

西藏南木林地区达那古火山机构中花岗岩 大地构造意义

韩飞¹, 宋元宝¹, 李峥¹, 黄永高¹, 代克刚², 张伟¹, 李应栩³,
贾小川¹, 杨学俊¹

(1. 四川省综合地质调查研究所 稀有稀土战略资源评价与利用四川省重点实验室, 四川 成都 610081; 2. 西藏地质矿产勘查开发局 第五地质大队, 西藏 拉萨 850000; 3. 中国地质调查局 成都地质调查中心, 四川 成都 610081)

摘要: 新发现的西藏南木林地区达那古火山机构为探讨陆相火山机构岩相组成及其大地构造意义提供了窗口。本研究对达那古火山机构开展了地质剖面测量、岩相学研究, 并对期后侵入的斑状二长花岗岩进行了锆石 U-Pb 年代学和全岩地球化学分析。结果表明, 斑状二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 54.0 ± 1.4 Ma, 具有高硅 ($\text{SiO}_2 = 71.03\% \sim 75.88\%$)、高钾低钠 ($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 1.45 \sim 1.79$)、富碱 ($\text{ALK} = 8.97\% \sim 9.67\%$)、低钛 ($\text{TiO}_2 = 0.17\% \sim 0.37\%$) 等特征, 铝饱和指数 (A/CNK) 介于 $0.95 \sim 1.00$ 之间, 里特曼指数 (σ) 介于 $2.45 \sim 3.38$ 之间, 属于准铝质、钙碱性岩石系列; 轻稀土元素富集而重稀土元素相对亏损 ($\text{LREE}/\text{HREE} = 7.60 \sim 9.78$), 且分异特征明显, $(\text{La}/\text{Sm})_N = 2.85 \sim 4.21$; Rb、Th、U 等大离子亲石元素 (LILE) 和不相容元素相对富集, Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素 (HFSE) 相对亏损, 表现出具有典型的俯冲带弧型或者壳源岩浆岩的地球化学属性。综合上述地质信息表明, 达那古火山机构形成于 54 Ma 之前, 斑状二长花岗岩形成于印度-欧亚大陆碰撞期的活动大陆边缘构造背景, 在幔源岩浆底侵作用下, 中下地壳发生熔融, 之后岩浆分异上升侵位于火山通道结晶而成。

关键词: 达那; 古火山机构; 二长花岗岩; 地球化学; 构造背景; 西藏

中图分类号: P581; P542.35

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2024)04-0803-18

Tectonic significance of granite in Dana ancient volcanic edifice in Nanmulin area, Xizang

HAN Fei¹, SONG Yuan-bao¹, LI Zheng¹, HUANG Yong-gao¹, DAI Ke-gang², ZHANG Wei¹,
LI Ying-xu³, JIA Xiao-chuan¹ and YANG Xue-jun¹

(1. Evaluation and Utilization of Strategic Rare Metals and Rare Earth Resource Key Laboratory, Sichuan Institute of Comprehensive Geological Survey, Chengdu 610081, China; 2. The Fifth Geological Brigade, Tibet Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Lhasa 850000, China; 3. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, China)

Abstract: The newly discovered Dana ancient volcanic edifice in the Nanmulin area of Xizang provides a window for exploring the lithofacies composition of continental volcanic edifice and its tectonic significance. This study conducts geological profile measurements and petrographic studies on the Dana ancient volcanic edifice, and conducts zircon LA-ICP-MS U-Pb dating and the whole-rock geochemical analysis for the porphyritic monzonitic granite which

收稿日期: 2023-06-03; 接受日期: 2024-04-06; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFC2901903); 第二次青藏高原综合科学考察项目 (2019QZKK0806); 中国地质调查局项目 (DD20230031, DD20240070-1, 12120114058201)

作者简介: 韩飞 (1988-), 男, 工程师, 从事区域地质调查和矿床成因研究, E-mail: cdhanfei7@163.com; 通讯作者: 李峥 (1989-), 男, 工程师, 从事地质调查与矿产勘查方面研究, E-mail: 16560253@qq.com; 黄永高 (1987-), 男, 高级工程师, 从事基础地质调查与研究, E-mail: hyonggao@126.com。

intrusived into volcanic channel laterly. The results show that the zircon U-Pb age of the porphyritic monzonitic granite is 54.0 ± 1.4 Ma, with high silicon ($\text{SiO}_2 = 71.03\% \sim 75.88\%$), high potassium and low sodium ($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 1.45 \sim 1.79$), rich alkali ($\text{ALK} = 8.97\% \sim 9.67\%$), and low titanium ($\text{TiO}_2 = 0.17\% \sim 0.37\%$) characteristics. The A/CNK value ranges from 0.95 to 1.00, and the Rittman index (σ) ranges from 2.45 to 3.38, belonging to the quasi-aluminous and calc-alkaline rock series. Enrichment of light rare earth elements and relative depletion of heavy rare earth elements ($\text{LREE}/\text{HREE} = 7.60 \sim 9.78$), with obvious differentiation characteristics, $(\text{La}/\text{Sm})_N = 2.85 \sim 4.21$; Large ion lithophilic elements such as Rb, Th, U (LILE) and incompatible elements are relatively enriched, while high field strength elements such as Nb, Ta, P, Ti (HFSE) are relatively depleted, exhibiting typical geochemical properties of subduction arc or crustal magmatic rocks. Based on the above geological information, it is indicated that the Dana ancient volcanic edifice was formed before 54 Ma, and the porphyritic monzonitic granite was formed in the tectonic background of the active continental margin during the India-Eurasia collision. Under the action of mantle-derived magma intrusion, the middle and lower crust melted, and then the magma differentiated and ascended to infiltrate and crystallize in the volcanic channel.

Key words: Dana; ancient volcanic edifice; monzonitic granite; geochemistry; tectonic setting; Xizang

Fund support: National Key R & D Plan (2021YFC2901903); The Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research (2019QZKK0806); Projects of China Geological Survey (DD20230031, DD20240070-1, 12120114058201)

西藏冈底斯岩浆弧南带发育一条巨型火山-岩浆岩带,东西跨度达 1 500 km,时代归属白垩纪—中新世,被认为是新特提斯洋北向俯冲、板片回转、断离和印度板块与欧亚大陆拼贴、碰撞等多个地球动力学过程的岩浆响应(莫宣学等, 2003, 2009a, 2009b; 莫宣学, 2011; Zhu *et al.*, 2013)。研究区即位于冈底斯岩浆弧带,区内广泛发育林子宗群火山岩。

林子宗群最早由李璞提出的“林子宗火山岩”演变而来,原意指分布在林周县等地,以火山岩为主,夹砂岩、泥灰岩的一套地层,创名时将其地质时代归置于白垩纪。西藏区调队提交的 1:20 万拉萨幅区域地质调查报告(李关清, 1990),认为林子宗群内部存在两个不整合关系,并据此将其解体,新创建典中组、年波组和帕那组 3 个组级岩石地层单位,通过部分化石及同位素测年资料将其地质时代归属于古近纪古新世—始新世。在冈底斯岩浆弧带,目前发现和报道的林子宗群火山岩主要分布在林周、拉萨、尼木-加查、昂仁、南木林、谢通门、措勤、雄巴等地区(唐攀等, 2018; 郭英帅, 2019; 韦乃韶等, 2019; 火久伟等, 2019; 贾雨阳, 2020)。一些学者认为这些地区林子宗群早期典中组多具有弧火山岩的地球化学特征,岩浆源区为交代富集的弧形楔形地幔(Mo *et al.*, 2007);年波组显示陆缘弧环境特征,岩浆组分表明有一定地壳物质加入,并在岩浆房发生源区混合(贾建称等, 2005);晚期帕那组则一般具有大

陆碰撞至板内环境的过渡特征,岩浆源区有更多的地壳物质成分(Kapp *et al.*, 2003; 黄映聪等, 2005)。

白垩纪—中新世是南木林地区岩浆活动最为发育的时期,已报道的研究往往单一以林子宗群岩性为对象,极少见结合火山机构识别和火山岩相划分的综合研究(陈晓林等, 2010),缺乏系统性和深入性,并且缺乏对林子宗群古火山机构特征和配套岩相岩石成因机理的深入研究。本文在野外地质调查基础上,拟从火山机构的识别及其稍晚期占据火山通道花岗岩的岩石成因、成岩构造背景等角度切入,通过地质测量、岩石年代学、岩石地球化学的研究,探讨南木林地区火山活动的地质作用过程,为研究整个林子宗群火山活动形式、新特提斯洋俯冲和印度-欧亚大陆碰撞时限提供年龄证据,并丰富林子宗群火山岩的岩相类型。

1 地质背景

西藏拉萨地块夹持于喜马拉雅陆块和羌塘陆块之间,三者接触界线分别是印度-雅鲁藏布江缝合带和班公湖-怒江缝合带。拉萨地块又被洛巴堆-米拉山断裂和狮泉河-纳木错蛇绿混杂岩带分割为南拉萨地块、中拉萨地块和北拉萨地块。研究区即位于南拉萨地块北缘(图 1a、1b),主体出露林子宗群典中组和年波组火山岩,也可见与火山机构伴生

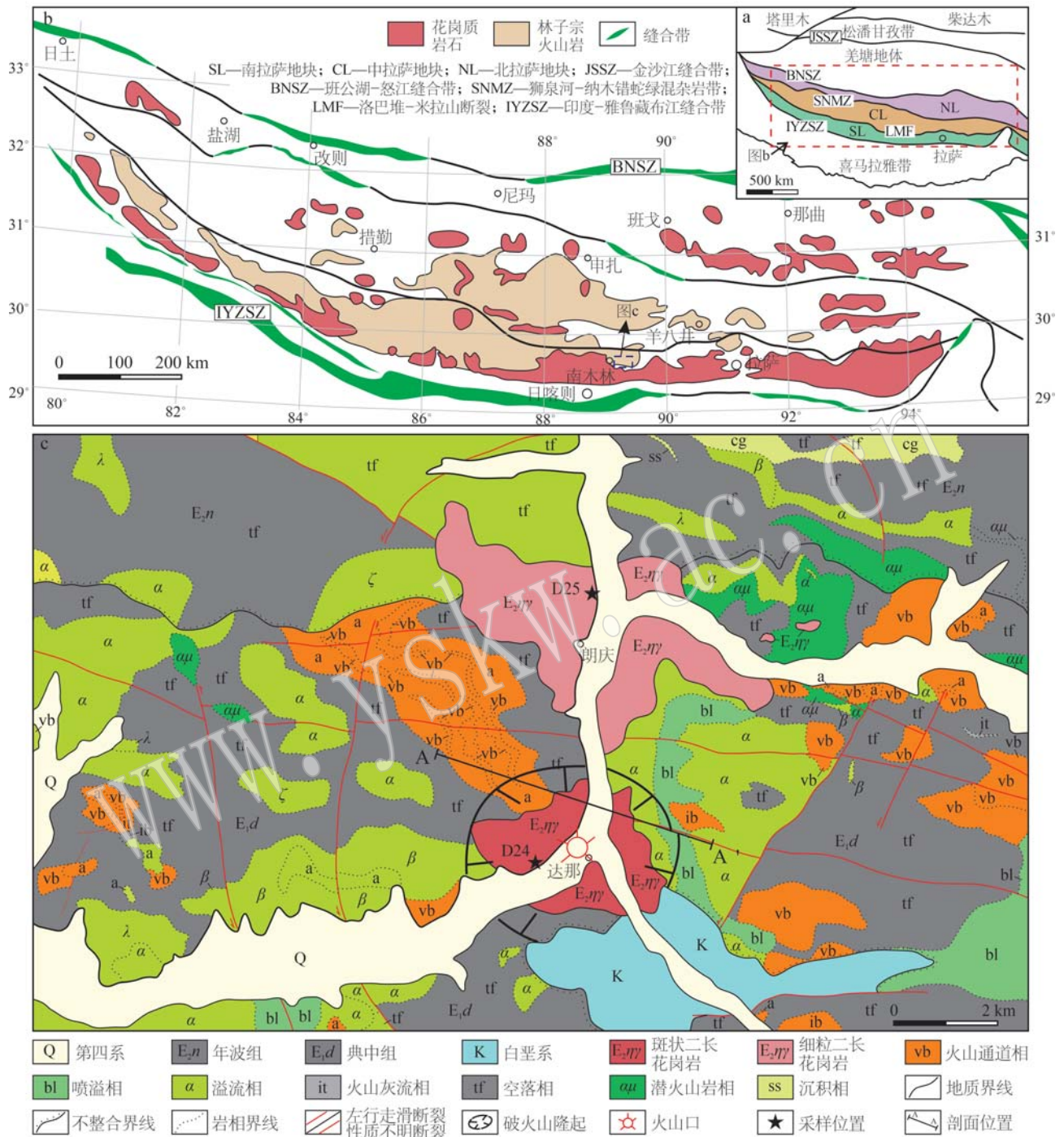


图1 研究区大地构造位置(a)、拉萨地块岩浆岩分布图(b)和研究区岩性-岩相图(c) [据刘洪等(2019)修改]

