

# 华北中生代火山作用:对克拉通破坏深部过程和浅部响应的制约

马强<sup>1,2</sup>, 郭建芳<sup>1,2</sup>, 徐义刚<sup>2,3</sup>, 郑建平<sup>1</sup>

1. 中国地质大学(武汉)地球科学学院,地质过程与矿产资源国家重点实验室,武汉 430074; 2. 南方海洋科学与工程广东省实验室,广州 511458; 3. 中国科学院广州地球化学研究所,同位素地球化学国家重点实验室,广州 510640

**摘要:**强烈的晚中生代火山活动是华北克拉通破坏的重要表现形式之一。本文对华北中生代火山作用的时空分布、不同时空背景下火山岩的性质与岩浆起源进行了综述,讨论了火山作用与克拉通破坏深部动力学过程和浅表系统之间的联系,主要认识包括:(1)华北中生代时期经历了5期火山活动,其中中晚侏罗世和早白垩世火山活动最为强烈,与克拉通破坏过程关系最为密切;(2)中晚侏罗世火山活动自海沟向内陆迁移,岩石组合、化学成分和同位素组成较为均一,是古太平洋板块俯冲前端位置上覆的古老大陆地壳和岩石圈地幔部分熔融的产物;早白垩世火山活动自内陆向海沟回迁,岩石组合、化学成分和同位素组成表现出较大的时空不均一性,是古太平洋板块回转后撒与东亚地幔楔形成过程中地幔楔与上覆岩石圈强烈相互作用造成深部岩石圈广泛部分熔融的结果;(3)华北中生代火山作用是联系克拉通破坏深部过程与陆地生物群演化的关键纽带,火山活动的空间差异性及其成因、环境气候效应是未来值得关注的问题。

**关键词:**火山作用;华北克拉通破坏;古太平洋板块俯冲;陆地生物群

**中图分类号:**P317.2 **文章编号:**1007-2802(2022)04-0776-12 **doi:**10.19658/j.issn.1007-2802.2022.41.044

## Mesozoic Volcanism in the North China Craton: Constraints for the Deep Processes and Shallow Responses of the Cratonic Destruction

MA Qiang<sup>1,2</sup>, GUO Jian-fang<sup>1,2</sup>, XU Yi-gang<sup>2,3</sup>, ZHENG Jian-ping<sup>1</sup>

1. School of Earth Sciences, State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan 430074, China; 2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory, Guangzhou 511458, China; 3. State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

**Abstract:** The intensive late Mesozoic volcanic activity is one of the important forms of destruction of the North China Craton. In this paper, we have comprehensively reviewed the temporal and spatial distribution of Mesozoic volcanism, properties and magmatic origins of the Mesozoic volcanic rocks under different temporal and spatial backgrounds in the North China Craton, and further have discussed the link between the volcanism and cratonic destruction in deep dynamic processes and superficial systems. Key points of this review are given below: (1) There are five stages of volcanisms, in which the middle-late Jurassic and early Cretaceous volcanisms were most widely and vigorously developed and were most closely related to the cratonic destruction process; (2) The middle and late Jurassic volcanisms had migrated to inland from the trench, and those volcanic rocks which have relatively uniformed rock assemblages, chemical compositions and isotopic compositions were products of partial melting of the old continental crust and lithospheric mantle overlying on the front of the flatly subducted ancient Pacific plate. However, the early Cretaceous volcanisms had migrated to the trench from inland, and those volcanic rocks which have relatively large temporal and spatial heterogeneities in rock assemblages, chemical compositions and isotopic compositions were products of extensive partial melting of the deep lithospheric mantle result-

收稿编号:2022-079,2022-5-10收到,2022-6-1改回

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41973050, 42288201);南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项项目(GML2019ZD0202)

第一作者简介:马强(1985-),男,博士,特任教授,研究方向:岩浆作用与大陆演化。E-mail: maqiang@cug.edu.cn.

ted from the intensive interaction between the mantle wedge and the overlying lithospheric mantle in processes of the rotation and retracement of the ancient Pacific plate and the formation of the East Asian great mantle wedge; (3) The Mesozoic volcanism in the North China is a key link between the deep process of the cratonic destruction and the evolution of terrestrial biotas. The spatial differences and origins of volcanic activities, as well as the environmental and climatic effects, should be paid attention to in the future.

**Key words:** volcanism; destruction of the North China Craton; subduction of the paleo-Pacific plate; terrestrial biota

## 0 引言

华北克拉通破坏现象的发现和研究表明颠覆了古老克拉通长期稳定、“一成不变”的传统认识(朱日祥等,2012,2020)。中生代强烈的火山活动是华北克拉通破坏的最重要产物之一(图1),记录了地幔和地壳的属性以及深部动力学过程等方面的重要信息,是探索华北克拉通破坏时空范围、机制、物质循环和深部动力学过程的重要岩石探针(吴福元等,2008;Yang and Li, 2008;Gao et al., 2008;徐义刚等,2009;朱日祥等,2012;Ma et al., 2015;Ma and Xu, 2021)。不同于就位在地壳内部的侵入岩,喷出地表的火山岩与沉积地层的关系更为密切,它们共同构成了华北中生代陆相盆地内的火山-沉积旋回。这些火山-沉积地层与区域地层不整合、盆地发展乃至陆地生物群的演化关系密切,因而能在华北克拉通破坏的浅部地质演化及其对陆地生物的影响研究中发挥重要作用(郭正府等,2003;Yang and Li, 2008;徐星等,2019;朱日祥和徐义刚,2019;朱日祥等,2020;Ma and Xu, 2021;Meng et al., 2022)。

多年来,学者们对华北中生代火山岩开展了大量的年代学、岩石学和地球化学研究,在其幕式活动规律、成因和动力学背景方面积累了大量成果(邓晋福等,1996;Zhang et al., 2002, 2003;Gao et al., 2004, 2008;路凤香等,2006;Yang and Li, 2008;Ma et al., 2012, 2015, 2016b;Xia et al., 2013;Pang et al., 2015;Hong et al., 2017;冯亚洲等,2020)。这些研究形成了一个基本共识:华北中生代火山活动是克拉通破坏过程中强烈壳-幔相互作用的结果。但是,不同区域、不同期次火山活动受控于哪个构造域?同时代火山岩与侵入岩之间的关系如何?火山活动如何影响表壳系统的演变?这些对于认识华北克拉通破坏的深部过程和浅部地质响应有着重要意义的科学问题仍然悬而未决。对典型地区和剖面上的火山岩开展精细解析、从整体上探讨火山作用的时空迁移和差异性为解决这些问题的两种不可或缺、优势互补的途径。本文侧

重于后者,重点总结对比华北克拉通不同时空背景下中生代火山活动的异同,进而阐述火山作用对华北克拉通破坏深部过程和浅部响应的制约。

## 1 华北中生代火山作用的时空分布

### 1.1 华北中生代火山岩的总体分布特征

华北克拉通是世界上最古老的克拉通之一(Liu et al., 1992; Ma et al., 2020),在古元古代克拉通化后进入了稳定盖层阶段,火山活动晚三叠世才开始出现,大致分为5期:

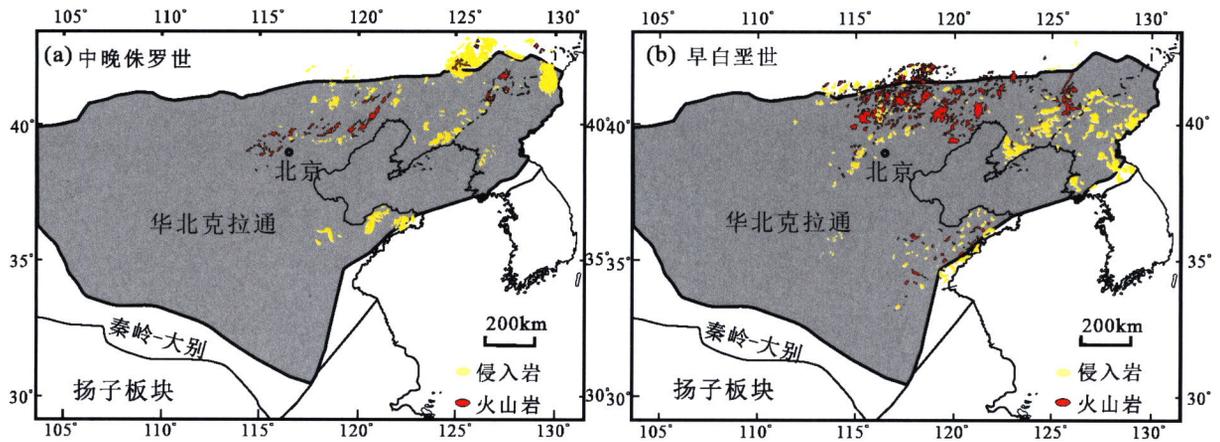
(1)晚三叠世在华北北部燕山造山带的凌源(Ma et al., 2012)、围场(Ye et al., 2014)和承德(Meng et al., 2019)等地区零星发育中酸性火山活动,被认为与古亚洲洋闭合后的伸展作用有关(Ma et al., 2012;Meng et al., 2019)。

