https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.185

辽西寺儿堡—白塔盆地晚侏罗世火山岩地质特征及其对燕山运动的响应

宋志伟[1],郑常青[1,2*],林 波[1],徐学纯[1],梁琛岳[1,2],陈 龙[1],赵英利[1,2],温泉波[1]

1. 吉林大学地球科学学院,吉林长春 130061
2. 吉林大学东北亚矿产资源评价自然资源部重点实验室,吉林长春 130061

摘 要: 辽西地区位于燕山造山带东段,发育大规模的中生代火山—沉积盆地,是研究中生代燕山运动构造体制转换、岩石圈减薄和克拉通破坏的关键地区之一.报道了辽西寺儿堡—白塔盆地晚侏罗世火山岩岩相学、锆石U-Pb年代学、地球化学和锆石Hf同位素组成等资料,确定了其形成时代、岩石成因及构造背景,探讨了晚中生代期间古太平洋板块对华北克拉通东部俯冲后撤作用时间,为进一步认识燕山运动和燕山期岩浆活动的地球动力学机制提供可靠的地质依据.盆地内大范围出露的流纹岩形成时代为153.8~160.3 Ma,在空间上呈NE向展布,具有较高的SiO_2、Al_2O_3和全碱含量,显示准铝质—过铝质和高钾钙碱性特征.样品相对富集大离子亲石元素(LILEs:Rb、Ba、Pb、K等)和轻稀土元素(LREEs),亏损高场强元素(HFSEs:Nb、Ta、P、Ti等)和重稀土元素(HREEs),具明显的Eu负异常和较低的Cr、Co、Ni含量,结合岩浆成因锆石具有负$\varepsilon_{Hf}(t)$值(−17.8~−23.2)和相对古老的Hf同位素二阶段模式年龄(T_{DM2}=2 334~2 697 Ma),暗示初始岩浆可能来自于太古代或元古代的古老下地壳的部分熔融.综合研究表明,辽西地区晚侏罗世岩浆构造活动主要受控于古太平洋板块俯冲和后撤.寺儿堡—白塔盆地中流纹岩形成于古太平洋板块俯冲的NW向挤压构造背景,同时,在辽西地区存在大量与古太平洋板块后撤密切相关的变质核杂岩和伸展盆地,暗示区域上伸展体系的存在.因此,认为燕山—辽西地区构造体制于晚侏罗世发生转变,由挤压体系逐渐过渡为伸展体系,为燕山运动的响应.

关键词: 燕山运动;锆石U-Pb年龄;华北克拉通;辽西地区;古太平洋板块;岩石学;构造.

中图分类号: P581;P597 **文章编号:** 1000-2383(2023)10-3689-18 **收稿日期:** 2021-08-20

Geological Characteristics of Late Jurassic Volcanic Rocks in Sierbao-Baita Basin, West Liaoning Province and Its Response to Yanshan Movement

Song Zhiwei[1], Zheng Changqing[1,2*], Lin Bo[1], Xu Xuechun[1], Liang Chenyue[1,2], Chen Long[1], Zhao Yingli[1,2], Wen Quanbo[1]

1. *College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun* 130061, *China*
2. *Key Laboratory of Mineral Resources Evaluation in Northeast Asia, Ministry of Natural Resources, Jilin University, Changchun* 130061, *China*

基金项目: 国家重点研发计划项目(No.2017YFC0601401);国家自然科学基金项目(No. 41972215).

作者简介: 宋志伟(1998-),男,硕士研究生,主要从事矿物学、岩石学、矿床学研究. ORCID: 0000-0002-2469-6191. E-mail: songzw19@mails.jlu.edu.cn

* **通讯作者:** 郑常青, ORCID: 0000-0002-9622-6299. E-mail: zhengchangqing@jlu.edu.cn

引用格式: 宋志伟,郑常青,林波,徐学纯,梁琛岳,陈龙,赵英利,温泉波,2023.辽西寺儿堡—白塔盆地晚侏罗世火山岩地质特征及其对燕山运动的响应.地球科学,48(10):3689-3706.

Citation: Song Zhiwei, Zheng Changqing, Lin Bo, Xu Xuechun, Liang Chenyue, Chen Long, Zhao Yingli, Wen Quanbo, 2023. Geological Characteristics of Late Jurassic Volcanic Rocks in Sierbao-Baita Basin, West Liaoning Province and Its Response to Yanshan Movement. *Earth Science*, 48(10): 3689-3706.

Abstract: The West Liaoning Province is located in the eastern part of the Yanshan orogenic belt, with large-scale Mesozoic volcanic-sedimentary basins. It is critical to study the transformation of the Yanshan movement tectonic regime, lithosphere thinning and craton destruction during the Mesozoic. In this paper it conducts a comprehensive study of the Late Jurassic volcanic rocks exposed in the Sierbao-Baita basin in West Liaoning from the aspects of the perspectives of petrography, zircon U-Pb chronology, geochemistry and zircon Hf isotopic composition, so as to determine the age of their formation, petrogenesis and tectonic setting, discusses the time of the subduction and rollback of the Paleo-Pacific plate to the eastern North China craton during the Late Mesozoic, which provides a reliable geological basis for further understanding the geodynamic mechanism of the Yanshan movement and Yanshanian magmatism. The formation age of the rhyolite exposed in the basin is 153.8−160.3 Ma, spatially distributed in NE direction, with high SiO_2, Al_2O_3 and total-alkali contents, showing the characteristics of metaluminous-peraluminous and high-K calc-alkaline. The samples are relatively enriched in large ion lithophile elements (LILEs: Rb, Ba, Pb, K) and light rare earth elements (LREEs), depleted in high field strength elements (HFSEs: Nb, Ta, P, Ti) and heavy rare earth elements (HREEs), with obvious Eu negative anomaly and low Cr, Co, Ni contents. Combined with the magmatic origin zircons exhibit negative $\varepsilon_{Hf}(t)$ value (−17.8 to −23.2) and old Hf isotopic two-stage model age (T_{DM2}=2 334−2 697 Ma), all suggest that the primary magma may have originated from the partial melting of the Archaean or Proterozoic ancient lower crust. The Late Jurassic magmatism and tectonic movement in the West Liaoning Province were controlled by the subduction and rollback of the paleo-Pacific plate. The rhyolite in the Sierbao-Baita basin was formed in the NW direction compression tectonic setting caused by the subduction of the paleo-Pacific plate. At the same time, there are also a large number of metamorphic core complexes and extensional basins closely related to the rollback of the paleo-Pacific plate in the West Liaoning Province, suggesting the existence of an extensional regime in this region. Therefore, it hold that the tectonic regime of the Yanshan-West Liaoning area gradually changed from compression regime to extension regime in the Late Jurassic, which is a response to Yanshan movement.

Key words: Yanshan movement; zircon U-Pb age; North China craton; West Liaoning; paleo-Pacific plate; petrology; tectonics.

0 引言

中国著名地质学家翁文灏根据燕山地区的构造运动特点于1926年首次提出“燕山运动”这一概念(Wong, 1926),最初是指辽西地区火山岩和髫髻山组火山岩的底部角度不整合所代表的构造运动及相应的岩浆活动,随后又将其推广至整个中国东部(Wong, 1927).近几十年来,学者们对燕山运动进行大量的相关研究,认为燕山运动是中国东部地区在整个侏罗纪至白垩纪期间发生的重大构造运动,根本性地改变了中国东部的构造格局,中国东部地壳由东西向构造转变为北东向,并经历了强烈的挤压造山作用向伸展构造体制的转变(Dong *et al.*, 2015, 2018; Wang *et al.*, 2018).但是关于燕山运动形成的动力学背景和构造体制转换时间仍存在不同认识.部分学者将燕山运动的形成联系于新特提斯、蒙古−鄂霍茨克和古太平洋三大构造域的共同作用(Dong *et al.*, 2015, 2018),或考虑燕山运动是蒙古−鄂霍茨克洋闭合和古太平洋板片俯冲交替影响的结果(Davis *et al.*, 2001),然而更多的研究认为燕山运动是古太平洋板块俯冲作用的产物(Li *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2015, 2017, 2018; Dai *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2020).古太平洋板块向欧亚大陆的俯冲作用开始于早侏罗世(Wang *et al.*, 2017; Tang *et al.*, 2018),与燕山运动的初始时间不谋而合(Dong *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2020).此外,燕山运动构造体制转变也受古太平洋板块俯冲后撤作用的强力制约(Li *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2018; Hu *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2020).因此,准确厘定古太平洋板块俯冲后撤作用的时间是必要的.

华北克拉通具有~38亿年的演化历史,是世界上最古老的克拉通之一(图1; Zhao *et al.*, 2012).在中生代受到燕山运动的强烈影响,岩石圈减薄,并在地表浅层发育大规模的岩浆活动和区域性构造变形(Yang *et al.*, 2003;张北航等,2021).辽西地区位于华北克拉通北缘,燕山构造带的东段(图1,图2).中生代时期,地壳由稳定转为活化,辽西地区具有与华北克拉通相似的演化历史.强烈且频繁的构造岩浆活动,导致区域内发育了大量的中生代岩浆岩和火山−沉积断陷盆地,并富含丰富的湖相古生物化石,是研究燕山运动和古太平洋构造体系演化历史的典型地区之一(Liang *et al.*, 2015a, 2015b; Song *et al.*, 2021).前人对该地区出露的大面积中生代岩浆岩进行了系统的研究工作,但工作重点主要集中于侵入岩类(Hu *et al.*, 2019; 崔芳华等,

