



华北克拉通辽宁兴城玄武岩脉 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及其地质意义

么丝嘉¹, 王宏伟¹, 耿建珍^{1,2}, 黄雅琪¹, 何登洋¹, 邱昆峰¹

1. 中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 中国地质调查局 天津地质调查中心, 天津 300170

摘要: 华北克拉通中生代期间受古太平洋板块俯冲作用的影响, 岩石圈发生大规模的减薄, 导致其物理化学性质明显改变. 揭示克拉通减薄的机制并约束克拉通破坏时限是地学界的重大科学问题. 华北克拉通广泛发育中生代玄武岩, 玄武岩作为岩浆作用的产物, 所蕴含的年代学信息可以为岩石圈演化过程提供重要的时间约束. 辽宁兴城地区位于华北克拉通的北缘, 其内发育的太古宙—中生代岩浆岩是研究华北克拉通破坏的理想对象. 尽管前人对这些玄武岩做了大量的研究, 但是对其结束时间仍然存在争论. 本文选取兴城地区出露的玄武岩脉为研究对象, 采用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学和金红石 U-Pb 年代学方法, 探讨成岩年代学及其地质意义. 锆石 U-Pb 定年结果表明, 辽宁兴城玄武岩脉年龄为 104.8 ± 6.5 Ma, 而华北克拉通中生代岩石圈减薄的结束年龄也可推到 105 Ma 左右. 此年代学信息为早白垩世晚期华北克拉通大规模岩石圈减薄过程的时限提供了约束.

关键词: 华北克拉通; 中生代; 玄武岩脉; 锆石 U-Pb 年龄; 金红石 U-Pb 年代学

LA-ICP-MS ZIRCON U-Pb AGE OF BASALT DIKES IN XINGCHENG OF LIAONING, NORTH CHINA CRATON: Geologic Implications

YAO Si-jia¹, WANG Hong-wei¹, GENG Jian-zhen^{1,2}, HUANG Ya-qi¹, HE Deng-yang¹, QIU Kun-feng¹

1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Tianjin Center of China Geological Survey, Tianjin 300170, China

Abstract: Affected by the subduction of Paleo-Pacific plate in Mesozoic, large-scale lithosphere thinning took place in North China Craton, leading to the significant changes of its physical and chemical properties. To reveal the mechanism of craton thinning and constrain the timing of craton destruction becomes a major scientific problem for geologists. The Mesozoic basalts are widely developed in North China Craton. As the product of magmatism, basalt contains geochronological information that can provide important timing constraint for lithosphere evolution. The Archean-Meso-Cenozoic magmatic rocks developed in Xingcheng area of Liaoning Province in the northern margin of North China Craton are ideal objects for studying the destruction of North China Craton. Although lots of research has been done on these basalts, their end time is still disputed. The Xingcheng basalt dike is selected as the research object, and LA-ICP-MS zircon U-Pb chronology and rutile U-Pb chronology are studied to discuss the diagenetic chronology and its geological significance. The zircon U-Pb dating results show that the age of Xingcheng basalt dike is 104.8 ± 6.5 Ma, and the end age of Mesozoic lithosphere thinning in North China Craton can be inferred to about 105 Ma. The

收稿日期: 2023-09-19; 修回日期: 2023-10-11. 编辑: 张哲.

基金项目: 国家自然科学基金委国际(地区)合作与交流项目“东亚早白垩造山型金成矿作用与深部过程”(42261134535); 深时数字地球前沿科学中心“深时数字地球”中央高校科技领军人才团队项目(2652023001); 中国地质大学(北京)2019年度大学生创新创业训练计划(201911415015).

作者简介: 么丝嘉(2002—), 女, 主要从事矿床地质学方面研究, 通信地址 北京市海淀区学院路 29 号, E-mail//sijiyao@cugb.edu.cn

通信作者: 邱昆峰(1986—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事矿床学教学与科研工作, 通信地址 北京市海淀区学院路 29 号, E-mail//kunfengqiu@qq.com

chronological information provides constraint on the timing of large-scale lithosphere thinning process in North China Craton in the late Early Cretaceous.

Key words: North China Craton; Mesozoic; basalt dike; zircon U-Pb age; rutile U-Pb chronology

0 前言

华北克拉通位于中国东部,有近4 Ga的演化历史.与其他古老稳定克拉通不同的是,华北克拉通自中生代以来受到古太平洋板块向欧亚板块俯冲作用的影响,在侏罗纪—白垩纪经历了大规模的减薄作用.华北岩石圈减薄不仅仅是岩石圈厚度的变化,同时伴随岩石圈性质和热状态的转变.从约1.85 Ga克拉通化以后,华北一直表现为稳定的克拉通特点,但从中生代以后,其稳定性质发生了破坏.克拉通遭受的强烈破坏导致改造与增生作用,使大陆地壳重新活化,伴随大规模的岩浆—构造—成矿活动^[1-3],形成了广泛的变质核杂岩和拉分盆地^[4-5].华北克拉通有太古宙—古元古代的结晶基底和中元古代以来基本未变质的沉积盖层.辽宁省兴城地区位于华北克拉通东北部,在中生代期间岩石圈发生减薄,而兴城玄武岩为华北克拉通东北缘早白垩世基性岩浆活动的产物,可能完整记录了岩石圈变薄的过程以及克拉通破坏机制与演化过程信息,是研究华北克拉通北缘岩石圈减薄的理想对象.我们以兴城玄武岩为研究对象来揭示克拉通破坏的原因,并以此来约束克拉通破坏时限^[6-7].

玄武岩脉作为地幔部分熔融岩浆作用产物,其所蕴含的年代学信息,可为岩石圈演化过程提供重要的时间约束^[8-9].目前对于华北克拉通减薄的开始与峰期仍存在争议:路凤香等^[10]认为华北晚白垩纪—新生代软流圈来源玄武岩就是岩石圈减薄的直接标志,因而岩石圈减薄的高峰期应在65 Ma之后的新生代,中生代期间尽管有减薄,但减薄的幅度不大.吴福元等^[11]认为侏罗纪岩浆作用可能是太平洋板块向亚洲大陆俯冲的结果,与岩石圈破坏无关,只有早白垩世(135~115 Ma)时期的岩浆活动对应岩石圈的减薄与克拉通的破坏,华北克拉通破坏是在相对短的时间内完成的;根据辽宁铁岭金伯利岩和宽甸玄武岩中橄榄岩包裹体的Os同位素资料,认为华北的岩石圈减薄有可能在三叠纪就已开始,而早白垩世减薄的是原来以构造方式底侵在华北克拉通之下的扬子岩石圈地幔.