(2)早中侏罗世火山活动仍集中在燕山地区,主要沿断裂带局部分布,包括辽西地区的兴隆沟组(Gao et al., 2004;Yang and Li, 2008)和冀北-京西地区的南大岭组火山岩(李晓勇等,2004;Hao et al., 2021)。兴隆沟组火山岩以粗面岩、粗面安山岩、安山岩和英安岩为主,其成因存在争议(Gao et al., 2004;Yang and Li, 2008);南大岭组火山岩以基性玄武岩为主,晚期发育粗安岩和火山碎屑岩,形成于陆内伸展环境(Wang et al., 2007;Hao et al., 2021)。

(3)华北大规模的火山活动从中晚侏罗世开始(图1),主要集中在燕山和吉南-辽东地区。中晚侏罗世火山岩以中酸性为主,同时代的玄武岩出露有限,主要集中在燕山地区髻髻山组底部或下部(Yang and Li, 2008;Ma et al., 2015)。

(4)早白垩世火山作用的范围和强度达到顶峰(图1),在同时期的陆内盆地中广泛发育(图2),不同地区火山岩的岩性和组合差异较大(详见后文)。

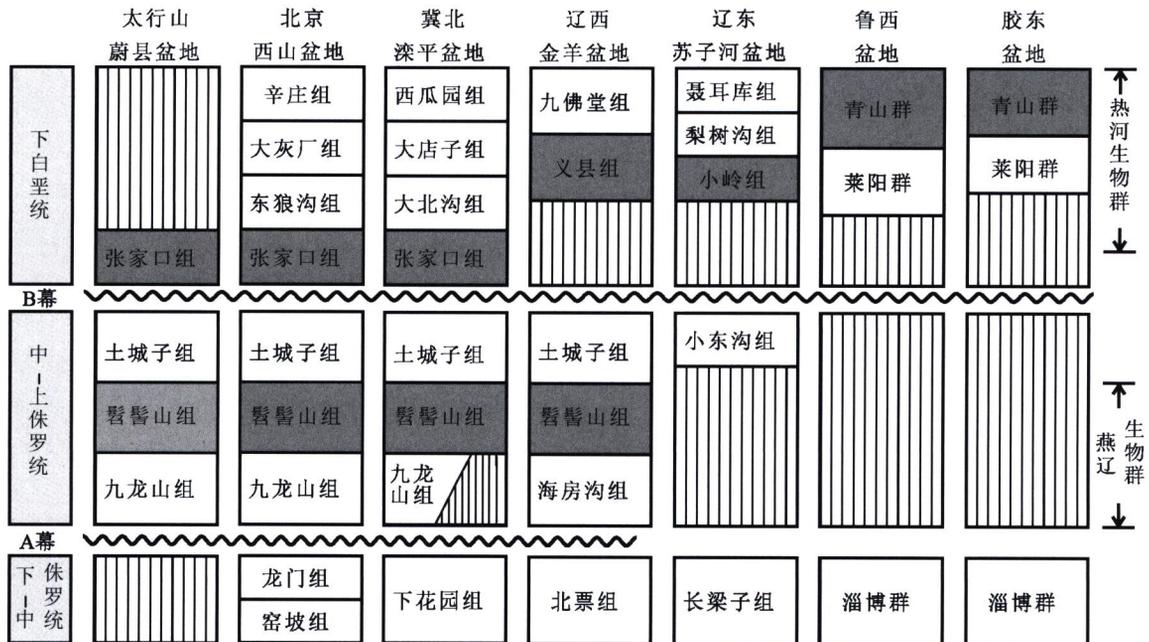
(5)早白垩世末期和晚白垩世(106 Ma以来),火山作用强度减弱,弥散分布在裂谷带附近,以来自软流圈地幔的碱性玄武岩为主(Zhang et al., 2003;Xu, 2014),属于滞留板片熔流体助熔东亚大地幔楔成因的板内玄武岩(徐义刚等,2018)。



据徐义刚等(2009)和 Zhang 等(2014)修改

图1 华北中晚侏罗世-早白垩世火成岩分布图

Fig. 1 Distribution maps of the middle-late Jurassic and early Cretaceous igneous rocks in the North China Craton



据许坤等(2003)以及山东省、辽宁省、河北省、北京市区域地质资料修改

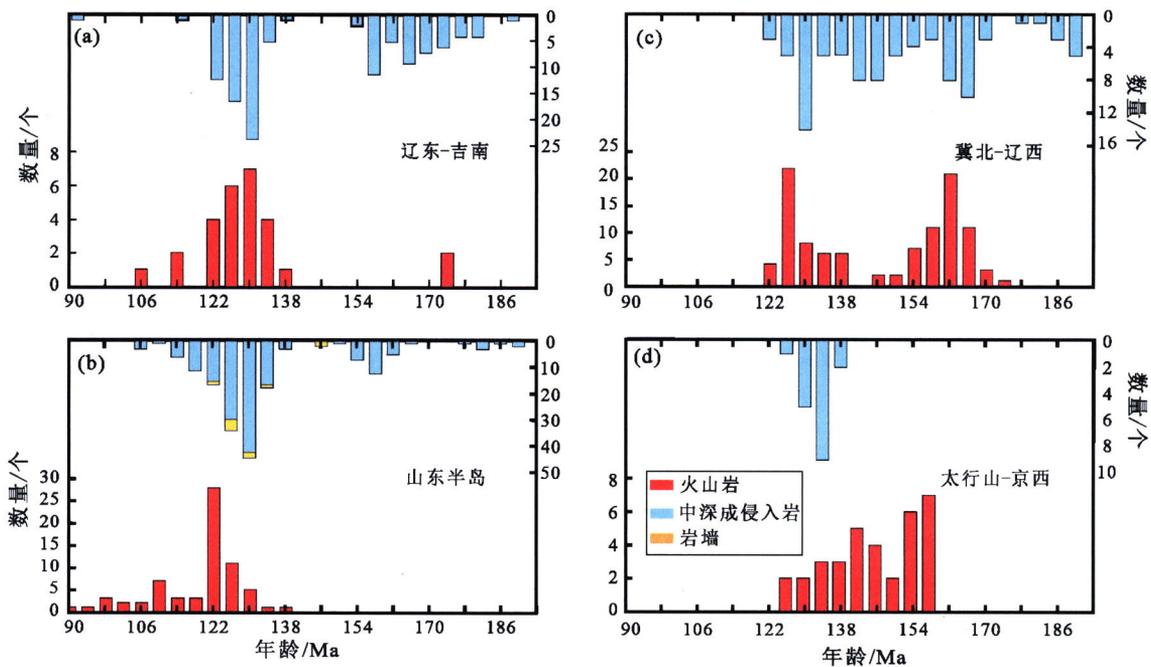
图2 华北克拉通代表性中生代盆地的火山-沉积层序

Fig. 2 The volcanic and sedimentary sequences of the representative Mesozoic basins in the North China Craton

### 1.2 中晚侏罗世和早白垩世火山岩的时空迁移

华北中晚侏罗世和早白垩世的火山作用最强烈、分布最广,与克拉通破坏过程关系最为密切。Ma 和 Xu(2021)总结发现了华北及朝鲜半岛岩浆活动具有侏罗纪自海沟向内陆迁移、早白垩世自内陆向海沟回迁的迁移规律。本文分别统计了吉南-辽东、山东半岛、冀北-辽西和京西-太行山地区火山岩和侵入岩的年代学数据(图3)。尽管火山岩显示了与整体岩浆活动(以及侵入岩)一致的迁移规律,但一个显著的区别是侏罗纪时期辽东-吉南和山东半岛等东部地区的岩浆岩以侵入岩为主,普遍缺乏

同时期的火山岩(图3a、3b),因此火山作用并未显示出两期次活动的特征。这一现象与吉南-辽东-山东半岛一带侏罗纪盆地和地层不发育相一致(图2)。造成这种侵入岩发育但缺失同时期火山-沉积地层的原因可能有两种:①侏罗纪时期这一带不发育火山-沉积地层;②原来发育的火山-沉积地层遭受了后期的隆升剥蚀而消失殆尽。低温热年代学研究显示,自早白垩世晚期起,辽东和胶东半岛的主要金属矿集区都经历了较大规模(4~5 km)的抬升剥蚀(Liu et al., 2017; Wang et al., 2018)。然而吉南-辽东-山东地区保存了完好的早白垩世火山-



数据来源:辽东-吉南、冀北-辽西和太行山-京西中生代火成岩据 Ma 和 Xu (2021) 及其参考文献;山东半岛火成岩据 Cao 等 (2019), Chen 等 (2013), Dai 等 (2016), Gu 等 (2013), Guo 等 (2013), Goss 等 (2010), Huang 等 (2012), Ji 等 (2022), Lan 等 (2011, 2013), Ling 等 (2009), Liu 等 (2008, 2009, 2015), Ma 等 (2013, 2014, 2016a), Tang 等 (2009), Xu 等 (2006), Xu 等 (2004a, 2004b), Yang 等 (2012), Yang 等 (2004), 曹光跃等 (2014), 高明波等 (2022), 郭壮等 (2016), 胡芳芳等 (2005), 匡永生等 (2012), 林景仟等 (1996), 凌文黎等 (2006), 邱检生等 (刘洪等, 2001; 邱检生等, 2012, 2013), 唐嘉锋等 (2008), 王栋等 (2022), 吴齐等 (2014), 许文良等 (2004), 杨承海等 (2006), 张永清等 (2019)