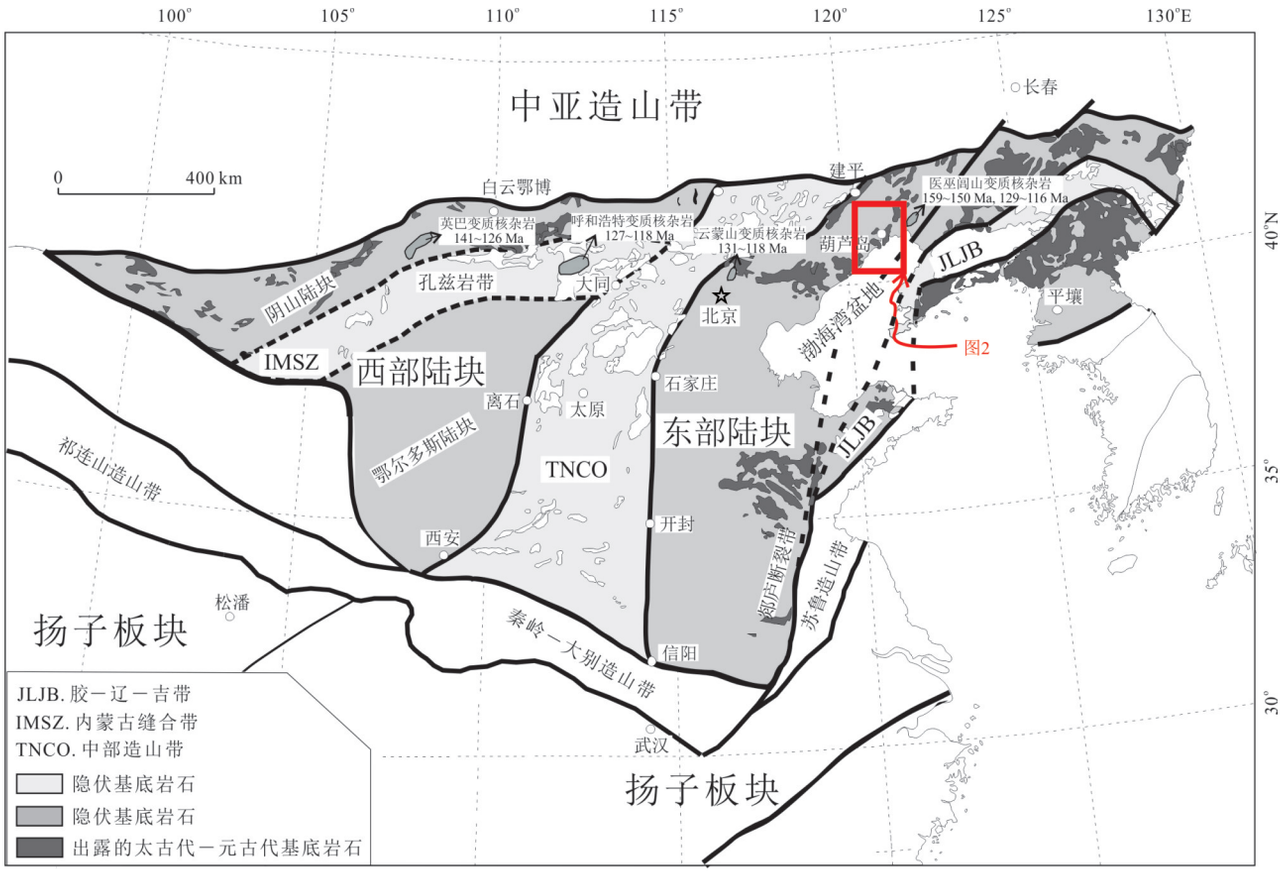

图 1　华北克拉通基底构造单元划分(据 Zhao *et al*., 2005 修改)

Fig. 1　Simplified map showing the tectonic subdivisions of the North China craton and the distribution of the basement rocks (modified after Zhao *et al*., 2005)

2020),对火山岩的报道相对较少,并且部分火山岩的年代划分是通过野外岩石组合和生物化石完成的,定年工作不够细致.因此,本文对辽西寺儿堡—白塔盆地出露的晚侏罗世火山岩进行岩石学、锆石 U-Pb 年代学、地球化学以及锆石 Hf 同位素组成等多方面的综合研究,确定了其形成时代、岩石成因及构造背景,探讨了晚中生代期间古太平洋板块对华北克拉通东部俯冲后撤作用时间,为进一步认识燕山运动和燕山期岩浆活动的地球动力学机制提供了可靠的地质依据.

1　区域地质背景

华北克拉通位于中国东部,形态上呈三角状,北邻西伯利亚克拉通,南邻扬子克拉通,东缘与太平洋板块相连(图 1).辽西地区位于华北克拉通北缘燕山褶皱带内,其东南为渤海湾盆地,向北为内蒙地轴(辽宁省地质矿产局, 1989).在古生代期间研究区处于稳定沉积阶段,整体以升降运动为主,构造、岩浆活动不活跃(崔芳华等, 2020; Song *et al*., 2021).而在中生代则先后经历了古亚洲洋、蒙古—鄂霍茨克洋和古太平洋等构造体系的叠加影响,引发了强烈的构造—岩浆—成矿—成盆活动,是研究区的构造活跃期(图 2; Davis *et al*., 2001; Meng, 2003; Dai *et al*., 2018).印支期时华北克拉通与相邻的扬子克拉通和西伯利亚克拉通发生碰撞拼合(Davis *et al*., 2001; Meng, 2003; Yang *et al*., 2003),导致研究区发育了一系列近东西向的褶皱和断裂构造,随后晚中生代的燕山运动又对印支期的构造格局进行了强烈的改造,造成研究区近东西向和北西向的断裂又被后期的燕山期北东向断裂错断,形成了大量走向为北东或北北东向的韧性剪切带、变质核杂岩和中小型断陷盆地.强烈的岩浆构造活动使得区域性隆升、伸展和走滑等构造现象较为普遍,同时还广泛分布着火山岩地层,如晚侏罗世髫髻山组和早白垩世义县组等(图 2;Song *et al*., 2021).因此,晚中生代火山岩与中国东部中生代构造格架的转换、燕山运动的演化历程

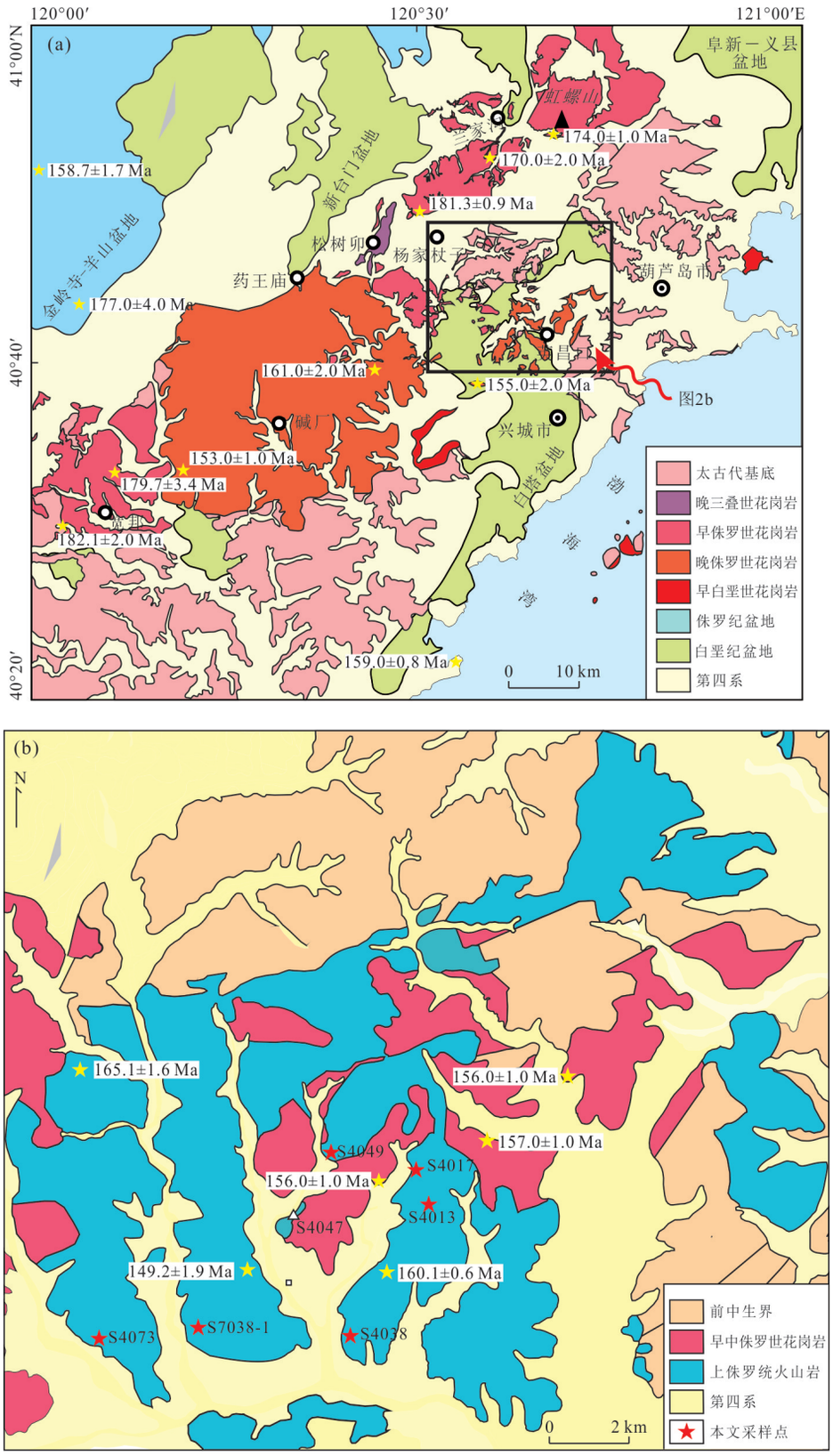

图 2　辽西地区地质图(a)及晚侏罗世火山岩展布及采样位置(b)

Fig. 2　Geological map of West Liaoning Province (a) and distribution of the Late Jurassic volcanics with sampling locations (b)

年代学数据来自:崔芳华(2015);赵伟策(2015);宋旸等(2018);Hu *et al*.(2019);Lin *et al*.(2021)

以及华北克拉通破坏等地质问题密切相关(Gao *et al*., 2004; Zhu *et al*., 2012).

中生代火山岩在辽西地区广泛分布，大面积的火山岩出露于小德营子、新台门、寺儿堡－白塔和阜新－义县等地区，分布面积约占总面积的30%(图2a;辽宁省地质矿产局，1989).研究区内火山喷发活动从晚三叠世开始，至早白垩世达到顶峰，之后区域处于相对稳定期，后期改造较弱.兴隆沟组中生代火山岩是辽西地区第1次火山喷发旋回的产物.随后进入强烈的晚侏罗世髫髻山(蓝旗)组和早白垩世义县组火山喷发旋回.研究区中生代频繁且强烈的岩浆活动和构造运动也造成区域上火山－碎屑岩地层较为发育，由下而上依次为晚三叠世红垃子组、中－晚侏罗世海房沟组、髫髻山(蓝旗)组和土城子组以及早白垩世义县组(辽宁省地质矿产局，1989).根据现今的盆地残留地层，又将辽西地区广泛发育的火山－沉积盆地划分为侏罗纪盆地和白垩纪盆地.其中，侏罗纪盆地为金岭寺－羊山盆地，白垩纪盆地主要包括小德营子盆地、新台门盆地和寺儿堡－白塔盆地等(图2a).寺儿堡－白塔盆地位于杨家杖子岩浆热液成矿带东南部(图2b)，盆地内发育有一套中酸性火山岩岩石组合，主要由粗安岩、粗面岩、粗面英安岩、流纹岩以及少量火山碎屑岩组成，因受燕山期构造运动的影响，火山岩均呈北东或北北东向展布，与下伏早－中元古代灰岩和早古生代灰岩地层呈不整合接触.对该套白垩纪盆地中晚侏罗世火山岩的详细厘定，有助于建立区域中生代火山岩年代学格架和确定火山岩岩石成因及其构造背景.

