



山东即墨马山粗面英安岩年代学与地球化学特征及其地质意义

朱晓青, 侯方辉, 刘洪滨, 郭兴伟, 孙天本, 秦亚超, 安郁辉, 李凤春

Geochronology and geochemistry of Mashan trachydacite, JiMo District, Shandong Province and their geological implications

ZHU Xiaoqing, HOU Fanghui, LIU Hongbin, GUO Xingwei, SUN Tianben, QIN Yachao, AN Yuhui, and LI Fengchun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2021011801>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

西南印度洋中脊岩石地球化学特征及其岩浆作用研究

A review of studies on the magmatism at Southwest Indian Ridge from petrological and geochemical perspectives

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 126

南海南部浅表层柱状沉积物孔隙水地球化学特征对甲烷渗漏活动的指示

Pore water geochemistry of shallow surface sediments in the southern South China Sea and its implications for methane seepage activities

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 112

南海北部神狐海域SH37岩芯浊流沉积及其物源分析

Turbidity deposits and their provenance: evidence from core SH37 in Shenhu area of the South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 101

江苏中部海岸晚第四纪沉积物的粒度与磁化率特征及其古环境意义

Characteristics of grain size and magnetic susceptibility of the Late Quaternary sediments from core 07SR01 in the middle Jiangsu coast and their paleoenvironmental significances

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 210



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2021011801

山东即墨马山粗面英安岩年代学与地球化学特征及其地质意义

朱晓青^{1,2}, 侯方辉^{1,2}, 刘洪滨³, 郭兴伟^{1,2}, 孙天本⁴, 秦亚超^{1,2}, 安郁辉^{1,2}, 李凤春⁵

1. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071

2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266237

3. 中国海洋大学海洋发展研究院, 青岛 266100

4. 青岛市即墨区马山自然保护区管理处, 青岛 266200

5. 中国冶金地质总局山东局测试中心, 济南 250014

摘要: 山东即墨马山地区出露罕见的发育柱状节理的中酸性火山岩, 对于其年代学及形成的大地构造背景鲜有讨论。岩石薄片与主量元素分析结果证明马山柱状节理火山岩属于粗面英安岩。利用 LA-ICP-MS 对马山柱状节理火山岩中的锆石进行 U-Pb 测年, 确定其形成时间为 113.2 ± 1.3 Ma, 属于早白垩世晚期。原位 Lu-Hf 分析获得锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值范围为 $-19.5 \sim -0.4$, 对应的二阶段模式年龄范围约为 $1.97 \sim 3.26$ Ga, 暗示其源区岩浆成生于古老地壳的熔融。马山粗面英安岩具有 SiO_2 和 Al_2O_3 含量较高, MgO 含量低及富含碱的主量元素的特征。其稀土元素总量较低, 配分模式呈轻稀土富集、重稀土亏损的右倾模式, Eu 轻微负异常, Sr 含量高而 Y 和 Yb 含量低。马山粗面英安岩的主微量元素显示其具有埃达克岩特征, 推测其来源岩浆可能形成于燕山期华北东部区域性壳增厚后下部老地壳的熔融。

关键词: 粗面英安岩; 锆石 U-Pb; Lu-Hf; 早白垩世; 埃达克岩; 马山

中图分类号: P542

文献标识码: A

Geochronology and geochemistry of Mashan trachydacite, JiMo District, Shandong Province and their geological implications

ZHU Xiaqing^{1,2}, HOU Fanghui^{1,2}, LIU Hongbin³, GUO Xingwei^{1,2}, SUN Tianben⁴, QIN Yachao^{1,2}, AN Yuhui^{1,2}, LI Fengchun⁵

1. Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China

2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China

3. Institute of Marine Development of Ocean University of China, Qingdao 266100, China

4. Management Office of Mashan Nature Reserve, Jimo District, Qingdao 266200, China

5. Testing Center of Shandong Bureau, China Metallurgy and Geology Bureau, Jinan 250014, China.

Abstract: Intermediate-acid volcanic rocks with columnar joints expose in the Mashan area, Jimo, Shandong Province. The geochronology and tectonic setting of the volcanic rocks had been rarely studied. The petrographic characteristics and major element results show that the volcanic rocks at Mashan are trachydacite. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of the trachydacite shows that the volcanic rocks erupted at 113.2 ± 1.3 Ma, that is, in the late Early Cretaceous. In-situ Lu-Hf analysis suggests that the zircon $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values range from -19.5 to -0.4 and two-stage model ages of zircons range from 1.97 Ga to 3.26 Ga, indicating that the magma was sourced from the melting of ancient crust. The Mashan trachyandesite is characterized by high content of SiO_2 and Al_2O_3 , low content of MgO , enriched Na_2O and K_2O . Moreover, all samples are featured by lower total contents of rare earth elements, enriched light rare earth elements, deficit heavy rare earth elements, slightly negative Eu anomaly, high Sr content, low Y and Yb contents. The major and trace elements of the trachydacite in Mashan are quite similar to adakite, and the adakitic magma could have been formed by the melting of the lower old crust after the regional crust thickening in Eastern North China Block during the Yanshanian.

Key words: trachydacite; zircon U-Pb; Lu-Hf; Early Cretaceous; Adakite; Mashan

资助项目: 中国地质调查局海洋地质调查项目 (DD20190365, DD20190377, DD20190205)

作者简介: 朱晓青 (1982—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事构造地质与海洋地质研究, E-mail: xq_zhu0819@126.com

通讯作者: 侯方辉 (1979—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事构造地质及海洋地质研究, E-mail: houfanghui3993@163.com

收稿日期: 2021-01-18; 改回日期: 2021-04-30. 蔡秋蓉编辑

岩石圈增厚与下沉是大陆岩浆弧地区普遍存在的旋回性过程, 典型例子如: 中生代时期的中国华北东部与美洲科迪勒拉等地区^[1]。任纪舜等^[2]根据中国东部大兴安岭-太行山-武陵山重力梯度带东、西两侧燕山造山期之后的差异性: 西部保存良好的沉积盆地、广泛分布的中元古代—侏罗纪沉积盖层(中-上构造层)迥然不同于东部的变质基底大量出露(下构造层)特征, 首次提出中国东部在印支-燕山旋回期间曾因挤压造山而隆升(成为高原)。邓晋福等^[3]根据实验岩石学的证据, 认为华北燕辽地区燕山期无负 Eu 异常的火山岩应形成于加厚的地壳底部(或山根带)。董树文等^[4-5]提出燕山期华北周缘多板块汇聚的东亚汇聚模式, 用于解释华北东部中生代东高西低古地势的动力学机制。张旗等^[6]在上述研究基础上, 首先提出“C 型”埃达克岩的概念, 将其用于描述中国东部燕山期富钾并具埃达克岩属性特征的岩浆岩, 认为该类型岩浆岩源自增厚地壳的熔融, 并根据中生代埃达克岩的分布大致圈定了东部高原的范围。尽管对于“C 型”埃达克岩的成因及其所代表的大地构造意义仍存在不同的认识^[6-12], 但越来越多的实例证明了“C 型”埃达克岩的出现与地壳增厚具有对应关系^[8]。

“中国大地构造演化和国际亚洲大地构造图编制(青岛所)”项目组在 2017—2019 年进行海区毗邻陆域的野外工作中, 借助岩石主微量元素特征确定青岛即墨马山发育一套具埃达克岩地球化学特征的火山岩。该套中酸性火山岩因发育罕见的柱状节理而建设成为“马山石林”地质景观。1:25 万青岛市幅区域地质调查成果将该套火山岩归入青山群八亩地组火山岩地层中^[13]。韩宗珠等^[14]曾根据岩石主微量元素分析结果提出马山安山玢岩的分异结晶程度较高, 为具火山弧属性的钙碱性火山岩, 推测构造背景为大陆边缘弧环境, 火山岩成生的动力学机制可能为扬子板块与华北板块在燕山期的推挤作用。最近, 何登洋等^[15]也对该套马山火山岩开展了锆石测年、全岩地球化学及锆石原位 Lu-Hf 同位素等工作, 其认为该套火山岩来源岩浆形成于早白垩世(119.3±1.6 Ma)区域下地壳物质的熔融, 与胶莱盆地早白垩世伸展变形时间对应, 对应的动力学机制为古太平洋板片大规模回撤背景下的区域性伸展。上述研究者前期所做的部分样品显示出典型的“C 型”埃达克岩地化特征, 但未对其埃达克岩属性展开讨论^[14-15], 更大的分歧在于对该套火山岩形成的构造背景存在挤压与伸展环境两种截然相反的认识^[14-15]。

基于此, 拟以该套马山柱状节理中-酸性火山岩为研究目标, 利用其中的锆石 U-Pb 测年进一步限定其形成时代, 借助岩石主微量元素分析与锆石原位 Lu-Hf 同位素特征探讨其来源岩浆性质, 在前人研究的基础上, 重点为下述 3 个科学问题的探讨提供约束与线索: ①马山柱状节理火山岩的形成时间; ②柱状节理火山岩的来源岩浆的地球化学特征; ③该火山岩形成期对应的区域动力学机制等。

1 地质背景与采样

山东即墨马山地区在大地构造位置上处于中朝板块与扬子板块的结合带——苏鲁造山带北侧、胶莱盆地南部, 因该地中性火山岩中发育规模壮观的柱状节理及其他地质景观, 已建设成为省级地质公园。该地区的柱状节理中-酸性火山岩岩体直接覆盖于早白垩世莱阳群曲格庄组砂岩、粉砂岩之上, 属于青山群八亩地组^[13](图 1a)。