Fig. 1 Geotectonic location map of the study area(a), magmatic rock of Lhasa Terrane(b) and lithologic and lithofacies map of the study area(c) (modified from Liu Hong *et al.*, 2019)

au—安山玢岩(潜火山岩相); β—玄武岩(溢流相); α—安山岩(溢流相); λ—流纹岩(溢流相); tl—凝灰熔岩(溢流相); ζ—英安岩(溢流相); bl—角砾熔岩(喷溢相); ib—熔结角砾岩(火山通道相); a—火山集块岩(火山通道相); vb—火山角砾岩(火山通道相); it—熔结凝灰岩(火山灰流相); tf—凝灰岩(空落相); ss—砂岩(沉积相); cg—砾岩(沉积相)

au—andesitic porphyrite(subvolcanic lithofacies); β—basalt(effusion facies); α—andesite(effusion facies); λ—rhyolite(effusion facies); tl—tuff lava(effusion facies); ζ—dacite(effusion facies); bl—breccia lava(effusive facies); ib—ignimbrite(volcanic crater); a—volcanic agglomerate(volcanic crater); vb—volcanic breccia(volcanic crater); it—ignimbrite(volcanic crater); tf—tuff(airborne facies); ss—sandstone(sedimentary facies); cg—conglomerate(sedimentary facies)

的始新世花岗岩和二长花岗岩,出露面积约 25 km²;中生代白垩纪地层仅展布于研究区南部(图 1c)。林子宗群为一套陆相火山岩组合,其中典中组主要出露岩石为玄武岩、安山岩、安山玢岩及基性-中性火山碎屑岩,少见流纹质等酸性火山岩;年波组出露岩石有安山岩、英安岩、流纹岩、中性和中酸性火山碎屑岩以及砂岩和砾岩,较少见基性火山岩。沉积相地层作为火山岩夹层是年波组最显著的特征,与典中组呈喷发不整合接触关系。白垩系主要是一套砂岩、板岩及厚层灰岩,典中组火山岩喷发不整合于白垩系之上。研究区出露多个火山机构,均为中心式喷发。在本次工作中,达那古火山机构是新发现的规模最大的古火山机构。

2 火山机构及特征

达那古火山机构位于南木林县达那乡,是方圆 10 km 内最大的一个火山机构,属典中组的一个火山喷发中心,地势陡峻,最高海拔达到 4 776 m(图 1c)。火山机构平面形态近似椭圆形,长轴北西-南东向,与火山岩展布方向大体一致,整体出露不完整。该古火山机构岩石组合、岩性及岩相出露丰富,见有近火山口相(坠落堆积亚相)、爆发相、爆溢相、喷溢相、空落相、潜火山岩相(图 2)。火山岩相岩石以中性火山岩为主,平面展布呈破布状,围岩主体倾向北东东,并配套发育火山活动相关断裂构造。围绕火山口由内向外依次发育有近火山口相→爆发相→溢流相→喷溢相→潜火山岩相→空落相,自下而上则依次是火山集块岩→火山角砾岩→安山岩→安山质岩屑晶屑凝灰岩,显示出火山喷发的能量由强到弱的变化过程。火山碎屑岩层理不发育,局部可见火山韵律构造和火山熔岩的流动构造。爆发→宁静溢流→喷溢的现象反映出,从早到晚,火山活动具有间歇性活动的特点。

近火山口相:包含的主要岩石类型有火山角砾岩、火山集块岩,是近火山口或者火山锥堆积的显著标志。分布于火山口的南西部,呈条带状、楔状,呈南东-北西向展布,出露长度 5.0~6.0 km,宽度 8.0~2.2 km。火山集块岩和火山角砾岩的集块和角砾岩性主要是安山岩和凝灰岩,部分为玄武岩、砂岩和粉砂岩。较大的集块大小在 40 mm×60 mm 左右(图 2a),少量火山集块呈次棱角状,具有岩浆熔蚀现象,部分火山角砾可见隐爆的特征(图 2b),可

见当时火山喷发能量之大。

空落相:在火山口周围及其他岩相周围均有分布,类似于沉积岩之“胶结物”一般。出露规模较大,分布范围较广,主要有(含角砾)岩屑晶屑凝灰岩,多为紫红色安山质成分火山碎屑岩,岩石层理不发育(图 2c)。

溢流相:可见火山喷发活动较缓和的溢流状安山岩及玄武岩,主要分布在火山口附近。安山岩呈暗紫红色,具有斑状结构,部分杏仁状构造,局部可见流动构造。斑晶为自形程度较好的斜长石,基质具隐晶质-细粒结构(图 2d)。玄武岩颜色较深,灰黑色,隐晶质结构、块状构造。

喷溢相:位于溢流相的上部(东侧),条带状,火山口东部半弧形展布,出露宽度 300~500 m,东西延伸较远,主要有安山质角砾熔岩(图 2e),角砾岩性为安山岩、凝灰岩和粉砂岩。喷溢相是溢流相前缘和边缘常见的岩石,显示出较大的喷发能量。相对于溢流相而言,距离火山口更远。

潜火山岩相:该岩相的岩石类型为安山玢岩,广泛分布于火山附近,呈脉状,脉体大小不等,地表出露规模最大者可达 10 m×15 m。斑状结构,斑晶为斜长石,含量达 40%,基质为微细粒中基性成分(图 2f)。

火山通道被稍晚期斑状二长花岗岩填充,平面上自行封闭,出露面积约 8 km²。它可能是岩浆房残余岩浆沿火山通道上侵,扩大通道或吞蚀围岩而形成的岩株。因河流侵蚀及风化作用的揭露,野外地质特征明显可见,空间上,斑状二长花岗岩呈穹状体侵入于 3 种不同岩相中,其中与典中组凝灰岩呈冷凝-半冷凝接触关系,接触界线明显,接触界面外倾,倾角 60°~70°(图 3a)。围岩未见有明显的烘烤边现象,岩体边部可见细粒边结构;在火山通道边部可见小块火山集块岩和火山角砾岩残留,局部以斑状二长花岗岩的捕虏体形式存在,表明斑状二长花岗岩体是在火山喷发活动之后,沿火山通道缓慢侵入充填冷凝而成,同时也表明稍晚期斑状二长花岗岩侵入时,围岩尚未完全冷却,反映了近于同时性特征(图 3b)。

斑状二长花岗岩体呈灰白色,斑状结构,块状构造,由斑晶与基质组成,二者成分相同,仅在结构上有差异,主要成分为钾长石、斜长石、石英、黑云母、蚀变角闪石(图 3c、3d)。斑晶大小在 2~8 mm 之间,主要成分为钾长石和少量斜长石,含量约占岩

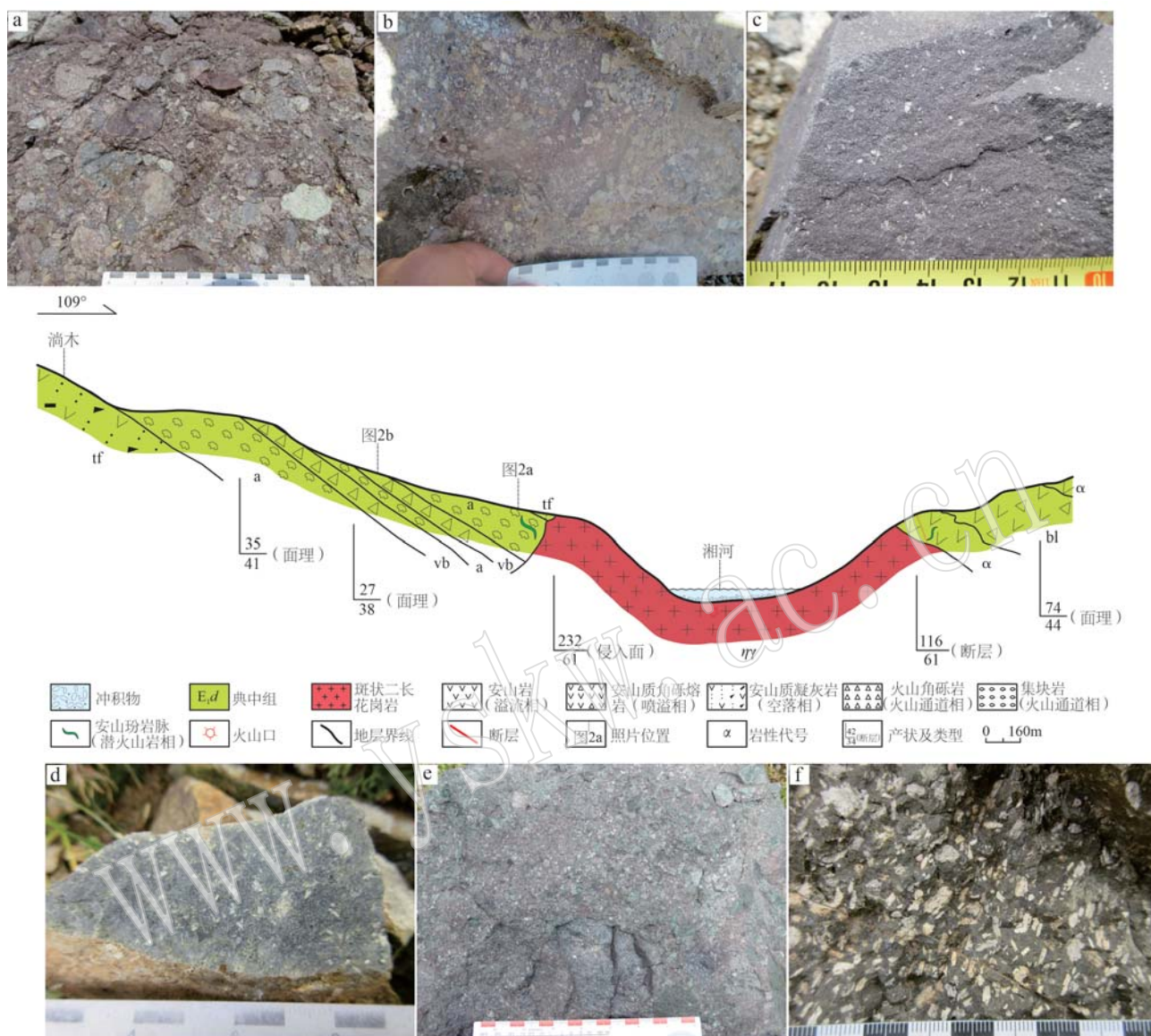


图2 达那古火山机构剖面图及其岩性-岩相地质特征

Fig. 2 The geological section and geological characteristics of rock facies of Dana ancient volcanic edifice

a—火山集块岩(火山通道相,镜头方向25°); b—火山角砾岩(火山通道相,镜头方向37°); c—岩屑晶屑凝灰岩(空落相,镜头方向78°); d—安山岩(溢流相,镜头方向352°); e—安山质角砾熔岩(喷溢相,镜头方向47°); f—安山玢岩(潜火山岩相,镜头方向143°)

a—volcanic agglomerate(volcanic crater, direction 25°); b—volcanic breccia(volcanic crater, direction 37°); c—lithic crystal tuff(airborne facies, direction 78°); d—andesite(effusion facies, direction 352°); e—andesitic breccia lava(effusive facies, direction 47°); f—andesitic porphyrite(subvolcanic rock facies, direction 143°)

石总量的20%;基质中矿物粒度大小不等,含量约占岩石总量的80%,粒度在0.7~3 mm之间的长英矿物及黑云母角闪石与斑晶呈渐变过渡关系。为限定火山机构形成时代及其所反映的大地构造意义,采取达那斑状二长花岗岩及相邻细粒二长花岗岩体样品,作为进一步研究对象。

