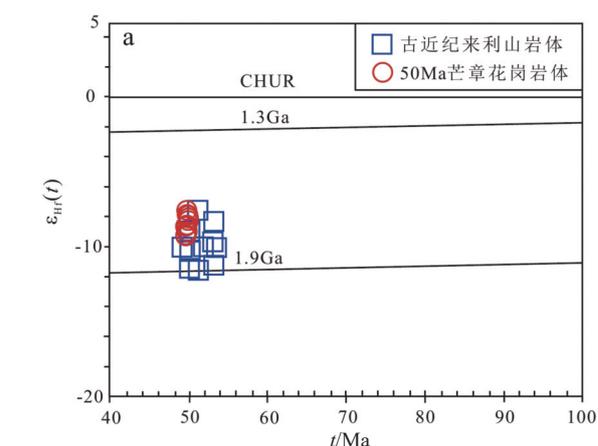
根据前人研究, Garzanti et al.(1987)和 Searle et al.(1987)认为印度板块与欧亚板块的初始碰撞时间为 65~40 Ma 左右。通过对芒章代表性岩石正长花岗岩进行高精度的锆石 U-Pb 定年, 判定岩体的侵位时间为 (49.81 ± 0.35) Ma(MSWD=1.6), 芒章花岗岩得到的锆石年龄处于印度板块与欧亚板块碰撞事件发生的时间范围内, 结合前人地球化学特征和同位素定年数据结果对比, 认为芒章岩体可能与腾冲地块西部岩体形成时间一致, 确定芒章岩体侵位时间为古近纪(50 Ma 左右), 可能是对印度大陆与欧亚大陆碰撞活动的响应。

4.2 岩石成因及岩浆源区

花岗岩的岩浆来源主要分为三种: (1)古老地壳部分熔融; (2)新生地壳部分熔融; (3)壳源和幔源岩浆混合形成的混合岩浆。其中来源于古老地壳物质部分熔融作用的岩浆表现为 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值低于球

粒陨石值,来源于新生地壳的岩浆 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值高于球粒陨石值。在研究区内的花岗岩体中,锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 -9.14 到 -7.73 , 变化范围较小,所有样品的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均小于 0, 在 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)-t$ 图解(图 8)中位于球粒陨石线(CHUR)下方,对应的二阶段模式年龄($t_{\text{DM}2}$)为 $1613 \sim 1699$ Ma, 与古近纪来利山岩体的特征相似(曹华文等, 2015; 周洁等, 2017), 表明二者可能都来源于中元古代古老地壳物质。壳源为主的花岗岩具有强烈的 Eu 负异常(杨启军等, 2009; 董美玲等, 2013; 高永娟等, 2014), 芒章花岗岩样品 δEu 值($0.16 \sim 0.19$)表现出强烈负异常, 表明源区具有壳源特征, 并且可能残留斜长石。同时芒章花岗岩稀土元素球粒陨石标准化图(图 5a)呈现“V”型分布的特征, Sr、Ba、Eu、Lu 相对亏损、Pb 明显富集, 进一步指示研究区源岩为典型的上地壳岩石。

大量研究表明, 不同成因的锆石 Th/U 值不同, 当 Th/U 值大于 0.4 时, 一般为岩浆成因锆石。芒章花岗岩 Th/U 平均值为 7.13, 明显高于 0.4, 具有明显的岩浆成因锆石特征。通过分析微量元素的变化, 可以对结晶分异信息有更进一步的了解, 如 Rb/Ba 的值可以用来说明结晶分异的程度(Ballouard et al., 2016; 肖庆辉等, 2002)。芒章花岗岩体 Rb/Ba 较高(图 9), 具有逐渐增加的趋势, 这说明可能存在黑云母和钾长石的分离结晶作用。一般认为 Sr 相容于斜长石(Deering and Bachmann, 2010), 壳源为主的花岗岩具有强烈的 Eu 负异常(杨启军等, 2009; 董美玲等, 2013; 高永娟等, 2014; 赵少伟等, 2017), 本文样品 δEu 值均小于 0, 岩体都具有 Sr 含量逐渐降低的趋势, 表明源区可能残留斜长石或斜长石正在进行分离结晶作用。