马山柱状节理火山岩岩体露头呈浅灰绿色, 肉眼观察为斑状结构, 发育充填方解石的晶洞(图 1b, c), 晶洞直径由几厘米到十几厘米不等。在马山地质公园的“石林”景观处(36°24'3"N、120°22'17"E)分散采集新鲜的柱状节理火山岩样品 4 块, 每块约 5 kg, 分别用于薄片磨制、锆石挑选及主微量元素分析等。

2 实验方法

2.1 锆石 U-Pb、Lu-Hf 及微量元素分析

选取样品 MS-01 用于锆石挑选、测年及薄片磨制。MS-01、MS-02、MS-03 与 MS-04 用于主微量元素分析。锆石挑选、制靶与拍照均在河北廊坊诚信地质服务有限公司进行。按照标准的重矿物挑选流程对样品进行粉碎、重磁分选, 双目镜下挑选获得用于定年的锆石颗粒。然后用环氧树脂将锆石固定并研磨抛光至锆石颗粒尺寸的 1/2 左右, 以揭示锆石内部结构。在进行锆石 U-Pb 及 Lu-Hf 测试前, 首先拍摄锆石的透射、反射及阴极发光图像, 以保证在分析过程中避开锆石颗粒中的包裹体或裂隙。

锆石 U-Pb 测试在中国冶金局山东局测试中心完成, 所用激光剥蚀系统为美国 Conherent 公司生产的 GeoLasPro 193 nm ArF 准分子系统, 电感耦合等离子体质谱仪的型号为 ThermoFisher 公司生产

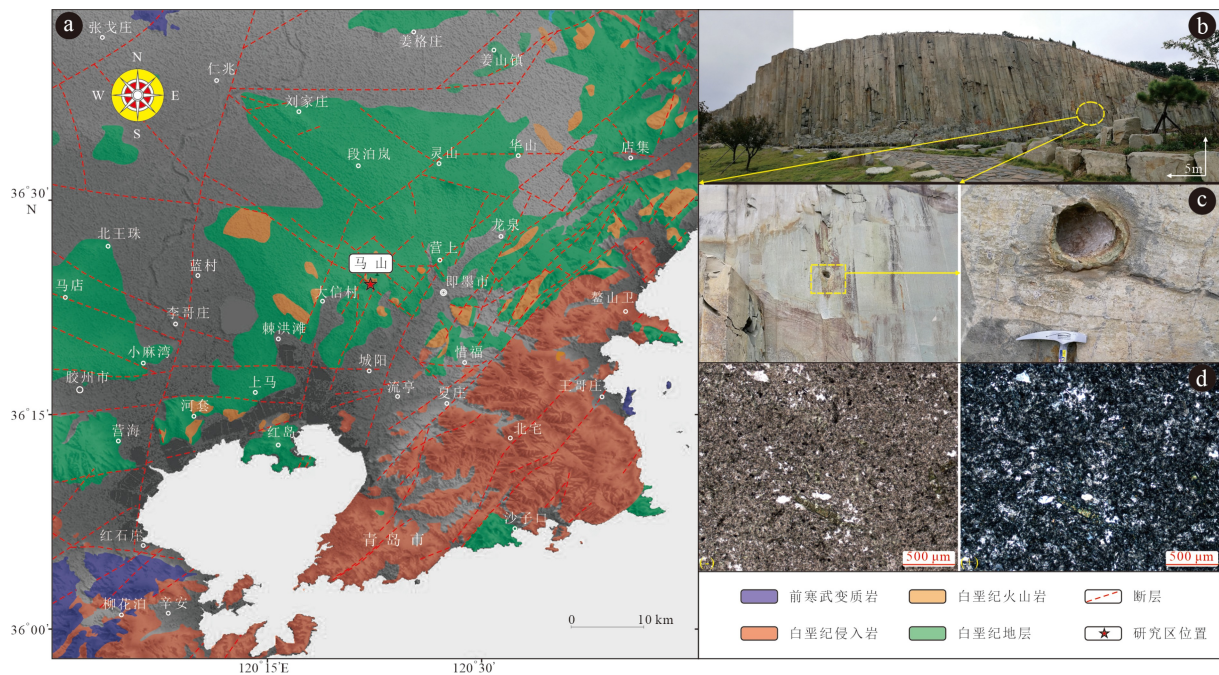


图 1 研究区地质概况、马山柱状节理火山岩露头与镜下特征

a. 研究区地质简图(据文献 [13]), b. 马山石林剖面, c. 粗面英安岩中的晶洞构造, d. 马山粗面英安岩镜下显微特征, 左侧为单偏光(-), 右侧为正交光(+).

Fig.1 Geological map of Mashan region with pictures of outcrops and photomicrographs of the volcanic rocks with columnar joints

a. sketched geological map of study area (According to reference [13]), b. section of columnar joints developed in Mashan, c. geode structure of the trachydacite, d. petrographic characteristics of Mashan trachydacite under microscope, with single polarized light (-) on the left and crossed light (+) on the right.

的 iCAPQ。具体实验流程为: 以氦气为载气, 束斑直径为 30 μm , 频率为 10 Hz, 能量密度约为 8 J/cm²。单点采集时间模式为: 30 s 气体空白, 50 s 样品剥蚀, 30 s 冲洗; 每 10 个样品点插入一组标样(锆石标样+成分标样)。采用 91500(年龄为 1 064 $\pm$ 2 Ma)作为外标进行基体校正; 成分标样采用 NIST SRM610。其中²⁹Si 作为内标元素。锆石微量元素分析与 U-Pb 定年同步进行, 以 NIST 612 作为外标计算未知微量元素的浓度, 使用 Pearce 等^[16]推荐值。利用²⁹Si 作为内标对分析结果进行标准化。轻稀土元素分析结果的平均不确定度为 10%, 其余元素为 5%。

锆石原位 Lu-Hf 测试在北京科荟测试技术有限公司进行, 利用 NWR213nm 固体激光器对锆石进行剥蚀, 激光剥蚀的斑束直径为 55 μm , 能量密度为 7~8 J/cm², 频率为 10 Hz, 激光剥蚀物质以高纯 He 为载气送入 Neptune Plus(MC-ICPMS)。以国际标样 GJ-1 作为监控样。采用¹⁷⁹Hf/¹⁷⁷Hf=0.7325 对 Hf 同位素比值进行指数归一化质量歧视校正, 采用¹⁷³Yb/¹⁷²Yb=1.35274 对 Yb 同位素比值进行指数归一化质量歧视校正。 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 计算采用衰变常数 $\lambda=1.867\times 10^{-11}/\text{a}$ ^[17], (¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf)_{CHUR}=0.0332, (¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf)_{CHUR}=

0.282772^[18], (¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf)_{DM}=0.0384, (¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf)_{DM}=0.28325^[19]; T_{DM}^{c} 为二阶段 Hf 模式年龄; 计算采用平均地壳¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 比值为 0.015。

2.2 岩石主微量元素分析

样品的主量元素与微量元素分析均在中国冶金地质总局山东局测试中心完成。4 件样品的制备分为粗碎、中碎和细碎, 每个阶段均包括破碎、过筛、混匀和缩分 4 道工序, 实验室检测温度均保持 25 $^{\circ}\text{C}$ 。主量元素分析采用 X-射线荧光粉末熔片法, 具体流程为: 准确称取 0.2000 g 样品, 7.0000 g 混合熔剂放入瓷坩埚中, 搅拌均匀, 转入铂-金坩埚($w_{\text{Pt}}95\%+w_{\text{Au}}5\%$)内, 加入 2 滴溴化锂溶液(4.2), 将坩埚置于熔样机上以 1 150 $^{\circ}\text{C}$ 熔融 12 min, 浇铸制备玻璃片。最后上机(ARL 9900XP 型 X 射线荧光光谱仪)测试主量元素。主量元素的检测精度与准确度为: SiO₂、Al₂O₃、MgO 为 0.1%, 总铁 TFe₂O₃、CaO 为 0.05%, TiO₂、MnO、Na₂O、K₂O 为 0.01%, P₂O₅ 为 0.005%。

微量元素测试采用电感耦合等离子质谱法: 准确称取 0.1000 g 样品于 Teflon 杯中, 少量水润湿样

品,依次加入 2 mL HNO_3 和 3 mL HF , 加盖,放入钢套,烘箱 185 $^{\circ}\text{C}$ 加热 48 h 后,冷却后拧开钢套,开盖,电热板 130 $^{\circ}\text{C}$ 加热蒸至尽干,加入 2 mL HNO_3 继续加热蒸干,以 1.5 mL HNO_3 , 1.5 mL MQ 水冲洗杯壁,加盖,放入钢套,180 $^{\circ}\text{C}$ 加热 12 h 提取盐类,冷却后开盖,转移至 100 mL 塑料刻度管中,稀释至刻度,摇匀,静置后利用 ICP-MS 测试微量元素。微量元素的检测精度与准确度为: U 为 0.003×10^{-6} , Y、Nd、Hf 为 0.01×10^{-6} , Cd 为 0.02×10^{-6} , Mo、Be、Zr、Ta 为 0.05×10^{-6} , Sc、Ni、W、Tl、Pb 为 0.1×10^{-6} , Co、Cu、Ga、Sr、Sn 为 0.2×10^{-6} , Cr、Ba 为 0.5×10^{-6} , Th 为 0.8×10^{-6} , Li、Rb 为 1.0×10^{-6} , V、Zn 为 2.0×10^{-6} 。稀土元素的检出限除 La、Ce、Pr、Nd、Sm、Gd 为 0.01×10^{-6} 外,其余均为 0.003×10^{-6} 。