上述各岩相火山岩围绕火山口呈不连续环形分

布,其中空落相分布范围最广泛,溢流相次之。二者约占整个火山机构出露面积的80%。火山机构东南角剥露有白垩系,与期后斑状二长花岗岩呈侵入接触关系。局部可见火山作用同期火山断裂构造穿切白垩系,而未穿切岩体,表明岩体就位时间晚于火山喷发时间。

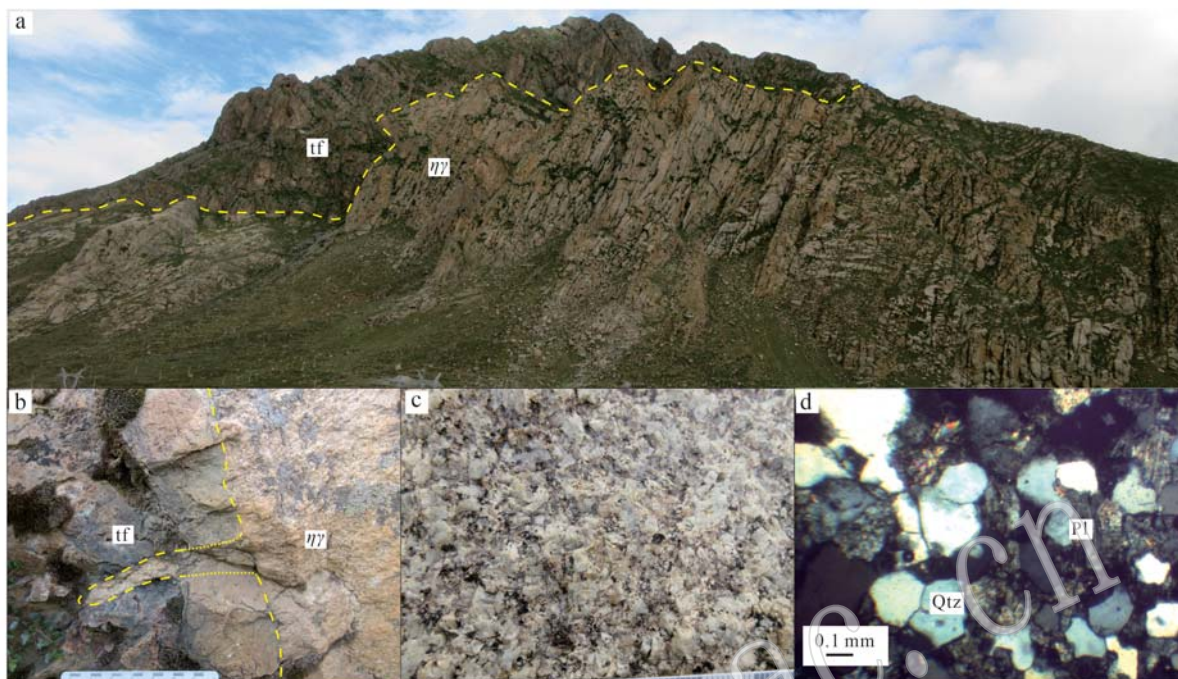


图 3 达那古火山机构中斑状二长花岗岩体特征

Fig. 3 The geological characteristics of porphyritic monzonitic granite body from Dana ancient volcanic edifice

a—野外产状(镜头方向 287°); b—斑状二长花岗岩侵入凝灰岩; c—手标本; d—镜下特征(正交偏光); tf—凝灰岩;

ηγ—斑状二长花岗岩; Qtz—石英; Pl—斜长石

a—field occurrence (direction 287°); b—porphyritic monzonitic granite intruded into tuff; c—hand specimen; d—microscopic characteristics (cross-polarized light); tf—tuff; ηγ—porphyritic monzonitic granite; Qtz—quartz; Pl—plagioclase

3 测试方法

3.1 锆石 U-Pb 定年

本文锆石的挑选、制靶及阴极发光照相工作在南京宏创地质勘查技术服务有限公司完成。单矿物分选采用常规方法:经粉碎后采用传统的重力和磁选的方法分选和富集,再在双目镜下提纯,将锆石嵌于环氧树脂样靶中,经打磨、抛光后在阴极发光下观察、记录显微结构,查明锆石内部结构,便于选取最佳分析区域点。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测试工作在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成,应用 Coherent 公司生产的 193 nm 准分子激光剥蚀系统+Agilent7700x 电感耦合等离子质谱仪联机进行测试。激光剥蚀过程中采用氦气作载气,由一个 T 型接头将氦气和氩气混合后进入 ICP-MS 中。每个采集周期包括大约 30 s 的空白信号和 60 s 的样品信号。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-Th-Pb 同位素比值和年龄计算)

采用软件 ICPMSDataCal 完成(Liu *et al.*, 2010)。U-Pb 同位素定年中采用锆石标准 91500 作外标进行同位素分馏校正,每分析 6~8 个样品点,分析 2 次 91500。对于与分析时间有关的 U-Th-Pb 同位素比值漂移,利用 91500 的变化采用线性内插的方式进行校正(Liu *et al.*, 2010)。锆石样品的 U-Pb 年龄谐和图绘制和加权平均年龄均采用 Isoplot 完成(Ludwig, 2003)。本次测试 U-Pb 年龄小于 1 000 Ma,因此选择²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄数据。

3.2 岩石地球化学分析

样品经显微镜下鉴定后,磨制成 200 目送至中国冶金地质总局山东局测试中心进行主、微量元素测定。主量元素分析经过硝酸、高氯酸、氢氟酸溶样、王水提取等步骤,采用 ARL 9900XP 型 X 射线荧光光谱仪(XRF 法)分析;微量元素采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)分析,将样品粉末与 2% 的 HNO₃ 溶解后,采用 X Series2 电感耦合等离子体质谱仪测定。两者分析环境均在温度 20~25℃ 和湿度 40%~45% 下进行,分析精度均小于 1%。

4 分析结果

4.1 年代学特征

达那斑状二长花岗岩样品(D24)的锆石粒度较大,呈长柱状自形晶体,长度多在60~190 μm 之间,宽度多在50~90 μm 之间,长宽比介于1:1~4:1之间。阴极发光图像显示锆石具有明显的核幔结构,核部阴极发光强度均一,显示环带或具有扇状分布特征;幔部发育明暗相间的韵律环带,为典型的岩浆结晶锆石(Corfu *et al.*, 2003)(图4)。本次获得锆

石Th含量为 $180.0 \times 10^{-6} \sim 931.1 \times 10^{-6}$,平均值为 365.0×10^{-6} ,U含量为 $319.3 \times 10^{-6} \sim 1\,026.8 \times 10^{-6}$,平均值为 485.2×10^{-6} ,Th/U值介于0.48~1.06之间,均大于0.4(表1),与典型的岩浆成因锆石类似(吴元保等,2004)。获得的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄集中在58.0~50.3 Ma之间,测年结果在U-Pb谐和图上沿谐和线或其附近集中分布(图5a),说明各自同位素系统封闭较好。所有测年锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄加权平均值为 54.0 ± 1.4 Ma,代表了达那斑状二长花岗岩体的结晶年龄。

细粒二长花岗岩样品(D25)的锆石粒度较大,

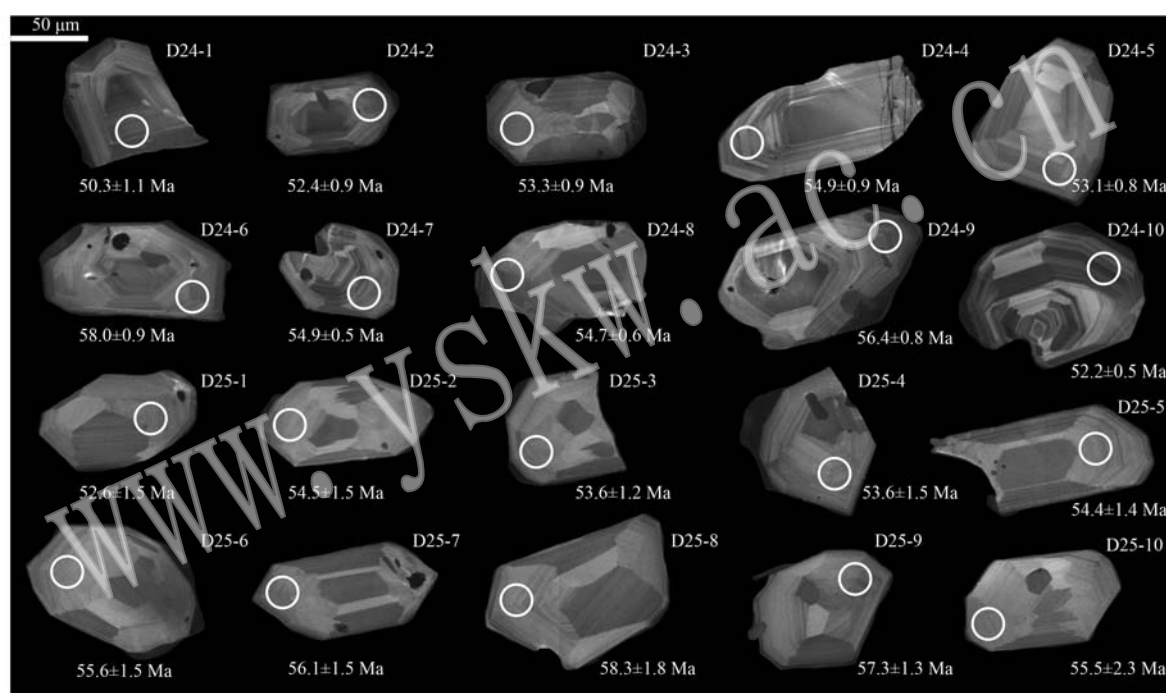


图4 二长花岗岩中锆石的CL图像

Fig. 4 Zircon CL images of monzonitic granite

呈长柱状自形晶体,长度多在80~200 μm 之间,宽度多在50~80 μm 之间,长宽比介于1:1~4:1之间。阴极发光图像显示锆石具有明显的核幔结构,核部阴极发光强度均一,不显示环带或具有扇状分布特征;幔部发育明暗相间的韵律环带,同样为典型的岩浆结晶锆石(Corfu *et al.*, 2003)。本次获得锆石Th含量为 $49.5 \times 10^{-6} \sim 158.9 \times 10^{-6}$,平均值为 95.19×10^{-6} ,U含量为 $100.9 \times 10^{-6} \sim 305.1 \times 10^{-6}$,平均值为 215.6×10^{-6} ,Th/U值介于0.39~0.49之间,普遍大于0.4(表1),与典型的岩浆成因锆石类似(黄映聪等,2005)。获得的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄集中在58.3~52.6 Ma之间,测年结果在U-Pb谐

和图上沿谐和线或其附近集中分布(图5b),说明各自同位素系统封闭较好。所有测年锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄加权平均值为 55.0 ± 1.2 Ma,代表细粒二长花岗岩体的结晶年龄。

4.2 地球化学特征

本次研究采集了达那斑状二长花岗岩和细粒二长花岗岩各8件样品进行岩石地球化学分析,测试结果见表2。岩石地球化学分析结果显示,达那斑状二长花岗岩具有高硅($\text{SiO}_2 = 71.03\% \sim 75.88\%$,平均72.50%)、富碱($\text{ALK} = 8.97\% \sim 9.67\%$,平均9.38%)、高钾低钠($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 1.45 \sim 1.79$,平均1.59)、低钛($\text{TiO}_2 = 0.17\% \sim 0.37\%$,平均0.30%)等

表 1 二长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果
Table 1 Zircon U-Pb dating results of the monzonitic granite