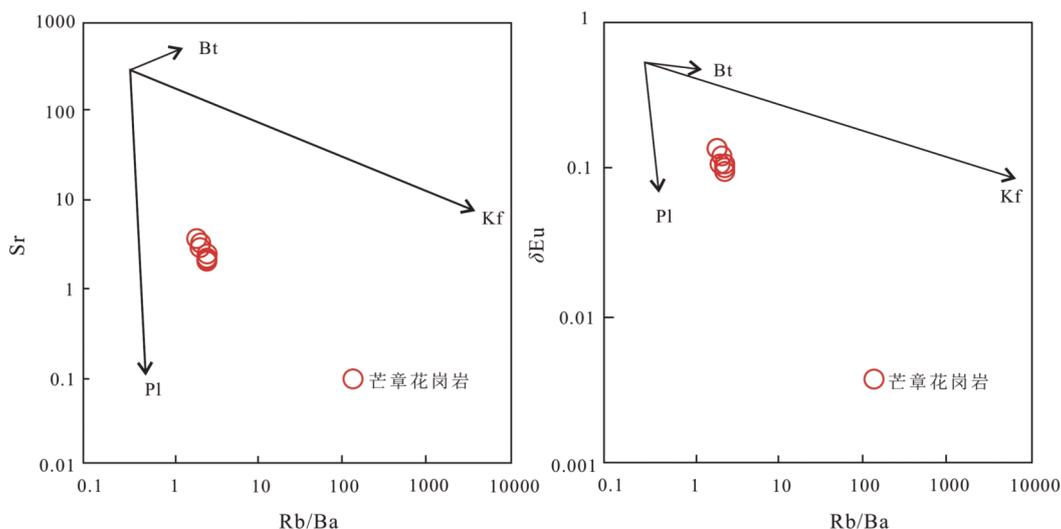
划分区域引自 Kemp et al., 2007; 数据引自孙转荣, 2020 和崔晓琳等, 2022

图 8 腾冲地块芒章花岗岩体 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)-t$ 图解

Fig. 8 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)-t$ plot of the Mangzhang granitoids

2010), 壳源为主的花岗岩具有强烈的 Eu 负异常(杨启军等, 2009; 董美玲等, 2013; 高永娟等, 2014; 赵少伟等, 2017), 本文样品 δEu 值均小于 0, 岩体都具有 Sr 含量逐渐降低的趋势, 表明源区可能残留斜长石或斜长石正在进行分离结晶作用。

芒章地区花岗岩样品的 SiO_2 含量介于 $74.41\% \sim 76.55\%$, 铝饱和度值 A/CNK 均在 $1.0 \sim 1.5$ 之间(图 4), Na_2O 含量偏低, 富 K 元素, 表现为过铝质花岗岩。A/NK 值均落在 $1.5 \sim 2.0$ 之间 (> 1.1), 表明芒章花岗岩体为 S 型花岗岩(Maniar, 1989)。在 $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{MgO}+\text{FeO})-\text{CaO}/(\text{MgO}+\text{FeO})$ 图解(图 10a)



黑云母、钾长石和斜长石的分配系数引自 Bachmann et al., 2005。Bt—黑云母; Kf—钾长石; Pl—斜长石

图 9 腾冲地块芒章花岗岩的 Sr-Rb/Ba 图解 (a) 和 $\delta\text{Eu}-\text{Rb}/\text{Ba}$ 图解 (b)

Fig. 9 Sr-Rb/Ba plot and $\delta\text{Eu}-\text{Rb}/\text{Ba}$ plot of the Mangzhang granitoids

中,样品的 $\text{CaO}/(\text{MgO}+\text{FeO})$ 值均在 0.2~0.6 之间, $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{MgO}+\text{FeO})$ 值介于 5~7,落在变质泥质岩范围内的样品居多,落于变质泥质岩和变质杂砂岩内的样品较少,样品均为富集黏土源岩(图 10b),指示源区的主要成分是泥质岩和少量变质杂砂岩,与岩石学特征相符。

同时 Barbarin(1996)认为花岗岩主要包括两类:(1)含白云母的过铝质花岗岩类(MPGs),主要存在于大陆碰撞加厚地壳内部,部分熔融的主导因素是隆升减压,在地壳剪切或逆掩断层作用下,通过“湿”深熔作用和岩浆的结晶分异作用形成;(2)含堇青石的过铝质花岗岩类(CPGs),形成于受底辟作用或幔源岩浆热引起的地壳岩石“干”深熔作用。腾冲地块内部的三期岩浆作用以及研究区古近纪花岗岩都未出现堇青石等矿物,表现为含白云母的过铝质花岗岩特征,说明芒章花岗岩是由于地壳物质增厚、隆升减压作用形成的过铝质花岗岩。

综合上述特征,进一步推断芒章地区古近纪花岗岩来源于富黏土的变质泥质岩及部分变质杂砂岩,为中元古代上地壳物质增厚、隆升减压作用形成的过铝质花岗岩。

4.3 地球动力学背景

喜马拉雅造山带是印度板块向欧亚大陆俯冲碰撞的结果,其影响范围广、规模大,形成了青藏高原。青藏高原由许多小陆块及陆间缝合带组成,由东北至西南主要包括:北羌塘地块、龙木错-双湖缝合带、南羌塘地块、班公湖-怒江缝合带、拉萨地块和雅鲁藏布江缝合带等(侯增谦等,2006;张