2　样品岩相学特征

晚侏罗世火山岩在辽西地区广泛发育，主要由粗安岩、粗面岩、粗面英安岩、流纹岩以及少量火山碎屑岩组成，其中流纹岩仅出露在寺儿堡－白塔盆地内，在空间上呈北东或北北东向展布，岩石风化面呈土黄色，新鲜面呈黄白色，斑状结构，块状构造或流纹构造(图3a, 3b).斑晶主要由石英、斜长石、黑云母及少量钾长石组成(图3c, 3d).其中，斜长石呈半自形－他形板柱状，具聚片双晶，高岭土化严重，粒径介于0.3～1.5 mm，含量约10%～15%；石英

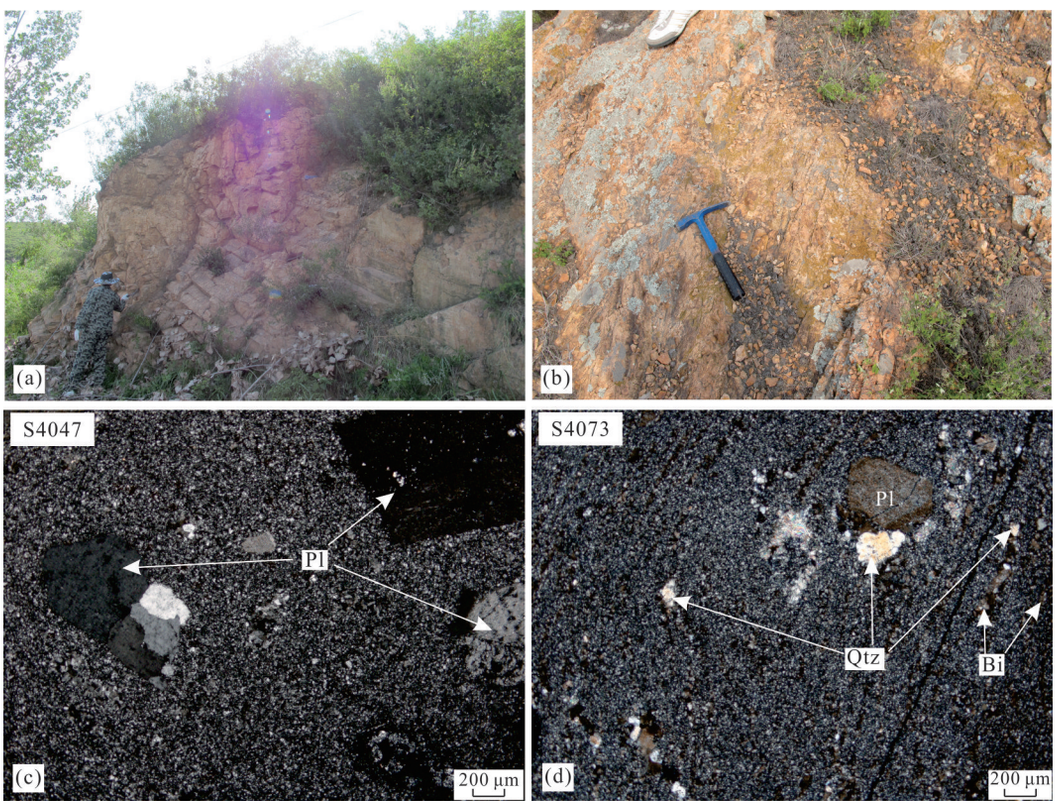

图3　辽西寺儿堡－白塔盆地晚侏罗世流纹岩野外露头及显微结构特征

Fig. 3　Representative meso- and micro-fabrics of the Late Jurassic rhyolites from Sierbao-Baita basin, West Liaoning

Qtz.石英；Pl.斜长石；Bi.黑云母

呈他形粒状，粒径介于0.4～0.7 mm，含量约为3%～5%；黑云母呈不规则的片状分布在基质中，含量约为1%～3%.基质为微晶－隐晶质结构，主要由石英和斜长石组成，钾长石含量较少，石英颗粒包含斜长石和钾长石微晶构成包含微晶结构(图3c，3d).

3 分析测试方法

3.1 LA-ICP-MS锆石U-Pb同位素测试分析

本文选取3件流纹岩(S4047，S4049，S4073)样品进行LA-ICP-MS锆石U-Pb同位素测试分析.锆石单矿物分选在河北廊坊地质调查院完成.样品靶由北京锆年领航科技有限公司制备.LA-ICP-MS锆石U-Pb年代学测试在吉林大学东北亚矿产资源评价自然资源部重点实验室完成.激光剥蚀使用德国相干公司(Coherent)COMPExPro型ArF准分子激光器，质谱仪为美国安捷伦公司7500A型四极杆等离子质谱.具体操作流程见梁琛岳等(2020).使用Glitter软件处理原始数据.年龄计算及图像绘制采用ISOPLOT(Version 3.0；Ludwig，2003)程序，数据结果和锆石U-Pb谐和图给出误差为1σ，表示95%的置信度(附表1).

3.2 全岩主、微量元素分析

全岩主量元素的前处理和测试分析在中国冶金地质总局一局测试中心完成，主量元素测试采用X射线荧光光谱(XRF)法，测试仪器为顺序式X-射线荧光光谱仪(AXIOS Minerals).微量元素测试采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS Agilent 7500ce)完成.详细分析流程参考Song *et al*.(2021).

3.3 锆石Lu-Hf同位素分析

在锆石年代学分析之后，对辽西寺儿堡－白塔盆地晚侏罗世火山岩进一步做了原位微区锆石Hf同位素组成分析.分析工作在中科院地质与地球物理研究所完成.实验仪器为GeoLas Plus和MC-ICP-MS为Neptune准分子激光器.数据结果处理(包括对样品和空白信号的选择、同位素质量分馏校正)采用ICPMSDataCal程序完成.具体分析流程见Hu *et al*.(2012).

4 分析测试结果

4.1 年代学测试结果

本文对采自寺儿堡－白塔盆地的3件流纹岩样品进行LA-ICP-MS锆石U-Pb同位素定年，数据结果见附表1，部分锆石的阴极发光图像如图4所示，所有锆石颗粒均呈自形－半自形粒状或椭圆状，颗粒长100～300 μm，长宽比为1.5∶1～3∶1，颗粒内部结构清晰，绝大多数锆石发育有典型的岩浆振荡环带，少量锆石保存有捕获的残留核(图4a2，4b2，4c2)，结合其较高的Th/U比值(0.03～3.23)，暗示锆石均为岩浆成因，详细结果如下：

样品S4047共有25个分析点，剔除4个偏离点，17个分析点的$^{206}Pb/^{238}U$加权平均年龄为159.3±2.0 Ma(MSWD＝0.19，n＝17；图4a1).其余4颗锆石的年龄值分别为～170、～175、～190和～245 Ma.该样品的最小年龄为159.3±2.0 Ma，代表了流纹岩的结晶年龄，其余较老的锆石年龄均为流纹岩形成过程中捕获的或继承的锆石年龄.

样品S4049共有25个分析点，剔除2个偏离点，22个分析点的$^{206}Pb/^{238}U$加权平均年龄为160.3±1.7 Ma(MSWD＝0.25，n＝22；图4b1)，代表了流纹岩的结晶年龄.剩余1颗锆石的年龄为199.0±6.0 Ma，可能代表了捕获的或继承的锆石年龄.

样品S4073共有24个分析点，剔除1个偏离点，23个分析点的$^{206}Pb/^{238}U$加权平均年龄为153.8±1.5 Ma(MSWD＝0.29，n＝23；图4c1)，代表了流纹岩的结晶年龄.

4.2 地球化学特征

本文对辽西寺儿堡－白塔盆地7件晚侏罗世火山岩样品进行了全岩主、微量元素分析，详细结果见表1.

本次在辽西寺儿堡－白塔盆地采集的晚侏罗世火山岩样品为流纹岩(图5a)，具有较高的SiO_2(75.53%～76.10%)、K_2O(5.01%～5.49%)、Al_2O_3(12.84%～13.05%)和全碱含量(8.68%～9.04%)，CaO(0.33%～0.58%)、MgO(＜0.20%)和TFeO含量较低(0.97%～1.45%).在TAS图解中，样品落入亚碱性区域(图5a)，其K_2O/Na_2O比值为1.37%～1.61%，属于高钾钙碱性系列(图5b).在A/CNK－A/NK图解中，A/CNK值介于0.99～1.07，样品落在准铝质－过铝质范围内，显示准铝质－过铝质特征(图5c).

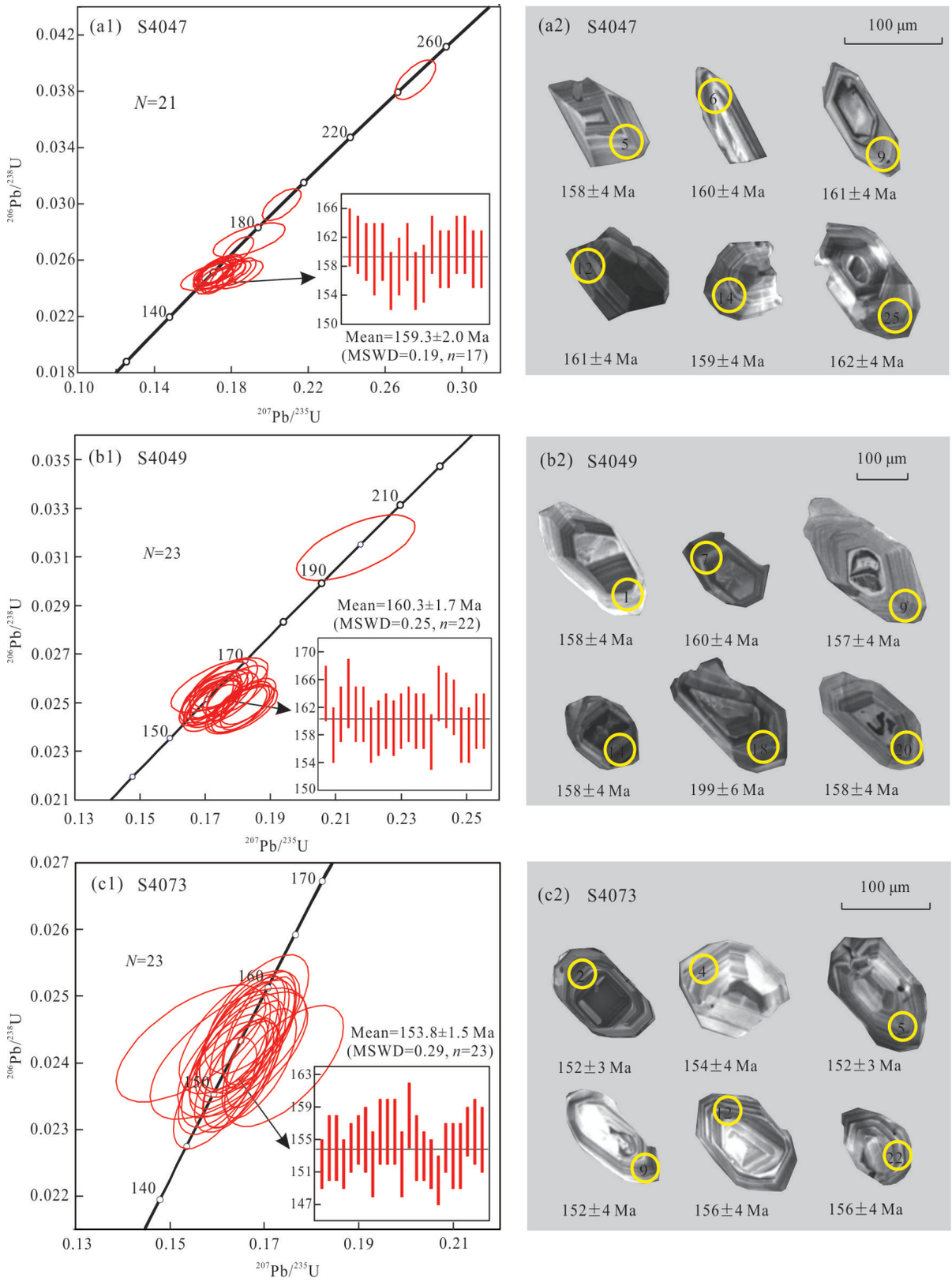

图4　辽西寺儿堡—白塔盆地晚侏罗世流纹岩锆石U-Pb年龄协和图(a1, b1, c1)和阴极发光图像(a2, b2, c2)

