

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.275



内蒙古狼山地区中三叠世早期C型埃达克岩的发现及其构造意义

王文龙, 滕学建, 刘洋, 郭硕, 滕飞, 何鹏, 田健, 段霄龙

中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170

摘要: 狼山构造带位于索伦缝合带南西, 华北北缘及中亚造山带南缘的结合位置, 是研究中亚造山带晚古生代—早中生代构造—岩浆演化及地球动力学背景的重要场所. 在该地区新识别出中三叠世早期具有埃达克岩特征的扎拉山岩体, 该岩体岩石类型主要为花岗闪长岩及二长花岗岩, LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果显示该岩体的形成时代介于 244.9 ± 1.2 Ma ~ 244.1 ± 2.3 Ma. 地球化学特征表明, 该岩体具有较高的 SiO_2 (68.77% ~ 72.58%)、 Al_2O_3 (14.48% ~ 16.28%)、Sr (287×10^{-6} ~ 455×10^{-6} , 平均值 413×10^{-6}) 含量及 Sr/Y 比值 (46.07 ~ 95.50), 较低的 Y (4.07×10^{-6} ~ 8.01×10^{-6})、Yb (0.43×10^{-6} ~ 0.78×10^{-6})、Cr (5.18×10^{-6} ~ 8.92×10^{-6})、Ni (1.34×10^{-6} ~ 7.71×10^{-6}) 含量及 $\text{Mg}^\#$ 值 (35.54 ~ 41.64), $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值为 0.86 ~ 1.19, 重稀土元素强烈亏损, 轻重稀土元素分馏明显 ($26.45 < (\text{La}/\text{Yb})_N < 56.13$), 铕异常较弱 ($0.82 < \delta\text{Eu} < 1.02$), 具有 C 型埃达克岩特征. 锆石 Hf 同位素分析结果显示 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 2.5 ~ 8.9, 对应的二阶模式年龄 $T_{\text{DM}2}$ 介于 707 ~ 1115 Ma, 表明其源区主要为年轻地壳. 结合区域地质背景, 结果表明内蒙古狼山地区中三叠世早期具有 C 型埃达克岩特征的扎拉山岩体应为古亚洲洋闭合之后, 西伯利亚板块与华北板块碰撞造山阶段的产物, 为加厚的下地壳部分熔融形成.

关键词: 狼山地区; 中三叠世早期; 埃达克; 加厚地壳; 古亚洲洋闭合; 岩石学.

中图分类号: P581

文章编号: 1000-2383(2019)01-0220-14

收稿日期: 2018-05-24

The Discovery of Earliest Middle Triassic C-Type Adakite from Langshan Area, Inner Mongolia and Its Tectonic Implications

Wang Wenlong, Teng Xuejian, Liu Yang, Guo Shuo, Teng Fei, He Peng, Tian Jian, Duan Xiaolong

Tianjin Center of China Geological Survey, Tianjin 300170, China

Abstract: The Langshan structural belt is located in southwest of the Solonker suture zone and as well as the junction between the northern margin of the North China Craton and southern of Central Asian orogenic belt, which is an ideal workplace to study on tectonic-magmatic evolution and geodynamics background from Late Paleozoic to Early Mesozoic. An earliest Middle Triassic pluton with Adakite characteristics was discovered in this study and was called as Zhalashan pluton. The main rock types of Zhalashan Pluton are granodiorite and monzogranite. LA-ICP-MS zircon U-Pb ages yield the formation time of Zhalashan pluton between 244.9 ± 1.2 Ma and 244.1 ± 2.3 Ma. Geochemical characteristics show that the Zhalashan granites are typical C-type adakite with high SiO_2 (68.77% ~ 72.58%), Al_2O_3 (14.48% ~ 16.28%), Sr (287×10^{-6} ~ 455×10^{-6} , 413×10^{-6} on average) content and high Sr/Y ratio (46.07 ~ 95.50), low Y (4.07×10^{-6} ~ 8.01×10^{-6}), Yb (0.43×10^{-6} ~ 0.78×10^{-6}), Cr (5.18×10^{-6} ~ 8.92×10^{-6}), Ni (1.34×10^{-6} ~ 7.71×10^{-6}) content and low $\text{Mg}^\#$ (35.54 ~ 41.64), $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ ratio between 0.86 and 1.19. In addition, it exhibits significant fractionation between LREE and HREE [$26.45 < (\text{La}/\text{Yb})_N < 56.13$] and is depleted in HREE with slight Eu anomaly ($0.82 < \delta\text{Eu} < 1.02$). Zircon Hf isotopic data displays that $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values vary

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (Nos. 1212014121079, 1212011121079).

作者简介: 王文龙 (1988—), 男, 工程师, 硕士, 从事岩石学、地球化学研究及地质调查工作. ORCID: 0000-0002-6507-4612. E-mail: 499692710@qq.com

引用格式: 王文龙, 滕学建, 刘洋, 等. 2019. 内蒙古狼山地区中三叠世早期 C 型埃达克岩的发现及其构造意义. 地球科学, 44(1): 220-233.

from 2.5~8.9, Hf model ages T_{DM2} vary from 707–1 115 Ma, indicating a juvenile crustal material. Together with regional geological background, the authors hold that the Zhalashan pluton resulted from collision between Siberia Craton and North China Craton after the closure of the Paleo-Asian Ocean which is the product of partial melting of the thickened lower crust.

Key words: Langshan area; earliest Middle Triassic; adakite; thickened crust; closure of the Paleo-Asian Ocean; petrology.

中亚造山带位于西伯利亚板块东南,塔里木板块及华北板块以北(图 1a),是显生宙陆壳增生与改造最显著的大陆造山带(Şengör *et al.*, 1993; Jahn *et al.*, 1993; Jahn *et al.*, 2004; Cawood *et al.*, 2009),中亚造山带在近 10 亿年来的陆壳演化过程中,经历了陆缘增生、碰撞(后碰撞)和陆内造山作用 3 个阶段,其复杂的

增生—碰撞过程与古亚洲洋的构造演化过程有着密切关系(Şengör *et al.*, 1993; Jahn *et al.*, 2004; Zhang *et al.*, 2012; Ma *et al.*, 2017; Zhao *et al.*, 2018).目前,越来越多的人认为古亚洲洋是在晚古生代—早中生代沿着索伦—西拉木伦缝合带完成最终闭合的(Wilde, 2015; Zhang *et al.*, 2016).因此,