3 结果

3.1 岩相学

马山柱状节理火山岩的岩石薄片镜下分析显示: 岩石主要由斑晶、基质组成。斑晶显示柱状,呈角闪石假象组成,绿鳞石化、少量绿泥石化等呈假象,粒度一般为 0.2~0.8 mm,分布零散,少数聚斑状产出,部分具暗化边结构(图 1d)。基质由长石、暗色矿物假象、石英组成,长石主要为斜长石,呈半自形微板条状,粒度一般 <0.1 mm,半定向或呈交织状分布,具交织结构,其间填隙暗色矿物(已蚀变为绿泥石等)及石英。杏仁体不规则状,大小 0.2~1 mm 零散分布,被石英、绿泥石等填充(图 1d)。从岩石薄片分析即可发现石英含量较典型安山岩要高,薄片鉴定可将其归为英安岩类。

3.2 锆石 U-Pb 与 Lu-Hf

马山柱状节理粗面英安岩中挑选获得的 23 颗锆石进行 U-Pb 测年(表 1),选取协和度 $\geq 90\%$ 、结果显示最年轻一组 12 颗锆石 U-Pb 加权平均年龄为 113.2 ± 1.3 Ma (MSWD=0.64, 图 2),对应早白垩世晚期 Aptian 与 Albian 期界线附近,其该组锆石的 Th/U 比值均大于 0.4,表明锆石多为岩浆锆石^[20],可用于代表马山柱状节理粗面英安岩的形成时代。

最年轻一组锆石显示相似的左倾稀土配分特征(标准化值据 McDonough 和 Sun^[21]),重稀土富集,具 δ_{Ce} 正异常及轻微的 δ_{Eu} 负异常(图 3)。碎屑锆石的稀土元素特征与形成时代关系密切,表明不同时代锆石的结晶条件存在差异(图 3)。锆石原位

Lu-Hf 测试结果显示: 所测锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均为负值 ($-0.42 \sim -19.48$),对应的二阶段模式年龄均为古元古代—太古代(表 2, 图 4)。

3.3 主微量元素特征

马山柱状节理火山岩 4 件样品的主量元素含量如表 3 所示, SiO_2 含量较高,为 65.44%~67.26%,平均为 66.74%; Al_2O_3 含量为 13.37%~14.58%,平均为 13.69%; K_2O 含量较高,为 3.58%~3.98%,平均为 3.79%; Na_2O 含量为 3.77%~4.71%,平均为 4.34%; 全碱 $w(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ 含量为 7.59%~8.24%,平均为 8.13%; TiO_2 、 MnO 、 P_2O_5 含量均较低,平均含量分别为 0.44%、0.09%、0.19%; MgO 平均含量为 2.14%; CaO 平均含量为 2.85%; 全铁含量较高 (3.61%~3.89%),平均含量为 3.69%。岩石全碱 TAS 图解(据 Le Bas^[22], 图 5)中,样品点均落于粗面英安岩区域,与镜下鉴定结果吻合。

4 件马山粗面英安岩的微量元素(表 4)特征为: Sr 含量高 ($341 \times 10^{-6} \sim 489 \times 10^{-6}$),平均为 413.5×10^{-6} ; Yb 与 Y 含量低,均值分别为 1.40×10^{-6} 、 13.5×10^{-6} ; 稀土元素总量较低(表 5), ΣREE 为 $119.2 \times 10^{-6} \sim 131.1 \times 10^{-6}$,平均为 126.1×10^{-6} ,明显低于地壳岩浆岩平均值。稀土配分模式呈轻稀土显著富集、重稀土强烈亏损的右倾模式, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 13.51~14.56, $(\text{Ce}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 9.31~9.98。 δEu 范围为 0.77~0.93,平均值 0.88,显示轻微负异常(图 6)。此外,马山粗面英安岩明显富集大离子亲石元素 Ba、Pb,亏损 Th、Nb、Ti 等高场强元素(图 7)。

4 讨论

4.1 马山粗面英安岩的埃达克岩属性、形成时代及区域对比

埃达克岩概念首先由 Defant and Drummond 于 1990 年在研究由年轻岩石圈俯冲熔融形成的现代弧岩浆时提出,系于现代弧岩浆由 Kay^[23] 首先记录于阿留申群岛的埃达克岛 (Adak Island), 因之命名为 Adakite^[24]。埃达克岩初始定义用于描述由年轻的大洋岩石圈 (≤ 25 Ma) 俯冲形成的火山岩或侵入岩,具有 SiO_2 含量 $\geq 56\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 15\%$ (很少低于此值), $\text{Na}_2\text{O} > 3.5\%$, MgO 含量通常 $< 3\%$ (很少高于 6%), 相对岛弧性质的安山岩、英安岩和钠质流纹岩组合具有更低的 Y 和重稀土含量 ($\text{Y} \leq 18 \times 10^{-6}$; $\text{Yb} \leq 1.9 \times 10^{-6}$), Sr 含量高 (很少 $< 400 \times 10^{-6}$), 高场强

表 1 马山粗面英安岩锆石 U-Pb 测试结果
Table 1 Zircon U-Pb dating results of trachydacite at Mashan

点 号	Th /10 ⁻⁶	U/10 ⁻⁶	Th/U	比值						年龄/Ma						谐和度/%
				²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	± 1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	± 1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	± 1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	± 1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	± 1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	± 1σ	
MS-01	3.2	370.2	0.01	0.04995	0.00297	0.133 78	0.00741	0.01984	0.00039	195	134	127	7	127	2	99
MS-02	165.0	235.1	0.70	0.10304	0.00387	2.14901	0.07840	0.15008	0.00276	1 679	69	1 165	25	901	15	74
MS-03	0.0	0.45	0.01	0.03465	0.01682	4.37117	2.07928	0.034 12	0.01459	--	--	1 707	393	216	91	56
MS-04	1 327.3	935.3	1.42	0.04782	0.00197	0.118 10	0.00484	0.01785	0.00027	100	87	113	4	114	2	99
MS-05	376.9	294.5	1.28	0.04951	0.00329	0.11991	0.00749	0.01787	0.00040	172	156	115	7	114	3	99
MS-06	100.5	115.3	0.87	0.05643	0.00525	0.13687	0.01219	0.01767	0.00053	478	205	130	11	113	3	85
MS-07	899.6	806.2	1.12	0.05167	0.00246	0.12889	0.00600	0.01787	0.00037	333	105	123	5	114	2	92
MS-08	96.9	148.0	0.65	0.11618	0.00370	5.07929	0.16091	0.31262	0.00570	1898	57	1833	27	1 754	28	95
MS-09	1 121.3	809.3	1.39	0.05088	0.00258	0.12693	0.00628	0.01795	0.00036	235	114	121	6	115	2	94
MS-10	80.6	120.9	0.67	0.08139	0.00443	0.71790	0.04065	0.06321	0.00167	1 231	140	549	24	395	10	67
MS-11	0.0	6.2	0.00	0.09050	0.02278	0.45048	0.12001	0.03243	0.00361	1 436	496	378	84	206	23	41
MS-12	510.8	1 110.0	0.46	0.05150	0.00206	0.12502	0.00506	0.01727	0.00030	265	93	120	5	110	2	91
MS-13	167.7	2 466.9	0.07	0.16904	0.00406	9.84273	0.23879	0.41252	0.00633	2 548	40	2 420	22	2 226	29	91
MS-14	184.5	166.1	1.11	0.05229	0.00471	0.12991	0.01039	0.01795	0.00046	298	210	124	9	115	3	92
MS-15	69.1	246.8	0.28	0.05578	0.00257	0.26734	0.01174	0.03436	0.00062	443	102	241	9	218	4	90
MS-16	109.4	315.4	0.35	0.05255	0.00237	0.24168	0.01064	0.03271	0.00060	309	99	220	9	208	4	94
MS-17	937.5	625.8	1.50	0.05214	0.00239	0.13070	0.00511	0.01794	0.00034	300	106	125	5	115	2	91
MS-18	396.1	555.5	0.71	0.05303	0.00222	0.13004	0.00486	0.01749	0.00032	332	94	124	4	112	2	90
MS-19	52.9	1 325.4	0.04	0.05007	0.00146	0.22608	0.00622	0.03209	0.00044	198	69	207	5	204	3	98
MS-20	614.1	290.2	2.12	0.04650	0.00531	0.11427	0.01412	0.01715	0.00048	33	243	110	13	110	3	99
MS-21	3 467.1	1 542.5	2.25	0.04698	0.00156	0.11737	0.00414	0.01766	0.00029	56	72	113	4	113	2	99
MS-22	1 321.0	881.1	1.50	0.04750	0.00189	0.12030	0.00482	0.01797	0.00034	76	89	115	4	115	2	99
MS-23	412.3	496.5	0.83	0.04682	0.00251	0.11249	0.00555	0.01728	0.00040	39	126	108	5	110	3	97

注: *谐和度=100×[1 - ((²⁰⁶Pb/²³⁸U - ²⁰⁷Pb/²³⁵U) / ((²⁰⁶Pb/²³⁸U + ²⁰⁷Pb/²³⁵U) / 2))]

元素含量低等特征^[24-25]。国内埃达克岩的研究,由张旗等在 21 世纪初引入并引发关于埃达克岩的广泛讨论^[6-10, 12, 26-31]。张旗等将中国东部与板块消减无关、富 K₂O(Na₂O/K₂O=0.9~1.3)并具埃达克岩地化特征的陆相火成岩称之为“C 型”埃达克岩,而将 Defant 和 Drummond^[24]所定义的与年轻的大洋板块俯冲有关的埃达克岩称之为“O 型”埃达克岩,并赋予“C”型埃达克岩明确的构造意义——代表增厚的地壳^[6-8, 31]。

本文所测 4 件马山粗面英安岩的主微量元素值,除 Al₂O₃ 含量(平均值 13.69%)略低外,各项指标均符合典型“C 型”埃达克岩的上述特征^[6-8, 31]。

