

西藏中拉萨地块门巴二长花岗岩年代学、岩石地球化学特征及地质意义

解鸿儒, 郎兴海, 邓煜霖, 何青, 李宸, 王兆帅, 吴伟哲, 王涌滔

(成都理工大学 地球与行星科学学院, 四川 成都 610059)

摘要: 在西藏中拉萨地块中-西部发育着一系列早白垩世 A 型花岗岩, 但目前在东段尚未发现相关的 A 型花岗岩, 制约了对中拉萨地块深部动力学的认识。本文基于详实的野外地质调查, 对门巴地区的二长花岗岩开展了岩相学、锆石 U-Pb 年代学、锆石 Hf 同位素地球化学和全岩地球化学研究。通过 LA-ICP-MS 定年测得的该二长花岗岩的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 120.9 ± 0.8 Ma, 表明门巴二长花岗岩形成于早白垩世。门巴二长花岗岩具有较高含量的 SiO_2 (69.69%~75.81%, 平均 73.84%), 较高的总碱 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) 含量 (8.22%~9.34%, 平均 8.92%), 中等含量的 Al_2O_3 (12.77%~15.60%, 平均 13.74%), 较低含量的 MgO (0.01%~0.12%, 平均 0.05%), A/CNK 的值为 1.08~1.22, A/NK 的值为 1.12~1.27, 表明门巴二长花岗岩为过铝质的高钾钙碱性-钾玄岩系列岩石。门巴二长花岗岩相对富集 Zr、Hf、Ce、Y 等微量元素, 相对亏损 Ba、Ti、Sr、P 等微量元素, 强烈的负 Eu 异常 ($\delta\text{Eu} = 0.04 \sim 0.11$, 平均 0.07), 具有较高的 10 000 Ga/Al 值 (1.99~4.17, 平均 3.06)、 FeO^T/MgO 值 (18.45~69.96, 平均 47.05)、Y/Nb 值 (1.07~2.42, 平均 1.77)、Rb/Nb 值 (6.70~12.16, 平均 9.83) 以及向右缓倾的“V”型稀土元素配分曲线, 表明门巴二长花岗岩为形成于后碰撞伸展环境中的 A2 型花岗岩。另外, 由负到正的 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值 ($-2.7 \sim +2.6$)、相对古老的锆石 Hf 地壳模式年龄 ($t_{\text{DM2}} = 1\,352.8 \sim 1\,016.8$ Ma) 以及与地壳接近的 Nb/Ta 值, 指示门巴二长花岗岩起源于古老下地壳并混有少量地幔物质。结合前人研究成果, 本文认为门巴二长花岗岩形成于早白垩世拉萨地块和羌塘地块的碰撞造山背景, 其成因为俯冲板片发生断离导致软流圈物质上涌并诱发了地壳部分熔融, 起源于地壳部分熔融并有少量地幔物质加入的岩浆, 经历了以钾长石为主的分离结晶作用。

关键词: 西藏; 中拉萨地块; 门巴地区; A 型花岗岩; 后碰撞

中图分类号: P588.12⁺1; P59

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2024)06-1553-25

Geochronology, geochemistry characteristics and geological significance of Menba monzonitic granite, central Lhasa subterrane, Xizang

XIE Hong-ru, LANG Xing-hai, DENG Yu-lin, HE Qing, LI Chen, WANG Zhao-shuai, WU Wei-zhe and WANG Yong-tao

(College of Earth and Planetary Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: A series of Early Cretaceous A-type granites are developed in the central-western part of the Central Lhasa subterrane in Xizang, but no related A-type granites have been found in the eastern section, which constrains the understanding of the deep dynamics of the central Lhasa subterrane. In this paper, petrographic, zircon U-Pb chronology, zircon Hf isotope geochemistry and whole-rock geochemistry studies were carried out on the monzonitic granites

收稿日期: 2023-10-08; 接受日期: 2024-07-01; 编辑: 雷敏

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41972084, 42230813); 国家重点研发计划 (2022YFC2905000); 四川省科技计划项目 (2020JDJQ0042); 成都理工大学珠峰科学研究计划 (2020ZF11407)

作者简介: 解鸿儒 (1999-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 岩石学, E-mail: 1174708692@qq.com; 通讯作者: 郎兴海 (1982-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向: 矿床学、矿产普查与勘探, E-mail: langxinghai@126.com。

网络首发时间: 2024-07-16; 网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1966.P.20240712.1314.002.html>

in the Menba area based on detailed field geological investigations. The zircon $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ weighted average age of this monzonitic granite measured by LA-ICP-MS dating is 120.9 ± 0.8 Ma, indicating that the Menba monzonitic granite was formed in the Early Cretaceous. The Menba monzonitic granite has a high content of SiO_2 (69.69% ~ 75.81%, average 73.84%), a high content of total alkali ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) (8.22% ~ 9.34%, average 8.92%), a medium content of Al_2O_3 (12.77% ~ 15.60%, average 13.74%), and a low content of MgO (0.01% ~ 0.12%, average 0.05%), values of 1.08 ~ 1.22 for A/CNK and 1.12 ~ 1.27 for A/NK, suggesting that the Menba monzonitic granite is a peraluminous, high-K calc-alkaline-potassium basaltic series rock. The Menba monzonitic granite is relatively enriched in trace elements such as Zr, Hf, Ce, and Y, and relatively deficient in trace elements such as Ba, Ti, Sr, and P. It has strong negative Eu anomalies ($\delta\text{Eu} = 0.04 \sim 0.11$, average 0.07), high 10 000 Ga/Al values (1.99 ~ 4.18, average 3.06), FeO^T/MgO values (18.45 ~ 69.96, average 47.05), Y/Nb (1.07 ~ 2.42, average 1.77), Rb/Nb (6.70 ~ 12.16, average 9.83), and a rightward gently dipping “V” rare earth element distribution curve, indicating that the Menba monzonitic granite is an A2-type granite produced in a post-collisional and extensional environment. In addition, the negative to positive $\varepsilon\text{Hf}(t)$ values ($-2.7 \sim +2.6$), relatively old zircon Hf crustal model ages ($t_{\text{DM2}} = 1\,352.8 \sim 1\,016.8$ Ma), and Nb/Ta values close to those of the crust indicate that the Menba monzonitic granite originated from the ancient lower crust with a small amount of mantle material. Combining the results of previous research, this paper suggests that the Menba monzonitic granite was formed in the collisional orogenic background of the Early Cretaceous Lhasa subterranean and Qiangtang subterranean, and that its genesis was due to the upwelling of soft-fluidic material caused by the breakup of subducting plates, which induced partial crustal melting, and that it originated from magma that was partially melted by crustal melting with a small amount of mantle material, and underwent the segregation and crystallisation of predominantly K-feldspars.

Key words: Xizang; Central Lhasa subterranean; Menba area; A-type granite; post-collision

Fund support: National Natural Science Foundation of China (41972084, 42230813); National Key R & D Program of China (2022YFC2905000); Sichuan Science and Technology Program (2020JDJQ0042); Everest Scientific Research Program of Chengdu University of Technology (2020ZF11407)

青藏高原位于我国西南部,是世界上海拔最高、面积最大的高原,面积约 $260 \times 10^4 \text{ km}^2$,其总面积约占全球大陆、大陆架和大陆坡总面积的 1% (图 1a; 潘桂棠等, 2022),同时青藏高原也是世界上重要的碰撞造山带 (Pan *et al.*, 2012; Yakovlev and Clark, 2014),是研究地球深部动力学过程的有利场所。位于青藏高原南部的拉萨地块作为东冈瓦纳大陆的重要组成部分,南部以印度河-雅鲁藏布江缝合带 (IYZSZ) 为界,北部以班公湖-怒江缝合带 (BNSZ) 为界,是一条近东西向的巨型构造岩浆带,东西延伸大约 2 500 km,南北跨度约 150 ~ 300 km (图 1a; Yin and Harrison, 2000; 潘桂棠等, 2006; Zhu *et al.*, 2011, 2013),是整个青藏高原岩浆活动最活跃的地区,其复杂的演化过程从古生代一直持续到新生代 (Zhu *et al.*, 2011, 2013, 2016),特别是中生代以来,经历了新特提斯洋俯冲、班公湖-怒江洋俯冲、拉萨地块与羌塘地块碰撞以及印度-欧亚大陆碰撞等一系列地质过程,导致中-新生代岩浆活动非常活

跃,在拉萨地块形成了巨型岩浆带,被称为冈底斯岩浆岩带 (Zhu *et al.*, 2011)。冈底斯岩浆岩带保存了中-新生代各个时代的岩浆岩,完整地记录了拉萨地块构造演化和深部动力学机制,为探究拉萨地块中-新生代的演化提供了重要的证据 (Yin and Harrison, 2000; Kapp *et al.*, 2005, 2007; Mo *et al.*, 2008; 朱弟成等, 2008a; Zhu *et al.*, 2009a, 2009b, 2011; Zhao *et al.*, 2009)。拉萨地块被狮泉河-纳木错蛇绿混杂岩 (SNMZ) 带和洛巴堆-米拉山断裂带 (LMF) 自南向北划分为南、中、北拉萨地块 (图 1a; Yin and Harrison, 2000; Zhu *et al.*, 2013)。此外,位于洛巴堆-米拉山断裂带 (LMF) 东段的松多榴辉岩带被认为是拉萨地块中晚二叠世闭合的古特提斯洋缝合带,因此又以松多榴辉岩带为界线将拉萨地块划分为南、北拉萨地块 (Yang *et al.*, 2009)。中拉萨地块位于拉萨地块中部 (图 1b),受到了班公湖-怒江洋南向俯冲、新特提斯洋北向俯冲以及拉萨-羌塘地块碰撞的影响,其岩浆岩形成的深部动力学机制

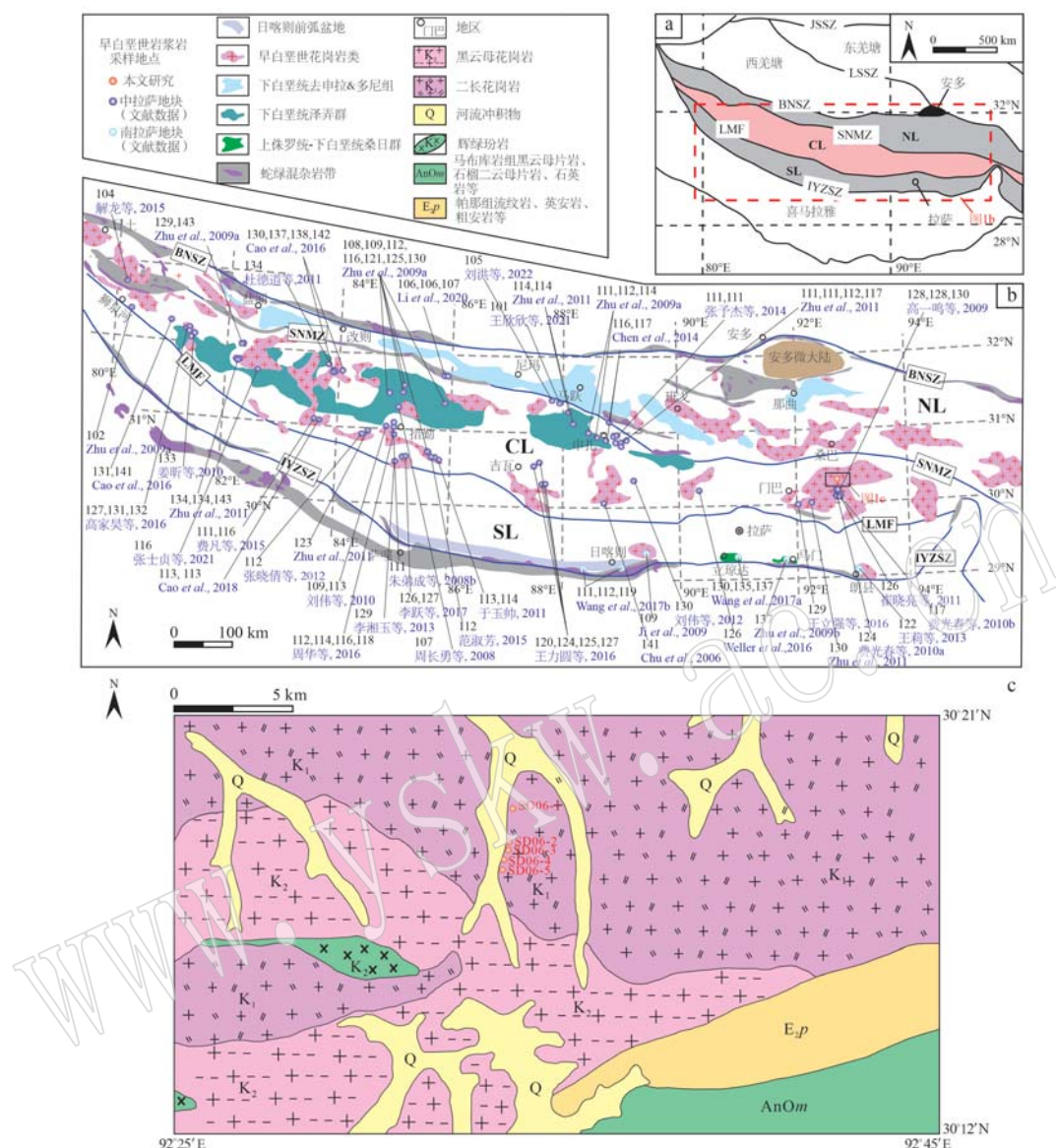


图1 青藏高原大地构造简图(a, 修改自 Zhu *et al.*, 2011)、拉萨地块主要岩浆岩分布图(b, 修改自 Li *et al.*, 2018)和门巴研究区地质图(c, 修改自吉林大学地质调查研究院, 2004)

Fig. 1 Sketch map of the geotectonics of Qinghai-Tibet Plateau(a, modified from Zhu *et al.*, 2011), distribution of major magmatic rocks of Lhasa subterranean(b, modified from Li *et al.*, 2018) and geological map of Menba area (c, modified from Geological Survey and Research Institute of Jilin University, 2004)

JSSZ—金沙江缝合带; LSSZ—龙木错-双湖缝合带; IYZSZ—印度河-雅鲁藏布江缝合带; LMF—落巴堆-米拉山断裂带; SNMZ—狮泉河-纳木错蛇绿混杂岩带; BNSZ—班公湖-怒江缝合带; SL—南拉萨地块; CL—中拉萨地块; NL—北拉萨地块

年龄数据来源: Chu *et al.*, 2006; 周长勇等, 2008; 朱弟成等, 2008b; Ji *et al.*, 2009; Zhu *et al.*, 2009a, 2009b, 2011; 高一鸣等, 2009; 费光春等, 2010a, 2010b; 姜昕等, 2010; 刘伟等, 2010, 2012; 崔晓亮等, 2011; 杜德道等, 2011; 于玉帅等, 2011; 张晓倩等, 2012; 李湘玉等, 2013; 王莉等, 2013; 张予杰等, 2014; Chen *et al.*, 2014; 解龙等, 2015; 费凡等, 2015; 范淑芳等, 2015; 高家昊等, 2016; 王力圆等, 2016; 周华等, 2016; 王立强等, 2016; Cao *et al.*, 2016; Weller *et al.*, 2016; 李跃等, 2017; Wang *et al.*, 2017a, 2017b; Cao *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2020; 王欣欣等, 2021; 张士贞等, 2021; 刘洪等, 2022

JSSZ—Jinshajiang suture zone; LSSZ—Longmuco-Shuanghu suture zone; IYZSZ—Indus-Yarlung Zangbo suture zone; LMF—Luobadui-Milashan fault; SNMZ—Shiquan River-Nam Tso ophiolite melange zone; BNSZ—Bangong-Nujiang suture zone; SL—Southern Lhasa subterranean; CL—central Lhasa subterranean; NL—northern Lhasa subterranean

Age data source: Chu *et al.*, 2006; Zhou Changyong *et al.*, 2008; Zhu Dicheng *et al.*, 2008b; Ji *et al.*, 2009; Zhu *et al.*, 2009a, 2009b, 2011; Gao Yiming *et al.*, 2009; Fei Guangchun *et al.*, 2010a, 2010b; Jiang Xin *et al.*, 2010; Liu Wei *et al.*, 2010, 2012; Cui Xiaoliang *et al.*, 2011; Du Dedao *et al.*, 2011; Yu Yushuai *et al.*, 2011; Zhang Xiaoqian *et al.*, 2012; Li Xiangyu *et al.*, 2013; Wang Li *et al.*, 2013; Zhang Yujie *et al.*, 2014; Chen *et al.*, 2014; Xie Lang *et al.*, 2015; Fei Fan *et al.*, 2015; Fan Shufang *et al.*, 2015; Gao Jiahao *et al.*, 2016; Wang Liyuan *et al.*, 2016; Zhou Hua *et al.*, 2016; Wang Liqiang *et al.*, 2016; Cao *et al.*, 2016; Shufang *et al.*, 2016; Li Yue *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2017a, 2017b; Cao *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2020; Wang Xinxin *et al.*, 2021; Zhang Shizhen *et al.*, 2021; Liu Hong *et al.*, 2022

① 吉林大学地质调查研究院. 2004. 1:25 万门巴区幅 H46C002002.