测点号	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值						同位素年龄/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	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	
D24-1	426.9	446.5	0.96	0.048 8	0.002 0	0.052 2	0.001 8	0.007 8	0.000 2	50.3	1.1	97
D24-2	454.4	568.6	0.80	0.048 3	0.002 3	0.054 1	0.002 5	0.008 2	0.000 1	52.4	0.9	97
D24-3	180.0	373.3	0.48	0.046 4	0.002 3	0.053 3	0.003 0	0.008 3	0.000 1	53.3	0.9	98
D24-4	393.1	371.4	1.06	0.051 6	0.003 2	0.060 8	0.003 8	0.008 5	0.000 1	54.9	0.9	91
D24-5	202.1	319.3	0.63	0.048 1	0.002 6	0.054 5	0.002 6	0.008 3	0.000 1	53.1	0.8	98
D24-6	244.9	423.3	0.58	0.050 2	0.002 8	0.062 7	0.003 7	0.009 0	0.000 1	58.0	0.9	93
91500	24.0	73.4	0.33	0.077 3	0.002 2	1.907 4	0.053 5	0.178 9	0.003 1	1 061.0	16.7	97
91500	23.3	71.1	0.33	0.072 5	0.001 7	1.793 0	0.038 5	0.179 4	0.003 0	1 063.8	16.3	98
D24-7	220.8	364.8	0.61	0.046 6	0.003 0	0.054 9	0.003 5	0.008 6	0.000 1	54.9	0.5	98
D24-8	392.3	538.9	0.73	0.047 1	0.002 1	0.055 4	0.002 4	0.008 5	0.000 1	54.7	0.6	99
D24-9	203.9	419.2	0.49	0.045 7	0.002 3	0.055 2	0.002 6	0.008 8	0.000 1	56.4	0.8	96
D24-10	931.1	1 026.8	0.91	0.047 9	0.001 8	0.053 6	0.002 0	0.008 1	0.000 1	52.2	0.5	98
91500	13.3	23.7	0.56	0.075 9	0.001 5	1.876 3	0.043 3	0.179 1	0.003 1	1 062.0	17.1	98
91500	13.1	23.4	0.56	0.073 8	0.002 0	1.824 1	0.048 9	0.179 3	0.002 8	1 062.9	15.5	99
D25-1	158.9	279.4	0.57	0.054 8	0.003 6	0.061 4	0.003 7	0.008 2	0.000 2	52.6	1.5	86
D25-2	76.2	185.8	0.41	0.044 8	0.005 2	0.053 6	0.006 4	0.008 5	0.000 2	54.5	1.5	97
D25-3	111.1	246.4	0.45	0.046 2	0.003 4	0.053 7	0.004 5	0.008 3	0.000 2	53.6	1.2	99
D25-4	132.9	305.1	0.44	0.047 6	0.004 4	0.055 3	0.0056	0.008 3	0.000 2	53.6	1.5	98
D25-5	77.3	178.2	0.43	0.054 7	0.007 7	0.061 7	0.007 7	0.008 5	0.000 2	54.4	1.4	88
D25-6	66.5	168.4	0.39	0.049 2	0.005 3	0.059 0	0.006 6	0.008 7	0.000 2	55.6	1.5	95
D25-7	86.2	218.2	0.40	0.042 0	0.004 5	0.050 5	0.005 0	0.008 7	0.000 2	56.1	1.5	88
91500	13.1	23.7	0.55	0.073 7	0.001 7	1.822 7	0.039 4	0.179 4	0.003 1	1 063.8	17.2	99
91500	12.5	22.5	0.56	0.076 0	0.001 6	1.877 7	0.037 8	0.178 9	0.002 5	1 061.0	13.5	98
D25-8	77.8	193.8	0.40	0.045 7	0.005 2	0.055 4	0.005 5	0.009 1	0.000 3	58.3	1.8	93
D25-9	115.5	279.8	0.41	0.044 8	0.005 5	0.054 3	0.006 1	0.008 9	0.000 2	57.3	1.3	93
D25-10	49.5	100.9	0.49	0.048 7	0.008 6	0.054 6	0.008 5	0.008 6	0.000 4	55.5	2.3	97
91500	12.8	23.0	0.56	0.075 8	0.002 1	1.868 6	0.050 5	0.179 0	0.002 5	1 061.4	13.5	99
91500	13.0	23.3	0.56	0.074 0	0.001 8	1.831 8	0.046 3	0.179 4	0.002 1	1 063.5	11.5	99

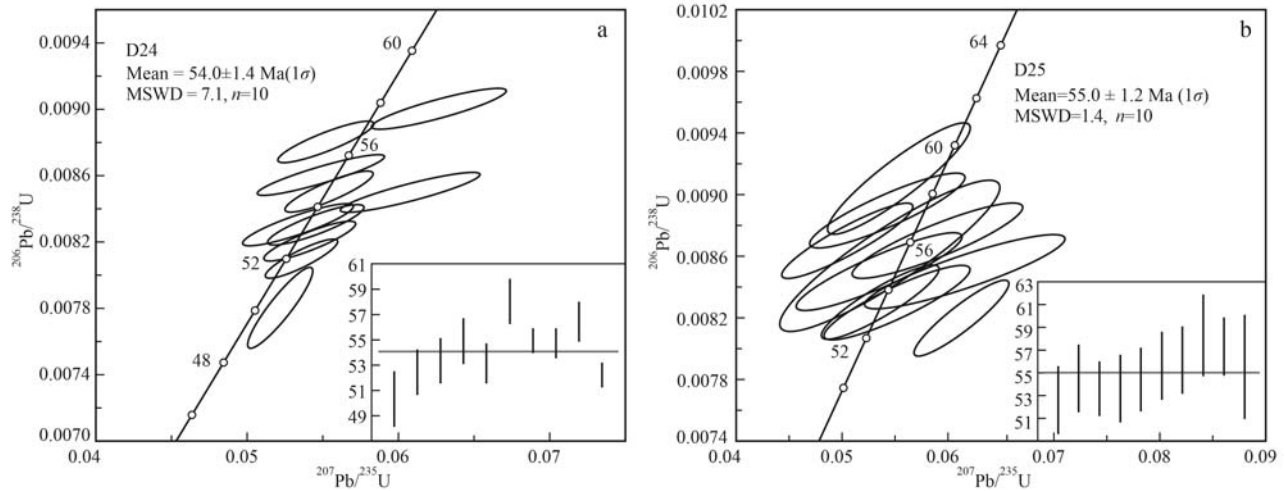


图 5 二长花岗岩中锆石 U-Pb 谐和图解
Fig. 5 Zircon U-Pb concordia diagrams of the monzonitic granite

表 2 达那古火山机构中二长花岗岩的主量元素 ($w_B/\%$)、稀土和微量元素 ($w_B/10^{-6}$) 测试结果
 Table 2 Major elements ($w_B/\%$) and trace elements ($w_B/10^{-6}$) of monzonitic granite from Dana ancient volcanic edifice

样品名称	斑状二长花岗岩								细粒二长花岗岩							
样号	D24H1	D24H2	D24H3	D24H4	D24H5	D24H6	D24H7	D24H8	D25H1	D25H2	D25H3	D25H4	D25H5	D25H6	D25H7	D25H8
SiO ₂	71.03	71.46	71.33	71.35	71.80	71.79	75.38	75.88	67.04	68.17	67.82	67.41	67.09	67.82	67.82	67.48
TiO ₂	0.37	0.37	0.35	0.34	0.31	0.35	0.17	0.17	0.63	0.58	0.60	0.60	0.60	0.60	0.59	0.58
Al ₂ O ₃	14.25	13.97	14.14	14.13	14.13	14.15	12.44	12.37	14.99	14.55	14.82	14.73	14.76	14.73	14.73	14.77
Fe ₂ O ₃	0.59	0.81	0.85	0.90	0.93	0.84	0.83	0.92	2.13	1.98	2.05	2.17	1.65	1.78	1.80	1.72
FeO	2.30	2.11	2.04	1.91	1.46	1.72	1.21	1.02	2.62	2.53	2.46	2.40	3.23	2.84	2.97	3.03
MnO	0.07	0.07	0.06	0.07	0.06	0.07	0.04	0.04	0.10	0.09	0.08	0.10	0.10	0.09	0.09	0.09
MgO	0.53	0.48	0.44	0.41	0.39	0.43	0.16	0.14	1.26	1.24	1.11	1.20	1.21	1.21	1.23	1.17
CaO	1.47	1.33	1.19	1.25	1.21	1.21	0.54	0.45	2.13	1.64	1.71	2.11	2.12	1.83	1.97	2.23
Na ₂ O	3.81	3.68	3.69	3.73	3.71	3.64	3.53	3.22	3.77	3.91	3.80	3.83	3.94	3.71	3.50	3.70
K ₂ O	5.51	5.67	5.85	5.85	5.96	5.74	5.67	5.76	5.12	5.12	5.36	5.27	5.09	5.22	5.13	5.04
P ₂ O ₅	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.06	0.02	0.02	0.21	0.19	0.18	0.19	0.21	0.18	0.18	0.18
LOI	0.65	0.60	0.60	0.42	0.51	0.34	0.60	0.83	3.31	2.05	1.86	2.07	1.77	1.70	1.61	1.63
TFEo	2.83	2.83	2.81	2.72	2.30	2.47	1.96	1.85	4.54	4.31	4.30	4.35	4.72	4.44	4.59	4.58
A/CNK	0.96	0.95	0.97	0.96	0.96	0.98	0.96	1.00	0.96	0.97	0.98	0.93	0.93	0.98	0.99	0.95
A/NK	1.16	1.14	1.14	1.13	1.12	1.16	1.04	1.07	1.27	1.21	1.23	1.22	1.23	1.25	1.30	1.28
σ	3.10	3.07	3.21	3.24	3.25	3.06	2.62	2.45	3.29	3.24	3.38	3.40	3.38	3.21	3.00	3.12
AR	2.88	2.85	2.85	2.88	2.87	2.80	3.39	3.01	2.58	2.87	2.70	2.67	2.75	2.62	2.44	2.54
Rb	194.20	203.78	195.63	184.12	202.31	208.26	229.32	228.74	164.38	133.88	120.81	126.67	129.97	157.83	141.42	161.03
Ba	708.60	679.33	669.89	662.65	644.05	675.23	105.50	124.34	624.57	647.45	603.10	626.62	599.00	647.75	626.08	602.26
Th	21.14	20.48	25.47	41.64	19.31	17.38	28.28	29.77	21.28	20.84	17.02	19.09	19.47	20.47	18.32	21.22
U	5.25	5.44	6.40	9.38	6.53	4.40	5.10	5.51	2.96	3.50	2.50	3.58	4.03	3.54	3.35	3.22
K	45 753	47 070	48 574	48 562	49 501	47 667	47 083	47 789	42 500	42 543	44 496	43 761	42 223	43 340	42 573	41 857
Ta	1.46	1.43	1.50	1.75	1.54	1.51	1.82	1.60	0.94	0.99	0.83	0.95	1.11	1.12	1.14	1.08
Nb	17.77	18.01	18.38	19.28	16.99	19.43	20.00	17.54	8.78	9.05	8.29	9.36	11.05	11.32	11.14	10.35
La	25.71	26.55	36.97	37.24	29.42	39.63	47.01	35.51	34.49	37.60	27.42	33.68	36.47	33.47	36.31	37.09
Ce	74.88	76.38	95.70	97.52	81.53	97.22	112.96	86.04	89.23	95.50	75.22	88.51	91.40	88.78	90.50	92.96
Pb	20.47	19.81	18.88	22.01	18.90	18.08	23.27	17.15	18.82	20.51	15.12	25.20	33.12	13.75	19.74	18.94
Pr	8.08	8.03	9.51	9.62	8.39	9.73	11.13	8.16	8.91	9.34	7.75	9.00	9.16	8.92	9.01	9.23
Sr	175.89	164.14	160.21	152.10	148.88	160.32	36.54	29.03	251.85	254.05	177.10	294.16	317.09	257.25	258.51	243.22
P	277	273	268	250	233	263	92	101	895	812	802	817	900	805	800	783
Nd	28.61	29.30	32.54	32.90	28.94	33.24	37.27	26.91	31.46	31.66	28.59	30.72	31.40	30.97	30.93	31.59
Zr	251.50	255.97	252.04	245.36	198.18	253.10	144.28	138.26	227.53	222.50	221.74	218.13	230.16	233.34	234.94	223.83
Hf	6.56	6.95	7.76	7.30	6.40	6.44	5.39	4.77	5.86	5.30	5.32	4.95	5.72	6.09	6.08	6.03
Sm	5.82	5.91	6.17	6.47	5.49	6.17	7.59	5.44	5.78	5.94	5.46	5.59	5.89	5.97	6.01	6.13
Eu	1.04	1.08	1.05	1.08	1.07	1.14	0.44	0.44	1.21	1.24	1.10	1.26	1.18	1.20	1.30	1.18
Ti	2 242	2 192	2 108	2 061	1 839	2 095	1 032	1 040	3 789	3 507	3 580	3 587	3 598	3 575	3 530	3 507
Dy	4.61	4.45	4.83	5.13	4.59	4.99	6.36	4.01	4.34	4.71	4.22	4.33	4.71	4.35	4.42	4.55
Y	23.40	22.84	24.23	27.03	23.08	24.31	32.52	20.92	21.39	21.83	20.44	20.64	21.67	20.85	21.45	21.83
Ho	0.93	0.92	0.96	0.99	0.90	0.92	1.22	0.81	0.82	0.89	0.83	0.85	0.90	0.89	0.85	0.86
Yb	2.77	2.74	2.80	3.23	2.56	2.94	3.68	2.20	2.31	2.53	2.29	2.44	2.45	2.43	2.40	2.54
Lu	0.41	0.40	0.41	0.47	0.41	0.41	0.54	0.33	0.35	0.36	0.34	0.35	0.36	0.38	0.37	0.36
Gd	6.44	6.33	6.77	7.33	6.13	6.77	8.24	5.83	6.54	6.68	6.10	6.33	6.70	6.66	6.62	6.55
Tb	0.82	0.85	0.93	0.88	0.86	0.86	1.11	0.73	0.81	0.82	0.81	0.85	0.88	0.83	0.85	0.83
Er	2.55	2.69	2.95	3.12	2.70	2.75	3.68	2.34	2.49	2.47	2.32	2.47	2.54	2.45	2.48	2.50
Tm	0.42	0.40	0.42	0.46	0.39	0.45	0.56	0.36	0.39	0.39	0.35	0.35	0.40	0.38	0.39	0.37
Σ REE	163.10	166.02	202.02	206.45	173.38	207.19	241.79	179.12	189.13	200.13	162.81	186.74	194.43	187.68	192.44	196.73
(La/Yb) _N	6.65	6.95	9.46	8.26	8.24	9.67	9.15	11.56	10.70	10.65	8.58	9.88	10.68	9.87	10.87	10.49
δ Eu	0.52	0.54	0.49	0.48	0.56	0.54	0.17	0.24	0.60	0.60	0.58	0.64	0.57	0.58	0.63	0.56