Sr/Y-Y 比值判别图解^[24]与(La/Yb)_N-Yb_N判别图解^[32]的投点亦均落入典型埃达克岩范围内(图 8)。4 件样品的 HREE 与 Y 元素均表现为亏损,这可能是因来源熔体的残留相中存在石榴石导致^[24, 33]。Eu 的轻微负异常也表明来源岩浆源区很少或没有斜长石,对应的残留相为榴辉岩,表明岩浆很可能来自增厚地壳的熔融^[6, 8, 12, 33]。实验岩石学证据表明, Sr 与 Yb 元素特征与压力密切相关^[8, 12],马山粗面英安岩样品具有显著的高 Sr(均值 414×10⁻⁶)、低 Yb(均值 1.40×10⁻⁶)特征,可能代表了高压(增厚地壳)环境。此外,统计数据表明,对于安山岩类,在 SiO₂ 含量一定的情况下, K₂O 的含量越高对应来源

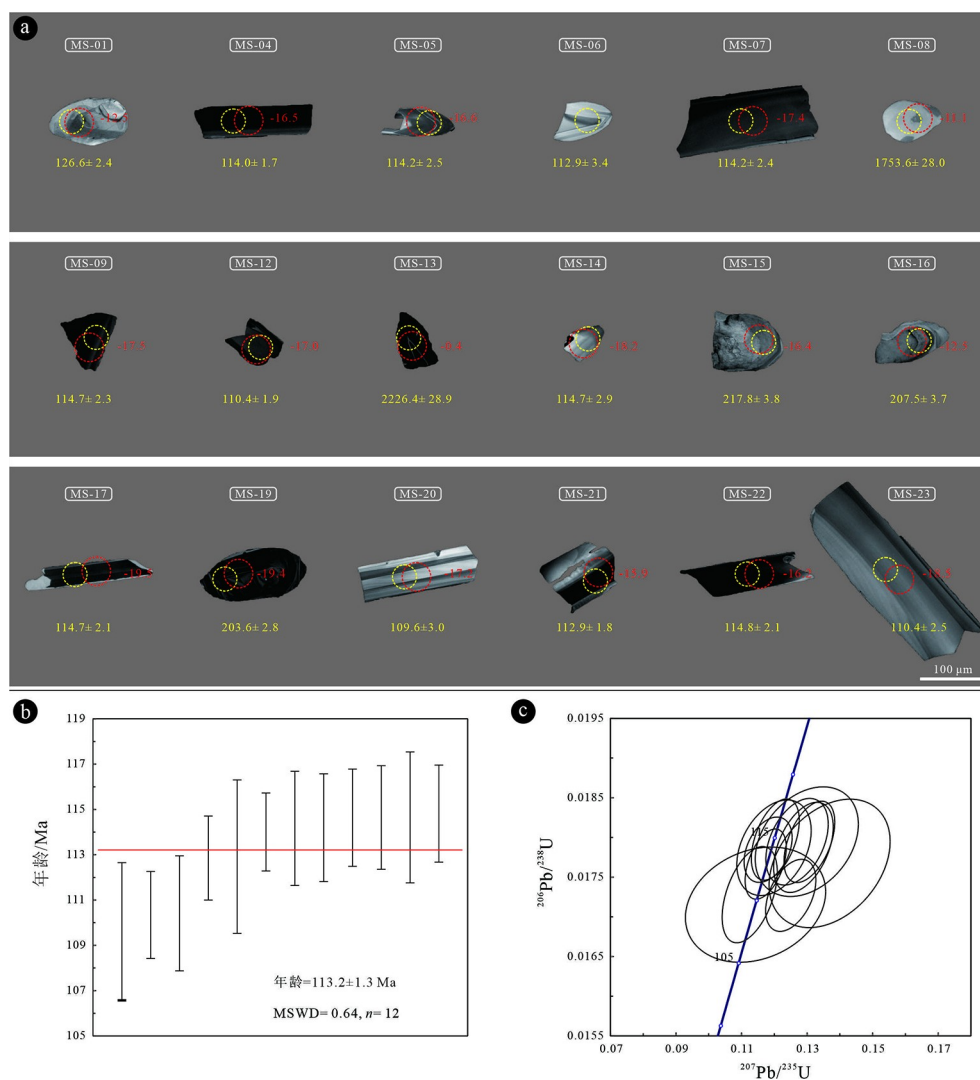


图 2 马山粗面英安岩锆石特征与测年结果

a. 马山粗面英安岩的锆石阴极发光图像及对应的 $\text{Pb}^{206}/\text{U}^{238}$ 年龄与 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值, b. 加权平均值, c. U-Pb 年龄谐和图。

Fig.2 Zircon characteristics and dating results of the trachyandesite in Mashan

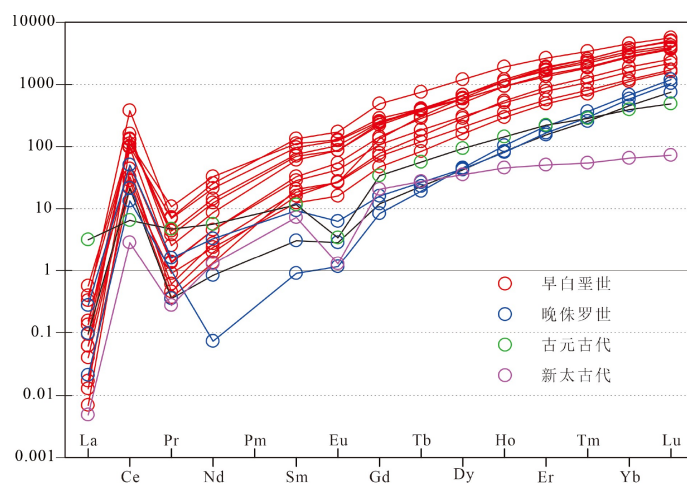
a. cathodoluminescence (CL) images, yellow numbers= U-Pb ages and red number= $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values; b. weighted mean age, c. concordia diagrams of zircons from the Mashan trachydacite.图 3 马山粗面英安岩中锆石的稀土元素配分曲线^[21]Fig.3 Rare earth element distribution pattern of zircons from Mashan trachydacite^[21]

表 2 马山粗面英安岩锆石原位 Lu-Hf 测试结果
Table 2 Zircon in-situ Lu-Hf results of trachydacite at Mashan

点 号	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$\pm 2\sigma$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$\pm 2\sigma$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$\pm 2\sigma$	$t \text{ (Ma)}^{①}$	$T_{\text{DM}}^{\text{C}}^{②}$	$\pm 2\sigma$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)^{③}$	$\pm 2\sigma$
MS-01	0.010 770	0.000 113	0.000 468	0.000 004	0.282 340	0.000 014	127	1971	32	-12.5	0.51
MS-04	0.092 622	0.002 184	0.003 462	0.000 074	0.282 242	0.000 021	114	2209	47	-16.5	0.76
MS-05	0.080 054	0.001 520	0.003 027	0.000 039	0.282 239	0.000 021	114	2213	46	-16.6	0.74
MS-07	0.145 124	0.004 230	0.005 205	0.000 141	0.282 221	0.000 020	114	2263	44	-17.4	0.71
MS-08	0.004 921	0.000 209	0.000 125	0.000 005	0.281 265	0.000 015	1898	3263	33	-11.1	0.54
MS-09	0.105 545	0.000 874	0.003 823	0.000 037	0.282 214	0.000 017	115	2272	38	-17.5	0.61
MS-12	0.133 218	0.001 571	0.004 997	0.000 055	0.282 232	0.000 033	110	2239	72	-17.0	1.17
MS-13	0.022 171	0.000 979	0.000 714	0.000 025	0.281 177	0.000 027	2548	3087	58	-0.4	0.96
MS-14	0.064 095	0.001 647	0.002 542	0.000 062	0.282 191	0.000 029	115	2317	63	-18.2	1.01
MS-15	0.022 432	0.000 587	0.000 875	0.000 019	0.282 176	0.000 016	218	2287	36	-16.4	0.58
MS-16	0.013 703	0.000 135	0.000 627	0.000 005	0.282 294	0.000 012	208	2030	28	-12.5	0.44
MS-17	0.110 210	0.000 395	0.004 199	0.000 016	0.282 159	0.000 017	115	2395	38	-19.5	0.61
MS-19	0.024 116	0.000 554	0.001 112	0.000 024	0.282 102	0.000 012	204	2458	27	-19.4	0.44
MS-20	0.082 807	0.001 461	0.003 316	0.000 056	0.282 225	0.000 025	110	2248	55	-17.2	0.88
MS-21	0.150 046	0.004 172	0.005 299	0.000 146	0.282 263	0.000 023	113	2172	51	-15.9	0.82
MS-22	0.132 288	0.002 429	0.005 110	0.000 093	0.282 254	0.000 022	115	2191	48	-16.2	0.77
MS-23	0.074 151	0.004 070	0.002 805	0.000 147	0.282 187	0.000 018	110	2330	39	-18.5	0.64

注：①为锆石表观年龄；②为基于DM的二阶段模式年龄计算使用平均大陆地壳 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值0.015。表中数据的误差为 2σ （标准误差），不确定度为最后一位数字；③为 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值的计算使用锆石的表观年龄，该年龄为锆石结晶年龄的最小估计值， $\lambda^{176}_{\text{Lu}}=1.867\times 10^{-11}/\text{a}^{[17]}$ ，CHUR现今的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 及 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值分别为0.0332和0.282772^[18]，DM现今的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 及 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值分别为0.0384和0.28325^[19]。

