

西藏林周地区始新世托龙 I 型花岗岩对印度-欧亚板块碰撞时限的制约

杨成业¹, 冯佳佳¹, 李玉彬^{1,2,3}, 张金树¹, 张根¹, 夏洋洋¹

(1. 西藏大学工学院, 西藏 拉萨 850000; 2. 成都理工大学 地球科学学院, 四川 成都 610059;

3. 西藏自治区地质调查院, 西藏 拉萨 850000)

摘要: 目前已有研究对印度-欧亚板块碰撞时限的认识存在诸多分歧。本文对西藏林周县中部出露的托龙岩体开展了锆石 U-Pb 年代学、全岩地球化学和锆石 Hf 同位素分析, 以期进一步约束印度-欧亚板块的碰撞时间。托龙岩体内出露的石英二长斑岩呈岩株状侵入到帕那组中, 锆石 U-Pb 定年结果显示该石英二长斑岩形成于始新世 (50.5 ± 0.6 Ma), 锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-0.6 \sim -0.5$ 。石英二长斑岩具有较低的 A/CNK 值、较高的 K_2O 含量和 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值, 属于准铝质和钾玄岩系列。岩石普遍亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti 和 P, 富集大离子亲石元素 Th、U 和 Pb, 轻、重稀土元素分异明显, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 15.3 \sim 16.3$, Eu 负异常较弱, $\delta\text{Eu} = 0.56 \sim 0.69$ 。托龙岩体较低的 A/CNK 值、 P_2O_5 与 SiO_2 的负相关性以及 Y 含量与 Rb 含量之间的正相关性, 表明托龙石英二长斑岩为 I 型花岗岩。综合岩体的地球化学特征、同位素特征和前人研究成果, 认为托龙石英二长斑岩可能是相对古老的变质中基性岩部分熔融的产物, 形成于印度-欧亚板块碰撞引起的俯冲板片断离环境, 指示了印度-亚洲大陆的碰撞应发生于 50 Ma 之前。

关键词: 西藏; 地球化学; 锆石 U-Pb 年代学; Hf 同位素; 印度-亚洲大陆碰撞

中图分类号: P588.12⁺1; P597

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2022)06-1080-17

Eocene Tuolong I-type granite in Linzhou area, Tibet: Constraints on the timing of the collision between India and Eurasian plates

YANG Cheng-ye¹, FENG Jia-jia¹, LI Yu-bin^{1,2,3}, ZHANG Jin-shu¹, ZHANG Gen¹ and XIA Yang-yang¹

(1. College of Engineering, Tibet University, Lhasa 850000, China; 2. College of Earth Science, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 3. Tibet Institute of Geological Survey, Lhasa 850000, China)

Abstract: Timing of the collision between India and Eurasian plate is still debated. In this paper, zircon U-Pb geochronology, whole rock geochemistry and zircon Hf isotope analysis have been carried out for the Tuolong intrusion exposed in the middle of Linzhou County, Tibet, in order to further constrain the collision time of the India-Eurasian plate. The quartz monzonite porphyry outcropped in Tuolong pluton intruded into the Pana Formation as stock. Zircon U-Pb dating results show that the quartz monzonite porphyry was formed in Eocene (50.5 ± 0.6 Ma) with $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ value of -0.6 to -0.5 . Quartz monzonite porphyries display metaluminous and shoshonitic characteristics with low A/CNK and high $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ value and high K_2O contents. They are generally depleted in high field strength elements (Nb, Ta, Ti and P) and enriched in large ion lithophile elements (Th, U and Pb). Chondrite-

收稿日期: 2022-04-13; 接受日期: 2022-09-05; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 青藏高原第二次科学考察项目(2019QZKK0806); 西藏大学地质资源与地质工程特色学科建设项目(ZF22002004); 西藏自治区科技计划项目(XZ202201ZY0020G)

作者简介: 杨成业(1990-), 硕士, 讲师, 矿产普查与勘探专业, E-mail: 1209097754@qq.com; 通讯作者: 冯佳佳(1989-), 硕士, 讲师, 地质资源与地质工程专业, E-mail: 734843804@qq.com。

normalized REE patterns are characterized by high $(La/Yb)_N$ values (15.3~16.3) with weak negative Eu anomalies (0.56~0.69), the differentiation of light and heavy rare earth elements is obvious. The low A/CNK value, the negative correlation between P_2O_5 and SiO_2 , and the positive correlation between Y content and Rb content indicate that the quartz monzonite porphyry is I-type granite. Combined with results of previous studies, it is considered that the Tuolong quartz monzonite porphyry may be the product of partial melting of the relatively ancient metamorphic intermediate-basic rock, and was formed as the consequences of subduction and break-off caused by the India-Eurasian plate collision, indicating that the India-Asia continent collision should have occurred before 50 Ma.

Key words: Tibet; geochemistry; zircon U-Pb age; Hf isotope; India-Asia collision

Fund support: Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program (STEP) (2019QZKK0806); Geological Resources and Geological Engineering Characteristic Discipline Construction Project of Tibet University (Zf22002004); Science and Technology Projects of Tibet (XZ202201ZY0020G)

青藏高原是现今地球上海拔最高的高原, 常被称为“地球的第三极”。青藏高原的形成与印度板块和欧亚板块碰撞作用有关, 并且形成了地球上海拔最高、陆壳最厚的碰撞造山带, 印度板块和欧亚板块碰撞造山过程的持续发展, 其作用区域已不仅仅局限在广阔的青藏高原, 还延伸至中国东部、东南亚、中亚乃至欧洲地区, 影响了亚洲乃至全球的气候和环境变化, 深入研究这一碰撞造山过程, 对认识碰撞造山作用、陆内变形机制以及青藏高原隆升等一系列地质前沿问题具有非常重要的意义 (吴福元等, 2008)。近年来, 在岩石学、构造地质学、地层学、地球化学以及地球物理学等多学科专家的共同努力下, 对印度板块和欧亚板块拼合过程的研究取得了重要的进展 (莫宣学等, 2003; 侯增谦等, 2006, 2020; 许志琴等, 2011, 2016; 王椿镛等, 2016; 邹光富等, 2016; 莫宣学, 2020; 曾庆高等, 2020)。但是, 不同学者对印度板块和欧亚板块碰撞时限的认识还存在很大的分歧 (朱日祥等, 2022), 如通过古地磁研究结果限定的碰撞时间为 65~20 Ma (Klootwijk *et al.*, 1992; van Hinsbergen *et al.*, 2012), 沉积学和古生物地层学研究所限定的碰撞时间为 65~45 Ma (Rage *et al.*, 1995; Rowley, 1998; Hu *et al.*, 2015), 而岩浆岩研究限定的碰撞时间为 70~45 Ma (纪伟强等, 2009; 莫宣学, 2011)。

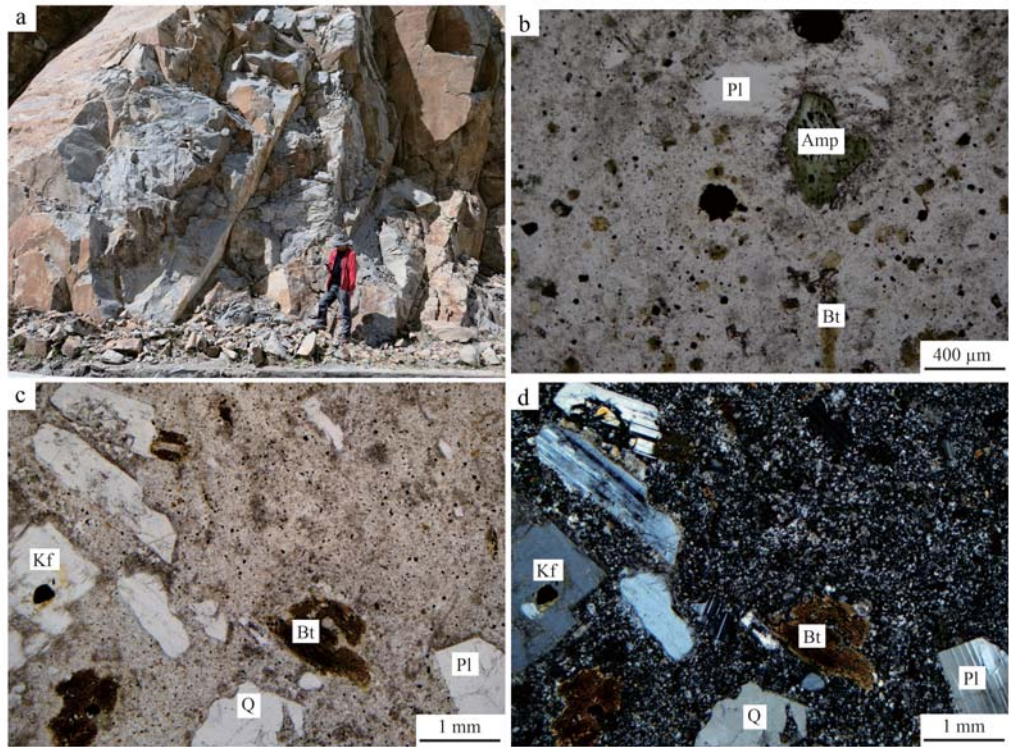
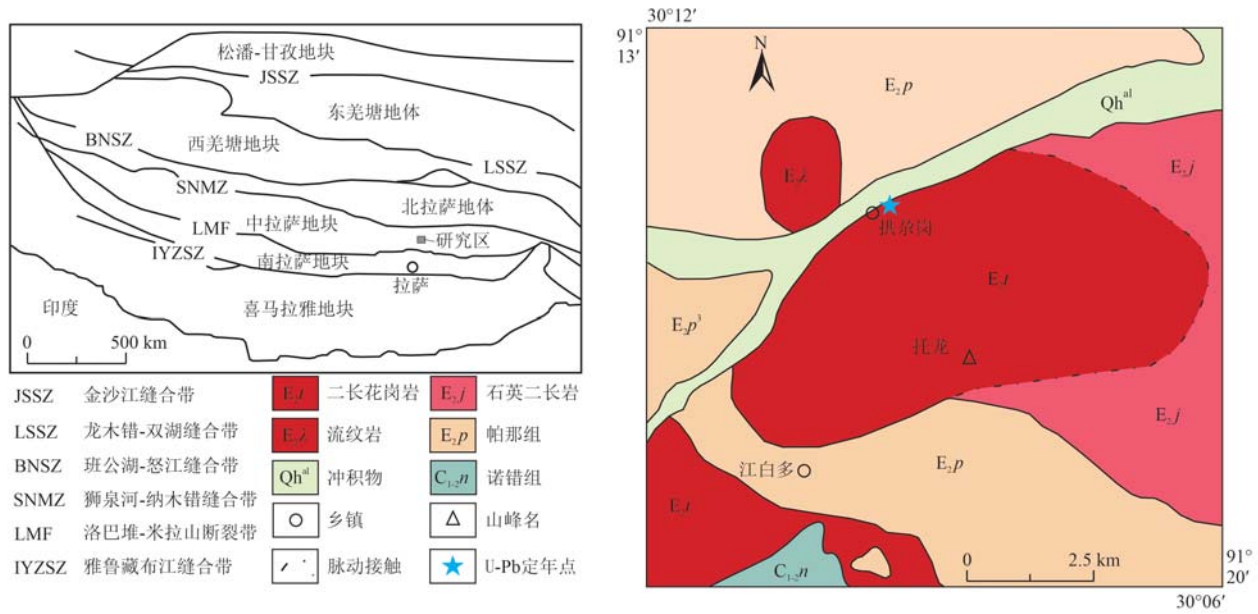
本文基于基础地质调查、岩石学、年代学及地球化学等多方面的综合研究, 对位于拉萨地块北部拱杂岗地区的托龙石英二长斑岩进行了详细研究, 希望查明该岩体的形成时代和成因机制, 确定其形成的地球动力学背景, 进而为深入理解印度板块和欧