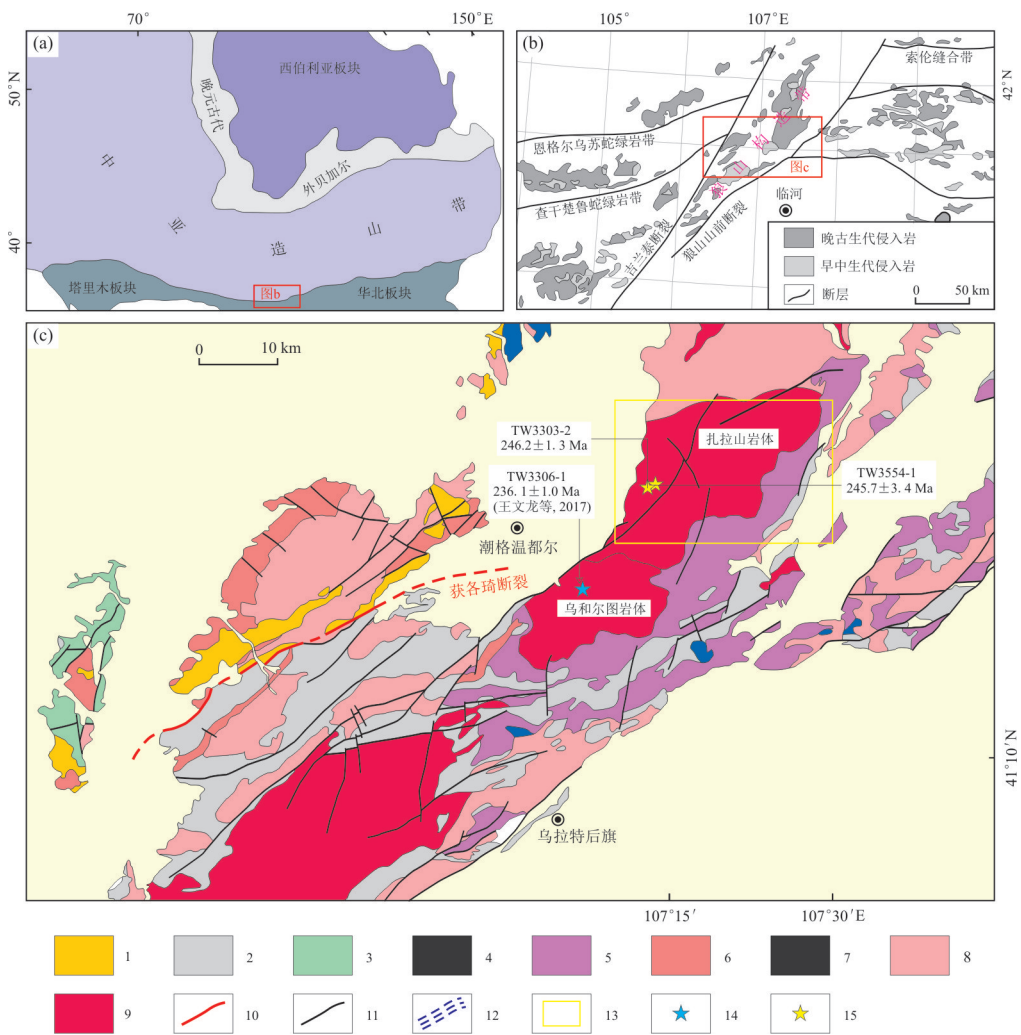


图 1 狼山及相邻地区不同尺度区域地质简图

Fig.1 Different scale geological maps in Langshan and adjacent area

a. 中亚造山带构造纲要图,据Şengör *et al.*(1993)、Jahn *et al.*(2004)修改; b. 华北北缘晚古生代—早中生代侵入岩分布图,据 Shi *et al.*(2014)修改; c. 狼山地区地质简图,据 Liu *et al.*(2016),以及中国地质调查局天津地质调查中心,2016,内蒙古 1:5 万查干呼舒庙幅、楚鲁庙幅、潮格幅、哈尔木格台幅、那仁宝力格公社幅、居力格台幅区域地质矿产调查报告修改。1. 中—新元古代变质沉积岩; 2. 新元古代变质沉积岩; 3. 晚古生代沉积岩及火山岩; 4. 中—新生代沉积岩; 5. 中元古代变质侵入岩; 6. 早古生代侵入岩; 7. 晚古生代镁铁质侵入岩; 8. 晚古生代中—酸性侵入岩; 9. 早中生代花岗岩; 10. 获各琦断裂; 11. 其他断裂; 12. 韧性剪切带; 13. 扎拉山岩体地质简图位置; 14. 前人锆石 U-Pb 年龄采样点; 15. 本文锆石 U-Pb 年龄采样点

对区域晚古生代—早中生代构造—岩浆演化过程进行系统详细的研究可以为古亚洲洋的最终闭合时限提供约束,同时有助于理解中亚造山带在该时期构造演化的转折过程。

C型埃达克岩可以追踪地质历史上的地壳增厚及其相关事件(张旗等, 2002),近年来在中亚造山带南缘及华北北缘,前人发现了一系列具有C型埃达克岩特征的岩浆岩,该期岩浆活动主要发生于晚二叠世至中三叠世早期,集中分布在索伦—西拉沐沦河缝合带附近(刘建峰等, 2013; Liu *et al.*, 2015; 刘珏等, 2015; Li *et al.*, 2017),并被认为是华北板块与西伯利亚板块发生碰撞及古亚洲洋最终闭合的直接证据(刘建峰等, 2013; 刘珏等, 2015)。

狼山构造带位于索伦缝合带西南,华北北缘与中亚造山带南缘的结合位置(图 1b),区内晚古生代—早中生代岩浆作用强烈,是研究区域构造—岩浆演化的重要场所。前人对于该区域石炭纪、早—中二叠世及晚三叠世岩浆岩进行了较为深入的研究,并认为石炭纪—中二叠世为活动大陆边缘环境(Liu *et al.*, 2016; 郭硕等, 2017),晚三叠世为后碰撞伸展环境(王文龙等, 2017),然而对于晚二叠世—中三叠世早期之间的岩浆活动记录关注相对较少,而这一时期恰好是研究古亚洲洋构造转换的关键时期。本文基于内蒙古 1:5 万查干呼舒庙等六幅区调项目在狼山构造带东北缘新识别出的中三叠世早期扎拉山岩体开展研究,该岩体具有典型的C型埃达克岩特征。对其进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年、原位 Hf 同位素及全岩地球化学分析,以期为古亚洲洋的闭合时限及板块碰撞过程的构造—岩浆演化提供有益参考。

1 区域地质背景

狼山构造带总体的构造线方向为北东向,著名的索伦缝合带位于狼山构造带的北东方向,查干楚鲁蛇绿岩带及恩格尔乌苏蛇绿岩带位于狼山构造带的北西侧(图 1b)。前人的研究表明恩格尔乌苏蛇绿岩带所代表的洋盆最终闭合时限为晚二叠世末—晚三叠世(王廷印等, 1992),与索伦—林西缝合带的最终闭合时限吻合,可能为索伦—林西缝合带的西延。著名的获各琦断裂分布于测区的中部,NEE-SWW 向延伸,前人的研究表明获各琦断裂可能是华北北缘及中亚造山带南缘(早古生代岛弧或微陆块)构造边界(Chen *et al.*, 2015),在区域上的构造

意义等同于西侧的赤峰—白云鄂博断裂(Jian *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2014),此外狼山地区还发育多期次的韧性剪切带(公王斌等, 2017)。

区内出露的最老地层为分布于获各琦断裂带以西的宝音图岩群,岩性主要为(石榴)斜长角闪岩、(石榴)云母片岩、石英岩及大理岩,为一套低角闪岩相—高绿片岩相的变质沉积岩石组合,锆石 U-Pb 测年获得斜长角闪岩的形成时代为 895.5 ± 6.8 Ma,变质沉积岩最小的碎屑锆石年龄峰值为 $1187 \sim 1395$ Ma,限定其形成时代为中元古代晚期—新元古代(中国地质调查局天津地质调查中心, 2016, 内蒙古 1:5 万查干呼舒庙幅、楚鲁庙幅、潮格幅、哈尔滨格台幅、那仁宝力格公社幅、居力格台幅区域地质矿产调查报告)。新元古代狼山群分布于获各琦断裂带以东(图 1c),为一套浅变质的碎屑岩及碳酸盐岩组合,岩性主要为变质砂岩、板岩、千枚岩、大理岩等。Hu *et al.* (2014) 和 Liu *et al.* (2017) 获得狼山群中碎屑锆石最小峰值年龄为 $0.8 \sim 1.2$ Ga。狼山群中存在新元古代火山岩夹层,锆石 U-Pb 测年结果显示其形成时代介于 $804 \sim 878$ Ma (Hu *et al.*, 2014; Liu *et al.*, 2017)。上石炭统碎屑岩及灰岩、中—上二叠统火山岩出露在研究区西侧(郭硕等, 2017),白垩系及第四系主要分布在地势较低处。

研究区广泛发育中元古代、古生代、早中生代侵入岩(图 1c)。中元古代侵入岩主要分布于研究区北东,主要为一套片麻状花岗岩(Wang *et al.*, 2016);早古生代侵入岩主要为一套石英闪长岩、花岗闪长岩及二长花岗岩的岩石组合,出露于获各琦断裂带以西,时代为志留纪(Wang *et al.*, 2015a);晚古生代岩石类型包括辉长岩、石英闪长岩及花岗岩,出露面积较大,主要分布于研究区中部,时代为二叠纪及石炭纪(Wang *et al.*, 2015a; Liu *et al.*, 2016);早中生代以酸性侵入岩为主,主要为正长花岗岩及二长花岗岩,时代为三叠纪(王文龙等, 2017)。

2 岩体地质及样品采集

扎拉山岩体位于狼山构造带的东北缘,基岩出露较好,节理发育,具有弱的球形风化特征,岩石新鲜未变质。南西侧被晚三叠世侵入岩侵入;北东侧侵入到二叠纪侵入岩中;南东侧侵入到中元古代变质侵入岩中;北西侧被第四系覆盖(图 1c)。扎拉山岩体主要由二长花岗岩及花岗闪长岩组成,二者为侵入接触关系,二长花岗岩侵入到花岗闪长岩之中(图 2a, 2b)。

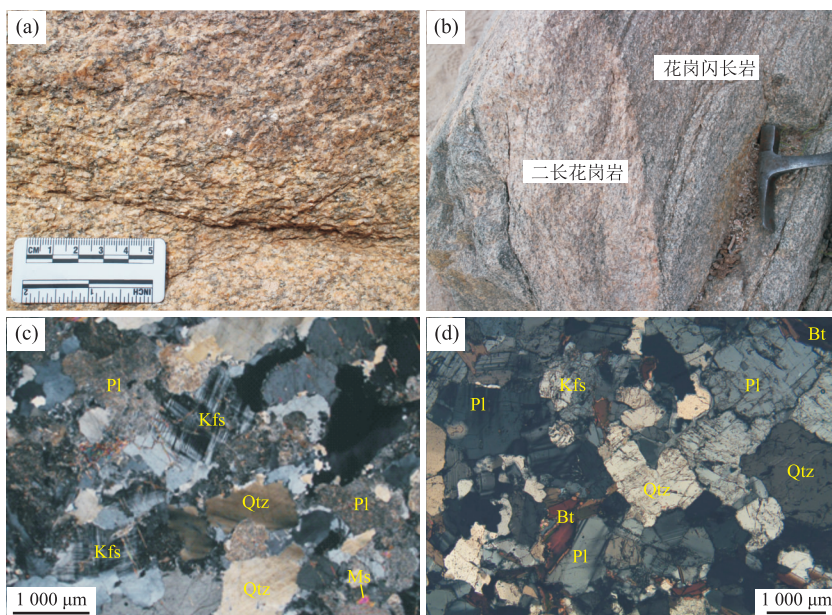


图 2 扎拉山岩体野外及镜下照片

Fig.2 Field and microscope photographs for Zhalashan pluton

a.二长花岗岩野外特征;b.二长花岗岩侵入花岗闪长岩;c.二长花岗岩镜下特征;d.花岗闪长岩镜下特征. 矿物代号:Kfs.钾长石;Pl.斜长石;Qtz.石英;Bt.黑云母;Ms.白云母