特征,在 QAP 图解中,样品主体落入碱长花岗岩和花岗岩区域(图 6a);细粒二长花岗岩具有高硅($\text{SiO}_2 = 67.04\% \sim 68.17\%$, 平均 67.58%)、富碱($\text{ALK} = 8.62\% \sim 9.16\%$, 平均 8.94%)、高钾低钠($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 1.29 \sim 1.48$, 平均 1.37)、低钛($\text{TiO}_2 = 0.58\% \sim 0.63\%$, 平均 0.60%)等特征,在 QAP 图解中,样品全部落入花岗岩区域(图 6a)。两者 Al_2O_3 含量分别介于 $12.70\% \sim 12.37\%$ 和 $14.55\% \sim 14.99\%$ 之间,铝饱和指数(A/CNK)分别为 $0.95 \sim 1.00$ 和 $0.93 \sim$

0.99 ,属于准铝质花岗岩,与 $\text{A}/\text{NK}-\text{A}/\text{CNK}$ 图解(图 6b)判别结果一致;里特曼指数(σ)平均值分别为 3.00 和 3.25 ,均属于钙碱性岩石系列;在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解(图 6c)中均表现出钾玄岩系列岩石特征,指示岩浆源区富钾。俯冲带内钾玄岩系列的出现是大洋岩石圈俯冲结束、陆内会聚开始、陆内岩浆活动的岩石学标志(邓晋福等,1996)。达那斑状二长花岗岩体表现出钾玄岩的特征,与之前报道始新世岩体这一特征(韩飞等,2019)相吻合。

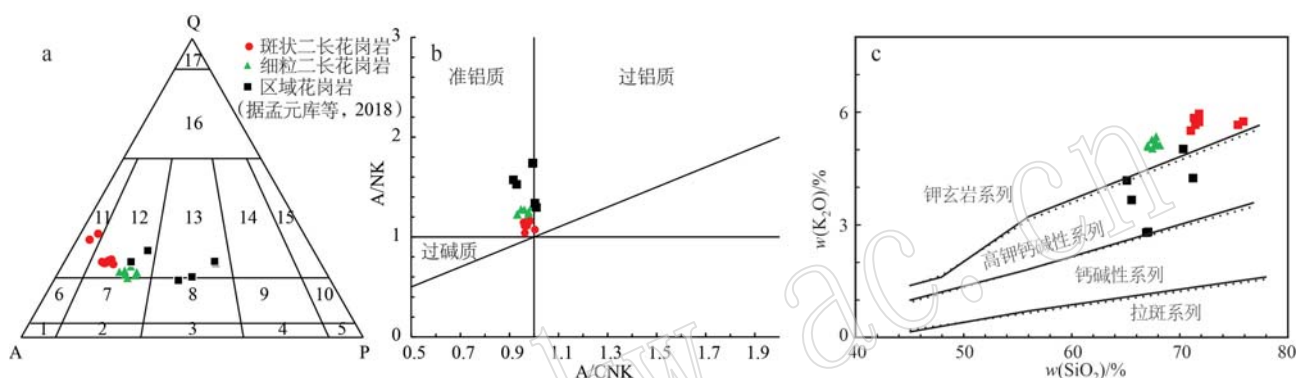


图 6 达那古火山机构中二长花岗岩的 QAP(a, Maitre, 1989)、 $\text{A}/\text{NK}-\text{A}/\text{CNK}$ (b, Molnar and Tappanier, 1975)和 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ (c, Peccerillo and Taylor, 1976)地球化学图解

Fig. 6 QAP(a, Maitre, 1989), $\text{A}/\text{NK}-\text{A}/\text{CNK}$ (b, Molnar and Tappanier, 1975) and $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ (c, Peccerillo and Taylor, 1976) geochemical diagrams of monzonitic granites from Dana ancient volcanic edifice

1—碱性长石正长岩; 2—正长岩; 3—二长岩; 4—二长闪长岩; 5—闪长岩; 6—碱长石英正长岩; 7—石英正长岩; 8—石英二长岩; 9—石英二长闪长岩; 10—石英闪长岩、石英辉长岩、石英斜长岩; 11—碱长花岗岩; 12—花岗岩; 13—花岗岩(二长花岗岩); 14—花岗闪长岩; 15—英云闪长岩、斜长花岗岩; 16—富石英花岗岩; 17—石英岩;

1—alkali syenite; 2—syenite; 3—monzonite; 4—monzodiorite; 5—diorite; 6—alkali feldspar-quartz syenite; 7—quartz syenite; 8—quartz monzonite; 9—quartz monzodiorite; 10—quartzdiorite, quartz gabbro, quartz —anorthosite; 11—alkali granite; 12—granite; 13—granite(monzonitic granite); 14—granodiorite; 15—tonalite, plagiogranite; 16—quartz-rich granite; 17—silicon quartzite

达那斑状二长花岗岩和细粒二长花岗岩球粒陨石标准化稀土元素配分曲线呈现相似的右倾配分型式(图 7a), ΣREE 分别为 $163.10 \times 10^{-6} \sim 241.79 \times 10^{-6}$ (平均值为 192.38×10^{-6}) 和 $162.81 \times 10^{-6} \sim 200.13 \times 10^{-6}$ (平均值为 188.76×10^{-6});轻、重稀土元素分异明显, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 分别为 $6.65 \sim 11.56$ (平均值为 8.74) 和 $8.58 \sim 10.87$ (平均值为 10.21),且轻稀土元素相对富集, LREE/HREE 分别为 $7.60 \sim 9.78$ (平均值为 8.63) 和 $8.43 \sim 9.61$ (平均值为 9.31);轻稀土元素分异明显, $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 分别为 $2.85 \sim 4.21$ (平均值为 3.64) 和 $3.24 \sim 4.08$ (平均值为 3.81),而重稀土元素分异相对较弱, $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 分别为 $1.85 \sim 2.19$ (平均值为 1.95) 和 $2.13 \sim 2.34$ (平均值为 2.23);达那斑状二长花岗岩样品显示有明显中等程

度负 Eu 异常($\delta \text{Eu} = 0.17 \sim 0.56$, 平均值为 0.44),细粒二长花岗岩样品显示有中等程度负 Eu 异常($\delta \text{Eu} = 0.56 \sim 0.64$, 平均值为 0.60),这与岩石富含钾长石以及斜长石为贫 Ca 的钠长石特征相一致。

在微量元素蛛网图(图 7b)中,可见大离子亲石元素(Rb 、 Th 、 U 等)和不相容元素具有相对富集、高场强元素(Nb 、 Ta 、 P 、 Ti 等)相对亏损的特点。

5 讨论

5.1 火山活动时限

学者们对林子宗群火山岩年代学研究程度较高,尤以林周、拉萨、尼木-加查、昂仁、南木林、谢通门、措勤和雄巴等地区为深入,积累了大量高精度

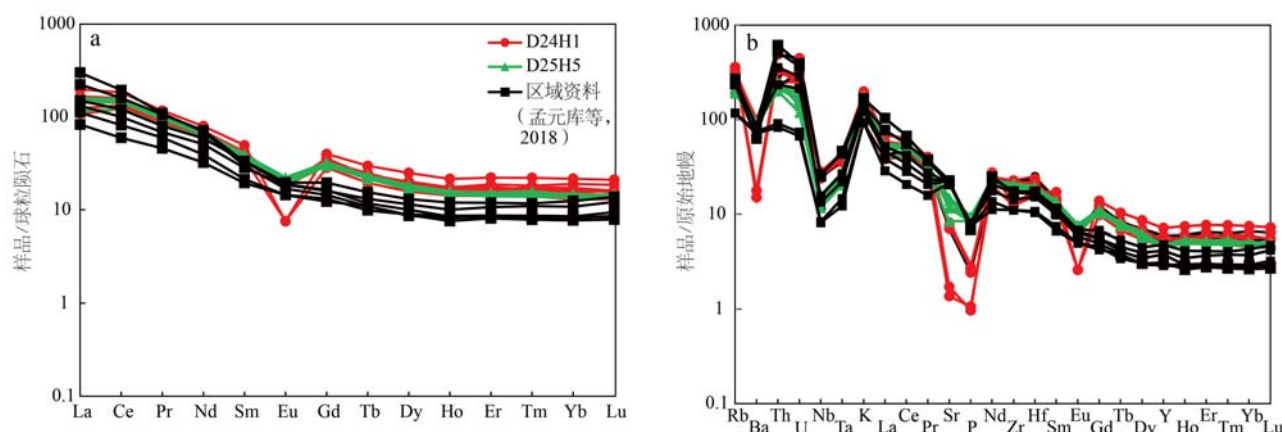


图7 二长花岗岩稀土元素球粒陨石标准化配分图(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b) (标准化数据据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns (a) and Primitive mantle-normalized multi-element diagrams (b) of monzonitic granite (chondrite data after Sun and McDonough, 1989)

U-Pb 同位素年龄数据。整个冈底斯岩浆岩带林子宗群火山岩年代跨度为 71~45 Ma, 而南木林盆地林子宗群火山岩年代跨度为 62.8~49.7 Ma, 其中林子宗群典中组火山岩年代跨度为 62.8~55 Ma, 而达那古火山机构周围典中组火山喷发时间在 63~55 Ma 之间; 林子宗群年波组火山岩年龄跨度在 52~50.2 Ma; 林子宗群帕那组与林周盆地比较而言缺失上段地层, 年龄为 49.7 ± 1 Ma (黄永高等, 2022)。林子宗群火山岩年代学格架较为清晰。李成志等 (2019) 通过研究南冈底斯带墨竹工卡地区错布拉果花岗岩, 认为印亚大陆主碰撞期可能在 61 Ma 前; 杨继忆等 (2019) 通过对北喜马拉雅地块浪卡子地区绒波杂二长花岗岩的研究, 表明成岩时代是 45 Ma, 认为这是一期印亚大陆碰撞的产物; 杨成业等 (2022) 对林周地区 I 型花岗岩研究, 指示印度-欧亚大陆碰撞发生在 50 Ma 之前。印亚大陆主碰撞期岩浆响应时代跨度达 15 Ma, 一定程度上说明了印亚大陆碰撞东早西晚的特征。