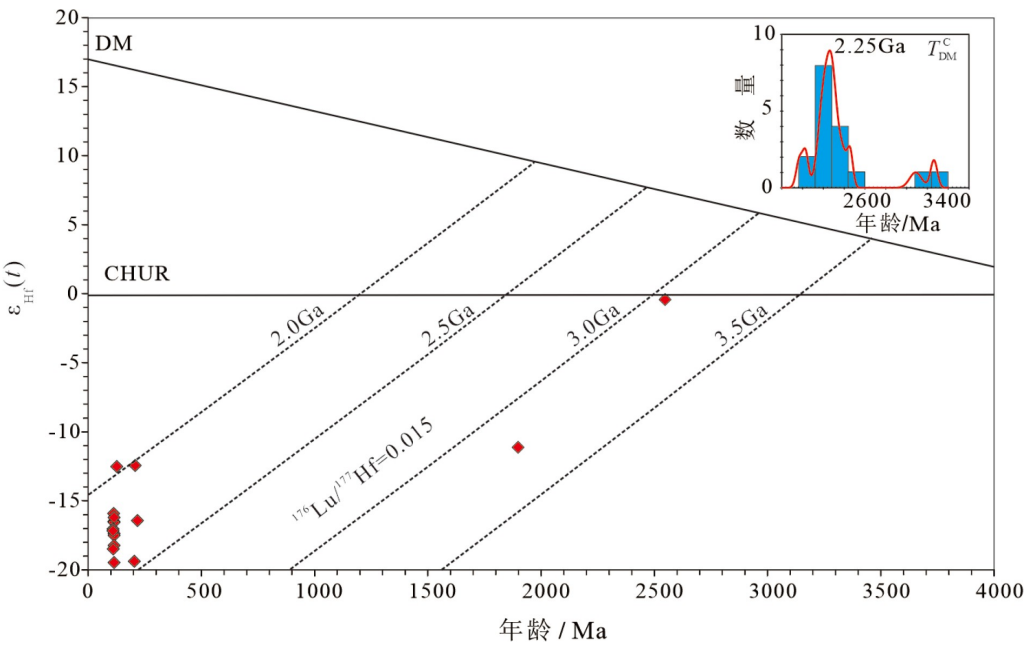


图 4 马山粗面英安岩中锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值与对应的二阶段模式年龄

Fig.4 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values and two stage Hf model ages of zircons from trachydacite in Mashan

表 3 马山粗面英安岩全岩主量元素分析结果					
Table 3 Whole-rock major element compositions of trachydacite at Mashan					%
样品号	M-01	M-02	M-03	M-04	平均值
SiO ₂	65.44	67.26	67.06	67.18	66.74
TiO ₂	0.46	0.45	0.44	0.40	0.44
Al ₂ O ₃	14.58	13.37	13.43	13.38	13.69
Fe ₂ O ₃	3.61	3.89	3.65	3.62	3.69
MnO	0.08	0.10	0.08	0.09	0.09
MgO	2.10	1.95	2.14	2.36	2.14
CaO	3.40	2.67	2.76	2.58	2.85
Na ₂ O	3.77	4.48	4.71	4.41	4.34
K ₂ O	3.83	3.76	3.58	3.98	3.79
P ₂ O ₅	0.18	0.19	0.21	0.17	0.19
L.O.I	2.12	1.46	1.86	1.65	1.77

岩浆所处的地壳厚度越大^[34], 本文 4 件样品的 K₂O 含量较高, Na₂O/K₂O 平均值为 1.15, 亦暗示马山粗面英安岩的岩浆来源较深, 可能形成于增厚地壳的熔融。4 件马山粗面英安岩的 Ce/Pb 比值为 0.97~1.73, 均值 1.31, 与洋壳来源的 Ce/Pb 比值特征(14.38)截然不同^[35], 表明来源岩浆源区不可能为洋壳。韩宗珠等^[14]所测马山的“ms04”与“ms08”等 2 件样品、何登洋等^[15]所测马山的“17MS01”、

“17MS02”、“17MS03”、“17MS04”等 4 件样品的主微量元素特征与本文所获结果相似。综上, 马山粗面英安岩为典型的“C 型”埃达克岩, 岩浆最可能来源于增厚地壳的熔融。

年代学方面, 何登洋等^[15]近来借助 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年, 将马山粗面英安岩的形成时代定为 119.3±1.6 Ma(*n*=9, MSWD=1.9)。但其用于确定喷出岩年龄的 9 颗锆石中年龄最小的 2 颗锆石年龄分别为 112±1 Ma 及 115±1 Ma^[13], 与本文所测的锆石 U-Pb 年龄在误差范围内一致, 而迥然不同于其余 7 颗锆石年龄(约 119~123 Ma)^[15]。通过比较, 可以推测马山粗面英安岩的实际形成时间可能更接近本文所测的 113.2±1.3 Ma。

此外, 马山地区该套早白垩世晚期的“C”型埃达克岩在区域上并非个例, 鲁东与辽东地区亦存在大量同时期的埃达克岩, 如: 文登长山南花岗岩(114 Ma)和胶东的六度寺(115 Ma)、泰薄顶(114 Ma)、三佛山与辽东的古道岭(113 Ma)等^[36]。

4.2 马山地区粗面英安岩来源岩浆形成的动力学机制初探

中国东部燕山期经历了由特提斯构造域/古亚洲洋构造域向太平洋构造域的转变^[2, 37-39], 晚中生代在东亚外侧形成壮观宏伟的燕山造山带的同时^[2], 从俄罗斯楚科奇半岛到中国浙闽沿海发育了范围广大(长度超过 5 000 km)的岩浆岩带^[39]。对东亚大

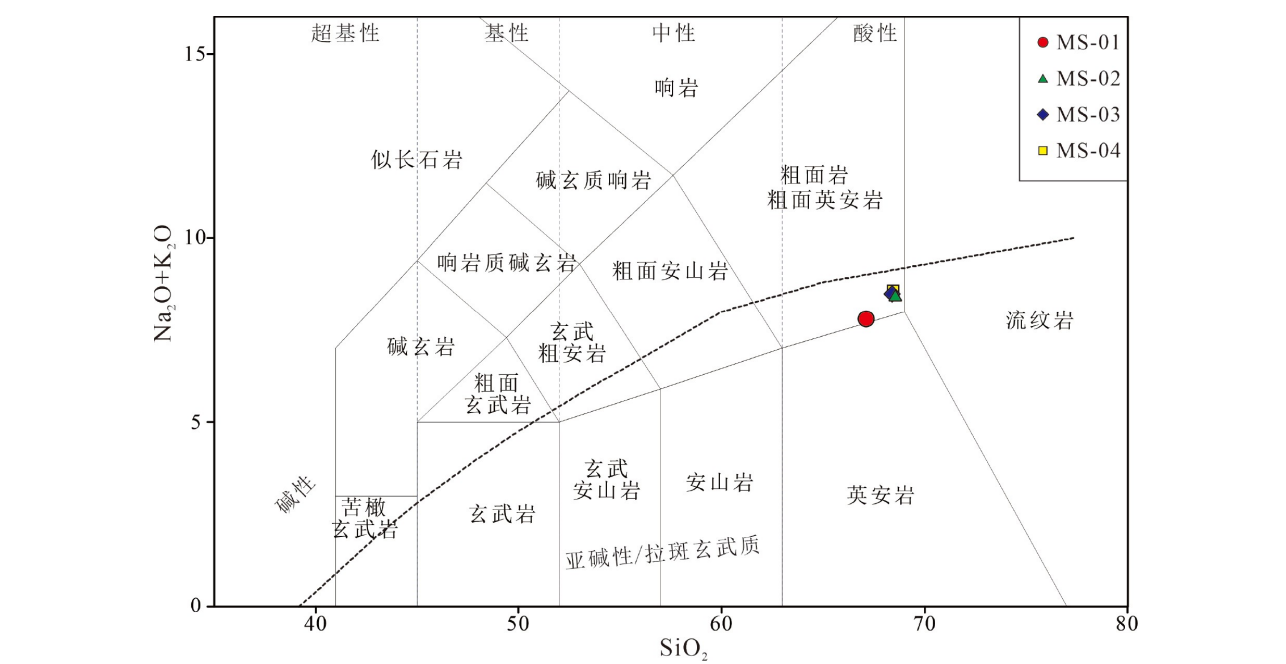


图 5 马山柱状节理粗面英安岩岩石类型划分 TAS 图解^[22]
Fig.5 TAS diagram of the trachydacite at Mashan^[22]

表 4 马山粗面英安岩微量元素分析结果

Table 4 Trace element compositions of trachydacite at Mashan 10^{-6}

样品号	M-01	M-02	M-03	M-04	平均值
Li	37.5	41.4	36.4	38.6	38.5
Be	1.75	1.66	1.70	1.68	1.70
Sc	18.30	7.80	7.91	8.10	10.50
Ti	2823	2700	2640	2400	2641
V	53.1	55.1	56.1	54.4	54.7
Cr	68.5	63.5	65.6	81.6	69.8
Co	10.80	11.00	11.00	11.40	11.10
Ni	32.1	29.5	29.6	39.2	32.6
Cu	4.76	45.80	28.60	28.20	26.80
Zn	48.5	72.2	68.0	67.2	64.0
Ga	17.9	16.7	17.2	15.9	16.9
Rb	91.6	85.0	87.1	99.2	90.7
Sr	402	341	422	489	414
Y	13.4	13.6	13.9	13.0	13.5
Zr	130	141	134	126	133
Nb	9.5	11.0	10.8	10.6	10.5
Mo	0.61	0.88	0.58	0.66	0.68
Cd	0.036	0.061	0.066	0.038	0.051
Cs	0.88	0.62	0.65	1.00	0.79
Ba	2381	1461	1939	1727	1877
Hf	3.73	4.35	4.40	4.00	4.12
Ta	0.73	1.20	1.00	1.15	1.02
Tl	0.38	0.38	0.38	0.44	0.40
Pb	30.3	54.6	39.2	43.6	41.9
Th	6.46	5.56	5.38	5.26	5.67
U	1.69	1.50	1.54	1.54	1.57

