“燕山运动”与东亚大陆晚中生代多板块汇聚构造——纪念“燕山运动”90周年

董树文^{1,2*}, 张岳桥¹, 李海龙^{2,3}, 施炜³, 薛怀民⁴, 李建华³, 黄始琪³, 王永超²

1. 南京大学地球科学与工程学院, 南京 210023;

2. 中国地质科学院地球深部探测中心, 北京 100037;

3. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

4. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

* E-mail: swdong8888@126.com

收稿日期: 2017-12-11; 收修改稿日期: 2018-06-13; 接受日期: 2018-10-30; 网络版发表日期: 2019-02-28

国家重点研发计划项目(编号: 2017YFC0601402)和国家科技专项项目(编号: SinoProbe-8)资助

摘要 翁文灏先生提出“燕山运动”已经整整90周年, 燕山运动对中国大地构造历史研究具有特殊的意义. 文章回顾了“燕山运动”提出、发展和构造幕划分沿革历史, 介绍与燕山运动相关的构造事件研究的最新成果和进展, 重点阐述了中国大陆不同地区对燕山运动的沉积、变形和岩浆响应, 进一步梳理了燕山运动幕式演化历史及其动力作用性质, 探讨了燕山运动发生的板块动力学背景及其全球构造意义. 研究认为, 燕山运动是三叠纪东亚大陆雏形形成后的一次重大地质构造事件, 起始于中侏罗世(170±5)Ma, 先后经历175~136Ma主变形期、135~90Ma主伸展期和89~80Ma的弱挤压变形期等3个主构造运动时期. 主变形期包含了北京西山和燕山地区发育的2个地层不整合事件: 髫髻山底部不整合和张家口底部不整合, 对应于翁文灏先生1928年定义的A幕和B幕. 从区域上看, 晚中生代燕山运动的启动和发展与古太平洋、新特提斯和蒙古-鄂霍茨克三大构造域洋壳俯冲消减历史和板块汇聚碰撞过程密切相关. 晚侏罗世, 东亚周邻多板块汇聚形成了3个巨型陆缘汇聚造山系统(北部蒙古-鄂霍茨克碰撞造山带、东部陆缘Cordillera型俯冲增生造山系统、西部班公湖-怒江俯冲碰撞造山系统)以及向陆内变形扩展系统, 包括多方向的陆内造山带、鄂尔多斯和四川盆地的环形褶皱山系. 陆内变形表现为远离汇聚板块边缘的大规模逆冲-褶皱构造、古老造山带的复活和广泛的岩浆成矿作用. 结合古大陆分离-聚合过程的周期演变规律, 本文提出晚中生代东亚多板块汇聚可能是未来亚美超大陆的起始点, 燕山运动应是亚美超大陆诞生的“第一声啼鸣”.

关键词 燕山运动, 晚侏罗世(170±5)Ma, 东亚汇聚, 陆内造山, 亚美超大陆

中文引用格式: 董树文, 张岳桥, 李海龙, 施炜, 薛怀民, 李建华, 黄始琪, 王永超. 2019. “燕山运动”与东亚大陆晚中生代多板块汇聚构造——纪念“燕山运动”90周年. 中国科学: 地球科学, 49: 913–938, doi: 10.1360/N072017-00432

英文引用格式: Dong S, Zhang Y, Li H, Shi W, Xue H, Li J, Huang S, Wang Y. 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: 1888–1909, <https://doi.org/10.1007/s11430-017-9297-y>

1 燕山运动及构造分期

1.1 “燕山运动”的提出

“燕山运动”是由中国著名地质学家翁文灏先生首创,他在1926年东京第三届泛太平洋科学大会上宣读了“中国东部造山运动”的论文,首次提出“燕山运动”一词(Wong, 1926),次年正式发表在中国地质学会会志(Wong, 1927)。燕山运动的提出主要基于由中国老一辈地质学家翁文灏、丁文江、章鸿钊、叶良辅等组织完成的首幅1:50000地质调查《北京西山地质志》的成果总结。翁文灏根据北京西山地区观察发现的侏罗纪髫髻山组火山岩底部的不整合面与辽西地区火山岩底部的不整合面进行对比,意识到这一不整合面具有区域构造意义,命名为“燕山运动”(Yenshan Movement),并将之推广到整个中国东部地区(Wong, 1927)。但其他学者如谢家荣等,则对北京西山髫髻山火山岩建造之下的这个地层不整合面表示怀疑(Xie, 1933)。1928年,翁文灏进一步将燕山运动划分为A、B两幕,并将A幕称为燕山运动的绪动。1929年,翁文灏(Wong, 1929)再次对燕山运动做了三期划分:A期地壳变动幕、中间火山幕、B期地壳变动幕,并认为A期地壳变动地层宽缓折曲或拗曲,大部分倾斜不甚急,而局部的上下升降颇大;中间期表现为强烈火山喷发;B期地壳变动幕地壳变动复烈,在特别地带更发生剧烈褶曲与逆掩构造。但鉴于当时地质调查程度,翁文灏先生对于燕山运动的主幕到底是A幕抑或B幕,一直存疑。丁文江(1929)对燕山运动概念进行了修正,认为早侏罗世燕山运动已经开始。鉴于当时缺乏有效的定年技术,依据地层不整合接触关系确定构造运动,其构造运动时代完全依赖于沉积地层时代(古生物对比)的划分,因而燕山运动的起始时代是不确定的。

1.2 燕山运动构造分期

自从翁文灏提出了燕山运动及其幕式演化的概念后,对燕山运动的研究从没有间断。Hsieh(1936)根据北京西山地区晚中生代2套火山岩系(包括早侏罗世的南大岭组火山岩),将燕山运动划分出5期,其中,第1期为造陆而非造山,第2、3和4期相当于翁文灏的A期、B期和中间期,第5期作为燕山运动的尾声。黄汲清(1960)根据对河北及山东、浙江、广东、四川龙门山等地区的侏罗纪-白垩纪沉积建造和地层接触关系的

对比分析,将燕山运动划分为5个运动期,分别对应5个地层不整合面,总结了多旋回的燕山运动演化历史。赵宗溥和何铸文(1959)梳理了燕山运动的概念,认为前人的划分方案扩大了燕山运动的原意,并强调燕山运动仅指中侏罗世中晚期不整合为代表的造山运动,回归到翁文灏先生最初的概念。任纪舜等(1998)从多旋回角度,将燕山运动分为早、中、晚三个旋回,时限从早侏罗世至晚白垩世。赵越等(1990, 2002)将燕山运动分为3期:早燕山期($J_1 \sim J_2$)、中燕山期($J_2 \sim J_3$)、晚燕山期($K_1 \sim K_2$)。崔盛芹等(2002)将燕山运动划分为初始造山(J_1)、中侏罗世早期造山(J_2)、峰期造山(J_3)、晚期造山(K_1)、后造山(K_2)五个构造幕。随后,董树文等(2007, 2008)和Dong等(2008, 2015)对燕山运动在东亚大陆诱发的地质响应进行了系统梳理,并将其定义为起始在侏罗纪/白垩纪之交($(165 \pm 5) \text{Ma}$),具区域规模和岩石圈尺度的一期重大构造事件。

总的来看,燕山运动多幕式构造变动奠定了中国主要大地构造单元雏形,在中国大陆产生了复杂的构造变形图像和盆山构造格架(崔盛芹, 2002; 董树文等, 2007, 2008; 赵越等, 2004b; Dong等, 2015)。由此产生的关键问题是,这样一期强烈的构造运动产生的构造几何形迹及力学机制如何?在全球构造中具有什么样的地位?

2 燕山运动构造事件再认识

上述关于燕山运动的概念及其分期基本沿袭了槽台构造旋回或褶皱旋回的思想,强调了大地构造发展的阶段性和周期性。在传统构造旋回理论中,地层不整合代表了强烈的褶皱事件,且褶皱作用的时间相对较短,构造的发展是相对平静时期与激烈运动时期的交替,每次更迭构成一个旋回(Huang, 1945)。

经过几十年不断调查研究,尤其是现代构造地质学研究手段的应用和构造岩浆事件的高精度测年数据的积累,地质学家们在不同地区燕山运动构造事件发生的时间、幕式演化阶段、动力作用方式和深部作用过程等方面,取得了重要进展。笔者及研究团队系统梳理了中国大陆与燕山运动相关的沉积、变形、岩浆和变质资料,编制了中国大陆燕山运动大地构造纲要图(图1)和燕山期构造-沉积-岩浆演化综合对比图(图2)。在此基础上,深化对燕山运动的本质和动力学机制等

图 1 中国大陆燕山期大地构造纲要简图

主要构造带: MOOB, 蒙古-鄂霍茨克造山带; HLYO, 喜马拉雅造山带(包括一些喜马拉雅地体); TSO, 天山造山带; QLDO, 秦岭-大别造山带; THO, 太行造山带; YSB, 阴山-燕山褶皱冲断带; JNOB, 江南造山带; EKLO, 东昆仑造山带; JSSZ, 金沙江缝合带; BNSZ, 班公湖-怒江缝合带; SPGTS, 松潘-甘孜构造带; SHOB, 锡霍浩特-阿林增生造山带; NHAC, 那丹哈达增生杂岩带; CNLB, 长乐-南澳构造带; LYRB, 下扬子构造带; TLF, 郯庐断裂带; ATF, 阿尔金断裂; CAO, 中亚造山带; OTZ, 乌川构造带; GM, 京畿地体

科学问题的认识.

2.1 燕山地区不整合事件与反序逆冲构造

中晚侏罗世, 在燕辽带普遍发育砾石-火山岩组合, 在北京西山一带称之为“龙门-九龙山-髻髻山”组合, 不整合于煤系地层之上; 在辽西称之为“海房沟-兰旗”组合, 同样不整合在煤系地层之上, 翁文灏(1928)称之为下火山岩组合. 这套砾岩-火山岩组合的底部年龄, 即不整合面形成的时代为175~160Ma(赵越等, 2002, 2004a; 徐刚等, 2005; 刘健等, 2006)或172~164Ma(Li等, 2016). 考虑到陆相地层的穿时性,

横向上存在一定的变化. 这期不整合面的下覆普遍发育挤压变形构造, 如南大寨-八宝山断裂的逆冲构造, 承德161~148Ma逆冲推覆体, 十三陵161~141Ma冲断褶皱构造, 云蒙山143~141Ma强烈褶皱和变质作用, 四合堂和古北口148~143Ma逆冲推覆构造等(Davis等, 1996, 1998, 2001; Li等, 2016; 张长厚等, 2002, 2004a, 2004b, 2006, 2011). 在燕山中段南缘, 这一时期的挤压变形还伴随着马兰峪核部基底地层的剥露(李海龙等, 2008). 在髻髻山组/兰旗组喷发的中后期, 区域上形成一套广布的砾石层, 即土城子-后城组砾石层, 沉积于156~139Ma(赵越等, 2002, 2004a; 徐刚等, 2005; 刘健

图2 中国大陆燕山期构造-沉积-岩浆演化综合图

JLKF, 中侏罗世九龙山组; TJSF, 华北晚侏罗世髻髻山组; ZJKF, 华北早白垩世张家口组; NYF, 南园组; SMSG, 华南晚白垩世石帽山群

等, 2006)或152~135Ma(Li等, 2016). 这期挤压事件持续约~30~35Ma, 结束后, 区域进入伸展环境, 发育广布的张家口组火山岩, 普遍认为其形成时间是~135Ma (Dong等, 2015; Li等, 2016).