Fig. 4　Zircon U-Pb concordia diagrams (a1, b1, c1) and CL images (a2, b2, c2) of the Late Jurassic rhyolites from Sierbao-Baita basin, West Liaoning

表1 辽西寺儿堡—白塔盆地晚侏罗世流纹岩主量元素(%)、微量元素(10^{-6})测试结果

Table 1 Major (%) and trace (10^{-6}) element compositions for Late Jurassic rhyolites in Sierbao-Baita basin, West Liaoning Province

样品号	S4013	S4017	S4038	S4047	S4049	S4073	S7038-1
岩性				流纹岩			
SiO_2	75.95	75.53	76.01	76.10	75.79	75.68	75.58
TiO_2	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14
Al_2O_3	12.85	12.92	12.84	12.86	12.90	13.05	12.94
TFeO	0.97	1.45	1.02	1.20	1.15	1.08	0.98
MnO	<0.02	0.03	0.04	0.02	0.03	0.03	0.01
MgO	<0.20	<0.20	<0.20	<0.20	<0.20	0.17	0.17
CaO	0.52	0.51	0.55	0.41	0.58	0.36	0.33
Na_2O	3.65	3.64	3.50	3.67	3.79	3.42	3.44
K_2O	5.29	5.31	5.36	5.01	5.25	5.49	5.35
P_2O_5	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02
LOI	0.67	0.72	0.56	0.71	0.30	0.72	0.96
Total	100.16	100.43	100.15	100.28	100.08	100.28	99.94
A/NK	1.10	1.10	1.11	1.12	1.08	1.13	1.13
A/CNK	1.01	1.02	1.02	1.05	0.99	1.07	1.07
全碱	8.94	8.95	8.86	8.68	9.04	8.91	8.79
K_2O/Na_2O	1.45	1.46	1.53	1.37	1.39	1.61	1.56
Cr	4.89	5.29	4.48	5.79	5.98	4.98	3.28
Ni	1.76	3.33	2.61	1.23	1.61	1.10	0.81
Sc	1.69	1.44	1.63	1.50	1.46	1.27	1.81
Co	0.79	1.14	0.93	0.55	0.73	0.62	
V	11.99	13.84	11.03	12.64	11.67	12.53	
Ba	606.27	594.41	537.29	631.37	691.95	570.99	582.63
Rb	167.66	170.61	174.84	156.09	171.53	178.99	196.50
Th	12.69	11.82	12.94	13.57	12.48	13.10	14.82
U	1.26	1.68	1.54	1.38	2.45	1.55	1.72
Nb	14.32	14.38	14.54	13.78	13.91	14.63	15.19
Ta	1.19	1.16	1.31	1.16	1.37	1.19	1.32
Sr	94.32	95.12	95.09	153.05	107.18	118.85	178.30
Zr	97.45	99.51	98.31	94.96	98.54	98.08	95.56
Hf	4.25	4.77	6.25	5.24	4.41	5.75	5.44
Y	6.28	3.67	5.40	6.27	4.37	7.03	5.98
Pb	15.84	14.72	26.22	10.67	19.51	22.72	13.20
Ga	16.04	15.59	15.66	13.80	15.46	15.38	15.77
Cs	1.62	1.94	2.16	1.46	2.02	2.02	16.80
La	25.49	11.98	22.46	27.91	12.27	28.93	31.10
Ce	55.12	31.77	64.84	47.49	34.99	66.65	58.17
Pr	5.10	2.36	4.46	5.41	2.24	5.34	5.77
Nd	15.67	7.14	13.78	16.56	7.00	16.17	15.66
Sm	2.20	1.05	2.05	2.44	1.11	2.33	1.92
Eu	0.44	0.29	0.42	0.46	0.42	0.46	0.34
Gd	2.08	0.97	1.98	2.22	1.09	2.31	1.94
Tb	0.24	0.11	0.22	0.24	0.14	0.25	0.23
Dy	1.23	0.68	1.09	1.16	0.83	1.25	1.12
Ho	0.25	0.15	0.22	0.23	0.18	0.25	0.23
Er	0.81	0.54	0.73	0.75	0.64	0.82	0.72

续表 1

样品号	S4013	S4017	S4038	S4047	S4049	S4073	S7038-1
Tm	0.14	0.11	0.13	0.13	0.13	0.14	0.12
Yb	1.03	0.83	0.94	0.96	0.93	1.04	0.91
Lu	0.16	0.12	0.15	0.15	0.13	0.16	0.15
δEu	0.63	0.86	0.62	0.60	1.15	0.59	0.53
Ce/Pb	3.48	2.16	2.47	4.45	1.79	2.93	4.41
Nb/Ta	12.03	12.40	11.10	11.88	10.15	12.29	11.51
Sr/Y	15.03	25.88	17.61	24.40	24.53	16.91	29.82
ΣREE	109.96	58.10	113.47	106.11	62.10	126.10	118.38
ΣLREE/ΣHREE	17.51	15.55	19.78	17.17	14.26	19.27	20.84
$(La/Yb)_N$	16.24	9.47	15.68	19.08	8.66	18.26	22.43

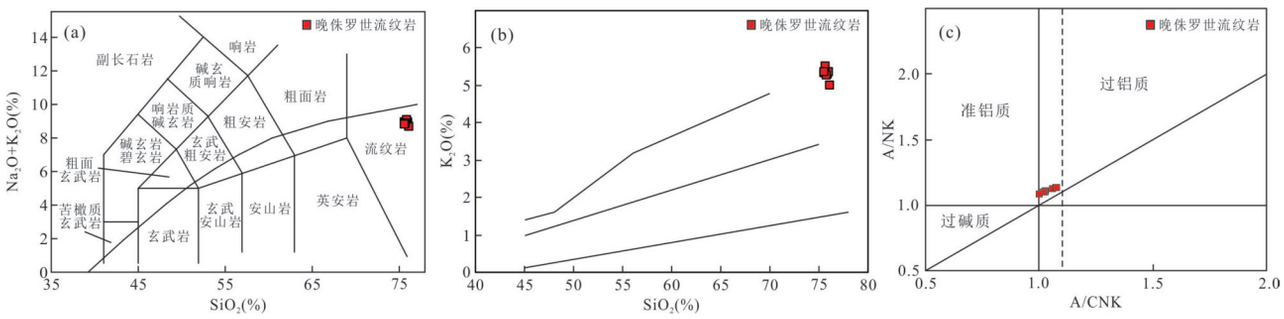

图 5　晚侏罗世流纹岩 TAS 图解(a,据 Irvine and Baragar, 1971),SiO_2—K_2O 图解(b,据 Peccerillo and Taylor, 1976)和 A/CNK—A/NK 图解(c, Maniar and Piccoli, 1989)

Fig. 5　TAS (a, after Irvine and Baragar, 1971), SiO_2 versus K_2O (b, after Peccerillo and Taylor, 1976) and A/CNK versus ANK (c, after Maniar and Piccoli, 1989) diagrams of the Late Jurassic rhyolites

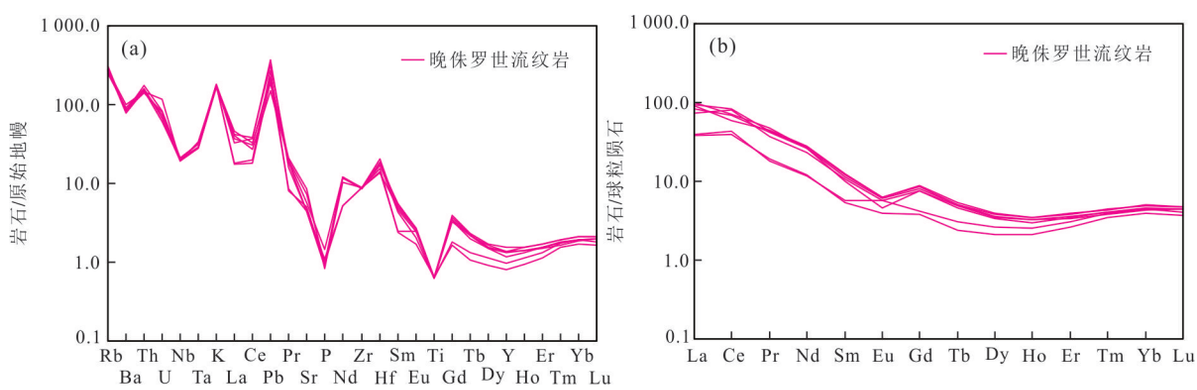

图 6　晚侏罗世流纹岩原始地幔标准化微量元素蛛网图(a)和球粒陨石标准化稀土元素配分图(b)

Fig. 6　Primitive mantle-normalized trace element spidergrams (a) and chondrite-normalized REE patterns (b) of the Late Jurassic rhyolites

图 a 据 Sun and McDonough(1989);图 b 据 Boynton(1984)

样品的稀土元素总量中等偏低(∑REE=58.10×10^{-6}~126.10×10^{-6}),在球粒陨石标准化稀土元素配分图中(图 6b),稀土元素配分模式整体右倾,轻重稀土分馏中等(∑LREE/∑HREE = 14.26~20.84; $(La/Yb)_N$=8.66~22.43),轻稀土元素富集,重稀土元素亏损.除 S4049 显示具有弱的 Eu 正异常外(δEu=1.15),其余样品均为明显的 Eu 负异常(δEu=0.53~0.86).在微量元素组成上(图 6a),流纹岩样品相对富集大离子亲石元素(LILEs: Rb、Ba、Pb、K 等),而相对亏损 Nb、Ta、Sr、P、Ti 等

高场强元素(HFSEs).

4.3 Hf同位素组成

本文对研究区3件流纹岩(S4047,S4049,S4073)样品中部分锆石进行了原位Hf同位素组成分析,测试结果见附表2.

3件流纹岩样品锆石$^{206}Pb/^{238}U$年龄虽有差别,但其Hf同位素具有相似的地球化学特征.样品S4047(t=159 Ma)中代表结晶年龄的10颗锆石$^{176}Hf/^{177}Hf$比值为0.282 055~0.282 176,以其结晶年龄计算得到的$\varepsilon_{Hf}(t)$值为−22.3~−17.8,二阶段模式年龄(T_{DM2})介于2 334~2 610 Ma.样品S4049中14颗代表岩石结晶年龄(t=160 Ma)的岩浆成因锆石$^{176}Hf/^{177}Hf$比值为0.282 008~0.282 131,$\varepsilon_{Hf}(t)$=−21.7~−19.4,T_{DM2}=2 430~2 697 Ma.样品S4073(t=154 Ma)中10颗岩浆成因锆石$^{176}Hf/^{177}Hf$比值为0.282 030~0.282 148,以其结晶年龄计算得到$\varepsilon_{Hf}(t)$=−23.2~−18.8,T_{DM2}=2 391~2 663 Ma.