陆边缘晚中生代大规模岩浆活动的动力学机制一直存在较大分歧。胡受奚等^[40]强调古太平洋板块向欧亚板块俯冲的弧后效应可能是主要原因^[40];王德滋等^[41]根据晚侏罗世—早白垩世火山岩的地化特征,将长江断裂带以北、郯庐断裂带以东地区分布的火山岩归为橄榄粗安岩省,认为其生成于华北-扬子板块对接后的陆内造山与晚期伸展、古太平洋板块向欧亚板块的俯冲消减及与白垩纪后特提斯构造体制有关的碰撞-挤出作用,三大构造动力体制所导致的郯庐断裂带大规模左行平移营造出的张应力环境。董树文等^[4-5]则强调燕山期东亚多块体的汇聚模式。万天丰等^[42]提出圈层滑脱与高地温

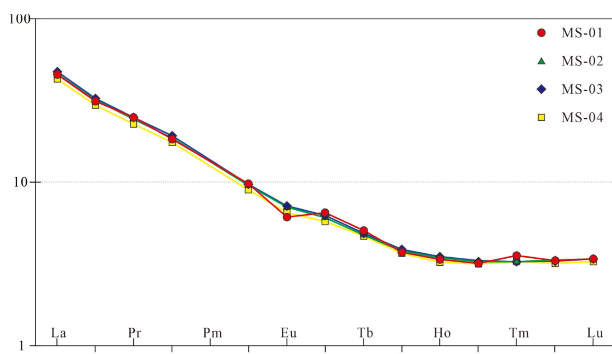
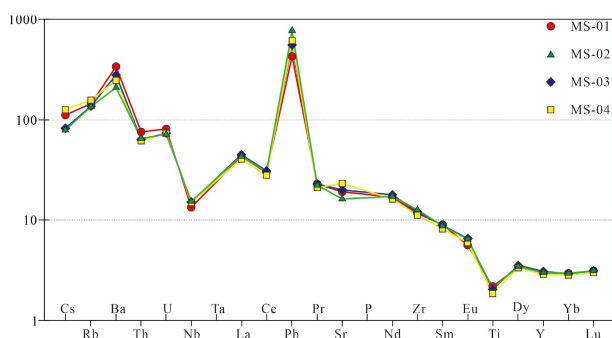
表 5 马山粗面英安岩稀土元素分析结果

Table 5 REE compositions of trachydacite at Mashan 10^{-6}

样品号	M-01	M-02	M-03	M-04	平均值
La	29.6	29.9	30.8	27.8	29.5
Ce	52.4	53.1	54.6	49.5	52.4
Pr	6.34	6.18	6.34	5.77	6.16
Nd	22.9	23.3	24.0	21.8	23.0
Sm	3.96	3.86	3.92	3.64	3.85
Eu	0.94	1.08	1.10	1.00	1.03
Gd	3.53	3.28	3.38	3.10	3.32
Tb	0.50	0.47	0.48	0.46	0.48
Dy	2.50	2.53	2.60	2.46	2.52
Ho	0.50	0.51	0.52	0.48	0.50
Er	1.39	1.42	1.44	1.38	1.41
Tm	0.24	0.22	0.22	0.22	0.23
Yb	1.45	1.46	1.44	1.40	1.44
Lu	0.23	0.23	0.23	0.22	0.23
Eu/Eu ⁺	0.77	0.93	0.92	0.91	0.88
La _N /Yb _N	13.89	13.94	14.56	13.51	13.98
ΣREE	126.48	127.54	131.07	119.23	126.08

梯度的洋陆过渡型岩石圈沿构造断裂的活动可能是中国东部中生代岩浆起源的动力学机制。张旗^[43]根据中国东部中生代缺少岛弧玄武岩和岛弧花岗岩及太平洋板块俯冲方向与大规模岩浆活动出现时代的不匹配等,认为中国东部中生代大规模岩浆活动与太平洋板块向西俯冲无关。

根据本文马山柱状节理粗面英安岩及胶辽地区广泛分布的早白垩世晚期“C型”埃达克岩,可以推测该时期马山地区粗面英安岩的岩浆来源于增厚地壳的熔融。但该时期熔融的增厚地壳是燕山运动早期的增厚地壳的残留(或范围缩减的高原)^[31]还是由燕山运动多期次、间歇性幕式区域性挤压形成的增厚地壳?是来自华北板块下部地壳还是俯冲的扬子板块?从马山 MS-01 样品的锆石 U-Pb 与 Lu-Hf 测试结果分析,马山粗面英安岩来源岩浆中结晶锆石的二阶段模式年龄集中于古元古代—太古代(表 2,图 4)。古元古代—太古代的锆石组分在华北板块扬子北缘均广泛分布^[44-45]。但根据本文及何登洋等^[15]所测马山粗面英安岩样品的锆石 U-Pb 年龄分析,锆石中分别出现了代表扬子板块与苏鲁造山带的新元古代与晚石炭世组分,表明增厚地

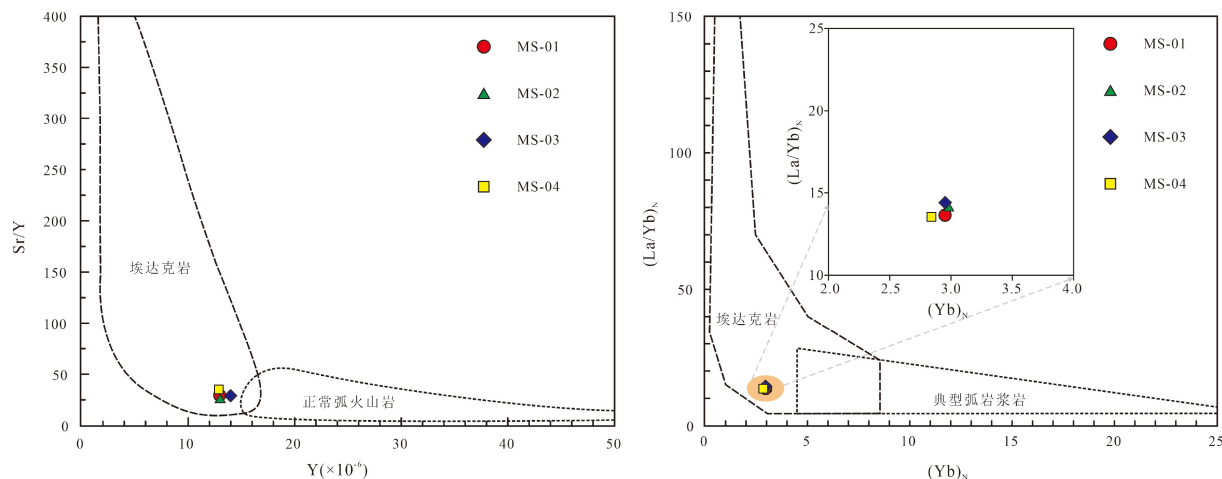
图 6 马山粗面英安岩稀土元素配分曲线^[21]Fig.6 REE distribution pattern of the trachydacite at Mashan^[21]图 7 马山粗面英安岩微量元素蛛网图^[21]Fig.7 Spider distribution pattern of the trachydacite at Mashan^[21]

壳的熔融物质中含有扬子陆壳的组分^[15]。此外,从马山粗面英安岩中具早白垩世晚期年龄锆石的 Hf 同位素特征看,并未呈现出在拉张环境下大陆弧地区产出锆石的 Hf 同位素受亏损地幔影响而导致 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值更向正值的趋势^[1]。该结果亦暗示马山柱状节理粗面英安岩的岩浆来源更可能来源于区域挤压导致增厚地壳的熔融而非受控于太平洋板块俯冲的弧后效应。这与马山粗面英安岩的主微量

元素特征所反映出来的“C 型”埃达克岩所代表的构造含义一致。

从大区域上看,东亚在早白垩世发生过数次幕式的挤压事件^[4-5, 46-48]。与马山柱状节理粗面英安岩形成时代接近的挤压事件对应于 Aptian 晚期, Guo 等^[48]将该期区域性挤压事件的动力学机制解释为:华南板块与其东南部——由现在的民都洛岛、朗布隆岛、班乃岛、巴拉望岛、婆罗洲东部及苏拉威西北部等构成的微陆块发生碰撞所致。即墨马山相邻的灵山岛地区在早白垩世 Aptian 期也存在 NW-SE 向挤压事件的明确记录,证据如:千层崖剖面西侧大型褶皱、平面 X 剪破裂所反映的古应力场特征等^[49]。胶莱盆地西侧的临沂方城盆地八亩地组与上覆火山岩间存在沉积间断,甚至发育有古风化壳^[50]。在燕山-辽西地区,该期碰撞事件导致早白垩世晚期的九佛堂组与阜新组之间形成区域性不整合^[48, 51-52],向内陆西北方向甚至可影响至二连盆地,二连盆地内早白垩世晚期的腾格尔组与赛罕组之间存在不整合^[48]等。