2.2 大青山逆冲推覆构造与侏罗纪生长地层

阴山带东部的大青山地区, 侏罗纪构造发育齐全, 主要包括南侧的大青山褶皱-逆冲系统和北侧的侏罗纪石拐盆地(郑亚东等, 1998; Darby等, 2001; Ritts等, 2001). 大青山褶皱-逆冲系统分为东、西两段(Gong等, 2015; 张进江等, 2009). 西段主要由一系列东西向展布、由南向北逆冲的构造岩片相互叠置而成, 推覆距离约10km(刘正宏等, 2003); 向东则逐渐过渡为北东向展布的、由南东向北西运移的大型低角度逆冲推覆构造, 推覆距离超过35km(郑亚东等, 1998). 由于缺乏可靠的同位素测年数据, 对大青山褶皱-逆冲系统的形成时代尚未达成统一认识. 郑亚东等(1998)认为推覆事件发生的时代应介于晚侏罗世至早白垩世之间, 与燕山地区以承德逆冲断层为代表的推覆构造体系为同期产物.

大青山石拐盆地处于大青山褶皱-逆冲系统变形前锋, 是阴山带内保留较为完整的侏罗纪盆地. 盆地下

部为富含煤层的早-中侏罗世五当沟组和召沟组陆源碎屑沉积(Ritts等, 2001); 中部为中侏罗世晚期长汉沟组, 该组在垂向上可清楚地分为向上变细再变粗的两大岩性旋回, 盆地上部为晚侏罗世大青山组砾质冲积扇及辫状河道沉积. Wang等(2017)对该盆地中下侏罗统煤系地层的同构造楔状沉积体和生长地层进行了研究, 并结合生长地层上部火山灰层的锆石U-Pb年龄, 证实大青山陆内挤压变形发生在中-晚侏罗世(~170±5)Ma(Wang等, 2017).

2.3 北山逆冲推覆构造

在北山与南戈壁地区, Zheng等(1996)发现了亚干特大型逆冲推覆构造带. 该逆冲系统呈东西向展布, 推覆距离超过120~180km. 上盘地层主要为中元古代白云质灰岩, 主体自南向北推覆于不同时代地层之上, 其中卷入变形的最新地层为中下侏罗统煤系地层. 继这期挤压逆冲事件之后, 区域地壳发生大规模伸展垮塌和断陷, 形成亚干变质核杂岩构造(Zheng等, 1996). 据同位素年代学资料, 变质核杂岩下盘低角度剪切带中糜棱岩的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 坪年龄为129~126Ma(Webb等, 1999), 代表了区域地壳大规模伸展的时代和变质核杂岩形成的时代.

2.4 山西宁武-静乐盆地沉积相变记录

宁武-静乐盆地位于山西台地褶皱带西侧的吕梁山北部地区, 是一个残留的向形褶皱盆地. 研究发现(李振宏等, 2013, 2014), 中侏罗统云岗组沉积序列由早期的湖进向湖退转换, 指示了区域由伸展向挤压环境转换, 代表了源区构造抬升与造山作用的开始. 云岗组底部砾岩层中碎屑岩样品中的主量元素CaO、CO₂、Fe₂O₃+FeO的含量以及Fe₂O₃/FeO的比值迅速增加, 反映了源区的剥蚀程度突然加剧. 稀土元素标准化曲线发生突变, 表明有同期火山物质的注入, 暗示着源区构造活动性突然加强. 参照云岗组顶部凝灰质泥晶灰岩的锆石年龄(161±1)Ma, 根据沉积厚度和沉积速率推算, 云岗组底部砾岩的发育时限约为168Ma, 该年龄代表了该区燕山运动的起始时限(Li Z H等, 2014).

2.5 大巴山陆内造山作用

发育于扬子地块北缘的大巴山是侏罗纪陆内造山带(董树文等, 2006, 2014; 张岳桥等, 2010), 由一系列NNW-NW-EW走向褶皱-冲断构造组成向南西显著突出的弧形构造带, 与WNW-ESE走向秦岭-大别造山带的几何走向明显不协调(张二朋等, 1992; 张国伟等, 2001; Ratschbacher等, 2003; Dong等, 2013; Li J H等, 2013a, 2015). 大巴山构成了围绕四川盆地(扬子克拉通)周缘山脉群的北东部分(张岳桥等, 2011). 横穿大巴山山脉的深反射地震剖面揭示出大巴山是一个形成于上地壳滑脱带之上的陆内薄皮造山带, 表明大巴山下部没有山根(Dong等, 2013). 以NNW-NW-EW弧形展布的城口断裂为界, 大巴山可分为北大巴山和南大巴山两个构造单元. 南大巴山呈弧形展布, 其东、西端均与北大巴山NW-SE线性构造线高角度截交, 构造变形样式以逆冲断片的叠瓦式堆叠及隔档式褶皱为主, 背斜紧闭, 向斜宽缓, 为一个具多层滑脱特征的薄皮褶皱冲断构造带(Li C X等, 2015; Li等, 2017; Liu等, 2017). 褶皱冲断构造卷入变形的最新地层为中侏罗统, 而下白垩统产状平缓, 表明褶皱冲断构造形成于中侏罗世之后, 早白垩世之前(Shi等, 2012). 北大巴山发育2条主要的基底韧性剪切带, 南部剪切带走向NW-SE, 以由NW向SE逆冲剪切变形为主; 北部剪切带走向NNW-SSE, 以右行走滑剪切变形为主. 黑云母和白云母⁴⁰Ar/³⁹Ar定年结果表明, 南部剪切带逆冲剪切和北

部剪切带右行走滑剪切时代分别为222~189和178~163Ma(Li等, 2013a). 胡健民等(2009, 2011)在剪切带北侧饶峰镇、两河口镇糜棱岩中获得的白云母和黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar坪年龄分别为(169±1)Ma和(161±2)Ma. 李鹏远等(2010)在城口断裂中部钟亭地区获得的同构造期绢云母⁴⁰Ar/³⁹Ar年龄为(143±1)Ma, 证实大巴山逆冲扩展变形的时代可持续至早白垩世初期. 上述年龄资料将北大巴山燕山期陆内挤压变形的时代限定为178~143Ma. 磷灰石裂变径迹测年和热历史模拟结果证实, 主挤压变形结束后, 大巴山在白垩纪-新生代经历了幕式的缓慢和快速隆升过程(李建华等, 2010; Shi等, 2012; Li等, 2017).

2.6 郯-庐断裂左旋走滑剪切变形

近年来, 国内学者对郯-庐断裂带中南段详细的野外调查研究, 识别出多条基底韧性走滑剪切带, 包括: 大别造山带东缘走滑韧性剪切带(朱光等, 2005a; Zhu等, 2005; 王勇生和朱光, 2004; 王勇生等, 2004)、肥东走滑韧性剪切带(朱光等, 2005a; Zhu等, 2005; 宋传中等, 2003)、张八岭走滑韧性剪切带(胡博和张岳桥, 2007)等. 在苏鲁超高压变质带西缘也发现了平行郯-庐断裂带的韧性剪切变形(朱光等, 2004, 2005b). 对这些韧性剪切带内全岩和单矿物的Ar-Ar年代学测试分析结果表明, 这些韧性剪切带经历了多期隆升冷却历史: 晚三叠-早侏罗世(180~200Ma、晚侏罗世155~165Ma, 和早白垩世(140~125Ma)(朱光等, 2004, 2005a, 2005b; Zhu等, 2005; 王勇生等, 2004; Wang等, 2006). 由于受到白垩纪强烈构造-岩浆热事件的影响, 剪切带中云母等矿物的Ar-Ar系统遭受部分重置, 统计结果显示, 大部分单矿物Ar-Ar坪年龄与岩浆侵位年龄一致(Zhang等, 2008). 最新的研究表明, 通过对卷入剪切变形和未变形岩体的锆石U-Pb测年, 可以帮助确定剪切带变形的时限. 王微等(2016)对肥东桃源地区剪切带带内发生同构造变形的长英质糜棱岩以及伟晶岩开展了锆石U-Pb测年, 有效限定了带内韧性剪切作用时间在140~124Ma. Zhang等(2018)对东北鸭绿江剪切带开展了详细的几何学、运动学和年代学研究, 通过对剪切带中卷入剪切变形和未变形的岩体的锆石U-Pb测年结果, 制约了剪切变形发生的时间在146~131Ma. 这些研究结果显示, 郯庐断裂带剪切变形与燕山运动B幕同期.

2.7 华南褶皱构造带与东南沿海变质变形事件

华南地区~1300km宽的逆冲褶皱构造带主体是燕山期陆内变形的结果(张岳桥等, 2012)。根据褶皱构造卷入的最新地层及其与岩体的侵位关系, NE-NNE向褶皱主要形成于早、中侏罗世, 即160Ma之前, 与燕山地区髻髻山底部不整合事件(A幕)相当。

沿华南东部沿海一带出露一套角闪岩相的变质岩, 前人或称为长乐-南澳断裂带, 或平潭-东乡变质带, 主要由混合岩、片麻岩、混合片麻岩、片麻状花岗岩等组成(Cui等, 2013)。对这套强烈变形岩石淡色体和混合岩的锆石进行U-Pb测年结果显示, 时代集中在150~160和137~147Ma两个区间(张岳桥等, 2012; Cui等, 2013), 指示这套地层的碎屑来源主要为武夷山地区大量出露的中晚侏罗世和早白垩世岩体。这套地层被大量的未变形的白垩纪岩体侵入, 年龄在133~118Ma, 从而限定了平潭-东乡变质带变质变形作用主要发生在133Ma之前, 很可能在140~135Ma, 即早、中白垩世。在时间上, 这期变质变形作用与燕山地区张家口底部变形幕(B幕)相当。