早白垩世兴城玄武岩是华北克拉通破坏与岩石圈减薄的重要产物之一,记录了克拉通破坏时间与演化过程信息.辽西地区位于华北克拉通东部,区内中生代岩浆活动较为强烈,形成了一系列花岗质侵入体,同时玄武岩脉也相当发育,且多呈脉岩群产出.本文以辽西兴城地区出露的早白垩世玄武岩为研究对象,通过详细的岩相学、同位素年代学等方法测试锆石和金红石年龄,进一步约束玄武岩脉形成时间,明确其成因与构造背景,为约束华北克拉通中生代岩石圈减薄的结束时间与过程^[12-13]提供补充资料.

1 区域地质背景

华北克拉通是世界上著名的古老陆块,也是中国最大的克拉通,与其他克拉通相比,有着更为复杂、多阶段的构造演化,记录了几乎所有的地球早期发展的重大构造事件,并在中生代又发生了减薄与改造^[14-15].华北克拉通位于中国东部,北部以中亚造山带为界^[1,16],南邻秦岭大别造山带,范围包含今日的华北与中国东北部、朝鲜半岛大部、蒙古南部,面积达 $170 \times 10^4 \text{ km}^2$ 万平方公里^[17].显生宙时期,华北克拉通在南、北、东3个方向分别受到了古特提斯洋、古亚洲洋和古太平洋板块俯冲的影响而发生了大规模的岩浆活动^[18-20].

辽西兴城地区位于华北克拉通东部(图1),经历了漫长的地区演化过程.古老结晶基底形成于太古宙,出露于东北部葫芦岛和西南部台里地区,主要为含有变质表壳岩系包裹体的片麻状花岗岩;中新元古代沉积长城系、蓟县系、青白口系巨厚地台型海相沉积盖层,同时发生强烈大陆裂谷作用形成古老隆起(山海关隆起)和裂陷槽(燕山裂陷槽)相间分布的构造格局.该地区中生代火山岩和侵入岩广泛分布^[22],发育众多中小型火山—沉积盆地,伴随着与地壳延伸有关的变质岩复合体和拉分盆地^[23].区内晚中生代玄武岩脉发育,类型多样,是研究古太平洋板块俯冲和华北克拉通破坏的理想区域.研究区内主要发育长城系常州沟组

(Chc)、串岭沟组(Chch)、团山子组(Cht)、大红峪组(Chd). 岩石类型以碳酸盐岩和陆源碎屑岩为主,并广泛发育新太古代片麻状绥中花岗岩. 辽西地区内煌斑岩、玄武岩、角闪岩等呈现规模不等的岩脉、岩株、岩墙状零星分布现象,以北东向带状展布在研究区西北和东南部,侵入于长城系和太古宙变质基底中.

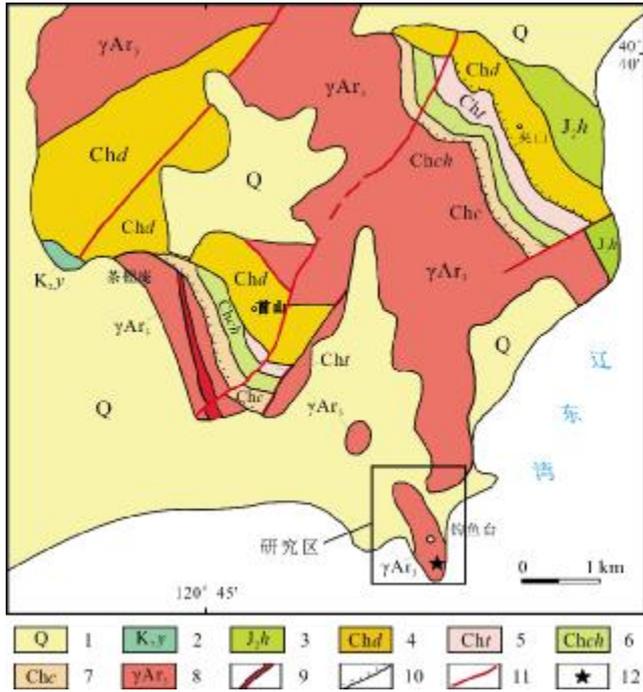


图 1 华北克拉通辽宁兴城地区地质简图
(据文献[21]改编)

Fig. 1 Geological sketch map of Xingcheng area in Liaoning Province, North China Craton
(Modified from Reference [21])

1—第四系(Quaternary); 2—下白垩统义县组(Lower Cretaceous Yixian fm.); 3—中侏罗统海房沟组(Middle Jurassic Haifanggou fm.); 4—中元古界大红峪组(Mesoprotozoic Dahongyu fm.); 5—中元古界团山子组(Mesoprotozoic Tuanshanzi fm.); 6—中元古界串岭沟组(Mesoprotozoic Chuanlinggou fm.); 7—中元古界常州沟组(Mesoprotozoic Changzhougou fm.); 8—新太古代绥中花岗岩(Neoproterozoic Suizhong granite); 9—花岗岩伟晶岩(granite pegmatite); 10—不整合(unconformity); 11—断层(fault); 12—采样点(sampling site)

中生代期间区内构造岩浆活动强烈,经历了新太古代、印支期和燕山期 3 期岩浆活动事件,中生代岩浆岩出露面积约占总面积的 55%. 辽西兴城地区中生代侵入岩主要为花岗质岩石,形成于晚三叠世、侏罗纪和早白垩世 3 个时期. 在早期形成的东西向构造格架基础上叠加了晚中生代北东向和北北东向褶皱和断裂构

造,中、新元古代发育大陆裂谷作用,形成燕辽裂陷槽,在古元古代晚期稳定下来,随后被元古宇到古生界沉积物覆盖^[24],并出现一系列陆相火山沉积岩系发育的中小型断陷盆地^[12].

2 地质体特征及岩相学

研究区内广泛出露新太古代片麻状花岗岩,岩性主要为中细粒石英闪长岩、黑云母二长花岗岩和花岗细晶岩等(图 2a、b),其内部可见少量后期侵入的基性岩脉. 本研究的玄武岩样品产自辽宁省兴城市海滨地区(GPS:40°36'15"N,120°47'37"E). 玄武岩脉切割花岗细晶岩和黑云母二长花岗岩(图 2c),岩脉走向约 116°,倾向西,为出露岩石中最晚的一期. 中粗粒黑云母二长花岗岩发生球状风化,风化面呈灰白色,新鲜面呈淡粉色,发育微弱的片麻状构造. 主要矿物有碱性长石(3~8 mm),灰白色半自形板柱状,含量 25%~45%;石英(3~6 mm),灰白色,他形粒状,含量 20%~30%;斜长石(3~6 mm),半自形柱状,含量 25%~40%;黑云母(2~4 mm),黑色片状,含量小于 5%. 花岗细晶岩风化面为黄色,新鲜面为灰白色,细粒结构,块状构造,主要矿物为钾长石(约 40%)、斜长石(约 30%)、石英(约 25%)及少量黑云母(< 5%),粒径较小,矿物



图 2 辽宁兴城岩浆岩野外产状

Fig. 2 Field occurrence of Xingcheng magmatite in Liaoning Province

均呈他形. 花岗细晶岩呈脉状穿切在黑云母二长花岗岩中.