亚板块碰撞造山过程提供重要依据。

1 地质背景

青藏高原是由多个增生地块拼合而成, 各地体之间为缝合带, 从南到北分别为特提斯喜马拉雅地块、雅鲁藏布江缝合带、拉萨地块、班公湖-怒江缝合带、羌塘地块、龙木错-双湖缝合带、金沙江结合带、松潘-甘孜地块。其中拉萨地块位于雅鲁藏布江缝合带和班公湖-怒江缝合带中间, 因为南北缺少寒武纪结晶基底 (史仁灯等, 2005; Dong *et al.*, 2011; Zhu *et al.*, 2012; 潘政等, 2020; 胡培远等, 2022), 中部具有古老结晶基底 (Zhu *et al.*, 2009a, 2011), 因此以洛巴堆-米拉山断裂带和狮泉河-纳木错缝合带为界, 将拉萨地块分为南、中、北 3 部分。本文研究的花岗岩体位于中拉萨地块东段, 地理位置为拉萨地块林周县中部江白多-拱杂岗一带, 呈岩株侵入到石炭系诺错组 ($C_{1-2}n$)、古近系帕那组 (E_2p) 中 (图 1), 岩体规模约 38 km²。诺错组为粉砂质板岩夹砂岩、板岩、钙质板岩夹灰岩; 帕那组主体是以流纹质、英安质、粗面质 (熔结) 凝灰岩为主的火山碎屑岩。

托龙岩体的岩石类型主要为石英二长斑岩, 整体呈青灰色-深灰色, 具斑状结构 (图 2), 斑晶主要为斜长石 (15%~20%)、钾长石 (8%~10%) 和黑云母 (5%~8%), 偶见角闪石和石英, 石英多为半自形。斜长石呈板状, 可见聚片双晶、环带结构, 偶见绢云母化; 钾长石呈板状, 可见简单双晶, 泥化较为发育; 黑云母多为片状, 多色性明显, 偶见绿泥石化。基质主要为长英质微晶和少量暗色矿物。



2 样品采集和实验方法

本次研究对采自托龙岩体的 5 件新鲜的石英二长斑岩样品开展了全岩主量元素和微量元素地球化学分析, 并对其中 1 件样品 (DX01) 进行了锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素分析。

2.1 锆石 U-Pb 年代学与 Hf 同位素测试

锆石阴极发光图像拍摄、U-Pb 同位素定年和 Hf 同位素分析均在武汉上谱分析科技有限责任公司完成, 仪器为高真空扫描电子显微镜 (JSM-IT100), 配备有 GATAN MINICL 系统。锆石 U-Pb 同位素定年和锆石 Hf 同位素分析利用 LA-(MC-) ICP-MS 分析完成。锆石 U-Pb 年代分析 GeolasPro 激光剥蚀系统由 COMPexPro 102 ArF 193 nm 准分子激光器和 MicroLas 光学系统组成, ICP-MS 型号为 Agilent 7700e, 激光束斑和频率分别为 32 μm 和 10 Hz, 采用锆石标准 91500 作外标进行同位素分馏校正, 每个时间分辨分析数据包括大约 20~30 s 空白信号和 50 s 样品信号, 对分析数据的离线处理 (包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及 U-Pb 同位素比值和年龄计算) 采用软件 ICPMS-DataCal (Liu *et al.*, 2010) 完成, U-Pb 年龄谱和图绘制和年龄加权平均计算采用 Isoplot/Ex_ver3 完成。锆石 Hf 同位素分析激光剥蚀系统为 Geolas HD, MC-ICP-MS 为 Neptune Plus, 激光束斑和实际输出能量密度分别为 44 μm 和 7.0 J/cm², 分析数据的离线处理采用软件 ICPMSDataCal (Liu *et al.*, 2010) 完

成, $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 、 t_{DM} 、 t_{DM}^C 等参数的计算方法参见 Zhu 等 (2009b)。

2.2 全岩地球化学

全岩主量元素和微量元素均在武汉上谱分析科技有限责任公司完成。全岩主量元素使用日本理学 (Rigaku) 生产的 ZSX Primus II 型波长色散 X 射线荧光光谱仪 (XRF) 进行测试, 数据校正采用理论 α 系数法, 测试相对标准偏差 (RSD) < 2%。全岩微量元素利用 Agilent 7700e ICP-MS 分析完成, 样品处理流程如下: 将 200 目样品置于 105℃ 烘箱中烘干 12 h; 准确称取粉末样品 50 mg 置于 Teflon 溶样弹中; 先后依次缓慢加入 1 mL 高纯 HNO₃ 和 1 mL 高纯 HF; 将 Teflon 溶样弹放入钢套, 拧紧后置于 190℃ 烘箱中加热 24 h 以上; 待溶样弹冷却, 开盖后置于 140℃ 电热板上蒸干, 然后加入 1 mL HNO₃ 并再次蒸干; 加入 1 mL 高纯 HNO₃、1 mL MQ 水和 1 mL 内标 In (浓度为 1×10^{-6}), 再次将 Teflon 溶样弹放入钢套, 拧紧后置于 190℃ 烘箱中加热 12 h 以上; 将溶液转入聚乙烯料瓶中, 并用 2% HNO₃ 稀释至 100 g 以备 ICP-MS 测试。

3 测试结果

3.1 锆石 U-Pb 年代学测试结果

托龙石英二长斑岩中的锆石多为短柱状晶体, 长宽比常介于 1:1~2:1 之间, 长度为 50~150 μm , 且主要集中在 100 μm 左右, 在阴极发光图像上多具振荡环带、弱分带或无分带的特点 (图 3), 显示出

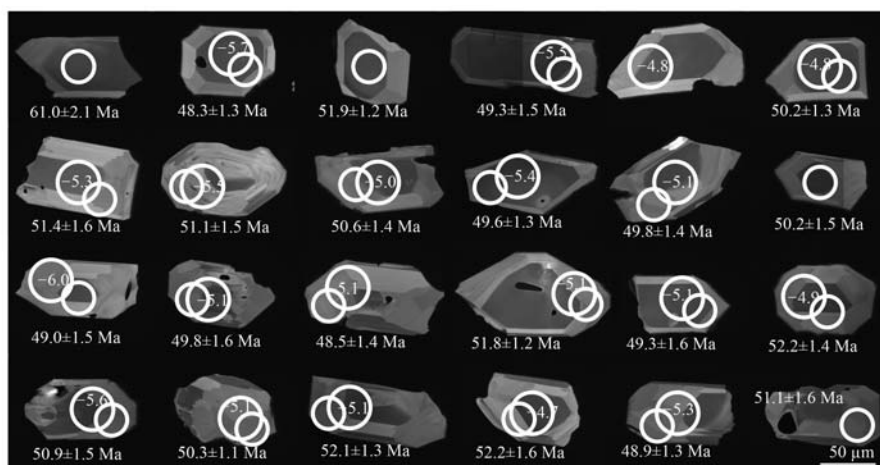


图 3 托龙石英二长斑岩样品 DX01 锆石阴极发光图像

Fig. 3 CL images of zircons for the sample DX01 of the Tuolong quartz monzonite porphyry

小圈为锆石 U-Pb 年龄测试位置, 大圈为锆石 Hf 同位素测试位置, 圈中的数字为 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值

the small circles are the zircon dating positions, the big circles are the locations of zircon Hf isotope test, the numbers in circles are $\varepsilon\text{Hf}(t)$ values

表1 托龙石英二长斑岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄测试结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic data of the Tuolong quartz monzonite porphyry

样品号	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值						年龄/Ma				谐和度		
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ
DX01-01	194	147	1.32	0.052 21	0.005 87	0.062 46	0.005 49	0.009 50	0.000 33	0.003 02	0.000 14	61.5	5.3	61.0	2.1	99%
DX01-02	220	151	1.45	0.051 97	0.005 82	0.053 84	0.005 39	0.007 53	0.000 20	0.002 42	0.000 09	53.3	5.2	48.3	1.3	90%
DX01-03	206	154	1.34	0.046 66	0.005 28	0.049 68	0.004 65	0.008 08	0.000 19	0.002 41	0.000 10	49.2	4.5	51.9	1.2	94%
DX01-04	155	136	1.14	0.051 64	0.007 68	0.052 65	0.007 88	0.007 67	0.000 24	0.002 63	0.000 12	52.1	7.6	49.3	1.5	94%
DX01-06	212	155	1.37	0.053 83	0.006 62	0.053 90	0.005 60	0.007 82	0.000 21	0.002 46	0.000 10	53.3	5.4	50.2	1.3	94%
DX01-07	130	111	1.18	0.052 18	0.006 56	0.054 97	0.005 62	0.008 01	0.000 24	0.002 45	0.000 13	54.3	5.4	51.4	1.6	94%
DX01-08	132	121	1.10	0.055 10	0.005 90	0.056 00	0.003 99	0.007 96	0.000 23	0.002 43	0.000 11	55.3	3.8	51.1	1.5	92%
DX01-09	137	120	1.14	0.048 39	0.007 60	0.047 21	0.004 96	0.007 87	0.000 23	0.002 59	0.000 12	46.8	4.8	50.6	1.4	92%
DX01-10	252	177	1.42	0.052 21	0.006 32	0.051 22	0.004 45	0.007 73	0.000 21	0.002 46	0.000 08	50.7	4.3	49.6	1.3	97%
DX01-11	156	129	1.22	0.050 87	0.006 27	0.050 16	0.003 57	0.007 68	0.000 25	0.002 44	0.000 15	49.7	3.5	49.3	1.6	99%
DX01-12	221	164	1.35	0.049 57	0.006 50	0.052 54	0.005 10	0.007 81	0.000 24	0.002 81	0.000 15	52.0	4.9	50.2	1.5	96%
DX01-14	199	143	1.39	0.050 71	0.006 66	0.049 72	0.004 43	0.007 63	0.000 23	0.002 68	0.000 13	49.3	4.3	49.0	1.5	99%
DX01-15	191	170	1.12	0.057 34	0.007 32	0.055 32	0.005 02	0.007 75	0.000 25	0.002 61	0.000 11	54.7	4.8	49.8	1.6	90%
DX01-16	117	120	0.98	0.076 65	0.010 53	0.069 85	0.007 40	0.007 55	0.000 22	0.002 61	0.000 14	68.6	7.0	48.5	1.4	65%
DX01-17	190	175	1.08	0.050 49	0.005 95	0.054 49	0.005 19	0.008 07	0.000 19	0.002 55	0.000 11	53.9	5.0	51.8	1.2	96%
DX01-18	173	142	1.21	0.071 37	0.008 77	0.072 90	0.007 27	0.007 75	0.000 22	0.002 68	0.000 11	71.4	6.9	49.8	1.4	64%
DX01-19	206	147	1.40	0.054 86	0.006 30	0.057 96	0.004 80	0.008 12	0.000 21	0.002 39	0.000 11	57.2	4.6	52.2	1.4	90%
DX01-20	122	113	1.09	0.058 37	0.010 44	0.055 03	0.007 70	0.007 93	0.000 23	0.002 56	0.000 11	54.4	7.4	50.9	1.5	93%
DX01-21	182	162	1.12	0.055 59	0.006 63	0.057 90	0.005 29	0.008 11	0.000 21	0.002 45	0.000 12	57.2	5.1	52.1	1.3	90%
DX01-22	192	163	1.18	0.052 42	0.005 99	0.054 85	0.005 37	0.007 83	0.000 17	0.002 50	0.000 11	54.2	5.2	50.3	1.1	92%
DX01-23	165	145	1.14	0.055 65	0.007 33	0.055 72	0.005 61	0.008 13	0.000 25	0.002 80	0.000 13	55.1	5.4	52.2	1.6	94%
DX01-24	159	147	1.08	0.059 19	0.007 01	0.058 91	0.005 67	0.007 62	0.000 20	0.002 43	0.000 13	58.1	5.4	48.9	1.3	82%
DX01-25	167	151	1.11	0.054 43	0.006 25	0.056 92	0.004 82	0.007 96	0.000 24	0.002 61	0.000 13	56.2	4.6	51.1	1.6	90%