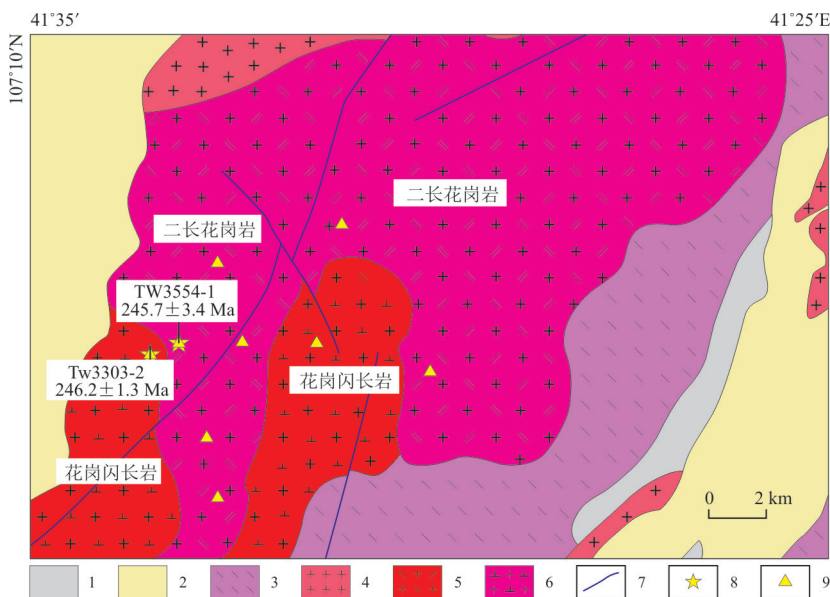


图 3 扎拉山岩体地质简图

Fig.3 Simplified geological map of Zhalashan pluton

1.新元古代变质沉积岩;2.中-新生代沉积岩;3.中元古代变质侵入岩;4.晚古生代中-酸性侵入岩;5.三叠纪花岗闪长岩;6.三叠纪二长花岗岩;7.断裂;8.锆石 U-Pb 年龄采样点;9.全岩地球化学分析采样点

二长花岗岩:岩石风化面为肉红色—浅肉红色,新鲜面为浅肉红色—灰白色,中细粒—细粒结构,块状构造.主要由钾长石、斜长石、石英及少量白云母组成.呈半自形板状—他形粒状,可见条纹长石和微斜长石,含量在 35%~40%,粒径为 1~4 mm,轻微高岭土化;斜长石含量在 25%~30%,粒径为 1~

3 mm,大部分颗粒呈不均匀绢云母化、高岭土化,表面污浊;石英含量在 25%~30%,粒径为 0.5~2.0 mm;白云母呈叶片状,片径约为 0.5 mm,星散分布,含量小于 5%(图 2c).

花岗闪长岩:岩石风化面及新鲜面均为灰白色,中细粒花岗结构为主,少量为细粒结构,块状构造.

岩石由钾长石、斜长石、石英及黑云母组成。钾长石含量在 20%~25%，粒径为 1~2 mm，具格子双晶；斜长石含量在 40%~45%，粒径为 1~3 mm，聚片双晶发育，部分具高岭土化、绢云母化；石英含量在 20%~25%，粒径为 0.5~3.0 mm；黑云母含量在 10%~15%，片径为 0.5~1.0 mm，部分发生绿泥石化(图 2d)。

岩石中副矿物主要包括锆石、磷灰石、钛铁矿、独居石、绿帘石等。

本次工作采集了灰白色中细粒花岗闪长岩(样品编号: TW3303-2, 采样位置: 41°28′56″N; 107°12′40″E)及浅肉红色中细粒二长花岗岩(样品编号: TW3554-1, 采样位置: 41°29′01″N; 107°13′08″E)2 件同位素年龄样品, 并对样品 TW3303-2 进行锆石原位 Hf 同位素分析, 采集全岩地球化学分析样品 9 件, 采样位置见图 3。

3 分析方法

3.1 锆石 U-Pb 测年及 Hf 同位素分析

将新鲜岩石样品破碎至 80 目, 然后经水粗淘、强磁分选、电磁分选和酒精细淘之后, 在实体显微镜下手工挑选出锆石, 将待测锆石颗粒用环氧树脂制靶, 然后磨至锆石颗粒的一半并抛光, 阴极发光照相在北京锆年领航科技有限公司的日本电子 JSM-6510 型扫描电镜上进行。锆石原位 U-Pb 年龄测试及原位 Hf 同位素测试在天津地质调查中心同位素实验室利用激光剥蚀多接收器电感耦合等离子体质谱仪(LA-MC-ICPMS)上完成, 将 NEW WAVE 193-FXArF 准分子激光器与 Thermo Fisher 公司的 Neptune 多接收器电感耦合等离子体质谱仪联接, 采用 He 气作为剥蚀物质的载气。锆石 U-Pb 年龄测定使用的激光束斑直径为 35 μm , 剥蚀时间为 30 s, 采用美国国家标准技术研究院研制的人工合成硅酸盐标准参考物质 NIST610, 锆石年龄计算采用 GJ-1; 对分析数据的离线处理采用软件 ICPMS-DataCal 9.2(Liu *et al.*, 2010)完成, U-Pb 年龄谐和图绘制和年龄加权平均值计算采用 Isoplot/Ex_ver3(Ludwig, 2003)。锆石原位微区 Hf 同位素分析采用与 U-Pb 年龄测定相同的激光器与质谱仪, 激光剥蚀束斑直径为 50 μm , 剥蚀时间为 30 s, 采用 GJ-1 作为外标计算 Hf 同位素比值, 具体仪器配置和实验流程参见耿建珍等(2011), Hf 同位素数据处理同样采用 ICPMSDataCal 9.2 程序完成(Liu *et*

al., 2010)。

3.2 全岩分析

主量、微量和稀土元素分析在天津地质调查中心元素分析实验室完成。野外采集新鲜无蚀变的岩石样品, 首先用水将样品表面冲洗干净并晾干, 机械破碎至 200 目后送实验室分析。主量元素在样品制成熔片后通过 X 射线荧光光谱法(XRF)测试, 相对误差在元素丰度大于 1.0%时为 $\pm 1\%$, 元素丰度小于 1.0%时为 $\pm 10\%$; FeO 采用氢氟酸、硫酸溶样、重铬酸钾滴定容量法, 分析误差优于 2%, 微量元素使用 ICP-MS 测试, 样品测定值和推荐值的相对误差小于 10%, 且绝大多数数值在 5%以内。

4 分析结果

4.1 形成时代

样品 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果见附表 1。

样品 TW3303-2(中细粒花岗闪长岩)中锆石呈自形长柱状, 四方双锥发育, 晶面平直, 颗粒大小介于(50~80 μm) \times (100~200 μm), 阴极发光图像显示锆石整体具有较为清晰的岩浆震荡环带, 属典型的岩浆锆石(图 4a)。对样品中的 24 颗锆石进行测年, 其中 3 个测点明显偏离谐和线(测点 16、19、23), 未参与平均年龄计算; 2 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄偏大(测点 3、5), 可能为捕获的岩浆锆石; 6 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄偏小(测点 8、10、12、14、18、21), 可能为后期岩浆热液带入锆石, 也未参与平均年龄计算; 其余 13 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄变化于 236~252 Ma 之间, Pb 的含量介于 20×10^{-6} ~ 79×10^{-6} , U 的含量介于 511×10^{-6} ~ 2141×10^{-6} , Th/U 为 0.12~0.72。最终获得样品 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 244.9 ± 1.2 Ma(MSWD=3.7; $n=13$)(图 5a), 代表扎拉山岩体花岗闪长岩的侵位时代。

样品 TW3554-1(中细粒二长花岗岩)锆石形态与样品 TW3303-2 较为相似, 总体呈长柱状, 锆石大小集中在(50~80 μm) \times (100~200 μm)之间, 锆石表面相对光滑、干净, 韵律环带清晰, 具岩浆锆石特征(图 4b)。对该样品中的 23 颗锆石进行测年, 其中 9 个测点偏离谐和线(测点 1、4、5、8、9、11、13、16、18), 未参与平均年龄计算。测点 12 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值为 279 Ma, 可能为捕获的二叠纪岩浆锆石, 未参与平均年龄计算, 其余 13 个测点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中在 235~254 Ma 之间, Pb 的含量介于 15×10^{-6} ~ 25×10^{-6} , U 的含量介于 390×10^{-6} ~

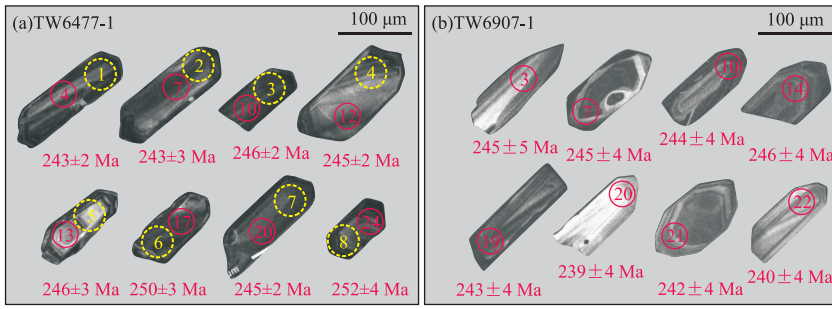


图 4 扎拉山岩体部分锆石 CL 图像

Fig.4 Part of CL images and analysis spot of zircons from Zhalashan pluton
红色小圈代表锆石 U-Pb 测年位置;黄色大圈代表 Hf 同位素分析位置