2.8 东北地区基底中侏罗世变形变质事件与古太平洋增生楔

在中国东北地区, 大兴安岭北部出露一套变质岩系, 命名为落马湖群、新开岭群、风水沟河群等。对这套变质岩进行锆石U-Pb年代学研究发现, 落马湖群变质时代为中晚侏罗世(159Ma), 风水沟河群变质时代也为中晚侏罗世(163Ma)等(董树文等, 2016)。这些中生代变质变形事件年龄与燕山运动A幕相当, 反映了东北地区对燕山期造山事件的响应。另外, 在东北的小兴安岭、松辽盆地基底发育一套发生强烈剪切变形的165~160Ma片麻状花岗岩, 表明松嫩-张广才岭地块在中侏罗世发生了挤压变形(吴福元等, 2000; 高福红等, 2007; 许文良等, 2008)。此外, 松嫩-张广才岭东缘牡丹江构造带内发育黑龙江杂岩, 杂岩内黑云母和白云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为184~174Ma, 表明挤压变形时间集中在中侏罗世, 其记录了松嫩-张广才岭东缘中生代陆缘增生事件(Wu等, 2007)。

2.9 古生物群落交替历史

燕辽生物群和热河生物群是以中国燕山地区两个

中生代中晚期特异埋藏生物群, 对燕山运动的划分和环境响应研究至关重要(王五力等, 1987; 任东等, 1995, 2002; 季强等, 2005)。最近, 综合同位素年代学、岩石地层学和生物地层学新进展, 黄迪颖(2015)提出燕山运动第一幕(A幕)为168Ma。标志性燕辽生物群的道虎沟化石层的底砾岩角度不整合于前寒武系变质岩之上, 代表燕山运动的启动, 对应了以燕辽划蜻-“滦平真叶肢介”-费尔干蚌-初鰵为代表的道虎沟生物群, 为中侏罗世中晚期。随后的髻髻山期火山喷发, 燕辽生物群的早期群落随之瓦解并迅速扩散演化, 发展形成燕辽生物群晚期组合, 如玲珑塔生物群, 以柴达木叶肢介-额尔古纳蚌-古鳕为代表, 为晚侏罗世早期。燕山运动第二幕(B幕)发生于土城子组和张家口-大北沟组或义县组之间, 从而造就了著名的热河生物群, 它与燕辽生物群的过渡存在于土城子组。

3 燕山运动幕式演化和动力学的重新厘定

前人对燕山运动分期和构造期次的划分通常基于陆相盆地中地层不整合关系的对比, 但“构造运动期”或“构造运动幕”这些概念没有赋予构造动力学机制。前已述及, 大陆动力学研究要求将构造运动或造山作用作为一个过程来描述, 不仅有挤压造山作用, 也有伸展断陷作用, 同时还有挤压走滑作用等。为此, 我们对照翁文灏1929年提出的燕山运动方案(Wong, 1929), 将燕山运动厘定为3个构造期, 并从动力学角度对每一个构造期赋予明确的构造含义: 挤压期(~175~136Ma)、主伸展期(135~90Ma)、弱挤压期(~80Ma)(图2; 董树文等, 2007; Dong等, 2015)。这一划分方案与最新发表资料不谋而合, 但在构造事件的精细年代上, 存在略微差异, 如Liu等(2017)的划分方案: 以NW-SE挤压为主的地壳缩短期(约200~137Ma)、以NWW-SEE伸展为主的地壳裂陷期(136~101Ma)、晚白垩世(100~67Ma)的S-N伸展期和NWW-SEE挤压期; Wang等(2018)的划分方案: 170~155Ma以地壳缩短和挤压变形为主, 130~110Ma以地壳侧向挤出和伸展变形为主, 75~65Ma以垂向隆升和地壳伸展为主。本文将侏罗纪-白垩纪时期发生的燕山运动作为一个完整的构造作用过程, 从地球动力学角度阐述了三个构造期的时代及其动力学含义。

(1) 强挤压造山期(约175~136Ma): 表现为幕式挤

压变形, 对应燕山地区2次地层不整合事件: 早期为强挤压变形期, 对应髻髻山底部不整合事件170~160Ma; 晚期对应张家口不整合事件150~135Ma. 从中侏罗世煤系地层之上的砾石层到张家口火山岩之下的一套构造地层, 其中发育有埃达克质的髻髻山组火山岩、后城组或土城子组的砾岩、170~140Ma的逆冲推覆构造和磨拉石建造等, 它们均为挤压变形的标志, 形成了不同方向的侏罗纪山脉, 如阴山-燕山近东西向山脉、贺兰山近南北向山脉、大巴山北西方向的弧形山脉、川东北NE-SW走向褶皱冲断带等(Liu, 1998; 刘少峰等, 2004; Liu等, 2012; Dong等, 2013; Li等, 2018). 这期变形分布范围遍布中国大陆、甚至东亚和中亚大陆, 成为东亚区域的基本定型构造(任纪舜等, 1990). 值得注意的是, 175~165Ma强挤压变形事件结束后, 中国大陆东部爆发大规模岩浆活动, 以晚侏罗世最强, 形成~160Ma岩浆峰期, 尤其华南大陆最为显著, 其反映了这期挤压变形过程中存在一期短暂的大陆地壳伸展松弛事件.

(2) 主伸展期(135~90Ma): 该期以广泛覆盖中国东部135~90Ma的火山岩和侵入岩为特征, 底部常有砾岩. 主伸展的时限证据, 包括有华北张家口火山岩底部年龄135Ma(牛宝贵等, 2004), 华南衡山变质核杂岩拆离带糜棱质钠长岩中锆石年龄136Ma(Li等, 2013b), 华北云蒙山变质核杂岩韧性剪切带角闪石、黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 冷却年龄135~126Ma(陈印等, 2014), 胶东鹊山变质核杂岩起始时代135Ma和结束时代105Ma(夏增明等, 2016)等. 虽然变质核杂岩伸展时间存在不同, 有先有后, 但大部分资料证实, 区域地壳伸展主体从~135Ma开始, 并可以延续到90Ma(Davis和Darby, 2010; Li J H等, 2012; Wang等, 2012). 这期伸展影响到蒙古、甚至俄罗斯贝加尔地区, 构成了覆盖东亚的早白垩世红层盆地和变质核杂岩群. 值得注意的是, 在华南大陆, 早白垩世末期(117~108Ma)存在一期NW-SE向挤压事件, 其终止了与伸展相关的活动大陆边缘岩浆活动, 并引发了断陷盆地的广泛构造反转及长乐-南澳带的变形变质作用(Li等, 2014a).

(3) 弱挤压变形期(~80Ma): 上下白垩统之间的不整合面早已被认识, 丁文江(1929)指出, “谢家荣和赵亚曾先生在三峡地区工作显示, 褶皱作用发生于被认为是下白垩统的秭归层之后, 东湖红色砂岩之前. 应当记住刘、赵二先生在浙西南发现第二次运动, 白垩

纪建德凝灰岩、熔岩和砂岩也被红色砂岩系不整合覆盖. 湖南田奇雋先生写到, 湖南造山运动发生在秭归层的相当地层和红色砂岩之间”. 早白垩世末期至晚白垩世早期, 华北地区以NW-SE向挤压为主, 使早期形成的伸展断陷盆地发生不同程度的构造反转, 也使中国东部郯庐断裂系发生左旋走滑活动(Zhang等, 2003). 浙江金衢盆地上白垩统下部发育角度不整合面, 可能记录了这次挤压变形事件(Li等, 2014b).

4 燕山运动深部过程的岩浆作用

燕山运动陆内造山作用伴随着大规模的岩浆活动, 形成了东亚大陆东部巨型晚中生代岩浆岩带(邓晋福等, 2015). 燕山运动在东亚东部不同地区作用方式的存在差异性, 造成了岩浆岩时空分布的不均匀性. 总体上, 该带沿大陆边缘呈带状不均衡展布, 具有面-带结合的特点(图1). 其中中国东北大兴安岭及其邻近地区、俄罗斯远东的鄂霍茨克地区显示大面积“面状”分布的特点, 华南东部地区也呈大面积岩浆岩集中分布. 但该巨型岩浆岩带内还同时存在若干成带状展布的次级岩浆岩带, 包括华北克拉通北缘的阴山-燕山-辽西岩浆岩带、大别山-桐柏山-秦岭岩浆岩带、长江中下游岩浆岩带、浙-赣岩浆岩带、胶东地区岩浆岩带等. 根据近几年获得的晚中生代岩浆岩的年龄资料, 结合已发表的同位素年龄(主要为锆石U-Pb年龄、部分镁铁质火山岩采用的 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄)(图3e), 明显指示了燕山期幕式岩浆作用的特点, 主要集中在几个岩浆活动峰期: ~160Ma、约140~120Ma、约110~90Ma.

4.1 华南地块

华南晚中生代的岩浆活动从早侏罗世到晚白垩世都不同程度的存在, 但以早白垩世最为强烈, 峰值约130~120Ma, 另外在~160Ma的晚侏罗世构成一中等强度的峰, 在~100Ma的早白垩世末期构成一弱峰(图3a). 华南内部(主要指武夷山及其以西的南岭地区)晚中生代岩浆活动持续的时间很长, 从早侏罗世到晚白垩世都有, 以晚侏罗世最强, 峰值~160Ma. 在~95Ma的晚白垩世早期构成一次强峰(图3b). 另外, 区内早侏罗世-中侏罗世早期也有较强的岩浆活动. 其他时期, 甚至早白垩世的岩浆活动则比较微弱. 华南东部沿海(主要指武夷山以东的浙东、闽东以及广东东部)虽然岩浆活动

图3 华南地区燕山期岩浆作用年龄频率

持续的时间也较长,但岩浆活动主要集中在白垩纪(邱检生等, 2008, 2012a; 段政等, 2013; 李良林等, 2013; Guo等, 2012; Liu Q等, 2012; Liu S F等, 2015; Chen等, 2016),并在~140Ma的早白垩世早期、~105Ma的早白垩世晚期以及~95Ma的晚白垩世早期构成3个强度不等的峰(图3c),而晚侏罗世及其以前的岩浆活动相对较弱(Li等, 2014a)。总体而言,自华南内部向东部沿海,岩浆活动显示随时间具有向东迁移的趋势(图3b和3c; Li等, 2014a)。

扬子地块东段的中生代岩浆作用集中分布在三个区带,江南造山带东段、长江中下游地区以及大别山造山带,岩浆活动的年龄谱也存在着差异。其中,江南造山带东段(主要指江山-绍兴结合带以北的皖南、浙西北和赣东北-赣中地区)的岩浆活动以早白垩世占绝对优势,峰值135Ma(图3d)。晚侏罗世以及中-早侏罗世也有一定规模的岩浆活动,晚白垩世岩浆活动则很微弱(薛怀民等, 2009; 王强等, 2012; 周翔等, 2012; 李双等, 2014; 李斌等, 2015; Li H等, 2012; Liu等, 2012;

Wang等, 2012; Wu等, 2012; Su等, 2013; Song等, 2014).