岩浆锆石的内部结构特征(吴元保等, 2004)。

托龙石英二长斑岩样品 DX01 的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测试结果见表 1。对样品 DX01 的 23 个测试点的分析结果显示, 锆石的 Th、U 含量较低, 分别为 $130 \times 10^{-6} \sim 252 \times 10^{-6}$ 和 $111 \times 10^{-6} \sim 177 \times 10^{-6}$, 平均值分别为 177×10^{-6} 和 145×10^{-6} , 相应的 Th/U 值介于 0.98~1.45 之间, 平均值为 1.21, 与典型的岩浆锆石 Th/U 值一致(吴元保等, 2004)。在锆石年龄谐和图上, 除两个测试点偏离谐和线外, 余下

21 个测试点均落在谐和线上或谐和线附近。测试点 DX01-1 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄较老 ($61.0 \pm 2.1 \text{ Ma}$), 余下 20 个测试点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 $52.2 \pm 1.4 \sim 48.3 \pm 1.3 \text{ Ma}$ 之间, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $50.5 \pm 0.6 \text{ Ma}$ (MSWD = 0.77) (图 4)。

3.2 锆石 Hf 同位素测试结果

托龙石英二长斑岩 DX01 锆石 Hf 同位素测试结果见表 2。由表 2 可见, 托龙石英二长斑岩锆石具有均一的 Hf 同位素组成, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值为 $0.000483 \sim$

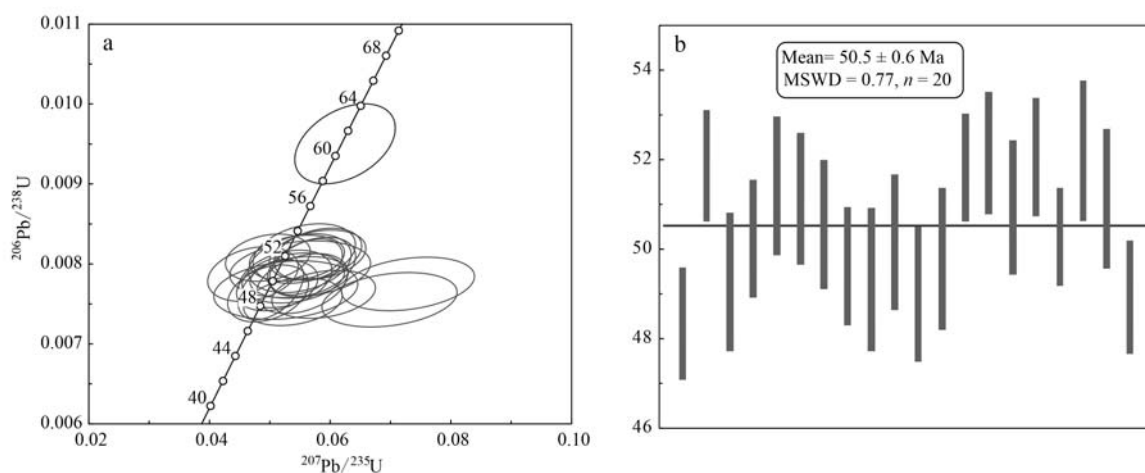


图 4 托龙石英二长斑岩锆石 U-Pb 年龄图解

Fig. 4 Zircon U-Pb age diagrams for the sample DX01 of the Tuolong quartz monzonite porphyry

表 2 托龙岩体锆石 Hf 同位素测试结果

Table 2 Zircon Hf isotopic data of the Tuolong quartz monzonite porphyry

样品号	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$	$\varepsilon\text{Hf}(0)$	$\varepsilon\text{Hf}(t)$	1σ	t_{DM}/Ma	$t_{\text{DM}}^c/\text{Ma}$
DX01-02	0.023 622	0.000 342	0.282 592	0.000 012	0.000 744	0.000 010	0.282 592	-6.8	-5.7	0.4	927	1 462
DX01-04	0.019 116	0.000 431	0.282 600	0.000 010	0.000 572	0.000 009	0.282 599	-6.5	-5.5	0.4	913	1 445
DX01-05	0.019 550	0.000 401	0.282 619	0.000 011	0.000 612	0.000 008	0.282 619	-5.9	-4.8	0.4	887	1 401
DX01-06	0.030 604	0.000 516	0.282 619	0.000 012	0.000 902	0.000 018	0.282 618	-5.9	-4.8	0.4	894	1 404
DX01-07	0.017 703	0.000 144	0.282 604	0.000 011	0.000 544	0.000 001	0.282 604	-6.4	-5.3	0.4	906	1 435
DX01-08	0.016 739	0.000 101	0.282 599	0.000 013	0.000 535	0.000 002	0.282 598	-6.6	-5.5	0.5	913	1 447
DX01-09	0.019 463	0.000 271	0.282 613	0.000 012	0.000 591	0.000 005	0.282 612	-6.1	-5.0	0.4	895	1 416
DX01-10	0.027 561	0.000 651	0.282 601	0.000 010	0.000 798	0.000 014	0.282 600	-6.5	-5.4	0.4	917	1 444
DX01-11	0.021 660	0.000 460	0.282 610	0.000 011	0.000 646	0.000 014	0.282 610	-6.2	-5.1	0.4	900	1 422
DX01-14	0.021 138	0.000 097	0.282 585	0.000 011	0.000 635	0.000 005	0.282 585	-7.1	-6.0	0.4	935	1 478
DX01-15	0.025 585	0.000 289	0.282 610	0.000 011	0.000 858	0.000 013	0.282 609	-6.2	-5.1	0.4	906	1 423
DX01-16	0.015 799	0.000 087	0.282 609	0.000 011	0.000 483	0.000 001	0.282 608	-6.2	-5.1	0.4	898	1 424
DX01-17	0.017 607	0.000 393	0.282 610	0.000 011	0.000 534	0.000 007	0.282 610	-6.2	-5.1	0.4	897	1 421
DX01-18	0.031 823	0.001 029	0.282 610	0.000 010	0.000 910	0.000 032	0.282 609	-6.2	-5.1	0.4	907	1 423
DX01-19	0.019 057	0.000 420	0.282 616	0.000 011	0.000 566	0.000 009	0.282 616	-6.0	-4.9	0.4	890	1 408
DX01-20	0.019 429	0.000 366	0.282 595	0.000 011	0.000 581	0.000 006	0.282 594	-6.7	-5.6	0.4	920	1 456
DX01-21	0.026 885	0.000 491	0.282 610	0.000 012	0.000 795	0.000 013	0.282 609	-6.2	-5.1	0.4	904	1 422
DX01-22	0.023 944	0.000 146	0.282 611	0.000 011	0.000 739	0.000 010	0.282 610	-6.1	-5.1	0.4	901	1 420
DX01-23	0.029 000	0.000 636	0.282 621	0.000 011	0.000 890	0.000 018	0.282 620	-5.8	-4.7	0.4	890	1 398
DX01-24	0.018 268	0.000 165	0.282 604	0.000 011	0.000 547	0.000 002	0.282 603	-6.4	-5.3	0.4	906	1 436

0.000 910, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.282 585~0.282 621, 相应的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 初始比值差别不大, 介于 0.282 585~0.282 620 之间, 对应的 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值介于 -6.0~

-4.7 之间, 加权平均值为 -5.2 (图 5), 亏损地幔模式年龄 t_{DM} 介于 935~887 Ma 之间, 地壳模式年龄 t_{DM}^{C} 介于 1 478~1 398 Ma 之间。

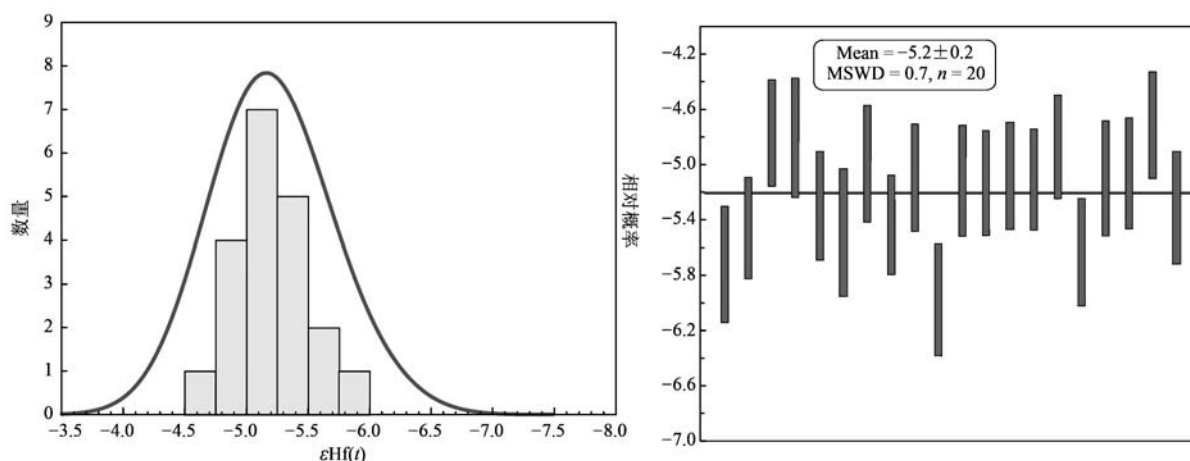


图 5 托龙石英二长斑岩 DX01 锆石 Hf 同位素图解

Fig. 5 Zircon Hf isotopic composition for the sample DX01 of the Tuolong quartz monzonite porphyry