洪瑞等,2018)。其中由班公湖-怒江缝合带至雅鲁藏布江-密支那缝合带,拉萨地块和腾冲地块内都具有缺少二叠纪地层(碎屑岩和碳酸盐岩)(杨启军等,2006; Xu et al., 2012)、发育大量早白垩世-始新世花岗岩等特征,且地球化学特征和 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值相似,说明腾冲地块与拉萨地块于冈瓦纳大陆裂解的过程中拼合,随后一起向北漂移,经历了复杂的演化过程后与欧亚大陆拼接为一体。位于拉萨地块东南部的腾冲地块受到强烈的挤压,发生了顺时针 87° 旋转。对于印度板块-欧亚大陆碰撞发生的初始时间,地质学者们有不同的观点。莫宣学等(2003)和王成善等(2003)学者通过对冈底斯带林子宗火山岩的区域不整合关系、岩相学特征以及元素地球化学等方面综合分析讨论,认为印度-欧亚大陆碰撞开始时间在 65 Ma 左右, Garzanti et al.(1987)和 Searle et al.(1987)认为碰撞时间早于 55 Ma。尽管对于碰撞初始时间的认识不统一,但在雅鲁藏布江缝合带附近发现的 53~33 Ma 的高压变质岩表明,二者碰撞时间应在 53 Ma 前。

在晚白垩世-早白垩世初期,印度板块与腾冲地块发生俯冲碰撞、造山作用,随着印度板块及洋壳的持续俯冲和楔入,腾冲地块受到强烈挤压,导致区域地壳增厚隆升,深部地壳物质受热抬升减压发生部分熔融形成花岗岩。上述提及腾冲地块内部(包括研究区)出露的始新世花岗岩均为含白云母的过铝质花岗岩类(MPGs),本文锆石 U-Pb 年龄(50 Ma)代表了岩浆的侵入时代,并且在构造环境判别图解(图 11; Harris et al., 1986)中,8 件样品均落入同碰撞花岗岩区域内,与拉萨地块广泛发育

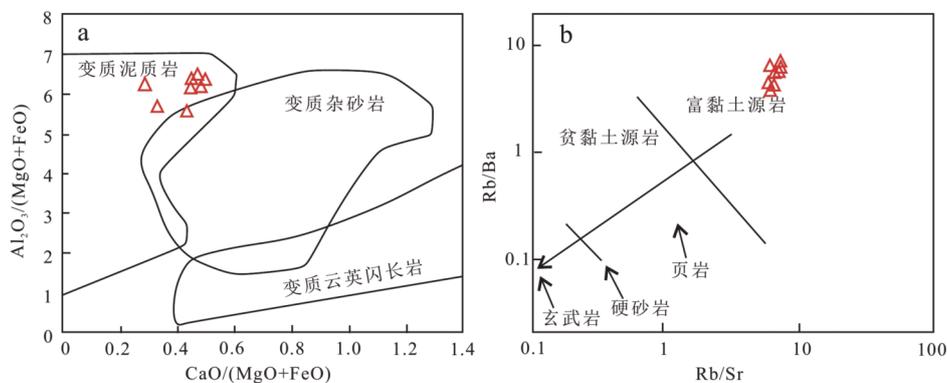


图 10 芒章地区古近纪花岗岩 $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{MgO}+\text{FeO})$ - $\text{CaO}/(\text{MgO}+\text{FeO})$ (a, 据 Altherr et al., 2000), Rb/Ba - Rb/Sr (b, 据 Sylvester, 1998) 图解

Fig. 10 Plots of $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{MgO}+\text{FeO})$ - $\text{CaO}/(\text{MgO}+\text{FeO})$ (a, after Altherr et al., 2000) and Rb/Ba - Rb/Sr (b, after Sylvester, 1998) for Paleogene granite in Mangzhang

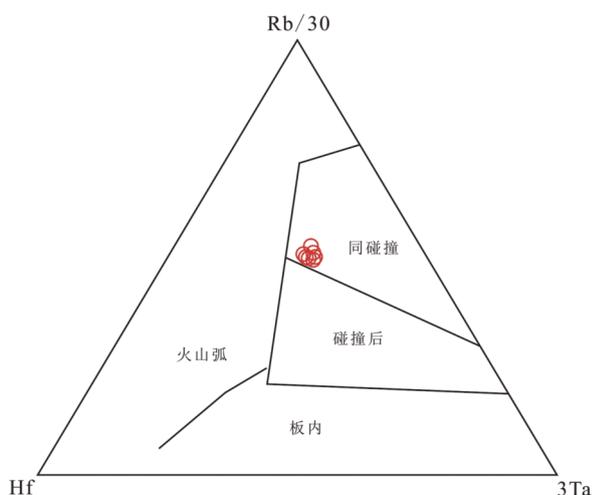


图 11 构造环境判别图解 (据 Harris et al., 1986)