此次研究对象, 即稍晚期侵入达那古火山机构火山通道的斑状二长花岗岩, 其锆石阴极发光图像 (CL) 显示具有清晰的生长振荡环带和较高的 Th/U 值, 表现出岩浆锆石的典型特征, 其测年结果可以代表岩体形成时代。获得斑状二长花岗岩和细粒二长花岗岩 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄分别为 54.0 ± 1.4 Ma 和 55.0 ± 1.2 Ma, 两者在误差范围内一致, 均为早始新世。如前所述, 从火山机构周围岩性、岩相分布规律及火山构造特征分析, 达那斑状二长花岗岩体是

达那古火山喷发后岩浆沿火山通道侵入冷凝而成, 故此次火山活动在 55 Ma 之前已经结束。

5.2 成岩构造背景

研究花岗岩的成岩构造背景可以从花岗岩的类型判别上获得依据。花岗岩大体可分为 A 型、I 型和 S 型, 三者从矿物组合到化学成分上均具有一定差异 (Collins *et al.*, 1982; Whalen *et al.*, 1987; Chappell and White, 1992)。如前所述, 达那斑状二长花岗岩岩体矿物组合主要为石英、斜长石和钾长石, 与 A 型花岗岩钠 (铁) 闪石-铁橄榄石-霓石等矿物组合有较大区别; 地球化学成分上, 相对富集大离子亲石元素、轻稀土元素、不相容元素以及强烈亏损高场强元素的特征也有别于 A 型花岗岩富高场强元素组合 (Nb、Ta、Zr 等) 的特征; 富铝 (12.37%~14.25%)、富碱 (8.97%~9.67%)、高分异系数 (87.53~94.83) 的特征, 表明岩浆为高程度分异结晶作用的产物。因此, 达那斑状二长花岗岩体应为高程度结晶分异的 S 型花岗岩或者 I 型花岗岩。

在 $(\text{FeO}^T/\text{MgO})-(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})$ 图解中, 研究样品主体落入分异的花岗岩区域及其边界附近 (图 8a)。花岗岩中 P_2O_5 含量是判别岩石类型的一个重要指标, 达那斑状二长花岗岩 P_2O_5 含量极低, 为 0.02%~0.06%; 二长花岗岩 P_2O_5 含量亦较低, 为 0.18%~0.21%, 二者 P_2O_5 与 SiO_2 含量具有负相关的线性关系 (图 8b), 暗示达那岩体具有 I 型花岗岩特征 (Wu *et al.*, 2003; Li *et al.*, 2007; 王琦崧等, 2019)。I 型花岗岩岩浆结晶早期可能形成富含 Th

和 Y 的矿物,且 Th、Y 与 Rb 具有正相关关系 (Wu *et al.*, 2003; 巩鑫等, 2020)。达那斑状二长花岗岩体 Th、Y 含量分别为 $17.02 \times 10^{-6} \sim 41.64 \times 10^{-6}$ 和 $20.44 \times 10^{-6} \sim 32.52 \times 10^{-6}$, 且与 Rb 均呈现正相关趋

势(图 8c、8d)。此外,在矿物组成上,样品缺乏 S 型花岗岩特征的白云母、堇青石等过铝质矿物。综合上述特征,判断本次研究的达那斑状二长花岗岩体为早始新世侵入的 I 型花岗岩。

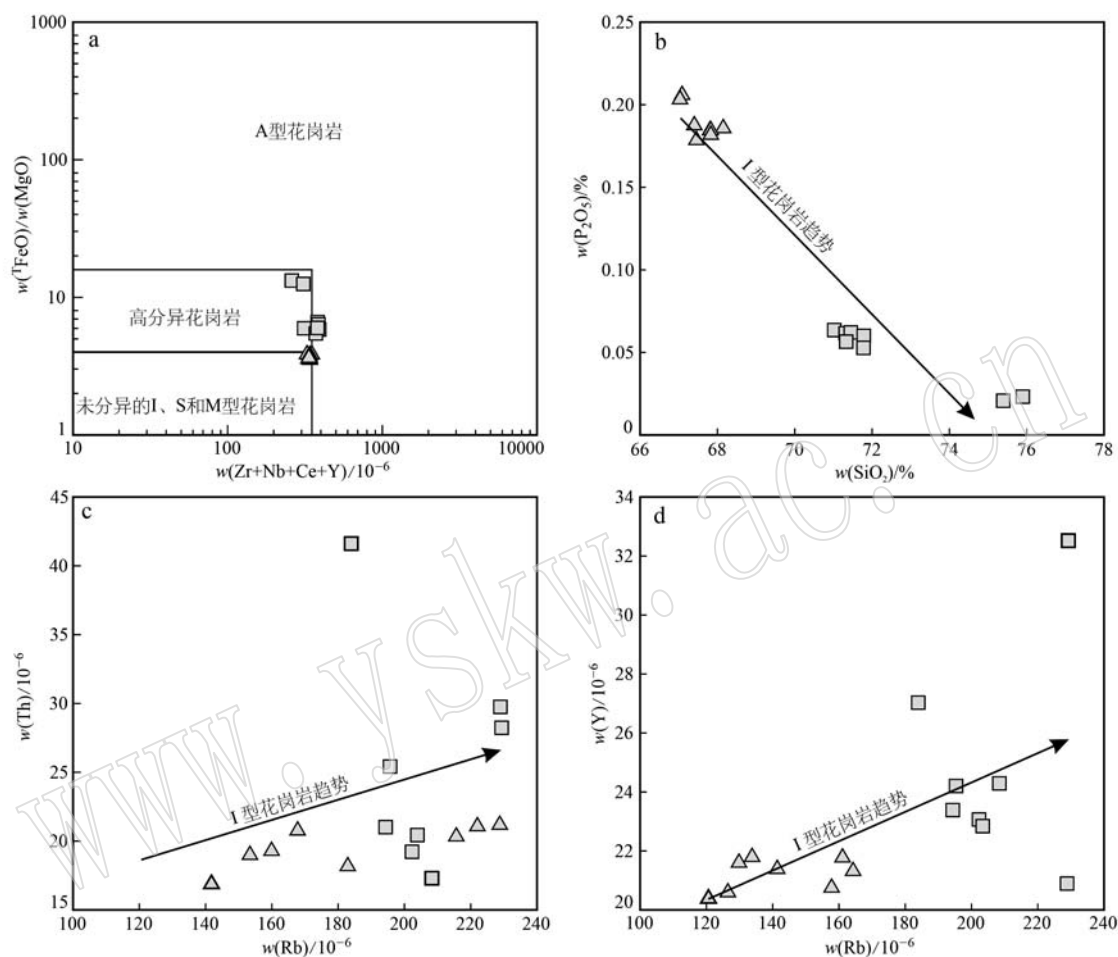


图 8 岩石类型判别图解(a 据 Whalen *et al.*, 1987; b~d 据 Li *et al.*, 2007)

Fig. 8 Discrimination diagram of the intrusion rock (a after Whalen *et al.*, 1987; b~d after Li *et al.*, 2007)

花岗岩类的形成和大地构造环境有密切的关系 (王涛等, 2017; 曾令森等, 2017)。在地球化学 Rb-(Y+Nb)、Ta-Yb 和 Rb-Hf-Ta 图中, 样品基本落在火山弧区域内 (图 9a~9c); 在 $\text{TFeO}/(\text{TFeO} + \text{MgO}) - \text{SiO}_2$ 图 (图 9d) 中, 样品落入岛弧花岗岩类 (IAG)、大陆弧花岗岩类 (CAG)、后造山花岗岩类 (POG) 和大陆碰撞花岗岩类 (CCG) 区域, 表明花岗岩形成于造山作用的构造环境中。如前所述, 样品的地球化学特征富钾、贫镁和钙碱性, 富集大离子亲石元素, 亏损高场强元素, 表明母岩浆可能发生了分离结晶作用, 具有壳源或者弧型岩浆岩的特征 (Rudnick and Gao, 2003; 刘军等, 2013; 巩鑫等, 2020);

轻、重稀土元素分馏明显、富集轻稀土元素而亏损重稀土元素、中等程度负 Eu 异常, 指示岩浆在部分熔融过程中, 源区有斜长石的残留或岩浆在结晶过程中存在斜长石的分离结晶作用 (孙超等, 2021), 同时表明具有陆缘弧火山岩的特征。

综上所述, 该期岩浆活动是火山活动的一个重要组成部分或者补充, 达那斑状二长花岗岩体形成于早始新世印度板块与拉萨地块俯冲、碰撞相关的活动大陆边缘弧构造背景下。

5.3 岩浆来源和岩石成因

本次获得的达那斑状二长花岗岩在 Nb/Th-Nb 图解 (图 10a) 中, 样品整体靠近大陆地壳区域却远

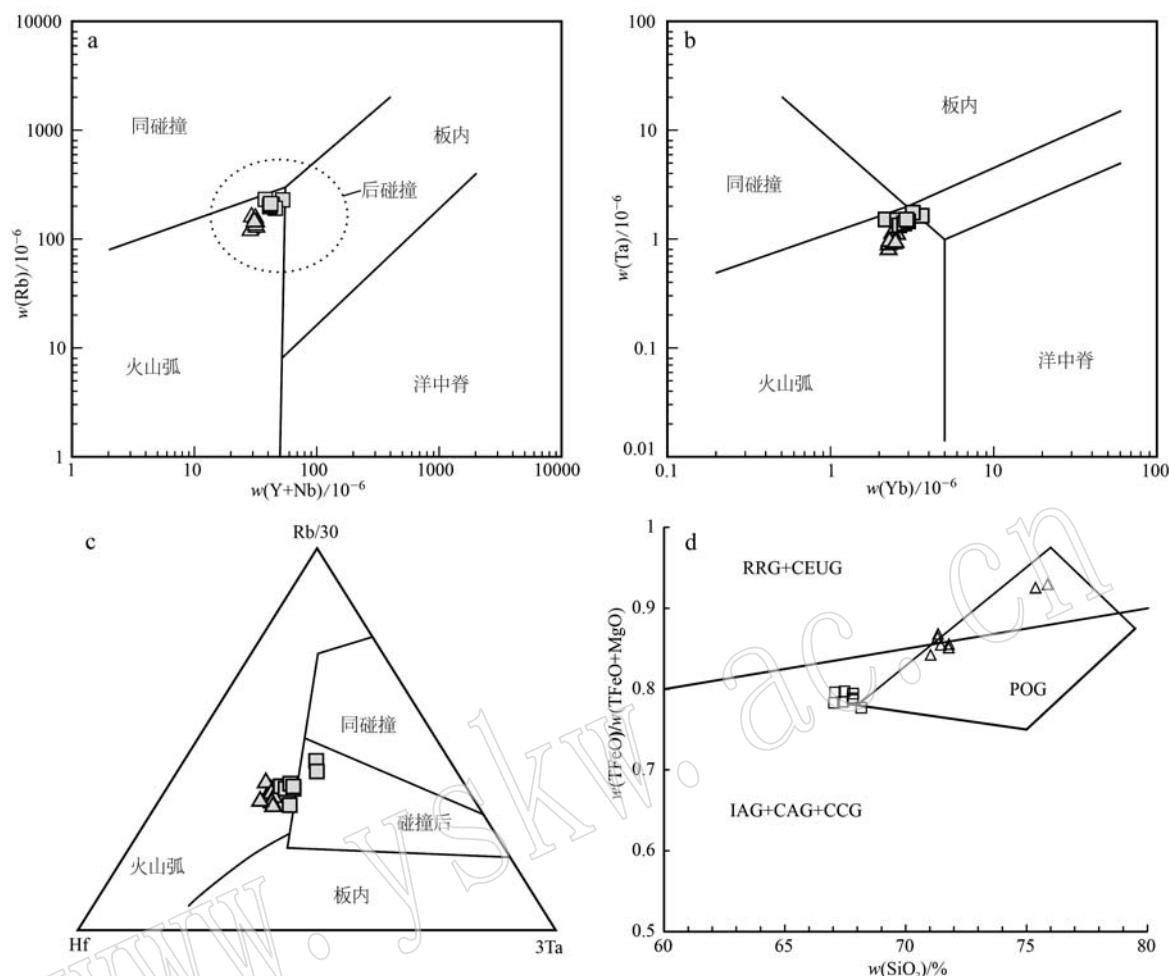


图9 二长花岗岩微量元素构造环境判别图(a, d据Pearce *et al.*, 1984; b据Pearce, 1996; c据Harris *et al.*, 1986)