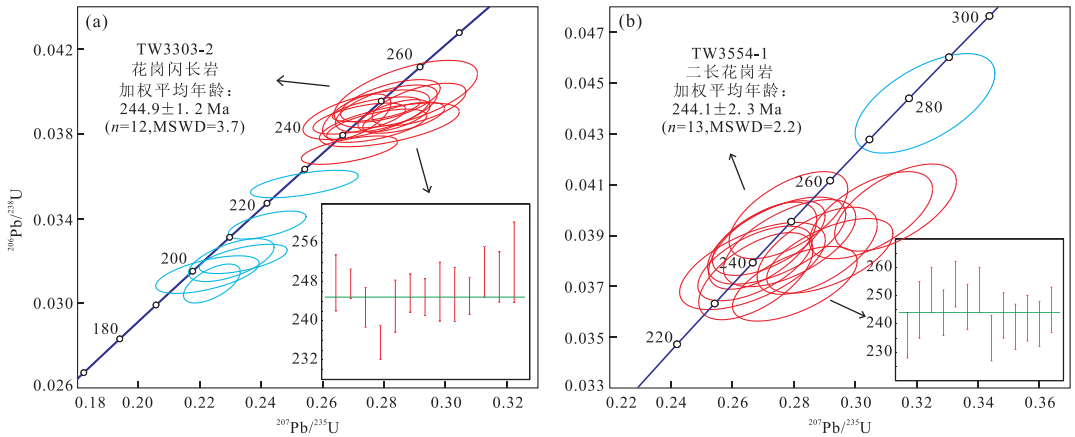


图 5 扎拉山岩体花岗闪长岩及二长花岗岩锆石 U-Pb 测年谐和图和加权平均年龄图

Fig.5 Zircon U-Pb concordia and weighted average age diagrams for granodiorite and monzogranite from Zhalashan pluton

672×10^{-6} , Th/U 比值介于 0.10~0.37, 最终获得样品 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 244.1 ± 2.3 Ma (MSWD=2.2; $n=13$), 代表扎拉山岩体二长花岗岩的侵位时代(图 5b)。

4.2 锆石原位 Hf 同位素

样品锆石原位 Hf 同位素分析结果见附表 2。

本文对样品 TW3303-2(中细粒花岗闪长岩)中的 8 颗锆石进行测试分析, 分析结果显示所有测点的 Hf 同位素组成比较一致, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值均小于 0.002, 说明锆石在形成后具有很少的放射性成因 Hf 的积累(杨钢等, 2015), 8 颗锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值介于 0.282 692~0.282 874, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均为正值, 介于 2.5~8.9, 对应的二阶模式年龄 T_{DM2} 介于 707~1 115 Ma。

4.3 岩石地球化学

样品主量、微量及稀土元素分析结果见附表 3。

扎拉山岩体花岗闪长岩及二长花岗岩全岩 SiO_2 含量介于 68.77%~72.58%, K_2O 含量为 3.64%~4.57%, 在图 6a 中, 样品点落入高钾钙碱性系列区域; Al_2O_3 含量为 14.48%~16.28%, A/

CNK 为 1.01~1.19, 在图 6b 中落入过铝质区域; 样品总体上具有较高的 SiO_2 、 K_2O 、 Na_2O 含量; 较低的 TiO_2 、 CaO 、 P_2O_5 、 MgO 、 FeO_t 含量。样品 $\text{Mg}^\#$ 值介于 35.54~41.64(平均值 37.96), $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 值介于 0.86~1.19(平均值 0.98)。扎拉山岩体的主量元素与南侧晚三叠世乌和尔图岩体具较为明显的差异, 乌和尔图岩体具有更高的 SiO_2 、 K_2O 含量, 更低的 MgO 、 FeO 、 Cr 、 Ni 含量(图 6a, 6b)(王文龙等, 2017)。

稀土元素配分曲线显示(图 7a), 扎拉山岩体稀土总量偏低($90.39 \times 10^{-6} \sim 169.10 \times 10^{-6}$), 轻稀土富集($82.25 \times 10^{-6} \sim 156.02 \times 10^{-6}$), 重稀土亏损($7.99 \times 10^{-6} \sim 14.61 \times 10^{-6}$), 轻重稀土分馏十分明显, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 介于 26.45~56.13, $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 介于 6.99~9.31, 轻稀土分馏明显; $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 介于 2.14~4.11, 重稀土分馏相对较弱, δEu 介于 0.82~1.02, Eu 异常不明显。在图 7b 中, 岩石表现为高度富集 Rb、Ba、U、K 等大离子亲石元素(LILE), 相对亏损 Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素(HFSE); 总体具有较低的 Y ($4.07 \times 10^{-6} \sim 8.01 \times 10^{-6}$) 和 Yb

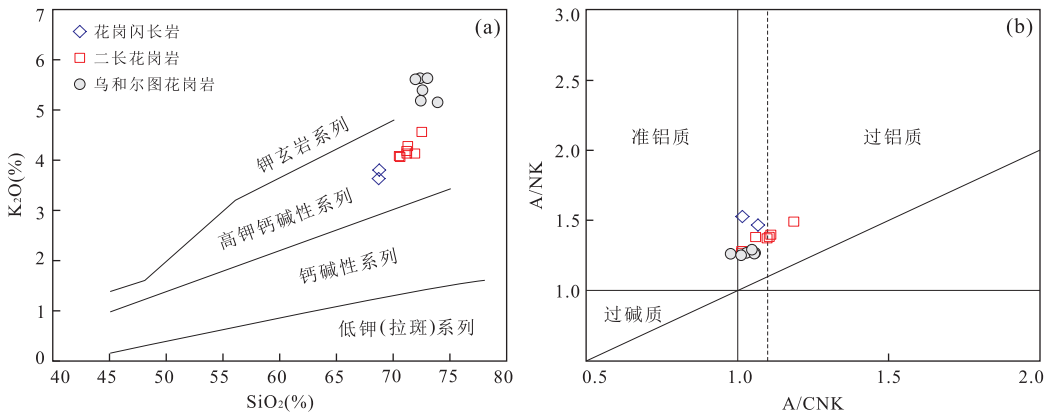


图 6 扎拉山岩体岩石判别图解

Fig. 6 Granitoids discrimination diagrams of the Zhalashan pluton

a. SiO_2 - K_2O 图解, 转引自 (Maitre, 1989); b. A/CNK-A/NK 图解, 转引自 Maniar and Piccoli (1989), 乌和尔图花岗岩数据引自王文龙等 (2017), 下文图解相同

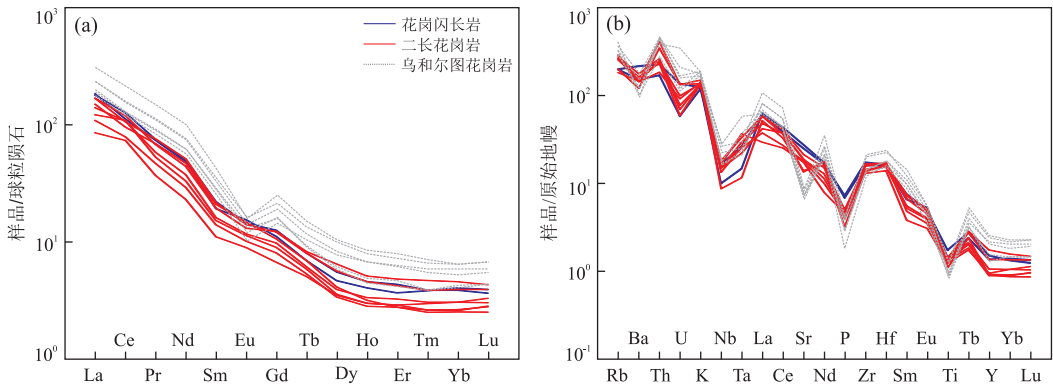


图 7 扎拉山岩体岩石稀土元素球粒陨石标准化配分图(a)及微量元素原始地幔蛛网图(b)

据 Sun and McDonough (1989)

($0.43 \times 10^{-6} \sim 0.78 \times 10^{-6}$) 含量, 较高的 Sr ($287 \times 10^{-6} \sim 589 \times 10^{-6}$, 平均值 413×10^{-6}) 含量及 Sr/Y 比值 (46.07~95.50). 相比之下, 南侧的乌和尔图岩体具有明显的负铈异常, 较低的 Sr 含量及 Sr/Y 比值, Ba、Sr、P、Ti 亏损更为强烈 (图 6).