Fig. 11 Discrimination diagram of tectonic setting for the granites (after Harris et al., 1986)

的 60~50 Ma、50~40 Ma 形成于同碰撞环境的岩浆岩一致。因此,可以将腾冲内部具有同碰撞花岗岩特征的始新世花岗岩看作是该时期印度板块与腾冲-拉萨地块俯冲碰撞活动的响应,同时腾冲地块是拉萨地体的东南延伸部分。而腾冲地区的新生代花岗岩距缅甸境内的密支那缝合带的直线距离超过了 100 km,由此可以将腾冲地块内始新世岩浆活动看作是印度次大陆以低角度持续向欧亚大陆俯冲碰撞作用的远程效应。

5 结论

(1)滇西芒章地区的正长花岗岩所测锆石样品的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素加权平均年龄为 $(49.81 \pm 0.35) \text{Ma}$ (MSWD=1.6), 指示其成岩时代为早始新世。

(2)花岗岩样品以高硅、富钾、A/CNK 值介于 1.0~1.5 为特征,指示其为高钾钙碱性 S 型花岗岩。锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值小于 0, 二阶段模式年龄 ($t_{\text{DM}2}$) 值为 1086~1018 Ma。Eu 和 Sr 明显负异常, Rb、Pb 富集等地球化学特征指示芒章花岗岩源区物质来自古老地壳, 是富黏土的变质泥质岩及部分变质杂砂岩经过部分熔融作用而成的产物。

(3)腾冲地块内部(包括研究区)出露的始新世花岗岩均为含白云母的过铝质花岗岩类(MPGs), 与拉萨地块广泛发育的形成于同碰撞环境的 60~50 Ma、50~40 Ma 岩浆岩一致, 是该时期印度板块与腾冲拉萨地块俯冲碰撞活动的响应, 同时腾冲地块是拉萨地体的东南延伸部分。

注释:

① 云南省地质调查院, 2018. 1:5 万芒章幅地质图 [R].

References

- Achache J, Courillot V, Zhou Y, 1984. Paleo-geographic and tectonic evolution of southern Tibet since Middle Cretaceous time: New paleomagnetic data and synthesis[J]. *Geophysics*, 89: 10311 - 10399.
- 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) [J]. *Lithos*, 50 (1-3): 51 - 73.
- Amelin Y, Lee D C, Halliday A N, 2000. Early-Middle Archaean crustal evolution deduced from Lu-Hf and U-Pb isotopic studies of single zircon grains[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64: 4205 - 4225.
- Bachmann O, Dungan A M, Bussy F, 2005. Insights into shallow magmatic processes in large silicic magma bodies: the trace element record in the Fish Canyon magma body, Colorado[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 149 (3): 338 - 349.
- Ballouard C, Poujol M, Boulvais P, et al., 2016. Nb-Ta fractionation in peraluminous granites: A marker of the magmatic-hydrothermal transition[J]. *Geology*, 44 (3): 231 - 234.
- Barbarin B, 1996. Genesis of the two main types of peraluminous granitoids[J]. *Geology*, 24: 295 - 298.
- Besse J, Courillot V, Pozzi J P, et al., 1984. Paleomagnetic estimates of crustal shortening in the Himalayan thrusts and Zangbo suture[J]. *Nature*, 311: 621 - 626.
- Blichert-Toft J, Albarède F, 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 148 (1-2): 243 - 258.
- Cao H W, Zhang S T, Lin J Z, et al., 2013. Geologic characteristics and tectonic settings of the deposits in West Yunnan, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 40 (4): 457 - 467 (in Chinese with English abstract).
- Chen Y Q, Lu Y X, Zhao H J, et al., 2013. Zircon SHRIMP U-Pb geochronology, geochemistry of the Xiaochang monzonitic granite with Mo mineralization and implications for tectonic setting in Tengchong Block, Western Yunnan Terrain, Southwestern China[J]. *Earth Science Frontiers*, 20 (5): 1 - 14 (in Chinese with English abstract).
- Cong F, Lin S L, Li Z H, et al., 2009. Zircon U-Pb ages of gneiss granites in Tengchong Block, western Yunnan[J]. *Acta Geologica Sinica*, 83: 651 - 658 (in Chinese with English abstract).
- Cong F, Lin S L, Tang H F, et al., 2010. Trace elements and Hf isotope compositions and U-Pb age of igneous zircons from the Triassic granite in Lianghe, western Yunnan[J]. *Acta Geologica Sinica* (8): 1155 - 1164 (in Chinese with English abstract).
- Cui X L, Zhang Q W, Wu H Y, et al., 2022. Genesis of Late