玄武岩可见斑状结构, 风化面为黄色, 新鲜面为绿黑色(图 3a), 可见白色斑点, 具块状构造、杏仁状构造. 基质主要由辉石(5%~20%)、斜长石(30%~50%)和玻璃质(10%~20%)等组成, 共占 90% 以上, 其中玄武玻璃呈黄色调. 玄武岩斑晶含量 5%~6%, 橄榄石斑晶为无色, 晶体发育裂纹, 可见尖锐六边形断面, 其中部分橄榄石方解石化, 并在裂纹处可见. 可见磁铁矿, 异常双反射色, 呈鲕状赤铁矿假象, 内部发育方解石, 可见在斑晶处富集.

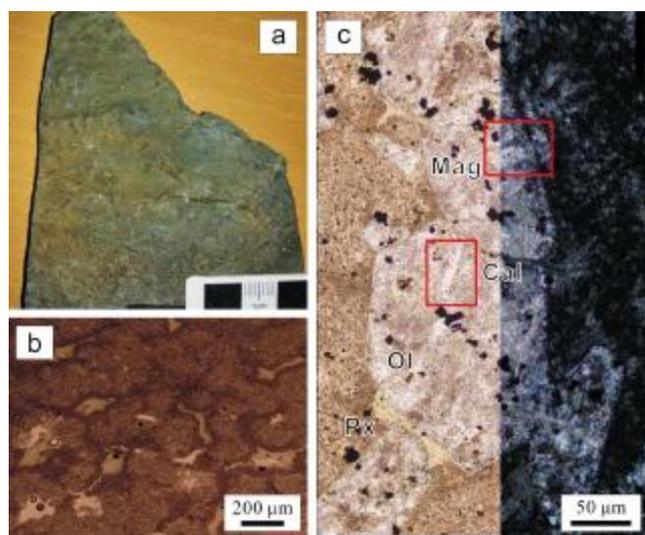


图 3 辽宁兴城玄武岩手标本及显微岩相学特征

Fig. 3 Hand specimens and micropetrographic characteristics of Kingcheng basalt in Liaoning Province

Px—辉石(pyroxene); Cal—方解石(calcite); Ol—橄榄石(olivine);
Mag—磁铁矿(magnetite)

3 样品分析测试

3.1 实验样品制备

样品采集于辽宁兴城台里滨海金沙湾地区出露的基性玄武岩脉. 选取去除风化面后的新鲜玄武岩样品进行测定. 首先将野外采集的样品破碎至 80~120 目, 通过电磁与重液分选, 在双目镜下挑选透明、无裂痕且晶形完好的锆石与金红石; 挑选代表性的锆石与金红石分别放入环氧树脂靶表面, 待其固化后打磨抛光; 然后对单矿物靶上锆石和金红石单矿物拍摄透射光、反射光及阴极发光照片^[25-26]. 注意测试之前用酒精擦拭锆石和金红石样品靶表面, 以除去污染.

3.2 实验分析方法

分析测试在中国地质调查局天津地质调查中心实验测试室完成. 测试仪器为 Resonetics Resolution S-155 ArF-Excime 激光器和 Agilent 7900 电感耦合等离子体质谱仪. 激光剥蚀采样过程以 He 为载气, 能量密度为 10 J/cm², 频率为 10 Hz, 采样束斑直径为 29 μm. 采用 Plesovice 和 91500 标准锆石作为外标进行基体校正; 成分标样采用 SRM612, 其中 ²⁹Si 作为内标元素. 采用 ICPMS-DataCal 9.0 处理实验数据, 具体的仪器配置和实验流程详见文献[27].

4 分析测试结果与讨论

4.1 锆石 U-Pb 年龄

辽宁兴城玄武岩样品的锆石颗粒较大, 多呈短柱状, 晶形完整, 多为自形一半自形, 晶面平直, 棱角较清晰(图 4a), 无破碎情况, 且显示典型的岩浆振荡环带. 较宽的岩浆振荡环带说明玄武岩中锆石样品形成于高温的中基性环境. 锆石颗粒一般长 35~150 μm, 宽 35~70 μm, 长宽比值为 1~1.5.

玄武岩脉中的锆石共得到 7 个分析点数据(表 1, 扫描首页 OSID 二维码可见), Th/U 值介于 0.21~1.22 之间, 具有较高的 Th/U 比值, 显示岩浆成因特点. 其中 5 个分析点年龄数据较好, 属于典型的岩浆锆石. 另外两个分析点数据(LX01-5、LX01-7)Th/U 值低, 普通铅含量高, 年龄数据结果偏差大, 可能为继承锆石. 选取其中 5 个分析点数据进行拟合, 得到锆石 Tera-Wasserburg 图解的下交点年龄为 104.8±6.5 Ma (MSWD=0.37, n=5)(图 4b).

4.2 金红石 U-Pb 年龄

金红石样品呈半透明、半自形或他形粒块状, 直径 50~150 μm(图 5). 玄武岩脉中的金红石共得到 32 个分析点数据(表 2, 扫描首页 OSID 二维码可见). 经过 LA-ICP-MS 测定发现, 由于 Th、U 含量低, 普通铅含量高, 不能像对高 U 含量的样品那样进行准确的普通铅扣除, 因此金红石的 32 个分析点无法计算得到玄武岩脉的侵位时间.

由于铅丢失是首先从矿物表层开始的, 所以在金红石 LA-ICP-MS 测定过程中, 可以选择靠近内部的晶域, 避开表层铅丢失较严重的部分, 从而降低测定结果铅丢失程度.