复杂多样,近年来在中拉萨地块相继报道了一系列早白垩世的岩浆活动(图1b),涉及到的洋壳俯冲和板块碰撞等重要地质事件仍存在争议,主要包括:①新特提斯洋北向俯冲作用(Zhang *et al.*, 2004, 2012a; Kapp *et al.*, 2005, 2007; Leier *et al.*, 2007; Chiu *et al.*, 2009; 刘伟等, 2012; 王莉等, 2013; 孟繁一, 2014; Dai *et al.*, 2015; 范淑芳等, 2015); ②班公湖-怒江洋闭合后的碰撞挤压造山作用(王立强等, 2016); ③新特提斯洋北向俯冲与班公湖-怒江洋南向俯冲双向俯冲作用(费光春等, 2010a, 2010b; 王力圆等, 2016; Cao *et al.*, 2016); ④班公湖-怒江洋南向俯冲、板片回转以及之后重力作用下发生的板片断离作用(莫宣学等, 2005; 潘桂棠等, 2006; 朱弟成等, 2009; Zhu *et al.*, 2009a, 2011; 刘伟等, 2010; 张晓倩等, 2010, 2012; 于玉帅等, 2011; Qu *et al.*, 2012; 张予杰等, 2014; Chen *et al.*, 2014; 周华等, 2016; 高家昊等, 2016; 李跃等, 2017; Li *et al.*, 2020; 罗安波, 2022; 刘洪等, 2022); ⑤拉萨地块与羌塘地块碰撞作用的伸展背景(Harris *et al.*, 1990; 李湘玉等, 2013; 解龙等, 2015; 王欣欣等, 2021)。另外,上述岩浆活动的报道大多集中在中拉萨地块的中部及西部,在东段仍然缺乏高质量的年代学和岩石地球化学数据来约束早白垩世岩浆作用的深部动力学过程,因此对于中拉萨地块东段构造-岩浆演化的研究可以为解决此时期中拉萨地块的岩浆活动究竟是受控于新特提斯洋的北向俯冲,还是班公湖-怒江洋的南向俯冲这一科学问题提供重要的约束。

花岗岩是陆壳中重要的组成部分,也是区分陆壳与洋壳的重要标志(Lundstrom and Glazner, 2016; 陈国能等, 2017),记录了地壳演化过程中的详细信息。因此,花岗岩的成因、形成的构造背景等一直是研究地球动力学机制的核心内容(Pearce *et al.*, 1984; 翟明国, 2017; Zhang *et al.*, 2021); 而A型花岗岩作为一种特殊的花岗岩,被定义为碱性(alkaline)、无水(anhydrous)以及非造山(anorogenic)的花岗岩(Loiselle and Wones, 1979),几乎涵盖了除典型I、S型花岗岩之外的其他花岗岩类(吴锁平等, 2007; 李小伟等, 2010)。A型花岗岩能够反映特定的构造环境,其形成于板内伸展环境(A1)或大陆碰撞后的造山带中(A2)(Eby, 1992),因此查明A型花岗岩的岩石成因对于约束构造背景具有重要意义。以往在中拉萨地块报道的形成于碰撞后岩石圈

伸展背景下的早白垩世A型花岗岩主要集中在中-西部,包括申扎黑云母花岗岩(Qu *et al.*, 2012)、扎独顶二长花岗岩(104 Ma, 解龙等, 2015)、吉瓦地区流纹岩(127~120 Ma, 王力圆等, 2016)、阿萨斑状花岗岩(107~106 Ma, Li *et al.*, 2020)、曲桑格勒花岗岩(101 Ma, 王欣欣等, 2021)、控错花岗岩(105 Ma, 刘洪等, 2022)(图1b),而东部地区尚无同类型花岗岩的相关研究报道。

近年来,笔者在中拉萨地块东部的门巴地区开展野外地质调查的过程中,发现一套位于研究区东北部的早白垩世二长花岗岩,其成因研究对深入探讨早白垩世中拉萨地块的深部动力学过程具有重要意义。因此,本文基于详实的野外地质调查、岩相学、年代学及岩石地球化学研究,探讨该二长花岗岩的岩石成因、源区特征及构造背景,为揭示中拉萨地块东段的早白垩世岩浆作用的深部动力学过程提供新的证据。

1 地质背景与样品特征

北拉萨地块具新生地壳特征(Zhu *et al.*, 2011),除侏罗系-白垩系的沉积岩盖层分布外,还发育大量的早白垩世的侵入岩及火山岩(Zhu *et al.*, 2013)。中拉萨地块具有太古宇和古元古界的基底岩石,为古老微陆块(Zhu *et al.*, 2009a, 2011, 2013),保留了前寒武纪至新生代的地质记录。这些基底岩石先后经历了多期变质作用,包括新元古代(约650 Ma, Zhang *et al.*, 2012b, 2014; 约690 Ma, Dong *et al.*, 2011a; 约720 Ma, 张泽明等, 2010)、晚三叠世(225~213 Ma, Dong *et al.*, 2011b)和新生代(Kapp *et al.*, 2005),经过改造后其结晶基底被石炭系-二叠系变沉积岩和上侏罗统-下白垩统沉积地层所覆盖,并且发育有大量火山岩和侵入岩(Zhu *et al.*, 2009a, 2011, 2013)。南拉萨地块与北拉萨地块相似,由新生地壳组成(Zhu *et al.*, 2011),主要发育有中三叠世-中新世的冈底斯岩基和古新统-始新统林子宗火山岩(Mo *et al.*, 2007, 2008; Zhu *et al.*, 2011, 2013, 2019; Lang *et al.*, 2020; Deng *et al.*, 2021),此外在其东部少量出露的寒武纪花岗岩,可能保留了部分前寒武系的结晶基底(Dong *et al.*, 2010)。

研究区位于中拉萨地块东部的门巴地区(图1b),如果按照Yang等(2009)以松多榴辉岩带为界

线的划分方案,研究区则属于北拉萨地块,但松多榴辉岩带代表了古生代古特提斯洋的演化,在时代上与本文研究内容不符,故采用北、中、南拉萨地块的划分方案。区内主要出露前奥陶系马布库岩组(AnOm)和始新统帕那组(E_2p)以及白垩纪花岗岩侵入岩体。马布库岩组主要分布于研究区东南部,主要岩石类型有黑云母片岩、石榴二云母片岩和石英岩等;始新统帕那组分布于研究区东南部,主要岩石类型为流纹岩、英安岩、粗安岩、中酸性火山熔岩和火山碎屑岩等。花岗岩岩体在区内出露面积约为200 km²,主要由晚白垩世黑云母花岗岩和早白垩世二长花岗岩构成。此外,在研究区的西南部还发育有小规模的晚白垩世辉绿玢岩(图1c)。

本文所研究的花岗岩采自研究区的东北部,岩

性为二长花岗岩,岩体规模巨大,呈岩基产出(图2a、2b)。采样的地理坐标为30°18'22"N, 92°33'47"E(图1c)。二长花岗岩岩体与帕那组不整合接触,又被晚白垩世黑云母花岗岩体侵入,呈侵入接触,接触界线明显。马布库岩组与帕那组为断层接触。门巴二长花岗岩野外露头良好,风化蚀变较弱,新鲜面为灰白色,中粗粒结构,块状构造(图2a、2b),主要造岩矿物有石英(30%~35%),斜长石(20%~25%)、条纹长石(15%~20%)、钾长石(35%~40%),斜长石主要为钠长石,钾长石包括微斜长石(15%~17%)和正长石(20%~23%);石英晶体镶嵌在长石中,正长石可见卡式双晶,斜长石可见聚片双晶,微斜长石可见格子双晶;暗色矿物仅含有少量的磁铁矿(2%~5%)(图2c~2f)。

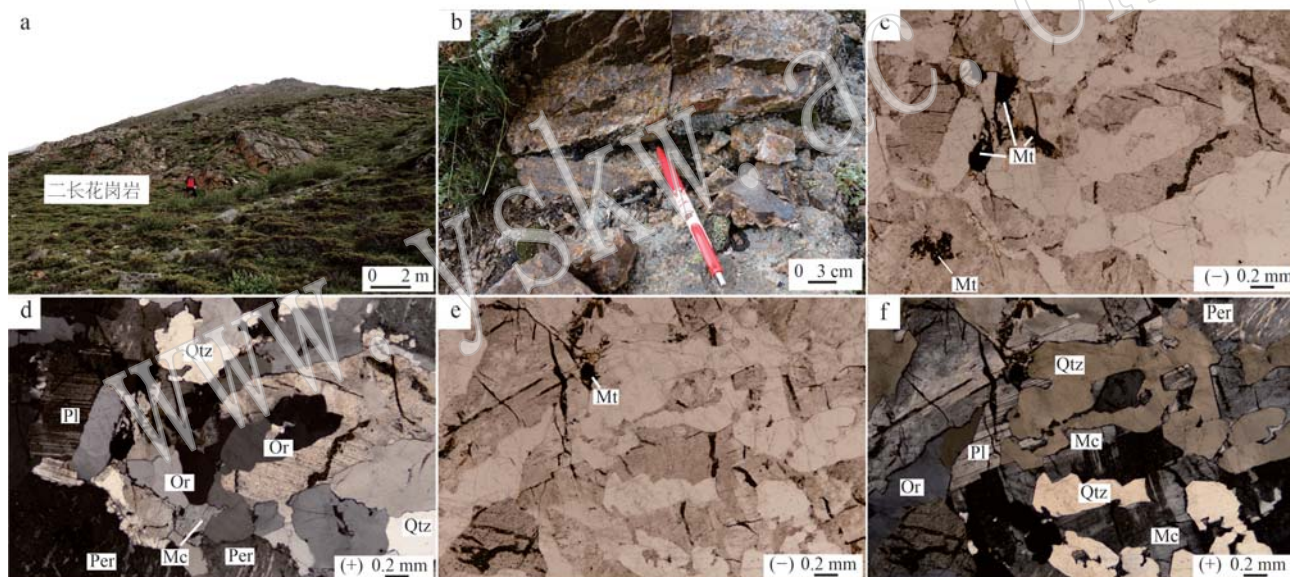


图2 门巴二长花岗岩野外露头及显微照片

Fig. 2 Photos of fields and micrographs of the Menba monzonitic granite

a—门巴二长花岗岩野外宏观特征; b—门巴二长花岗岩野外露头; c~f—门巴二长花岗岩镜下显微照片; Qtz—石英; Pl—斜长石;

Mc—微斜长石; Per—条纹长石; Or—正长石; Mt—磁铁矿

a—the field of the Menba granite; b—the field outcrops of the Menba monzonitic granite; c~f—the microscopic micrographs of the Menba granite;

Qtz—quartz; Pl—plagioclase; Mc—microcline; Per—perthite; Or—orthoclase; Mt—magnetite

2 分析方法

2.1 锆石 U-Pb 定年

野外样品采集过程中,选择较新鲜无污染的样品,经室内刷洗干净并晾干;锆石分选工作在河北省廊坊市科大岩石矿物分选技术服务有限公司进行,主要采用浮选和磁选方法完成。锆石制靶、显微

(反射光和透射光)及阴极发光(CL)照相在北京锆年领航科技有限公司完成。LA-ICP-MS U-Pb 定年测试在北京锆年领航科技有限公司完成。首先用双面胶将双目镜下挑选的表面平整光洁的锆石颗粒粘取,之后再用环氧树脂固定,等待树脂固化后再将树脂表面进行抛光处理,完成锆石靶的制作,最后用反射光和透射光分别对锆石靶中的锆石颗粒进行照相,镀金后再对其进行阴极发光照相,用以检查锆石

内部的结构。根据获得的锆石透射光图像、反射光图像和阴极发光 (CL) 图像, 选择无裂痕且无包裹体的部位进行 U-Pb 定年测试。由激光剥蚀系统 GeolasPro 激光发生器产生的深紫外光束经匀化光路聚焦于选取的锆石测试表面, ICP-MS 为 Agilent7700a 四级杆质谱仪。激光束斑直径为 32 μm , 剥蚀频率为 10 Hz, 能量密度约为 2.5 J/cm², 剥蚀物质的载气为氦气。在测试过程中每进行 5 个测试点会测定 2 个锆石 GJ-1 以进行样品校正, 用锆石 Plesovice 观察仪器状态和测试的重现性, 后期利用 ICPMSDataCal (Ver7.2) 软件对锆石同位素比值进行处理 (Liu *et al.*, 2010), 利用 Isoplot 软件进行年龄数据的处理和图件绘制。

2.2 锆石 Hf 同位素分析

本次锆石 Hf 同位素测试在北京锆年领航科技有限公司完成, 使用配备有 Geolas-193 型紫外激光剥蚀系统 (LA) 的 Neptune 型多接收电感耦合等离子体质谱仪 (MC-ICP-MS) 采集信号, 测定时以 GJ-1 为参考标样。采用的激光束斑直径约为 55 μm , 采用氦气为载气。

2.3 全岩主微量元素测试

全岩主微量元素测试在南京聚谱检测科技有限公司完成。主量元素测试采用 X 射线荧光光谱法 (XRF), 在荷兰帕纳科 AxiosX 荧光仪上完成, 分析误差小于 3%。微量元素测试采用 ICP-MS 法, 在 FinniganElement ICP-MS 仪器上完成, 将样品研磨并用酸溶法制成溶液, 然后在等离子质谱仪上进行测定, 并用标准溶液进行校正, 含量大于 10×10^{-6} 的元素分析误差小于 5%, 而含量小于 10×10^{-6} 的元素分析误差小于 10%。

3 结果

3.1 锆石 U-Pb 年龄

本文对二长花岗岩样品进行了锆石 U-Pb 测年, 测试结果见表 1。二长花岗岩样品锆石大多为短柱状晶体, 锆石颗粒较小, 长约 100~200 μm , 宽约 20~60 μm , 长宽比为 1:1~1:3, 颜色较浅, 颗粒比较完整, 有部分锆石可见局部的熔蚀。锆石的 Th/U 值较高 (0.60~8.31), 远大于变质成因锆石的 Th/U 值,

表 1 门巴二长花岗岩 (SD06) 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素分析结果
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb analysis data for the Menba monzonitic granite (SD06)

点号	$w_B/10^{-6}$			Th/U	同位素比值						年龄/Ma		谐和度/%
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	
1	70	1 819	2 583	0.70	0.049 9	0.000 8	0.130 7	0.002 3	0.019 0	0.000 2	121.2	1.3	97
2	7	246	216	1.14	0.051 6	0.002 1	0.133 5	0.005 3	0.018 9	0.000 3	120.5	1.6	94
3	87	2 153	3 427	0.63	0.048 5	0.000 7	0.127 3	0.001 9	0.019 0	0.000 2	121.4	1.0	99
4	10	468	218	2.15	0.051 5	0.002 1	0.135 2	0.005 6	0.019 1	0.000 2	121.8	1.3	94
5	8	390	143	2.72	0.052 1	0.002 5	0.138 0	0.006 7	0.019 2	0.000 2	122.9	1.4	93
6	13	391	408	0.96	0.049 9	0.001 3	0.131 4	0.003 3	0.019 1	0.000 2	122.1	1.2	97
7	49	1 339	1 837	0.73	0.049 2	0.000 8	0.126 9	0.002 1	0.018 7	0.000 2	119.2	1.1	98
8	9	276	315	0.88	0.053 8	0.001 6	0.139 5	0.004 0	0.018 9	0.000 2	120.5	1.1	90
9	100	2 571	3 744	0.69	0.048 6	0.000 7	0.129 3	0.001 8	0.019 3	0.000 2	123.0	1.0	99
10	9	327	242	1.35	0.050 2	0.002 0	0.132 3	0.005 2	0.019 1	0.000 2	121.9	1.4	96
11	13	359	442	0.81	0.054 3	0.001 7	0.141 7	0.004 2	0.019 0	0.000 2	121.2	1.2	90
12	943	1 844	709	2.60	0.051 1	0.002 6	0.126 4	0.003 9	0.018 9	0.000 3	120.9	1.9	99
13	870	2 316	1 286	1.80	0.048 6	0.002 0	0.123 9	0.003 5	0.018 6	0.000 2	118.9	1.4	99
14	453	1 124	511	2.20	0.050 3	0.001 7	0.131 6	0.003 0	0.019 3	0.000 2	123.3	1.4	98
15	1 166	3 128	377	8.31	0.050 6	0.002 1	0.131 1	0.003 3	0.019 0	0.000 2	121.1	1.4	96
16	669	1 295	521	2.49	0.052 0	0.002 7	0.134 3	0.004 3	0.019 5	0.000 2	124.6	1.6	97
17	1 803	4 917	3 294	1.49	0.050 1	0.000 8	0.130 3	0.002 1	0.019 0	0.000 2	121.0	1.5	97
18	543	1 418	673	2.11	0.049 9	0.001 4	0.128 9	0.002 5	0.018 5	0.000 2	118.5	1.3	96
19	3 296	8 682	2 245	3.87	0.049 5	0.001 8	0.127 3	0.004 1	0.019 1	0.000 2	121.7	1.5	99
20	520	1 208	509	2.37	0.051 0	0.001 5	0.133 1	0.002 4	0.019 2	0.000 2	122.3	1.3	96
21	527	857	444	1.93	0.049 6	0.003 2	0.123 4	0.004 0	0.018 7	0.000 2	119.4	1.5	98
22	614	1 293	650	1.99	0.048 3	0.002 0	0.123 9	0.003 0	0.018 4	0.000 2	117.6	1.1	99
23	519	1 282	440	2.91	0.049 9	0.001 6	0.126 3	0.002 4	0.018 5	0.000 2	118.1	1.2	97