图 3 华北克拉通中生代火成岩的锆石 U-Pb 和 Ar-Ar 年龄直方图

Fig. 3 Histograms of zircon U-Pb and Ar-Ar ages of the Mesozoic igneous rocks in the North China Craton

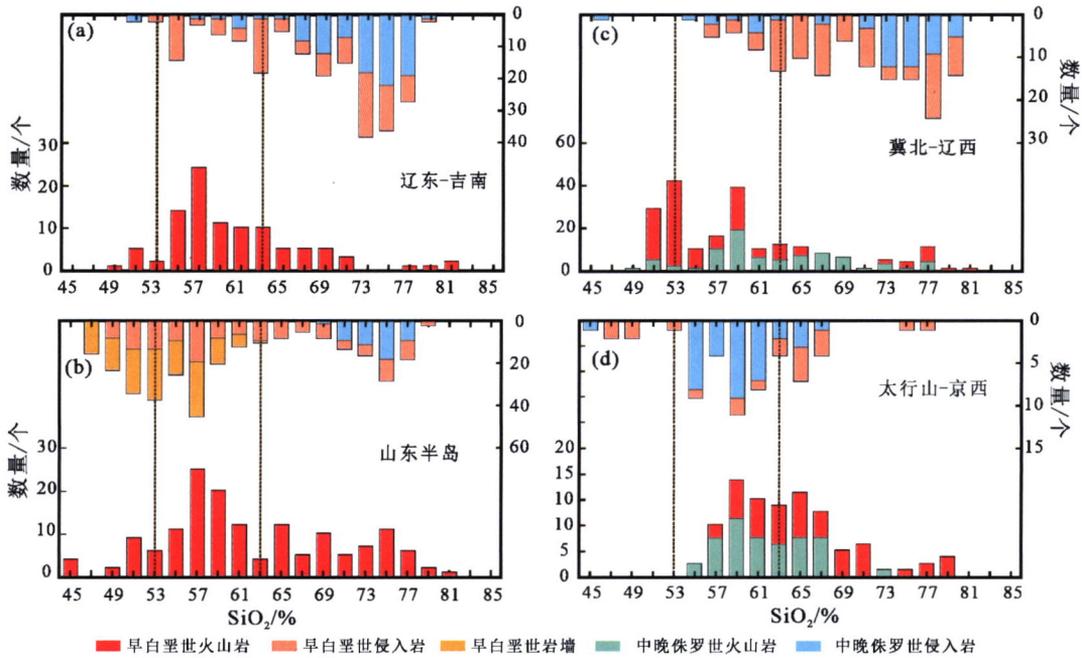
沉积地层(图 2),零星保存的侏罗纪地层中也缺乏火山岩(图 2),这些现象说明早白垩世晚期以来的隆升剥蚀作用并非造成全区侏罗纪火山岩地层缺失的主要原因。我们认为,中晚侏罗世时期吉南-辽东-山东地区的地壳可能受挤压抬升作用的影响,不利于岩浆喷出地表形成大规模火山岩,即便有火山岩的形成,非常局限的小型盆地也会造成它们难以长期保存。燕山和太行山地区的中生代盆地内充填了被巨厚层土城子沉积岩分割的中晚侏罗世髫髻山组/蓝旗组和早白垩世张家口组/义县组两期火山岩(图 2)。根据现有的年代学数据很容易将辽西至冀北赤城一带的这两幕火山活动区分开(图 3c),但却很难直观的区分燕山西部到太行山地区的两幕火山活动(图 3d),表明后一地区这两期火山活动之间的间隔很短,需要高精度的年代学数据才有望区分。

### 1.3 晚中生代火山岩性质的时空差异

中晚侏罗世和早白垩世火山作用不仅在时空分布上具有明显差异,它们在岩相、岩性、成分和同位素地球化学特征上也不相同。中晚侏罗世时期

的火山岩以中性的安山岩、粗面岩和粗面安山岩及其相应成分的火山碎屑岩为主(图 4),基性的玄武岩和酸性的英安岩-流纹岩仅在局部地区零星分布;而早白垩世火山岩的成分非常复杂,从基性、中性到酸性的火山岩(及火山碎屑岩)都广泛发育(图 4)。

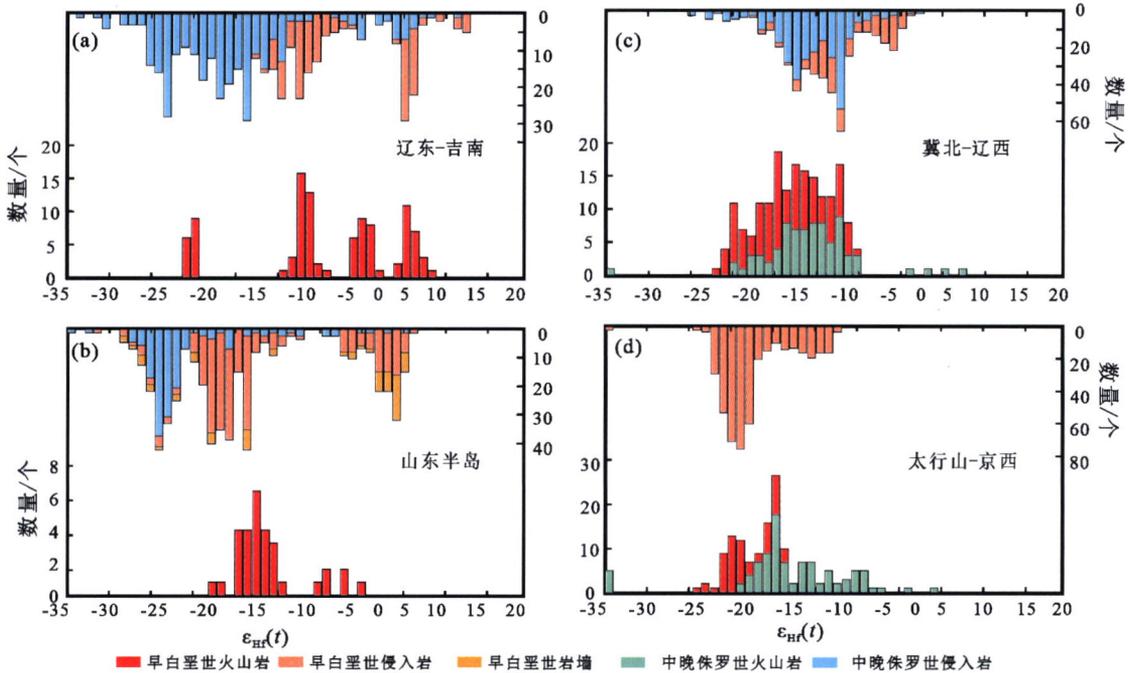
中晚侏罗世的火山活动集中在燕山地区(图 1、4),属于髫髻山组(在辽西也曾被称为蓝旗组),主体上为一套以高 Sr ( $>500 \times 10^{-6}$ ) 和轻稀土元素含量、低 Y ( $8 \times 10^{-6} \sim 21 \times 10^{-6}$ ) 和重稀土元素含量、无明显 Eu 异常以及低 MgO ( $<4.9\%$ )、Ni ( $<41 \times 10^{-6}$ )、Cr ( $<57 \times 10^{-6}$ ) 含量为特征的高 Sr/Y (埃达克质)火山岩 (Ma et al., 2015)。辽西北票地区局部还发育一些低 Sr/Y、高 Y ( $12 \times 10^{-6} \sim 43 \times 10^{-6}$ ) 和重稀土元素含量的中酸性火山岩,它们的地球化学组成与正常的岛弧安山岩-英安岩-流纹岩相似 (Ma et al., 2015; Yang and Li, 2008)。这两类中酸性火山岩都富集大离子亲石元素、亏损高场强元素,具有演化的 Sr-Nd 同位素和锆石 Hf 同位素组成(图 5) (李伍平等, 2001; 马强和郑建平, 2009; Yang and Li,



数据来源同图 3

图 4 华北克拉通中晚侏罗世和早白垩世火成岩 SiO<sub>2</sub> 含量直方图

Fig. 4 Histograms of SiO<sub>2</sub> contents of the middle-late Jurassic and early Cretaceous igneous rocks in the North China Craton



数据来源同图 3

图 5 华北克拉通中晚侏罗世和早白垩世火成岩锆石 ε<sub>Hf</sub>(t) 直方图

Fig. 5 Histograms of ε<sub>Hf</sub>(t) values of magmatic zircons from the middle-late Jurassic and early Cretaceous igneous rocks in the North China Craton

2008;李伍平,2012;Ma et al., 2015;Guo et al., 2022)。岩石学和地球化学研究表明它们是由幔源岩浆底侵引起的古老大陆下地壳部分熔融的产物 (Yang and Li, 2008; Ma et al., 2015; Guo et al.,

2022)。中晚侏罗世玄武质火山岩仅在辽西北票、北京西山和河北山海关等地零星出露,它们具有中等的 MgO、富碱、富集大离子亲石元素、亏损高场强元素,低放射成因 Pb 和演化的 Sr-Nd 同位素等特