长江中下游地区的岩浆活动时代为早白垩世(145~125Ma)(谢桂青等, 2006, 2009; 薛怀民等, 2006, 2010, 2012, 2013, 2015; 薛怀民, 2016; 范裕等, 2008, 2010; 吴才来等, 2008, 2010, 2013; 吴淦国等, 2008; 周涛发等, 2008, 2010, 2011; 曾键年等, 2010; 袁峰等, 2010, 2011; Xie等, 2011; Yao等, 2015), 在~130和~140Ma处构成强峰(图3e), 分别对应着断陷盆地内火山作用的时间和与铜成矿有关的具埃达克质浅成-超浅成侵入体的形成时间. 另外在约105Ma处有一弱峰, 对应的是长江中下游岩浆岩带最东段-宁镇地区岩体的形成时间(曾键年等, 2013; 王小龙等, 2014).

大别山造山带内晚中生代的岩浆活动也限于早白垩世(马昌前等, 2003; 王勇生等, 2010; 李鑫浩等, 2015; 刘晓强等, 2015; Zhao等, 2004; Wang等, 2007), 峰值~130Ma(图3f). 但与长江中下游地区相比, ~140Ma前后的岩浆活动较弱, 且缺少~105Ma早白垩世晚期的岩浆活动.

4.2 华北地块

华北地块晚中生代的岩浆岩主要分布燕山-辽西、胶东、辽东、吉南地区, 另外在华北西部的太行山区及南缘徐州-蚌埠一带也有少量分布. 岩浆活动从早侏罗世一直持续到晚白垩世, 以早白垩世最为强烈, 峰值约128Ma, 在~160和~175Ma形成两个较弱的活动峰期(图4a; 柳永清等, 2003, 2006; 袁洪林等, 2005; 张宏等, 2005, 2008a, 2008b; 吴福元等, 2006; 胡健民等, 2007; 杨进辉等, 2008; 刘俊来等, 2011; Wu等, 2005a, 2005b, 2011; Pei等, 2011a, 2011b; Yang等, 2014; Zhang等, 2014).

华北北缘是岩浆活动的集中区, 岩浆活动以早白垩世最为强烈, 其次为晚侏罗世. 另外, 在早侏罗世晚期-中侏罗世也有较强的岩浆作用(图4b). 以火山岩为例, 空间上, 晚侏罗世的埃达克质火山岩主要位于燕山-辽西火山岩带的南东侧, 而早白垩世的火山岩主要位于北西侧(图1), 显示火山活动随时间向北西方向迁移的趋势, 可能与古太平洋板块的俯冲有关.

除了华北北缘外, 整个东亚大陆中部缺少早-中侏罗世的岩浆岩(重力梯度带以西). 华北克拉通西部的阴山地区主要发育早白垩世的岩浆活动, 年龄从142~114Ma, 而侏罗纪的岩浆活动很微弱(陈斌等,

2005; 杨兴科等, 2008; 申志超等, 2015); 南太行山中生代岩浆岩的时代均为早白垩世, 年龄从139~125Ma(周凌和陈斌, 2005; Ying等, 2007).

华北西部和南缘的岩浆活动时间为166~110Ma(图4c). 西南缘的小秦岭地区晚侏罗世岩浆作用的年龄为158~148Ma, 峰值为156Ma和149Ma. 早白垩世岩浆作用的年龄为142~112Ma, 峰值为141、131~129和117Ma(李厚民等, 2007; 周红升等, 2008; 江思宏等, 2009; 江小均等, 2010; 高昕宇等, 2012; 杨阳等, 2012); 华北克拉通东南缘徐淮-蚌埠地区中生代岩浆岩主要为早白垩世, 时代从132~112Ma(靳克等, 2003; 徐祥等, 2005; 杨德彬等, 2005, 2008), 仅在蚌埠隆起的荆山有一个中侏罗世含石榴石的花岗岩体出露, 时代为166~160Ma(许文良等, 2004a).

胶东中生代的岩浆岩分为晚侏罗世和早白垩世两期(关康等, 1998; 苗来成等, 1998; 邱检生等, 2012a; 郭敬辉等, 2005; 凌文黎等, 2006; 张田和张岳桥, 2007; 张岳桥等, 2007; 邱连贵等, 2008; 王世进等, 2009, 2010; 匡永生等, 2012; 曹光跃等, 2014; 江鹏, 2015), 其间有20~30Ma的岩浆活动寂静期(图4d). 早白垩世岩浆作用的年龄为128~100Ma, 在~120Ma处构成一强峰; 晚侏罗世岩浆作用的年龄为165~152Ma, 在~160Ma处构成一中等强度的峰. 鲁西地区中生代岩浆岩时代主体为144~113Ma(许文良等, 2004b; 杨承海等, 2005, 2006, 2008; 刘鹏瑞等, 2013), 仅在靠近郯庐断裂的铜石有一个早侏罗世二长岩-正长岩-花岗岩杂岩体(约190~176Ma).

4.3 东北北部及俄罗斯远东地区

该地区, 尤其是其南部的中国吉林-黑龙江东部和大兴安岭地区, 处在古生代古亚洲洋构造域与晚中生代滨西太平洋构造域的叠加与复合部位, 晚中生代受到鄂霍茨克洋的闭合与太平洋板块俯冲双重机制的制约, 岩浆活动强烈, 岩浆岩类型复杂多样, 且不同地区岩浆活动的起始、峰期和结束时间不尽相同, 显示出明显的迁移性.

吉林和黑龙江东部的岩浆活动明显分两期, 中间有明显的火山活动宁静期(图5a). 早期的岩浆活动始于晚三叠世, 一直延续到中侏罗世的早期, 在早侏罗世的~175和~200Ma构成两个明显的峰. 晚期的岩浆活动主要为早白垩世, 峰值为~116Ma(孙德有等,

图4 华北地区燕山期岩浆作用年龄频率

2005b; 程瑞玉等, 2006; 李超文等, 2007; 唐杰等, 2011; 马顺清和陈静, 2012; 孙景贵等, 2012; 王永彬等, 2012; 杨言辰等, 2012; 徐美君等, 2013; 周丽云等, 2015; Wu等, 2002, 2011; Xu等, 2013; Yu等, 2012). 另外, 晚白垩世的岩浆岩在吉林和黑东部边缘也有一定规模的分布(李献华等, 2004).

大兴安岭的火山活动持续的时间较长, 但以早白垩世为主(Wang等, 2006; Zhang等, 2008, 2010; Wu等, 2011; Chen等, 2011; Li Z Z等, 2014; Sun等, 2014; Tang等, 2015; Wang等, 2015), 少量晚侏罗世的岩浆活动, 而早-中侏罗世的岩浆活动微弱且很局部. 年龄谱在~125Ma出现强峰, 在~116、~140和~156Ma处出现数个弱峰(图5b). 该区复杂的年龄谱可能与其不仅受到太平洋板块俯冲的影响, 还受到鄂霍茨克洋闭合的影响有关.

邻近吉黑东部的朝鲜半岛晚中生代岩浆活动的情况总体与吉黑东部类似, 岩浆活动也明显分两期, 早期从晚三叠世, 一直延续到中侏罗世的早期(Sagōng等, 2005; Wu等, 2007), 峰值~175Ma; 晚期的火山活动从118Ma一直延续到晚白垩世, 强峰出现在~110Ma的早白垩世晚期(图5c). 总体缺少晚侏罗世的岩浆活动. 俄罗斯远东地区晚中生代岩浆活动为约135~55Ma, 存在~105、~71和~57Ma三个岩浆活动的峰期(图5d).

5 燕山运动的动力学——东亚多板块汇聚

5.1 燕山运动构造-岩浆事件基本特征

上述分析显示, 燕山运动过程中的构造-岩浆作用具有下列显著特征.

图5 中国东北及邻区燕山期岩浆作用年龄频率展布

(1) 多向性: 古老的纬向造山带, 如阴山-燕山构造带、秦岭造山带、南岭构造带等, 都不同程度地在燕山期重新活跃, 在造山带两侧前陆地带形成新的前陆构造带, 大巴山褶皱-冲断构造带便是典型的例子(Dong等, 2013; Li J H等, 2013a, 2015). 经向构造带如鄂尔多斯西缘的南北构造带、NE-NNE向新华夏系构造带, 也在这个时期形成. 这些不同方向的造山带在空间上发生复合和联合, 形成世界上特有的联合弧形构造, 如扬子地块北缘的大巴弧、八面山弧, 同时也形成了围绕刚性地块的薄皮环形褶皱构造带, 如鄂尔多斯地块周缘褶皱构造带、四川盆地周缘褶皱带等(张

岳桥等, 2007, 2011).

(2) 同时性: 不同方向陆内造山带的构造变形几乎同时起始于中晚侏罗世(170 ± 5)Ma, 并经历了大致相同的幕式构造演化阶段(董树文等, 2008, 2016; 张岳桥等, 2007).

(3) 弥散性: 与经典的碰撞造山作用不同, 晚中生代陆内造山作用具有显著的弥散性变形特征, 构造带宽度从几百千米至千余千米, 如华南地区宽达1300km的褶皱-逆冲构造带和岩浆岩带(Li和Li, 2007).

(4) 晚中生代大面积的岩浆成矿作用: 几乎发生在大陆不同构造部位, 包括造山带和克拉通, 指示东亚大

陆岩石圈发生了全面活化过程。

5.2 东亚陆缘多板块汇聚作用

研究表明,晚中生代东亚大陆广泛的陆内造山和构造-岩浆-成矿事件有其特定的板块构造动力学背景.随着联合古大陆的裂解,东亚大陆周邻3大洋(东部古太平洋、北部蒙古鄂霍茨克洋、西南部班公湖-怒江洋)在侏罗纪时期开始向东亚大陆俯冲消减和碰撞汇聚,形成了3个特定的陆缘构造带:北部的蒙古鄂霍茨克碰撞造山带、东部的古太平洋俯冲所形成的沟弧盆体系和西部的班公湖-怒江汇聚构造带.这些陆缘板块构造带向东亚大陆内部的变形传播,导致大规模的陆内造山带、逆冲带发育,形成了东亚大陆特有的晚中生代多板块汇聚构造体系(董树文等, 2000, 2007). 识

别和重建3个陆缘构造带板块构造演化历史成为破解东亚大陆晚中生代燕山运动 and 大规模构造-岩浆-成矿事件深部过程的关键(图6; Dong等, 2015). 燕山运动的动力学可以从以下的东亚汇聚模型得到合理的解释(图6). 尽管三个陆缘的俯冲增生和碰撞作用的时代并不完全一致,有先有后,其向陆内传播的方式也不尽相同,但在中晚侏罗世-早白垩世期间,它们共同作用于中国大陆,形成了多面围限的挤压环境,造成了特有的燕山运动构造变形,尤其是多方向的陆内造山带和围限挤压盆地的格局(图6). 最典型的例如:鄂尔多斯和四川盆地周缘的环形山脉和多向挤压变形(Liu, 1998; 张岳桥等, 2011; Liu等, 2013).