指示锆石样品具有岩浆成因的特点 (Hoskin and Black, 2000), 同时锆石发育明显的震荡环带特征

(图3), 也显示出明显的岩浆成因锆石的特点。

本次实验共测得SD06中有效的U-Pb同位素

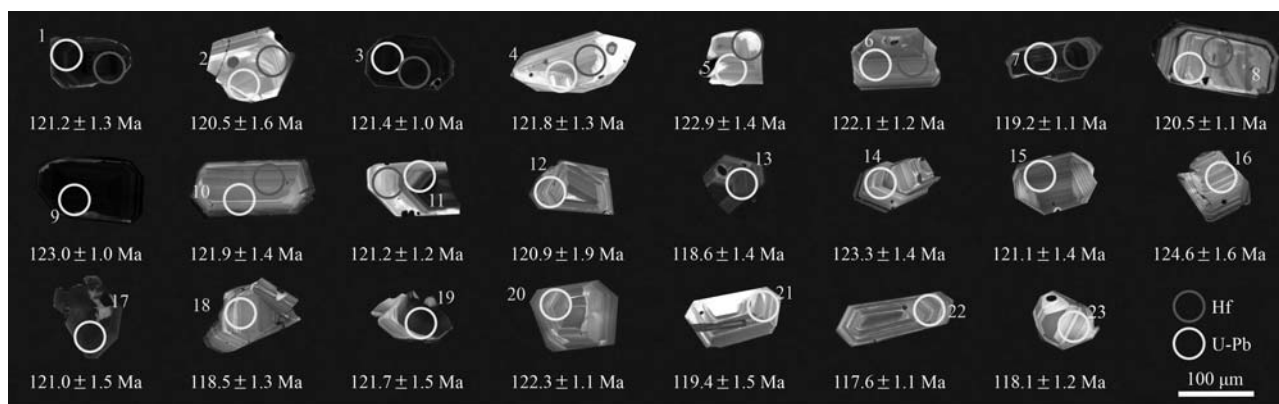


图3 门巴二长花岗岩锆石阴极发光图像

Fig. 3 Cathodoluminescence images of the zircons of the Menba monzonitic granite

数据共23个, 测试所用的两个标样的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分别为580.7~576.4 Ma、590.5~587.4 Ma, 锆石样品的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分布在124.6~117.6 Ma之间, 在U-Pb年龄谐和图中分布在谐和线附近(图4)。通过计算获得加权平均年龄为 120.9 ± 0.8 Ma (NSWD=1.6, $n=23$), 该年龄值基本代表了二长花岗岩的结晶年龄, 表明成岩时代为早白垩世。

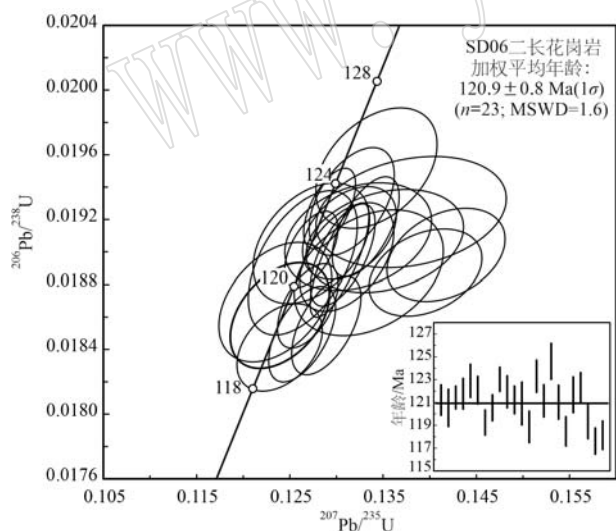


图4 门巴二长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 4 Concordia diagram of LA-ICP-MS zircon U-Pb for Menba monzonitic granite

3.2 锆石 Hf 同位素

在锆石 U-Pb 定年的基础上对二长花岗岩中的10个点进行了锆石 Hf 同位素测试, 测试所选位置靠近测年点位, 测试结果见表2。所测试的10个分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为122.9~119.2 Ma, 对应的

$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 的值为-2.7~+2.6, 一阶段模式年龄(t_{DM1}) 在908.6~714.3 Ma 之间, 二阶段模式年龄(t_{DM2}) 在1352.8~1016.8 Ma 之间, 测试所用标样的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为0.282682~0.282694, 2σ 为0.000020~0.000021。

3.3 岩石地球化学特征

本次获得的门巴二长花岗岩样品的主微量数据见表3, 与中拉萨地块已报道的A型花岗岩地球化学特征相似。门巴二长花岗岩样品具有较高含量的 SiO_2 , 介于69.69%~75.81%, 平均73.84%; 中等含量的 Al_2O_3 , 介于12.77%~15.60%, 平均13.74%; 较低含量的 MgO , 介于0.01%~0.12%, 平均0.05%; 总碱($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) 的含量介于8.22%~9.34%。 $\text{Mg}^\#$ 值为2.48~8.81, A/CNK 值为1.08~1.22, A/NK 值为1.12~1.27, 分异指数(DI) 为92.33~96.22(平均94.87), 指示样品的分异程度较高。 $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) - \text{SiO}_2$ 图解(图5a) 中, 样品位于花岗岩区域, 与野外观察和镜下鉴定结果相符; $\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ 图解(图5b) 中, 样品显示出高钾钙碱性系列-钾玄岩系列过渡的性质; $\text{A}/\text{NK} - \text{A}/\text{CNK}$ 图解(图5c) 中, 样品显示过铝质岩石特征。

稀土元素总量较高(表3), 其总量(ΣREE) 为 43.17×10^{-6} ~ 405.12×10^{-6} , 平均 163.80×10^{-6} , 其中轻稀土元素总量(LREE) 为 28.82×10^{-6} ~ 353.72×10^{-6} , 平均 132.79×10^{-6} , 重稀土元素总量(HREE) 为 13.96×10^{-6} ~ 51.40×10^{-6} , 平均 31.01×10^{-6} ; $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值为0.72~6.07, 平均2.84。在稀土元素球粒陨石标准化配分图中(图6a), 轻稀土元素与

表 2 门巴二长花岗岩(SD06)锆石 Hf 同位素分析结果

Table 2 Zircon Hf isotope analysis results of Menba monzonitic granite(SD06)

点号	<i>t</i> /Ma	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	εHf(<i>t</i>)	εHf(0)	<i>t</i> _{DM1} /Ma	<i>t</i> _{DM2} /Ma	<i>f</i> _{Lu/Hf}
1	121.2	0.189 730	0.005 621	0.282 730	0.000 019	0.7	-1.5	842.5	1 131.6	-0.83
2	120.5	0.049 979	0.001 619	0.282 624	0.000 019	-2.7	-5.2	903.7	1 351.5	-0.95
3	121.4	0.096 789	0.003 056	0.282 655	0.000 014	-1.7	-4.1	893.8	1 288.1	-0.91
4	121.8	0.080 529	0.002 708	0.282 684	0.000 021	-0.7	-3.1	842.4	1 221.0	-0.92
5	122.9	0.089 444	0.003 030	0.282 775	0.000 023	2.6	0.1	714.3	1 016.8	-0.91
6	122.1	0.062 190	0.002 005	0.282 691	0.000 020	-0.3	-2.9	816.1	1 201.5	-0.94
7	119.2	0.086 410	0.002 660	0.282 640	0.000 015	-2.3	-4.7	907.0	1 322.4	-0.92
8	120.5	0.042 868	0.001 406	0.282 638	0.000 015	-2.2	-4.7	878.3	1 318.6	-0.96
10	121.9	0.056 101	0.001 787	0.282 624	0.000 018	-2.7	-5.2	908.6	1 352.8	-0.95
11	121.2	0.027 561	0.000 951	0.282 691	0.000 015	-0.3	-2.9	794.0	1 197.9	-0.97

注: $\varepsilon\text{Hf}(t) = 10\,000 \times \{ [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} \times (e^{\lambda t} - 1)] / [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} \times (e^{\lambda t} - 1)] - 1 \}$, $t_{\text{DM1}} = 1/\lambda \times \ln \{ 1 + [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} - (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}] / [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}] \}$, $t_{\text{DM2}} = t_{\text{DM1}} - (t_{\text{DM1}} - t) \times [(f_{\text{cc}} - f_{\text{s}}) / (f_{\text{cc}} - f_{\text{DM}})]$; $f_{\text{Lu/Hf}} = (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} / (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} - 1$, 其中: $\lambda = 1.867 \times 10^{-11} / \text{a}$ (Soderlund *et al.*, 2004); $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}}$ 和 $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}}$ 为样品测量值; $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} = 0.033\,2$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} = 0.282\,772$ (Blichert-Toft and Albarede, 1997); $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.038\,4$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.283\,25$ (Griffin *et al.*, 2000); $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{平均地壳}} = 0.015$; $f_{\text{cc}} = [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{平均地壳}} / (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}}] - 1$; $f_{\text{s}} = f_{\text{Lu/Hf}}$; $f_{\text{DM}} = [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} / (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}}] - 1$; *t* 为锆石结晶年龄。

表 3 门巴二长花岗岩主量元素(*w_B*/%)和微量元素(*w_B*/10⁻⁶)分析数据表

Table 3 Major (*w_B*/%) and trace (*w_B*/10⁻⁶) elements analyses for Menba monzonitic granite

样品	SD06-1	SD06-2	SD06-3	SD06-4	SD06-5	样品	SD06-1	SD06-2	SD06-3	SD06-4	SD06-5
SiO ₂	75.81	69.69	74.97	74.98	73.74	Dy	8.77	13.80	3.82	3.73	11.50
TiO ₂	0.15	0.22	0.05	0.05	0.10	Ho	1.76	2.85	0.86	0.85	2.61
Al ₂ O ₃	12.77	15.60	13.35	13.28	13.71	Er	5.18	8.39	2.69	2.70	8.46
TF ₂ O ₃	1.45	2.54	1.13	1.18	1.97	Tm	0.74	1.30	0.42	0.44	1.39
MnO	0.04	0.05	0.02	0.03	0.05	Yb	4.92	8.15	2.76	2.80	9.22
MgO	0.04	0.12	0.01	0.02	0.03	Lu	0.67	1.21	0.40	0.42	1.37
CaO	0.32	0.24	0.25	0.25	0.33	Y	46.41	80.30	25.00	24.70	75.90
Na ₂ O	3.34	3.90	3.77	3.71	3.8	Rb	207.72	282.00	257.00	265.00	280.00
K ₂ O	4.88	5.44	5.16	5.31	5.29	Ba	134.05	149.00	11.00	10.50	28.60
P ₂ O ₅	0.04	0.06	0.02	0.02	0.02	Th	36.2	59.8	33.5	38.0	84.7
LOI	0.69	1.57	0.52	0.47	0.58	U	4.46	6.22	9.09	8.71	12.60
Total	99.52	99.43	99.27	99.3	99.62	Nb	19.2	33.4	23.3	21.8	41.8
A/NK	1.19	1.27	1.13	1.12	1.14	Sr	29.64	22.70	10.20	8.14	17.10
A/CNK	1.12	1.22	1.09	1.08	1.09	Zr	178.57	334.00	95.10	72.90	91.30
FeO ^T	1.30	2.28	1.02	1.06	1.77	Hf	6.24	11.5	4.78	3.95	5.19
DI	95.02	92.33	96.19	96.22	94.67	Sc	2.74	4.83	0.68	0.57	1.66
Mg [#]	5.29	8.80	2.48	3.46	2.66	Ga	23.38	34.46	14.04	15.17	25.46
La	38.48	69.00	3.30	3.75	9.22	ΣREE	215.54	405.12	43.17	43.65	111.54
Ce	92.31	190.00	16.50	16.60	32.90	LREE	184.22	353.72	28.82	29.69	67.50
Pr	9.43	17.00	1.27	1.38	3.61	HREE	31.32	51.40	14.35	13.96	44.04
Nd	35.50	63.60	5.57	5.77	15.50	LREE/HREE	5.88	6.88	2.01	2.13	1.53
Sm	8.19	13.70	2.15	2.15	6.16	(La/Yb) _N	5.62	6.07	0.86	0.96	0.72
Eu	0.30	0.42	0.03	0.04	0.11	δEu	0.11	0.09	0.04	0.05	0.05
Gd	7.87	13.50	2.85	2.50	7.87	δCe	1.15	1.32	1.98	1.79	1.40
Tb	1.41	2.20	0.55	0.52	1.62						

注: $\delta\text{Eu} = \text{Eu}_\text{N} / (\text{Sm}_\text{N} \times \text{Gd}_\text{N})^{1/2}$; $\delta\text{Ce} = \text{Ce}_\text{N} / (\text{La}_\text{N} \times \text{Pr}_\text{N})^{1/2}$; $\text{Mg}^\# = 100 \text{ (MgO}/40.3) / (\text{MgO}/40.3 + \text{FeO}^\text{T}/71.8)$; DI = 石英 (Qtz) + 正长石 (Or) + 钠长石 (Ab) + 钠长石 (Ab) + 霞石 (Ne) + 白榴石 (Lc) + 六方钾霞石 (Kp) (CIPW 质量分数比)。

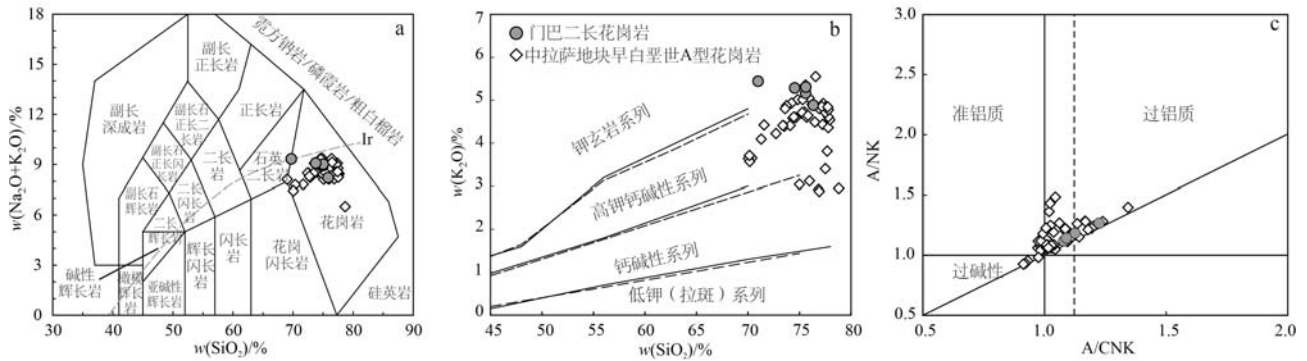


图 5 门巴二长花岗岩($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$)- SiO_2 图解(a, 据 Wilson, 1989)、 K_2O - SiO_2 图解(b, 据 Peccerillo and Taylor, 1976)和 A/NK - A/CNK 图解(c, 据 Maniar and Piccoli, 1989)

Fig. 5 ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$)- SiO_2 diagram (a, after Wilson, 1989), K_2O - SiO_2 diagram (b, after Peccerillo and Taylor, 1976) and A/NK - A/CNK diagram (c, after Maniar and Piccoli, 1989) for Menba monzonitic granite

中拉萨地块早白垩世 A 型花岗岩数据来源: Qu *et al.*, 2012; Chen *et al.*, 2014; 解龙等, 2015; Li *et al.*, 2020; 王欣欣等, 2021; 刘洪等, 2022

data source of Early Cretaceous A-type granite in the Central Lhasa subterranean: Qu *et al.*, 2012; Chen *et al.*, 2014; Xie Long *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2020; Wang Xinxin *et al.*, 2021; Liu Hong *et al.*, 2022

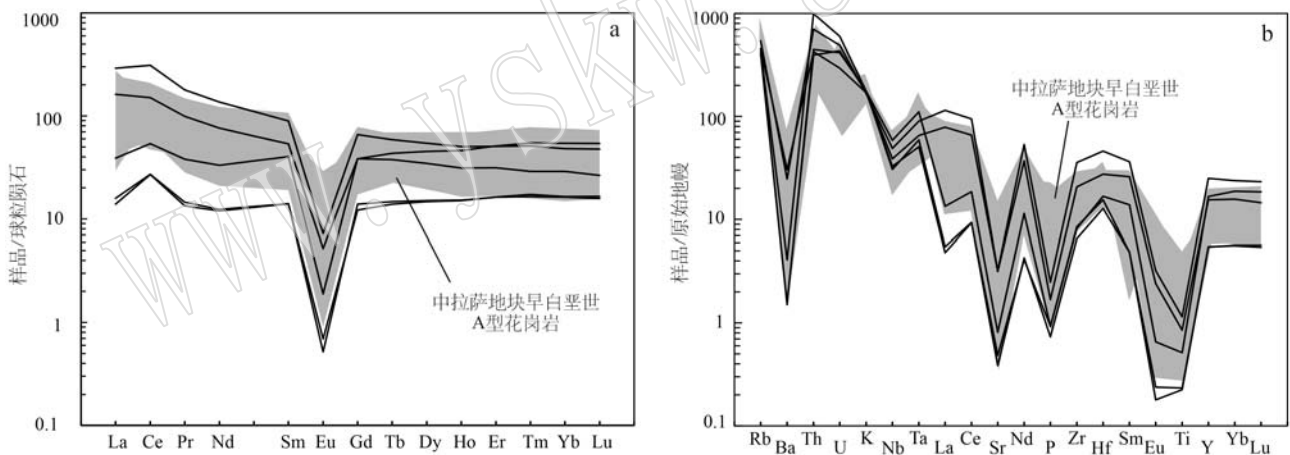


图 6 门巴二长花岗岩稀土元素球粒陨石标准化配分图(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns(a) and primitive mantle-normalized trace element spidergrams(b) for Menba monzonitic granite

球粒陨石和原始地幔数据来自 Sun and McDonough, 1989; 中拉萨地块早白垩世 A 型花岗岩数据来源: Qu *et al.*, 2012; Chen *et al.*, 2014; 解龙等, 2015; Li *et al.*, 2020; 王欣欣等, 2021; 刘洪等, 2022

the chondrite and primitive mantle data are from Sun and McDonough, 1989; Data Source of Early Cretaceous A-type granite in the Central Lhasa Subterranean: Qu *et al.*, 2012; Chen *et al.*, 2014; Xie Long *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2020; Wang Xinxin *et al.*, 2021; Liu Hong *et al.*, 2022