5 讨论

5.1 岩石类型

埃达克岩最初是由 Defant and Drummond (1990) 提出来的一种形成于俯冲消减环境、由板片熔融形成的一套中酸性火山岩, 具有特殊的地球化学特征, 如富集轻稀土元素、亏损重稀土元素, 具有高 SiO_2 ($\geq 56\%$)、高 Al_2O_3 ($\geq 15\%$)、高 Sr ($> 400 \times 10^{-6}$) 含量、高 Sr/Y 比值 ($> 20 \sim 40$), 同时又具有较低的 Y ($< 18 \times 10^{-6}$) 和 Yb ($< 1.9 \times$

10^{-6}) 含量等特征. 随后的研究表明, 一些具有埃达克岩地球化学特征的高钾钙碱性中酸性火成岩既不产生于岛弧环境, 也不是板片熔融的产物, 而是形成于大陆地区. 张旗等 (2002) 根据埃达克岩化学成分的差异及其产出的大地构造环境的不同, 将埃达克岩划分为 O 型和 C 型, 前者富 Na、Mg, 是以 MORB 为源岩的挤压消减板片发生部分熔融的产物 (Defant and Drummond, 1990), K_2O 含量低, 平均不超过 1.72%; 后者 K_2O 含量显著偏高, 一般在 2.9%~3.9% 以上, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 值 < 2 , MgO 及 $\text{Mg}^\#$ 值相对前者较低, 这类埃达克岩主要形成于大陆地区, 如活动陆缘地壳加厚地区、板块碰撞导致的地壳加厚地区和高原底部等环境. 岩石地球化学特征表明, 扎拉山岩体具有典型 C 型埃达克岩地球化学特征: 如高 SiO_2 (68.77%~72.58%, 平均值 70.81%)、 Al_2O_3 (14.48%~16.28%, 平均值 15.45%)、Sr

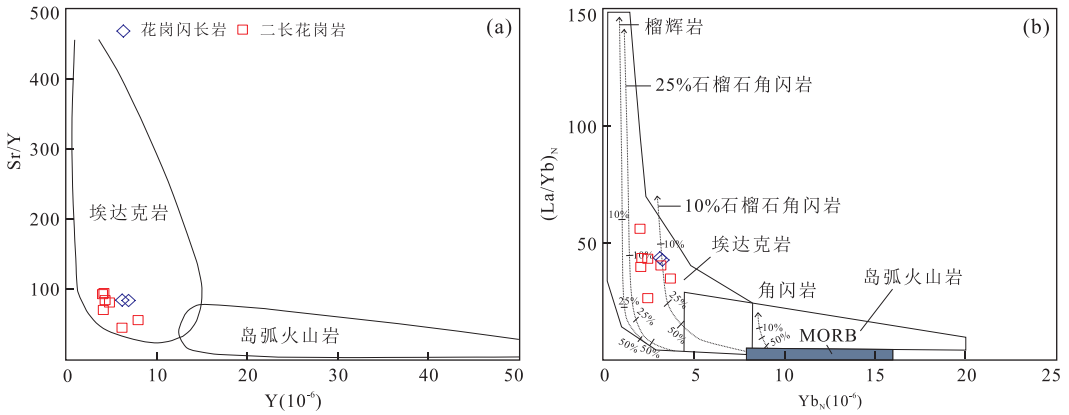


图 8 扎拉山岩体埃达克岩判别图解

Fig.8 Adakite discrimination diagram of Zhalashan pluton

图 a 据 Defant and Drummond(1990); 图 b 据 Martin(1986)

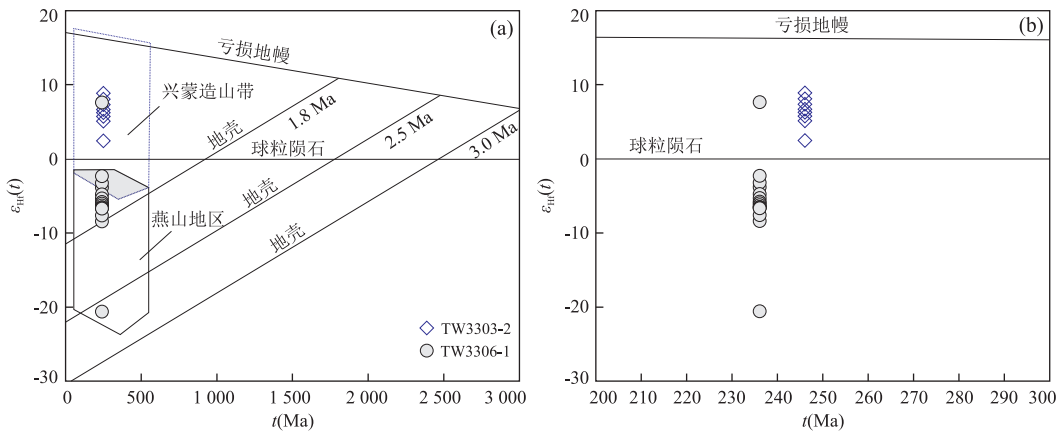


图 9 扎拉山岩体花岗闪长岩 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)-t$ 图解

Fig.9 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)-t$ diagrams of Zhalashan granodiorite

样品 TW3306-1 数据引自乌和尔图岩体,据王文龙等(2017)

($287 \times 10^{-6} \sim 589 \times 10^{-6}$, 平均值 413×10^{-6}) 含量和 Sr/Y 值 ($46.07 \sim 95.50$, 平均值 80.6), 低 HREE ($7.99 \times 10^{-6} \sim 14.61 \times 10^{-6}$, 平均值 10.52×10^{-6})、Y ($4.07 \times 10^{-6} \sim 8.01 \times 10^{-6}$, 平均值 5.45×10^{-6})、Yb ($0.43 \times 10^{-6} \sim 0.78 \times 10^{-6}$, 平均值 0.57×10^{-6}) 含量, 轻稀土元素富集, 重稀土元素亏损, 轻重稀土元素分馏明显, $26.45 < (La/Yb)_N < 56.13$, 平均值 41.24, 没有明显的 Eu 异常 ($0.82 < \delta\text{Eu} < 1.02$, 平均值 0.91), 在图 8 上, 样品都落入埃达克岩区域. 样品 K_2O 含量为 $3.64\% \sim 4.57\%$, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 值为 $0.86 \sim 1.19$, 平均值为 0.98, 在图 6a 中样品点主要落在高钾钙碱性岩石系列中, 与中国东部埃达克岩相似 (葛小月等, 2002; 张旗等, 2002; Wang *et al.*, 2007).

5.2 源区特征及岩石成因

扎拉山岩体具有较高的 SiO_2 、 K_2O 含量, 较低的 MgO、Cr、Ni 含量, 高钾钙碱性系列, 过铝质等地

球化学特征, 显示出壳源的特点. 锆石 Hf 同位素分析结果显示, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 2.5~8.9, 对应的二阶模式年龄 $T_{\text{DM}2}$ 介于 707~1115 Ma, 表明其源区主要为年轻地壳. 在图 9 中, 扎拉山岩体样品点全部落入中亚造山带东段区域, 南侧乌和尔图岩体样品点主体落入华北北缘区域, 显示出二者源区的巨大差异性, 笔者初步推测在两个岩体之间可能存在分割华北北缘及中亚造山带南缘 (早古生代岛弧或微陆块) 的构造边界. 前人对于华北北缘与中亚造山带南缘发生在石炭纪之前的弧陆拼贴事件已有报道, 而赤峰-白云鄂博断裂即为记录这一事件的构造边界 (Jian *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2014). 通过区域对比, 笔者认为研究区获各琦断裂具有与赤峰-白云鄂博断裂相同的构造属性, 可能是赤峰-白云鄂博断裂带的西延, 以下几方面的证据支持笔者的推测: (1) 地层方面: 太古代乌拉山群仅出露于获各琦

断裂带以东,断裂带以西出露的最老地层为中一新元古代宝音图岩群;(2)岩浆岩方面:早古生代侵入岩仅出露于获各琦断裂以西,晚石炭世之后的侵入岩在断裂带两侧均有出现;(3)变质作用方面:位于获各琦断裂带以西的宝音图岩群岩石中可见角闪石+石榴石+斜长石的变质矿物组合,变质程度可达到角闪岩相(中国地质调查局天津地质调查中心,2016,内蒙古1:5万查干呼舒庙幅、楚鲁庙幅、潮格幅、哈尔木格台幅、那仁宝力格公社幅、居力格台幅区域地质矿产调查报告),与华北地区中一新元古代浅变质地层无法对比.Chen *et al.* (2015)获得狼山地区宝音图岩群的变质年龄为 399 ± 6 Ma,并将该年龄解释为中亚造山带早古生代俯冲增生杂岩带及微陆块与华北克拉通的碰撞时限。

关于 C 型埃达克岩,主要存在以下几种模式:(1)加厚的下地壳部分熔融(Zeng *et al.*, 2011; Chiaradia, 2015);(2)基性岩浆高压分异(Chiaradia, 2009; Castillo, 2012);(3)拆沉下地壳的部分熔融(Kay and Kay, 1993; Kay *et al.*, 1993; Wang *et al.*, 2006).部分熔融的玄武质岩浆在高压条件下经过分异作用可以形成埃达克岩,这一过程通常伴随着较为强烈的壳幔交代混染作用,而研究区并未广泛发育同期基性岩石,并且扎拉山岩体中镁铁质暗色微量包体不发育,因此并不支持第 3 种成因模式,在图 10 中,扎拉山岩体样品点全部落入钙碱性及过铝质的区域,而明显区别于具有高分异特征的乌和尔图岩体,表明该岩体并未经过明显的结晶分异作用。

Kay and Kay(1993)提出,当地壳厚度达到一定程度,并且经历拆沉作用后同样可以形成埃达克岩,然而拆沉下地壳部分熔融的熔体,在上升过程中

不可避免会与上地幔相互作用,导致形成的岩浆具有较高的 MgO、Cr、Ni 含量(Gao *et al.*, 2004),而加厚下地壳部分熔融形成的埃达克岩往往具有较高的 SiO₂、K₂O 含量,Mg、Cr、Ni 含量相对较低.实验研究结果显示,加厚下地壳发生部分熔融的熔体一般 $Mg^{\#} < 45$ (Rapp and Watson, 1995),研究区埃达克岩 $Mg^{\#}$ 介于 35.54~41.64,亏损相容元素 Cr、Ni 等,表明其不可能是拆沉下地壳部分熔融的产物,而应为加厚的基性下地壳部分熔融的产物.在图 11 中,扎拉山岩体样品点均落入与加厚地壳相关的埃达克岩区域。