蒙古-鄂霍茨克构造带从蒙古杭爱山脉一直延伸到东部鄂霍茨克海乌达海湾、长约3000km, 宽约

图6 东亚大陆中生代多向汇聚的构造格架图

300km, 古生代和早中生代时期, 位于西伯利亚板块、华北板块和古太平洋板块之间. 岩石学、地质年代学和地球化学研究显示, 中蒙古和外贝加尔地区早侏罗世火成岩(约195~180Ma)主要由碱性熔岩和A型花岗岩组成, 表明蒙古-鄂霍茨克洋在早侏罗世初期开始向北和向南俯冲, 向南俯冲作用在额尔古那地块形成早侏罗世火山岩和斑岩型钼矿(Yarmolyuk等, 2000; Mazukabzov等, 2006; Donskaya等, 2008, 2013). 古地磁学研究表明, 中侏罗世早期蒙古-鄂霍茨克洋约3000km, 到晚侏罗世迅速缩小关闭, 至早白垩世, 西伯利亚板块的磁极移动轨迹与欧亚大陆其他地区已十分一致, 表明此时蒙古-鄂霍茨克洋两侧各地块的拼贴已经完成(Cogné等, 2005; Metelkin等, 2010; Pei J L等, 2011; Besse和Courtillet, 2002; Schettino和Scotese, 2005; Hankard等, 2005, 2007). 而地质学 and 同位素年代学研究显示, 蒙古-鄂霍茨克洋于中-晚侏罗世关闭, 两侧块体发生强烈碰撞造山(Zorin等, 1993; Zorin, 1999; 莫申国等, 2005), 在外贝加尔地区广泛发育陆相磨拉石建造, 不整合覆盖于早期海相复理石建造之上. 位于蒙古-鄂霍茨克构造带中段的艾伦达瓦变质带由绿片岩、片麻岩、片麻状花岗岩、糜棱岩、混合岩、大洋残留体和后期侵入的未变形伟晶岩脉等组成, 相关的构造年代学研究表明, 蒙古-鄂霍茨克洋闭合时间为182~174Ma, 碰撞带变质峰期时间为175~165Ma. 与造山作用相伴的岩浆活动主要为钙碱性和弱碱性岩浆岩, 同构造期花岗岩锆石U-Pb年龄为173~153Ma (Sklyarov等, 1997; Tomurtogoo等, 2005; Donskaya等, 2008). 在该区白垩纪则形成与碰撞后增厚地壳的拆沉和区域引张有关的碱性和过碱性岩浆岩(Donskaya等, 2008; Daoudene等, 2009, 2013). 同时, 白垩纪玄武岩则显示板内特征(Donskaya等, 2012). 区域地壳伸展形成的变质核杂岩年龄主要集中在135~120Ma(Wang等, 2012; Lin等, 2013; Charles等, 2013; Daoudene等, 2013).

古太平洋板块向东亚大陆之下俯冲作用深刻影响了东亚大陆东部陆缘晚中生代构造演化进程与大规模岩浆成矿事件. 但对于古太平洋板块何时开始向东亚大陆俯冲、以及如何俯冲到大陆之下等问题, 一直是大地构造研究的争议焦点. 华南构造研究表明, 华南早中生代构造动力体制经历了从特提斯陆-陆碰撞构造体制向古太平洋板块俯冲构造体制的转换(Zhou和

Li, 2000; 张岳桥等, 2009), 这两个构造动力体制分别在华南产生强烈的陆内变形和复杂的构造-岩浆组合. 在东海大陆架钻孔岩芯标本的岩浆岩年代学和同位素地球化学分析结果, 揭示了早侏罗世初期陆缘岛弧型岩浆活动, 指示古太平洋板块向华南大陆俯冲起始于早侏罗世初期(198~195Ma)(Xu等, 2017). 华南火成岩浆活动演化序列展示, 华南东部地区在经历了晚三叠世晚期(220~205Ma)碱性花岗岩、早、中侏罗世(190~175Ma)的A型花岗岩和幔源火山岩, 期间(205~190Ma)出现了一个明显的岩浆活动间隙期(Zhou等, 2006). 陆缘强烈的挤压作用发生在中侏罗世(约175~165Ma), 导致华南东部褶皱构造带的形成(Li等, 2018).

在朝鲜半岛, 发育早侏罗世挤压背景下的同造山期前陆沉积物(Bansong Group, Han等, 2006)和高钾钙碱性岩浆岩(184~167Ma)(Kim等, 2011), 它们均产生于活动大陆边缘, 与Izanagi板片的俯冲作用相关. 这个时期发生的大宝造山运动(Daebo orogeny)影响了整个朝鲜半岛, 在时间上与北京西山和燕山地区的燕山运动A幕相当(Lim和Cho, 2011).

中国东北佳木斯地块两侧发育两套混杂岩: 西侧为黑龙江混杂岩, 东侧为那丹哈达地体, 记录了晚中生代两期大陆俯冲增生事件. 周建波等(2016)认为佳木斯-兴凯地块与松辽地块之间的吉黑高压带形成于古亚洲构造域与环太平洋构造域转换的关键时期(210~180Ma). 早期向西俯冲增生作用发生在早侏罗世, 吉黑杂岩体及其高温高压变质作用记录了古牡丹江洋盆的闭合和松嫩地块与BUREYA-佳木斯-兴凯地块的碰撞, 变质峰期在165~184Ma(李亮等, 2016). 晚期(150~131Ma)那丹哈达增生作用为典型的因太平洋板块俯冲拼贴而形成的增生杂岩带. 程瑞玉等(2006)对饶河杂岩的年代学研究发现, 这套由含放射虫深海沉积岩以及镁铁质的熔岩和侵入岩等洋壳残片组成的杂岩, 被早白垩世(131~115Ma)蛤蟆河和太平村花岗岩侵入. 根据饶河杂岩中辉长岩的锆石U-Pb年龄(166 ± 1) Ma、深海沉积岩中最晚出现的放射虫的时代160~150Ma, 指示饶河杂岩的增生就位应发生在150~131Ma, 对应晚侏罗世-早白垩世时期.

近2000km长的班公湖-怒江缝合带是拉萨地体和羌塘地体的分界线, 其俯冲消减历史、俯冲极性以及碰撞过程等, 一直存在争论. 沿着日土-狮泉河一

线、多不杂-改则一线发育的与蛇绿岩相关的辉长岩及辉绿岩测出锆石年龄约181~184Ma,被认为代表了班公湖-怒江洋的时代(曲晓明等, 2010)。班戈带火山岩代表南向俯冲的岛弧(Qiu等, 2007; 朱弟成等, 2006),同时存在向北俯冲的证据(Murphy等, 1997; Kapp等, 2003; Ding等, 2003; Ding和Lai, 2003; Zhang等, 2004; 张玉修等, 2007)。Guynn等(2006)对沿着班公-怒江带中段出露的片麻岩U-Pb和 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测年分析揭示出一期早侏罗世(185~170Ma)角闪岩相变质事件及其伴随的花岗质岩石的侵位。羌塘地体北部发育的早侏罗世钙碱性英安岩(177.21 ± 1.69)Ma是在班公湖-怒江洋洋壳向北俯冲时出现弧后扩张、地幔部分熔融的结果;早侏罗世碱性玄武岩(179.19 ± 2.88)Ma代表了班公湖-怒江洋内的板内洋岛玄武岩(汪洋, 2007)。西段阿里地区的蛇绿岩带(张旗等, 2001; Matte等, 1996; 赵崇贺和李国良, 1987),认为是晚侏罗世推覆侵位(夏斌和何明友, 1995; Kapp等, 2003)。其中,同构造新生云母的 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄为151~153Ma。拉果错斜长花岗岩锆石SHRIMP U-Pb年龄为(166.6 ± 2.5)Ma(张玉修等, 2007)。在羌塘地体南缘发现的岛弧类岩石,包括流纹岩、安山岩和闪长岩等,它们的锆石SHRIMP U-Pb年龄(166.6 ± 2.5)Ma指示班公湖-怒江洋盆于中侏罗世向羌塘地体下北向俯冲消减。位于藏北羌塘盆地中央隆起带北缘玛依岗日地区的俄久卖高级变质岩,正片麻岩原岩的岩浆结晶时代为(207 ± 2)Ma,片麻岩主变质作用形成的锆石增生边的年龄(161~197Ma)记录了班公湖-怒江洋向北的俯冲消减作用在羌塘中部地区的响应(刘通等, 2013)。关于两个地块的碰撞时间,在安多附近羌塘地块碰撞事件发生晚侏罗世(Dewey等, 1988),而在喀喇昆仑北部地块,则发生在中白垩世(Matte等, 1996; Gaetani等, 1993)。根据羌塘与拉萨地块之间的沉积碎屑锆石年龄分析和对比获得的碰撞时代定为(166 ± 1)Ma,证实海沟-火山弧系统结束于早侏罗世(183~170Ma),地块碰撞作用发生于晚中侏罗世(Ma等, 2016)。

6 讨论

6.1 燕山运动是东亚陆缘汇聚的结果

大量地壳重熔花岗岩和埃达克岩证据表明,华北地块在中侏罗世时期岩石圈经历了一次重要的增厚过

程(李伍平等, 2001; 李伍平和李献华, 2004)。路凤香等(2006)估算在髫髻山组火山喷发之前,地壳厚度达到40~45km;张旗等(2001)认为燕山期埃达克质岩浆岩是地壳增厚过程,下地壳重熔的产物,推测地壳厚度达到50~60km。

中-晚侏罗世挤压构造展示了具有显著对照的、东西分异的构造样式。在西侧,大巴山、山西台地和川西的逆冲断层及其相关褶皱被反射地震剖面证实为与上地壳基底和盖层间内的滑脱构造(decollement)有关,而下地壳基底岩石没有卷入到缩短变形,是典型的薄皮构造(董树文等, 2006; 张岳桥等, 2007; Dong等, 2013; Li等, 2013a; Li C X等, 2015)。这种薄皮构造样式同样适用于大青山逆冲推覆构造带(王永超等, 2017)。另一方面,大别山、燕山和位于郯-庐断裂带东侧的胶辽地区,伴随晚侏罗世强烈变形,均指示了下地壳卷入的厚皮构造特征(董树文等, 2006; 李秋生等, 2008)。这些资料表明,太行山东缘存在一条著名的重力梯度带,其为东部地区卷入下地壳的厚皮构造向西部地区卷入上地壳的薄皮构造的转换带。这种构造变形样式进一步指示,中晚侏罗世的地壳增厚作用主要发生在位于太行山以东的华北东部地区。