5 讨论

5.1 火山岩形成时代

华北克拉通先后受到了古亚洲洋构造域、蒙古−鄂霍茨克洋构造域及古太平洋构造域的相互作用影响,在华北北缘燕山−辽西地区发育了大面积的岩浆岩,并具有多期构造−岩浆活动叠加的特点(Gao *et al.*, 2004; 马强, 2013; Song *et al.*, 2021).出露的大规模中生代火山岩可划分为4期:早侏罗世(兴隆沟组或南大岭期)、晚侏罗世(蓝旗组或髫髻山组)、早白垩世(义县期或张家口期)和晚白垩世(大兴庄期)(Yang and Li, 2008; 马强, 2013).其中,晚侏罗世中酸性火山岩岩石组合主要以粗安岩、粗面岩、粗面英安岩、流纹岩以及少量火山碎屑岩为主,出露于金岭寺−羊山盆地和寺儿堡−白塔盆地内.

寺儿堡−白塔盆地原被认为是白垩纪盆地,主要发育早白垩世义县组火山岩(辽宁省地质矿产局, 1989).但本次通过详细的野外地质调查和锆石U-Pb同位素年代学分析发现盆地内具有两套不同时期的火山岩,大部分火山岩形成于晚侏罗世,其时代与髫髻山(蓝旗)组火山岩相近,而早白垩世火山岩仅在盆地南缘的尖山−老滩地区出露.本次对盆地内白塔满族乡附近的3件流纹岩样品进行锆石U-Pb年代学分析,样品中锆石颗粒均呈自形−半自形粒状或椭圆状,发育有典型的岩浆振荡环带,Th/U比值(0.03~3.23)较高,暗示锆石为岩浆成因.因此,经原位U-Pb同位素测试分析得到的年龄即为火山岩的结晶年龄,其结果显示白塔地区流纹岩形成于153.8~160.3 Ma,即晚侏罗世.此外,在野外可见该套火山岩与上覆土城子组砂砾岩具有明显的不整合接触关系,火山岩中包含有晚侏罗世的凝灰岩和翼龙化石.因此,本文认为该火山岩应该为晚侏罗世火山岩,与区域上已发现的中酸性火山岩和花岗质岩石结晶年龄基本一致(马强和郑建平, 2009; 崔芳华等, 2020).

5.2 岩石成因及源区特征

主微量元素数据和锆石Hf同位素组成是探讨岩浆源区性质的可靠手段.辽西地区晚侏罗世酸性火山岩具有较高的SiO_2、Al_2O_3和全碱含量,较低的MgO(<0.20%)、Cr、Co、Ni含量(Cr、Co、Ni平均值为4.96×10^{-6}、0.79×10^{-6}、1.78×10^{-6}),结合低Ce/Pb值(1.79~4.45),说明岩浆起源于地壳物质的部分熔融(Zhang *et al.*, 2018).中等偏高的Th、U、Sr含量和K、Pb正异常及P、Ti负异常,暗示着岩浆在上升过程中可能遭受了中上地壳的混染作用(马强, 2013).流纹岩属于高钾钙碱性系列,显示准铝质−过铝质特征.大离子亲石元素(LILEs:Rb、Ba、Pb、K等)和轻稀土元素(LREEs)相对富集,高场强元素(HFSEs:Nb、Ta、Sr、P、Ti等)和重稀土元素(HREEs)相对亏损,并具有Eu负异常、Sr弱正异常或无异常的特点,暗示岩浆起源于正常深部陆壳的部分熔融.整体上,晚侏罗世流纹岩轻重稀土分异程度中等($(La/Yb)_N$=8.66~22.43;∑LREE/∑HREE=14.26~20.84),稀土元素总量不高(58.10×10^{-6}~126.10×10^{-6}),明显低于同时期的中基性火山岩.辽西地区晚侏罗世中基性火山岩主要为埃达克质岩石,具有比晚侏罗世流纹岩更强的轻重稀土元素分馏和更高的MgO(>1.00%)、Sr(>400×10^{-6})含量,一般表现出不明显的Eu负异常或具有Eu正异常(Yang and Li, 2008; 马强, 2013).因此,晚侏罗世流纹岩不可能是中性岩浆直接分异结晶的产物.本次研究中除样品S4049外,其余样品均表现出明显的Eu负异常,具有低Sr含量、Ti和重稀土元素亏损的特点,Er和Dy之间具有明显的线性关系(图7a),表明其经历了斜长石和角闪石的分离结晶作用.在火山岩Rb/Y−Nb/Y图解中(图7b),流纹岩具有部分熔融程度增加的趋势,说明酸性岩浆曾经历明显的部分熔融过程,后期则以斜长

石、角闪石等矿物的分离结晶作用为主.

流纹岩相对富集Rb、Ba、K等大离子亲石元素，亏损Nb、Ta、Ti、Th、U等高场强元素，明显的Pb正异常和P负异常，结合低Nb/Ta值(10.2～12.4；古老地壳值为11；Sun and McDonough，1989)，暗示其源区可能为古老的下地壳，这在流纹岩锆石Hf同位素组成上也有体现(图8).虽然3件流纹岩样品锆石年龄值略有不同，但其Hf同位素具有相似的地球化学特征.锆石具有明显的负$\varepsilon_{Hf}(t)$值(－17.8～－23.2)和古老的Hf同位素二阶段模式年龄(T_{DM2}=2 334～2 699 Ma)，与区域上中酸性火山岩和花岗质岩石相似，均表现出富集Hf同位素特点(马强和郑建平，2009；马强等，2013；崔芳华等，2020；薛吉祥等，2020).本次研究结果在Hf同位素相关图解中分别落入2.5 Ga地壳演化线和下地壳区域内(图8)，指示其岩浆源区应为太古代或元古代的古老下地壳的部分熔融.结合岩石中高的SiO_2、Th、U和重稀土含量及低Sr/Y值，指示岩浆可能是由下地壳中上部长英质麻粒岩或片麻岩部分熔融形成，再经历斜长石、角闪石等矿物的分离结晶作用，最后喷发至地表形成流纹岩.

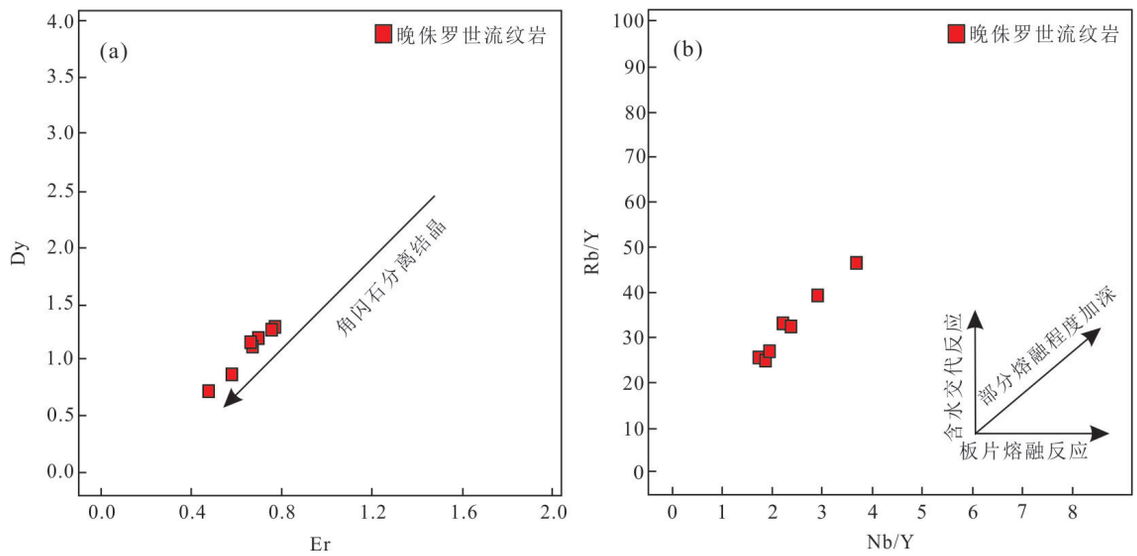

图7　晚侏罗世酸性火山岩Er—Dy和Nb/Y—Rb/Y图解

Fig. 7　The Er vs. Dy and Nb/Y vs. Rb/Y diagrams for the Late Jurassic acidic volcanic rocks

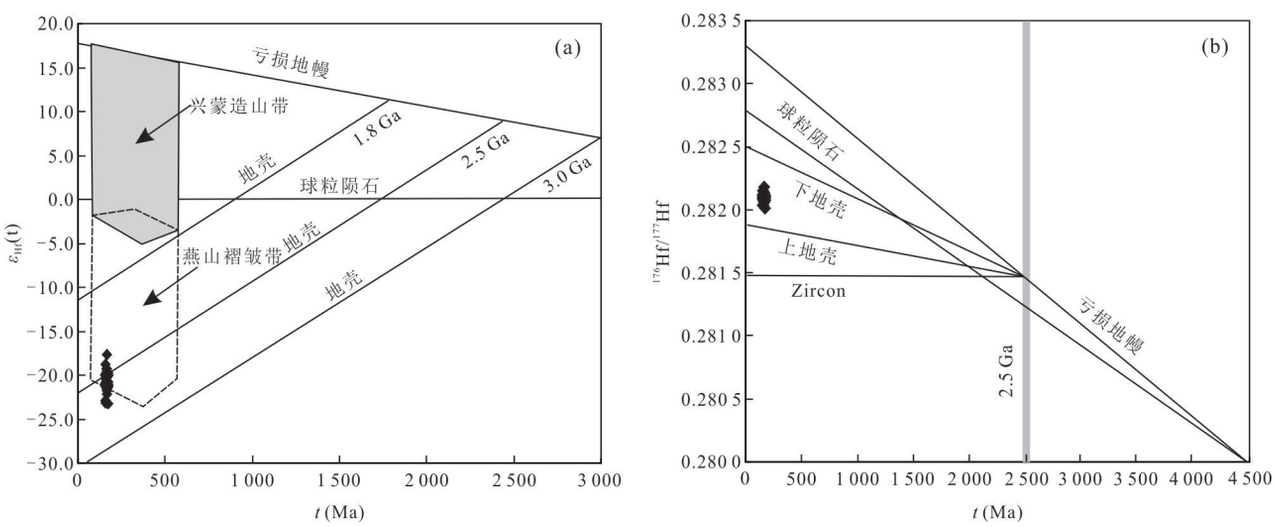

图8　辽西寺儿堡—白塔盆地晚侏罗世流纹岩的锆石Hf同位素特征

Fig. 8　Zircon Hf isotopic characteristics of the Late Jurassic rhyolites in Sierbao-Baita basin, West Liaoning

图a据Yang *et al*.(2006)；图b据吴福元等(2007)

5.3　华北克拉通北缘晚侏罗世的构造演化及其对燕山运动的响应

华北克拉通自晚古生代以来先后受到了古亚洲洋、蒙古－鄂霍茨克洋和古太平洋等多构造体系的叠加影响，是研究燕山运动、岩石圈减薄和克拉通破坏的重要地区之一（赵越等，2004；Zhu *et al.*，2018）.侏罗纪是燕山运动构造体制转换的关键时期（赵越等，2004），燕山地区经历了强烈的构造变形和岩浆活动，并发育了大规模北东－北北东向火山－沉积断陷盆地（Liang *et al.*，2015a，2015b）.辽西地区位于燕山造山带的东段，出露有大面积的中－晚侏罗世火山岩，与区域上中生代火山岩和花岗质岩石呈现一致的北东向展布方向.晚侏罗世流纹岩具有与活动大陆边缘岩浆岩相似的地球化学特征（Pitcher，1997），显示高钾钙碱性和准铝质－过铝质特点，P_2O_5含量极低（0.02%～0.03%），属于I型流纹岩（图9；Pitcher，1997）.在相关的构造判别图解中样品分别落在岛弧花岗岩（图10a，10b）和活动大陆边缘区域（图10c，10d），与同时期的花岗质岩石基本一致（Hu *et al.*，2019；崔芳华等，2020），共同显示强烈的Nb、Ta亏损，暗示它们应形成于相同的构造环境，即与俯冲相关的活动大陆边缘构造环境.