3.3 地球化学测试结果

托龙石英二长斑岩主量元素和微量元素测试结果见表 3。托龙石英二长斑岩具有较高的 SiO_2 含量和全碱 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) 含量, 分别介于 66.71%~68.36% 和 9.48%~9.72% 之间, 在 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) - SiO_2 图解上落入石英二长岩的范围内 (图 6a)。 K_2O 含量较高, 明显高于 Na_2O 含量, 分别为 5.92%~6.33% 和 3.36%~3.56%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为 1.66~1.86, 在 K_2O - SiO_2 图解和 K_2O - Na_2O 图解中均落入钾玄岩系列范围内 (图 6b、6c)。 Al_2O_3 含量较高, 介于 15.63%~16.43%, A/NK 与 A/CNK 值分别为 1.27~1.34 和 0.98~1.00, 主要落在准铝质系列范围内 (图 6d)。 TFe_2O_3 和 MgO 含量整体偏低, 分别介于 2.51%~2.71% 和 0.66%~0.72% 之间, 对应的 $\text{Mg}^\#$ 值亦较低, 介于 33~49 之间。

托龙石英二长斑岩的稀土元素总量较高, 介于 267×10^{-6} ~ 282×10^{-6} 之间。 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值也较高, 介于 15.3~16.1 之间, 这与其轻稀土元素富集、重稀土元素亏损的右倾型稀土元素配分模式特征一致 (图 7a)。具有较弱的 Eu 的负异常, δEu 介于 0.56~0.69 之间。在微量元素蛛网图上 (图 7b), 托龙石英二长斑岩富集 Cs、Rb、K 等大离子亲石元素和 La、Ce 等轻稀土元素, 亏损 Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素,

且具有中等的 Ba 的负异常和较弱的 Sr 的负异常。

4 讨论

4.1 形成时代

近年来高精度年代学研究成果显示, 拉萨地块岩浆岩整体上多形成于白垩纪-古近纪, 约 65~40 Ma 的岩浆活动最为强烈, 且在约 50 Ma 左右达到顶峰 (莫宣学等, 2005, 2009; Wen *et al.*, 2008; 纪伟强等, 2009; Zhu *et al.*, 2015; 孟元库等, 2022)。这一时期的岩浆岩在拉萨地块中南部广泛分布, 岩石类型多样, 镁铁质、中性、长英质的侵入岩和火山岩等多种岩石类型均有产出, 但以发育大规模的花岗岩和林子宗火山岩为特征 (莫宣学, 2011, 2020)。

托龙石英二长斑岩锆石 U-Pb 年龄结果分为两组, 较老的 61.0 ± 2.1 Ma 与林子宗火山岩典中组以及冈底斯带广泛分布的约 60 Ma 岩浆事件时间一致 (侯增谦等, 2006; 董国臣等, 2021; 孟元库等, 2022), 可能代表了捕获锆石的形成时代; 较年轻的 50.4 ± 0.6 Ma 与林子宗火山岩帕那组以及冈底斯带最为发育的约 50 Ma 岩浆事件时间一致 (纪伟强等, 2009; 莫宣学, 2020), 代表了托龙石英二长斑岩的形成时代。

表 3 托龙石英二长斑岩主量元素 ($w_B/\%$) 及微量元素 ($w_B/10^{-6}$) 测试结果Table 3 Major element ($w_B/\%$) and trace element ($w_B/10^{-6}$) compositions of the Tuolong quartz monzonite porphyry

样号	DX01	DX01-2	DX01-3	DX05-1	DX05-3	样号	DX01	DX01-2	DX01-3	DX05-1	DX05-3
SiO ₂	68.20	68.12	68.36	67.51	66.71	Cu	6.11	4.19	5.80	5.74	5.39
TiO ₂	0.54	0.55	0.54	0.58	0.57	Zn	46.8	47.5	44.6	47.2	46.3
Al ₂ O ₃	15.74	15.63	15.83	16.43	16.38	Ga	18.2	17.5	17.8	18.9	18.8
Fe ₂ O ₃	2.51	2.64	2.53	2.71	2.65	Rb	292	281	279	269	259
MnO	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	Sr	380	355	375	477	490
MgO	0.66	0.72	0.68	0.67	0.66	Y	30.1	29.7	29.4	29.5	28.9
CaO	2.01	2.03	2.04	2.27	2.43	Zr	386	388	376	357	369
Na ₂ O	3.40	3.36	3.45	3.49	3.56	Nb	21.6	21.3	20.9	20.6	19.8
K ₂ O	6.33	6.25	6.20	6.01	5.92	Sn	3.11	3.61	3.54	3.38	3.47
P ₂ O ₅	0.10	0.10	0.10	0.11	0.11	Cs	7.32	7.78	6.75	5.15	5.09
LOI	0.44	0.34	0.46	0.48	0.41	Ba	689	623	659	810	818
Total	99.98	99.79	100.24	100.32	99.47	La	63.7	63.5	63.4	60.0	62.6
Na ₂ O+K ₂ O	9.72	9.60	9.64	9.50	9.48	Ce	126	127	124	121	125
K ₂ O/Na ₂ O	1.86	1.86	1.80	1.72	1.66	Pr	13.6	13.5	13.5	12.8	13.3
A/CNK	0.98	0.98	0.98	1.00	0.98	Nd	47.3	47.4	47.0	44.7	47.3
A/NK	1.27	1.27	1.28	1.34	1.34	Sm	8.69	8.64	8.38	8.05	8.32
Mg [#]	49	35	35	33	33	Eu	1.46	1.48	1.39	1.62	1.67
Q	19.27	19.59	19.48	18.66	17.50	Gd	6.33	6.18	6.23	6.20	6.10
C	0	0	0	0.32	0	Tb	0.95	0.99	0.97	0.97	0.97
Or	37.41	36.94	36.64	35.52	34.99	Dy	5.36	5.33	5.35	5.15	5.07
Ab	28.77	28.43	29.19	29.53	30.12	Ho	1.03	1.04	1.06	1.02	1.05
An	8.99	9.11	9.40	10.54	11.23	Er	3.06	2.96	3.04	2.89	3.02
Hy	1.64	1.79	1.69	1.67	1.64	Tm	0.43	0.43	0.44	0.40	0.41
Il	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	Yb	2.90	2.94	2.98	2.69	2.79
Hm	2.51	2.64	2.53	2.71	2.65	Lu	0.43	0.43	0.43	0.39	0.41
Tn	0.23	0.22	0.05	0	0.08	Hf	9.71	10.1	9.81	8.98	9.34
Ru	0.38	0.39	0.45	0.51	0.47	Ta	1.59	1.64	1.67	1.52	1.52
Ap	0.24	0.24	0.24	0.26	0.26	Tl	0.88	0.86	0.87	0.80	0.76
						Pb	41.3	37.2	36.9	37.3	36.2
Li	26.5	25.9	23.4	22.9	21.9	Th	44.5	46.1	45.8	40.8	43.2
Be	4.48	3.69	3.98	3.91	3.78	U	5.36	5.83	5.25	5.65	5.81
Sc	6.03	5.83	5.84	5.82	5.71	REE	281	282	278	267	278
V	30.2	31.8	29.4	31.0	30.6	(La/Yb) _N	15.8	15.5	15.3	16.0	16.1
Cr	4.69	5.56	5.53	3.34	3.78	δEu	0.57	0.59	0.56	0.68	0.69
Co	2.81	3.11	2.94	2.61	2.73	Nb/Ta	13.6	12.9	12.5	13.5	13.0
Ni	2.93	3.60	3.24	2.39	2.08	Ce/Pb	3.04	3.41	3.36	3.23	3.46

4.2 岩石类型划分

花岗岩的成因分类往往是花岗岩研究的基础之一, 最著名的是 Chappell 和 White (1974) 提出按源区划分的 I 型和 S 型花岗岩分类方案, 其中 I 型花岗岩的源区常为未风化的火成岩, 而 S 型花岗岩的源区则为沉积岩。Loiselle 和 Wones (1979) 则从地球化学和构造环境的角度, 提出了具有贫水、适度碱性和产自非造山环境的 A 型花岗岩这一花岗岩类型。此外, Defant 和 Drummond (1990) 提出埃达克岩这一术语, 指的是具有高 Sr、低 Y 及富 Al 等地球化学特征的中酸性岩浆岩。

托龙岩体具较高的 Y 含量 ($28.9 \times 10^{-6} \sim 30.1 \times 10^{-6}$) 和较低的 Sr/Y 值 (12.0~17.0), 与埃达克岩存在很大的差异 (图 8a); 较低的 10^4 Ga/Al (2.12~2.18) 及 FeO^*/MgO (3.29~3.65) 值等特征, 也显示出其与 A 型花岗岩存在一定的差异 (图 8b)。托龙石英二长斑岩中可见黑云母及少量角闪石, 不发育白云母、堇青石及石榴子石等富铝矿物; 相应地, 其 A/CNK 值除样品 DX01 为 1.00 外, 其余样品均小于 1, 为准铝质, CIPW 计算结果也缺乏标准刚玉分子 (表 3), 上述岩石学及地球化学特征均表明托龙岩体与 S 型花岗岩差异明显, 而与 I 型花岗岩的特

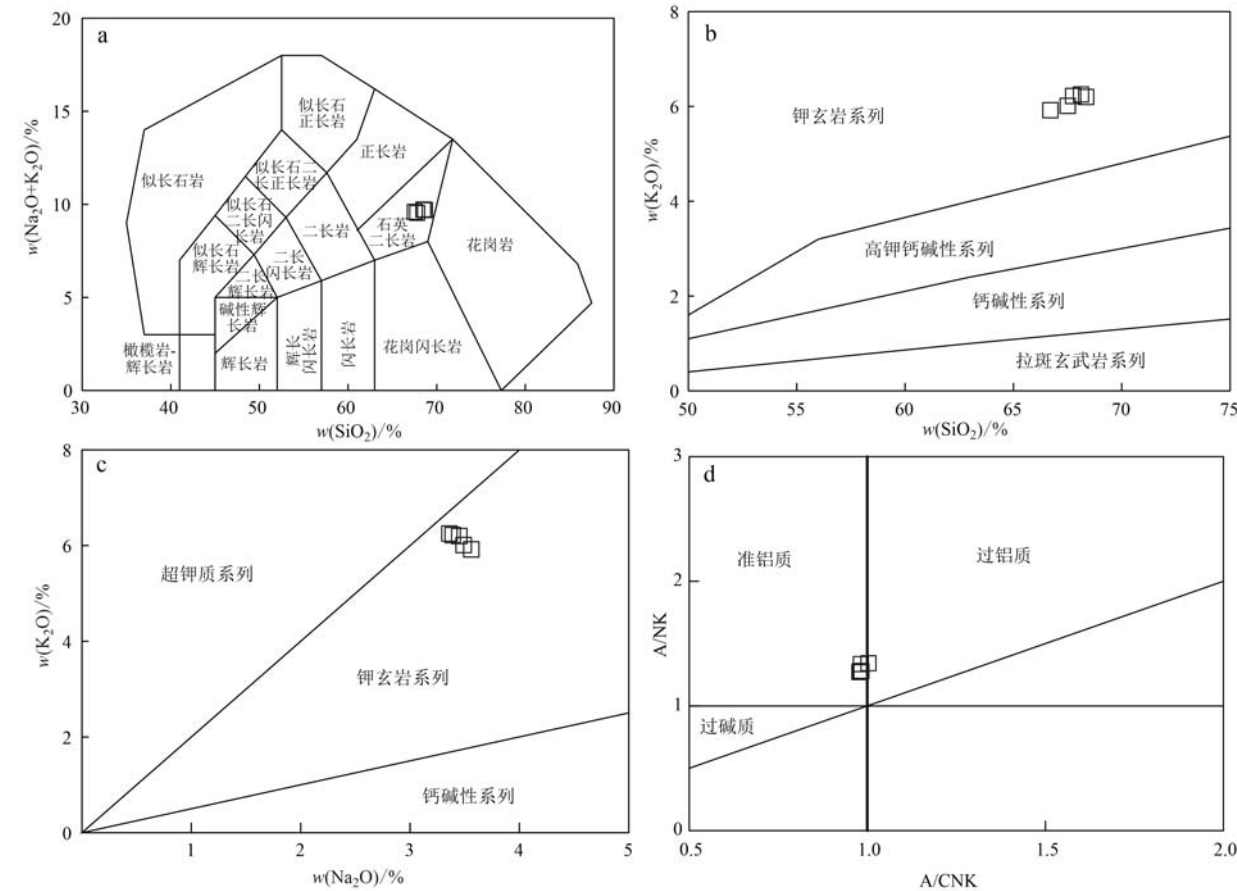


图 6 托龙石英二长斑岩的 $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})-\text{SiO}_2$ (a, Middlemost, 1994)、 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ (b, 据 Peccerillo 和 Taylor, 1976)、 $\text{K}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{O}$ (c, 据 Turner 等, 1996) 和 $\text{A/NK}-\text{A/CNK}$ (d, 据 Maniar 和 Piccoli, 1989) 图解
Fig. 6 Plots of $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})-\text{SiO}_2$ (a, Middlemost, 1994), $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ (b, Peccerillo and Taylor, 1976), $\text{K}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{O}$ (c, Turner *et al.*, 1996) and $\text{A/NK}-\text{A/CNK}$ (d, Maniar and Piccoli, 1989) for the Tuolong quartz monzonite porphyry