马山地区所处的胶莱盆地,目前绝大多数研究者认为其为拉张性盆地。但姜同海^[53]根据①盆地发育于基底褶皱之上,盆地南部为一逆冲断裂;②白垩系下统的沉积速率与挤压型盆地一致(由慢变快);③盆地边缘的莱阳群林寺山组底部发育磨拉石沉积,向内逐渐变为复理石沉积等特征,认为胶莱盆地属于挤压挠曲型盆地。特别是,早白垩世中晚期该地区构造应力场为 NW-SE 向挤压,与周缘地区记录的挤压事件吻合。如:Wu 等^[54]利用高(锆石 U-Pb)-中(白云母 Ar-Ar)-低(锆石 U-Th/He) 3 种温标对胶东地区早白垩世中晚期两处侵入岩体

图 8 马山粗面英安岩 Sr/Y vs. Y^[24] 和 (La/Yb)_N-Yb_N^[32] 判别图解Fig.8 Sr/Y - Y and (La/Yb)_N-Yb_N adakitic trace elemental discrimination diagrams for Mashan trachydacite^[24, 32]

的热史进行约束,发现在117~110 Ma存在一期快速冷却事件。该期热事件可与区域上该期挤压隆升事件相对应。此外,Zhang等^[55]曾借助碳酸盐团簇同位素估算胶莱盆地晚白垩世期间的古海拔超过2 000 m,在约90 Ma之前甚至更高。但该时期高原或海岸山脉的形成是受控于鄂霍茨克板块与东亚大陆边缘的碰撞^[56]还是从早白垩世晚期持续至晚白垩世早期的山脉或高原^[57],还需更多证据与线索。

综合上述马山早白垩世柱状节理粗面英安岩的“C型”埃达克岩属性、区域上同时期的构造、沉积响应及锆石U-Pb与Hf同位素特征,笔者更倾向于认为:早白垩世Aptian晚期,马山地区经历区域性挤压事件造成地壳增厚,进而导致原俯冲于华北板块之下的扬子板块部分熔融并沿同时期切割深度较大的断裂通道(如:牟平-即墨断裂)喷发形成范围广阔的火山岩盆地。

5 结论

(1)锆石U-Pb定年结果显示马山地区的柱状节理粗面英安岩的形成时代为早白垩世113.2 Ma,岩石全岩主微量元素分析结果显示其具有“C型”埃达克岩特征。

(2)马山粗面英安岩中所获锆石的二阶段模式年龄均为古元古代—太古代,暗示来源岩浆形成于古老基底的熔融。

(3)马山柱状节理粗面英安岩类的岩浆可能源于燕山期区域性NW-SE向挤压导致的大陆地壳增厚后的熔融,熔融物质包含来自俯冲于华北板块之下的扬子板块组分。

参考文献 (References)

- [1] Cope T. Phanerozoic magmatic tempos of North China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, 468: 1-10.
- [2] 任纪舜, 陈廷愚, 牛宝贵, 等. 中国东部及邻区大陆岩石圈的构造演化与成矿[M]. 北京: 科学出版社, 1990: 1-205. [REN Jishun, CHEN Tingyu, NIU Baogui, et al. Tectonic Evolution of the Continental Lithosphere and Metallogeny in Eastern China and Adjacent Areas[M]. Beijing: Science Press, 1990: 1-205.]
- [3] 邓晋福, 刘厚祥, 赵海玲, 等. 燕辽地区燕山期火成岩与造山模型[J]. 现代地质, 1996, 10(2): 137-148. [DENG Jinfu, LIU Houxiang, ZHAO Hailing, et al. Yanshanian igneous rocks and orogeny model in Yanshan-Liaoning area [J]. *Geoscience*, 1996, 10(2): 137-148.]
- [4] 董树文, 吴锡浩, 吴珍汉, 等. 论东亚大陆的构造演变: 燕山运动的全球意义[J]. *地质论评*, 2000, 46(1): 8-13. [DONG Shuwen, WU Xihao, WU Zhenhan, et al. On tectonic seesawing of the East Asia Continent: Global implication of the Yanshanian Movement [J]. *Geological Review*, 2000, 46(1): 8-13.]
- [5] 董树文, 张岳桥, 李海龙, 等. “燕山运动”与东亚大陆晚中生代多板块汇聚构造: 纪念“燕山运动”90周年[J]. 中国科学: 地球科学, 2018, 61(6): 1888-1909. [DONG Shuwen, ZHANG Yueqiao, LI Hailong, et al. The Yanshan orogeny and late Mesozoic multi-plate convergence in East Asia: Commemorating 90th years of the “Yanshan Orogeny” [J]. *Science China Earth Sciences*, 2018, 61(6): 1888-1909.]
- [6] 张旗, 钱青, 王二七, 等. 燕山中晚期的中国东部高原: 埃达克岩的启示[J]. *地质科学*, 2001, 36(2): 248-255. [ZHANG Qi, QIAN Qing, WANG Erqi, et al. An East China Plateau in Mid-Late Yanshanian Period: Implication from adakites [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2001, 36(2): 248-255.]
- [7] 张旗, 许继峰, 王焰, 等. 埃达克岩的多样性[J]. 地质通报, 2004, 23(9-10): 959-965. [ZHANG Qi, XU Jifeng, WANG Yan, et al. Diversity of adakite [J]. *Geological Bulletin of China*, 2004, 23(9-10): 959-965.]
- [8] 张旗, 焦守涛. 埃达克岩来自高压背景: 一个科学的、可靠的、有预见性的科学发现[J]. *岩石学报*, 2020, 36(6): 1675-1683. [ZHANG Qi, JIAO Shoutao. Adakite comes from a high-pressure background: A scientific, reliable, predictable scientific discovery [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2020, 36(6): 1675-1683.]
- [9] 汪洋, 程素华. “C型埃达克岩”: 一个基于误解的概念[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2010, 29(3): 284-292, 298. [WANG Yang, CHENG Suhua. The “C-type Adakite”: A concept based on misunderstanding? [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2010, 29(3): 284-292, 298.]
- [10] 汪洋. 涉及埃达克岩实验的若干基本概念与问题辨析[J]. *岩石矿物学杂志*, 2016, 35(1): 162-176. [WANG Yang. A discussion on some basic conceptions and problems related to the experimental study of adakite [J]. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 2016, 35(1): 162-176.]
- [11] Martin H, Smithies R H, Rapp R, et al. D. An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution [J]. *Lithos*, 2005, 79(1-2): 1-24.
- [12] 王强, 郝露露, 张修政, 等. 汇聚板块边缘的埃达克质岩: 成分和成因[J]. *中国科学: 地球科学*, 2020, 63(12): 1992-2016. [WANG Qiang, HAO Lulu, ZHANG Xiuzheng, et al. Adakitic rocks at convergent plate boundaries: Compositions and petrogenesis [J]. *Science China Earth Sciences*, 2020, 63(12): 1992-2016.]
- [13] 山东省地质调查院. 1: 25万青岛市幅区域地质调查报告与地质图[R]. 2004. [Shandong Institute of Geological Survey. 1: 250000 Qingdao Regional Geological Survey Report and Geological Map[R]. 2004.]
- [14] 韩宗珠, 衣伟虹, 余芝华, 等. 青岛马山地区安山玢岩地球化学特征及成因机理研究[J]. *中国海洋大学学报*, 2011, 41(S1): 305-311. [HAN Zongzhu, YI Weihong, YU Zhihua, et al. Geochemistry and petrogenesis of andesite-prophyrite in Mashan area, Qingdao [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2011, 41(S1): 305-311.]
- [15] 何登洋, 邱昆峰, 于皓丞, 等. 华北克拉通胶莱盆地马山地区早白垩世粗面英安岩岩石成因[J]. *岩石学报*, 2020, 36(12): 3705-3720.