重稀土元素分馏不明显,且 Eu 具有很明显的负异常, δEu 为 0.04~0.11, 平均 0.07, 整体上呈微弱右倾的“V”形。微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 6b)整体上呈右倾, 大离子亲石元素(LILEs)相对富集, 如 Rb、Th; 高场强元素(HFSEs)相对亏损, 如 Nb、Ta、Ti。

3.4 全岩锆石饱和温度

Watson 等(1983)的实验研究表明锆石中 Zr 的分配系数对于温度非常敏感, 而对于其他条件因素较稳定, 因此锆石的饱和温度可以基本代表花岗岩的形成温度, 计算公式为: $\ln D_{\text{Zr}}(496\,000/\text{Zr}_{\text{melt}}) = [-3.8 - 0.85(M-1)] + 12\,900/T$, 其中 T 为绝对温

度, D 为分配系数, 经过摄氏温度换算后 $t_{Zr} (^{\circ}\text{C}) = 12\,900 / \ln D_{Zr} (49\,600 / Zr_{\text{melt}}) + 0.85 M + 2.95 - 273.15$, 其中 Zr_{melt} 可以用全岩的 Zr 含量近似替代, $M = (2\text{Ca} + \text{K} + \text{Na}) / (\text{Si} \times \text{Al})$ (原子分数)。由公式计算的结果为 $728 \sim 868^{\circ}\text{C}$, 说明门巴二长花岗岩的结晶温度较高。

4 讨论

4.1 成岩时代

中拉萨地块早白垩世的岩浆活动强烈, 并且在 110 Ma 左右集中出现了大规模的岩浆事件, 形成的岩石主要为中酸性岩浆岩, 其中主要包括: 中拉萨地块西部狮泉河以北的扎独顶地区的二长花岗岩 (104 Ma , 解龙等, 2015), 革吉县亚热地区的辉长岩 (116 Ma , 张士贞等, 2021), 措勤隆格尔铁矿二长花岗岩、闪长岩 (116 Ma , 111 Ma , 费凡等, 2015), 措勤地区正长花岗岩 (112 Ma , 张晓倩等, 2012), 二长花岗岩 (123 Ma , Zhu *et al.*, 2011)、流纹岩 ($113 \sim 109\text{ Ma}$, 刘伟等, 2010; 111 Ma , 朱弟成等, 2008b)、英安岩 ($118 \sim 112\text{ Ma}$, 周华等, 2016), 尼雄铁矿花岗岩 (113 Ma , 范淑芳等, 2015), 滚纠铁矿花岗岩闪长岩、二长花岗岩 (114 Ma , 113 Ma , 于玉帅等, 2011), 达雄岩体流纹岩、尼雄花岗闪长岩、闪长岩 ($112, 109, 108\text{ Ma}$, Zhu *et al.*, 2009a); 中部吉瓦地区流纹岩 ($124 \sim 120\text{ Ma}$, 王力圆等, 2016), 阿萨斑状花岗岩 ($107 \sim 106\text{ Ma}$, Li *et al.*, 2020), 尼玛地区控错花岗岩 (105 Ma , 刘洪等, 2022), 曲桑格勒花岗岩 (101 Ma , 王欣欣等, 2021), 申扎地区英安岩 (114 Ma , Zhu *et al.*, 2011; $117 \sim 116\text{ Ma}$, Chen *et al.*, 2014)、花岗闪长岩、闪长岩 (113 Ma , 111 Ma , Zhu *et al.*, 2009a), 买巴地区花岗岩、石英二长岩 (111 Ma , 张予杰等, 2014); 东部墨竹工卡县洞中拉铅锌矿床辉绿玢岩 (117 Ma , 费光春等, 2010b), 在区域上自西向东形成了范围广泛、规模巨大的岩浆活动带 (图 1b)。已有的岩浆岩年龄数据表明在早白垩世 ($\sim 110\text{ Ma}$) 中拉萨地块存在一系列大规模的岩浆活动。本文获得的门巴二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 $120.9 \pm 0.8\text{ Ma}$, 表明其侵位于早白垩世晚期, 与中拉萨地块以往报道的早白垩世岩浆作用时间一致, 说明在时间序列上门巴二长花岗岩与它们属于同一时期岩浆作用的产物。

4.2 岩石成因

4.2.1 岩石类型

对于花岗岩而言, 目前主流的分类方法将花岗岩分为 S 型 (来源于沉积岩)、I 型 (来源于火成岩)、M 型 (来源于地幔) 和 A 型 (产于非造山环境) 4 类花岗岩 (Whalen *et al.*, 1987)。A 型花岗岩在地球化学方面有着显著的特征, 在主量元素上通常富硅、富碱, 具有较高的 $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) / \text{CaO}$ 、 $\text{FeO}^T / \text{MgO}$ 等比值; 在微量元素上相对富集高场强元素, 并且具有较高的 $(\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y})$ 值以及 Ga / Al 值 (Eby, 1990, 1992)。门巴二长花岗岩在主量元素组成上具有高硅、高碱、低钙和低镁的特征, 这与典型的 A 型花岗岩主量元素组成相似 (Whalen *et al.*, 1987)。在微量元素及稀土元素方面, 门巴二长花岗岩样品的 δEu 值为 $0.04 \sim 0.11$, 显示明显的 Eu 负异常, 在稀土元素球粒陨石标准配分图 (图 6a) 整体上显示出向右缓倾的“V”字海鸥曲线, 重稀土元素略亏损于轻稀土元素; 同时在微量元素原始地幔标准化蛛网图中 (图 6b), Rb、Th、U、Zr、Hf 表现出了相对富集, Nb、Sr、Ba、Ti、P 表现出了相对亏损, 符合 A 型花岗岩的典型特征 (Whalen *et al.*, 1987; Eby, 1990), 并与中拉萨地块已报道的早白垩世 A 型花岗岩非常相似。在 $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) / \text{CaO} - (\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y})$ (图 7a)、 $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) - 10\,000\text{ Ga} / \text{Al}$ (图 7b) 和 $\text{FeO}^T / \text{MgO} - 10\,000\text{ Ga} / \text{Al}$ (图 7c) 图解中, 门巴二长花岗岩与中拉萨地块已报道的早白垩世 A 型花岗岩同样位于 A 型花岗岩区域。King 等 (1997) 认为高分异型 S 花岗岩相对于 A 型花岗岩具有高磷 (P_2O_5 平均含量为 0.14%) 和低钠 (Na_2O 平均含量为 2.81%) 的特征, 然而门巴二长花岗岩的 P_2O_5 含量较低 (平均 0.03%) 而 Na_2O 含量 (平均 3.70%) 较高, 不符合高分异型 S 型花岗岩的特征。此外, 门巴二长花岗岩的全岩锆石饱和温度为 $728 \sim 868^{\circ}\text{C}$, 明显高于班戈地区早白垩世高分异 I 型花岗岩的形成温度 ($721 \sim 740^{\circ}\text{C}$; 王楠等, 2020), 与尼玛地区的曲桑格勒 A 型花岗岩 ($764 \sim 851^{\circ}\text{C}$, 王欣欣等, 2021) 基本相符。Collins 等 (1982) 认为可以通过一些地球化学特征区分 SiO_2 含量相当的高分异的 I 型花岗岩和 A 型花岗岩, 例如 A 型花岗岩的 MgO 、 CaO 含量要低于高分异的 I 型花岗岩, 而全碱以及 Nb、Y、Ga、REE 含量要高于高分异的 I 型花岗岩。门巴二长花岗岩的 MgO (平均 0.05%) 和 CaO (平均 0.28%) 含量相比于藏北班戈县同期的高分异 I 型花岗岩的 MgO (平均

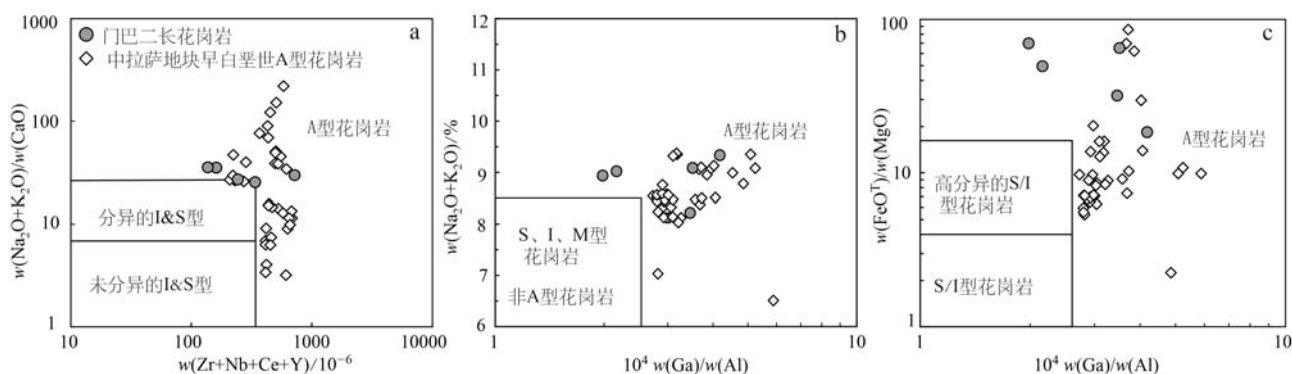


图7 门巴二长花岗岩 $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})/\text{CaO}-(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})$ 图解(a)、 $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})-10^4 \text{ Ga}/\text{Al}$ 图解(b)和 $\text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO}-10^4 \text{ Ga}/\text{Al}$ 图解(c)(据 Whalen *et al.*, 1987)

Fig. 7 $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})/\text{CaO}-(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})$ diagram (a), $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})-10^4 \text{ Ga}/\text{Al}$ diagram (b) and $\text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO}-10^4 \text{ Ga}/\text{Al}$ diagram (c) of the Menba monzonitic granite (after Whalen *et al.*, 1987)

中拉萨地块早白垩世 A 型花岗岩数据来源: Qu *et al.*, 2012; Chen *et al.*, 2014; 解龙等, 2015; Li *et al.*, 2020; 王欣欣等, 2021; 刘洪等, 2022

Data source of Early Cretaceous A-type granite in the Central Lhasa subterranean: Qu *et al.*, 2012; Chen *et al.*, 2014; Xie Long *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2020; Wang Xinxin *et al.*, 2021; Liu Hong *et al.*, 2022

0.18%) 和 CaO (平均 0.63%) 含量明显更低, 而全碱含量 (平均 8.92%) 以及 Nb (平均 27.90×10^{-6})、Y (平均 50.46×10^{-6})、Ga (平均 22.50×10^{-6})、REE (平均 163.80×10^{-6}) 含量要明显高于班戈高分异 I 型花岗岩 (平均含量分别为 7.53%, 12.45×10^{-6} , 20.45×10^{-6} , 17.93×10^{-6} , 63.55×10^{-6} ; 王楠等, 2020), 并且中拉萨地块已报道的 A 型花岗岩也表现出了这种区别于高分异 I 型花岗岩的特征 (Qu *et al.*, 2012; Chen *et al.*, 2014; 解龙等, 2015; Li *et al.*, 2020; 王欣欣等, 2021; 刘洪等, 2022)。门巴二长花岗岩的主要造岩矿物为石英、长石, 铁镁质暗色矿物含量较低, 这些特征在中拉萨地块已报道的早白垩世 A 型花岗岩中也有体现 (Qu *et al.*, 2012; Li *et al.*, 2020; 王欣欣等, 2021; 刘洪等, 2022)。综上所述, 判断门巴二长花岗岩属于 A 型花岗岩。

A 型花岗岩在以往通常是被定义为碱性、无水和非造山的花岗岩, 随着研究的深入, 发现 A 型花岗岩不仅可以形成于地幔柱或热点型环境, 而且也可以是产于碰撞造山后期伸展的构造环境 (Eby, 1990), 因此将 A 型花岗岩分为两个亚类, A1 型和 A2 型。其中 A1 型花岗岩类似于大洋岛弧玄武岩 (OIB), 被认为是形成于非造山环境, 而 A2 型花岗岩类似于岛弧玄武岩 (IAB), 被认为是形成于同碰撞或后碰撞环境 (Eby, 1992)。A1 与 A2 花岗岩在已有研究表明, 来自下地壳麻粒岩部分熔融形成的

微量元素中明显的区别在于 Y/Nb 与 Rb/Nb 值, 前者具有较低的比值, 相反后者具有较高的比值 (Eby, 1992)。门巴二长花岗岩具有较高的 Rb ($208 \times 10^{-6} \sim 282 \times 10^{-6}$, 平均 258×10^{-6}) 和 Y ($24.7 \times 10^{-6} \sim 80.3 \times 10^{-6}$, 平均 50.5×10^{-6}) 元素含量以及相对较低的 Nb ($19.2 \times 10^{-6} \sim 41.8 \times 10^{-6}$, 平均 27.9×10^{-6}) 含量, Y/Nb 与 Rb/Nb 值分别为 1.07~2.42、6.70~12.16, 平均值分别为 1.77、9.83; 在 Rb/Nb-Y/Nb 图解 (图 8a) 和 Nb-Y-Ce 三角图解 (图 8b) 中, 门巴二长花岗岩样品与中拉萨地块已报道的早白垩世 A 型花岗岩同样位于 A2 型花岗岩的区域。因此, 判断早白垩世门巴二长花岗岩属于 A2 型花岗岩。

4.2.2 岩石成因与岩浆源区

A 型花岗岩的成因通常有几种岩浆来源, 包括: ① 下地壳麻粒岩部分熔融 (Collins *et al.*, 1982; Whalen *et al.*, 1987; King *et al.*, 1997); ② 幔源玄武质岩石的部分熔融 (Turner *et al.*, 1992a; Frost *et al.*, 1999; Haapala *et al.*, 2005); ③ 上地壳中的钙碱性岩石的减压熔融 (Patiño Douce, 1997); ④ 地幔分异的玄武质岩浆的分离结晶与同化混染作用 (AFC) 直接形成 (Sparks and Marshall, 1986; Foland and Allen, 1991; Turner *et al.*, 1992b); ⑤ 地幔部分熔融形成的玄武质岩浆与地壳部分熔融形成的中酸性岩浆混合形成 (Kerr and Fryer, 1993)。A 型花岗岩通常具有强过铝质的特征 (Dooley and

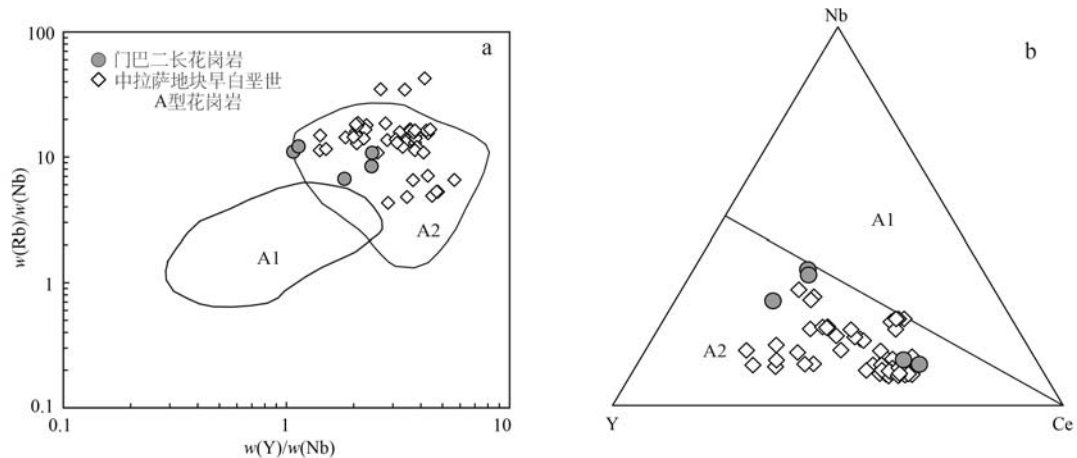


图 8 门巴 A 型花岗岩 Rb/Nb-Y/Nb 图解 (a, 据 Ebly, 1992) 和 Nb-Y-Ce 图解 (b, 据 Ebly, 1992)

Fig. 8 Rb/Nb-Y/Nb diagrams (a, after Ebly, 1992) and Nb-Y-Ce diagrams (b, after Ebly, 1992) of the Menba A-type granite

A1—非造山型花岗岩; A2—后碰撞型花岗岩; 中拉萨地块早白垩世 A 型花岗岩数据来源: Qu *et al.*, 2012; Chen *et al.*, 2014; 解龙等, 2015; Li *et al.*, 2020; 王欣欣等, 2021; 刘洪等, 2022

A1—anorogenic granite; A2—post-collision granite; Data Source of early cretaceous A-type granite in the Central Lhasa Subterranean:

Qu *et al.*, 2012; Chen *et al.*, 2014; Xie *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2021; Liu *et al.*, 2022

Patiño Douce, 1996; Patiño Douce and Beard, 1996), 而门巴二长花岗岩具有弱过铝质-强过铝质过渡的性质, 但更偏向于弱过铝质 (图 5c)。Creaser 等 (1991) 的实验表明残余的下地壳麻粒岩比初始源岩更富集铝、钙、镁而更亏损硅、钾, 这很难形成高硅、高碱、低钙和低镁的门巴二长花岗岩。门巴二长花岗岩中的锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-2.7 \sim +2.6$, 具有不均一的 Hf 同位素组成, 这表明门巴二长花岗岩由两种不同性质的岩浆混合而成, 这很可能是幔源岩浆的底侵导致的 (Griffin *et al.*, 2002; Belousova *et al.*, 2006; Hawkesworth *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2022), 并且 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值明显高于以当雄二长花岗岩为代表的中拉萨地块古老基底的衍生熔体 [$\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = -25.5 \sim -16.0$, Zhu *et al.*, 2011], 说明存在部分幔源玄武质熔体的输入, 因此门巴二长花岗岩不可能源于纯地壳或纯地幔。门巴二长花岗岩的 SiO_2 含量较高, 介于 $69.69\% \sim 75.81\%$, 平均 73.84% (表 3), 具有高硅的特征, 以往的研究表明通过 AFC 过程形成的高硅岩石通常伴随着广泛的幔源铁镁质岩浆的分异结晶作用 (Wilson, 1993), 然而在门巴地区在白垩世并没有相关的报道。