Fig. 9 Tectonic discrimination diagrams for the monzonitic granite (a, d after Pearce *et al.*, 1984; b after Pearce, 1996; c after Harris *et al.*, 1986)

离 MORB+OIB 和原始地幔区域;在 $\text{Th/Y}-\text{Nb/Y}$ 图解(图 10b)中,几乎所有样品落在接近中下地壳平均组分的区域。岩石的 Nb/Ta 值($9.10 \sim 12.85$)低于幔源岩石(36.27 ± 2)而接近陆壳岩石(≈ 11)(Taylor and McLennan, 1985); La/Nb 值($1.45 \sim 4.15$)显示出壳源的特点(DePaolo and Daley, 2000)。 $\text{Mg}^\#$ 是判别岩浆来源的一个重要指标,如 $\text{Mg}^\# < 50$ 和低 MgO 含量指示岩浆来源于下地壳,而 $\text{Mg}^\# > 50$ 和高 MgO 含量表明岩浆来源于俯冲板片的部分熔融或者壳幔混合作用(Rapp *et al.*, 1999; Xu *et al.*, 2002; Xiong *et al.*, 2003; 王琦崧等, 2019)。达那斑状二长花岗岩和细粒二长花岗岩 $\text{Mg}^\#$ 介于 $7 \sim 22$ 之间, MgO 含量介于 $0.14\% \sim 1.26\%$ 之间,较低的数值暗示岩浆来源可能为下地壳。

I 型花岗岩的形成方式主要有如下几种:① 幔源岩浆充分、完全的分离结晶作用;② 由幔源岩浆

参与壳源岩浆的混合成岩作用;③ 在各种外因的驱动下,地壳物质发生部分熔融之后的分离结晶作用(Wyborn *et al.*, 1987; Turpin *et al.*, 1990; Castro *et al.*, 1991; Barbarin, 1996; Chappell *et al.*, 2012)。如前所述,达那斑状二长花岗岩来源于中下地壳的高程度分异结晶的 I 型花岗岩。

综合地质和地球化学特征,本文推演达那古火山机构的形成过程如下:54 Ma 之前,北向俯冲的新特提斯洋壳诱发达那火山喷发,形成林子宗群典中组近火山口相、爆发相、喷溢相、潜火山岩相、空落相等火山岩相;54 Ma 左右,达那火山喷发活动基本结束,洋-陆俯冲碰撞基本完成,进入陆-陆拼贴、碰撞阶段。此时,持续俯冲的新特提斯洋壳折返或者断离,并发生脱水作用,导致上覆的地幔(楔)发生部分熔融(Wen *et al.*, 2008; Ji *et al.*, 2009),熔融的岩浆热烘烤作用导致中下地壳发生熔融,在上升过程

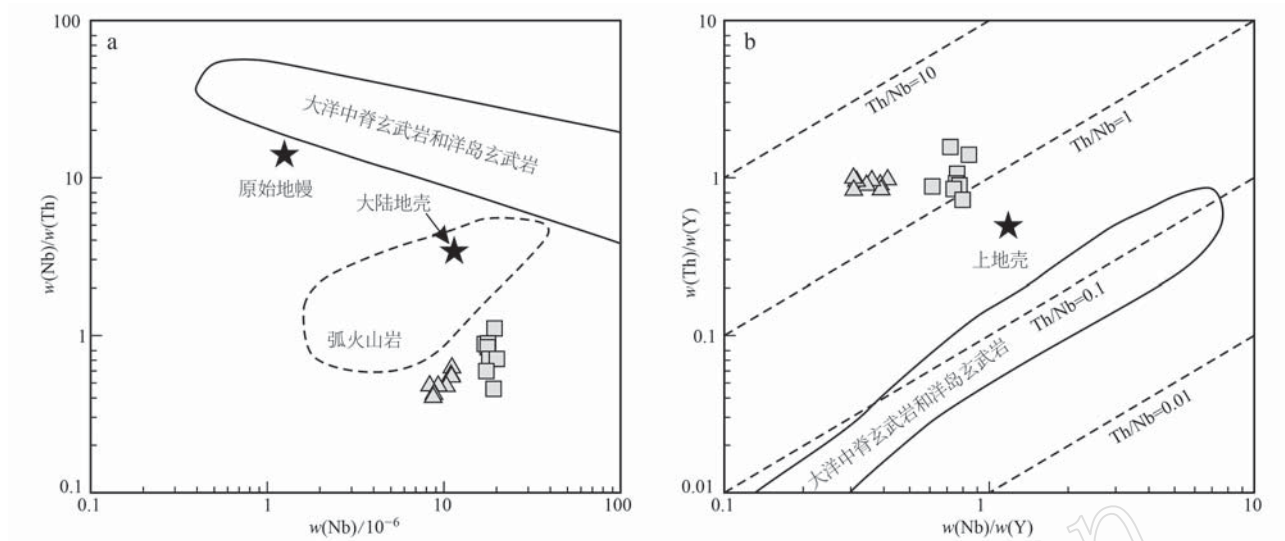


图 10 二长花岗岩 Nb/Th-Nb 和 Th/Y-Nb/Y 判别图解 (Hofmann *et al.*, 1988; Schmidberger and Hegner, 1999; Boztuğ *et al.*, 2007)

Fig. 10 Nb/Th-Nb and Th/Y-Nb/Y diagrams the monzonitic granite (Hofmann *et al.*, 1988; Schmidberger and Hegner, 1999; Boztuğ *et al.*, 2007)

中发生分离结晶,长英质岩浆沿达那火山通道侵位形成斑状二长花岗岩体(图 11)。



图 11 南冈底斯中段达那古火山机构形成模式(据潘桂棠等, 2006; 许志琴等, 2011; 侯增谦等, 2012; 韩飞等, 2019 修改)

Fig. 11 The model of Dana ancient volcanic edifice in the South Gangdese belt (modified from Pan Guitang *et al.*, 2006; Xu Zhiqin *et al.*, 2011; Hou Zengqian *et al.*, 2012; Han Fei *et al.*, 2019)

6 结论

(1) 发现并识别出达那古火山机构发育火山通道相→爆发相→溢流相→喷溢相→潜火山岩相→空落相。

(2) 沿达那古火山机构火山通道侵入的斑状二

长花岗岩形成于 54 Ma, 晚于火山喷发时间, 具有大陆边缘弧型花岗岩的地球化学特征。

(3) 达那斑状二长花岗岩为壳源 I 型花岗岩, 形成于新特提斯洋俯冲结束后的印度-欧亚大陆拼贴、碰撞开始阶段。在部分熔融的地幔(楔)岩浆热烘烤作用下, 中下地壳发生熔融, 岩浆上升并发生分离结晶作用, 最后沿火山通道侵位形成达那斑状二长花岗岩体。

致谢 感谢中国地质调查局成都地质调查中心付建刚副研究员对本文的指导, 感谢中国科学院贵阳地球化学研究所戴智慧老师在实验测试中的指导, 感谢审阅文稿老师提出的宝贵意见, 在此一并致以真挚的感谢。

References

- Barbarin B. 1996. Genesis of the two main types of peraluminous granitoids[J]. *Geology*, 24(4): 295.
- Boztuğ D, Harlavan Y, Arehart G B, *et al.* 2007. K-Ar age, whole-rock and isotope geochemistry of A-type granitoids in the Divrigi-Sivas Region, eastern-central Anatolia, Turkey[J]. *Lithos*, 97(1~2): 193~218.
- Castro A, Moreno-Ventas I and de la Rosa J D. 1991. H-type (hybrid)

- granitoids: A proposed revision of the granite-type classification and nomenclature[J]. *Earth-Science Reviews*, 31(3~4): 237~253.
- Chappell B W, Bryant C J and Wyborn D. 2012. Peraluminous I-type granites[J]. *Lithos*, 153: 142~153.
- Chappell B W and White A J R. 1992. I- and S-type granites in the Lachlan Fold Belt[J]. *Special Paper of the Geological Society of America*, 272: 1~26.
- Chappell B W and White A J R. 2001. Two contrasting granite types: 25 years later[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 48(4): 489~499.
- Chen Xiaolin and Huang Xiangzhi. 2010. Volcanic facies and volcanic edifice in Paleogene period at xiongba-delai district, Tibet[J]. *Resources Environment & Engineering*, 24(6): 653~658 (in Chinese with English abstract).
- Collins W J, Beams S D, White A J R, *et al.* 1982. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 80(2): 189~200.
- Corfu F, Hanchar J M, Hoskin P W O, *et al.* 2003. Atlas of zircon textures[C]//Hanchar J M and Hoskin P W O. *Zircon Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53: 469~499.
- DePaolo D J and Daley E E. 2000. Neodymium isotopes in basalts of the southwest basin and range and lithospheric thinning during continental extension[J]. *Chemical Geology*, 169(1~2): 157~185.
- Deng Jinfu, Zhao Hailing, Mo Xuanxue, *et al.* 1996. The Root-Plume Tectonics of China Continental: Key to the Continental Dynamics [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~110 (in Chinese with English abstract).
- Gong Xin, Zhao Yuanyi, Shui Xinfang, *et al.* 2020. Zircon U-Pb chronology, Hf isotope and geochemistry studies of the Early Cretaceous rock mass in the Hulalin of Upper Heilongjiang Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(2): 553~572 (in Chinese with English abstract).
- Guo Yingshuai. 2019. Geochemical Characteristics of Volcanic Rocks of Linzizong Group in Xungba Area, Tibet[D]. Chengdu University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Han Fei, Huang Yonggao, Li Yingxu, *et al.* 2019. The identification of the Eocene magmatism and tectonic significance in the middle Gangdise magmatic belt, Namulin area, Tibet[J]. *Geological Bulletin of China*, 38(9): 1 403~1 416 (in Chinese with English abstract).
- Harris N B W, Pearce J A and Tindle A G. 1986. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism[J]. *Geological Society of London Special Publications*, 19(1): 67~81.
- Hofmann A W. 1988. Chemical differentiation of the Earth: The relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 90(3): 297~314.
- Hou Zengqian, Zheng Yuanchuan, Yang Zhiming, *et al.* 2012. Metallogenesis of continental collision setting: Part I. Gangdese Cenozoic porphyry Cu-Mo systems in Tibet[J]. *Mineral Deposits*, 31(4): 647~670 (in Chinese with English abstract).
- Huang Yingcong, Yang Deming, Zheng Changqing, *et al.* 2005. The geochemical characteristics of the pana volcanic rocks of the linzizong group in the Zhaxue area, Linzhou County, Tibet and its geological implication[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 35(5): 576~580 (in Chinese with English abstract).
- Huang Yonggao, Han Fei, Kang Zhiqiang, *et al.* 2022. Geochronology and geochemistry of the Linzizong volcanic succession, Namling Basin, Tibet[J/OL]. *Earth Science*. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.p.20220607.1507.020.html>.
- Huo Jiwei, Huang Dengpeng, Li Shengbao, *et al.* 2019. Geochemical, chronological characteristics and geological significance of the volcanic rocks of the Dianzhong Formation in the eastern Dajiacuo area, Tibet [J]. *Mineral Exploration*, 10(6): 1 285~1 295 (in Chinese with English abstract).
- Ji W Q, Wu F Y, Chung S L, *et al.* 2009. Zircon U-Pb geochronology and Hf isotopic constraints on petrogenesis of the Gangdese batholith, southern Tibet[J]. *Chemical Geology*, 262(3~4): 229~245.
- Jia Jianchen, Wen Changshun, Wang Genhou, *et al.* 2005. Geochemical characteristics and geodynamic significance of the Linzizong Group volcanic rocks in the Gangdise area[J]. *Chinese Geology*, 32(3): 396~404 (in Chinese with English abstract).
- Jia Yuyang. 2020. Geological Characteristics and Tectonic Significance of Volcanic Rocks of Linzizong Group in Xietongmen Area, Tibet[D]. Chengdu University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Kapp P, Murphy M A, Yin A, *et al.* 2003. Mesozoic and Cenozoic tectonic evolution of the Shiquanhe area of western Tibet[J]. *Tectonics*, 22(4): 1~26.
- Li Chengzhi, Yang Wenguang, Zhu Lidong, *et al.* 2019. Zircon U-Pb age, geochemical characteristics and diagenetic dynamic background of the cuobulaguo granites in the southern margin of Lhasa terrane [J]. *Mineralogy and Petrology*, 39(2): 45~57 (in Chinese with English abstract).
- Li X H, Li W X and Li Z X. 2007. On the genetic classification and tectonic implications of the Early Yanshanian granitoids in the Nanling Range, South China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 52(14): 1 873~1 885.