中晚侏罗世的地壳缩短应变在时间和空间上分解为逆冲作用和走滑活动。通常的解释是,近N-S向地壳挤压和缩短变形主要发生在两个纬向构造带(阴山-燕山构造带和秦岭-大别构造带),而NW-SE向挤压和地壳缩短变形主要发生在华北地块的广大地区(如山西高地、华北平原北部和胶辽块体);特别是,郯-庐断裂带东侧的胶辽块体以逆冲和走滑共同作用为主要特征,山西高地以逆冲和断层相关褶皱变形为主,华北平原区则以左旋走滑为主;这一应变分解模式为华北地块在中晚侏罗世时期受多向挤压作用的结果(张岳桥等, 2007)。

克拉通地块周边环形褶皱山系,如围绕鄂尔多斯和四川陆块的环形褶皱带,很难用一个方向的挤压应力场来解释。Sun等(2013)用数值模拟再现了环形山脉的成因,提出了三个方向的同时挤压和围限作用可以形成围绕地块周缘的山脉和逆冲构造。中国许多弧形构造包括太行山-燕山的弧形构造、大巴山与川东双弧构造等,都是与这种机制有关。

目前对侏罗纪东亚汇聚及岩石圈增厚的机制还不清楚,需要深入研究。但是,增厚的东亚大陆在白垩纪

发生了岩石圈的减薄, 这已成为不争的事实(邓晋福等, 1996; Griffin等, 1998; Menzies等, 1993; Menzies和Xu, 1998; 和政军等, 1998; 翟明国等, 2004; Wu等, 2005a, 2005b; 朱日祥等, 2011). 正是因为中国东部巨厚的岩石圈发生重力失稳和坍塌作用, 导致软流圈物质从它的两侧或周边作侧向补偿, 进一步牵引太平洋板块持续向西俯冲, 印度洋板块向北东漂移. 这种深部物质运动过程, 可视为软流圈和岩石圈物质向中国东部汇流、聚集的主要原因和机制. 其最显著的结果是印度洋板块拖着印度板块向东北方向运动, 最终与亚洲大陆碰撞(董树文等, 2000, 2007, 2016; Dong等, 2015; 图7).

总之, 中晚侏罗世至少在东半球是一个重大的变革时期, 并以软流圈物质和岩石圈向东亚汇聚为其主要特点, 多板块的汇聚造成了岩石圈增厚, 控制了东亚晚中生代的成山、成盆、成矿、成藏的一系列过程. 所以, 应该把中国东部中晚侏罗世岩石圈增厚及随后的突发性崩落过程, 与东半球深部物质的补偿性汇聚作为统一的过程来考虑, 二者之间必然存在因果关系.

6.2 从东亚汇聚到未来亚美大陆的形成

在地球历史上, 大约每隔6~7亿年, 就会经历一次超大陆的裂解-聚合演化历史. 目前可恢复的超大陆有三个: 哥伦比亚超大陆(2~1.9Ga)、罗迪尼亚超大陆(1~0.8Ga)、潘吉亚(Pangea)超大陆(0.3~0.25Ga). 超大陆重建一直是地球科学前沿的重大课题, 其中最具挑战性的问题是如何确定超大陆会聚中心和起始时间以及会聚的机理(Nance和Murphy, 2013). 当今全球正处于潘吉亚超大陆的裂解、未来新的超大陆形成的中间阶段, 根据Pangea超大陆裂解、三大洋扩展、亚欧大陆的形成过程, 地质学家开始构建未来2~3亿年时期新超大陆的图像, 提出了未来亚美超大陆的可能性. Mitchell等(2012)认为, 每一个超大陆是在离自己的“前大陆”约90°的位置形成. 他们推测北冰洋关闭, Amasia位于Pangea的垂直位置, 距今100Ma后美亚大陆的分布预测和地块运移过程为: 南北美洲大陆碰撞拼合, 加勒比海消亡; 新形成的陆块持续北移, 在北极与欧亚大陆碰撞, 导致北冰洋关闭. 非洲大陆将与欧洲大陆碰撞, 导致地中海消亡; 澳洲大陆也会向北漂移, 成为美亚大陆的一部分. 至此, 除南极大陆外, 全球各大陆块将汇聚成一个超大陆, 即亚美大陆(Amasia)

(Mitchell等, 2012; 安培浚, 2012).

若未来亚美大陆的设想可行, 我们可据此追溯至这一超大陆循环的起始, 即距今约300~250Ma以来, 在亚洲大陆的记录中, 影响最为深刻的两次构造事件: 印支运动和燕山运动. 东亚大陆是个年轻大陆, 是从三叠纪华南与华北陆块拼贴成中国大陆后, 逐步生长演化成最大的大陆——亚洲大陆或亚欧大陆的. 这其中, 中晚侏罗世(燕山期)的“东亚汇聚”是最重要的过程, 奠定了亚洲大陆东部的构造格局, 记录了周边板块向其汇聚的过程. 特别是与古太平洋、大西洋和印度洋的扩张是同步的, 寓意了Pangea超大陆的全面裂解. 古太平洋板块起始俯冲, 到Izanaqi洋盆逐步消减的过程, 是未来太平洋关闭导致亚美大陆形成的前奏序曲. 从这个意义上, “东亚汇聚”可定义为未来亚美超大陆诞生的里程碑. 那么“燕山运动”成了亚美超大陆诞生的最初的地质记录. 理解这一汇聚过程, 可为探讨未来超大陆形成的动力学机理提供科学线索.

7 几点认识

(1) 燕山运动时空格架. 翁文灏先生于1926年最先提出的燕山运动已整整90年, 认识不断在演变和发展. 目前, 对燕山运动的起始时间、演化阶段和动力学背景的认识, 基本趋于一致: 即在中侏罗世~(170±5)Ma形成的由三条边缘造山带和多方向的陆内造山作用构成的变形体系和伴随的强烈岩浆活动和表层响应系统. 这是三叠纪东亚大陆雏形形成后的又一次重大地质构造事件.

(2) 东亚汇聚构造体系. 在侏罗纪全球三大洋近乎同时扩张, 标志了泛大陆(Pangea)的全面裂解, 开启了东亚大陆周邻古太平洋、新特提斯洋和蒙古-鄂霍茨克洋俯冲消减的板块构造格架, 形成了东亚多板块汇聚构造体系. 主体由两部分组成: 陆缘汇聚造山系统(包括北部蒙古-鄂霍茨克碰撞造山带、东部陆缘Cordillera型俯冲增生造山系统、西部班公湖-怒江俯冲碰撞系统); 陆内变形扩展系统(表现为远离汇聚板块边缘的大规模逆冲-褶皱构造、古老造山带的复活和广泛的岩浆成矿作用).

(3) 东亚汇聚可能是未来美亚超大陆形成的起始点. 古地磁研究证实, 在中侏罗纪以来中国大陆的古地理位置几乎没有改变, 称为稳定的陆块, 而周围的

图7 从边缘汇聚到陆内造山示意图
据Dong等(2015)修改

大陆相向汇聚于中国大陆. 这种东亚汇聚模式, 与未来“美亚超大陆”(Amesiasia)重构, 以及太平洋关闭, 东亚大陆成为亚美超大陆的中心的模型是一致的. 据此推测, 东亚汇聚可作为未来新超大陆诞生的里程碑.

90年过去了, 关于对“燕山运动”的认识, 从最早起源于北京西山和燕山地区侏罗纪-白垩纪地层不整合面, 逐步扩展到中国东部晚中生代一次重大构造运动, 到现今将中国大陆燕山运动与“东亚陆缘汇聚”板块动力学联系起来, 并预测其与未来“美亚超大陆”形成的内在联系, 反映了中国地质学家们对燕山运动的认识和理解在不断加深和扩展. 随着进一步的研究深入和资料积累, 相信关于燕山运动的更多细节有望被更多地质事实所揭示, 而“燕山运动”也必将成为具全球意义的重要大地构造概念.

致谢 该文是作者长期对中国东部和东亚中生代构造演化研究结果的总结, 时值翁文灏先生提出“燕山运动”90周年, 作为对先辈的敬仰和纪念, 同时向同仁讨教. 成文中得到李廷栋院士、孙枢院士、任纪舜院士、朱日祥院士、金振民院士、王成善院士、高锐院士、侯增谦院士、赵越研究员、胡健民研究员、龙长兴研究员、季强研究员、李锦轶研究员等支持和指导; 与俄罗斯全俄地

质研究所O. Peterov博士、美国加州大学(洛杉矶)尹安教授、美国匹茨堡大学T. Anderson教授、加拿大阿尔伯塔大学S. Johnston教授、美国密苏里大学M. Liu教授等讨论并得到有益的启示, 在此一并致谢.

参考文献

- 安培俊. 2012. Nature: 将形成新的美亚超级大陆. 地球科学进展, 27: 397
- 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: 1019-1038
- 曾键年, 李锦伟, 陈津华, 陆建培. 2013. 宁镇地区安基山侵入岩SHRIMP锆石U-Pb年龄及其地质意义. 地球科学, 38: 57-67
- 曾键年, 覃永军, 郭坤一, 陈国光, 曾勇. 2010. 安徽庐枞盆地含矿岩浆岩锆石U-Pb年龄及其对成矿时限的约束. 地质学报, 84: 466-478
- 陈斌, 田伟, 翟明国, 荒川洋二. 2005. 太行山和华北其他地区中生代岩浆作用的锆石U-Pb年代学和地球化学特征及其岩浆成因和地球动力学意义. 岩石学报, 21: 13-24
- 陈印, 朱光, 姜大志, 林少泽. 2014. 云蒙山变质核杂岩的变形规律与发育机制. 科学通报, 59: 1525-1541
- 程瑞玉, 吴福元, 葛文春, 孙德有, 柳小明, 杨进辉. 2006. 黑龙江省东部饶河杂岩的就位时代与东北东部中生代构造演化. 岩石学报,