关于门巴二长花岗岩的成因, 用地壳和地幔熔体相互混合来解释比较合理, 原因如下: ① Nb 与 Ta 为强不相容元素, 在变质作用和底侵作用中较稳定,

因此可以作为判断原始岩浆源区的依据 (Barth *et al.*, 2000; Pfänder *et al.*, 2007); 地幔熔体的 Nb/Ta 值为 17.5 左右 (Green, 1995), 大陆地壳的 Nb/Ta 值要低的多, 仅为 11 左右 (Taylor and McLennan, 1985)。门巴二长花岗岩的 Nb/Ta 值为 $9.01 \sim 13.12$, 说明门巴二长花岗岩的岩浆可能起源于地壳但有不同程度的幔源物质的加入; ② 在微量元素蛛网图中, 门巴二长花岗岩的微量元素特征与中拉萨地块早白垩世 A 型花岗岩特征相似 (图 6b), 暗示岩浆具有同源性, 而中拉萨地块早白垩世 A 型花岗岩基本都源于地壳与地幔熔体的混合作用; ③ 前文已述, 门巴二长花岗岩的锆石 Hf 同位素特征表明其存在幔源物质的输入, 这种 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值在球粒陨石均一储库附近 [$\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = -2.7 \sim +2.6$] 以及相对古老的地壳模式年龄 ($1353 \sim 1016$ Ma) 的特征, 在中拉萨地块已报道的同期壳幔混源的岩浆岩中也有体现 (图 9a、9b; 周长勇等, 2008; Zhu *et al.*, 2009a; 姜昕等, 2010; Chen *et al.*, 2014; Cao *et al.*, 2016; 高家昊等, 2016); ④ 在微量元素蛛网图中 (图 6b), Nb 显示出相对亏损的特征, 并且 Nb_N 值介于 $26.9 \sim 58.6$, 平均 39.1, 体现出地壳组分特征 (Barth *et al.*, 2000); ⑤ 门巴二长花岗岩 Ba 和 Sr 的强烈亏损 (图 6b) 也反映出其可能是壳源物质低程度部分熔融的产物 (Harris and Inger, 1992)。

锆石在岩浆演化中具有良好的稳定性,因此锆石 Hf 同位素可以作为讨论岩浆岩源区的一种可靠方式 (Griffin *et al.*, 2002)。门巴二长花岗岩的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化相对较大 ($-2.7 \sim +2.6$, 平均 -0.96), 主要为负值, 指示门巴二长花岗岩起源于古老下地壳的部分熔融并混有少量的幔源物质。而在早白垩世, 中拉萨地块大部分的岩浆岩起源于中拉萨地块古老基底的部分熔融, 并且具有从老到新, 其 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值由负到正的趋势指示壳幔混合作用逐渐增强, 幔源物质对岩浆的贡献逐渐增加 (图 9a)。因此, 本文

认为门巴二长花岗岩可能是起源于中拉萨地块古老下地壳的部分熔融, 并且存在少量幔源基性物质的加入。此外, Sylvester (1998) 对后碰撞型花岗岩的脱水熔融实验结果表明, 起源于泥质岩源区的花岗岩通常具有低 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 值 (<0.4) 以及低的 $\text{FeO}^{\text{T}} + \text{MgO} + \text{TiO}_2$ ($<4\%$)。门巴二长花岗岩的 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 值、 $\text{FeO}^{\text{T}} + \text{MgO} + \text{TiO}_2$ 含量较低, 分别为 $0.06 \sim 0.10$ 、 $1.08\% \sim 2.62\%$, 因此推测门巴二长花岗岩很可能起源于泥质岩源区。在 $\text{Rb}/\text{Ba}-\text{Rb}/\text{Sr}$ (图 9c) 图中, 门巴二长花岗岩与早白垩世 A 型花岗岩的源区都显示

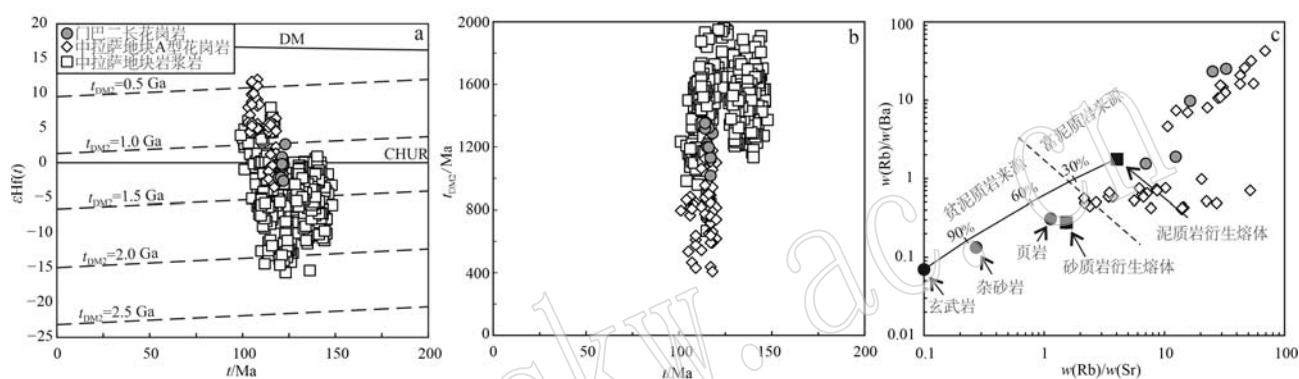


图 9 门巴二长花岗岩 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)-t$ 图解 (a, 据 Blichert-Toft and Albarède, 1997; Griffin *et al.*, 2000, 2002), $t_{\text{DM}2}-t$ 图解 (b) 和 $\text{Rb}/\text{Ba}-\text{Rb}/\text{Sr}$ 图解 (c, 据 Sylvester, 1998)

Fig. 9 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)-t$ diagram (a, after Blichert-Toft and Albarède, 1997; Griffin *et al.*, 2000, 2002), $t_{\text{DM}2}-t$ diagram (b) and $\text{Rb}/\text{Ba}-\text{Rb}/\text{Sr}$ diagram (c, after Sylvester, 1998) of Menba monzonitic granite

中拉萨地块 A 型花岗岩数据来源: Qu *et al.*, 2012; Chen *et al.*, 2014; 解龙等, 2015; Li *et al.*, 2020; 王欣欣等, 2021; 刘洪等, 2022; 中拉萨地块岩浆岩数据来源: 周长勇等, 2008; Zhu *et al.*, 2009a, 2011; 姜昕等, 2010; 张晓倩等, 2012; Chen *et al.*, 2014; 高家昊等, 2016; Cao *et al.*, 2016; 张士贞等, 2021

Data source of Early Cretaceous A-type granite in the Central Lhasa subterranean: Qu *et al.*, 2012; Chen *et al.*, 2014; Xie Long *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2020; Wang Xinxin *et al.*, 2021; Liu Hong *et al.*, 2022; Data Source of magmatic rock in the Central Lhasa Subterranean: Zhou Changyong *et al.*, 2008; Zhu *et al.*, 2009a, 2011; Jiang Xin *et al.*, 2010; Zhang Xiaoqian *et al.*, 2012; Chen *et al.*, 2014; Gao Jiahao *et al.*, 2016; Cao *et al.*, 2016; Zhang Shizhen *et al.*, 2021

出了富泥质岩的特征, 同样支持了这种推断。

高度不相容元素与中度不相容元素的比值, 通常用于区分部分熔融与分异结晶的趋势 (Allègre and Minster, 1978)。在门巴二长花岗岩 $\text{La}/\text{Sm}-\text{La}$ 图解 (图 10a) 和 $\text{Ce}/\text{Sm}-\text{Ce}$ (图 10b) 图解中, 其比值变化不大, 在图解中比较平缓, 表现出结晶分异趋势。另一方面, 前人的研究认为花岗岩中某种元素的亏损是由于该元素的矿物结晶分异所引起的 (Chappell and White, 1992; Chappell, 1999; Wu *et al.*, 2003)。门巴二长花岗岩亏损 Eu 、 Ti 、 Sr 、 P 、 Nb 、 Ba 等, 暗示门巴二长花岗岩母岩浆在演化的过程中经历了富钛富磷矿物、铁镁矿物的分离结晶。在分离

结晶判别图中 (图 11a~11e), SiO_2 与主要氧化物显示出了明显的负相关趋势, 指示门巴二长花岗岩在形成的过程中发生了长石类矿物 (如钾长石、斜长石)、铁镁矿物 (如黑云母、角闪石)、含磷 (磷灰石) 矿物以及含钛矿物的分离结晶。同时, 在 $\text{Eu}-\text{Sr}$ 图解 (图 11f)、 $\text{Ba}-\text{Sr}$ 图解 (图 11g)、 $\text{Rb}/\text{Sr}-\text{Ba}$ 图解 (图 11h) 中指示了门巴二长花岗岩在形成的过程中经历的分离结晶中分离的矿物以钾长石为主, 其次是角闪石以及少量的斜长石和黑云母。

综上所述, 门巴二长花岗岩起源于地壳与地幔熔体的混合作用, 以壳源为主, 存在以钾长石为主的分离结晶作用。

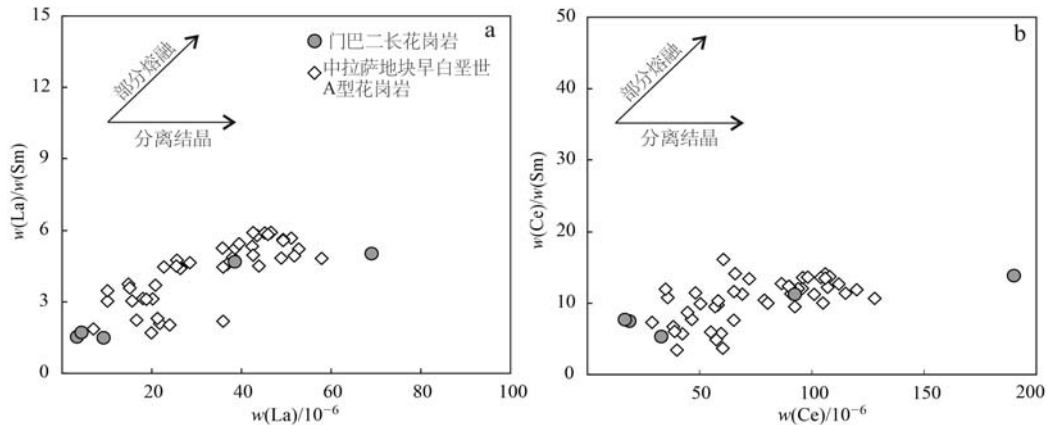


图 10 门巴二长花岗岩 La/Sm-La 图解(a)和 Ce/Sm-Ce 图解(b) (据 Allègre and Minster, 1978)

Fig. 10 La/Sm-La diagram (a) and Ce/Sm-Ce diagram (b) of the Menba monzonitic granite (after Allègre and Minster, 1978)

中拉萨地块早白垩世 A 型花岗岩数据来源: Qu *et al.*, 2012; Chen *et al.*, 2014; 解龙等, 2015; Li *et al.*, 2020; 王欣欣等, 2021; 刘洪等, 2022

Data source of Early Cretaceous A-type granite in the Central Lhasa subterranean: Qu *et al.*, 2012; Chen *et al.*, 2014; Xie Long *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2020; Wang Xinxin *et al.*, 2021; Liu Hong *et al.*, 2022

4.3 深部动力学机制

门巴二长花岗岩与中拉萨地块已经报道的早白垩世 A 型花岗岩同样属于陆陆碰撞相关的 A2 型花岗岩 (Qu *et al.*, 2012; Chen *et al.*, 2014; 解龙等, 2015; Li *et al.*, 2020; 王欣欣等, 2021; 刘洪等, 2022)。早期研究认为 A 型花岗岩代表的是碱性、无水、非造山的构造环境, 但 Whalen 等 (1987) 认为 A 型花岗岩与伸展的构造背景相关。后来, Eby (1992) 将 A 型花岗岩分为 A1 和 A2 型花岗岩, 前者代表非造山的构造环境, 后者产于后碰撞环境; 洪大卫等 (1995) 根据 A 型花岗岩的特征, 将 A 型花岗岩划分为 AA 型和 PA 型, 分别对应 A1 和 A2 型花岗岩, 表明 A 型花岗岩属于陆陆后碰撞的伸展构造背景已得到普遍共识 (Zhao *et al.*, 2008; Jiang *et al.*, 2009; Wong *et al.*, 2009; Goodenough *et al.*, 2010; Qu *et al.*, 2012)。

如前文所述, 对于中拉萨地块发育的早白垩世岩浆活动的深部动力学机制主要争议有: ① 新特提斯洋北向俯冲的影响; ② 新特提斯洋北向俯冲与班公湖-怒江洋南向俯冲双向俯冲作用; ③ 班公湖-怒江洋南向俯冲、板片回转以及之后重力作用下发生的板片断离作用; ④ 拉萨-羌塘地块碰撞后岩石圈伸展的背景。

对于拉萨地块中北部的大规模早白垩世岩浆作用, 一些学者将其归因于新特提斯洋北向低角度俯

冲的影响 (Zhang *et al.*, 2004, 2012a; Kapp *et al.*, 2005, 2007; Leier *et al.*, 2007)。然而, 在低角度俯冲的模型中, 一是形成隔热层, 不存在交代的软流圈地幔楔, 因此不会发育岛弧岩浆岩; 二是在俯冲带的前缘发育埃达克岩 (Gutscher *et al.*, 2000)。朱弟成等 (2008b) 报道的中拉萨地块措勤地区表明在中拉萨地块早白垩世发生了以则弄群为代表的大规模火山活动, 同时在南拉萨地块也发育有同期的埃达克岩 (Zhu *et al.*, 2009b) 和花岗岩侵入 (朱弟成等, 2008a), 表明在早白垩世拉萨地块下方应该存在流体交代的地幔楔; 而且已有的资料表明在拉萨地块中北部发育的广泛的早白垩世岩浆岩多不具有埃达克质岩石的特征 (朱弟成等, 2006), 这与低角度俯冲模型矛盾。另外, 部分学者认为拉萨地块中北部的大规模早白垩世岩浆作用是由于新特提斯洋北向正常角度的俯冲 (刘伟等, 2012; Dai *et al.*, 2015), 但拉萨地块在白垩纪之后发生了显著的地壳缩短, 并且新特提斯洋俯冲带与中拉萨地块早白垩世的岩浆弧的距离相对较远 (Kapp *et al.*, 2005), 这用正常角度的俯冲模型来解释是不合理的, 因此判断中拉萨地块门巴地区发育的 A 型花岗岩与新特提斯洋的演化没有太大关联。

对于门巴二长花岗岩的深部动力学机制, 本文认为可能是班公湖-怒江洋板片俯冲消减闭合之后, 在拉萨-羌塘地块碰撞过程中班公湖-怒江板片发生

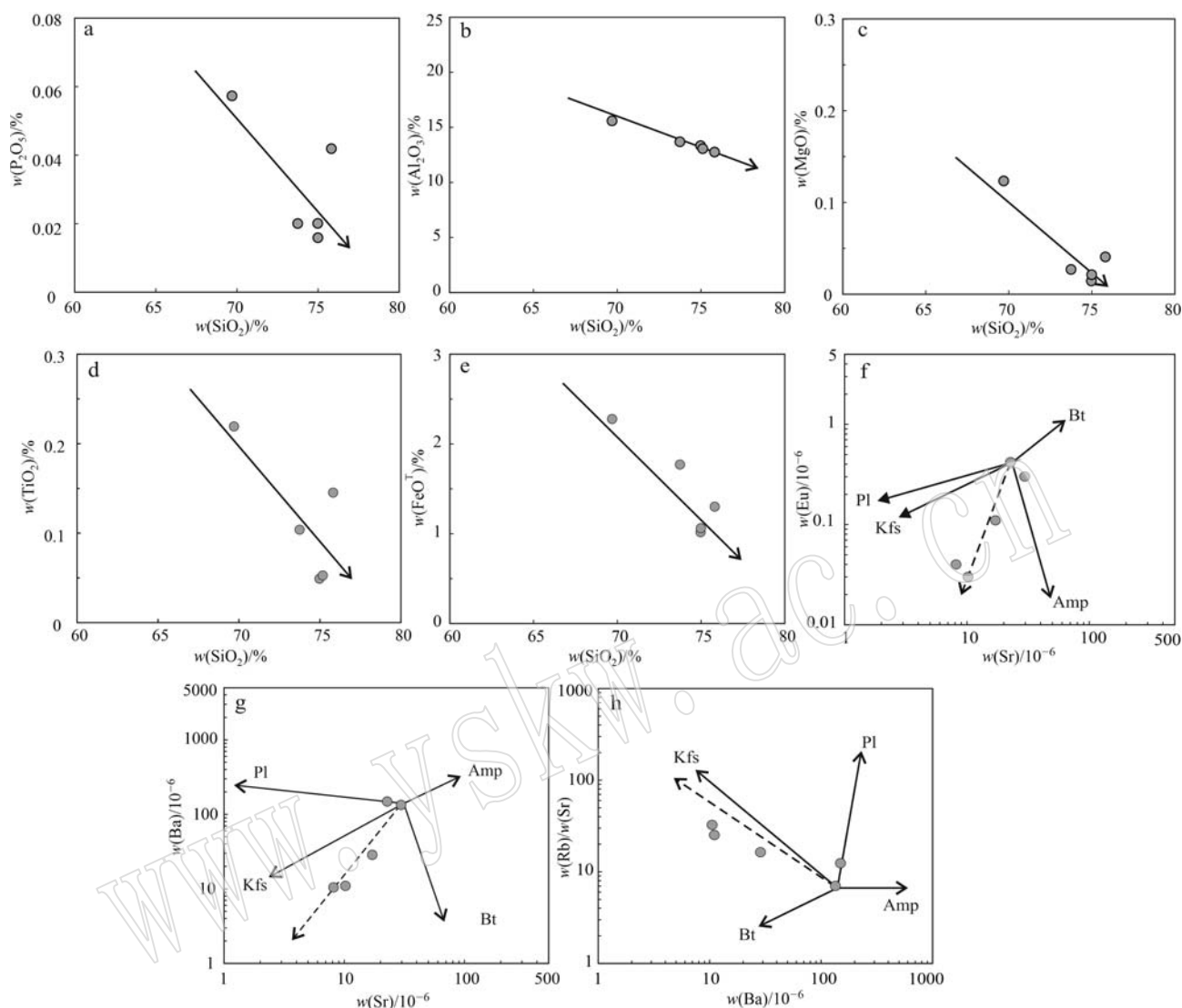


图 11 门巴二长花岗岩分离结晶判别图解(f~h 据 Rollinson, 1993)