- Cretaceous-Paleogene Tin-rich granites in Tengchong Block: magmatic source region and differentiation and evolution conditions[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 38 (01) : 253 – 266 (in Chinese with English abstract).
- DeCelles P G, Gehrels G E, Nijman Y, et al., 2015. Detrital geochronology and geochemistry of cretaceous early Miocene strata of Nepal: implications for timing and diachroneity of initial Himalayan orogenesis[J]. *Earth Planetary Science Letters*, 227 (3-4) : 313 – 330.
- Deering C D, Bachmann, 2010. Trace element indicators of crystal accumulation in silicic igneous rocks[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 297 (1-2) : 324 – 331.
- Dong F L, Hou Z Q, Gao Y F, et al., 2006. Cenozoic granitoid in Tengchong, western Yunnan: Genesis type and implication for tectonics[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22 (4) : 927 – 937 (in Chinese with English abstract).
- Dong M L, Dong G C, Mo X X, et al., 2013. The Mesozoic Cenozoic magmatism in Baoshan Block, western Yunnan and its tectonic significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29 (11) : 3901 – 3913 (in Chinese with English abstract).
- Gao Y J, Lin S L, Cong F, et al., 2012. LA-LCP-MS zircon U-Pb dating and geological implications for the Early Cretaceous volcanic rocks on the southeastern margin of the Tengchong block, western Yunnan[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 32 (4) : 59 – 64 (in Chinese with English abstract).
- Gao Y J, Lin S L, Cong F, et al., 2014. Zircon U-Pb geochronology, zircon Hf isotope and bulk geochemistry of Paleogene granite in the Tengchong-Lianghe area, western Yunan[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88 (1) : 63 – 71 (in Chinese with English abstract).
- Garzanti E, Baud A, Mascle G, 1987. Sedimentary record of the northward flight of India and its collision with Eurasia (Ladakh Himalaya, India) [J]. *Geodinaca Acta (Paris)*, 1 (4-5) : 297 – 312.
- Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, et al., 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites[J]. *Geochemical et Cosmochimica Acta*, 64 (1) : 133 – 147.
- Harris N B, Pearce J A, Tindle A G, 1986. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 19 (1) : 67 – 81.
- Hong D W, Wang T, Tong Y, 2007. An outline about granitoids in China[J]. *Geological Review (S1)* : 9 – 16 (in Chinese with English abstract).
- Hou Z Q, Yang Z S, Xu W Y, 2006. Tibetan Plateau collisional orogenic belt: I. Main collisional orogenic mineralization[J]. *Geology of Ore Deposits* (4) : 337 – 358 (in Chinese with English abstract).
- Hu X M, A Xue, W Garzanti E, et al., 2022. Exploring a lost ocean in the Tibetan Plateau: Birth, growth, and demise of the Bangong-Nujiang Ocean[J]. *Earth-Science Reviews*, 229 (Suppl C) : 104031.
- 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[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 27 (9) : 1391 – 1399.
- Hu Z C, Zhang W, Liu Y S, et al., 2015. “Wave” signal-smoothing and mercury-removing device for laser ablation quadrupole and multiple collector ICPMS analysis: Application to lead isotope analysis[J]. *Analytical Chemistry*, 87 (2) : 1152 – 1157.
- Jaeger J J, Courtillot V, Tapponnier P, 1989. Palaeontological view of the Deccan Traps, the Cretaceous/Tertiary boundary and the India-Asia Collision[J]. *Geology*, 17: 316 – 319.
- Ji J Q, 1998. Petrology and tectonic evolution of Cenozoic lithosphere in Tengchong-Menglian-Napang area[D]. Institute of Geology and Geophysics (in Chinese with English abstract).
- Kemp A I, Hawkesworth C J, Foster G L, et al., 2007. Magmatic and crustal differentiation history of granitic rocks from Hf-O isotopes in zircon[J]. *Science*, 315 (5814) : 980 – 983.
- Li Z H, Lin S L, Cong F, et al., 2012. Early Cretaceous magmatism in Tengchong-Lianghe Block, western Yunnan[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 31 (6) : 590 – 598 (in Chinese with English abstract).
- Lin J J, Cao H W, Zhang S T, et al., 2015. Geochemical characteristics, zircon U-Pb dating and its tectonic significance of A-type granites in Lilishan, Tengchong, southeast margin of Tibetan Plateau[J]. *Geotectonics and Metallogeny*, 39 (5) : 959 – 971 (in Chinese with English abstract).
- Liu J P, Tian S M, Cong F, et al., 2017. The Shale granites from the southern part of the Lancangjiang tectonic belt, western Yunnan: Zircon U-Pb age, geochemistry and geological implications[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 37 (4) : 29 – 40 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y S, Gao S, Hu Z C, 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 of mantle xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 51: 537 – 571.
- 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[J]. *Chemical Geology*, 257: 34 – 43.
- Lü B X, Wang Z, Zhang N D, et al., 1993. Granitoids and their metallogenic specificity in Sanjiang area[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1 – 328.
- Ma L Y, Fan W M, Wang Y J, et al., 2013. Zircon U-Pb geochronology and Hf isotopes of the granitic gneisses in the Nabang area, western Yunnan Province[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 37 (2) : 273 – 283 (in Chinese with English abstract).
- Maniar P D, Piccoli P M, 1989. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 101 (5) : 635 – 643.
- Mao Y, Mao Q, Guo Z Q, et al., 2017. Zircon U-Pb Chronology and geochemistry of Cenozoic granites in Tengchong Block, western Yunnan[C]//The 9th National Congress and the 16th Academic Annual Meeting of the Chinese Society for Mineralogy, Petrology and