目前大多数学者认为，燕山地区早白垩世岩浆岩形成于与古太平洋板块俯冲相关的伸展背景下（Sun *et al.*，2007；崔芳华等，2020；Fan *et al.*，2021），但对晚侏罗世岩浆岩的成因及其构造背景仍存在较大争议.部分学者将燕山地区晚侏罗世的岩浆活动联系于蒙古－鄂霍茨克洋消减闭合的远程效应（张长厚等，2004；赵越等，2004）、古太平洋的俯冲（Wang *et al.*，2015），或者两者的叠加影响（马强，2013；Dong *et al.*，2015）.最新的古地磁资料表明，在晚侏罗世时华北克拉通与西伯利亚之间相距1 600 km（Ren *et al.*，2016；Wang *et al.*，2018），并且在燕山地区未发现较大规模的南北向岩浆活动.因此，蒙古－鄂霍茨克洋的消减闭合可能对燕山地区晚侏罗世的岩浆活动起到推动作用，但绝不是引起辽西地区构造岩浆活动的必要条件.燕山地区晚侏罗世岩浆活动仅次于早白垩世，空间上，晚侏罗世火山岩和早白垩世火山岩分别位于燕－辽火山岩带的东南侧和西北侧，整体表现出火山活动随时间由南东向北西迁移的趋势（Dong *et al.*，2018）.并且，辽西地区晚侏罗世火山岩及同时期花岗质岩石的展布方向与古太平洋俯冲带方向近乎平行，均呈NE向（崔芳华等，2020），暗示区域上晚侏罗世岩浆活动可能与古太平洋板块的俯冲有关.Hu *et al.*（2019）提出辽西兴城地区晚侏罗世花岗岩形成于古太平洋板块俯冲的挤压环境.辽西凌源蓝旗组火山岩（166～153 Ma）及台里地区晚侏罗世ENE向花岗质糜棱岩带的形成也与古太平洋板块的俯冲相关（马强，2013；Liang *et al.*，2015a，2015b）.除广泛分布的岩浆岩外，华北北缘发育有大规模的晚侏罗世逆冲构造，例如大青山逆冲推覆构造带（～170 Ma），十三陵冲断褶皱构造（161～141 Ma）以及四合堂逆冲推覆构造（148～143 Ma）等（Davis *et al.*，2001；张长厚等，2004；Dong *et al.*，2018）.燕山地区则以承德逆冲断层为代表（Dong *et al.*，2018），这些广泛发育代表挤压的变形样式暗示着区域处于古太平洋板块俯冲引起的挤压环境.因此，辽西寺儿堡－白塔盆地的晚侏罗世

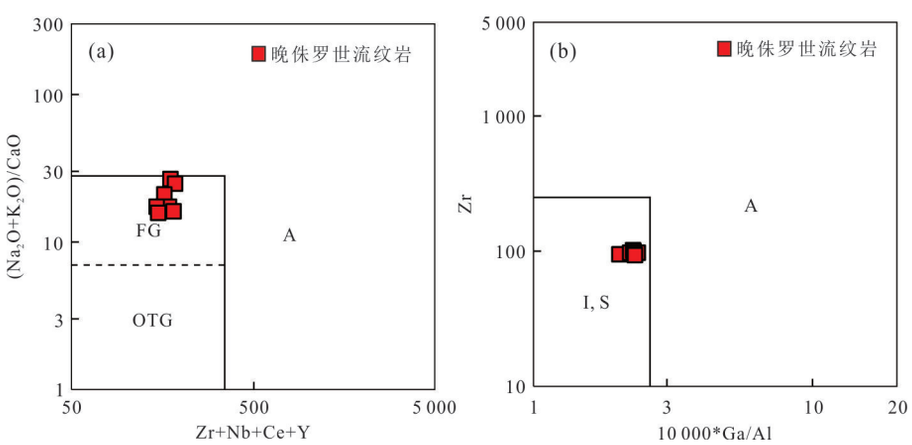

图9　晚侏罗世酸性火山岩岩石成因类型判别图解（据Whalen *et al.*，1987）

Fig. 9　Genetic discrimination diagrams for the Late Jurassic acidic volcanic rocks (after Whalen *et al.*, 1987)

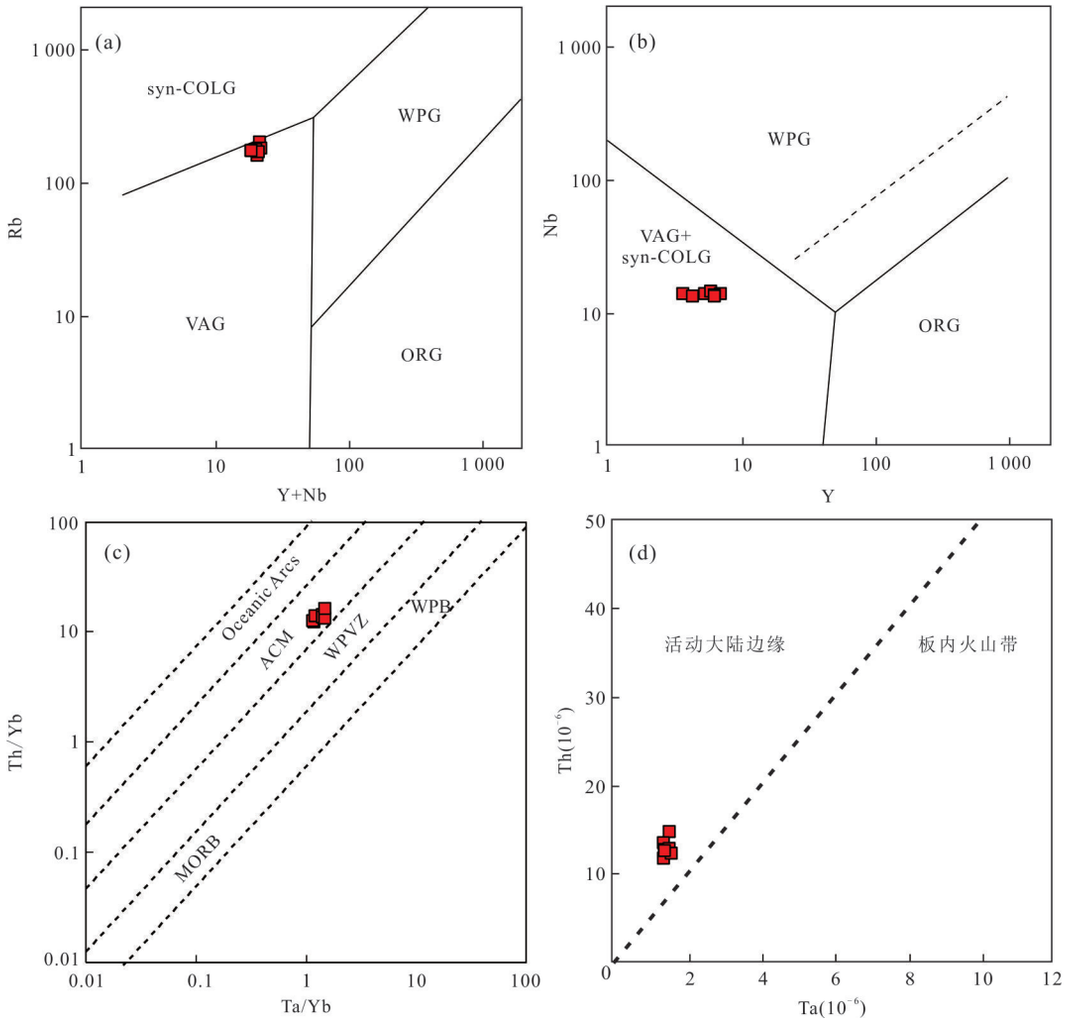

图 10　晚侏罗世酸性火山岩构造环境判别图解

Fig. 10　Tectonic discrimination diagrams for the Late Jurassic acidic volcanic rocks

图例与图 9 一致；图 a 据 Pearce *et al*.(1984)；图 b 据 Schandl and Gorton(2002)

火山岩具有与活动大陆边缘岩浆岩相似的地球化学特征，形成于古太平洋板块俯冲的北西向挤压构造环境．这为确定辽西地区晚侏罗世中酸性火山岩的成因提供了更有利的证据．晚侏罗世古太平洋板块向欧亚大陆的斜向俯冲脱水扰动了燕山地区的岩石圈地幔，使其部分熔融形成幔源岩浆，幔源岩浆底侵古老下地壳并加热下地壳，造成下地壳不同层次的部分熔融，持续的底侵作用导致下地壳中上部长英质麻粒岩或片麻岩部分熔融，在经历斜长石、角闪石等矿物的分离结晶后形成流纹岩岩浆．

目前已有的区域资料表明古太平洋板块的俯冲和后撤作用是引起燕山运动构造体制发生重大转变的主要原因（赵越等，2004；Mercier *et al*.，2007；Zhu *et al*.，2012；Wang *et al*.，2018；Hu *et al*.，2019），但对后撤作用的初始时间依旧存在不同的认识，例如～145 Ma（Zheng *et al*.，2018；Zhu and Xu，2019）、～135 Ma（Mercier *et al*.，2007；Zhu *et al*.，2012）以及～100 Ma 等．燕山地区晚侏罗世火山岩 SiO_2 含量变化范围较大，主要为一套中酸性岩石组合，火山岩地球化学组成多变，成因呈多样化，单一的成岩模式很难解释，这可能是由燕山地区壳幔结构不均一导致的，与区域上构造体制转变密切相关（Yang and Li，2008；马强，2013）．本次在寺儿堡—白塔盆地识别出晚侏罗世火山岩形成于活动大陆边缘构造背景，与下伏地层呈角度不整合接触，其北东向展布与古太平洋板块俯冲方向正交，暗示其可能处于古太平洋板块俯冲的北西向挤压构造环境．但同时期金岭寺—羊山盆地出露的火山岩则为碱性岩石系列，暗示着区域上伸展体系的存在．辽西医巫闾山地区保存有明显的晚侏罗世伸