Fig. 11 separation crystallization discrimination diagrams of the Menba monzonitic granite (f~h after Rollinson, 1993)

Kfs—钾长石; Pl—斜长石; Bt—黑云母; Amp—角闪石

Kfs—K-feldspar; Pl—plagioclase; Bt—biotite; Amp—amphibole

板片回转或者断离的产物。门巴二长花岗岩富钾, 体现出了其后碰撞岩浆岩的特征(曹毅等, 2008)。在门巴二长花岗岩构造环境判别图(图 12)中, 门巴二长花岗岩与中拉萨地块已报道的 A 型花岗岩同样位于后碰撞花岗岩的区域, 进一步支持了其属于碰撞后岩石圈伸展的构造环境。前人的研究表明, 早白垩世对于中拉萨地块很有可能是重要的构造演变时间节点, Kapp 等(2007)识别出北拉萨地块尼玛地区的地层在早白垩世(125~118 Ma)由海相转为陆相; Zhu 等(2009a)将中、北拉萨地块早白垩世岩浆岩幔源组分的明显增加归因于班公湖-怒江洋俯

冲板片的断离; 在申扎地区的发育的大规模早白垩世的酸性侵入岩是班公湖-怒江洋板片断离的产物(张亮亮等, 2011; Zhu *et al.*, 2011; Chen *et al.*, 2014); 桑巴地区的后碰撞花岗岩(121~117 Ma)揭示了班公湖-怒江缝合带的碰撞造山作用结束于早白垩世, 拉萨地块中北部由挤压的环境转换为伸展的环境(和钟铎等, 2006)。此外, Eby(1992)对于 A2 型花岗岩的定义是经历过陆-陆碰撞或岛弧岩浆作用之后的大陆地壳或者板下地壳的部分熔融, 对于 A2 型花岗岩的构造背景具有指示作用。前文已述, 门巴二长花岗岩与中拉萨地块已报道的早白垩世 A

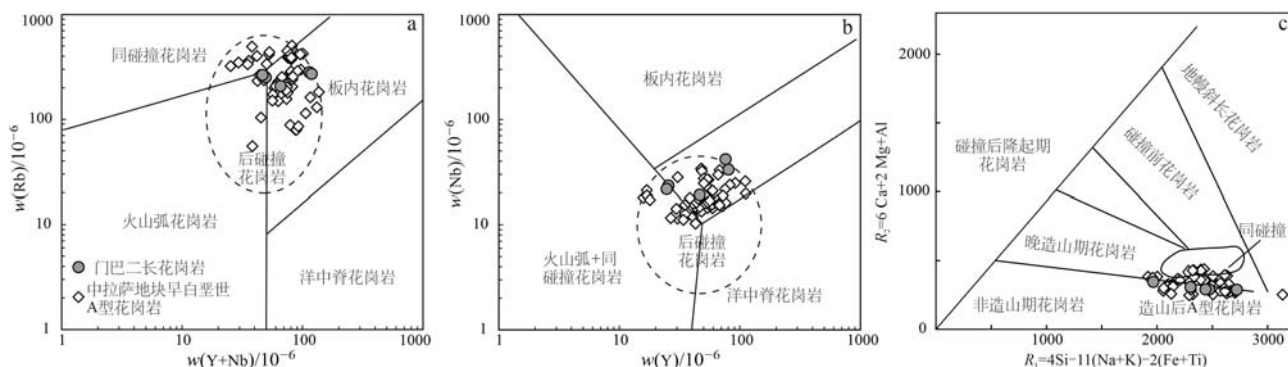


图 12 门巴二长花岗岩 Rb-(Y+Nb)图解(a, 据 Pearce *et al.*, 1984)、Nb-Y 图解(b, 据 Pearce *et al.*, 1984)和 R_2-R_1 图解(c, 据 Batchelor and Bowden, 1985)

Fig. 12 Rb-(Y+Nb) diagrams (a, after Pearce *et al.*, 1984;), Nb-Y diagrams (b, after Pearce *et al.*, 1984;) and R_2-R_1 diagrams (c, after Batchelor and Bowden, 1985) of Menba monzonitic granite

中拉萨地块早白垩世 A 型花岗岩数据来源: Qu *et al.*, 2012; Chen *et al.*, 2014; 解龙等, 2015; Li *et al.*, 2020; 王欣欣等, 2021; 刘洪等, 2022

Data Source of early cretaceous A-type granite in the Central Lhasa Subterrane: Qu *et al.*, 2012; Chen *et al.*, 2014; Xie *et al.*, 2015;

Li *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2021; Liu *et al.*, 2022

型花岗岩同属于 A2 型花岗岩, 并且班公湖-怒江洋闭合于早白垩世, 结合岩石成因, 说明这一系列 A2 型花岗岩源于陆-陆碰撞过后的大陆地壳的部分熔融。因此可以判断, 早白垩世门巴二长花岗岩与中拉萨地块中北部的 A 型花岗岩同样处于班公湖-怒江洋闭合后, 拉萨-羌塘地块碰撞后岩石圈伸展的构造环境中 (Qu *et al.*, 2012; Chen *et al.*, 2014; 解龙等, 2015; Li *et al.*, 2020; 王欣欣等, 2021; 刘洪等, 2022)。

已有研究认为狮泉河-纳木错蛇绿岩带是班公湖-怒江洋南向俯冲所形成的弧后盆地, 其演化时间为中侏罗世—早白垩世 (Zhu *et al.*, 2011, 2013; Xu *et al.*, 2014; Zeng *et al.*, 2018), 这为班公湖-怒江洋的南向俯冲提供了有力的依据。近年来越来越多的学者认为中拉萨地块早白垩世晚期的岩浆活动与班公湖-怒江洋的南向俯冲、板片回转以及随后的板片断离作用有密切的联系 (莫宣学等, 2005; 潘桂棠等, 2006; 朱弟成等, 2009; 刘伟等, 2010; 张晓倩等, 2010, 2012; 于玉帅等, 2011; Zhu *et al.*, 2011; Qu *et al.*, 2012; 张予杰等, 2014; Chen *et al.*, 2014; 周华等, 2016; 高家昊等, 2016; 李跃等, 2017; Li *et al.*, 2020; 罗安波, 2022; 刘洪等, 2022)。门巴二长花岗岩的微量元素具有相对富集大离子亲石元素以及相对亏损高场强元素的特征 (图 6b), 这与和大洋俯冲相关的岛弧岩浆岩的地球化学特征类似 (Pearce *et al.*, 1995; Shinjo *et al.*,

1999), 暗示其与班公湖-怒江洋板片俯冲有关。虽然班公湖-怒江缝合带的演化问题仍存在争议 (Zhu *et al.*, 2016), 但目前已有的研究表明, 在中拉萨地块广泛发育的早白垩世岩浆岩 (约 110 Ma), 幔源组分对岩浆的贡献出现了明显的增加 (Zhu *et al.*, 2009a; 朱弟成等, 2009), 表明在此时期存在幔源物质加入到岩浆源区, 这与本文对于岩浆源区的认识相符, 暗示了此时期在地壳下方存在板片窗的打开, 班公湖-怒江洋板片很可能发生了断离; Zhu 等 (2011) 对拉萨地块进行 4 个南北向剖面的 Hf 同位素填图工作也验证了这种推论。在早白垩世, 拉萨地块中北部发育了一系列特殊的伸展相关的岩石组合, 包括板内玄武岩 (Chen *et al.*, 2014; 王力圆等, 2016)、双峰式火山岩 (吴浩等, 2014)、埃达克岩 (Wu *et al.*, 2015a, 2015b) 和 A 型花岗岩 (Qu *et al.*, 2012; Chen *et al.*, 2014; 解龙等, 2015; Li *et al.*, 2020; 王欣欣等, 2021), 这些岩浆岩与门巴 A 型花岗岩是同期岩浆活动的产物, 这为早白垩世门巴地区受到班公湖-怒江洋板片断离影响提供了进一步的证据。在中拉萨地块中部的申扎-措勤一带还发育了一系列早白垩世高钾钙碱性的 I 型花岗岩, 它们的成因为地壳重熔的过程中幔源物质的混入 (张亮亮等, 2011; 张晓倩等, 2012), 相对于门巴二长花岗岩更负的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 和更古老的 t_{DM2} 表明在岩石形成的过程中幔源物质的贡献更少或起源于更古老的地壳, 但它们与门巴二长花岗岩同属于中拉萨

地块早白垩世发生的大规模壳幔混合作用的一部分 (Zhu *et al.*, 2011), 暗示整个中拉萨地块的早白垩世岩浆岩都有类似的成因, 这可能与班公湖-怒江洋的板片断离有密切的联系。

因此, 门巴二长花岗岩既不是新特提斯洋北向俯冲的结果, 也不是受到班公湖-怒江洋南向俯冲的直接影响, 更可能是在早白垩世, 班公湖-怒江洋俯冲板片消减闭合之后, 拉萨地块与羌塘地块发生碰撞, 之后随着南向俯冲的班公湖-怒江洋俯冲板片断离形成板片窗, 诱发上覆岩石圈的伸展, 同时软流圈地幔物质通过板片窗上涌, 引起岩石圈地幔底侵, 诱发地壳发生部分熔融从而形成门巴地区的早白垩世 A 型花岗岩 (图 13)。值得注意的是, 前人的研究表

明拉萨-羌塘地块的碰撞具有东部早、西部晚的特征 (Yin and Harrison, 2000; Kapp *et al.*, 2007; Zhu *et al.*, 2011); 并且 Zeng 等 (2018) 认为相对于西部, 狮泉河-纳木错蛇绿岩带东部的蛇绿岩形成于更成熟的弧后盆地环境, 这很可能是由班公湖-怒江洋东部的俯冲速度要比西部更快导致的。而门巴地区 A 型花岗岩的发现在一定程度上可以作为班公湖-怒江洋东部板片断离的标志, 其形成时间 (121 Ma) 早于班公湖怒江洋中-西部板片断离的时间 ($113 \pm 5 \text{ Ma}$; Zhu *et al.*, 2011), 结合区域上壳幔混源成因的岩浆岩的形成时代具有东部早、中-西部晚的分布特征 (图 1b), 推断班公湖-怒江洋可能在东西方向上并不是同时闭合的, 而是东部要早于中-西部。

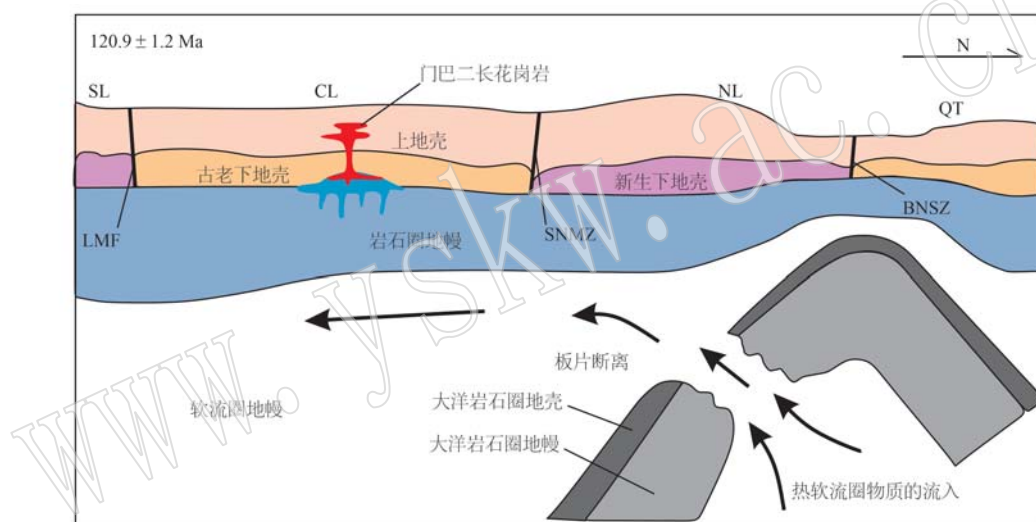


图 13 门巴二长花岗岩形成环境示意图 (修改自 Li *et al.*, 2018)

Fig. 13 Sketch map showing the formation environment of Menba monzonitic granite (modified from Li *et al.*, 2018)

LMF—洛巴堆-米拉山断裂带; SNMZ—狮泉河-纳木错蛇绿混杂岩带; BNSZ—班公湖-怒江缝合带; QT—羌塘地块; SL—南拉萨地块;

CL—中拉萨地块; NL—北拉萨地块

LMF—Luobadui-Milashan fault; SNMZ—Shiquan River-Nam Tso ophiolite melange zone; BNSZ—Bangong-Nujiang suture zone;

QT—Qiangtang subterranean; SL—Southern Lhasa subterranean; CL—central Lhasa subterranean; NL—northern Lhasa subterranean

5 结论

(1) 门巴二长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 $120.9 \pm 0.8 \text{ Ma}$, 表明其侵位时代为早白垩世晚期, 与中拉萨地块早白垩世的岩浆活动时间一致。

(2) 门巴二长花岗岩的地球化学特征表明其属于过铝质的高钾钙碱性-钾玄岩系列的 A2 型花岗岩, 起源于古老下地壳并混有少量地幔物质。

(3) 门巴二长花岗岩形成于班公湖-怒江洋闭

合之后拉萨-羌塘地块的后碰撞背景下, 俯冲板片断离引起的软流圈上涌诱发的地壳部分熔融, 形成了以壳源为主并有少量地幔物质加入的母岩浆, 岩浆经历了以钾长石为主的分离结晶。

References

- Allègre C J and Minster J F. 1978. Quantitative models of trace element behavior in magmatic processes[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 38(1): 1~25.

- Barth M G, McDonough W F and Rudnic R L. 2000. Tracking the budget of Nb and Ta in the continental crust[J]. *Chemical Geology*, 165(3~4): 197~213.
- Batchelor R A and Bowden P. 1985. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters[J]. *Chemical Geology*, 48(1~4): 43~55.
- Belousova E A, Griffin W L and O'Reilly A S Y. 2006. Zircon crystal morphology, trace element signatures and Hf isotope composition as a tool for petrogenetic modelling: Examples from eastern Australian granitoids[J]. *Journal of Petrology*, 47(2): 329~353.
- Blichert-Toft J and 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 Y H, Santosh M, *et al.* 2018. Petrogenesis and metallogenic implications of Cretaceous magmatism in Central Lhasa, Tibetan Plateau: A case study from the Lunggar Fe skarn deposit and perspective review[J]. *Geological Journal*, 54(4): 2 323~2 346.
- Cao M J, Qin K Z, Li G M, *et al.* 2016. Tectono-magmatic evolution of Late Jurassic to Early Cretaceous granitoids in the west central Lhasa subterrane, Tibet[J]. *Gondwana Research*, 39: 386~400.
- Cao Yi, Du Yangsong, Cai Chunlin, *et al.* 2008. Mesozoic A-type granitoids and xenoliths in the Lujiang-Zongyang Area, Anhui Province: Significance in post-collisional magmatic evolution[J]. *Geological Journal of China Universities*, 14(4): 565~576 (in Chinese with English abstract).
- Chappell B W. 1999. Aluminium saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites[J]. *Lithos*, 46(3): 535~551.
- Chappell B W, White A J R. 1992. I- and S-type granites in the Lachlan Fold Belt[J]. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Science*, 83(1~2): 1~26.
- Chen Guoneng, Wang Yong, Chen Zhen, *et al.* 2017. Advance and consideration on the mechanism of formation and emplacement of granitic magma[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(5): 1 489~1 497 (in Chinese with English abstract).
- Chen Y, Zhu D C, Zhao Z D, *et al.* 2014. Slab breakoff triggered ca. 113 Ma magmatism around Xainza area of the Lhasa Terrane, Tibet[J]. *Gondwana Research*, 26(2): 449~463.
- Chiu H Y, Chuang S L, Wu F Y, *et al.* 2009. Zircon U-Pb and Hf isotopic constraints from eastern Transhi Malayan batholiths on the pre-collisional magmatic and tectonic evolution in southern Tibet[J]. *Tectonophysics*, 477(1~2): 3~19.
- Chu M F, Chung S L, Song B, *et al.* 2006. Zircon U-Pb and Hf isotope constraints on the Mesozoic tectonics and crustal evolution of southern Tibet[J]. *Geology*, 34(9): 745~748.
- 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.
- Creaser R A, Price R C and Wormald R J. 1991. A-type granites revisited: Assessment of a residual-source model[J]. *Geology*, 19(2): 163~166.
- Cui Xiaoliang, Tang Juxing, Duo Ji, *et al.* 2011. Zircon U-Pb geochronology of quartz porphyry in Dongzhongla lead-zinc deposit, Tibet, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 38(5): 557~562 (in Chinese).
- Dai J G, Wang C S, Zhu D C, *et al.* 2015. Multi-stage volcanic activities and geodynamic evolution of the Lhasa terrane during the Cretaceous: Insights from the Xigaze forearc basin[J]. *Lithos*, 218~219: 127~140.
- Deng Y L, Lang X H, Wang X H, *et al.* 2021. Early mesozoic arc-back-arc system in the leading edge of the Tibetan Plateau[J]. *Lithos*, 406~407.
- Dong X, Zhang Z M, Liu F, *et al.* 2011b. 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.
- Dong X, Zhang Z M, Santosh M. 2010. Zircon U-Pb chronology of the Nyingtri group, southern Lhasa terrane, Tibetan Plateau: Implications for Grenvillian and Pan-African provenance and Mesozoic-Cenozoic metamorphism[J]. *The Journal of Geology*, 118(6): 677~690.
- Dong X, Zhang Z M, Santosh M, *et al.* 2011a. Late Neoproterozoic thermal events in the northern Lhasa terrane, South Tibet: Zircon chronology and tectonic implications[J]. *Journal of Geodynamics*, 52(5): 389~405.
- Dooley D F and Patiño Douce A E. 1996. Fluid-absent melting of F-rich phlogopite+rutile+quartz[J]. *American Mineralogist*, 81(1~2): 202~212.
- Du Dedao, Qu Xiaoming, Wang Genhou, *et al.* 2011. Bidirectional subduction of the Middle Tethys oceanic basin in the west segment of Bangonghu-Nujiang suture, Tibet: Evidence from zircon U-Pb LA-ICPMS dating and petrogeochemistry of arc granites[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(7): 1 993~2 002 (in Chinese with English abstract).
- Eby G N. 1990. The A-type granitoids: A review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis[J]. *Lithos*, 26(1~2): 115~134.
- Eby G N. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petroge-