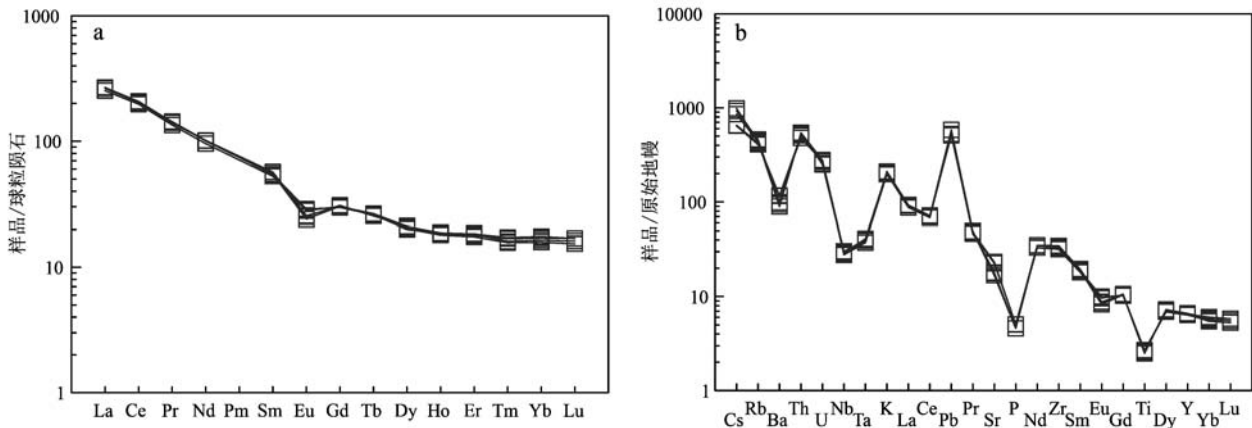


图 7 托龙石英二长斑岩稀土元素配分图(a)和微量元素蛛网图(b) (球粒陨石和原始地幔数据出自 Sun 和 McDonough, 1989)
Fig. 7 REE patterns (a) and spidergrams (b) of the Tuolong quartz monzonite porphyry (the values of chondrite and primitive mantle are from Sun and McDonough, 1989)

征基本一致。此外, I 型花岗岩的 P_2O_5 含量与 SiO_2 含量呈负相关性, Y 含量与 Rb 含量呈正相关性; S 型花岗岩的 P_2O_5 含量随 SiO_2 含量的增加无降低趋势, Y 含量随 Rb 含量的增加具明显的降低趋势(Li

et al., 2007), 而托龙岩体的 P_2O_5 含量与 SiO_2 含量整体上具有负相关性, Y 含量则与 Rb 含量具有明显的正相关性(图 8c、8d), 进一步表明托龙石英二长斑岩属于 I 型花岗岩。

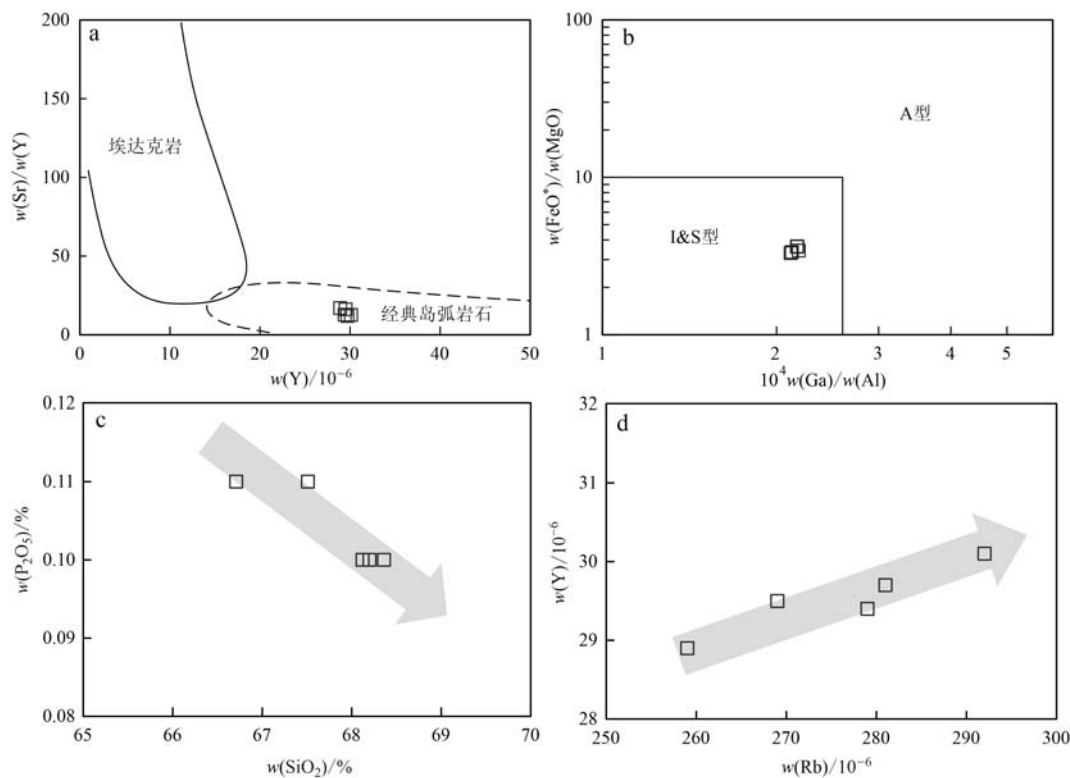


图 8 托龙石英二长斑岩的 Sr/Y-Y(a, 据 Defant 和 Drummond, 1990)、 $FeO^*/MgO-10^4 Ga/Al$ (b, 据 Whalen 等, 1987)、 $P_2O_5-SiO_2$ (c) 和 Y-Rb(d) 图解

Fig. 8 Diagrams of Sr/Y-Y(a, after Defant and Drummond, 1990), $FeO^*/MgO-10^4 Ga/Al$ (b, after Whalen *et al.*, 1987), $P_2O_5-SiO_2$ (c) and Y-Rb(d) for the Tuolong quartz monzonite porphyry

4.3 岩石成因

对于高 Si、低 Mg 的 I 型花岗岩, 如托龙岩体, 较低的 MgO (0.66% ~ 0.72%, 平均 0.68%)、Cr ($3.34 \times 10^{-6} \sim 5.56 \times 10^{-6}$, 平均 4.58×10^{-6})、Co ($2.61 \times 10^{-6} \sim 3.11 \times 10^{-6}$, 平均 2.85×10^{-6})、Ni ($2.08 \times 10^{-6} \sim 3.60 \times 10^{-6}$, 平均 2.85×10^{-6}) 含量和 $Mg^\#$ 值 (33 ~ 49, 平均 37), 和与地幔平衡的高 $Mg^\#$ 值的原生岩浆差异显著 (Wilson, 1989), 通常被认为可能是幔源岩浆结晶分异、壳幔岩浆混合或者壳源物质部分熔融的产物 (Guo *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2014, 2017; Lewis *et al.*, 2021)。

研究区内与托龙岩体共存的均为同时代的花岗岩和以巨厚层状流纹质 (熔结) 凝灰岩为主的帕那组, 缺乏与其共生的基性岩和中性岩, 研究区周缘如林周地区同样广泛发育以英安质-流纹质火山岩

为主的帕那组以及花岗质侵入岩, 基性岩和中性岩非常有限。此外, 帕那组中尽管存在少量的玄武质以及玄武安山质岩石, 但缺乏安山质岩石, 存在明显的成分间隔, 无法构成从基性经中性再到酸性的连续演化系列 (莫宣学等, 2009; Zhu *et al.*, 2015), 因此, 托龙岩体的成因难以用幔源岩浆的结晶分异模式来解释。

壳幔岩浆混合模式同样无法解释托龙石英二长斑岩的成因。一是如上所述, 托龙岩体缺乏如拉萨地块南部广泛出露的与花岗岩伴生的基性端员, 岩体内也不发育如拉萨地块南部花岗岩中大量显示岩浆混合作用的暗色微粒包体 (莫宣学, 2011; Ma *et al.*, 2017); 二是矿物不发育如针状磷灰石以及具镶边的石英或钾长石等显示岩浆混合作用的典型结构 (莫宣学, 2011; Ma *et al.*, 2017); 三是 Hf 同位

素组成非常均一,不具备岩浆混合所具有的双峰式或多峰式 Hf 同位素组成特征 (Wang *et al.*, 2003; Liu *et al.*, 2013)。

地壳源区通常可简单地分为变质火成岩和变质沉积岩两类源区,分别与 I 型花岗岩和 S 型花岗岩对应。前已述及,托龙石英二长斑岩中主要含钾长石、斜长石、石英、黑云母以及少量角闪石,其 A/CNK 值多小于 1, CIPW 计算结果也显示出缺乏标准刚玉分子,这些事实均表明其源岩不是变质沉

积岩。在源区判别图解上,托龙石英二长斑岩也均落入角闪岩的部分熔融区内(图 9),表明其可能是由变质中基性岩部分熔融形成的。此外,托龙石英二长斑岩具有较低的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(加权平均值为 -5.2)和较古老的地壳模式年龄 t_{DMC} ($1\,478 \sim 1\,398$ Ma),与拉萨地块南缘大量源自新生地壳的高达 13 的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值的花岗岩存在明显的差异(纪伟强等, 2009; Hou *et al.*, 2015),显示出其主要来源于相对古老地壳物质的再造。