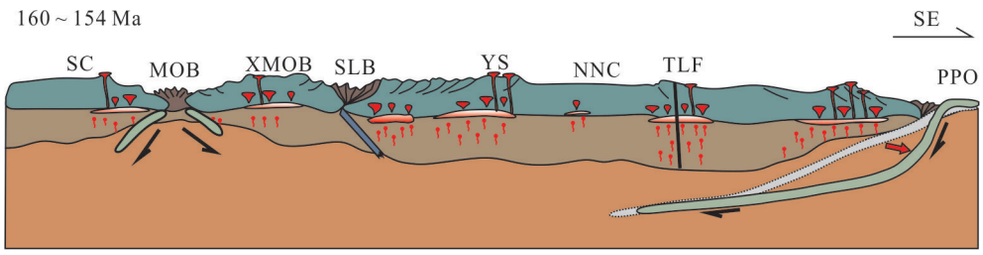

图11　华北克拉通北缘晚侏罗世构造演化(据马强,2013修改)

Fig. 11　Tectonic evolution of the northern North China craton during the Late Jurassic (modified after Ma, 2013)

SC.西伯利亚克拉通;MOB.蒙古—鄂霍茨克缝合带;XMOB.兴蒙造山带;SLB.索伦—林西缝合带;YS.燕山造山带;NCC.华北克拉通;TLF.郯庐断裂;PPO.古太平洋

展构造形迹,其邻区存在双峰式火山岩侵位(李刚等, 2013;梁琛岳等, 2016).同时,花岗岩磁组构资料指出燕山地区晚侏罗世碱厂岩体和四干顶岩体的侵位受控于古太平洋板块俯冲引起的区域伸展(Lin *et al.*, 2021).燕山地区除广泛分布的火山岩外,还存在着大量的晚侏罗世变质核杂岩和伸展盆地(梁琛岳等, 2016; Lin *et al.*, 2021),例如:辽西大红旗断陷盆地、后城盆地(160～152 Ma; 邵济安等, 2003)以及下板城盆地等(160～153 Ma; Davis *et al.*, 2001; Lin *et al.*, 2021).晚侏罗世(160～150 Ma)是华北克拉通中生代变质核杂岩发育的高峰期之一(Dong *et al.*, 2018; Hu *et al.*, 2019).辽西医巫闾山晚侏罗世伸展变形、台里韧性剪切带以及片麻状花岗岩体中矿物之间的破碎具有明显定向,均暗示着区域上存在伸展体系(许文良等, 2004; Liang *et al.*, 2015a, 2015b; 梁琛岳等, 2016).综上所述,燕山—辽西地区出露的大规模晚侏罗世中酸性火山岩、花岗质岩石及逆冲构造形成于古太平洋板块俯冲的挤压构造环境,局部变质核杂岩、侵入岩体与沉积盆地受区域伸展体系控制,暗示着燕山—辽西地区构造体制于晚侏罗世(153.8～160.3 Ma)发生转变,由挤压体系逐渐过渡为伸展体系,为燕山运动的局部响应(图11).

6　结论

(1)最新锆石U-Pb年代学结果表明寺儿堡—白塔盆地除早白垩世火山岩外,还发育有大规模的晚侏罗世火山岩,成岩时代为153.8～160.3 Ma,空间上呈NE向展布.

(2)晚侏罗世流纹岩具有与活动大陆边缘岩浆岩相似的地球化学特征,岩浆成因锆石显示负的$\varepsilon_{Hf}(t)$值(−17.8～−23.2)和古老的Hf同位素二阶段模式年龄(T_{DM2}=2 334～2 697 Ma),暗示初始岩浆来源于太古代或元古代的古老下地壳的部分熔融,形成于古太平洋板块俯冲的北西向挤压构造背景.

(3)晚侏罗世燕山—辽西地区受古太平洋板块俯冲后撤作用的影响构造体制发生转变,由挤压体系逐渐过渡为伸展体系,为燕山运动的局部响应.

致谢:对吉林大学东北亚矿产资源评价自然资源部重点实验室在锆石U-Pb测试方面给予的支持表示感谢.感谢吉林大学地球科学学院苟军老师在地球化学分析方面给予的帮助.同时,特别感谢3位匿名审稿专家对本文提出的宝贵修改意见.

附表见本刊官网(http://www.earth-science.net).

References

Boynton, W. V., 1984. Cosmochemistry of the Rare Earth Elements: Meteorite Studies. Rare Earth Element Geochemistry. Elsevier, Amsterdam, 63—114. https://doi.org/10.1016/b978-0-444-42148-7.50008-3

Bureau of Geology and Mineral Resources of Liaoning Province, 1989. Regional Geology of Liaoning Province. Geological Publishing House, Beijing, 438—460 (in Chinese).

Cui, F.H., 2015. Genesis and Crustal Evolution of Mesozoic Granitic Rocks in Xingcheng Area, Western Liaoning Province (Dissertation). Jilin University, Changchun(in Chinese with English abstract).

Cui, F.H., Xu, X.C., Zheng, C.Q., et al., 2020. 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. *Acta Petrologica Sinica*, 36(8): 2463—2492 (in Chinese with English abstract).

Dai, L.M., Li, S.Z., Li, Z.H., et al., 2018. Dynamics of

Exhumation and Deformation of HP-UHP Orogens in Double Subduction-Collision Systems: Numerical Modeling and Implications for the Western Dabie Orogen. *Earth-Science Reviews*, 182: 68—84. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.05.005

Davis, G. A., Zheng, Y. D., Wang, C., et al., 2001. Mesozoic Tectonic Evolution of the Yanshan Fold and Thrust Belt, with Emphasis on Hebei and Liaoning Provinces, Northern China. *Memoir of the Geological Society of America*, 194: 171—197. https://doi.org/10.1130/0-8137-1194-0.171

Dong, S. W., Zhang, Y. Q., Li, H. L., et al., 2018. The Yanshan Orogeny and Late Mesozoic Multi-Plate Convergence in East Asia—Commemorating 90th Years of the "Yanshan Orogeny". *Science China Earth Sciences*, 61(12): 1888—1909. https://doi.org/10.1007/s11430-017-9297-y

Dong, S.W., Zhang, Y.Q., Zhang, F.Q., et al., 2015. Late Jurassic-Early Cretaceous Continental Convergence and Intracontinental Orogenesis in East Asia: A Synthesis of the Yanshan Revolution. *Journal of Asian Earth Sciences*, 114: 750—770. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2015.08.011

Fan, W. B., Jiang, N., Zhai, M. G., et al., 2021. Origin of the Low $\delta^{18}O$ Signals in Zircons from the Early Cretaceous A-Type Granites in Eastern China: Evidence from the Kulongshan Pluton. *Journal of Earth Science*, 32(6): 1415—1427. https://doi.org/10.1007/s12583-021-1515-y

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

Hu, P.Y., Liang, C.Y., Zheng, C.Q., et al., 2019. Tectonic Transformation and Metallogenesis of the Yanshan Movement during the Late Jurassic Period: Evidence from Geochemistry and Zircon U-Pb Geochronology of the Adamellites in Xingcheng, Western Liaoning, China. *Minerals*, 9(9): 518. https://doi.org/10.3390/min9090518

Hu, Z.C., Liu, Y.S., Gao, S., et al., 2012. A "Wire" Signal Smoothing Device for Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry Analysis. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 78: 50—57. https://doi.org/10.1016/j.sab.2012.09.007

Irvine, T. N., Baragar, W. R. A., 1971. A Guide to the Chemical Classification of the Common Volcanic Rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8(5): 523—548. https://doi.org/10.1139/e71-055

Li, G., Liu, Z.H., Li, Y.F., et al., 2013. Strain and Kinematic Vorticity Analysis of the Ductile Shear Zone in Yiwulüshan Area, Western Liaoning Province. *Geological Bulletin of China*, 32(2): 408—423(in Chinese with English abstract).

Li, Z. H., Dong, S. W., Qu, H. J., 2014. Timing of the Initiation of the Jurassic Yanshan Movement on the North China Craton: Evidence from Sedimentary Cycles, Heavy Minerals, Geochemistry, and Zircon U-Pb Geochronology. *International Geology Review*, 56(3): 288—312. https://doi.org/10.1080/00206814.2013.855013

Liang, C.Y., Liu, Y.J., Li, W.M., et al., 2016. Ductile Deformation and Rock Rheological Characteristics from Southern Yiwulüshan Metamorphic Core Complex. *Acta Petrologica Sinica*, 32(9): 2656—2676(in Chinese with English abstract).

Liang, C.Y., Liu, Y.J., Neubauer, F., et al., 2015a. Structures, Kinematic Analysis, Rheological Parameters and Temperature-Pressure Estimate of the Mesozoic Xingcheng-Taili Ductile Shear Zone in the North China Craton. *Journal of Structural Geology*, 78: 27—51. https://doi.org/10.1016/j.jsg.2015.06.007

Liang, C.Y., Liu, Y.J, Neubauer, F., et al., 2015b. Structural Characteristics and LA-ICP-MS U-Pb Zircon Geochronology of the Deformed Granitic Rocks from the Mesozoic Xingcheng-Taili Ductile Shear Zone in the North China Craton. *Tectonophysics*, 650: 80—103. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2014.05.010

Liang, C.Y., Liu, Y.J., Song, Z.W., et al., 2020. Deformation Pattern and Age of Hulin Complex in Heilongjiang Province: Implications for Subduction of the Palaeo-Pacific Plate during the Early Cretaceous, Eastern NE China. *Acta Petrologica Sinica*, 36(3): 685—702(in Chinese with English abstract).

Lin, W., Zeng, J. P., Meng, L. T., et al., 2021. Extensional Tectonics and North China Craton Destruction: Insights from the Magnetic Susceptibility Anisotropy (AMS) of Granite and Metamorphic Core Complex. *Science China Earth Sciences*, 64(9): 1557—1589. https://doi.org/10.1007/s11430-020-9754-1

Ludwig, K. R., 2003. User's Manual for Isoplot 3.6: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center, Berkeley.

Ma, Q., 2013. Triassic-Jurassic Volcanic Rocks in Western Liaoning: Lower Crustal Reconstruction and Craton De-

struction in the Eastern Part of Northern Margin of North China (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).

Ma, Q., Zheng, J.P., 2009. In-Situ U-Pb Dating and Hf Isotopic Analyses of Zircons in the Volcanic Rock of the Lanqi Formation in the Beipiao Area, Western Liaoning Province. *Acta Petrologica Sinica*, 25(12): 3287−3297 (in Chinese with English abstract).

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)1010635: tdog>2.3.co;2

Meng, Q.R., 2003. What Drove Late Mesozoic Extension of the Northern China-Mongolia Tract? *Tectonophysics*, 369(3/4): 155−174. https://doi.org/10.1016/S0040-1951(03)00195-1

Mercier, J. L., Hou, M. J., Vergely, P., et al., 2007. Structural and Stratigraphical Constraints on the Kinematics History of the Southern Tan-Lu Fault Zone during the Mesozoic Anhui Province, China. *Tectonophysics*, 439(1−4): 33−66. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2007.03.001

Pearce, J. A., Harris, N. B. W., Tindle, A. G., 1984. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956−983. https://doi.org/10.1093/petrology/25.4.956

Peccerillo, A., Taylor, S. R., 1976. Geochemistry of Eocene Calc-Alkaline Volcanic Rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63−81. https://doi.org/10.1007/BF00384745

Pitcher, W.S., 1997. The Nature and Origin of Granite(2nd Edition). Chapman and Hall, London.