- Liu Hong, Zhang Linkui, Huang Hanxiao, *et al.* 2019. Petrogenesis of Late Triassic luerma monzodiorite in western gangdise, Tibet, China [J]. *Earth Science*, 44(7): 2 339~2 356 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jun, Mao Jingwen, Wu Guang, *et al.* 2013. Zircon U-Pb dating for the magmatic rocks in the chalukou porphyry Mo deposit in the northern great Xing'an range, China, and its geological significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 87(2): 208~226 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y S, Hu Z C, Zong K Q, *et al.* 2010. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS[J]. *Chinese Science Bulletin*, 55(15): 1 535~1 546.
- Ludwig K R. 2003. ISOPLLOT 3.0: A Geochronology Toolkit for Microsoft Excel Berkeley [C]//Berkeley Geochronology Center Special Publication, 1~53.
- Maitre R W L. 1989. A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms[M]. Blackwell Scientific Publications.
- Meng Yuanku, Xu Zhiqin, Gao Cunshan, *et al.* 2018. The identification of the Eocene magmatism and tectonic significance in the middle Gangdese magmatic belt, southern Tibet [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(3): 513~546(in Chinese with English abstract).
- 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 X X, Hou Z Q, Niu Y L, *et al.* 2007. Mantle contributions to crustal thickening during continental collision: Evidence from Cenozoic igneous rocks in southern Tibet[J]. *Lithos*, 96(1~2): 225~242.
- 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, Yu Xuehui, *et al.* 2009a. Cenozoic Collisional-Postcollisional Igneous Rocks in the Tibetan Plateau[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, Zhu Dicheng, *et al.* 2009b. On the lithosphere of indo-Asia collision zone in southern Tibet: Petrological and geochemical constraints[J]. *Earth Science*, 34(1): 17~27 (in Chinese with English abstract).
- Molnar P and Tapponnier P. 1975. Cenozoic Tectonics of Asia: Effects of a Continental Collision: Features of recent continental tectonics in Asia can be interpreted as results of the India-Eurasia collision[J]. *Science*, 189(4 201): 419~426.
- Pan Guitang, Mo Xuanxue, Hou Zengqian, *et al.* 2006. Spatial-temporal framework of the Gangdese Orogenic Belt and its evolution[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3): 521~533 (in Chinese with English abstract).
- Pearce J. 1996. Sources and settings of granitic rocks[J]. *Episodes*, 19(4): 120~125.
- 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.
- Rapp R P, Shimizu N, Norman M D, *et al.* 1999. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: Experimental constraints at 3.8 GPa[J]. *Chemical Geology*, 160(4): 335~356.
- Rudnick R L and Gao S. 2003. Composition of the continental crust [C]//Treatise on Geochemistry. Amsterdam; Elsevier, 1~64.
- Schmidberger S S and Hegner E. 1999. Geochemistry and isotope systematics of calc-alkaline volcanic rocks from the Saar-Nahe Basin (SW Germany)-Implications for Late-Variscan orogenic development[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 135(4): 373~385.
- Sun Chao, Gou Jun, Sun Deyou, *et al.* 2021. Petrogenesis and tectonic implication of Late Paleozoic I-A type granites in the northwest Heilongjiang Province[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 51(4): 1 082~1 097 (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, London, Special Publications*, 42(1): 313~345.
- Tang Pan, Tang Juxing, Zheng Wenbao, *et al.* 2018. Zircon U-Pb ages, Hf isotopes and geochemistry of the volcanic rocks in Dianzhong Formation from Xingaguo area, Tibet[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 37(1): 47~60 (in Chinese with English abstract).
- Taylor S R and McLennan S M. 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution; An Examination of the Geochemical Record Preserved in Sedimentary Rocks[M]. Oxford, London; Blackwell Scientific Publication, 1~301.
- Turpin L, Cuney M, Friedrich M, *et al.* 1990. Meta-igneous origin of Hercynian peraluminous granites in N. W. French Massif Central: Implications for crustal history reconstructions[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 104(2): 163~172.
- Wang Qisong, Zhang Jing, Wang Su, *et al.* 2019. Petrogenesis and tec-

- tonic setting of the quartz porphyry in Mazhuangshan gold deposit, Eastern Tianshan Orogen: Evidence from geochemistry, zircon U-Pb geochronology and Sr-Nd-Hf isotopes [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(5): 1 503~1 518 (in Chinese with English abstract).
- Wang Tao, Wang Xiaoxia, Guo Lei, *et al.* 2017. Granitoid and tectonics [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(5): 1 459~1 478 (in Chinese with English abstract).
- Wei Naishao, Kang Zhiqiang, Yang Feng, *et al.* 2019. Geochronology, geochemical characteristics, and genesis of the Dianzhong Formation volcanic rocks in Changguo area, southeastern Lhasa Block, Tibet [J]. *Geochimica*, 48(1): 30~42 (in Chinese with English abstract).
- Wen D R, Liu D Y, 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]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407~419.
- Wu F Y, Jahn B M, Wilde S A, *et al.* 2003. Highly fractionated I-type granites in NE China (I): Geochronology and petrogenesis [J]. *Lithos*, 66(3~4): 241~273.
- Wu Yuanbao and Zheng Yongfei. 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(15): 1 589~1 604 (in Chinese with English abstract).
- Wyborn D, Turner B S and Chappell B W. 1987. The Boggy Plain Supersuite: A distinctive belt of I-type igneous rocks of potential economic significance in the Lachlan Fold Belt[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 34(1): 21~43.
- Xiong X L, Li X H, Xu J F, *et al.* 2003. Extremely high-Na adakite-like magmas derived from alkali-rich basaltic underplate: The Late Cretaceous Zhantang andesites in the Huichang Basin, SE China[J]. *Geochemical Journal*, 37(2): 233~252.
- Xu J F, Shinjo R, Defant M J, *et al.* 2002. Origin of Mesozoic adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of East China: Partial melting of delaminated lower continental crust? [J]. *Geology*, 30(12): 1 111.
- 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 Chengye, Feng Jiajia, Li Yubin, *et al.* 2022. Eocene Tuolong I-type granite in Linzhou area, Tibet: Constraints on the timing of the collision between India and Eurasian plates[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 41(6): 1 080~1 096 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jiye, Fei Guangchun, Ding Feng, *et al.* 2019. The geochemical characteristics and geological significance of the monzogranite in Rongboza, Angarze, Tibet[J]. *J. Mineral. Petrol.*, 39(4): 69~77 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Lingsen and Gao Li'e. 2017. Cenozoic crustal anatexis and the leucogranites in the Himalayan collisional orogenic belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(5): 1 420~1 444 (in Chinese with English abstract).
- Zhu D C, Zhao Z D, Niu Y L, *et al.* 2013. The origin and pre-Cenozoic evolution of the Tibetan Plateau[J]. *Gondwana Research*, 23(4): 1 429~1 454.

附中文参考文献

- 陈晓林, 黄祥芝. 2010. 西藏雄巴-德来地区古近纪火山岩相及火山机构[J]. *资源环境与工程*, 24(6): 653~658.
- 邓晋福, 赵海玲, 莫宣学, 等. 1996. 大陆根柱构造-大陆动力学的钥匙[M]. 北京: 地质出版社.
- 巩 鑫, 赵元艺, 水新芳, 等. 2020. 上黑龙江盆地虎拉林早白垩世岩体锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素及地球化学特征研究[J]. *地质学报*, 94(2): 553~572.
- 郭英帅. 2020. 西藏雄巴地区林子宗群火山岩岩石地球化学特征[D]. 成都: 成都理工大学.
- 韩 飞, 黄永高, 李应栩, 等. 2019. 西藏冈底斯中段南木林地区始新世岩浆作用的厘定及其大地构造意义[J]. *地质通报*, 38(9): 1 403~1 416.
- 黄映聪, 杨德明, 郑常青, 等. 2005. 西藏林周县扎雪地区林子宗群帕那组火山岩的地球化学特征及其地质意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 35(5): 576~580.
- 黄永高, 韩 飞, 康志强, 等. 2022. 西藏南木林盆地林子宗群火山岩年代学和地球化学特征[J/OL]. *地球科学*: 1~25. (2022-06-09). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.p.20220607.1507.020.html>.
- 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.
- 火久伟, 黄登鹏, 李生宝, 等. 2019. 西藏打加错东地区典中组火山岩地球化学特征、年代学特征及地质意义[J]. *矿产勘查*, 10(6): 1 285~1 295.
- 贾建称, 温长顺, 王根厚, 等. 2005. 冈底斯地区林子宗群火山岩岩石地球化学特征及地球动力学意义[J]. *中国地质*, 32(3): 396

- ~404.
- 贾雨阳. 2021. 西藏谢通门地区林子宗群火山岩地质特征及其构造意义[D]. 成都: 成都理工大学.
- 李成志, 杨文光, 朱利东, 等. 2019. 拉萨地体南缘错布拉果花岗岩体锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及成岩动力学背景[J]. 矿物岩石, 39(2): 45~57.
- 李关清. 1990. 拉萨幅 H-46-20 1:20 万区域地质调查报告[R]. 西藏地矿局区域地质调查大队.
- 刘洪, 张林奎, 黄瀚霄, 等. 2019. 西藏冈底斯西段鲁尔玛晚三叠世二长闪长岩的成因[J]. 地球科学, 44(7): 2 339~2 356.
- 刘军, 毛景文, 武广, 等. 2013. 大兴安岭北部岔路口斑岩钼矿床岩浆岩锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质学报, 87(2): 208~226.
- 孟元库, 许志琴, 高存山, 等. 2018. 藏南冈底斯带中段始新世岩浆作用的厘定及其大地构造意义[J]. 岩石学报, 34(3): 513~546.
- 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, 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, 喻学惠, 等. 2009a. 青藏高原新生代碰撞-后碰撞火成岩[D]. 北京: 地质出版社.
- 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, 34(1): 17~27.
- 潘桂棠, 莫宣学, 侯增谦, 等. 2006. 冈底斯造山带的时空结构及演化[J]. 岩石学报, 22(3): 521~533.
- 孙超, 苟军, 孙德有, 等. 2021. 黑龙江省西北部晚古生代 I-A 型花岗岩的成因及构造意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 51(4): 1 082~1 097.
- 唐攀, 唐菊兴, 郑文宝, 等. 2018. 西藏新嘎果地区典中组火山岩年代学、Hf 同位素及地球化学特征[J]. 岩石矿物学杂志, 37(1): 47~60.
- 王琦崧, 张静, 王肃, 等. 2019. 东天山马庄山金矿区赋矿石英斑岩的岩石成因和构造背景: 元素地球化学、U-Pb 年代学和 Sr-Nd-Hf 同位素约束[J]. 岩石学报, 35(5): 1 503~1 518.
- 王涛, 王晓霞, 郭磊, 等. 2017. 花岗岩与大地构造[J]. 岩石学报, 33(5): 1 459~1 478.
- 韦乃韶, 康志强, 杨锋, 等. 2019. 西藏拉萨地块东部南缘昌果地区典中组火山岩的年代学、地球化学及成因[J]. 地球化学, 48(1): 30~42.
- 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.
- 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.
- 杨成业, 冯佳佳, 李玉彬, 等. 2022. 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[J]. 岩石矿物学杂志, 41(6): 1 080~1 096.
- 杨继忆, 费光春, 丁枫, 等. 2019. 西藏浪卡子县绒波杂二长花岗岩地球化学特征、锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. 矿物岩石, 39(4): 69~77.
- 曾令森, 高利娥. 2017. 喜马拉雅碰撞造山带新生代地壳深熔作用与淡色花岗岩[J]. 岩石学报, 33(5): 1 420~1 444.