- [HE Dengyang, QIU Kunfeng, YU Haocheng, et al. Petrogenesis of the Early Cretaceous trachy-dacite from Mashan in the Jiaolai Basin, North China Craton [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2020, 36(12): 3705-3720.]
- [16] Pearce N J G, Perkins W T, Westgate J A, et al. A compilation of new and published major and trace element data for NIST SRM 610 and NIST SRM 612 glass reference materials [J]. *Geostandards Newsletter*, 1997, 21(1): 115-144.
- [17] Söderlund U, Patchett P J, Vervoort J D, et al. The ^{176}Lu decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 219(3-4): 311-324.
- [18] Bichert-Toft J, Albarède F. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1997, 148(1-2): 243-258.
- [19] Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, et al. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64(1): 133-147.
- [20] 吴元保, 郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对U-Pb年龄解释的制约[J]. *科学通报*, 2004, 49(15): 1554-1569. [WU Yuanbao, ZHENG Yongfei. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(15): 1554-1569.]
- [21] McDonough W F, Sun S S. The composition of the Earth [J]. *Chemical Geology*, 1995, 120(3-4): 223-253.
- [22] Le Bas M J, Le Maitre R W, Streckeisen A, et al. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram [J]. *Journal of Petrology*, 1986, 27(3): 745-750.
- [23] Kay R W. Aleutian magnesian andesites: Melts from subducted Pacific ocean crust [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1978, 4(1-2): 117-132.
- [24] Defant M J, Drummond M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere [J]. *Nature*, 1990, 347(6294): 662-665.
- [25] Defant M J, Xu J F, Kepezhinskas P, et al. Adakites: some variations on a theme [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2002, 18(2): 129-142.
- [26] 王焰, 张旗, 钱青. 埃达克岩(adakite)的地球化学特征及其构造意义[J]. *地质科学*, 2000, 35(2): 251-256. [WANG Yan, ZHANG Qi, QIAN Qing. Adakite: geochemical characteristics and tectonic significances [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 2000, 35(2): 251-256.]
- [27] 王强, 许继锋, 赵振华. 一种新的火成岩: 埃达克岩的研究综述[J]. *地球科学进展*, 2001, 16(2): 201-208. [WANG Qiang, XU Jifen, ZHAO Zhenghua. The summary and comment on research on a new kind of igneous rock-Adakite [J]. *Advance in Earth Sciences*, 2001, 16(2): 201-208.]
- [28] Rapp R P, Xiao L, Shim Izu N. Experimental constraints on the origin of potassium-rich adakites in eastern China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2002, 18(3): 293-302.
- [29] 罗照华, 柯珊, 湛宏伟. 埃达克岩的特征、成因及构造意义[J]. *地球科学进展*, 2002, 21(7): 436-440. [LUO Zhaohua, KE Shan, CHEN Hongwei. Characteristics, petrogenesis and tectonic implications of adakite [J]. *Geological Bulletin of China*, 2002, 21(7): 436-440.]
- [30] 翟明国. 埃达克岩和大陆下地壳重熔的花岗岩类[J]. *岩石学报*, 2004, 20(2): 193-194. [ZHAI Mingguo. Adakite and related granitoids from partial melting of continental lower crust [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20(2): 193-194.]
- [31] 张旗, 王元龙, 金惟俊, 等. 晚中生代的中国东部高原: 证据、问题和启示[J]. *地质通报*, 2008, 27(9): 1404-1430. [ZHANG Qi, WANG Yuanlong, JI Weijun, et al. Eastern China Plateau during the Late Mesozoic: evidence, problems and implication [J]. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(9): 1404-1430.]
- [32] Martin H. Effect of steeper Archean geothermal gradient on geochemistry of subduction-zone magmas [J]. *Geology*, 1986, 14(9): 753-756.
- [33] 邓晋福, 苏尚国, 刘翠, 等. 关于华北克拉通燕山期岩石圈减薄的机制与过程的讨论: 是拆沉, 还是热侵蚀和化学交代?[J]. *地学前缘*, 2006, 13(2): 105-119. [DENG Jinfu, SU Shangguo, LIU Cui, et al. Discussion on the lithospheric thinning of the North China craton: delamination? Or thermal erosion and chemical metasomatism? [J]. *Earth Science Frontiers*, 2006, 13(2): 105-119.]
- [34] Best M G. *Igneous and Metamorphic Petrology* [M]. 2nd ed. Malden, Mass: Blackwell Science, 2003: 340-341.
- [35] Taylor S R, McLennan S M. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution* [M]. Oxford: Blackwell Scientific Publication, 1985: 312.
- [36] 张旗, 王焰, 熊小林, 等. 埃达克岩和花岗岩: 挑战与机遇[M]. 北京: 中国大地出版社, 2008: 1-344. [ZHANG Qi, WANG Yan, XIONG Xiaolin, et al. Adakite and Granite: Challenges and Opportunities [M]. Beijing: China Land Press, 2008: 1-344.]
- [37] 赵越, 徐刚, 张拴宏, 等. 燕山运动与东亚构造体制的转变[J]. *地学前缘*, 2004, 11(3): 319-328. [ZHAO Yue, XU Gang, ZHANG Shuanhong, et al. Yanshanian movement and conversion of tectonic regimes in East Asia [J]. *Earth Science Frontiers*, 2004, 11(3): 319-328.]
- [38] 孟庆任. 中国东部燕山期沉积盆地演化与资源效应[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2017, 36(4): 567-569. [MENG Qingren. Development of sedimentary basins in Eastern China during the Yanshanian period [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2017, 36(4): 567-569.]
- [39] 邵济安, 刘福田, 陈辉, 等. 大兴安岭—燕山晚中生代岩浆活动与俯冲作用关系[J]. *地质学报*, 2001, 75(1): 56-63. [SHAO Ji'an, LIU Futian, CHEN Hui, et al. Relationship between Mesozoic Magmatism and Subduction in Da Hinggan-Yanshan Area [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2001, 75(1): 56-63.]
- [40] 胡受奚, 赵乙英, 胡志宏, 等. 中国东部中—新生代活动大陆边缘构造: 岩浆作用演化和发展[J]. *岩石学报*, 1994, 10(4): 370-381. [HU Shouxi, ZHAO Yiying, HU Zhihong, et al. Evolution and development of tectonics and magmatism at the active continental margin of the East China (E106°) during Mesozoic and Cenozoic [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1994, 10(4): 370-381.]
- [41] 王德滋, 任启江, 邱检生, 等. 中国东部橄榄安粗岩省的火山岩特征及其成矿作用[J]. *地质学报*, 1996, 70(1): 23-34. [WANG Dezi, REN Qijiang, QIU Jiansheng, et al. Characteristics of volcanic rocks in the Shoshonite province, Eastern China, and their metallogenesis [J].

- Acta Geologica Sinica, 1996, 70(1): 23-34.]
- [42] 万天丰, 赵庆乐. 中国东部构造-岩浆作用的成因[J]. *中国科学: 地球科学*, 2012, 55(3): 347-354. [WAN Tianfeng, ZHAO Qingle. The genesis of tectono-magmatism in eastern China [J]. *Science China Earth Sciences*, 2012, 55(3): 347-354.]
- [43] 张旗. 中国东部中生代岩浆活动与太平洋板块向西俯冲有关吗?[J]. *岩石矿物学杂志*, 2013, 32(1): 113-128. [ZHANG Qi. Is the Mesozoic magmatism in eastern China related to westward subduction of the Pacific plate? [J]. *Acta Petrologica ET Mineralogica*, 2013, 32(1): 113-128.]
- [44] Zhu X Q, Zhu W B, Ge R F, et al. Late Paleozoic provenance shift in the south-central North China Craton: Implications for tectonic evolution and crustal growth [J]. *Gondwana Research*, 2014, 25(1): 383-400.
- [45] Li S Z, Zhao S J, Liu X, et al. Closure of the Proto-Tethys Ocean and Early Paleozoic amalgamation of microcontinental blocks in East Asia [J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 186: 37-75.
- [46] 张岳桥, 李金良, 张田, 等. 胶莱盆地及其邻区白垩纪—古新世沉积构造演化历史及其区域动力学意义[J]. *地质学报*, 2008, 82(9): 1229-1257. [ZHANG Yueqiao, LI Jinliang, ZHANG Tian, et al. Cretaceous to Paleocene Tectono-sedimentary evolution of the Jiaolai Basin and the contiguous areas of the Shandong Peninsula (North China) and Its geodynamic implications [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(9): 1229-1257.]
- [47] 张田, 张岳桥. 胶北隆起晚中生代构造-岩浆演化历史[J]. *地质学报*, 2008, 82(9): 1210-1228. [ZHANG Tian, ZHANG Yueqiao. Late Mesozoic tectono-magmatic evolution history of the Jiaobei Uplift, Shandong Peninsula [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(9): 1210-1228.]
- [48] Guo Z X, Yang Y T, Zhao X Z, et al. Early Cretaceous tectonostratigraphic evolution of the Erlian Basin, NE China: A record of Late Mesozoic intraplate deformation in East Asia [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 110: 539-564.
- [49] 吕洪波, 王俊, 张海春. 山东灵山岛晚中生代滑塌沉积层的发现及区域构造意义初探[J]. *地质学报*, 2011, 85(6): 938-946. [LÜ Hongbo, WANG Jun, ZHANG Haichun. Discovery of the Late Mesozoic slump beds in Lingshan Island, Shandong, and a pilot research on the regional tectonics [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(6): 938-946.]
- [50] 孙天柱, 武斌. 临沂方城盆地中生代青山群火山岩地球化学特征及地质意义[J]. *山东国土资源*, 2020, 36(6): 14-22. [SUN Tianzhu, WU Bin. Geochemical characteristics and geological significance of volcanic rocks in Mesozoic Qingshan Group in Fangcheng Basin of Linyi City [J]. *Shandong Land and Resources*, 2020, 36(6): 14-22.]
- [51] 王宇林, 郭强, 李喜海, 等. 辽西喀左盆地九佛堂组的划分及相关问题[J]. *地层学杂志*, 2009, 33(2): 147-154. [WANG Yulin, GUO Qiang, LI Xihai, et al. Subdivision of the Jiufotang Formation and related issues in the Kazuo Basin [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2009, 33(2): 147-154.]
- [52] 刘为付, 刘双龙, 孙立新, 等. 包日温都构造带九佛堂组高分辨率层序结构及储层分析[J]. *地层学杂志*, 2015, 39(3): 310-318. [LIU Weifu, LIU Shuanglong, SUN Lixin, et al. High resolution sequence stratigraphy configurations and reservoir analysis of the Jiufotang Formation in the Baoriwendu tectonic belt [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2015, 39(3): 310-318.]
- [53] 姜同海. 胶莱盆地构造特征及演化[D]. 山东科技大学硕士学位论文, 2005: 1-45. [JIANG Tonghai. The structural characteristics and evolution of Jiaolai Basin[D]. Master Dissertation of Shandong University of Science and Technology, 2005: 1-45.]
- [54] Wu L, Monié P, Wang F, et al. Multi-phase cooling of Early Cretaceous granites on the Jiaodong Peninsula, East China: Evidence from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and (U-Th)/He thermochronology [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 160: 334-347.
- [55] Zhang L M, Wang C S, Cao K, et al. High elevation of Jiaolai Basin during the Late Cretaceous: Implication for the coastal mountains along the East Asian margin [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2016, 456: 112-123.
- [56] Yang Y T. An unrecognized major collision of the Okhotomorsk Block with East Asia during the Late Cretaceous, constraints on the plate reorganization of the Northwest Pacific [J]. *Earth-Science Reviews*, 2013, 126: 96-115.
- [57] Chen P J. Paleoenvironmental changes during the Cretaceous in eastern China[M]//Okada H, Mateer N J. Developments in Palaeontology and Stratigraphy. Amsterdam: Elsevier, 2000, 17: 81-90.