- Geochemistry: 178–179 (in Chinese with English abstract).
- Miller K G, Fairbanks R G, Moutain G S, 1987. Tertiary oxygen isotope synthesis, sea level history, and continental margin erosion[J]. *Paleoceanography*, 2: 1–19.
- Mo X X, Pan G T, 2006. From the Tethys to the formation of the Qinghai-Tibet Plateau: Constrained by tectono-magmatic events[J]. *Earth Science Frontiers*, 13 (6): 43–51 (in Chinese with English abstract).
- Mo X X, Zhao Z Z, Deng J F, 2003. Response of volcanism to the India-Asia collision[J]. *Earth Science Frontiers*, 10 (3): 135–148 (in Chinese with English abstract).
- Nie F, Fan W Y, Dong G C, et al., 2015. LA-ICP-MS zircon U-Pb chronology, Hf isotopes and geochemistry of the Xinjie granites in western Yunnan and their implications[J]. *Geological Bulletin of China*, 34 (10): 1837–1847 (in Chinese with English abstract).
- Pan G T, Wang L Q, Geng Q R, et al., 2020. Space-time structure of the Bangonghu-Shuanghu-Nujiang-Changning-Menglian Mega-suture zone: A discussion on geology and evolution of the Tethys Ocean[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 40 (3): 1–19 (in Chinese with English abstract).
- Pecerillo A, Taylor S R, 1976. Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58 (1): 63–81.
- Rage J C, Cappetta H, Hartenberger J L, et al., 1995. Collision ages[J]. *Nature*, 375: 286.
- Rickwood S C, 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements[J]. *Lithos*, 22: 247–263.
- Rowley D B, 1996. Age of initiation of collision between India and Asia: A review of stratigraphic data[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 145 (1–4): 1–13.
- Searle M P, Windley B F, Coward M P, et al., 1987. The closing of Tethys and the tectonics of the Himalaya[J]. *Science Direct*, 98 (6): 678–701.
- Söderlund U, Patchett P J, Vervoort J D, et al., 2004. The ^{176}Lu decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 219 (3–4): 311–324.
- Sun S S, McDonough W F, 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society, London, Special Publication*, 42: 313–346.
- Sun Z R, Dong G C, Zhao Z X, et al., 2017. Chronology, geochemistry and origin of shell source partial melting of Lilishan granite in western Yunnan[J]. *Geology of China*, 44 (06): 1140–1158 (in Chinese with English abstract).
- Sun Z R, 2020. Evolution of meso-Cenozoic granites in Tengchong Block and its significance for Tin mineralization [D]. China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Sylvester P J, 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites[J]. *Lithos*, 45 (1–4): 29–44.
- Taylor R, McLennan S M, 1985. The continental crust: Its composition and evolution[M]. Oxford: Blackwell: 1–328.
- Vervoort J D, Pachel J, Gehrel S G E, et al., 1996. Constraints on early earth differentiation from hafnium and neodymium isotopes[J]. *Nature*, 379: 624–627.
- Wang C S, Li X H, Hu X M, 2003. On the initiation time of the India-Asia continental Collision[J]. *Acta Geologica Sinica*, 77 (1): 16–24 (in Chinese with English abstract).
- Wu F Y, Li X H, Zheng Y F, et al., 2007. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (2): 185–220 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Q H, Deng J F, Ma D Q, et al., 2002. Thinking and methods of granite research[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1–294.
- Xu Y G, Yang Q J, Lan J B, et al., 2012. Temporal-spatial distribution and tectonic implications of the batholiths in the Gaoligong-Tengliang-Yingjiang area, western Yunnan: Constraints from zircon U-Pb ages and Hf isotopes[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 53 (7): 151–175.
- Yang Q J, Xu Y G, Huang X L, et al., 2006. Geochronology and geochemistry of granites in the Gaoligong tectonic belt, western Yunnan: Tectonic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22 (4): 817–834 (in Chinese with English abstract).
- Yang Q J, Xu Y G, Huang X L, et al., 2009. Geochronology and geochemistry of granites in the Tengliang area, western Yunnan: Tectonic implication[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25 (5): 1092–1104 (in Chinese with English abstract).
- Yin F G, Tang Y, Xu B, 2021. Cenozoic strike slip orogeny in Sanjiang area, Southwestern China[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 41 (1): 1–14 (in Chinese with English abstract).
- Zhang H R, Hou Z Q, 2018. Mineralization in continental collision zones: a comparative study of young collision orogen zones[J]. *Chinese Scientific Journals: Earth science*, 48 (12): 1629–1654 (in Chinese with English abstract).
- Zhang W, Zhang S T, Cao H W, et al., 2014. Characteristics of chlorite minerals from Xiaolonghe tin deposit in West Yunnan, China and their geological implications[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 41 (3): 318–328 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Z, Geng Q R, Peng Z M, et al., 2011. Geochemistry and geochronology of the Caima granites in the western part of the Bangong Lake-Nujiang metallogenic zone, Xizang[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 31 (4): 86–96 (in Chinese with English abstract).
- Zhao S W, 2017. Petrogenesis and continental geodynamic implications of late Cretaceous to early Eocene granitic rocks in Tengchong Block[D]. Northwest University (in Chinese with English abstract).
- Zhao S W, Lai S C, Qin J F, et al., 2017. The Petrogenesis and implications of the early Eocene granites in Lianghe area, Tengchong Block[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33 (1): 191–203 (in Chinese with English abstract).
- Zhou J, Wang G H, Zhang L, 2017. Petrogenesis and geological significance of the Eocene porphyry in the Xiaolongtan mining area of