征,可能是富集岩石圈地幔低程度部分熔融的岩浆强烈分离结晶并混染地壳物质的产物(Yang and Li, 2008; Ma and Xu, 2021)。Ma 和 Xu(2021)进一步推测它们的源区可能是古老岩石圈地幔的交代、薄弱层,相当于克拉通破坏之前的中岩石圈不连续界面。

华北早白垩世火山岩的组成和来源更为复杂多样,并表现出显著的时空差异性。最早的早白垩世火山活动始于太行山-燕山西部地区(即张家口组),从~145 Ma 持续到~130 Ma,以爆发相为主,岩性以酸性、A 型的流纹岩、碱流岩、粗面英安岩及相应成分的火山碎屑岩为主,缺乏基性岩浆活动(图 4),与北美、南美和新西兰等地的流纹质熔结凝灰岩突然爆发(Best et al., 2016; De Silva and Kay, 2018)相似。张家口组火山岩具有演化的锆石 Hf 同位素组成(图 5c、5d),表明它们来自古老地壳的部分熔融。

燕山东部辽西地区的早白垩世义县组火山岩形成于 126~120 Ma,是一套从基性、中基性、中性到酸性的巨厚火山岩系,含河湖相沉积夹层,它以大规模溢流相含橄榄石的玄武岩-玄武安山岩为特征而区别于燕山西部地区的张家口组火山作用(图 4)。研究程度较高的义县组玄武岩,具有低的 SiO<sub>2</sub>、高 MgO、富集大离子亲石元素、亏损高场强元素,低放射成因 Pb 和演化的 Sr-Nd 同位素等特征,被认为是古老富集岩石圈部分熔融的产物(Gao et al., 2008),但富集组分的来源存在拆沉下地壳熔体、俯冲板片熔/流体等不同认识(Gao et al., 2008; Yang and Li, 2008; Geng et al., 2019; Xu and Zhang, 2020)。义县组中酸性火山岩的组成类似于高 MgO 安山岩或 Mg<sup>#</sup>埃达克岩,其成因仍然存在激烈争论(王晓蕊等,2005; Yang and Li, 2008; Hong et al., 2017; Qian et al., 2018)。一些研究者认为它们是拆沉大陆下地壳的熔体在上升过程中与地幔橄榄岩相互作用的结果(王晓蕊等,2005);另一些研究者则认为它们的源区是俯冲板片熔/流体与地幔橄榄岩反应形成的富斜方辉石的辉石岩(Hong et al., 2017);还有学者认为这些岩石高 Mg<sup>#</sup>和埃达克质特征并不是原始岩浆本身的性质,义县组高 Mg<sup>#</sup>安山岩是幔源基性岩浆和壳源酸性岩浆混合、并混入-消耗橄榄石捕虏晶的结果(邵济安等,2005; 张宏福和邵济安,2008)。

吉南-辽东地区的早白垩世火山岩的形成年龄为 129~105 Ma,分布在一系列伸展盆地中,其岩石地层单元名称尚未统一,在不同盆地中仍沿用原有

名称,主要有果松组、小岭组、桂云花组、干沟组和侯家屯组,主要岩石类型有玄武岩、玄武粗安岩、粗安岩、粗面岩和安山岩等,酸性英安质和流纹质火山岩分布相对较少。吉南-辽东早白垩世火山岩富集大离子亲石元素、亏损高场强元素,但具有不均一的成分和同位素组成,大致可以分为 4 个系列:

(1)碱性玄武粗安岩、粗安岩和粗面岩及其伴生的亚碱性玄武岩-安山岩组合:具有 EM-1 型 Sr-Nd-Pb 同位素组成、富集的锆石 Hf 同位素组成以及与地幔类似的锆石 O 同位素组成,其母岩浆来源于古老富集岩石圈地幔的低程度部分熔融(Pang et al., 2015; 冯亚洲等,2020);

(2)高镁安山岩系列:具有高 SiO<sub>2</sub>(55%~57%)和 MgO(7.6%~10.4%)、低 TFeO/MgO(< 1)以及高 Mg<sup>#</sup>(67~72)的特点,其中的橄榄高镁安山岩代表了近原生的幔源岩浆,起源于热的(~1250 °C)、含水(H<sub>2</sub>O>3%)岩石圈地幔浅部橄榄岩的部分熔融(Ma et al., 2016b);

(3)亏损同位素组成的钙碱性安山岩:它们的锆石  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  高达+5.2,锆石 O 同位素高于正常地幔值,其源区被认为是遭受低温热液蚀变洋壳来源熔体/流体交代的地幔(冯亚洲等,2020);

(4)分布有限的英安岩-流纹岩系列:具有不均一、但比同时代幔源火山岩更富集的 Sr-Nd 和锆石 Hf 同位素组成,与华北古老的地壳基底相似,起源于古老基性下地壳的部分熔融(Ma et al., 2016b; Zhou et al., 2021a)。

山东半岛早白垩世火山作用主要出现在青山期,也称青山群火山岩,它们在郯庐断裂带两侧存在较大差别,具有自西向东逐渐变年轻的趋势(Ling et al., 2009),与华北早白垩世岩浆的整体迁移趋势相一致。鲁西地区主要发育基性岩,形成时代约为 128~115 Ma,而胶东地区则为基性、酸性双峰式火山岩组成,喷发于 110~98 Ma(凌文黎等,2006; Ling et al., 2009; 匡永生等,2012; 张永清等,2019)。青山群基性火山岩是交代富集岩石圈地幔部分熔融作用的产物(Zhang et al., 2002; Ling et al., 2009),其地幔源区高度富水(Xia et al., 2013);酸性火山岩为古老下地壳部分熔融的产物(Ling et al., 2009; 匡永生等,2012)。

## 2 华北克拉通中生代火山作用与古太平洋板块俯冲作用

前人对华北中生代火山岩成因制约克拉通破坏机制的研究进展已经做了较为全面的总结(吴福

元等,2008;徐义刚等,2009;朱日祥等,2012;Liu et al., 2019;Wu et al., 2019;Ma and Xu, 2021;Yang et al., 2021),我们不再赘述。本文将重点论述这些火山作用的时空差异性与板块俯冲动力学过程之间的联系。

经过多年研究,一个基本的共识是古太平洋板块俯冲是华北克拉通破坏的一级控制因素(朱日祥等,2012;朱日祥和徐义刚,2019),然而中生代时期古太平洋板块向欧亚大陆之下俯冲的历史等重要问题一直没有得到很好解决。岩浆是俯冲板块与周围地幔相互作用的直接产物,因此火山弧的分布和迁移特征可以表征板块俯冲的动力过程。华北克拉通中生代火山活动的空间范围很宽,延伸至远离任何同时代俯冲带数百乃至上千公里的内陆区域(图1)(Ma and Xu, 2021),这与板块高角度俯冲形成的沟-弧-盆体系截然不同。从构造位置角度考虑,华北中生代宽阔的侏罗纪-白垩纪火山活动带可能受到古太平洋板块俯冲、蒙古-鄂霍茨克洋闭合或者它们叠合作用的影响。因此,在根据火山作用迁移规律讨论古太平洋板块俯冲历史之前,需要评估蒙古-鄂霍茨克洋闭合的影响。目前对华北早白垩世岩浆活动主要受控于古太平洋板块俯冲、而蒙古-鄂霍茨克洋闭合对其影响微弱基本达成共识,争论的焦点在于燕山地区的中晚侏罗世髻髻山组火山岩是否受到蒙古-鄂霍茨克洋闭合远程效应的控制(Yang and Li, 2008;Xu et al., 2013;唐杰等,2018;朱日祥和徐义刚,2019;Ma and Xu, 2021;Guo et al., 2022)。Guo等(2022)统计了大兴安岭晚中生代火山岩的年代学数据,发现大兴安岭北部发育三阶段幕式火山活动(166~153 Ma, 150~140 Ma, 130~106 Ma),大兴安岭南部火山活动则显示为两幕火山活动(166~145 Ma, 143~122 Ma),这与华北克拉通北部燕山地区相似。大兴安岭北部的第一期火山岩主要局限在额尔古纳地区及其周边,岩石组合和地球化学特征显示其受到蒙古-鄂霍茨克洋构造的影响,可能是该大洋闭合后造山带加厚陆壳垮塌拆沉所致(Xu et al., 2013;Li et al., 2018;Guo et al., 2022)。大兴安岭北部中晚侏罗世第二期火山岩则与大兴安岭南部的中晚侏罗世火山岩具有相似的岩石组合和地球化学特征,但不同于加厚陆壳垮塌拆沉的岩浆(Guo et al., 2022)。将燕山和大兴安岭看作一个整体,除了大兴安岭北部第一期火山活动以外,整个区域的中晚侏罗世火山活动自燕山经大兴安岭南部到大兴安岭北部逐渐变年轻(Guo et al., 2022),这与蒙古-鄂霍茨克

洋南向俯冲闭合不吻合。从东北地区岩浆的时空分布看,除了上述受蒙古-鄂霍茨克洋闭合控制的大兴安岭北部侏罗纪第一期岩浆活动以外,整体上显示了与华北克拉通一致的侏罗纪自东向西、早白垩世自东向西迁移规律(Ji et al., 2019;Guo et al., 2022)。基于上述观察,我们认为华北克拉通中晚侏罗世火山岩与蒙古-鄂霍茨克构造体系的关系不大,那么华北侏罗纪-白垩纪火山活动的迁移规律应该是古太平洋板块俯冲作用的响应。