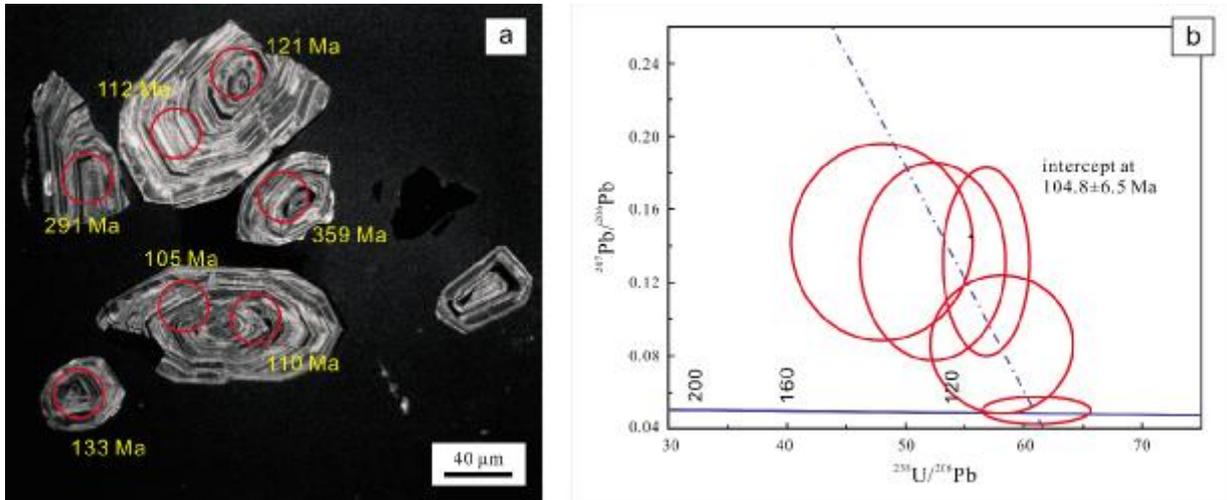


图 4 辽宁兴城玄武岩脉锆石的阴极发光特征与锆石 U-Pb 同位素年龄谐和图

Fig. 4 Zircon CL images and U-Pb isotopic age concordia diagram of Xingcheng basaltic dike in Liaoning Province

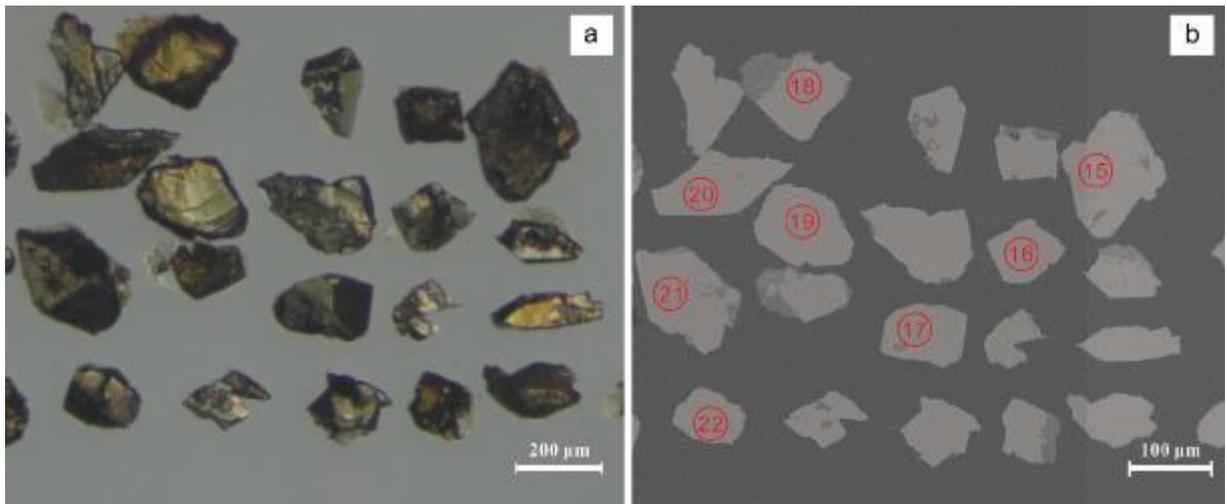


图 5 辽宁兴城玄武岩金红石图像

Fig. 5 Images of rutiles from Xingcheng basalt in Liaoning Province

a—透射光 (under transmitted light); b—反射光 (under reflected light)

5 讨论

5.1 玄武岩侵位年代

本次研究通过锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年获得辽宁兴城地区出露的玄武岩脉年龄为 104.8 ± 6.5 Ma. 据何登洋等^[28]知兴城玄武岩锆石结晶温度为 $695 \sim 779$ °C, 平均温度为 730 °C, 温度值均小于 800 °C. 该玄武岩锆石结晶温度与形成于俯冲带地幔楔或其他幔源镁铁质岩石中的锆石结晶温度相一致, 这也进一步印证了兴城玄武岩是俯冲带上覆地幔楔交代橄榄岩部分熔融产物. 由于兴城玄武岩岩浆源区存在锆石、金红石的分离结晶作用, 且同化了部分地壳物质, 前人研

究结果表明兴城早白垩世玄武岩普遍亏损高场强元素, 富集大离子亲石元素和 Pb 等, 这也进一步表明兴城早白垩世岩浆为古老岛弧型岩浆. 因此兴城玄武岩岩浆由华北克拉通古老岛弧型系列镁铁质基性岩浆演化而来^[28], 源区为岩石圈地幔交代橄榄岩, 岩浆在喷出地表的过程中经历了氧化作用和分离结晶作用.

通过本研究对辽宁兴城地区出露的玄武岩脉进行锆石和金红石年代学分析, 并结合前人对该地区玄武岩的年龄分析、主微量元素分析等工作, 可以得到该地区中生代的岩浆作用以及玄武岩的成因. 通过总结不同时代的构造活动可以得到华北克拉通减薄的开始时

期与峰期,本文年龄可以为其补充年代学信息.华北克拉通减薄的证据及其对应的构造活动,列于表3(扫描首页 OSID 二维码可见),详见文献[29-42].

其中,Gao等^[34]根据在辽西发现的中侏罗世高镁埃达克岩,结合该岩石中高的Ni和Cr的含量及其在矿物中的分布特征,提出这些岩石是拆沉进入地幔的地壳岩石部分熔融而成.这一解释暗示华北克拉通的破坏可能集中在中侏罗世.资料显示华北地区较大规模的岩浆活动集中在190~155 Ma和135~115 Ma两个时段^[21,38].姜耀辉^[37]依据在辽东发现的晚侏罗世煌斑岩,认为华北岩石圈减薄的起始时间在晚侏罗纪.徐义刚^[35]研究得到整个华北克拉通破坏过程的持续时间超过100 Ma,高峰应在白垩世—早新生代,并且在120~130 Ma的峰期岩浆作用之前岩石圈已发生减薄,侏罗纪零星的岩浆活动可能就是具体的体现.吴福元等^[11,20-21]据此认为华北的克拉通破坏应发生在新生代之前的中生代,由于辽西阜新地区在100 Ma左右出现软流圈地幔来源的玄武质岩石,因此华北的克拉通破坏发生在100 Ma之前.翟明国等^[33]通过一系列研究,认为华北东部构造体制转折(岩石圈减薄)的峰期时限起于150~140 Ma,结束于110~100 Ma,峰值是120 Ma.故本研究锆石所反映玄武岩脉的年龄与华北克拉通玄武岩集中形成的时间相吻合,所得年龄可补充岩脉年代学信息,为岩石圈演化过程提供重要的时间约束.