22: 353–376

- 崔盛芹. 2002. 燕山地区中生代陆内造山作用. 北京: 地质出版社
- 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, (2): 137–148
- 邓晋福, 冯艳芳, 刘翠, 肖庆辉, 孟斐, 车如风. 2015. 古亚洲构造域侵入岩时-空演化框架. 地质论评: 1211–1224
- 丁文江. 1929. 中国造山运动. 中国地质学会会志(英文), 8: 151–170
- 董树文, 胡健民, 施炜, 张忠义, 刘刚. 2006. 大巴山侏罗纪叠加褶皱与侏罗纪前陆. 地球学报, 27: 403–410
- 董树文, 李廷栋, 陈宣华, 高锐, 吕庆田, 石耀霖, 黄大年, 杨经绥, 王学求, 魏文博, 陈群策. 2014. 深部探测揭示中国地壳结构、深部过程与成矿作用背景. 地学前缘, 21: 201–225
- 董树文, 吴锡浩, 吴珍汉, 邓晋福, 高锐, 王成善. 2000. 论东亚大陆的构造翘变——燕山运动的全球意义. 地质论评, 46: 8–13
- 董树文, 张岳桥, 陈宣华, 龙长兴, 王涛, 杨振宇, 胡健民. 2008. 晚侏罗世东亚多向汇聚构造体系的形成与变形特征. 地球学报, 29: 306–317
- 董树文, 张岳桥, 龙长兴, 杨振宇, 季强, 王涛, 胡建民, 陈宣华. 2007. 中国侏罗纪构造变革与燕山运动新诠释. 地质学报, 81: 1449–1461
- 董树文, 张岳桥, 赵越、张福勤, 杨振宇, 陈宣华等. 2016. 中国大陆中-新生代构造演化与动力学分析, 中国深部探测研究丛书. 北京: 科学出版社
- 段政, 邢光福, 余明刚, 赵希林, 靳国栋, 陈志洪. 2013. 浙闽边界区晚中生代火山作用时序与过程分析. 地质论评, 59: 454–469
- 范裕, 周涛发, 袁峰, 钱存超, 陆三明, 等. 2008. 安徽庐江-枞阳地区A型花岗岩的LA-ICP-MS定年及其地质意义. 岩石学报, 24: 1715–1724
- 范裕, 周涛发, 袁峰, 张乐骏, 钱兵, 马良, David R C. 2010. 宁芜盆地闪长玢岩的形成时代及其对成矿的指示意义. 岩石学报, 26: 2815–2728
- 高福红, 许文良, 杨德彬, 裴福萍, 柳小明, 胡兆初. 2007. 松辽盆地南部基底花岗质岩石锆石LA-ICP-MSU-Pb定年: 对盆地基底形成时代的制约. 中国科学D辑: 地球科学, 37: 331–335
- 高昕宇, 赵太平, 高剑峰, 薛良伟, 原振雷. 2012. 华北陆块南缘小秦岭地区早白垩世埃达克质花岗岩的LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄、Hf同位素和元素地球化学特征. 地球化学, 41: 303–325
- 关康, 罗镇宽, 苗天成, 黄佳展. 1998. 胶东招掖郭家岭型花岗岩锆石SHRIMP年代学研究. 地质科学, 33: 318–328
- 郭敬辉, 陈福坤, 张晓曼, Siebel W, 瞿明国. 2005. 鲁超高压带北部中生代岩浆侵入活动与同碰撞-碰撞后构造过程: 锆石U-Pb年代学. 岩石学报, 21: 1281–3001
- 和政军, 李锦轶, 牛宝贵, 任纪舜. 1998. 燕山-阴山地区晚侏罗世强烈推覆-隆升事件及沉积响应. 地质论评, 44: 407–418
- 胡博, 张岳桥. 2007. 安徽张八岭隆起东缘基底走滑韧性剪切带的发现及其构造意义. 地质通报, 26: 256–265
- 胡健民, 刘晓文, 杨之青. 2007. 辽西地区燕山板内造山带早中生代构造变形的年代学限定. 岩石学报, 23: 605–616
- 胡健民, 施炜, 渠洪杰, 陈虹, 田蜜. 2009. 秦岭造山带大巴山弧形构造带中生代构造变形. 地学前缘, 3: 49–68
- 胡健民, 孟庆任, 陈虹, 武国利, 渠洪杰, 高卫, 陈文. 2011. 秦岭造山带内宁陕断裂带构造演化及其意义. 岩石学报, 27: 657–671
- 黄迪颖. 2015. 燕辽生物群和燕山运动. 古生物学报, 54: 501–546
- 黄汲清. 1960. 中国地质构造基本特征的初步总结. 地质学报, 34: 3–137
- 季强, 柳永清, 陈文, 姬书安, 吕君昌, 尤海鲁, 袁崇喜. 2005. 再论道虎沟生物群的时代. 地质论评, 51: 609–612
- 江鹏. 2015. 胶东郭家岭型花岗岩类多期脉冲式岩浆混合作用: 来自榴石微区U-Pb年代学和地球化学制约. 中国矿物岩石地球化学学会. 中国矿物岩石地球化学学会第15届学术年会论文摘要集
- 江思宏, 聂凤军, 方东会, 刘翼飞. 2009. 河南桐柏围山城地区侵入岩年代学与地球化学特征. 地质学报, 83: 1011–1029
- 江小均, 柳永清, 姬书安, 张维, 张兴辽, 徐莉, 贾松海, 吕君昌, 袁崇喜, 李明. 2010. 豫西汝阳盆地九店组凝灰岩锆石SHRIMP U-Pb测年及其对含恐龙化石地层年代约束. 地质论评, 56: 161–173
- 靳克, 许文良, 王清海, 高山, 刘晓春. 2003. 蚌埠淮广“混合花岗闪长岩”的形成时代及源区: 锆石SHRIMP U-Pb地质年代学证据. 地球学报, 24: 331–335
- 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: 1073–1091
- 李斌, 张赞赞, 吴明安, 周涛发, 赵文广, 蔡晓兵, 狄勤松. 2015. 皖南宁国大坞尖岗钼矿床成岩成矿年龄——以花岗闪长斑岩锆石U-Pb和辉钼矿Re-Os年龄为依据. 地质通报, 34: 569–578
- 李超文, 郭锋, 范蔚茗, 高晓峰. 2007. 延吉地区晚中生代火山岩的Ar-Ar年代学格架及其大地构造意义. 中国科学D辑: 地球科学, 37: 319–330
- 李海龙, 张长厚, 邹云, 邓洪菱, 马君. 2008. 冀东马兰峪背斜南翼与西部倾伏端盖层变形特征及其构造意义. 地质通报, 27: 1698–1708
- 李厚民, 王登红, 张冠, 陈毓川, 王彦斌, 张长青, 代军治. 2007. 河南白石坡银矿区花岗斑岩中锆石的SHRIMP U-Pb年龄及其地质意义. 地质学报, 81: 808–813
- 李良林, 周汉文, 陈植华, 王锦荣, 陈正华, 陈威. 2013. 福建沿海晚中生代花岗质岩石成因及其地质意义. 地质通报, 32: 1047–1062
- 李亮, 孙景贵, 郭维, 韩吉龙. 2016. 鹤岗北部地区黑龙江岩群的构造属性: 来自岩石地球化学、锆石U-Pb定年和Hf同位素的制约. 大地构造与成矿学, 40: 1014–1030
- 李秋生, 高锐, 张成科, 赵金仁, 管烨, 张季生. 2008. 残余壳根与“三明治”结构——燕山造山带中段地壳结构的主要特征. 地球学报, 82: 129–136
- 李双, 杨晓勇, 孙卫东, 戴圣潜. 2014. 皖南泾县榔桥岩体锆石U-Pb定

- 年、Hf同位素和地球化学特征及其找矿指示意义. 地质学报, 88: 1561–1578
- 李伍平, 李献华. 2004. 燕山造山带中段中晚侏罗世酸性火山岩的成因及其意义. 岩石学报, 20: 501–510
- 李伍平, 路凤香, 李献华, 周瑶琪, 孙善平, 李家振, 章大港. 2001. 北京西山髻髻山组火山岩的地球化学特征与岩浆起源. 岩石矿物学杂志, 20: 123–133
- 李建华, 张岳桥, 董树文, 施炜, 李海龙. 2010. 北大巴山凤凰山基底隆起晚中生代构造隆升历史——磷灰石裂变径迹测年约束. 地质科学, 4: 969–986
- 李献华, 李武显, 陈丕基, 万晓樵, 李罡, 宋彪, 姜剑虹, 刘吉才, 尹德顺, 阎伟. 2004. 黑龙江富饶组上段凝灰岩的SHRIMP锆石U-Pb年龄: 一个最接近白垩系/第三系界线的年龄. 科学通报, 49: 816–818
- 李鑫浩, 高昕宇, 张忠慧, 方建华, 赵太平. 2015. 北淮阳早白垩世金剛台组火山岩LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄及地层对比. 大地构造与成矿学, 39: 718–728
- 李振宏, 董树文, 渠洪杰, 胡健民. 2013. 宁武-静乐盆地侏罗系碎屑岩地球化学特征及地质意义. 地质论评, 59: 637–655
- 李振宏, 董树文, 渠洪杰. 2014. 华北克拉通北缘侏罗纪造山过程及关键时限的沉积证据. 吉林大学学报(地球科学版), 44: 1553–1574
- 李鹏远, 张进江, 郭磊, 杨雄英. 2010. 北大巴山逆冲推覆构造带前缘构造特征及变形年代学研究. 地学前缘, 17: 191–199
- 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D辑: 地球科学, 36: 401–411
- 刘健, 赵越, 柳小明. 2006. 冀北承德盆地髻髻山组火山岩的时代. 岩石学报, 22: 2617–2630
- 刘俊来, 纪沫, 申亮, 关会梅, Davis G. A. 2011. 辽东半岛早白垩世伸展构造组合、形成时代及区域构造内涵. 中国科学: 地球科学, 41: 618–637
- 刘鹏瑞, 熊玉新, 马晓东, 王奎峰, 董延钰, 李敏. 2013. 山东邹平火山岩盆地铜多金属矿SHRIMP锆石U-Pb和辉钼矿Re-Os年龄. 地质通报, 32: 1621–1630
- 刘少峰, 李忠, 张金芳. 2004. 燕山地区中生代盆地演化及构造体制. 中国科学D辑: 地球科学, 34(增刊): 19–31
- 刘通, 翟庆国, 王军, 苏犁, 康珍, 索朗次列. 2013. 藏北羌塘盆地基底高级变质岩LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄及其地质意义. 地质通报, 32: 1691–1703
- 刘晓强, 闫峻, 王爱国, 李全忠, 姚洪忠. 2015. 北大别岳西岩体和飞旗寨岩体的LA-ICPMS锆石U-Pb定年及其地质意义. 地球化学, 44: 155–166
- 刘正宏, 徐仲元, 杨振升. 2003. 大青山逆冲推覆构造形成时代的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄证据. 科学通报, 48: 2193–2197
- 柳永清, 李佩贤, 田树刚. 2003. 冀北滦平晚中生代火山碎屑(熔)岩中锆石SHRIMP U-Pb年龄及其地质意义. 岩石矿物学杂志, 22: 237–244
- 柳永清, 刘燕学, 姬书安, 杨之青. 2006. 内蒙古宁城和辽西凌源热水汤地区道虎沟生物群与相关地层SHRIMP锆石U-Pb定年及有关问题的讨论. 科学通报, 51: 2273–2282
- 路凤香, 郑建平, 张瑞生, 邵济安, 李伍平, 余淳梅. 2006. 地壳与弱化石圈地幔的相互作用: 以燕山造山带为例. 地球科学, 31: 1–7
- 马昌前, 杨坤光, 明厚利, 林广春. 2003. 大别山中生代地壳从挤压转向伸展的时间: 花岗岩的证据. 中国科学D辑: 地球科学, 35: 817–827
- 马顺清, 陈静. 2012. 黑龙江鹿鸣钼矿区花岗岩锆石年龄、地球化学特征及其地质意义. 中国地质, 39: 1162–1171
- 苗来成, 罗镇宽, 关康, 黄佳展. 1998. 玲珑花岗岩中锆石的离子质谱U-Pb年龄及其岩石学意义. 岩石学报, 14: 198–206
- 莫中国, 韩美莲, 李锦轶. 2005. 蒙古-鄂霍茨克造山带的组成及造山过程. 山东科技大学学报(自然科学版), 24: 50–52, 64
- 牛宝贵, 和政军, 任纪舜, 宋彪, 肖蓓薇. 2004. 冀北张家口组、义县组火山岩SHRIMP定年兼论中国东部大兴安岭兴安岭群和东南沿海火山岩地层时代. 地质学报, 78: 751
- 邱检生, 李真, 刘亮, 赵蛟龙. 2012a. 福建漳浦复式花岗岩体的成因: 锆石U-Pb年代学、元素地球化学及Nd-Hf同位素制约. 地质学报, 86: 561–576
- 邱检生, 肖娥, 胡建, 徐夕生, 蒋少涌, 李真. 2008. 福建北东沿海高分异I型花岗岩的成因: 锆石U-Pb年代学、地球化学和Nd-Hf同位素制约. 岩石学报, 24: 2468–2484
- 邱连贵, 任凤楼, 曹忠祥, 张岳桥. 2008. 胶东地区晚中生代岩浆活动及对大地构造的制约. 大地构造与成矿学, 32: 117–127
- 曲晓明, 辛洪波, 赵元艺, 王瑞江, 樊兴涛. 2010. 西藏班公湖中特提斯洋盆的打开时间: 镁铁质蛇绿岩地球化学与锆石U-Pb LAICPMS定年结果. 地学前缘, 17: 53–63
- 任东, 高克勤, 郭子光, 姬书安, 谭京晶, 宋卓. 2002. 内蒙古宁城道虎沟地区侏罗纪地层划分及时代探讨. 地质通报, 21: 584–591
- 任东, 朱会忠, 陆有泉. 1995. 内蒙古赤峰早白垩世昆虫化石的新发现. 地球学报, (4): 432–439
- 任纪舜, 陈廷愚, 牛宝贵. 1990. 中国东部及邻区大陆岩石圈的构造演化与成矿. 北京: 科学出版社
- 任纪舜, 王作勋, 陈炳蔚. 1998. 从全球看中国大地构造: 中国及邻区大地构造图简要说明. 北京: 地质出版社. 1–38
- 申志超, 侯增谦, 于枫, 陈志宽, 李秋耘, 马国玺, 葛峰, 王志敏. 2015. 太行山北段王安镇杂岩体中酸性岩锆石SHRIMP U-Pb定年、Hf同位素组成及其地质意义. 岩石学报, 31: 1409–1420
- 宋传中, 朱光, 刘洋, 牛漫兰, 刘国生. 2003. 郯庐断裂带肥东韧性剪切带的变形规律、同位素年龄及其构造意义. 地质论评, 49: 10–17
- 孙德有, 吴福元, 高山, 路孝平. 2005b. 吉林中部晚三叠世和早侏罗世两期铝质A型花岗岩的厘定及对吉黑东部构造格局的制约. 地