the western Yunnan, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 44 (3): 334–349 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 曹华文, 张寿庭, 林进展, 等, 2013. 滇西锡矿带地质特征与成矿构造背景[J]. *成都理工大学学报: 自然科学版*, 40 (4): 457–467.
- 陈永清, 卢映祥, 赵红娟, 等, 2013. 滇西腾冲地块小场铅矿化花岗岩的锆石 SHRIMP U-Pb 定年、地球化学及其构造意义[J]. *地质前缘*, 20 (5): 1–14.
- 丛峰, 林仕良, 李再会, 等, 2009. 滇西腾冲地块片麻状花岗岩的锆石 U-Pb 年龄[J]. *地质学报*, 83: 651–658.
- 丛峰, 林仕良, 唐红峰, 等, 2010. 滇西梁河三叠纪花岗岩的锆石微量元素、U-Pb 和 Hf 同位素组成[J]. *地质学报* (8): 1155–1164.
- 崔晓琳, 张琦玮, 吴华英, 等, 2022. 腾冲地块晚白垩世-古近纪富锡花岗岩成因: 岩浆源区及分异演化条件[J]. *岩石学报*, 38 (01): 253–266.
- 董方浏, 侯增谦, 高永丰, 等, 2006. 滇西腾冲新生代花岗岩: 成因类型与构造意义[J]. *岩石学报*, 22 (4): 927–937.
- 董美玲, 董国臣, 莫宣学, 等, 2013. 滇西保山地块中-新生代岩浆作用及其构造意义[J]. *岩石学报*, 29 (11): 3901–3913.
- 高永娟, 林仕良, 丛峰, 等, 2012. 滇西腾冲地块东南缘早白垩世火山岩锆石 U-Pb 定年及地质意义[J]. *沉积与特提斯地质*, 32 (4): 59–64.
- 高永娟, 林仕良, 丛峰, 等, 2014. 滇西腾冲-梁河古近纪花岗岩锆石 U-Pb 定年、Hf 同位素及地球化学[J]. *地质学报*, 88 (1): 63–71.
- 洪大卫, 王涛, 董英, 2007. 中国花岗岩概述[J]. *地质论评* (S1): 9–16.
- 侯增谦, 杨竹森, 徐文艺, 等, 2006. 青藏高原碰撞造山带: I. 主碰撞造山成矿作用[J]. *矿床地质* (4): 337–358.
- 季建清, 1998. 腾冲-勐连-那邦地区岩石学与新生代岩石圈构造演化[D]. 中国科学院地质与地球物理研究所.
- 李再会, 林仕良, 丛峰, 等, 2012. 滇西腾冲-梁河地块早白垩世岩浆作用[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 31 (6): 590–598.
- 林进展, 曹华文, 张寿庭, 等, 2015. 青藏高原东南缘腾冲来利山 A 型花岗岩地球化学特征、锆石 U-Pb 定年及其构造意义[J]. *大地构造与成矿学*, 39 (5): 959–971.
- 刘军平, 田素梅, 丛峰, 等, 2017. 滇西澜沧江构造带南段沙乐花岗岩的锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义[J]. *沉积与特提斯地质*, 37 (4): 29–40.
- 吕伯西, 王增, 张能德, 等, 1993. 三江地区花岗岩类及其成矿专属性[M]. 北京: 地质出版社: 1–328.
- 马莉燕, 范蔚茗, 王岳军, 等, 2013. 那邦地区花岗片麻岩的锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素组成特征[J]. *大地构造与成矿学*, 37 (2): 273–283.