- netic and tectonic implications[J]. *Geology*, 20(7): 641~644.
- Fan Shufang, Qu Xiaoming, Song Yang, *et al.* 2015. Genesis of the ore-forming granitoids of the Nixiong iron ore mine, Tibet, and their implications for the tectonic setting of mineralisation[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 39(2): 286~299(in Chinese).
- Fei Fan, Yang Zhusen, Liu Yingchao, *et al.* 2015. Petrogenetic epoch of the rock mass in the Lunggar iron deposit of Coqen County, Tibet[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 34(4): 568~580(in Chinese with English abstract).
- Fei Guangchun, Wen Chunqi, Wang Chengsong, *et al.* 2010a. Zircon SHRIMP U-Pb dating of the Dongzhongla Pb-Zn deposit, Mozhugongka County, Tibet[J]. *Geology in Chinese*, 37(2): 470~476(in Chinese).
- Fei Guangchun, Wen Chunqi, Wang Chengsong, *et al.* 2010b. Zircon SHRIMP U-Pb age and its geological significance in Dongzhongla all-govite, Mozhugongka area, eastern segment of Gangdise, Tibet, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 29(8): 1 138~1 142(in Chinese with English abstract).
- Foland K A and Allen J C. 1991. Magma sources for Mesozoic anorogenic granites of the white mountain magma series, New England, USA [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 109(2): 195~211.
- Frost C D, Frost B R, Chamberlain K R, *et al.* 1999. Petrogenesis of the 1.43 Ga Sherman batholith, SE Wyoming, USA: A reduced, rapakivi-type anorogenic granite[J]. *Journal of Petrology*, 40(12): 1 771~1 802.
- Gao Jiahao, Zeng Lingsen, Gao Lie, *et al.* 2016. Two episodes of Early Cretaceous magmatism in Geji area of the Lhasa Block, Tibet [J]. *Geological Bulletin of China*, 35(1): 55~70(in Chinese with English abstract).
- Gao Yiming, Chen Yuchuan, Tang Juxing. *et al.* 2009. SHRIMP U-Pb dating of zircon from quartz porphyry in the Yaguila Pb-Zn-Mo Deposit, Gongbujiangda County, Tibet and its geological implication[J]. *Acta Geological Sinica*, 83(10): 1 436~1 444(in Chinese with English abstract).
- Goodenough K M, Thomas R J, De Waele B, *et al.* 2010. Post-collisional magmatism in the central East African Orogen: The Maevarano suite of North Madagascar[J]. *Lithos*, 116(1): 18~34.
- Green T H. 1995. Significance of Nb/Ta as an indicator of geochemical processes in the crust-mantle system [J]. *Chemical Geology*, 120(3): 347~359.
- 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]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133~147.
- Griffin W L, Wang X, Jackson S E, *et al.* 2002. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes[J]. *Lithos*, 61: 237~269.
- Gutscher M A, Maury R, Eissen J P. 2000. Can slab melting be caused by flat subduction? [J] *Geology*, 28(6): 535~538.
- Haapala I, Rämö O T and Frindt S. 2005. Comparison of Proterozoic and Phanerozoic rift-related basaltic-granitic magmatism[J]. *Lithos*, 80(1~4): 1~32.
- Harris N B W and Inger S. 1992. Trace element modeling of pelite-derived granites [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 110(1): 46~56.
- Harris N B W, Inger S and Xu R H. 1990. Cretaceous plutonism in Central Tibet: An example of post-collision magmatism? [J]. *Journal of Volcanology and Geotherm Research*, 44: 21~32.
- Hawkesworth C J, Dhuime B, Pietranik A B, *et al.* 2010. The generation and evolution of the continental crust [J]. *Journal of the Geological Society*, 167(2): 229~248.
- He Zhonghua, Yang Deming and Wang Tianwu. 2006. The determination of early Cretaceous post-collision granitoids in Sangba area of Gangdese tectonic belt and its tectonic significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 25(3): 185~193(in Chinese with English abstract).
- Hong Dawei, Wang Shiguang, Han Baofu, *et al.* 1995. Tectonic-environmental classification of alkaline granites and their distinguishing marks [J]. *Science in China (Series B)*, 25(4): 418~426(in Chinese).
- Hoskin P W O and Black L P. 2000. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 18(4): 423~439.
- Ji W Q, Wu F Y, Chung S L, *et al.* 2009. Zircon U-Pb chronology and Hf isotopic constraints on the petrogenesis of Gangdese batholiths, southern Tibet[J]. *Chemical Geology*, 262: 229~245.
- Jiang N, Zhang S Q, Zhou W G, *et al.* 2009. Origin of a Mesozoic granite with A-type characteristics from the North China Craton: Highly fractionated from I-type Magmas? [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 158(1): 113~130.
- Jiang Xin, Zhao Zhidan, Zhu Dicheng, *et al.* 2010. Zircon U-Pb geochronology and Hf isotopic geochemistry of Jiangba, Bange and Xiongba granitoids in western Gangdese Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(7): 2 155~2 165(in Chinese with English abstract).
- Kapp P, Decelles P G, Gehrels G E, *et al.* 2007. Geological records of the Lhasa-Qiangtang and Indo-Asian collisions in the Nima area of central Tibet[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 119(7~8): 917~933.

- Kapp P, Yin A, Harrison T M, *et al.* 2005. Cretaceous-Tertiary shortening, basin development, and volcanism in central Tibet[J]. Geological Society of America Bulletin, 117: 865~878.
- Kerr A and Fryer B J. 1993. Nd isotope evidence for crust-mantle interaction in the generation of A-type granitoid suites in Labrador, Canada [J]. Chemical Geology, 104(1~4): 39~60.
- King P L, White A J R, Chappell B W, *et al.* 1997. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan Fold Belt, South-eastern Australia[J]. Journal of Petrology, 38(3): 371~391.
- Lang X H, Deng Y L, Wang X H, *et al.* 2020. Geochronology and geochemistry of volcanic rocks of the Bima Formation, southern Lhasa subterranean, Tibet: Implications for early Neo-Tethyan subduction[J]. Gondwana Research, 80: 335~349.
- Leier A L, Decelles P G, Kapp P, *et al.* 2007. Lower cretaceous strata in the Lhasa Terrane, Tibet, with implications for understanding the early tectonic history of the Tibetan plateau[J]. Journal of Sedimentary Research, 77(9~10): 809~825.
- Li H, Wang M, Zeng X W, *et al.* 2020. Slab break-off origin of 105 Ma A-type porphyritic granites in the Asa area of Tibet[J]. Geological Magazine, 157(8): 1 281~1 298.
- Li S M, Wang Q, Zhu D C, *et al.* 2018. One or two Early Cretaceous arc systems in the Lhasa Terrane, Southern Tibet[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 123(5): 3 391~3 413.
- Li Xiangyu, Ma Runze, Yi Liwen, *et al.* 2013. The determination and petrogenesis of Early Cretaceous post-collision granitoids in Coqen, Tibet[J]. Xinjiang Geology, 31(1): 57~64 (in Chinese with English abstract).
- Li Xiaowei, Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, *et al.* 2010. A discussion on how to discriminate A-type granite[J]. Geological Bulletin of China, 29(2/3): 278~285 (in Chinese with English abstract).
- Li Yue, Ding Feng, Lin Jichun, *et al.* 2017. LA-ICP-MS zircon U-Pb ages and geochemical characteristics of Tajilixialong granodiorite in Nuocang Area, Coqen, Xizang (Tibet) [J]. Geological Review, 63(2): 484~498 (in Chinese with English abstract).
- Liu Hong, Li Guangming, Li Wenchang, *et al.* 2022. Petrogenesis and tectonic setting of the late Early Cretaceous Kong Co A-type granite in the northern margin of Central Lhasa Subterranean, Tibet[J]. Acta Petrologica Sinica, 38(1): 230~252 (in Chinese with English abstract).
- Liu Wei, Li Fenqi, Yang Xiaoyong, *et al.* 2012. Zircon U-Pb age and geochemistry of Early Cretaceous rhyolite in Luozha area of Namling County, Tibet[J]. Geology in China, 39(5): 1 151~1 161 (in Chinese with English abstract).
- Liu Wei, Li Fenqi, Yuan Sihua, *et al.* 2010. Volcanic rock provenance of Zenong Group in Coqen area of Tibet: Geochemistry and Sr-Nd isotopic constraint[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 29(4): 267~376 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y S, Hu Z C, Zong Ke 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.
- Loiselle M C and Wones D R. 1979. Characteristics and origin of anorogenic Granites[J]. Geological Society of America Abstracts with Programs, 11(7): 468.
- Lundstrom C C and Glazner A F. 2016. Silicic Magmatism and the volcanic-plutonic connection[J]. Elements, 12(2): 91~96.
- Luo Anbo. 2022. Timing and Process of the Extinction of the Bangong-Nujiang Ocean: Insights from Early Cretaceous Sedimentary and Volcanic Rocks[D]. Changchun: Jilin University (in Chinese with English abstract).
- Maniar P D and Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids [J]. Geological Society of America Bulletin, 101(5): 635~643.
- Meng Fanyi. 2014. Mesozoic Magmatic Rocks in Mamba Area, Central Lhasa Subterranean: Geochronology, Geochemistry, and Geodynamic Implications[D]. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Mo Xuanxue, Dong Guochen, 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).
- 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: 225~242.
- Mo X X, Niu Y L, Dong G C, *et al.* 2008. Contribution of syn-collisional felsic magmatism to continental crust growth: A case study of the Paleogene Linzizong volcanic Succession in southern Tibet[J]. Chemical Geology, 250: 49~67.
- 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).
- Pan G T, Wang L Q, Li R S, *et al.* 2012. Tectonic evolution of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 53: 3~14.
- Pan Guitang, Wang Liqun, Yin Fuguang, *et al.* 2022. Researches on geological-tectonic evolution of Tibetan Plateau: A review, recent ad-

- vances, and directions in the future[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 42(2): 151~175 (in Chinese with English abstract).
- Patiño Douce A E. 1997. Generation of Metaluminous A-type granites by low-pressure melting of calc-alkaline granitoids[J]. *Geology*, 25(8): 743~746.
- Patiño Douce A E and Beard J S. 1996. Effects of P, $f_{(O_2)}$ and Mg/Fe ratio on dehydration melting of model metagreywackes[J]. *Journal of Petrology*, 37: 999~1 024.
- 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.
- Pearce J A and Peate D W. 1995. Tectonic Implications of the Composition of Volcanic ARC Magmas[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 23(1): 251~286.
- 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.
- Pfänder J A, Münker C, Stracke A, *et al.* 2007. Nb/Ta and Zr/Hf in ocean island basalts-implications for crust-mantle differentiation and the fate of Niobium[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 254(1): 158~172.
- Qu X M, Wang R J, Xin H B, *et al.* 2012. Age and petrogenesis of A-type granites in the middle segment of the Bangonghu-Nujiang suture, Tibetan plateau[J]. *Lithos*, 146~147: 264~275.
- Rollinson H R. 1993. *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation*[M]. Longman Scientific and Technical: 1~152.
- Shinjo R, Chung S L, Kato Y, *et al.* 1999. Geochemical and Sr-Nd isotopic characteristics of volcanic rocks from the Okinawa Trough and Ryukyu Arc: Implications for the evolution of a young, intracontinental back arc basin[J]. *Journal of Geophysical Research*, 104: 10 591~10 608.
- Soderlund 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: 311~324.
- Sparks R S J, Marshall L A. 1986. Thermal and mechanical constraints on mixing between mafic and silicic magmas[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 29(1~4): 99~124.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society of London Special Publications*, 42: 313~345.
- Sylvester P J. 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites[J]. *Lithos*, 45: 29~44.
- Taylor S R and McLennan S M. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications: 57~114.
- Turner S, Sandiford M and Foden J. 1992b. Some geodynamic and compositional constraints on "postorogenic" magmatism[J]. *Geology*, 20(10): 931~934.
- Turner S P, Foden J D and Morrison R S. 1992a. Derivation of some A-type magmas by fractionation of basaltic magma: An example from the Padthaway Ridge, South Australia[J]. *Lithos*, 28(2): 151~179.
- Wang C, Ding L, Liu Z C, *et al.* 2017a. Early Cretaceous bimodal volcanic rocks in the southern Lhasa terrane, south Tibet: Age, petrogenesis and tectonic implications[J]. *Lithos*, 268~271: 260~273.
- Wang J G, Hu X M, Garzanti E, *et al.* 2017b. The birth of the Xigaze forearc basin in southern Tibet[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 465: 38~47.
- Wang Li, Zeng Lingsen, Gao Li'e, *et al.* 2013. Early Cretaceous high Mg[#] and high Sr/Y clinopyroxene-bearing diorite in the southeast Gangdese batholith, Southern Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(6): 1 977~1 994(in Chinese with English abstract).
- Wang Liqiang, Xie Fuwei and Wang Yong. 2016. U-Pb geochronology and trace element compositions of zircon in biotite granite from the Bagaladong Pb-Zn Deposit, Tibet and their geological significance[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 35(6): 650~657(in Chinese with English abstract).
- Wang Liyuan, Zheng Youye, Gao Shunbao, *et al.* 2016. The discovery of the Early Cretaceous Zenong Group volcanic rocks and geological significance in Jiwa area in south of the Central Lhasa subterrane[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(5): 1 543~1 555(in Chinese with English abstract).
- Wang Nan, Liu Zhibo, Song Yang, *et al.* 2020. Chronology and petrogenesis of Early Cretaceous high-divergence granites in the Bango area of Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 36(2): 409~425(in Chinese with English abstract).
- Wang X H, Lang X H, Deng Y L, *et al.* 2022. Early Mesozoic magmatism records the tectonic evolution from syn-to post-collisional setting in the Central Lhasa subterrane, Tibet [J]. *Lithos*, 416: 106642.
- Wang Xinxin, Yan Guoqiang, Liu Hong, *et al.* 2021. genesis of Late Cretaceous Qusang 'gele granitite in Central Lhasa Block, Tibet: Constraints by geochemistry, zircon U-Pb geochronology, and Sr-Nd-Pb-Hf isotopes[J]. *Earth Science*, 46(8): 2 832~2 849(in Chinese with English abstract).