华北克拉通中生代岩浆活动在185~145 Ma期间自靠近海沟的朝鲜半岛开始逐渐向内陆太行山地区迁移了近1000多公里,145~140 Ma之后开始往回迁移,在110~105 Ma左右到达朝鲜半岛东部(Ma and Xu, 2021)。图3显示了华北中晚侏罗世与早白垩世两期岩浆活动之间的间隔期从吉南-辽东地区的~30 Ma向西逐渐减小,到最西边的太行山-京西地区虽然从火山-沉积地层序列上很容易识别出被巨厚土城子组沉积岩所分隔的两期火山活动(图2),但根据已有的年代学数据已经很难区分两期岩浆活动及其间歇期(图3)。中晚侏罗世时期,吉南-辽东-山东半岛的岩浆岩以深成侵入体为主,缺少同时期的火山岩和沉积地层(图3、4),它们是一套低温、富水、钙碱性的酸性岩浆岩(Wu et al., 2005;Ma and Xu, 2021;Yang et al., 2021),可能代表了东侧古太平洋板块向东亚大陆俯冲而形成的大陆弧岩浆(Ma and Xu, 2021)。此后,岩浆活动的前缘逐渐向内陆的燕山-太行山迁移,而吉南-辽东-山东半岛进入了岩浆静寂期,与平板俯冲岩浆活动规律一致。在平板俯冲过程中,上覆岩石圈和俯冲板片之间的舌型软流圈地幔楔不断向内陆迁移,平躺板片与上覆岩石圈地幔处于耦合状态,其表面温度较低,难以发生部分熔融作用,使得岩浆活动会随着平板俯冲前端位置向距离海沟较远的陆内迁移,其后侧的地区则进入岩浆静寂期(Copeland et al., 2017;Gutscher, 2018)。因此,我们认为,中晚侏罗世古太平洋板块的平俯冲是造成华北侏罗纪岩浆活动由海沟向内陆迁移的驱动力,这也能很好的解释同时期广泛发育的陆内造山事件和火山静寂期成盆事件。

145~140 Ma开始,华北克拉通岩浆活动开始转向海沟方向回迁(Ma and Xu, 2021),与此同时构造变形、沉积盆地迁移乃至表生系统也发生了重大转变(郑建平和戴宏坤, 2018;Wu et al., 2019;朱日祥等,2020;Zhou et al., 2021b;Meng et al., 2022),克拉通破坏的峰期接踵而至(朱日祥等,2012)。太行

山-京西-冀北的张家口组酸性火山岩和火山碎屑岩是上述转折之后最早的岩浆活动,充填在早白垩世伸展盆地的底部(图2),具有非常演化的放射性同位素组成(图5d),是太平洋板块后撤阶段伸展背景下古老地壳部分熔融的产物。值得注意的是,张家口组以流纹岩/熔结凝灰岩快速大规模爆发区别于其他华北中生代火山活动,与北美和南美平板俯冲后撤初期的熔结凝灰岩突然爆发(Best et al., 2016; De Silva and Kay, 2018)特征相似。如果张家口组火山岩与典型的熔结凝灰岩突然爆发成因类似,还可能暗示了当时的地壳是较厚、较热的,古太平洋板块后撤的初期可能伴随着板块的断裂、撕裂等过程,这需要后续研究予以检验。早白垩世岩浆迁移到辽西地区时开始出现大规模的玄武质火山岩(图4c),与同时期的侵入岩构成双峰式组合,它们分别来自岩石圈地幔和古老下地壳的部分熔融,酸性侵入岩中开始出现新生地壳组分(图5c)。山东半岛和吉南-辽东地区早白垩世岩浆成分的双峰式特征更加明显(图4a、4b),基性岩墙分布也更为广泛(图4b)(Ma et al., 2014, 2016a)。此时无论幔源的基性岩还是壳源的酸性岩都表现出了高度的同位素不均一性(图5),显示了软流圈地幔、岩石圈地幔、古老地壳和新生地壳广泛部分熔融的特征(Yang et al., 2021; Ma and Xu, 2021)。早白垩世火山岩(及侵入岩)岩浆温度较高(Ma et al., 2016b; Wu et al., 2019; Ma and Xu, 2021),含有的软流圈地幔和新生地壳组分具有随着岩浆东迁逐渐增多的趋势(图5)(Ma and Xu, 2021),这可能与古太平洋板块回转和后撤诱发的软流圈上涌逐渐增强有关。早白垩世幔源和壳源岩浆具有很高的水含量(Xia et al., 2013; Ma et al., 2016b; Hong et al., 2020)和俯冲太平洋壳组分(冯亚洲等, 2020),表明克拉通破坏过程伴随着板片来源熔/流体的注入。古太平洋板块后撤造成软流圈地幔对流、非稳态流动和高水通量,可以显著降低上覆岩石圈的黏滞度和熔融温度,最终导致了华北克拉通的破坏(朱日祥和徐义刚, 2019)。考虑到海沟后撤和板片回转是俯冲板片在地幔过渡带内滞留的先决条件, Ma 和 Xu (2021) 进一步提出东亚大地幔楔系统可能早在 145~140 Ma 就开始形成、并在 ~120 Ma 发展成。这一认识与中国东部在 ~106 Ma 首次出现轻  $\delta^{26}\text{Mg}$  玄武岩的结论是一致的(Li et al., 2017),也得到了数值模拟研究的支持(Liu et al., 2021)。

### 3 华北克拉通中生代火山作用与浅表系统演化

华北中生代火山-沉积地层中赋存了对鸟类和被子植物起源与早期演化具有重要价值的燕辽和热河生物群化石(图2)(黄迪颖, 2015; 徐星等, 2019; Zhou et al., 2021b)。赋存在髻髻山组(及其相关的海房沟-九龙山组)火山湖相地层中的燕辽生物群与古太平洋板块向内陆前进俯冲以及华北克拉通破坏启动的时间和空间一致。早白垩世热河生物群的形成、繁盛和迁移则与张家口组-义县组火山活动迁移、古太平洋板块回转后撤和华北克拉通破坏的峰期一致(Zhou et al., 2021b)。因此,这两个生物群落的起源、发展、更替与华北克拉通破坏相关的火山活动、燕山运动和盆地发展存在显著的时空相关性和内在联系(朱日祥等, 2020; Zhou et al., 2021b),为研究地球深部动力过程对浅表系统的控制机理提供了难得的机遇(朱日祥等, 2020)。

目前,对两个陆地生物群与地质过程和古地理-古环境的协同演化关系仍处于描述阶段,我们尚不能很好地诠释西太平洋板块俯冲作用对克拉通破坏、地表地质、地形地貌和陆地生态系统演化的控制机理。这方面的突破既依赖于在高精度时间标尺下对单一圈层事件的精细刻画,还需要建立起各圈层间的纽带。火山作用正是深部与浅部系统的链接纽带,也被认为是华北克拉通破坏控制陆地生物演化前沿科学问题中最值得深入研究的因素之一(徐星等, 2019)。一方面火山来自地球深部,记录了克拉通破坏机制和深部动力过程的信息;另一方面,火山活动的环境气候和地理地貌效应是燕辽和热河生物群的形成、繁盛、消亡和迁移的重要外在驱动因素(黄迪颖, 2015; 徐星等, 2019; Zhou et al., 2021b)。燕山期频繁剧烈的火山活动能为淡水湖泊提供大量影响物质(Jiang et al., 2011),挥发性气体以及高温火山灰的释放会改变大气环境,形成强大的选择性压力,甚至引发生态系统的崩溃(郭正府等, 2003; 徐星等, 2019)。挥发分循环是火山活动联系地球内部与浅表纽带作用研究的重要抓手之一,在探究克拉通破坏的深部过程与环境效应研究中越发受到重视。华北早白垩世幔源岩浆普遍高  $\text{H}_2\text{O}$  含量的发现,为俯冲作用驱动克拉通破坏的动力学过程提供了关键证据(Xia et al., 2013; Ma et al., 2016b; Hong et al., 2020);华北早白垩世

煌斑岩岩浆 CO<sub>2</sub> 含量的研究为深部 CO<sub>2</sub> 释放、气候变暖与克拉通破坏之间的联系提供了新视角 (Wang et al., 2022)。然而,与燕辽和热河生物群直接相关的髻髻山组及张家口组-义县组火山活动岩浆挥发分的研究仍十分薄弱,有待于未来的深入研究。

#### 4 结语与展望

华北中生代火山作用的研究使得我们对于克拉通破坏的机制、时空范围和动力学背景有了深入了解。晚中生代火山岩具有侏罗纪自海沟向内陆迁移、早白垩世自内陆向海沟回迁的规律。它们的岩石组合、化学成分和同位素组成上都具有时空差异性,中晚侏罗世火山岩以古老下地壳熔融形成的钙碱性中酸性安山岩-英安岩-流纹岩组合为主,还有少量富集岩石圈地幔来源的碱性中基性岩石。随着早白垩世火山岩的向东迁移,岩浆源区由单一古老下地壳向富集岩石圈地幔+古老下地壳+新生地壳+软流圈地幔转换。晚中生代火山作用的迁移与性质的时空差异与构造变形、沉积盆地发展和陆地生态系统演化是耦合的,它们都是古太平洋板块俯冲动力体制调整及其与上覆大陆岩石圈相互作用的结果。