扎拉山岩体岩石具有高的 Sr/Y 比值,低的 MgO、Cr、Ni 含量,与加厚下地壳熔融形成的埃达克岩和实验岩石学中由榴辉岩/石榴角闪岩形成的熔体成分类似(Wang *et al.*, 2006; 熊小林等, 2011).由于 HREE 中 Yb 和 Lu 在石榴石中的分配系数最大(Sisson, 1994),而 Dy 和 Ho 在角闪石中的分配系数最大,所以当石榴石为主要源区残留相时,Y/Yb 比值一般明显大于 10(有的接近 20),形成的熔体具有倾斜的 HREE 配分模式;而当角闪石为主要残留相时,Y/Yb 比值接近于 10,形成的熔体具有相对平坦的 HREE 配分模式(葛小月等, 2002).扎拉山岩体岩石 Y/Yb 值介于 8.37~10.52,平均值为 9.46,接近 10,表明角闪石为主要的残留相,(Gd/Yb)_N 介于 2.14~4.11,重稀土分馏相对较弱,具有弱倾斜的 HREE 配分模式,表明源区还有石榴石残留.另外,在图 8b 中样品点主要落在残留组分为 25%石榴石角闪岩和 10%石榴石角闪岩的部分熔融曲线之间.综上笔者认为扎拉山岩体的残留相以角闪石为主,石榴石次之。

5.3 晚二叠世—中三叠世早期埃达克质岩浆活动及构造演化

在索伦—西拉木伦缝合带内部及两侧晚二叠世—中三叠世早期(260~245 Ma)岩浆活动较为强烈,不同于华北北缘石炭纪—中二叠世岩浆岩呈近东西向带状展布的特点(张拴宏等, 2010),晚二叠世—中三叠世早期岩浆岩多为局部产出,但从区域上来看具有弱的线性分布特点,与缝合带的方向基本一致.由东向西分别发育在东北地区(Wang *et al.*, 2015b; Yang *et al.*, 2015; 李世超等, 2017)、内蒙古西部巴林右旗—林西地区(刘建峰等, 2013; 刘珏等, 2015; Li *et al.*, 2017)、内蒙古中部四子王旗、达茂旗、乌拉特中旗地区(张维等, 2010; Liu *et al.*, 2015)及内蒙古西部阿拉善等地区(Li *et al.*,

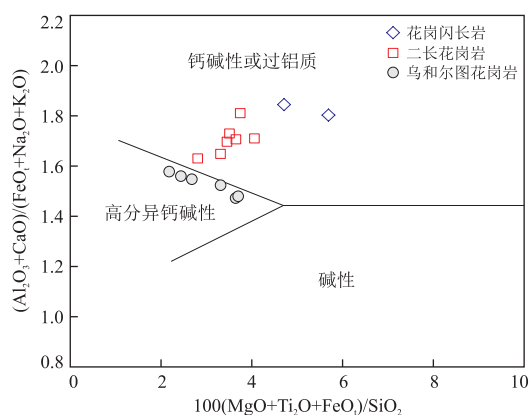
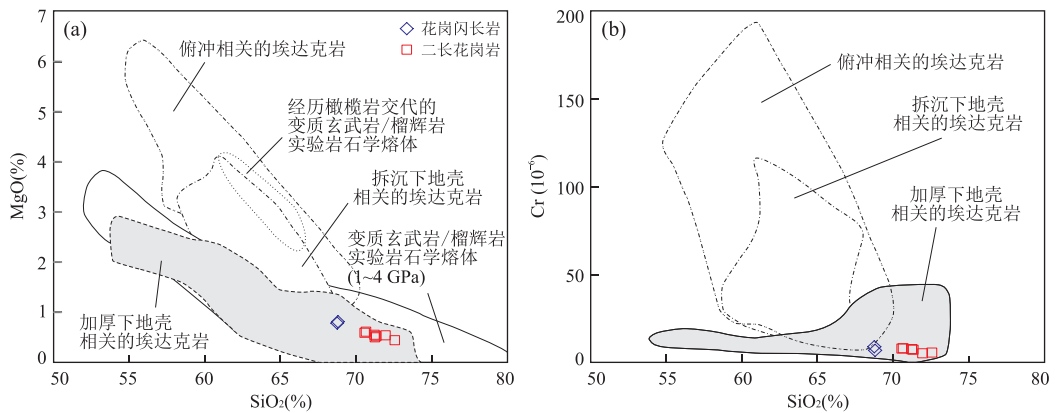


图 10 高分异花岗岩判别图解

Fig.10 Highly fractionated granite discrimination diagram
据 Sylvester(1989)

图 11 扎拉山岩体 SiO_2 - MgO (a) 及 SiO_2 -Cr 图解(b)Fig.11 SiO_2 - MgO (a) and SiO_2 -Cr (b) diagrams of Zhalashan pluton据 Wang *et al.*(2006)

2012; Shi *et al.*, 2014). 该时期的岩浆岩以中酸性侵入岩为主, 岩性主要为石英闪长岩、花岗闪长岩及二长花岗岩, 岩石普遍具有高 Sr 低 Y 的特点, 大部分具有 C 型埃达克岩的特征, 极少数为 O 型埃达克岩(李世超等, 2017). 本文新获得内蒙古狼山地区扎拉山岩体 246.2 ± 1.3 Ma 及 245.7 ± 3.4 Ma 的锆石 U-Pb 同位素年龄, 岩体所处构造位置、形成时代及岩石地球化学特征均可进行区域对比, 应该为同一构造背景的产物. 需要指出的是在华北北缘及华北克拉通内部晚二叠世—早三叠世早期的埃达克质岩浆活动表现不强烈, 可能是由于远离索伦缝合带, 地壳加厚不显著, 不具有形成 C 型埃达克岩的条件.

扎拉山岩体岩石具有较高的 SiO_2 、 K_2O 含量, 较低的 FeO 、Cr、Ni 含量, 结合 Hf 同位素分析结果, 笔者认为扎拉山岩体的源区为年轻地壳. 较高的 Sr/Y 比值, 较低的 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值表明其具有 C 型埃达克岩的特征, 而较低的 $\text{Mg}^\#$ 值及不显著的结晶分异作用表明其可能来源于加厚下地壳的部分熔融. 结合区域地质背景, 笔者认为扎拉山岩体为古亚洲洋闭合之后, 西伯利亚板块与华北板块碰撞造山阶段的产物, 为加厚的下地壳部分熔融形成. 以上观点得到以下几方面证据的支持: (1) 早二叠世晚期—中二叠世早期古亚洲洋两侧处于活动大陆边缘环境, 洋壳持续俯冲, 洋盆尚未闭合 (Jian *et al.*, 2010; 张拴宏等, 2010; Li *et al.*, 2016), 晚二叠世—中三叠世早期弧岩浆作用的终止可以做为古亚洲洋闭合的直接证据 (Li *et al.*, 2016); (2) 东北地区晚二叠世磨拉石的形成标志着古亚洲洋已经闭合, 并进入了碰撞造山阶段, 研究区内晚二叠世—中三叠世早期的沉积地层出露十分有限, 表明该时期

研究区应处于地壳大面积隆升、增厚及地表剥蚀阶段; (3) 区域上晚三叠世侵入岩主要为高分异 I 型花岗岩及 A 型花岗岩, 形成于后碰撞伸展构造背景 (Li *et al.*, 2012; 王文龙等, 2017), 位于扎拉山岩体以南的乌和尔图岩体截然不同的地球化学特征表明构造环境已经发生转变, 区域应力场由早期的挤压为主转变为伸展为主. 三叠纪末期发育在燕辽—阴山地区古裂谷带上的一条近东西向的碱性正长岩带标志着古亚洲洋构造演化的结束 (Zhang *et al.*, 2012). 海拉尔盆地晚三叠世—早侏罗世火山岩的发现标志着古亚洲洋构造域向蒙古—鄂霍茨克构造域和太平洋构造域的转换 (陈崇阳等, 2016).

6 结论

(1) 扎拉山岩体花岗闪长岩及二长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为 244.9 ± 1.2 Ma 及 244.1 ± 2.3 Ma, 指示该岩体形成于中三叠世早期.

(2) 扎拉山岩体岩石具有典型 C 型埃达克岩的特征: 具有较高的 SiO_2 、 Al_2O_3 、Sr 含量及 Sr/Y 比值; 低的 Y、Yb、Cr、Ni 含量; $\text{Mg}^\#$ 值小于 45; $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值接近 1; 轻稀土元素富集, 重稀土元素亏损, 轻重稀土元素分馏明显.

(3) Hf 同位素结果显示, 扎拉山岩体具有正的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 (2.5~8.9), 二阶模式年龄 T_{DM2} 介于 707~1115 Ma, 表明其源区为年轻地壳, 与中亚造山带南缘同期岩浆岩 Hf 同位素结果一致; 南侧乌和尔图岩体 Hf 同位素组成与华北北缘基本一致, 笔者推测华北北缘与中亚造山带南缘 (早古生代岛弧或微陆块) 的构造边界可能从两个岩体之间通过.