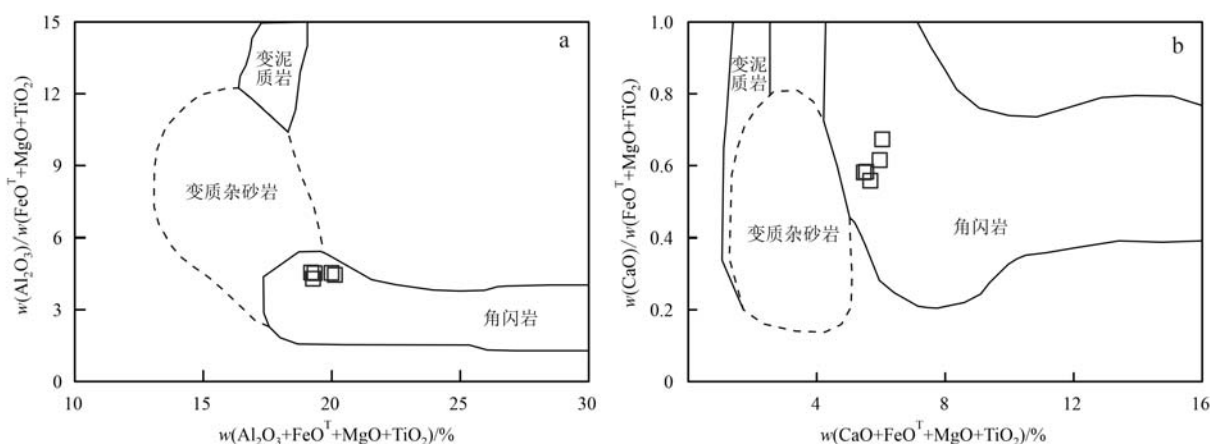


图 9 托龙石英二长斑岩化学成分图解(据 Kaygusuz 等, 2008)

Fig. 9 Chemical composition of the Tuolong quartz monzonite porphyry (Kaygusuz *et al.*, 2008)

在哈克图解中,随着 SiO_2 含量的增高, CaO 、 Na_2O 及 Al_2O_3 含量整体上呈降低的趋势,而 K_2O 含量则具有明显的正相关关系(图 10), MgO 及 TFe_2O_3 则没有明显的相关性,表明岩浆演化过程中斜长石的分离结晶作用起主要控制作用。这与微量元素 Sr 和 Ba 含量与 SiO_2 含量的负相关性、Rb 含量与 SiO_2 含量的正相关性一致, Eu 的负异常与 SiO_2 含量明显的负相关关系(图 10),也进一步证实了斜长石的分离结晶作用。

4.4 构造背景

花岗岩的地球化学特征常常被用作与其形成的大地构造背景相联系,如 I 型花岗岩多形成于俯冲至碰撞阶段, S 型花岗岩一般形成于碰撞背景, A 型花岗岩多指示伸展背景等, Pearce 等 (1984) 和 Harris 等 (1986) 进一步利用地球化学图解来判定花岗岩的形成环境。然而,绝大部分拉萨地块的花岗岩在 Pearce 构造环境判别图解中落入火山弧环境中(纪伟强等, 2009),因而花岗岩的地球化学成分构造环境判别图解已基本被舍弃,这主要是因为花岗岩的地球化学成分与构造背景之间并不存在直接的

联系,而往往与其源区成分以及后期的岩浆演化等方面存在很大的关系。

前已述及,拉萨地块在约 50 Ma 存在明显的岩浆峰期,不仅发育巨量的花岗质岩浆,在拉萨地块南缘还伴有广泛的基性岩浆活动,形成了强烈的岩浆混合,且这些基性岩和酸性岩常常显示出非常亏损的 Sr-Nd-Hf 同位素组成。上述地质事实表明,在约 50 Ma 可能存在明显的区域性构造转换,造成了巨量的岩浆活动、广泛的壳幔岩浆混合以及地壳增生事件,这一过程可能与新特提斯洋俯冲板片断离造成的软流圈上涌有关。托龙岩体的 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值介于 15.3 ~ 16.1 之间,根据 Profeta 等 (2015) 的地壳源区厚度计算公式,其源区深度约为 58 ~ 60 km,而位于拉萨地块南缘约 50 Ma 的安岗、总训等岩体具有相似的较高的 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值(徐旺春, 2010),它们被证实具有相似的地壳源区深度,这些事实表明在约 50 Ma 青藏高原的地壳厚度已增厚至约 60 km。随着新特提斯洋的逐渐闭合以及随后的印度-亚洲大陆碰撞造山作用的持续进行,青藏高原的地壳厚度逐渐增大,新特提斯洋俯冲板片回转、

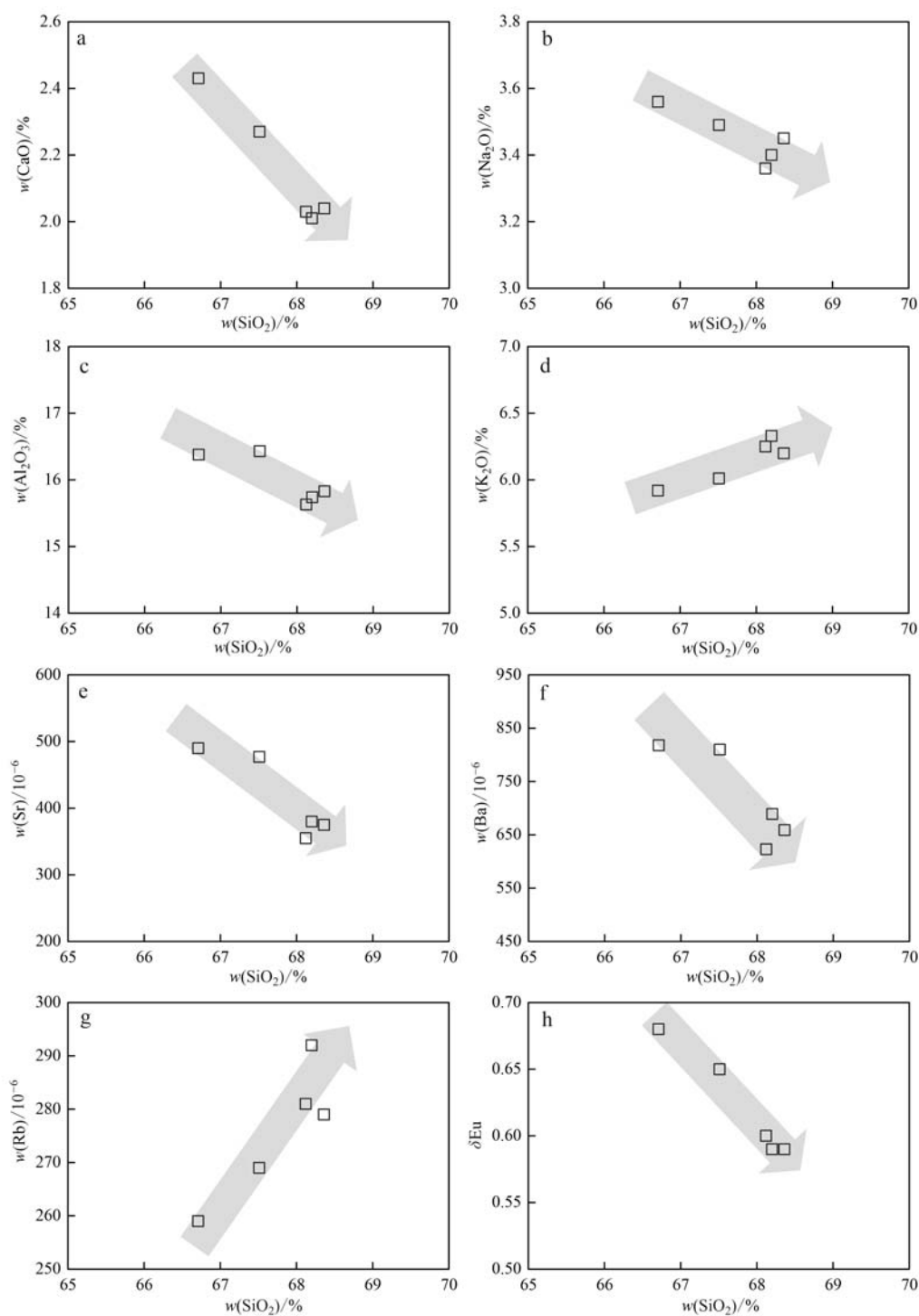


图 10 托龙石英二长斑岩 Harker 图解

Fig. 10 Harker diagrams for the Tuolong quartz monzonite porphyry

断离造成的软流圈上涌, 导致了上覆岩石圈不同部位产生了广泛的熔融, 拉萨地块古老的中基性变质基底物质也在这一时期发生了部分熔融作用, 从而形成了托龙岩体。

4.5 对印度-欧亚板块碰撞时间的约束

尽管近年来对青藏高原的相关研究取得了丰富的成果(张玉泉等, 2000; 杨经绥等, 2002; 赵志丹等, 2006; 莫宣学等, 2009; 莫宣学, 2020; 梁银平等,

2010; 侯增谦等, 2012, 2020; 谢冰晶等, 2013; 迟效国等, 2017; 周鹏等, 2019; 吴福元等, 2020; 董国臣等, 2021), 但是对青藏高原地质演化的认识, 尤其是对印度大陆与欧亚大陆碰撞过程的认识, 还存在相当大的争议, 如 Yin 和 Harrison (2000) 综合了板块运动学、古地磁学、沉积学以及岩浆岩年代学等方面的证据, 认为印度板块与亚洲板块开始碰撞的时间可早至约 70 Ma; 而 Aitchison 等 (2007) 则综合海相沉积的消失、磨拉石沉积的启动、俯冲相关钙碱性岩浆作用的结束等事件的时限, 认为印度与亚洲大陆的碰撞启动时间为约 34 Ma, 这与 Yin 和 Harrison (2000) 等估计的碰撞时限相差达 35 Ma。然而, 钙碱性岩浆作用可持续到中新世晚期 (Huang *et al.*, 2016), 用其确定印度-亚洲大陆的碰撞启动时间并不十分合理, 此外大陆碰撞后残留海中的沉积作用仍会持续, 因而海相沉积的消失时间会晚于大陆碰撞的时间。莫宣学等 (2007, 2011) 依据林子宗火山岩与下伏二叠系-白垩系 1 000 多公里长的区域性角度不整合关系, 通过限定林子宗火山岩底部的最老时代, 判断雅鲁藏布洋闭合以及印度-亚洲大陆碰撞的开始时间为 70 ~ 65 Ma; 许志琴等 (2011) 则提出不整合面能否代表大印度与亚洲大陆碰撞的时限还需要进一步探讨, 并通过喜马拉雅造山带东、西构造结及其外缘的走滑断裂的时代, 认为印度-亚洲板块的初始碰撞时代为 53 ~ 45 Ma; Hu 等 (2015) 依据桑单林组碎屑物源由从印度物源向亚洲物源转变的时间, 将印度-亚洲大陆碰撞开始的时间确定为 59 ± 1 Ma; Zhu 等 (2015) 则根据大陆碰撞造成的俯冲板片回转以及后续的板片断离所形成的岩浆作用为标志, 认为印度-亚洲大陆碰撞的启动时间为约 55 Ma。