Ren, Q., Zhang, S. H., Wu, H. C., et al., 2016. Further Paleomagnetic Results from the ~155 Ma Tiaojishan Formation, Yanshan Belt, North China, and Their Implications for the Tectonic Evolution of the Mongol-Okhotsk Suture. *Gondwana Research*, 35: 180−191. https://doi.org/10.1016/j.gr.2015.05.002

Schandl, E. S., Gorton, M. P., 2002. Application of High Field Strength Elements to Discriminate Tectonic Settings in VMS Environments. *Economic Geology*, 97(3): 629−642. https://doi.org/10.2113/gsecongeo.97.3.629

Shao, J.A., Meng, Q.R., Wei, H.Q., et al., 2003. Nature and Tectonic Environment of Late Jurassic Volcanic-Sedimentary Basins in Northwestern Hebei Province. *Geological Bulletin of China*, 22(10): 751−761(in Chinese with English abstract).

Song, Y., Xu, X.C., Zheng, C.Q., et al., 2018. Petrology, Isotopic Geochronology and Geochemistry of Jurassic Volcanic Rocks in Baita Area, Western Liaoning. *Global Geology*, 37(1): 70−87(in Chinese with English abstract).

Song, Z. W., Zheng, C. Q., Liang, C. Y., et al., 2021. Identification and Geological Significance of Early Jurassic Adakitic Volcanic Rocks in Xintaimen Area, Western Liaoning. *Minerals*, 11(3): 331. https://doi.org/10.3390/min11030331

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

Sun, W.D., Ding, X., Hu, Y.H., et al., 2007. The Golden Transformation of the Cretaceous Plate Subduction in the West Pacific. *Earth and Planetary Science Letters*, 262(3−4): 533−542. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.08.021

Tang, J., Xu, W. L., Wang, F., et al., 2018. Subduction History of the Paleo-Pacific Slab beneath Eurasian Continent: Mesozoic-Paleogene Magmatic Records in Northeast Asia. *Science China Earth Sciences*, 61(5): 527−559. https://doi.org/10.1007/s11430-017-9174-1

Wang, Y., Sun, L. X., Zhou, L. Y., et al., 2018. Discussion on the Relationship between the Yanshanian Movement and Cratonic Destruction in North China. *Science China Earth Sciences*, 61(5): 499−514. https://doi.org/10.1007/s11430-017-9177-2

Wang, Y., Zhou, L. Y., Luo, Z. H., 2017. Kinematics and Timing of Continental Block Deformation from Margins to Interiors. *Terra Nova*, 29(4): 253−263. https://doi.org/10.1111/ter.12272

Wang, Y., Zhou, L. Y., Zhao, L. J., et al., 2015. Tectonic Transformations in the North of Eastern China during 170−150 Ma: Causal Linkage to the Rapid Formation of the Paleo-Pacific Plate. *Geological Society of America*, 561−587. https://doi.org/10.1130/2015.2513(18)

Whalen, J. B., Currie, K. L., Chappell, B. W., 1987. A-Type Granites: Geochemical Characteristics, Discrimination and Petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407−419. https://doi.org/10.1007/BF00402202

Wong, W.H., 1926. Crustal Movement in Eastern China. In

Proceeding of the 3th Pan-Pacific Scientific Congress, 1: 265—285.

Wong, W. H., 1927. Crustal Movements and Igneous Activities in Eastern China since Mesozoic Time.1. *Bulletin of the Geological Society of China*, 6(1): 9—37. https://doi.org/10.1111/j.1755-6724.1927.mp6001002.x

Wu, F. Y., Li, X.H., Zheng, Y.F., et al., 2007. Lu-Hf Isotopic Systematics and Their Applications in Petrology. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185—220(in Chinese with English abstract).

Xu, W.L., Wang, Q.H., Wang, D.Y., et al., 2004. Processes and Mechanism of Mesozoic Lithospheric Thinning in Eastern North China Craton: Evidence from Mesozoic Igneous Rocks and Deep-Seated Xenoliths. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 309—317(in Chinese with English abstract).

Xue, J.X., Liu, Z.H., Liu, J.X., et al., 2020. Geochemistry, Geochronology, Hf Isotope and Tectonic Significance of Late Jurassic Huangdi Pluton in Xiuyan, Liaodong Peninsula. *Earth Science*, 45(6): 2030—2043(in Chinese with English abstract).

Yang, J.H., Wu, F.Y., Shao, J.A., et al., 2006. Constraints on the Timing of Uplift of the Yanshan Fold and Thrust Belt, North China. *Earth and Planetary Science Letters*, 246(3/4): 336—352. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.04.029

Yang, J.H., Wu, F.Y., Wilde, S.A., 2003. A Review of the Geodynamic Setting of Large-Scale Late Mesozoic Gold Mineralization in the North China Craton: An Association with Lithospheric Thinning. *Ore Geology Reviews*, 23(3/4): 125—152. https://doi. org/10.1016/S0169-1368(03)00033-7

Yang, J. H., Wu, F. Y., Wilde, S. A., et al., 2008. Mesozoic Decratonization of the North China Block. *Geology*, 36(6): 467—470. https://doi.org/10.1130/g24518a.1

Yang, W., Li, S., 2008. Geochronology and Geochemistry of the Mesozoic Volcanic Rocks in Western Liaoning: Implications for Lithospheric Thinning of the North China Craton. *Lithos*, 102(1/2): 88—117. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.09.018

Zhang, B. H., Zhang, J., Qu, J. F., et al., 2021. Lüliangshan: A Mesozoic Basement Involved Fold System in the Central North China Craton. *Earth Science*, 46(7): 2423—2448(in Chinese with English abstract).

Zhang, C.H., Wu, G.G., Xu, D.B., et al., 2004. Mesozoic Tectonic Framework and Evolution in the Central Segment of the Intraplate Yanshan Orogenic Belt. *Geological Bulletin of China*, 23(9): 864—875(in Chinese with English abstract).

Zhang, Y.T., Sun, F.Y., Wang, S., 2018. Geochronology and Geochemistry of Late Jurassic to Early Cretaceous Granitoids in the Northern Great Xing'an Range, NE China: Petrogenesis and Implications for Late Mesozoic Tectonic Evolution. *Lithos*, 312/313: 171—185. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.05.006

Zhang, Z. K., Ling, M. X., Lin, W., et al., 2020. "Yanshanian Movement" Induced by the Westward Subduction of the Paleo-Pacific Plate. *Solid Earth Sciences*, 5(2): 103—114. https://doi. org/10.1016/j.sesci.2020.04.002

Zhao, G. C., Cawood, P. A., Li, S. Z., et al., 2012. Amalgamation of the North China Craton: Key Issues and Discussion. *Precambrian Research*, 222/223: 55—76. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2012.09.016

Zhao, G. C., Sun, M., Wilde, S. A., et al., 2005. Late Archean to Paleoproterozoic Evolution of the North China Craton: Key Issues Revisited. *Precambrian Research*, 136(2): 177—202. https://doi. org/10.1016/j. precamres.2004.10.002

Zhao, W. C., 2015. Mesozoic Tectonic Deformation Sequence in Yaowangmiao Area of Jianchang, Southern Liaoning Province and Its Significance (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing(in Chinese with English abstract).

Zhao, Y., Xu, G., Zhang, S. H., et al., 2004. Yanshanian Movement and Conversion of Tectonic Regimes in East Asia. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 319—328(in Chinese with English abstract).

Zheng, Y. F., Xu, Z., Zhao, Z. F., et al., 2018. Mesozoic Mafic Magmatism in North China: Implications for Thinning and Destruction of Cratonic Lithosphere. *Science China Earth Sciences*, 61(4): 353—385. https://doi.org/10.1007/s11430-017-9160-3

Zhu, G., Liu, C., Gu, C. C., et al., 2018. Oceanic Plate Subduction History in the Western Pacific Ocean: Constraint from Late Mesozoic Evolution of the Tan-Lu Fault Zone. *Science China Earth Sciences*, 61(4): 386—405. https://doi.org/10.1007/s11430-017-9136-4

Zhu, R. X., Xu, Y. G., 2019. The Subduction of the West Pacific Plate and the Destruction of the North China Craton. *Science China Earth Sciences*, 62(9): 1340—1350. https://doi.org/10.1007/s11430-018-9356-y

Zhu, R. X., Xu, Y. G., Zhu, G., et al., 2012. Destruction

of the North China Craton. *Science China Earth Sciences*, 55(10): 1565－1587. https://doi. org/10.1007/s11430-012-4516-y

附中文参考文献

崔芳华, 2015. 辽西兴城地区中生代花岗质岩石的成因与地壳演化(博士学位论文). 长春: 吉林大学.

崔芳华, 徐学纯, 郑常青, 等, 2020. 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质岩石的记录与启示. 岩石学报, 36(8): 2463－2492.

李刚, 刘正宏, 李永飞, 等, 2013. 辽西医巫闾山地区韧性剪切带的应变与运动学涡度. 地质通报, 32(2): 408－423.

梁琛岳, 刘永江, 李伟民, 等, 2016. 医巫闾山变质核杂岩南段韧性变形与流变特征. 岩石学报, 32(9): 2656－2676.

梁琛岳, 刘永江, 宋志伟, 等, 2020. 黑龙江虎林杂岩变形样式与时代: 对中国东北东部早白垩世古太平洋板块俯冲的启示. 岩石学报, 36(3): 685－702.

辽宁省地质矿产局, 1989. 辽宁省区域地质志. 北京: 地质出版社.

马强, 2013. 辽西三叠纪－侏罗纪火山岩:华北北缘东段下地壳再造与克拉通破坏(博士学位论文). 武汉: 中国地质大学.

马强, 郑建平, 2009. 辽西北票蓝旗组火山岩锆石U-Pb年龄和Hf同位素组成. 岩石学报, 25(12): 3287－3297.

邵济安, 孟庆任, 魏海泉, 等, 2003. 冀西北晚侏罗世火山－沉积盆地的性质及构造环境. 地质通报, 22(10): 751－761.

宋旸, 徐学纯, 郑常青, 等, 2018. 辽西白塔地区侏罗纪火山岩岩石学、同位素年代学与地球化学特征. 世界地质, 37(1): 70－87.

吴福元, 李献华, 郑永飞, 等, 2007. Lu-Hf同位素体系及其岩石学应用. 岩石学报, 23(2): 185－220.

许文良, 王清海, 王冬艳, 等, 2004. 华北克拉通东部中生代岩石圈减薄的过程与机制: 中生代火成岩和深源捕虏体证据. 地学前缘, 11(3): 309－317.

薛吉祥, 刘正宏, 刘杰勋, 等, 2020. 辽东岫岩晚侏罗世荒地岩体的地球化学、年代学与Hf同位素及构造意义. 地球科学, 45(6):2030－2043.

张北航, 张进, 曲军峰, 等, 2021. 吕梁山－华北克拉通中部中生代基底卷入褶皱系统. 地球科学, 46(7): 2423－2448.

张长厚, 吴淦国, 徐德斌, 等, 2004. 燕山板内造山带中段中生代构造格局与构造演化. 地质通报, 23(9): 864－875.

赵伟策, 2015. 辽西南部建昌药王庙一带中生代构造变形序列及其意义(硕士学位论文). 北京: 中国地质大学.

赵越, 徐刚, 张拴宏, 等, 2004. 燕山运动与东亚构造体制的转变. 地学前缘, 11(3): 319－328.