- Watson E B and Harrison T M. 1983. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effects in a variety of crustal magma types [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 64(2): 295~304.
- Weller O M, St-Onge M R, Rayner N, *et al.* 2016. Miocene magmatism in the western Nyainqentanglha Mountains of southern Tibet: An exhumed bright spot? [J]. *Lithos*, 245: 147~160.
- 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.
- Wilson B M. 1989. *Igneous Petrogenesis* [M]. London: Allen and Unwin.
- Wilson M. 1993. Magmatism and the geodynamics of basin formation [J]. *Sedimentary Geology*, 86(1~2): 5~29.
- Wong J, Sun M, Xing G F, *et al.* 2009. Geochemical and zircon U-Pb and Hf isotopic study of the Baijuhuajian metaluminous A-type granite: Extension at 125~100 Ma and its tectonic significance for South China [J]. *Lithos*, 112(3~4): 289~305.
- 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 H, Li C, Hu P Y, *et al.* 2015a. Early Cretaceous (100~105 Ma) adakitic magmatism in the Dachagou area, northern Lhasa terrane, Tibet: Implications for the Bangong-Nujiang Ocean subduction and slab break-off [J]. *International Geology Review*, 57(9~10): 1 172~1 188.
- Wu Hao, Li Cai, Hu Peiyuan, *et al.* 2014. The discovery of Early Cretaceous bimodal volcanic rocks in the Dachagou area of Tibet and its significance [J]. *Geological Bulletin of China*, 33(11): 1 804~1 814 (in Chinese with English abstract).
- Wu H, Li C, Xu M J, *et al.* 2015b. Early Cretaceous adakitic magmatism in the Dachagou area, northern Lhasa terrane, Tibet: Implications for slab roll-back and subsequent slab break-off of the lithosphere of the Bangong-Nujiang Ocean [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 97: 21~66.
- Wu Suoping, Wang Meiying and Qi Kaijing. 2007. Present situation of researches on A-type granites: A review [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(1): 57~66 (in Chinese with English abstract).
- Xie Long, Dun Du, Zhu Lidong, *et al.* 2015. Zircon U-Pb geochronology, geochemistry and geological significance of the Zhaduding A-type granites innorthern Gangdise, Tibet [J]. *Geology in China*, 42(5): 1 214~1 227 (in Chinese with English abstract).
- Xu M J, Li C, Zhang X J, *et al.* 2014. Nature and evolution of the Neotethys in central Tibet: Synthesis of ophiolitic petrology, geochemistry, and geochronology [J]. *International Geology Review*, 56(9): 1 072~1 096.
- Yakovlev P V and Clark M K. 2014. Conservation and redistribution of crust during the Indo-Asian collision [J]. *Tectonics*, 33(6): 1 016~1 027.
- Yang J S, Xu Z Q, Li Z L, *et al.* 2009. Discovery of an eclogite belt in the Lhasa block, Tibet: A new border for Paleo-Tethys? [J]. *Journal of Asian Earth Science*, 34(1): 76~89.
- Yin A and Harrison T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28(1): 211~280.
- Yu Yushuai, Gao Yuan, Yang Zhusen, *et al.* 2011. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating and geochemistry of intrusive rocks from Gunjiu iron deposit in the Nixiong ore field, Coqen, Tibet [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(7): 1 949~1 960 (in Chinese with English abstract).
- Zeng X W, Wang M, Fan J J, *et al.* 2018. Geochemistry and geochronology of gabbros from the Asa Ophiolite, Tibet: Implications for the Early Cretaceous evolution of the Meso-Tethys Ocean [J]. *Lithos*, 320~321: 192~206.
- Zhai Mingguo. 2017. Granites: Leading study issue for continental evolution [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(5): 1 369~1 380 (in Chinese with English abstract).
- Zhang K J, Xia B D, Wang G M, *et al.* 2004. Early Cretaceous stratigraphy, depositional environments, sandstone provenance, and tectonic setting of central Tibet, western China [J]. *GSA Bulletin*, 116(9~10): 1 202~1 222.
- Zhang K J, Zhang Y X, Tang X C, *et al.* 2012a. Late Mesozoic tectonic evolution and growth of the Tibetan plateau prior to the Indo-Asian collision [J]. *Earth-Science Reviews*, 114(3~4): 236~249.
- Zhang Liangliang, Zhu Dicheng, Zhao Zhidan, *et al.* 2011. Early Cretaceous granitoids in Xainza, Tibet: Evidence of slab break-off [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(7): 1 938~1 948 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Shizhen, Li Fenqi, Liu Han, *et al.* 2021. The Early Cretaceous gabbro in Yare area, middle Lhasa Block: Magmatism response to the slab break-off of the southward subduction Bangong-Nujiang Ocean lithosphere [J]. *Geological Bulletin of China*, 40(11): 1 852~1 864 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiaoqian, Zhu Dicheng, Zhao Zhidan, *et al.* 2010. Petrogenesis of the Nixiong pluton in Coqen, Tibet and its potential significance for the Nixiong Fe-rich mineralization [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(6): 1 793~1 804 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiaoqian, Zhu Dicheng, Zhao Zhidan, *et al.* 2012. Geochemistry,

- zircon U-Pb geochronology and in-situ Hf isotope of the Maiga batholith in Coqen, Tibet: Constraints on the petrogenesis of the Early Cretaceous granitoids in the central Lhasa Terrane[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(5): 1 615~1 634(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yujie, Liu Wei, Zhu Tongxing, *et al.* 2014. Zircon U-Pb age and geochemistry of Early Cretaceous intrusive rocks in Maiba area of Xainza County, Tibet[J]. *Geology in China*, 41(1): 50~60(in Chinese with English abstract).
- Zhang Y Z, Wang X L, Li J Y, *et al.* 2021. Oligocene leucogranites of the Gangdese batholith, Southern Tibet: Fractional crystallization of felsic melts from juvenile lower crust[J]. *Journal of Petrology*, 62(11): 1~29.
- Zhang Zeming, Dong Xin, Geng Guansheng, *et al.* 2010. Precambrian metamorphism of the northern Lhasa terrane, south Tibet and its tectonic implications[J]. *Acta Geologica Sinica*, 84(4): 449~456(in Chinese with English abstract).
- Zhang Z M, Dong X, Liu F, *et al.* 2012b. The Making of Gondwana: Discovery of 650 Ma HP granulites from the North Lhasa, Tibet[J]. *Precambrian Research*, 212~213: 107~116.
- Zhang Z M, Dong X, Santosh M, *et al.* 2014. Metamorphism and tectonic evolution of the Lhasa terrane, Central Tibet[J]. *Gondwana Research*, 25(1): 170~189.
- Zhao X F, Zhou M F, Li J W, *et al.* 2008. Association of Neoproterozoic A- and I-type granites in South China: Implications for generation of A-type granites in a subduction-related environment[J]. *Chemical Geology*, 257(1~2): 1~15.
- Zhao Z D, Mo X X, Dilek Y, *et al.* 2009. Geochemical and Sr-Nd-Pb-O isotopic compositions of the post-collisional ultrapotassic magmatism in SW Tibet: Petrogenesis and implications for India intra-continental subduction beneath southern Tibet[J]. *Lithos*, 113(1~2): 190~212.
- Zhou Changyong, Zhu Dicheng, Zhao Zhidan, *et al.* 2008. Petrogenesis of Daxiong pluton in western Gangdese, Tibet: Zircon U-Pb dating and Hf isotopic constraints[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(2): 348~358(in Chinese with English abstract).
- Zhou Hua, Qiu Jiansheng, Yu Sibin, *et al.* 2016. Geochronology and geochemistry of volcanic rocks from Coqen district of Tibet and their implications for petrogenesis[J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(11): 3 137~3 191(in Chinese with English abstract).
- Zhu D C, Li S M, Cawood P A, *et al.* 2016. Assembly of the Lhasa and Qiangtang terranes in central Tibet by divergent double subduction[J]. *Lithos*, 245: 7~17.
- Zhu D C, Mo X X, Niu Y L, *et al.* 2009a. Geochemical investigation of Early Cretaceous igneous rocks along an east-west traverse throughout the central Lhasa Terrane, Tibet[J]. *Chemical Geology*, 268(3~4): 298~312.
- Zhu Dicheng, Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, *et al.* 2008b. Zircon U-Pb geochronology of Zenong Group volcanic rocks in Coqen area of the Gangdese, Tibet and tectonic significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(3): 401~412(in Chinese with English abstract).
- Zhu Dicheng, Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, *et al.* 2009. Permian and Early Cretaceous tectonomagmatism in southern Tibet and Tethyan evolution: New perspective[J]. *Earth Science Frontiers*, 16(2): 1~20(in Chinese with English abstract).
- Zhu Dicheng, Pan Guitang, Mo Xuanxue, *et al.* 2006. Late Jurassic-Early Cretaceous geodynamic setting in middle-northern Gangdese: New insights from volcanic rocks[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3): 534~546(in Chinese with English abstract).
- Zhu Dicheng, Pan Guitang, Wang Liquan, *et al.* 2008a. Tempo-spatial variations of Mesozoic magmatic rocks in the Gangdise belt, Tibet, China, with a discussion of geodynamic setting-related issues[J]. *Geological Bulletin of China*, 27(9): 1 535~1 550(in Chinese with English abstract).
- Zhu D C, Wang Q, Chuang S L, *et al.* 2019. Gangdese magmatism in southern Tibet and India-Asia convergence since 120 Ma[J]. *Geological Society Special Publication*, 483(1): 583~604.
- 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.* 2013. The origin and pre-Cenozoic evolution of the Tibetan Plateau[J]. *Gondwana Research*, 23(4): 1 429~1 454.
- Zhu D C, Zhao Z D, Pan G T, *et al.* 2009b. 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.

附中文参考文献

- 曹毅, 杜杨松, 蔡春麟, 等. 2008. 安徽庐枞地区中生代 A 型花岗岩类及其岩石包体: 在后碰撞岩浆演化过程中的意义[J]. *高校地质学报*, 14(4): 565~576.
- 陈国能, 王勇, 陈震, 等. 2017. 花岗岩浆形成定位机制的思考与研究进展[J]. *岩石学报*, 33(5): 1 489~1 497.
- 崔晓亮, 唐菊兴, 多吉, 等. 2011. 西藏洞中拉铅锌矿床石英斑岩

- 锆石 U-Pb 年代学研究[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 38(05): 557~562.
- 杜德道, 曲晓明, 王根厚, 等. 2011. 西藏班公湖-怒江缝合带西段中特提斯洋盆的双向俯冲: 来自岛弧型花岗岩锆石 U-Pb 年龄和元素地球化学的证据[J]. 岩石学报, 27(7): 1993~2002.
- 范淑芳, 曲晓明, 宋 扬, 等. 2015. 西藏尼雄铁矿成矿花岗岩成因及其对成矿构造背景的启示[J]. 大地构造与成矿学, 39(2): 286~299.
- 费 凡, 杨竹森, 刘英超, 等. 2015. 西藏措勤隆格铁岩体成岩时代及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 34(4): 568~580.
- 费光春, 温春齐, 王成松, 等. 2010a. 西藏墨竹工卡县洞中拉铅锌矿床花岗岩斑岩锆石 SHRIMP-U-Pb 定年[J]. 中国地质, 37(2): 470~476.
- 费光春, 温春齐, 王成松, 等. 2010b. 西藏冈底斯东段墨竹工卡地区洞中拉辉绿玢岩锆石 SHRIMP-U-Pb 定年及意义[J]. 地质通报, 29(8): 1138~1142.
- 高家昊, 曾令森, 高利娥, 等. 2016. 西藏拉萨地体北部革吉地区两期早白垩世岩浆作用——锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素和地球化学特征[J]. 地质通报, 35(1): 55~70.
- 高一鸣, 陈毓川, 唐菊兴, 等. 2009. 西藏工布江达县亚贵拉铅锌钼多金属矿床石英斑岩锆石 SHRIMP 定年及其地质意义[J]. 地质学报, 83(10): 1436~1444.
- 和钟铧, 杨德明, 王天武. 2006. 冈底斯带桑巴区早白垩世后碰撞花岗岩类的确定及构造意义[J]. 岩石矿物学杂志, 25(3): 185~193.
- 洪大卫, 王式洸, 韩宝福, 等. 1995. 碱性花岗岩的构造环境分类及其鉴别标志[J]. 中国科学(B 辑), 25(4): 418~426.
- 姜 昕, 赵志丹, 朱弟成, 等. 2010. 西藏冈底斯西部江巴、邦巴和雄巴岩体的锆石 U-Pb 年代学与 Hf 同位素地球化学[J]. 岩石学报, 26(7): 2155~2164.
- 李湘玉, 马润则, 易立文, 等. 2013. 西藏措勤早白垩世后碰撞花岗岩厘定及岩石成因[J]. 新疆地质, 31(1): 57~64.
- 李小伟, 莫宣学, 赵志丹, 等. 2010. 关于 A 型花岗岩判别过程中若干问题的讨论[J]. 地质通报, 29(2/3): 278~285.
- 李 跃, 丁 枫, 蔺吉春, 等. 2017. 西藏措勤县诺仓地区塔吉里霞隆花岗闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄与地球化学特征[J]. 地质评论, 63(2): 484~498.
- 刘 洪, 李光明, 李文昌, 等. 2022. 西藏中拉萨地块北部早白垩世晚期控错 A 型花岗岩的成因及构造环境研究[J]. 岩石学报, 38(1): 230~252.
- 刘 伟, 李奋其, 杨晓勇, 等. 2012. 西藏南木林县罗扎地区早白垩世流纹岩锆石 U-Pb 年龄及地球化学特征[J]. 中国地质, 39(5): 1151~1161.
- 刘 伟, 李奋其, 袁四化, 等. 2010. 西藏措勤地区则弄群火山岩源区——地球化学及 Sr-Nd 同位素制约[J]. 岩石矿物学杂志, 29(4): 267~376.
- 罗安波. 2022. 班公湖-怒江洋消亡时限和过程: 基于早白垩世沉积岩和火山岩的研究[D]. 长春: 吉林大学.
- 孟繁一. 2014. 西藏中部拉萨地块门巴地区中生代岩浆岩年代学、地球化学及动力学意义[D]. 北京: 中国地质大学.
- 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.
- 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.
- 潘桂棠, 王立全, 尹福光, 等. 2022. 青藏高原形成演化研究回顾、进展与展望[J]. 沉积与特提斯地质, 42(2): 151~175.
- 王 莉, 曾令森, 高利娥, 等. 2013. 藏南冈底斯岩基东南缘早白垩世高镁-高 Sr/Y 含单斜辉石闪长岩[J]. 岩石学报, 29(6): 1977~1994.
- 王立强, 谢富伟, 王 勇. 2016. 西藏巴嘎拉东铅锌矿床黑云母花岗岩锆石 U-Pb 年龄、微量元素组成及地质意义[J]. 岩矿测试, 35(6): 650~657.
- 王力圆, 郑有业, 高顺宝, 等. 2016. 中部拉萨地块南侧吉瓦地区早白垩世则弄群火山岩的发现及意义[J]. 岩石学报, 32(5): 1543~1555.
- 王 楠, 刘治博, 宋 扬, 等. 2020. 西藏班戈地区早白垩世高分异花岗岩年代学及岩石成因[J]. 岩石学报, 36(2): 409~425.
- 王欣欣, 闫国强, 刘 洪, 等. 2021. 中拉萨地块晚白垩世曲桑格勒花岗岩的成因: 地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素的约束[J]. 地球科学, 46(8): 2832~2849.
- 吴 浩, 李 才, 胡培远, 等. 2014. 藏北班公湖-怒江缝合带早白垩世双峰式火山岩的确定及其地质意义[J]. 地质通报, 33(11): 1804~1814.
- 吴锁平, 王梅英, 戚开静. 2007. A 型花岗岩研究现状及述评[J]. 岩石矿物学杂志, 26(1): 57~66.
- 解 龙, 顿 都, 朱利东, 等. 2015. 西藏北冈底斯扎独顶 A 型花岗岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学及其地质意义[J]. 中国地质, 42(5): 1214~1227.
- 于玉帅, 高 原, 杨竹森, 等. 2011. 西藏措勤尼雄矿田滚铁铁矿侵入岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄与地球化学特征[J]. 岩石学报, 27(7): 1949~1960.
- 翟明国. 2017. 花岗岩: 大陆地质研究的突破口以及若干关键科学问题——“岩石学报”花岗岩专辑代序[J]. 岩石学报, 33(5): 1369~1380.
- 张亮亮, 朱弟成, 赵志丹, 等. 2011. 西藏申扎早白垩世花岗岩类:

- 板片断离的证据[J]. 岩石学报, 27(7): 1 938~1 948.
- 张士贞, 李奋其, 刘 函, 等. 2021. 中拉萨地块亚热地区早白垩世辉长岩: 班公湖-怒江洋南向俯冲板片断离的岩浆作用响应[J]. 地质通报, 40(11): 1 852~1 864.
- 张晓倩, 朱弟成, 赵志丹, 等. 2010. 西藏措勤尼雄岩体的岩石成因及其对富 Fe 成矿作用的潜在意义[J]. 岩石学报, 26(6): 1 793~1 804.
- 张晓倩, 朱弟成, 赵志丹, 等. 2012. 西藏措勤麦嘎岩基的锆石 U-Pb 年代学、地球化学和锆石 Hf 同位素: 对中部拉萨地块早白垩世花岗岩类岩石成因的约束[J]. 岩石学报, 28(5): 1 615~1 634.
- 张予杰, 刘 伟, 朱同兴, 等. 2014. 西藏申扎县买巴地区早白垩世侵入岩锆石 U-Pb 年龄及地球化学[J]. 中国地质, 41(1): 50~60.
- 张泽明, 董 昕, 耿官升, 等. 2010. 青藏高原拉萨地体北部的前寒武纪变质作用及构造意义[J]. 地质学报, 84(4): 449~456.
- 周长勇, 朱弟成, 赵志丹, 等. 2008. 西藏冈底斯带西部达雄岩体的岩石成因: 锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素约束[J]. 岩石学报, 24(2): 348~358.
- 周 华, 邱检生, 喻思斌, 等. 2016. 西藏措勤地区火山岩的年代学与地球化学及其对岩石成因的制约[J]. 地质学报, 90(11): 3 173~3 191.
- 朱弟成, 莫宣学, 赵志丹, 等. 2008b. 西藏冈底斯带措勤地区则弄群火山岩锆石 U-Pb 年代学格架及构造意义[J]. 岩石学报, 24(3): 401~412.
- 朱弟成, 莫宣学, 赵志丹, 等. 2009. 西藏南部三叠纪和早白垩世构造岩浆作用与特提斯演化: 新观点[J]. 地学前缘, 16(2): 1~20.
- 朱弟成, 潘桂棠, 莫宣学, 等. 2006. 冈底斯中北部晚侏罗世—早白垩世地球动力学环境: 火山岩约束[J]. 岩石学报, (3): 534~546.
- 朱弟成, 潘桂棠, 王立全, 等. 2008a. 西藏冈底斯带中生代岩浆岩的时空分布和相关问题的讨论[J]. 地质通报, (9): 1 535~1 550.