减薄作用在晚侏罗世—白垩纪达到高峰,并一直持续到白垩纪末期—新生代早期.华北岩石圈减薄作用发生的时间尺度大于100 Ma,说明华北岩石圈减薄是一个相对缓慢的过程,而且导致华北岩石圈破坏的构造控制因素可能是多元的.华北岩石圈减薄作用可能开始于克拉通边缘,与晚石炭世古亚洲洋的南向俯冲和晚三叠世华北—华南板块碰撞有关.晚石炭世古亚洲洋的南向俯冲以及后续的碰撞作用和晚三叠世华南—华北板块的碰撞作用对华北克拉通破坏起到了“唤醒”的作用.太平洋板块的俯冲对华北岩石圈破坏的影响则是决定性的,是导致这一地区现今盆地和主要构造线的走向、岩浆作用性质的演变以及南北重力梯度带的形成的主因.

5.2 地质意义

中生代早白垩世大规模的岩浆作用表明华北克

拉通在这一时期发生了大规模的岩石圈减薄,大量研究表明中生代时期华北克拉通岩石圈厚度从大于200 km锐减到东部的60~80 km,其减薄的峰期为130~120 Ma^[43].华北克拉通岩石圈减薄是以岩石圈地幔减薄为先导,因此岩石圈地幔的演化是认识华北克拉通岩石圈减薄的关键^[44].

有关岩石圈减薄的时间,一些学者认为岩石圈的拆沉减薄作用发生于中生代中期,并认为与中生代华北地区的成矿作用有联系^[45].另一些人则主张岩石圈减薄事件主要发生于中生代晚期—新生代^[46-48].之所以存在对岩石圈减薄发生时间的分歧是由于对该深部过程发生的标志有不同认识.中国东部晚白垩世—新生代软流圈来源的玄武岩分布广泛^[49],从黑龙江、吉林、内蒙古、山西到海南岛跨越了约4 000 km的范围.这些玄武岩是软流圈大面积上涌的直接证据,也是岩石圈—软流圈相互作用诱发的岩浆结晶产物,所伴随的岩石圈拉伸与研究区能源盆地的形成有密切关系^[50].因此这一事件发生的时间应该是岩石圈减薄的主要时期.

推断辽宁兴城地区玄武岩脉可能受到了早白垩世的岩石圈拆沉作用的影响,使得华北克拉通东部地区处于区域的伸展构造背景,引发了软流圈的上涌.俯冲背景下形成的早期流体影响深部软流圈地幔,使得地幔物质上涌的温压条件降低,部分熔融形成玄武岩岩浆,在构造薄弱或断裂等位置中侵位形成玄武岩.

白垩纪时期在华北克拉通东部,与其紧邻的古太平洋板块发生了洋壳俯冲,并伴随有俯冲板块后撤形成相关的海沟,这种构造活动使得上覆岩石圈伸展减薄,软流圈上升,进而形成一系列中基性岩浆活动等.岩石圈深部地幔物质在底部,与紧邻的深部软流圈之间产生一系列热交换和传导,并在板块后撤的过程中经历伸展减薄时形成多期玄武岩脉的侵位,侵位时代多集中在155~143 Ma之间.随后,古太平洋板块俯冲方向由北北东向转变为北东向,最终这种板块活动使得汇聚方向近似平行于华北克拉通东部大陆边缘,在岩石圈大洋板块持续构造活动的背景下,致使该时期在克拉通东缘发育了大规模的斜向大陆裂谷.华北克拉通东部的深部岩石圈地幔在古太平洋板块俯冲后撤的过程中,在东缘残留有一系列厚度不同的上部板片,伴随基底的剥落拆沉和软流圈的上涌,致使发生俯冲

交代作用的超基性岩石在尖晶石-石榴石高级变质区域内发生部分熔融,它们沿着构造薄弱的断裂带向上运移侵位,形成了兴城地区早白垩世的岛弧型玄武质岩浆。

郑永飞等^[51]认为自 144 Ma 以来俯冲的古太平洋板块开始发生回卷,古老岛弧型岩浆开始频繁活动,并标志着克拉通减薄的开始。这表明华北克拉通岩石圈减薄,可能是由于高角度俯冲的古太平洋板块发生板块回卷,引起弧后扩张与伸展,使得岩石圈开始减薄,同时软流圈地幔对岩石圈根部的侧向热侵蚀进一步加剧华北克拉通岩石圈减薄。130~120 Ma 期间回卷板片引起的弧后扩张与伸展达到峰期,同时标志着克拉通岩石圈减薄达到峰期。华北克拉通古老岛弧型镁铁质岩浆出现的最晚年龄是 108 Ma,代表华北克拉通中生代岩石圈减薄结束时间。由于兴城玄武岩结晶年龄为 104.8 ± 6.5 Ma,故本研究认为华北克拉通中生代岩石圈减薄的结束年龄可推到 105 Ma 左右。

6 结论

1) 白垩纪时期,华北克拉通东部的古太平洋板块的洋壳俯冲使得上覆岩石圈伸展减薄,软流圈上升,伴随基底的剥落拆沉和软流圈的上涌而形成一系列中基性岩浆活动,在板块后撤的过程中经历伸展减薄时形成多期玄武岩脉的侵位。兴城玄武岩岩浆也由华北克拉通古老岛弧型岩浆演化而来,源区岩石圈地幔交代橄榄岩岩浆在喷出地表的过程中经历了氧化作用和分离结晶作用。

2) 本研究获得的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 104.8 ± 6.5 Ma,表明辽宁兴城出露的玄武岩脉形成于早白垩世晚期且锆石所反映玄武岩脉的年龄与华北克拉通玄武岩集中形成的时间相吻合,为约束华北克拉通中生代岩石圈减薄的结束时间与过程补充了时间资料。

3) 根据前人研究可知,减薄作用在晚侏罗世—白垩纪达到高峰,并一直持续到白垩纪末期—新生代早期。在早白垩世时期,华北克拉通东北部的伸展减薄是伴随岩浆作用和不同熔体演化模式一起发生的。伸展构造和克拉通的减薄在时间和空间上与亚洲大陆东部活动大陆边缘构造和相关的俯冲带的活动有关,相关基性岩浆活动的高峰期在大约 110 Ma 附近,与所

得玄武岩脉形成年龄 104.8 ± 6.5 Ma 一致。该年龄指示了大规模岩石圈减薄事件发生在一个热-机械-化学侵蚀过程中,与前人的板片回撤的大陆动力学背景相一致。

参考文献(References):