华北中生代火山岩研究仍有许多问题有待解决。例如,大部分地区同时期的火山岩与侵入岩都存在成分和同位素组成的差异(图 4、5),这些时空耦合的火山岩与侵入岩之间的成因关系仍鲜有探讨。太行山-燕山西部的早白垩世初期熔结凝灰岩快速爆发的机制,以及它们没有随着其他类型岩浆活动一起向东迁移至辽宁-朝鲜地区的原因,这也是今后值得关注的问题。中生代火山作用的环境气候效应及其对燕辽-热河生物群形成演化的影响仍是一个具有挑战性的重要课题。

**致谢:**感谢黄小龙研究员邀请撰写本文。本文得益于基础科学中心项目“克拉通破坏与陆地生物演化”组织的多次联合野外地质考察及富有启发性的研讨。

#### 参考文献 (References):

Best M G, Christiansen E H, De Silva S, Lipman P W. 2016. Slab-roll-back ignimbrite flareups in the southern Great Basin and other Cenozoic American arcs: A distinct style of arc volcanism. *Geosphere*, 12(4): 1097-1135

Cao G Y, Xue H M, Liu Z, Lu Z L. 2019. U-Pb zircon, geochemical, and Sr-Nd-Hf isotopic data for late Mesozoic volcanic rocks along the Tan-Lu fault zone of Shandong Province, eastern China: Constraints

on magma genesis and lithospheric thinning. *International Geology Review*, 61(8): 972-996

Chen B, Jahn B M, Suzuki K. 2013. Petrological and Nd-Sr-Os isotopic constraints on the origin of high-Mg adakitic rocks from the North China Craton: Tectonic implications. *Geology*, 41(1): 91-94

Copeland P, Currie C A, Lawton T F, Murphy M A. 2017. Location, location, location: The variable lifespan of the Laramide orogeny. *Geology*, 45(3): 223-226

Dai L Q, Zheng Y F, Zhao Z F. 2016. Termination time of peak decratonization in North China: Geochemical evidence from mafic igneous rocks. *Lithos*, 240-243: 327-336

De Silva S L, Kay S M. 2018. Turning up the heat: High-flux magmatism in the central Andes. *Elements*, 14(4): 245-250

Gao S, Rudnick R L, Yuan H L, Liu X M, Liu Y S, Xu W L, Ling W L, Ayers J, Wang X C, Wang Q H. 2004. Recycling lower continental crust in the North China craton. *Nature*, 432(7019): 892-897

Gao S, Rudnick R L, Xu W L, Yuan H L, Liu Y S, Walker R J, Puchtel I S, Liu X M, Huang H, Wang X R, Yang J. 2008. Recycling deep cratonic lithosphere and generation of intraplate magmatism in the North China Craton. *Earth and Planetary Science Letters*, 270(1-2): 41-53

Geng X L, Foley S F, Liu Y S, Wang Z C, Hu Z C, Zhou L. 2019. Thermal-chemical conditions of the North China Mesozoic lithospheric mantle and implication for the lithospheric thinning of cratons. *Earth and Planetary Science Letters*, 516: 1-11

Goss S C, Wilde S A, Wu F Y, Yang J H. 2010. The age, isotopic signature and significance of the youngest Mesozoic granitoids in the Jiaodong Terrane, Shandong Province, North China Craton. *Lithos*, 120(3-4): 309-326

Gu H O, Xiao Y L, Santosh M, Li W Y, Yang X Y, Paek A, Hou Z H. 2013. Spatial and temporal distribution of Mesozoic adakitic rocks along the Tan-Lu fault, Eastern China: Constraints on the initiation of lithospheric thinning. *Lithos*, 177: 352-365

Guo F, Guo J T, Wang C, Fan W M, Li C W, Zhao L, Li H X, Li J Y. 2013. Formation of mafic magmas through lower crustal AFC processes - an example from the Jinan gabbroic intrusion in the North China Block. *Lithos*, 179: 157-174

Guo J F, Ma Q, Xu Y G, Zheng J P, Zou Z Y, Ma L, Bai X J. 2022. Migration of Middle-Late Jurassic volcanism across the northern North China Craton in response to subduction of Paleo-Pacific Plate. *Tectonophysics*, 833: 229338

Gutscher M A. 2018. Scraped by flat-slab subduction. *Nature Geoscience*, 11(12): 890-891

Hao W X, Zhu R X, Zhu G. 2021. Jurassic tectonics of the eastern North China Craton: Response to initial subduction of the Paleo-Pacific Plate. *GSA Bulletin*, 133(1-2): 19-36

Hong L B, Zhang Y H, Xu Y G, Ren Z Y, Yan W, Ma Q, Ma L, Xie W. 2017. Hydrous orthopyroxene-rich pyroxenite source of the Xinkailing high magnesium andesites, Western Liaoning: Implications for the subduction-modified lithospheric mantle and the destruction mechanism of the North China Craton. *Lithos*, 282-283: 10-22

Hong L B, Xu Y G, Zhang L, Liu Z, Xia X P, Kuang Y S. 2020. Oxi-

- dized Late Mesozoic subcontinental lithospheric mantle beneath the eastern North China Craton: A clue to understanding cratonic destruction. *Gondwana Research*, 81: 230–239
- Huang X L, Zhong J W, Xu Y G. 2012. Two tales of the continental lithospheric mantle prior to the destruction of the North China Craton: Insights from early cretaceous mafic intrusions in Western Shandong, East China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 96: 193–214
- Ji L, Liu J L, Ding X, Luo Z M, Ni J L, Shi X X, Dao H N. 2022. Lithospheric thinning of the North China craton: Insights from Early Cretaceous intermediate-mafic dyke swarms in Jiaodong peninsula. *Gondwana Research*, 107: 84–106
- Ji Z, Meng Q A, Wan C B, Zhu D F, Ge W C, Zhang Y L, Yang H, Dong Y. 2019. Geodynamic evolution of flat-slab subduction of paleo-pacific plate: Constraints from Jurassic Adakitic lavas in the Hailar basin, NE China. *Tectonics*, 38(12): 4301–4319
- Jiang B Y, Fürsich F T, Sha J G, Wang B, Niu Y Z. 2011. Early Cretaceous volcanism and its impact on fossil preservation in Western Liaoning, NE China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 302(3–4): 255–269
- Lan T G, Fan H R, Hu F F, Tomkins A G, Yang K F, Liu Y S. 2011. Multiple crust-mantle interactions for the destruction of the North China Craton: Geochemical and Sr-Nd-Pb-Hf isotopic evidence from the Longbaoshan alkaline complex. *Lithos*, 122(1–2): 87–106
- Lan T G, Fan H R, Santosh M, Hu F F, Yang K F, Yang Y H, Liu Y S. 2013. Crust-mantle interaction beneath the Luxi Block, eastern North China Craton: Evidence from coexisting mantle- and crust-derived enclaves in a quartz monzonite pluton. *Lithos*, 177: 1–16
- Li S G, Yang W, Ke S, Meng X N, Tian H C, Xu L J, He Y S, Huang J, Wang X C, Xia Q K, Sun W D, Yang X Y, Ren Z Y, Wei H Q, Liu Y S, Meng F C, Yan J. 2017. Deep carbon cycles constrained by a large-scale mantle Mg isotope anomaly in eastern China. *National Science Review*, 4(1): 111–120
- Li Y, Xu W L, Tang J, Pei F P, Wang F, Sun C Y. 2018. Geochronology and geochemistry of Mesozoic intrusive rocks in the Xing'an Massif of NE China: Implications for the evolution and spatial extent of the Mongol-Okhotsk tectonic regime. *Lithos*, 304–307: 57–73
- Ling W L, Duan R C, Xie X J, Zhang Y Q, Zhang J B, Cheng J P, Liu X M, Yang H M. 2009. Contrasting geochemistry of the Cretaceous volcanic suites in Shandong province and its implications for the Mesozoic lower crust delamination in the eastern North China craton. *Lithos*, 113(3–4): 640–658
- Liu D Y, Nutman A P, Compston W, Wu J S, Shen Q H. 1992. Remnants of  $\geq 3800$  Ma crust in the Chinese part of the Sino-Korean craton. *Geology*, 20(4): 339–342
- Liu J G, Cai R H, Pearson D G, Scott J M. 2019. Thinning and destruction of the lithospheric mantle root beneath the North China Craton: A review. *Earth-Science Reviews*, 196: 102873
- Liu L, Liu L J, Xu Y G. 2021. Mesozoic intraplate tectonism of East Asia due to flat subduction of a composite terrane slab. *Earth-Science Reviews*, 214: 103505
- Liu S, Hu R Z, Gao S, Feng C X, Qi L, Zhong H, Xiao T F, Qi Y Q, Wang T, Coulson I M. 2008. Zircon U-Pb geochronology and major, trace elemental and Sr-Nd-Pb isotopic geochemistry of mafic dykes in western Shandong Province, east China: Constraints on their petrogenesis and geodynamic significance. *Chemical Geology*, 255(3–4): 329–345
- Liu S, Hu R Z, Gao S, Feng C X, Yu B B, Feng G Y, Qi Y Q, Wang T, Coulson I M. 2009. Petrogenesis of Late Mesozoic mafic dykes in the Jiaodong Peninsula, eastern North China Craton and implications for the foundering of lower crust. *Lithos*, 113(3–4): 621–639
- Liu S, Feng C X, Hu R Z, Zhai M G, Gao S, Lai S C, Yan J, Coulson I M, Zou H B. 2015. Zircon U-Pb geochronological, geochemical, and Sr-Nd isotope data for Early Cretaceous mafic dykes in the Tancheng-Lujiang Fault area of the Shandong Province, China: Constraints on the timing of magmatism and magma genesis. *Journal of Asian Earth Sciences*, 98: 247–260
- Liu X, Fan H R, Evans N J, Yang K F, Danišik M, McInnes B I A, Qin K Z, Yu X F. 2017. Exhumation history of the Sanshandao Au deposit, Jiaodong: Constraints from structural analysis and (U-Th)/He thermochronology. *Scientific Reports*, 7(1): 7787
- Ma L, Jiang S Y, Dai B Z, Jiang Y H, Hou M L, Pu W, Xu B. 2013. Multiple sources for the origin of Late Jurassic Linglong adakitic granite in the Shandong Peninsula, Eastern China: Zircon U-Pb geochronological, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic evidence. *Lithos*, 162–163: 251–263
- Ma L, Jiang S Y, Hofmann A W, Dai B Z, Hou M L, Zhao K D, Chen L H, Li J W, Jiang Y H. 2014. Lithospheric and asthenospheric sources of lamprophyres in the Jiaodong Peninsula: A consequence of rapid lithospheric thinning beneath the North China Craton? *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 124: 250–271
- Ma L, Jiang S Y, Hofmann A W, Xu Y G, Dai B Z, Hou M L. 2016a. Rapid lithospheric thinning of the North China craton: New evidence from Cretaceous mafic dikes in the Jiaodong Peninsula. *Chemical Geology*, 432: 1–15
- Ma Q, Zheng J P, Griffin W L, Zhang M, Tang H Y, Su Y P, Ping X Q. 2012. Triassic “adakitic” rocks in an extensional setting (North China): Melts from the cratonic lower crust. *Lithos*, 149: 159–173
- Ma Q, Zheng J P, Xu Y G, Griffin W L, Zhang R S. 2015. Are continental “adakites” derived from thickened or foundered lower crust? *Earth and Planetary Science Letters*, 419: 125–133
- Ma Q, Xu Y G, Zheng J P, Griffin W L, Hong L B, Ma L. 2016b. Coexisting early cretaceous high-Mg andesites and adakitic rocks in the North China craton: The role of water in intraplate magmatism and cratonic destruction. *Journal of Petrology*, 57(7): 1279–1308
- Ma Q, Xu Y G, Huang X L, Zheng J P, Ping X Q, Xia X P. 2020. Eoarchean to Paleoproterozoic crustal evolution in the North China craton: Evidence from U-Pb and Hf-O isotopes of zircons from deep-crustal xenoliths. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 278: 94–109
- Ma Q, Xu Y G. 2021. Magmatic perspective on subduction of Paleo-Pacific plate and initiation of big mantle wedge in East Asia. *Earth-Science Reviews*, 213: 103473
- Meng Q R, Wu G L, Fan L G, Wei H H. 2019. Tectonic evolution of early Mesozoic sedimentary basins in the North China block. *Earth-Science Reviews*, 190: 416–438