自约 65 Ma 开始, 拉萨地块发育的岩浆活动具有从北向南的迁移趋势, 这被认为与新特提斯洋俯冲板片的回转有关 (Wen *et al.*, 2008; Zhu *et al.*, 2017); 拉萨地块在约 50 Ma 开始爆发巨量的岩浆活动, 本文研究的托龙岩体即形成于这一时期, 与此同时, 基性岩浆活动及其相伴的壳幔相互作用同样十分强烈, 林子宗火山岩也在这一时期广泛发育。这些大规模的岩浆活动以及壳幔相互作用, 被认为与新特提斯洋俯冲板片断离造成的软流圈上涌有关。模拟计算的结果进一步显示, 新特提斯洋板片的断离发生在印度-亚洲大陆初始碰撞之后不超过 2 Ma (Zhu *et al.*, 2017), 这表明印度-亚洲大陆

的初始碰撞发生在 50 Ma 以前。

5 结论

通过对拉萨地块托龙石英二长斑岩系统的年代学、元素地球化学及 Hf 同位素研究, 本文得出以下认识:

(1) 拉萨地块托龙石英二长斑岩的形成时代为 50.5 ± 0.6 Ma, 与拉萨地块岩浆活动峰期的时间一致。

(2) 托龙石英二长斑岩具有较高的 K_2O 含量和 K_2O/Na_2O 值以及较低的 A/CNK 值, 为准铝质、钾玄质岩石; 轻稀土元素富集, 重稀土元素亏损, 具有弱的负 Eu 异常, 富集大离子亲石元素, 亏损高场强元素。

(3) 托龙石英二长斑岩为 I 型花岗岩, 具有较低的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值, 可能起源于古老的变质中基性岩的部分熔融, 并经历了斜长石的结晶分异作用。

(4) 托龙石英二长斑岩形成于印度-欧亚板块碰撞引起的俯冲板片断离环境, 表明至少在 50 Ma 之前印度大陆与亚洲大陆就已开始发生碰撞。

References

- Aitchison J C, Ali J R and Davis A M. 2007. When and where did India and Asia collide[J]. *Journal of Geophysical Research*, 112: 1~19.
- Chappell B W and White A. 1974. Two contrasting granite types[J]. *Pacific Geology*, 8: 173~174.
- Chi Xiaoguo, Zhang Rui, Fan Lefu, *et al.* 2017. The formatting mechanism of Cenozoic basaltic volcanic rocks in the northern Tibet: Continental subduction and slab break-off driven by mantle convection and upwelling[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(10): 3 011~3 026 (in Chinese with English abstract).
- Defant M J and Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere[J]. *Nature*, 347 (6 294): 662~665.
- Dong Guochen, Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, *et al.* 2021. A response of volcanic rocks to the India-Asia continental collision: A case study on Linzizong volcanic rocks in Linzhou, Tibet[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 41(2): 332~339 (in Chinese with English abstract).
- Dong X, Zhang Z M, Liu F, *et al.* 2011. Zircon U-Pb geochronology of

- the Nyainqentanglha Group from the Lhasa terrane: New constraints on the Triassic orogeny of the south Tibet[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 42(4): 732~739.
- Guo L, Zhang H F, Harris N, *et al.* 2011. Origin and evolution of multi-stage felsic melts in eastern Gangdese belt: Constraints from U-Pb zircon dating and Hf isotopic composition[J]. *Lithos*, 127(1~2): 54~67.
- Harris N B W, Pearce J A and Tindle A G. 1986. *Geochemical characteristics of collision-zone magmatism*[J]. Geological Society, London, Special Publications, 19(1): 67~81.
- Hou Z Q, Duan L F, Lu Y J, *et al.* 2015. Lithospheric architecture of the Lhasa terrane and its control on ore deposits in the Himalayan-Tibetan orogen[J]. *Economic Geology*, 110(6): 1 541~1 575.
- Hou Zengqian, Mo Xuanxue, Gao Yongfeng, *et al.* 2006. Early processes and tectonic model for the Indian-Asian continental collision: Evidence from the Cenozoic Gangdese igneous rocks in Tibet[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(9): 1 233~1 248 (in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian, Zheng Yuanchuan, Lu Zhanwu, *et al.* 2020. Growth, thickening and evolution of the thickened crust of the Tibet Plateau [J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(10): 2 797~2 815 (in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian, Zheng Yuanchuan, Yang Zhiming, *et al.* 2012. Metallogensis of continental collision setting: Part I. Gangdese Cenozoic porphyry Cu-Mo systems in Tibet [J]. *Mineral Deposites*, 31(4): 647~670 (in Chinese with English abstract).
- Hu Peiyuan, Zhai Qingguo, Zhao Guochun, *et al.* 2022. Precambrian basement in the Ren Co area, Tibet constraining the origin of the North Lhasa terrane[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 41(2): 281~302 (in Chinese with English abstract).
- Hu X M, Garzanti E, Moore T, *et al.* 2015. Direct stratigraphic dating of India-Asia collision onset at the Selandian (middle Paleocene, 59±1 Ma)[J]. *Geology*, 43(10): 859~862.
- Huang F, Xu J F, Chen J L, *et al.* 2016. Two Cenozoic tectonic events of N-S and E-W extension in the Lhasa Terrane; Evidence from geology and geochronology[J]. *Lithos*, 245: 118~136.
- Ji Weiqiang, Wu Fuyuan, Chung Sunlin, *et al.* 2009. Geochronology and petrogenesis of granitic rocks in Gangdese batholith, southern Tibet [J]. *Sci. China Ser D-Earth Sci.*, 39(7): 849~871 (in Chinese).
- Kaygusuz A, Siebel W, Sen C, *et al.* 2008. Petrochemistry and petrology of I-type granitoids in an arc setting: The composite Torul pluton, eastern Pontides, NE Turkey[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 97(4): 39~76.
- Lewis M J, Bucholz C E and Jagoutz O E. 2021. Evidence for polybaric fractional crystallization in a continental arc: Hidden Lakes mafic complex, Sierra Nevada batholith, California[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 176(11): 1~27.
- Li X H, Li W X and Li Z X. 2007. On genetic types and tectonic significance of early Yanshanian granites in Nanling[J]. *Chinese Science Bulletin*, (9): 981~991.
- Liang Yinping, Zhu Jie, Ci Qiong, *et al.* 2010. Zircon U-Pb ages and geochemistry of volcanic rock from Linzizong Group in Zhunuo area in Middle Gangdise Belt, Tibet Plateau[J]. *Earth Science*, 35(2): 211~223 (in Chinese with English abstract).
- Liu L, Qiu J S and Li Z. 2013. Origin of mafic microgranular enclaves (MMEs) and their host quartz monzonites from the Muchen pluton in Zhejiang Province, Southeast China: Implications for magma mixing and crust-mantle interaction[J]. *Lithos*, 160~161: 145~163.
- 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(1~2): 537~571.
- Loiselle M C and Wones D R. 1979. Characteristics of anorogenic granites [J]. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, 11(7): 468.
- Ma X X, Meert J G, Xu Z Q, *et al.* 2017. Evidence of magma mixing identified in the Early Eocene Caina pluton from the Gangdese Batholith, southern Tibet[J]. *Lithos*, 278~281: 126~139.
- Maniar P D and Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635~643.
- Meng Yuanku, Yuan Haoqi, Wei Youqing, *et al.* 2022. Research progress and prospect of the Gangdese magmatic belt in Southern Tibet [J]. *Geological Journal of China Universities*, 28(1): 1~31 (in Chinese with English abstract).
- Middlemost E A. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth-Science Reviews*, 37(3~4): 215~224.
- Mo Xuanxue. 2011. Magmatism and evolution of the Tibetan Plateau[J]. *Geological Journal of China Universities*, 17(3): 351~367 (in Chinese with English abstract).
- Mo Xuanxue. 2020. Growth and evolution of crust of Tibetan Plateau from perspective of magmatic rocks[J]. *Earth Science*, 45(7): 2 245~2 257 (in Chinese with English abstract).
- Mo Xuanxue, Dong Guaochen, Zhao Zhidan, *et al.* 2005. Spatial and temporal distribution and characteristics of granitoids in the Gangdese, Tibet and implication for crustal growth and evolution[J]. *Geological Journal of China Universities*, 11(3): 281~290 (in Chinese with English abstract).

- English abstract).
- Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, Deng Jinfu, *et al.* 2003. Response of volcanism to the India-Asia collision[J]. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 135~148(in Chinese with English abstract).
- Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, Zhou Su, *et al.* 2007. On the timing of India-Asia continental collision[J]. *Geological Bulletin of China*, 26(10): 1 240~ 1 244(in Chinese with English abstract).
- Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, Zhu Dicheng, *et al.* 2009. On the lithosphere of India-Asia collision zone in Southern Tibet: Petrological and geochemical constraints[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34(1): 17~27(in Chinese with English abstract).
- Pan Zheng, Shi Rendeng, Huang Qishuai, *et al.* 2020. The discovery of alkaline volcanic rocks in the Kaimeng ophiolite mélangé, Tibet, and its implications[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 39(1): 18~34(in Chinese with English abstract).
- Pearce J A, Harris N B W and Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 25(4): 956~983.
- Peccerillo A and 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.
- Profeta L, Ducea M N, Chapman J B, *et al.* 2015. Quantifying crustal thickness over time in magmatic arcs[J]. *Scientific Reports*, 5(1): 1~7.
- Rage J C, Cappetta H, Hartenberger J L, *et al.* 1995. Collision age[J]. *Nature*, 375(6 529): 286~286.
- Rowley D B. 1998. Minimum age of initiation of collision between India and Asia north of everest based on the subsidence history of the Zhepure Mountain section[J]. *The Journal of Geology*, 106(2): 220~235.
- Shi Rendeng, Yang Jingsui, Xu Zhiqin, *et al.* 2005. Recognition of MOR- and SSZ-type ophiolites in the Bangong Lake ophiolite mélangé, western Tibet: Evidence from two kinds of mantle peridotites[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 24(5): 397~408(in Chinese with English abstract).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society*, 42(1): 313~345.
- Turner S, Arnaud N, Liu J, *et al.* 1996. Post-collision, shoshonitic volcanism on the Tibetan Plateau: Implications for convective thinning of the lithosphere and the source of ocean island basalts[J]. *Journal of Petrology*, 37(1): 45~71.
- Van Hinsbergen D J J, Lippert P C, Dupont-Nivet G, *et al.* 2012. Greater India basin hypothesis and a two-stage Cenozoic collision between India and Asia[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(20): 7 659~7 664.
- Wang Chunyong, Li Yonghua, Lou Hai, *et al.* 2016. Issues on crustal and upper-mantle structures associated with geodynamics in the north-eastern Tibetan Plateau[J]. *Chi. Sci. Bull.*, 61(20): 2 239~2 263 (in Chinese with English abstract).
- Wang F, Xu Y G, Xu W L, *et al.* 2017. Early Jurassic calc-alkaline magmatism in northeast China: Magmatic response to subduction of the Paleo-Pacific Plate beneath the Eurasian continent[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 143: 249~268.
- Wang L X, Ma C Q, Zhang C, *et al.* 2014. Genesis of leucogranite by prolonged fractional crystallization: A case study of the Mufushan complex, South China[J]. *Lithos*, 206~207: 147~163.
- Wang X, Griffin W L, Wang Z C, *et al.* 2003. Hf isotope composition of zircons and implication for the petrogenesis of Yajiangqiao granite, Hunan Province, China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 48(10): 995~998.
- Wen D R, Liu D, Chung S L, *et al.* 2008. Zircon SHRIMP U-Pb ages of the Gangdese batholith and implications for Neotethyan subduction in southern Tibet[J]. *Chemical Geology*, 252(3~4): 191~201.
- Whalen J B, Currie K L and Chappell B W. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 95: 407~419.
- Wilson M B. 1989. *Igneous Petrogenesis: A Global Tectonic Approach* [M]. Springer Science & Business Media.
- Wu Fuyuan, Huang Baochun, Ye Kaifang, *et al.* 2008. Collapsed Himalayan-Tibetan orogen and the rising Tibetan Plateau[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(1): 1~30(in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Wan Bo, Zhao Liang, *et al.* 2020. Tethyan geodynamics[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 36(6): 1 627~1 674(in Chinese with English abstract).
- Wu Yuanbao and Zheng Yongfei. 2004. Zircon genetic mineralogy and its constraints on U-Pb age interpretation[J]. *Chi. Sci. Bull.*, 49(16): 1 589~1 604(in Chinese with English abstract).
- Xie Bingjing, Zhou Su, Xie Guogang, *et al.* 2013. Zircon SHRIMP U-Pb data and regional contrasts of geochemical characteristics of Linzizong volcanic rocks from Konglong and Dinrenle region, middle Gangdese belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(11): 3 803~3 814(in Chinese with English abstract).
- Xu Wangchun. 2010. *Spatial Variation of Zircon U-Pb Ages and Hf Isotopic Compositions of the Gangdese Granitoids and Its Geologic Implications*[D]. China University of Geosciences(in Chinese).
- Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Hou Zengqian, *et al.* 2016. The progress in