- 毛英, 毛琼, 郭增强, 等, 2017. 滇西腾冲地块新生代花岗岩锆石 U-Pb 年代学及地球化学特征[C]//中国矿物岩石地球化学学会第九次全国会员代表大会暨第 16 届学术年会论文集: 178–179.
- 莫宣学, 潘桂棠, 2006. 从特提斯到青藏高原形成: 构造-岩浆事件的约束[J]. *地质前缘*, 13 (6): 43–51.
- 莫宣学, 赵志丹, 邓晋福, 2003. 印度-亚洲大陆主碰撞过程的火山作用响应[J]. *地质前缘*, 10 (3): 135–148.
- 聂飞, 范文玉, 董国臣, 等, 2015. 滇西新街岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素和地球化学及其构造意义[J]. *地质通报*, 34 (10): 1837–1847.
- 潘桂棠, 王立全, 耿全如, 等, 2020. 班公湖-双湖-怒江-昌宁-孟连对接带时空结构——特提斯大洋地质及演化问题[J]. *沉积与特提斯地质*, 40 (3): 1–19.
- 孙转荣, 董国臣, 赵作新, 等, 2017. 滇西来利山花岗岩年代学、地球化学特征及其壳源部分熔融成因[J]. *中国地质*, 44 (06): 1140–1158.
- 孙转荣, 2020. 腾冲地块中-新生代花岗岩演化及其锡成矿意义[D]. 中国地质大学(北京).
- 王成善, 李祥辉, 胡修棉, 2003. 再论印度-亚洲大陆碰撞的启动时间[J]. *地质学报*, 77 (1): 16–24.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等, 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. *岩石学报*, 23 (2): 185–220.
- 肖庆辉, 邓晋福, 马大铨, 等, 2002. 花岗岩研究思维与方法[M]. 北京: 地质出版社: 1–294.
- 杨启军, 徐义刚, 黄小龙, 等, 2006. 高黎贡构造带花岗岩的年代学和地球化学及其构造意义[J]. *岩石学报*, 22 (4): 817–834.
- 杨启军, 徐义刚, 黄小龙, 等, 2009. 滇西腾冲-梁河地区花岗岩的年代学、地球化学及其构造意义[J]. *岩石学报*, 25 (5): 1092–1104.
- 尹福光, 唐渊, 徐波, 2021. 西南三江地区新生代走滑造山[J]. *沉积与特提斯地质*, 41 (1): 1–14.
- 张洪瑞, 侯增谦, 2018. 大陆碰撞带成矿作用: 年轻碰撞造山带对比研究[J]. *中国科学: 地球科学*, 48 (12): 1629–1654.
- 张伟, 张寿庭, 曹华文, 等, 2014. 滇西小清河锡矿床中绿泥石矿物特征及其指示意义[J]. *成都理工大学学报: 自然科学版*, 41 (3): 318–328.
- 张璋, 耿全如, 彭智敏, 等, 2011. 班公湖-怒江成矿带西段玛花岩体岩石地球化学及年代学[J]. *沉积与特提斯地质*, 31 (4): 86–96.
- 赵少伟, 2017. 腾冲地块晚白垩世-早始新世花岗岩类成因机制及大陆动力学意义[D]. 西北大学.
- 赵少伟, 赖绍聪, 秦江锋, 等, 2017. 腾冲地块梁河早始新世花岗岩成因机制及其地质意义[J]. *岩石学报*, 33 (1): 191–203.
- 周洁, 王根厚, 张莉, 2017. 滇西小龙潭矿区始新世岩浆岩的成因及其地质意义[J]. *成都理工大学学报: 自然科学版*, 44 (3): 334–349.