- Meng Q R, Zhou Z H, Zhu R X, Xu Y G, Guo Z T. 2022. Cretaceous basin evolution in northeast Asia: Tectonic responses to the paleo-Pacific plate subduction. *National Science Review*, 9(1): nwab088
- Pang C J, Wang X C, Xu Y G, Wen S N, Kuang Y S, Hong L B. 2015. Pyroxenite-derived Early Cretaceous lavas in the Liaodong peninsula: Implication for metasomatism and thinning of the lithospheric mantle beneath North China Craton. *Lithos*, 227: 77-93
- Qian S P, Ren Z Y, Zhang L, Zhang L, Wu Y D, Mei S W, Xu X B, Luo Q C. 2018. Petrological and geochemical constraints on the origin of early cretaceous volcanic rocks in the central-east Asia: Implications for crustal growth and evolution. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 19(9): 3004-3018
- Tang H Y, Zheng J P, Yu C M. 2009. Age and composition of the Rusan intrusive complex in the northern Sulu orogen, eastern China: Petrogenesis and lithospheric mantle evolution. *Geological Magazine*, 146(2): 199-215
- Wang Y Z, Wang F, Wu L, Shi W B, Yang L K. 2018. (U-Th)/He thermochronology of metallic ore deposits in the Liaodong Peninsula: Implications for orefield evolution in northeast China. *Ore Geology Reviews*, 92: 348-365
- Wang Z H, Zhao Y, Zou H B, Li W P, Liu X W, Wu H, Xu G, Zhang S H. 2007. Petrogenesis of the Early Jurassic Nandaling flood basalts in the Yanshan belt, North China Craton: A correlation between magmatic underplating and lithospheric thinning. *Lithos*, 96(3-4): 543-566
- Wang Z X, Liu S A, Li S G, Liu D, Liu J G. 2022. Linking deep CO<sub>2</sub> outgassing to cratonic destruction. *National Science Review*, 9(6): nwac001
- Wu F Y, Yang J H, Wilde S A, Zhang X O. 2005. Geochronology, petrogenesis and tectonic implications of Jurassic granites in the Liaodong Peninsula, NE China. *Chemical Geology*, 221(1-2): 127-156
- Wu F Y, Yang J H, Xu Y G, Wilde S A, Walker R J. 2019. Destruction of the North China Craton in the Mesozoic. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 47(1): 173-195
- Xia Q K, Liu J, Liu S C, Kovács I, Feng M, Dang L. 2013. High water content in Mesozoic primitive basalts of the North China Craton and implications on the destruction of cratonic mantle lithosphere. *Earth and Planetary Science Letters*, 361: 85-97
- Xu W L, Wang Q H, Wang D Y, Guo J H, Pei F P. 2006. Mesozoic adakitic rocks from the Xuzhou-Suzhou area, eastern China: Evidence for partial melting of delaminated lower continental crust. *Journal of Asian Earth Sciences*, 27(2): 230-240
- Xu W L, Pei F P, Wang F, Meng E, Ji W Q, Yang D B, Wang W. 2013. Spatial-temporal relationships of Mesozoic volcanic rocks in NE China: Constraints on tectonic overprinting and transformations between multiple tectonic regimes. *Journal of Asian Earth Sciences*, 74: 167-193
- Xu Y, Zhang H F. 2020. Secular evolution of the lithospheric mantle beneath the northern margin of the North China Craton: Insights from zoned olivine xenocrysts in Early Cretaceous basalts. *GSA Bulletin*, 132(11-12): 2353-2366
- Xu Y G, Huang X L, Ma J L, Wang Y B, Iizuka Y, Xu J F, Wang Q, Wu X Y. 2004a. Crust-mantle interaction during the tectono-thermal reactivation of the North China Craton: Constraints from SHRIMP zircon U-Pb chronology and geochemistry of Mesozoic plutons from Western Shandong. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 147(6): 750-767
- Xu Y G, Ma J L, Huang X L, Iizuka Y, Chung S L, Wang Y B, Wu X Y. 2004b. Early cretaceous gabbroic complex from Yinan, Shandong province: Petrogenesis and mantle domains beneath the North China Craton. *International Journal of Earth Sciences*, 93(6): 1025-1041
- Xu Y G. 2014. Recycled oceanic crust in the source of 90-40 Ma basalts in North and Northeast China: Evidence, provenance and significance. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 143: 49-67
- Yang D B, Xu W L, Pei F P, Yang C H, Wang Q H. 2012. Spatial extent of the influence of the deeply subducted South China Block on the southeastern North China Block: Constraints from Sr-Nd-Pb isotopes in Mesozoic mafic igneous rocks. *Lithos*, 136-139: 246-260
- Yang J H, Chung S L, Zhai M G, Zhou X H. 2004. Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of mafic dikes from the Liaodong Peninsula, China: Evidence for vein-plus-Peridotite melting in the lithospheric mantle. *Lithos*, 73(3-4): 145-160
- Yang J H, Xu L, Sun J F, Zeng Q D, Zhao Y N, Wang H, Zhu Y S. 2021. Geodynamics of decratonization and related magmatism and mineralization in the North China Craton. *Science China Earth Sciences*, 64(9): 1409-1427
- Yang W, Li S G. 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
- Ye H, Zhang S H, Zhao Y. 2014. Origin of two contrasting latest Permian-Triassic volcanic rock suites in the northern North China Craton: Implications for early Mesozoic lithosphere thinning. *International Geology Review*, 56(13): 1630-1657
- Zhang H F, Sun M, Zhou X H, Fan W M, Zhai M G, Yin J F. 2002. Mesozoic lithosphere destruction beneath the North China Craton: Evidence from major-, trace-element and Sr-Nd-Pb isotope studies of Fangcheng basalts. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 144(2): 241-254
- Zhang H F, Sun M, Zhou X H, Zhou M F, Fan W M, Zheng J P. 2003. Secular evolution of the lithosphere beneath the eastern North China Craton: Evidence from Mesozoic basalts and high-Mg andesites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(22): 4373-4387
- Zhang S H, Zhao Y, Davis G A, Ye H, Wu F. 2014. Temporal and spatial variations of Mesozoic magmatism and deformation in the North China Craton: Implications for lithospheric thinning and decratonization. *Earth-Science Reviews*, 131: 49-87
- Zhou H, Pei F P, Xu W L, Wei J Y, Wang Y P. 2021a. Petrogenesis of Early Cretaceous volcanic rocks of the northeastern North China Craton: Constraints from elemental and Sr-Nd-Pb isotope geochemistry. *Lithos*, 392-393: 106149
- Zhou Z H, Meng Q R, Zhu R X, Wang M. 2021b. Spatiotemporal evolution of the Jehol Biota: Responses to the North China Craton destruction in the Early Cretaceous. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 118