(4)结合区域地质背景,笔者认为晚二叠世—中三叠世早期(260~245 Ma)华北板块与西伯利亚板块发生碰撞造山,地壳收缩加厚明显,在索伦缝合带附近形成一系列具有C型埃达克岩特征的岩浆岩。扎拉山岩体为该构造背景下,加厚地壳部分熔融的产物。

致谢:天津地质调查中心王树庆、胡晓佳、杨泽黎在成文过程中给予了许多指导;编委及两位审稿人审阅全文,并提出了宝贵意见,中国地质大学(北京)硕士研究生张天曦在文章格式排版中给予了帮助,在此一并致以诚挚的感谢!

附补充信息表见:<http://www.earth-science.net/WebPage/view.aspx?id=20190117071017.pdf>

References

- Castillo, P. R., 2012. Adakite Petrogenesis. *Lithos*, 134–135; 304–316. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.09.013>
- Cawood, P. A., Kröner, A., Collins, W. J., et al., 2009. Accretionary Orogens through Earth History. *Geological Society, London, Special Publications*, 318(1): 1–36. <https://doi.org/10.1144/sp318.1>
- Chen, C. Y., Gao, Y. F., Wu, H. B., et al., 2016. Zircon U-Pb Chronology of Volcanic Rocks in the Hailaer Basin, NE China and Its Geological Implications. *Earth Science*, 41(8): 1259–1274 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.104>
- Chen, Y. P., Wei, C. J., Zhang, J. R., et al., 2015. Metamorphism and Zircon U-Pb Dating of Garnet Amphibolite in the Baoyintu Group, Inner Mongolia. *Chinese Science Bulletin*, 60(19): 1698–1707. <https://doi.org/10.1007/s11434-015-0890-0>
- Chiaradia, M., 2009. Adakite-Like Magmas from Fractional Crystallization and Melting-Assimilation of Mafic Lower Crust (Eocene Macuchi Arc, Western Cordillera, Ecuador). *Chemical Geology*, 265(3–4): 468–487. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2009.05.014>
- Chiaradia, M., 2015. Crustal Thickness Control on Sr/Y Signatures of Recent Arc Magmas: An Earth Scale Perspective. *Scientific Reports*, 5(1): 8115. <https://doi.org/10.1038/srep08115>
- Defant, M. J., Drummond, M. S., 1990. Derivation of Some Modern Arc Magmas by Melting of Young Subducted Lithosphere. *Nature*, 347(6294): 662–665. <https://doi.org/10.1038/347662a0>
- Gao, S., Rudnick, R. L., Yuan, H. L., et al., 2004. Recycling Lower Continental Crust in the North China Craton. *Nature*, 432(7019): 892–897. <https://doi.org/10.1038/nature03162>
- Ge, X. Y., Li, X. H., Chen, Z. G., et al., 2002. Geochemistry and Petrogenesis of Jurassic High Sr/Low Y Granitoids in Eastern China: Constrains on Crustal Thickness. *Chinese Science Bulletin*, 47(6): 474–480 (in Chinese).
- Geng, J. Z., Li, H. K., Zhang, J., et al., 2011. Zircon Hf Isotope Analysis by Means of LA-MC-ICP-MS. *Geological Bulletin of China*, 30(10): 1508–1513 (in Chinese with English Abstract).
- Gong, W. B., Hu, J. M., Wu, S. J., et al., 2017. Deformation Characteristics, Timing and Significance of the Lang Shan Sinistral Strike-Slip Ductile Shear Zone in Inner Mongolia. *Earth Science Frontiers*, 24(3): 263–275 (in Chinese with English abstract).
- Guo, S., Teng, X. J., Liu, Y., et al., 2017. Geochemistry, Chronology and Hf Isotope Features of the Permian Intermediate-Basic Volcanic Rocks in Wulanaobao Area, Urad Houqi, Inner Mongolia and Its Geological Significance. *Journal of Geomechanics*, 23(3): 397–410 (in Chinese with English abstract).
- Hu, J. M., Gong, W. B., Wu, S. J., et al., 2014. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating of the Langshan Group in the Northeast Margin of the Alxa Block, with Tectonic Implications. *Precambrian Research*, 255: 756–770. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.08.013>
- Jahn, B. M., Windley, B., Natal'in, B., et al., 2004. Phanerozoic Continental Growth in Central Asia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(5): 599–603. [https://doi.org/10.1016/s1367-9120\(03\)00124-x](https://doi.org/10.1016/s1367-9120(03)00124-x)
- Jian, P., Liu, D. Y., Kröner, A., et al., 2010. Evolution of a Permian Intraoceanic Arc-Trench System in the Solonker Suture Zone, Central Asian Orogenic Belt, China and Mongolia. *Lithos*, 118(1–2): 169–190. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2010.04.014>
- Kay, R. W., Kay, S. M., 1993. Delamination and Delamination Magmatism. *Tectonophysics*, 219(1–3): 177–189. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(93\)90295-u](https://doi.org/10.1016/0040-1951(93)90295-u)
- Kay, S. M., Ramos, V. A., Marquez, M., 1993. Evidence in Cerro Pampa Volcanic Rocks for Slab-Melting Prior to Ridge-Trench Collision in Southern South America. *The Journal of Geology*, 101(6): 703–714. <https://doi.org/10.1086/648269>
- Li, S., Chung, S. L., Wilde, S. A., et al., 2017. Early-Middle Triassic High Sr/Y Granitoids in the Southern Central Asian Orogenic Belt: Implications for Ocean Closure in Accretionary Orogens. *Journal of Geophysical Research; Solid Earth*, 122(3): 2291–2309. <https://doi.org/10.1002/2017jb014006>

- Li, S., Wang, T., Wilde, S. A., et al., 2012. Geochronology, Petrogenesis and Tectonic Implications of Triassic Granitoids from Beishan, NW China. *Lithos*, 134 – 135; 123 – 145. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.12.005>
- Li, S., Wilde, S. A., Wang, T., et al., 2016. Latest Early Permian Granitic Magmatism in Southern Inner Mongolia, China; Implications for the Tectonic Evolution of the Southeastern Central Asian Orogenic Belt. *Gondwana Research*, 29(1): 168 – 180. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2014.11.006>
- Li, S. C., Zhang, L. Y., Li, P. C., et al., 2017. Discovery and Tectonic Implications of Early Triassic O-Type Adakite in Middle of Great Xing'an Range. *Earth Science*, 42 (12): 2117 – 2128 (in Chinese with English Abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.136>
- Liu, C. F., Wu, C., Zhu, Y., et al., 2015. Late Paleozoic-Early Mesozoic Magmatic History of Central Inner Mongolia, China; Implications for the Tectonic Evolution of the Xingmeng Orogenic Belt, the Southeastern Segment of the Central Asian Orogenic Belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, Online. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2015.09.011>
- Liu, C. H., Zhao, G. C., Liu, F. L., et al., 2017. Late Precambrian Tectonic Affinity of the Alxa Block and the North China Craton: Evidence from Zircon U-Pb Dating and Lu-Hf Isotopes of the Langshan Group. *Precambrian Research*, Online. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.10.019>
- Liu, J., Xi, A. H., Ge, Y. H., et al., 2015. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Ages and Petrogenesis of Granodiorite in Mengguyingzi, Chifeng, Inner Mongolia. *Geological Bulletin of China*, 34 (2): 437 – 446 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. F., Chi, X. G., Zhao, Z., et al., 2013. Zircon U-Pb Age and Petrogenetic Discussion on Jianshetun Adakite in Balinyouqi, Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 29 (3): 827 – 839 (in Chinese with English abstract).
- Liu, M., Zhang, D., Xiong, G. Q., et al., 2016. Zircon U-Pb Age, Hf Isotope and Geochemistry of Carboniferous Intrusions from the Langshan Area, Inner Mongolia; Petrogenesis and Tectonic Implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 120: 139 – 158. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2016.01.005>
- Liu, Y. S., Gao, S., Hu, Z. C., et al., 2010. Continental and Oceanic Crust Recycling-Induced Melt-Peridotite Interactions in the Trans-North China Orogen; U-Pb Dating, Hf Isotopes and Trace Elements in Zircons from Mantle Xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1 – 2): 537 – 571. <https://doi.org/10.1093/petrology/egp082>
- Ludwig, K., 2003. Isoplot/Ex, A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel, version 3.00. Berkeley Geochronology Centre, Berkeley.
- Ma, S. W., Liu, C. F., Xu, Z. Q., et al., 2017. Geochronology, Geochemistry and Tectonic Significance of the Early Carboniferous Gabbro and Diorite Plutons in West Ujimqin, Inner Mongolia. *Journal of Earth Science*, 28 (2): 249 – 264. <https://doi.org/10.1007/s12583-016-0912-2>
- Maitre, R. W. L., 1989. A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms; Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks. Blackwell Scientific, Oxford.
- Maniar, P. D., Piccoli, P. M., 1989. Tectonic Discrimination of Granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635 – 643. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1989\)101<0635:tdog>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1989)101<0635:tdog>2.3.co;2)
- Martin, H., 1986. Effect of Steeper Archean Geothermal Gradient on Geochemistry of Subduction-Zone Magmas. *Geology*, 14 (9): 753. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1986\)14<753:eosagg>2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1986)14<753:eosagg>2.0.co;2)
- Rapp, R. P., Watson, E. B., 1995. Dehydration Melting of Metabasalt at 8 – 32 kbar: Implications for Continental Growth and Crust-Mantle Recycling. *Journal of Petrology*, 36(4): 891 – 931. <https://doi.org/10.1093/petrology/36.4.891>
- Şengör, A. M. C., Natal'in, B. A., Burtman, V. S., 1993. Evolution of the Altaid Tectonic Collage and Palaeozoic Crustal Growth in Eurasia. *Nature*, 364 (6435): 299 – 307. <https://doi.org/10.1038/364299a0>
- Shi, X. J., Wang, T., Zhang, L., et al., 2014. Timing, Petrogenesis and Tectonic Setting of the Late Paleozoic Gabbro-Granodiorite-Granite Intrusions in the Shalazhashan of Northern Alxa: Constraints on the Southernmost Boundary of the Central Asian Orogenic Belt. *Lithos*, 208 – 209: 158 – 177. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.08.024>
- Sisson, T. W., 1994. Hornblende-Melt Trace-Element Partitioning Measured by Ion Microprobe. *Chemical Geology*, 117 (1 – 4): 331 – 344. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)90135-x](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)90135-x)
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts; Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42 (1): 313 – 345. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>
- Sylvester, P. J., 1989. Post-Collisional Alkaline Granites. *The Journal of Geology*, 97(3): 261 – 280. <https://doi.org/10.1086/629302>
- Wang, Q., Wyman, D. A., Xu, J. F., et al., 2007. Partial Melt-