- [1] Davis G A, Zheng Y D, Wang C, et al. Mesozoic tectonic evolution of the Yanshan fold and thrust belt, with emphasis on Hebei and Liaoning provinces, Northern China [C]//Hendrix M S, Davis G A. Paleozoic and Mesozoic tectonic evolution of central and eastern Asia: From continental assembly to intracontinental deformation. Boulder: Geological Society of America Memoir, 2001: 171-197.
- [2] Meng Q R. What drove Late Mesozoic extension of the Northern China-Mongolia tract? [J]. Tectonophysics, 2003, 369(3/4): 155-174.
- [3] Yang J H, Wu F Y, Chung S L, et al. Petrogenesis of Early Cretaceous intrusions in the Sulu ultrahigh-pressure orogenic belt, East China and their relationship to lithospheric thinning [J]. Chemical Geology, 2005, 222(3/4): 200-231.
- [4] Liang C Y, Liu Y J, Neubauer F, et al. Structural and rheological features of the western Liaoning metamorphic core complex corridor: Indications for Late Mesozoic extension of the eastern North China Craton [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2017, 139: 142-164.
- [5] 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 Y Q, Li J L, Zhang T, 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.
- [6] Deng J, Liu X F, Wang Q F, et al. Isotopic characterization and petrogenetic modeling of Early Cretaceous mafic dike: Lithospheric extension in the North China Craton, eastern Asia [J]. GSA Bulletin, 2017, 129(11/12): 1379-1407.
- [7] Liang Y Y, Liu X F, Wang Q F, et al. Late Mesozoic magmatism in the Jiaodong Peninsula, East China: Implications for crust-mantle interactions and lithospheric thinning of the eastern North China Craton [J]. Geoscience Frontiers, 2020, 11(3): 895-914.
- [8] 梁亚运. 胶东早白垩世基性脉岩岩石成因与成矿动力学驱动 [D]. 北京: 中国地质大学, 2017.
Liang Y Y. Petrogenesis of the Early Cretaceous mafic dikes and metallogenic dynamics in Jiaodong Peninsula [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2017.
- [9] 贺永诚. 辽西兴城台里中基性岩脉锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及其地质意义 [D]. 北京: 中国地质大学, 2015.
He C C. Zircon U-Pb geochronology, geochemical characteristics and

- geological significance of the Xingchengtaili intermediate-basic dyke in western Liaoning[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2015.
- [10]路凤香, 郑建平, 邵济安, 等. 华北东部中生代晚期—新生代软流圈上涌与岩石圈减薄[J]. 地学前缘, 2006, 13(2): 86–92.
- Lu F X, Zheng J P, Shao J A, et al. Asthenospheric upwelling and lithospheric thinning in Late Cretaceous-Cenozoic in eastern North China[J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13(2): 86–92.
- [11]吴福元, 徐义刚, 高山, 等. 华北岩石圈减薄与克拉通破坏研究的主要学术争论[J]. 岩石学报, 2008, 24(6): 1145–1174.
- Wu F Y, Xu Y G, Gao S, et al. Lithospheric thinning and destruction of the North China Craton[J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(6): 1145–1174.
- [12]崔芳华, 徐学纯, 郑常青, 等. 华北克拉通东部古太平洋板块俯冲与回撤作用: 来自辽西兴城地区晚中生代花岗岩质石的记录与启示[J]. 岩石学报, 2020, 36(8): 2463–2492.
- Cui F H, Xu X C, Zheng C Q, et al. The paleo-Pacific plate subduction and slab roll-back beneath eastern North China Craton: Insights from the Late Mesozoic granitoids in Xingcheng area, western Liaoning Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 2020, 36(8): 2463–2492.
- [13]唐杰, 许文良, 王枫. 东北亚早中生代火成岩组合的时空变异: 对古太平洋板块俯冲开始时间的制约[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2016, 35(6): 1181–1194.
- Tang J, Xu W L, Wang F. Rock associations and their spatial-temporal variations of the Early Mesozoic igneous rocks in the NE Asia: Constraints on the initial subduction timing of the paleo-Pacific plate[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2016, 35(6): 1181–1194.
- [14]Jahn B M, Auvray B, Cornichet J, et al. 3.5 Ga old amphibolites from eastern Hebei Province, China: Field occurrence, petrography, Sm-Nd isochron age and REE geochemistry[J]. Precambrian Research, 1987, 34(3/4): 311–346.
- [15]Liu D Y, Nutman A P, Compston W, et al. Remnants of ≥ 3800 Ma crust in the Chinese part of the Sino-Korean Craton[J]. Geology, 1992, 20(4): 339–342.
- [16]Sengör A M C, Natal'in B A, Burtman V S. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia[J]. Nature, 1993, 364(6435): 299–307.
- [17]Li S G, Xiao Y L, Liou D, et al. Collision of the North China and Yangtze blocks and formation of coesite-bearing eclogites: Timing and processes[J]. Chemical Geology, 1993, 109(1/4): 89–111.
- [18]Zhu G, Jiang D Z, Zhang B L, et al. Destruction of the eastern North China Craton in a backarc setting: Evidence from crustal deformation kinematics[J]. Gondwana Research, 2012, 22(1): 86–103.
- [19]Niu Y L. Geological understanding of plate tectonics: Basic concepts, illustrations, examples and new perspectives[J]. Global Tectonics and Metallogeny, 2018, 10(1): 23–46.
- [20]吴福元, 徐义刚, 朱日祥, 等. 克拉通岩石圈减薄与破坏[J]. 中国科学(地球科学), 2014, 44(11): 2358–2372.
- Wu F Y, Xu Y G, Zhu R X, et al. Thinning and destruction of the cratonic lithosphere: A global perspective[J]. Science China Earth Sciences, 2014, 57(12): 2878–2890.
- [21]周帅, 张梅生, 李晓波, 等. 辽西兴城地区首山南花岗伟晶岩地质特征及其地质意义[J]. 世界地质, 2017, 36(1): 66–81.
- Zhou S, Zhang M S, Li X B, et al. Geological characteristics of granitic pegmatite at south of Shoushan, Xingcheng area in western Liaoning and its geological significance[J]. Global Geology, 2017, 36(1): 66–81.
- [22]Wu F Y, Lin J Q, Wilde S A, et al. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in Eastern China[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2005, 233(1/2): 103–119.
- [23]Davis G A, Darby B J, Zheng Y D, et al. Geometric and temporal evolution of an extensional detachment fault, Hohhot metamorphic core complex, Inner Mongolia, China[J]. Geology, 2002, 30(11): 1003–1006.
- [24]Zhao G C, Wilde S A, Cawood P A, et al. Archean blocks and their boundaries in the North China Craton: lithological, geochemical, structural and P-T path constraints and tectonic evolution [J]. Precambrian Research, 2001, 107(1/2): 45–73.
- [25]宋彪, 张玉海, 万渝生, 等. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论[J]. 地质论评, 2002, 48(S1): 26–30.
- Song B, Zhang Y H, Wang Y S, et al. Mount making and procedure of the SHRIMP dating[J]. Geological Review, 2002, 48(S1): 26–30.
- [26]黄雅琪, 邱昆峰, 于皓丞, 等. 西秦岭格娄昂金矿床赋矿斑岩岩石成因及其地质意义[J]. 岩石学报, 2020, 36(5): 1567–1585.
- Huang Y Q, Qiu K F, Yu H C, et al. Petrogenesis of ore-hosting porphyry in the Gelouang gold deposit, West Qinling and its geological implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 2020, 36(5): 1567–1585.
- [27]周红英, 李怀坤, 崔玉荣, 等. 金红石 U-Pb 同位素定年技术研究[J]. 地质学报, 2013, 87(9): 1439–1446.
- Zhou H Y, Li H K, Cui Y R, et al. Rutile U-Pb isotopic dating methodology[J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87(9): 1439–1446.
- [28]何登洋, 邱昆峰, 张莲, 等. 华北克拉通兴城早白垩世玄武岩锆石、金红石地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2020, 39(6): 735–750.
- He D Y, Qiu K F, Zhang L, et al. Zircon and rutile geochemistry of the Early Cretaceous basaltic porphyry from Xingcheng in the North China Craton and its geodynamic implications[J]. Acta Petrologica Et Mineralogica, 2020, 39(6): 735–750.
- [29]从柏林, 王清晨. 中国合肥盆地新生代火山岩成因岩石学研究[J]. 岩石学报, 1996, 12(3): 370–381.
- Cong B L, Wang Q C. Petrogenesis of Cenozoic volcanic rocks in Hefei Basin, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 1996, 12(3): 370–381.