- the study of continental dynamics of the Tibetan Plateau[J]. *Geology in China*, 43(1): 1~42(in Chinese with English abstract).
- Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Li Haibing, *et al.* 2011. On the Tectonics of the India-Asia Collision[J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(1): 1~33 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jingsui, Wu Cailai, Shi Rendeng, *et al.* 2002. Miocene and Pleistocene shoshonitic volcanic rocks in the Jingyuhu area, north of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 18(2): 161~176(in Chinese with English abstract).
- Yin A and Harrison T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibet[J]. *Earth Planet.*, 28: 21~80.
- Zeng Qinggao, Wang Baodi, Xi Luolangjie, *et al.* 2020. Suture zones in Tibetan and Tethys evolution[J]. *Earth Science*, 45(8): 2 735~2 763(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yuquan, Xie Yingwen, Li Xianhua, *et al.* 2000. Isotopic characteristics of magmatic rocks from the Potassic basalt series in the eastern Tibetan Plateau: Petrogenesis and tectonic implications[J]. *Science in China: Series D*, 30(5): 493~498(in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhidan, Mo Xuanxue, Sebastien Nomade, *et al.* 2006. Post-collisional ultrapotassic rocks in Lhasa Block, Tibetan Plateau: Spatial and temporal distribution and its implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 787~794(in Chinese with English abstract).
- Zhou Peng, Liu Gongxi, Li Qiang, *et al.* 2019. Zircon U-Pb ages and geochemistry of volcanic rocks from the Linzizong Group in the Tingong area in middle Gangdise belt[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 38(2): 352~360(in Chinese with English abstract).
- Zhu D C, Mo X X, Wang L Q, *et al.* 2009b. Petrogenesis of highly fractionated I-type granites in the Chayu area of eastern Gangdese, Tibet: Constraints from zircon U-Pb geochronology, geochemistry and Sr-Nd-Hf isotopes[J]. *Science in China (Series D)*, 52(9): 1 223~1 239.
- Zhu D C, Wang Q and Zhao Z D. 2017. Constraining quantitatively the timing and process of continent-continent collision using magmatic record: Method and examples[J]. *Science China*, 60(6): 1 040~1 056.
- Zhu D C, Wang Q, Zhao Z D, *et al.* 2015. Magmatic record of India-Asia collision[J]. *Scientific Reports*, 5(1): 1~9.
- Zhu D C, Zhao Z D, Pan G T, *et al.* 2009a. Early Cretaceous subduction-related adakite-like rocks of the Gangdese belt, southern Tibet: Products of slab melting and subsequent melt-peridotite interaction? [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 34(3): 298~309.
- Zhu D C, Zhao Z D, Niu Y L, *et al.* 2011. The Lhasa Terrane: Record of a microcontinent and its histories of drift and growth[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 301(1~2): 241~255.
- Zhu D C, Zhao Z D, Niu Y L, *et al.* 2012. Cambrian bimodal volcanism in the Lhasa Terrance, southern Tibet: Record of an Early Paleozoic Andean-type magmatic arc in the Australian proto-Tethyan margin [J]. *Chemical Geology*, 328: 290~308.
- Zhu Rixiang, Zhao Pan and Zhao Liang. 2022. Tectonic evolution and geodynamics of the Neo-Tethys Ocean[J]. *Science China Earth Sciences*, 65(1): 1~24(in Chinese with English abstract).
- Zou Guangfu, Mao Qiong, Zhuang Zhonghai, *et al.* 2016. Characteristics of paleomagnetism and its tectonic implications for the Phanerozoic in the Himalaya blocks, Tibet[J]. *Mineral Petrol.*, 36(1): 2 239~2 263(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 迟效国, 张 蕊, 范乐夫, 等. 2017. 藏北新生代玄武质火山岩起源的深部机制——大陆俯冲和板片断离驱动的地幔对流上涌模式[J]. *岩石学报*, 33(10): 3 011~3 026.
- 董国臣, 莫宣学, 赵志丹, 等. 2021. 大陆碰撞过程的火山岩响应: 以西藏林周林子宗火山岩为例[J]. *沉积与特提斯地质*, 41(2): 332~339.
- 侯增谦, 莫宣学, 高永丰, 等. 2006. 印度大陆与亚洲大陆早期碰撞过程与动力学模型——来自西藏冈底斯新生代火成岩证据[J]. *地质学报*, 80(9): 1 233~1 248.
- 侯增谦, 郑远川, 卢占武, 等. 2020. 青藏高原巨厚地壳: 生长、加厚与演化[J]. *地质学报*, 94(10): 2 797~2 815.
- 侯增谦, 郑远川, 杨志明, 等. 2012. 大陆碰撞成矿作用: I. 冈底斯新生代斑岩成矿系统[J]. *矿床地质*, 31(4): 647~670.
- 胡培远, 翟庆国, 赵国春, 等. 2022. 西藏仁错地区前寒武纪基底对北拉萨地块起源的约束[J]. *岩石矿物学杂志*, 41(2): 281~302.
- 纪伟强, 吴福元, 鍾孙霖, 等. 2009. 西藏南部冈底斯岩基花岗岩时代与岩石成因[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 39(7): 849~871.
- 梁银平, 朱 杰, 次 邛, 等. 2010. 青藏高原冈底斯带中部朱诺地区林子宗群火山岩锆石 U-Pb 年龄和地球化学特征[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 35(2): 211~223.
- 孟元库, 袁昊歧, 魏友卿, 等. 2022. 藏南冈底斯岩浆带研究进展与展望[J]. *高校地质学报*, 28(1): 1~31.
- 莫宣学. 2011. 岩浆作用与青藏高原演化[J]. *高校地质学报*, 17(3): 351~367.

- 莫宣学. 2020. 从岩浆岩看青藏高原地壳的生长演化[J]. 地球科学, 45(7): 2 245~2 257.
- 莫宣学, 董国臣, 赵志丹, 等. 2005. 西藏冈底斯带花岗岩的时空分布特征及地壳生长演化信息[J]. 高校地质学报, 11(3): 281~290.
- 莫宣学, 赵志丹, 邓晋福, 等. 2003. 印度-亚洲大陆主碰撞过程的火山作用响应[J]. 地学前缘, 10(3): 135~148.
- 莫宣学, 赵志丹, 周 肃, 等. 2007. 印度-亚洲大陆碰撞的时限[J]. 地质通报, 26(10): 1 240~1 244.
- 莫宣学, 赵志丹, 朱弟成, 等. 2009. 西藏南部印度-亚洲碰撞带岩石圈: 岩石学-地球化学约束[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 34(1): 17~27.
- 潘 政, 史仁灯, 黄启帅, 等. 2020. 青藏高原凯蒙蛇绿混杂岩中碱性火山岩的发现及意义[J]. 岩石矿物学杂志, 39(1): 18~34.
- 史仁灯, 杨经绥, 许志琴, 等. 2005. 西藏班公湖存在 MOR 型和 SSZ 型蛇绿岩——来自两种不同地幔橄榄岩的证据[J]. 岩石矿物学杂志, 24(5): 397~408.
- 王椿镛, 李永华, 楼 海, 等. 2016. 与青藏高原东北部地球动力学相关的深部构造问题[J]. 科学通报, 61(20): 2 239~2 263.
- 吴福元, 黄宝春, 叶凯方, 等. 2008. 青藏高原造山带的垮塌与高原隆升[J]. 岩石学报, 24(1): 1~30.
- 吴福元, 万 博, 赵 亮, 等. 2020. 特提斯地球动力学[J]. 岩石学报, 36(6): 1 627~1 674.
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报, 49(16): 1 589~1 604.
- 谢冰晶, 周 肃, 谢国刚, 等. 2013. 西藏冈底斯中段孔隆至丁仁勒地区林子宗群火山岩锆石 SHRIMP 年龄和地球化学特征的区域对比[J]. 岩石学报, 29(11): 3 803~3 814.
- 徐旺春. 2010. 西藏冈底斯花岗岩类锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成的空间变化及其地质意义[D]. 中国地质大学.
- 许志琴, 杨经绥, 侯增谦, 等. 2016. 青藏高原大陆动力学研究若干进展[J]. 中国地质, 43(1): 1~42.
- 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 等. 2011. 印度-亚洲碰撞大地构造[J]. 地质学报, 85(1): 1~33.
- 杨经绥, 吴才来, 史仁灯, 等. 2002. 青藏高原北部鲸鱼湖地区中新世和更新世两期橄榄玄粗质系列火山岩[J]. 岩石学报, 18(2): 161~176.
- 曾庆高, 王保弟, 西洛郎杰, 等. 2020. 西藏的缝合带与特提斯演化[J]. 地球科学, 45(8): 2 735~2 763.
- 张玉泉, 谢应雯, 李献华, 等. 2000. 青藏高原东部钾玄岩系岩浆岩同位素特征: 岩石成因及其构造意义[J]. 中国科学: 地球科学, 30(5): 493~498.
- 赵志丹, 莫宣学, Nomade Sebastien, 等. 2006. 青藏高原拉萨地块碰撞后超钾质岩石的时空分布及其意义[J]. 岩石学报, 22(4): 787~794.
- 周 鹏, 刘恭喜, 李 强, 等. 2019. 冈底斯中段厅宫地区林子宗火山岩锆石 U-Pb 年龄和地球化学特征[J]. 矿物岩石地球化学通报, 38(2): 352~360.
- 朱日祥, 赵 盼, 赵 亮. 2022. 新特提斯洋演化与动力过程[J]. 中国科学: 地球科学, 52(1): 1~25.
- 邹光富, 毛 琼, 庄忠海, 等. 2016. 西藏喜马拉雅地块显生宙古地磁特征及其构造地质意义[J]. 矿物岩石, 36(1): 2 239~2 263.