- ing of Thickened or Delaminated Lower Crust in the Middle of Eastern China: Implications for Cu-Au Mineralization. *The Journal of Geology*, 115 (2): 149–161. <https://doi.org/10.1086/510643>
- Wang, Q., Xu, J. F., Jian, P., et al., 2006. Petrogenesis of Adakitic Porphyries in an Extensional Tectonic Setting, Dexing, South China: Implications for the Genesis of Porphyry Copper Mineralization. *Journal of Petrology*, 47 (1): 119–144. <https://doi.org/10.1093/petrology/egi070>
- Wang, T. Y., Wang, J. R., Wang, S. Z., et al., 1992. Discovery of the Engeer Wusu Ophiolitic Mélange Belt in Northern Alashan and Its Tectonic Significance. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 28 (2): 194–196 (in Chinese with English abstract).
- Wang, W. L., Teng, X. J., Liu, Y., et al., 2017. Zircon U-Pb Chronology and Geochemical Characteristics of the Wuheertu Granite Mass in Langshan, Inner Mongolia. *Journal of Geomechanics*, 23 (3): 382–396 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z. Z., Han, B. F., Feng, L. X., et al., 2015a. Geochronology, Geochemistry and Origins of the Paleozoic-Triassic Plutons in the Langshan Area, Western Inner Mongolia, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 97: 337–351. <https://doi.org/10.1016/j.jseaeas.2014.08.005>
- Wang, Z. J., Xu, W. L., Pei, F. P., et al., 2015b. Geochronology and Geochemistry of Middle Permian-Middle Triassic Intrusive Rocks from Central-Eastern Jilin Province, NE China: Constraints on the Tectonic Evolution of the Eastern Segment of the Paleo-Asian Ocean. *Lithos*, 238: 13–25. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.09.019>
- Wang, Z. Z., Han, B. F., Feng, L. X., et al., 2016. Tectonic Attribution of the Langshan Area in Western Inner Mongolia and Implications for the Neoproterozoic Evolution of the Western North China Craton: Evidence from LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating of the Langshan Basement. *Lithos*, 261: 278–295. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.03.005>
- Wilde, S. A., 2015. Final Amalgamation of the Central Asian Orogenic Belt in NE China: Paleo-Asian Ocean Closure Versus Paleo-Pacific Plate Subduction—A Review of the Evidence. *Tectonophysics*, 662: 345–362. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2015.05.006>
- Xiong, X. L., Liu, X. C., Zhu, Z. M., et al., 2011. Adakitic Rocks and Destruction of the North China Craton: Evidence from Experimental Petrology and Geochemistry. *Science in China (Series D)*, 41 (5): 654–667 (in Chinese).
- Yang, G., Xiao, L., Wang, G. C., et al., 2015. Geochronology, Geochemistry and Petrogenesis of Bieluogaxi Granodioritic Pluton in Western Junggar. *Earth Science*, 40 (5): 810–823 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.37pp/dqkx.2015.043>
- Yang, H., Ge, W. C., Zhao, G. C., et al., 2015. Early Permian-Late Triassic Granitic Magmatism in the Jiamusi-Khanka Massif, Eastern Segment of the Central Asian Orogenic Belt and Its Implications. *Gondwana Research*, 27 (4): 1509–1533. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2014.01.011>
- Zeng, L. S., Gao, L. E., Xie, K. J., et al., 2011. Mid-Eocene High Sr/Y Granites in the Northern Himalayan Gneiss Domes: Melting Thickened Lower Continental Crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 303 (3–4): 251–266. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.01.005>
- Zhang, Q., Wang, Y., Liu, W., et al., 2002. Adakite: Its Characteristic and Implications. *Geological Bulletin of China*, 21 (7): 431–435 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. H., Zhao, Y., Liu, J. M., et al., 2010. Geochronology, Geochemistry and Tectonic Setting of the Late Paleozoic-Early Mesozoic Magmatism in the Northern Margin of the North China Block: A Preliminary Review. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29 (6): 824–842 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. H., Zhao, Y., Liu, J. M., et al., 2016. Different Sources Involved in Generation of Continental Arc Volcanism: The Carboniferous-Permian Volcanic Rocks in the Northern Margin of the North China Block. *Lithos*, 240–243: 382–401. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.11.027>
- Zhang, S. H., Zhao, Y., Ye, H., et al., 2012. Early Mesozoic Alkaline Complexes in the Northern North China Craton: Implications for Cratonic Lithospheric Destruction. *Lithos*, 155: 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.08.009>
- Zhang, S. H., Zhao, Y., Ye, H., et al., 2014. Origin and Evolution of the Bainaimiao Arc Belt: Implications for Crustal Growth in the Southern Central Asian Orogenic Belt. *Geological Society of America Bulletin*, 126 (9–10): 1275–1300. <https://doi.org/10.1130/b31042.1>
- Zhang, W., Jian, P., Liu, D. Y., et al., 2010. Geochemistry, Geochronology and Hf Isotopic Compositions of Triassic Granodiorite and Shoshonite from the Damaoqi Area, Central Inner Mongolia, China. *Geological Bulletin of China*, 29 (7): 821–832 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, X. C., Zhou, W. X., Fu, D., et al., 2018. Isotope Chronology and Geochemistry of the Lower Carboniferous Granite in Xilinhot, Inner Mongolia, China. *Journal of Earth Science*, 29 (2): 280–294. <https://doi.org/10.1007/s12583-017-0942-2>

附中文参考文献

- 陈崇阳,高有峰,吴海波,等,2016.海拉尔盆地火山岩的锆石 U-Pb 年龄及其地质意义.地球科学,41(8): 1259—1274.
- 葛小月,李献华,陈志刚,等,2002.中国东部燕山期高 Sr 低 Y 型中酸性火成岩的地球化学特征及成因:对中国东部地壳厚度的制约.科学通报,47(6): 474—480.
- 耿建珍,李怀坤,张健,等,2011.锆石 Hf 同位素组成的 LA-MC-ICP-MS 测定.地质通报,30(10): 1508—1513.
- 公王斌,胡健民,吴素娟,等,2017.内蒙古狼山左行走滑韧性剪切带变形特征、时间及意义.地学前缘,24(3): 263—275.
- 郭硕,滕学建,刘洋,等,2017.内蒙古乌拉特后旗乌兰敖包地区二叠纪中—基性火山岩地球化学、年代学、Hf 同位素特征及其地质意义.地质力学学报,23(3): 397—410.
- 李世超,张凌宇,李鹏川,等,2017.大兴安岭中段早三叠世 O 型埃达克岩的发现及其大地构造意义.地球科学,42(12): 2117—2128.
- 刘珏,郝爱华,葛玉辉,等,2015.内蒙古赤峰地区蒙古营子花岗闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及成因.地质通报,34(2): 437—446.
- 刘建峰,迟效国,赵芝,等,2013.内蒙古巴林右旗建设屯埃达克岩锆石 U-Pb 年龄及成因讨论.岩石学报,29(3): 827—839.
- 王廷印,王金荣,王士政,等,1992.阿拉善北部恩格尔乌苏蛇绿混杂岩带的发现及其构造意义.兰州大学学报(自然科学版),28(2): 194—196.
- 王文龙,滕学建,刘洋,等,2017.内蒙古狼山乌和尔图花岗岩岩体锆石 U-Pb 年代学及地球化学特征.地质力学学报,23(3): 382—396.
- 熊小林,刘星成,朱志敏,等,2011.华北埃达克质岩与克拉通破坏:实验岩石学和地球化学依据.中国科学(D辑),41(5): 654—667.
- 杨钢,肖龙,王国灿,等,2015.西准噶尔别鲁阿嘎希花岗闪长岩年代学、地球化学特征及岩石成因.地球科学,40(5): 810—823.
- 张旗,王焰,刘伟,等,2002.埃达克岩的特征及其意义.地质通报,21(7): 431—435.
- 张拴宏,赵越,刘建民,等,2010.华北地块北缘晚古生代——早中生代岩浆活动期次、特征及构造背景.岩石矿物学杂志,29(6): 824—842.
- 张维,简平,刘敦一,等,2010.内蒙古中部达茂旗地区三叠纪花岗岩和钾玄岩的地球化学、年代学和 Hf 同位素特征.地质通报,29(7): 821—832.