- [30] Zhang H F, Sun M. Geochemistry of Mesozoic basalts and mafic dikes, southeastern North China Craton, and tectonic implications [J]. *International Geology Review*, 2002, 44(4): 370-382.
- [31] Zhang H F, Sun M, Zhou X H, et al. Secular evolution of the lithosphere beneath the eastern North China Craton: Evidence from Mesozoic basalts and high-Mg andesites [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2003, 67(22): 4373-4387.
- [32] 闫峻, 陈江峰, 谢智, 等. 鲁东晚白垩世玄武岩及其中幔源包体的岩石学和地球化学研究 [J]. *岩石学报*, 2005, 21(1): 99-112.
Yan J, Chen J F, Xie Z, et al. Studies on petrology and geochemistry of the Later Cretaceous basalts and mantle-derived xenoliths from eastern Shandong [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 21(1): 99-112.
- [33] 翟明国, 朱日祥, 刘建明, 等. 华北东部中生代构造体制转折的关键时限 [J]. *中国科学(D辑)*, 2003, 33(10): 913-920.
Zhai M G, Zhu R X, Liu J M, et al. Time range of Mesozoic tectonic regime inversion in eastern North China Block [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2004, 47(2): 151-159.
- [34] Gao S, Rudnick R L, Yuan H L, et al. Recycling lower continental crust in the North China Craton [J]. *Nature*, 2004, 432(7019): 892-897.
- [35] 徐义刚. 用玄武岩组成反演中—新生代华北岩石圈的演化 [J]. *地学前缘*, 2006, 13(2): 93-104.
Xu Y G. Using basalt geochemistry to constrain Mesozoic-Cenozoic evolution of the lithosphere beneath North China Craton [J]. *Earth Science Frontiers*, 2006, 13(2): 93-104.
- [36] 许文良, 杨承海, 杨德彬, 等. 华北克拉通东部中生代高 Mg 闪长岩——对岩石圈减薄机制的制约 [J]. *地学前缘*, 2006, 13(2): 120-129.
Xu W L, Yang C H, Yang D B, et al. Mesozoic high-Mg diorites in eastern North China Craton: Constraints on the mechanism of lithospheric thinning [J]. *Earth Science Frontiers*, 2006, 13(2): 120-129.
- [37] 姜耀辉, 蒋少涌, 赵葵东, 等. 辽东半岛煌斑岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其对中国东部岩石圈减薄开始时间的制约 [J]. *科学通报*, 2005, 50(19): 2161-2168.
Jiang Y H, Jiang S Y, Zhao K D, et al. SHRIMP U-Pb zircon dating for lamprophyre from Liaodong Peninsula: Constraints on the initial time of Mesozoic lithosphere thinning beneath Eastern China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(22): 2612-2620.
- [38] Wu F Y, Yang J H, Wilde S A, et al. Geochronology, petrogenesis and tectonic implications of Jurassic granites in the Liaodong Peninsula, NE China [J]. *Chemical Geology*, 2005, 221(1/2): 127-156.
- [39] Xu Y, Menzies M A, Vroon P, et al. Texture-temperature-geochemistry relationships in the upper mantle as revealed from spinel peridotite xenoliths from Wangqing, NE China [J]. *Journal of Petrology*, 1998, 39(3): 469-493.
- [40] Wu F Y, Lin J Q, Wilde S A, et al. Nature and significance of the early Cretaceous giant igneous event in eastern China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 233: 103-119.
- [41] 路孝平, 吴福元, 赵成弼, 等. 通化地区印支期花岗岩锆石 U-Pb 年龄及其与大别-苏鲁超高压带碰撞造山作用之间的关系 [J]. *科学通报*, 2003, 48(8): 843-849.
Lu X P, Wu F Y, Zhang C B, et al. Triassic U-Pb age for zircon from granites in the Tonghua area and its response to the Dabie-Sulu ultrahigh-pressure collisional orogenesis [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(15): 1616-1623.
- [42] 韩宝福, 加加美宽雄, 李惠民. 河北平泉光头山碱性花岗岩的时代、Nd-Sr 同位素特征及其对华北早中生代壳幔相互作用的意义 [J]. *岩石学报*, 2004, 20(6): 1375-1388.
Han B F, Kagami H, Li H M. Age and Nd-Sr isotopic geochemistry of the Guangtoushan alkaline granite, Hebei Province, China: Implications for Early Mesozoic crust-mantle interaction in North China Block [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20(6): 1375-1388.
- [43] 王五力, 郑少林, 张立君, 等. 辽宁西部中生代地层古生物(一) [M]. 北京: 地质出版社, 1989: 202-218.
Wang W L, Zheng S L, Zhang L J, et al. Mesozoic stratigraphy and palaeontology of western Liaoning (Part I) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1989: 202-218.
- [44] 张宏福, 郑建平. 华北中生代玄武岩的地球化学特征与岩石成因: 以辽宁阜新为例 [J]. *科学通报*, 2003, 48(6): 603-609.
Zhang H Y, Zheng J P. Geochemical characteristics and petrogenesis of Mesozoic basalts from the North China Craton: A case study in Fuxin, Liaoning Province [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(9): 924-930.
- [45] 毛景文, 谢桂青, 张作衡, 等. 中国北方中生代大规模成矿作用的期次及其地球动力学背景 [J]. *岩石学报*, 2005, 21(1): 169-188.
Mao J W, Xie G Q, Zhang Z H, et al. Mesozoic large-scale metallogenic pulses in North China and corresponding geodynamic settings [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 21(1): 169-188.
- [46] Lu F X, Zhu Q W, Li S T, et al. Mesozoic volcanism surrounding Songliao Basin, China: Implication for the relationship with evolution of basin [J]. *Journal of China University of Geosciences*, 1997, 8(1): 72-77.
- [47] 邵济安, 李之彤, 张履桥. 辽西及邻区中-新生代火山岩的时空对称分布及其启示 [J]. *地质科学*, 2004, 39(1): 98-106, 152.
Shao J A, Li Z T, Zhang L Q. Symmetric spatiotemporal distribution of the Meso-Cenozoic volcanic rocks in west Liaoning and environs and its implications [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2004, 39(1): 98-106, 152.

- characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1987, 95(4): 407-419.
- [42] Rudnick R L, Shan G. Composition of the continental crust [C]// Holland H D, Turekian K K. *Treatise on Geochemistry*. Elsevier Science Ltd, 2014, 4: 1-64.
- [43] Green T H. Significance of Nb/Ta as an indicator of geochemical processes in the crust-mantle system[J]. *Chemical Geology*, 1995, 120(3/4): 347-359.
- [44] Wedepohl K H. The composition of the continental crust [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(7): 1217-1232.
- [45] Lassiter J C, Depaolo D J. Plume/lithosphere interaction in the generation of continental and oceanic flood basalts: Chemical and isotopic constraints [C]// Mahoney J J, Coffin M F. *Large igneous provinces: Continental, oceanic, and planetary flood volcanism*. Washington: American Geophysical Union, 1997.
- [46] Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 1984, 25(4): 956-983.
- [47] Gill R. *Igneous rocks and processes: A practical guide*[M]. Hoboken: Wiley, 2010.
- [48] Ma Y F, Liu Y J, Wang Y, et al. Geochronology and geochemistry of the Carboniferous felsic rocks in the central Great Xing'an Range, NE China: Implications for the amalgamation history of Xing'an and Songliao-Xilinhot blocks[J]. *Geological Journal*, 2019, 54(1): 482-513.
- [49] 徐备, Charvet J, 张福勤. 内蒙古北部苏尼特左旗蓝片岩岩石学和年代学研究[J]. *地质科学*, 2001, 36(4): 424-434.
Xu B, Charvet J, Zhang F Q. Primary study on petrology and geochronology of blueschists in Sunitezuqi, northern Inner Mongolia [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2001, 36(4): 424-434.
- [50] 刘兵. 大兴安岭地区晚古生代构造演化研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- Liu B. Study on the Late Paleozoic tectonic evolution of the Great Xing'an Ranges[D]. Changchun: Jilin University, 2014.
- [51] Li Y, Xu W L, Wang F, et al. Geochronology and geochemistry of Late Paleozoic volcanic rocks on the western margin of the Songnen-Zhangguangcai Range massif, NE China: Implications for the amalgamation history of the Xing'an and Songnen-Zhangguangcai Range massifs[J]. *Lithos*, 2014, 205: 394-410.
- [52] 张超, 吴新伟, 刘永江, 等. 大兴安岭中段早二叠世 A 型花岗岩成因及对扎兰屯地区构造演化的制约[J]. *岩石学报*, 2020, 36(4): 1091-1106.
Zhang C, Wu X W, Liu Y J, et al. Genesis of Early Permian A-type granites in the middle of the Great Xing'an Range and constraints on tectonic evolution of the Zhalantun area[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2020, 36(4): 1091-1106.
- [53] 郭奎城, 张文龙, 杨晓平, 等. 黑河市五道沟地区早二叠世 A 型花岗岩成因[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2011, 41(4): 1077-1083.
Guo K C, Zhang W L, Yang X P, et al. Origin of Early Permian A-type granite in the Wudaogou area, Heihe City[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2011, 41(4): 1077-1083.
- [54] 余宏全, 李进文, 向安平, 等. 大兴安岭中北段原岩锆石 U-Pb 测年及其与区域构造演化关系[J]. *岩石学报*, 2012, 28(2): 571-594.
She H Q, Li J W, Xiang A P, et al. U-Pb ages of the zircons from primary rocks in middle-northern Daxinganling and its implications to geotectonic evolution [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(2): 571-594.
- [55] Feng Z Q, Liu Y J, Li L, et al. Subduction, accretion, and collision during the Neoproterozoic-Cambrian orogeny in the Great Xing'an Range, NE China: Insights from geochemistry and geochronology of the Ali River ophiolitic mélange and arc-type granodiorites [J]. *Precambrian Research*, 2018, 311: 117-135.

(上接第 299 页/Continued from Page 299)

- [48] 路凤香, 郑建平, 张瑞生, 等. 华北克拉通东部显生宙地幔演化[J]. *地学前缘*, 2005, 12(1): 61-67.
Lu F X, Zheng J P, Zhang R S, et al. Phanerozoic mantle secular evolution beneath the eastern North China Craton[J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(1): 61-67.
- [49] 罗绍强, 唐华, 肖进, 等. 川西甘孜-理塘结合带洋岛型玄武岩地球化学、年代学特征及其地质意义[J]. *地质与资源*, 2021, 30(6): 656-665.
Luo S Q, Tang H, Xiao J, et al. Oceanic island basalts in Garze-Litang junction zone, western Sichuan Province: Geochemistry, geochronology and geological implication[J]. *Geology and Resources*, 2021, 30(6): 656-665.
- [50] 仲米山, 张国仁, 杨中柱, 等. 辽东半岛南部早白垩世变质核杂岩时空分布及动力学特征[J]. *地质与资源*, 2020, 29(5): 411-418.
Zhong M S, Zhang G R, Yang Z Z, et al. Spatiotemporal distribution and dynamic characteristics of the Early Cretaceous metamorphic core complexes in southern Liaodong Peninsula[J]. *Geology and Resources*, 2020, 29(5): 411-418.
- [51] 郑永飞, 徐峥, 赵子福, 等. 华北中生代镁铁质岩浆作用与克拉通减薄和破坏[J]. *中国科学(地球科学)*, 2018, 48(4): 379-414.
Zheng Y F, Xu Z, Zhao Z F, et al. Mesozoic mafic magmatism in North China: Implications for thinning and destruction of cratonic lithosphere[J]. *Science China Earth Sciences*, 2018, 61(4): 353-385.