(34): e2107859118

- 曹光跃, 薛怀民, 王金光. 2014. 郯庐断裂山东段(胶东)中生代中酸性火山岩的锆石 U-Pb 年代学及地球化学特征. 岩石矿物学杂志, 33(6): 1019-1038
- 邓晋福, 刘厚祥, 赵海玲, 罗照华, 郭正府, 李玉文. 1996. 燕辽地区燕山期火成岩与造山模型. 现代地质, 10(2): 137-148
- 冯亚洲, 杨进辉, 孙金凤, 张吉衡. 2020. 中生代古太平洋板块俯冲诱发华北克拉通破坏的物质记录. 中国科学: 地球科学, 50(5): 651-662
- 高明波, 高继雷, 张永明, 张照录, 刘丽萍, 李亚东, 马明, 刘晓. 2022. 鲁西莱芜火山岩杂岩体源区及成因: 地球化学、Sr-Nd-Pb 及锆石 Hf 同位素约束. 矿物岩石地球化学通报, 41(2): 287-306
- 郭壮, 李华侨, 彭昊, 冯彩霞, 陈俊瑾, 刘荣, 郭晓磊, 冯强. 2016. 郯庐断裂带中部基性岩墙成因: K-Ar 年代学、地球化学和 Sr-Nd 同位素证据. 矿物岩石地球化学通报, 35(3): 592-601
- 郭正府, 刘嘉麒, 汪筱林. 2003. 辽西中生代火山喷发对古气候和古脊椎动物生存环境的影响. 中国科学: 地球科学, 33(1): 59-71
- 胡芳芳, 范宏瑞, 杨进辉, 翟明国, 金成伟, 谢烈文, 杨岳衡. 2005. 胶东文登长山南花岗岩闪长岩体的岩浆混合成因: 闪长质包体及寄主岩石的地球化学、Sr-Nd 同位素和锆石 Hf 同位素证据. 岩石学报, 21(3): 569-586
- 黄迪颖. 2015. 燕辽生物群和燕山运动. 古生物学报, 54(4): 501-546
- 匡永生, 庞崇进, 罗震宇, 洪路兵, 钟玉婷, 邱华宁, 徐义刚. 2012. 胶东青山群基性火山岩的 Ar-Ar 年代学和地球化学特征: 对华北克拉通破坏过程的启示. 岩石学报, 28(4): 1073-1091
- 李伍平, 李献华, 路凤香. 2001. 辽西中侏罗世高 Sr 低 Y 型火山岩的成因及其地质意义. 岩石学报, 17(4): 523-532
- 李伍平. 2012. 辽西北票晚侏罗世蓝旗组火山岩的岩浆演化及其岩石成因. 地球科学: 中国地质大学学报, 37(1): 47-56
- 李晓勇, 范蔚茗, 郭锋, 王岳军, 李超文. 2004. 古亚洲洋对华北陆缘岩石圈的改造作用: 来自于西山东大岭组中基性火山岩的地球化学证据. 岩石学报, 20(3): 557-566
- 林景任, 谭东娟, 金焯. 1996. 鲁西地区中生代火成活动的  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年龄. 岩石矿物学杂志, 15(3): 213-220
- 凌文黎, 谢先军, 柳小明, 程建萍. 2006. 鲁东中生代标准剖面青山群火山岩锆石 U-Pb 年龄及其构造意义. 中国科学: 地球科学, 36(5): 401-411
- 刘洪, 邱检生, 王德滋, 罗清华. 2001. 鲁东胶莱盆地青山组火山岩的  $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$  定年——以五莲分岭山火山机构为例. 高校地质学报, 7(3): 351-355
- 路凤香, 郑建平, 张瑞生, 邵济安, 李伍平, 余淳梅. 2006. 地壳与弱化岩石圈地幔的相互作用: 以燕山造山带为例. 地球科学-中国地质大学学报, 31(1): 1-7
- 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
- 邱检生, 刘亮, 李友连. 2012. 山东汤头盆地钾质及钠质火山岩的年代学与地球化学: 对华北克拉通岩石圈减薄的启示. 岩石学报, 28(4): 1044-1056
- 邱检生, 刘亮, 李友连, 赵蛟龙. 2013. 沂沭断裂带中南段钾质火山岩的元素地球化学与 Sr-Nd-Hf 同位素组成及其对岩石成因的制约. 地质学报, 87(9): 1193-1210
- 邵济安, 路凤香, 张履桥, 杨进辉. 2005. 辽西义县组玄武岩捕虏晶的发现及其意义. 岩石学报, 21(6): 1547-1558
- 唐杰, 许文良, 王枫, 葛文春. 2018. 古太平洋板块在欧亚大陆下的俯冲历史: 东北亚陆缘中生代-古近纪岩浆记录. 中国科学: 地球科学, 48(5): 549-583
- 唐嘉锋, 刘玉琳, 王启飞. 2008. 山东中生代火山岩年代学研究. 岩石学报, 24(6): 1333-1338
- 王栋, 李红艳, 王天齐, 于洪, 宿建恒. 2022. 胶东地区东部晚侏罗世花岗岩锆石 U-Pb 定年、Hf 同位素特征及其对金成矿构造背景的限制. 岩石学报, 38(1): 41-62
- 王晓蕊, 高山, 柳小明, 袁洪林, 胡兆初, 张宏, 王选策. 2005. 辽西四合屯早白垩世义县组高镁安山岩的地球化学: 对下地壳拆沉作用和 Sr/Y 变化的指示. 中国科学: 地球科学, 35(8): 700-709
- 吴福元, 徐义刚, 高山, 郑建平. 2008. 华北岩石圈减薄与克拉通破坏研究的主要学术争论. 岩石学报, 24(6): 1145-1174
- 吴齐, 牛漫兰, 朱光, 王婷. 2014. 沂沭断裂带高桥盆地早白垩世火山岩的地球化学及岩石成因. 地质科学, 49(4): 1113-1131
- 许坤, 杨建国, 陶明华, 梁鸿德, 赵传本, 李荣辉, 孔慧, 李瑜, 万传彪, 彭维松. 2003. 中国北方侏罗系(VII)东北地层区. 北京: 石油工业出版社, 9-90
- 许文良, 王冬艳, 王清海, 裴福萍, 林景任. 2004. 华北地块中东部中生代侵入杂岩中角闪石和黑云母的  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  定年: 对岩石圈减薄时间的制约. 地球化学, 33(3): 221-231
- 徐星, 周忠和, 王原, 王敏. 2019. 热河生物群研究的回顾与展望. 中国科学: 地球科学, 49(10): 1491-1511
- 徐义刚, 李洪颜, 庞崇进, 何斌. 2009. 论华北克拉通破坏的时限. 科学通报, 54(14): 1974-1989
- 徐义刚, 李洪颜, 洪路兵, 马亮, 马强, 孙明道. 2018. 东亚大地幔楔与中国东部新生代板内玄武岩成因. 中国科学: 地球科学, 48(7): 825-843
- 杨承海, 许文良, 杨德彬, 刘长春, 柳小明, 胡兆初. 2006. 鲁西中生代高 Mg 闪长岩的成因: 年代学与岩石地球化学证据. 地球科学-中国地质大学学报, 31(1): 81-92
- 张宏福, 邵济安. 2008. 辽西义县组火山岩: 拆沉作用还是岩浆混合作用的产物? 岩石学报, 24(1): 37-48
- 张永清, 凌文黎, 张军波, 段瑞春, 任邦方, 杨红梅. 2019. 鲁东中生代青山群火山岩锆石 U-Pb 年代学. 地球科学, 44(1): 344-354
- 郑建平, 戴宏坤. 2018. 西太平洋板片俯冲与后撤引起华北东部地幔置换并导致陆内盆-山耦合. 中国科学: 地球科学, 48(4): 436-456
- 朱日祥, 徐义刚, 朱光, 张宏福, 夏群科, 郑天愉. 2012. 华北克拉通破坏. 中国科学: 地球科学, 42(8): 1135-1159
- 朱日祥, 徐义刚. 2019. 西太平洋板块俯冲与华北克拉通破坏. 中国科学: 地球科学, 49(9): 1346-1356
- 朱日祥, 周忠和, 孟庆任. 2020. 华北克拉通破坏对地表地质与陆地生物的影响. 科学通报, 65(27): 2954-2965

(本文责任编辑: 龚超颖; 英文审校: 张兴春)