- 学前缘, 12: 263–275
- 孙景贵, 张勇, 邢树文, 赵克强, 张增杰, 白令安, 马玉波, 刘勇胜. 2012. 兴蒙造山带东缘内生钼矿床的成因类型、成矿年代及成矿动力学背景. 岩石学报, 28: 1317–1332
- 唐杰, 许文良, 王枫, 高福红, 曹花花. 2011. 张广才岭帽儿山组双峰式火山岩成因: 年代学与地球化学证据. 世界地质, 30: 508–520
- 汪洋. 2007. 羌塘地体中生代构造演化: 来自火山岩年代学、地球化学及同位素的证据. 硕士学位论文. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所
- 王强, 孙燕, 张雪辉, 张世铭, 王瑜亮, 张春茂. 2012. 江西省村前铜多金属矿床斜长花岗斑岩LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄及地质意义. 中国地质, 39: 1143–1150
- 王世进, 万渝生, 王伟, 宋志勇, 王金光, 董春艳, 颜炳强, 刘清德. 2010. 山东崂山花岗岩形成时代——锆石SHRIMP U-Pb定年. 山东国土资源, 26: 1–10
- 王世进, 张成基, 杨恩秀, 宋志勇, 王立法, 许克民. 2009. 鲁西地区中生代侵入岩期次划分. 山东国土资源, 25: 18–23
- 王五力, 郑少林, 张立君, 蒲荣干, 张武, 吴洪章, 具然弘, 董国义, 元红. 1987. 辽宁西部中生代地层古生物(第一册). 北京: 地质出版社. 1–263
- 王小龙, 曾键年, 马昌前, 李小芬, 吴亚飞, 陆顺富. 2014. 宁镇地区燕山期侵入岩锆石U-Pb定年: 长江中下游新一期成岩成矿作用的年代学证据. 地学前缘, 21: 289–301
- 王永彬, 刘建明, 孙守恪, 李艳, 李凤友, 胡海涛. 2012. 黑龙江省乌拉嘎金矿赋花岗岩闪长斑岩锆石U-Pb年龄、岩石成因及其地质意义. 岩石学报, 28: 557–570
- 王永超, 董树文, 陈宣华, 施炜. 2017. 内蒙古大青山侏罗纪生长地层对燕山运动“绪动”的制约. 科学通报, 62: 1274–1277
- 王勇生, 魏鑫, 向必伟, 朱光, 牛漫兰, 谢成龙. 2010. 晓天-磨子潭剪切带的早白垩世活动及其对北大别穹窿演化的制约. 地质学报, 84: 618–630
- 王勇生, 朱光, 王道轩, 刘国生, 宋传中. 2004. 大别山东缘郧庐两期走滑剪切带形成的温压条件与造山带折返的关系. 大地构造与成矿学, 28: 228–238
- 王勇生, 朱光. 2004. 大别山东缘郧庐断裂带早期韧性剪切带的形成温度. 合肥工业大学学报(自然科学版), 27: 855–859
- 王微, 宋传中, 李加好, 任升莲, 张妍, 冯腊梅, 李振伟, 王阳阳. 2016. 郧庐断裂带肥东桃源韧性剪切带构造分析及时限探究. 地质科学, 4: 1040–1058
- 吴才来, 董树文, 国和平, 郭祥炎, 高前明, 刘良根, 陈其龙, 雷敏, Wooden J L, Mazadab F K, Mattinson C. 2008. 铜陵狮子山地区中酸性侵入岩锆石SHRIMP U-Pb定年及岩浆作用的深部过程. 岩石学报, 24: 1801–1812
- 吴才来, 高前明, 国和平, 郭祥炎, 刘良根, 郅源红, 雷敏, 秦海鹏. 2010. 铜陵中酸性侵入岩成因及锆石SHRIMP定年. 岩石学报, 26: 2630–2652
- 吴才来, 郭祥炎, 王次松, 武秀平, 郅源红, 雷敏, 秦海鹏, 刘春花, 李名则, 陈其龙. 2013. 铜陵地区高钾钙碱性系列侵入岩锆石U-Pb年代学及其地质意义. 地球化学, 42: 11–28
- 吴福元, 孙德有, 李惠民, 汪筱林. 2000. 松辽盆地基底岩石的锆石U-Pb年龄. 科学通报, 45: 656–660
- 吴福元, 杨进辉, 张艳斌, 柳小明. 2006. 辽西东南部中生代花岗岩时代. 岩石学报, 22: 315–325
- 吴淦国, 张达, 狄永军, 臧文拴, 张祥信, 宋彪, 张忠义. 2008. 铜陵矿集区侵入岩SHRIMP锆石U-Pb年龄及其深部动力学背景. 中国科学D辑: 地球科学, 38: 630–645
- 夏斌, 何明友. 1995. 西藏加纳朋蛇绿岩岩石地球化学及成因意义. 矿物学报, (2): 236–241
- 夏增明, 刘俊来, 倪金龙, 张婷婷, 施性明, 吴云. 2016. 胶东东部鹊山变质核杂岩结构、演化及区域构造意义. 中国科学: 地球科学, 46: 356–373
- 谢桂青, 毛景文, 李瑞玲, 张祖送, 赵维超, 屈文俊, 赵财胜, 魏世昆. 2006. 鄂东南地区Cu-Au-Mo-(W)矿床的成矿时代及其成矿地球动力学背景探讨: 辉钼矿Re-Os同位素年龄. 矿床地质, 25: 43–52
- 谢桂青, 赵海杰, 赵财胜, 李向前, 侯可军, 潘怀军. 2009. 鄂东南铜绿山矿田矽卡岩型铜铁金矿床的辉钼矿Re-Os同位素年龄及其地质意义. 矿床地质, 28: 227–239
- 徐刚, 赵越, 吴海, 张栓宏. 2005. 辽西凌源牛营子盆地晚三叠世-中侏罗世地层层序及区域对比. 地球学报, (4): 299–308
- 徐美君, 许文良, 王枫, 高福红, 于介江. 2013. 小兴安岭中部早侏罗世花岗岩质岩石的年代学与地球化学及其构造意义. 岩石学报, 29: 354–368
- 徐祥, 侯明金, 邱瑞龙, 吴礼彬, 李建设. 2005. 华北陆块东南缘蚌埠地区花岗岩与相关脉岩 ^{40}Ar - ^{39}Ar 定年. 中国地质, 32: 588–595
- 许文良, 裴福萍, 高福红, 杨德彬, 卜永吉. 2008. 伊舒地堑基底花岗岩的锆石U-Pb年代学及其构造意义. 地球科学——中国地质大学学报, 33: 145–150
- 许文良, 王冬艳, 王清海, 裴福萍, 林景仟. 2004a. 华北地块中东部中生代侵入杂岩中角闪石和黑云母的 ^{40}Ar / ^{39}Ar 定年: 对岩石圈减薄时间的制约. 地球化学, 33: 221–231
- 许文良, 王清海, 杨德彬, 刘晓春, 郭敬辉. 2004b. 蚌埠荆山“混合花岗岩”SHRIMP锆石U-Pb定年及其地质意义. 中国科学D辑: 地球科学, 34: 423–428
- 薛怀民. 2016. 长江中下游火山岩带东南缘溧阳盆地火山作用的年代学、地球化学及岩浆成因探讨. 地球化学, 45: 213–234
- 薛怀民, 董树文, 简平. 2006. 大别山造山带前陆阳新二长质侵入体的矿物化学、地球化学与锆石SHRIMP定年. 中国科学D辑: 地球科学, 36: 133–142
- 薛怀民, 董树文, 马芳. 2010. 长江中下游地区庐(江)-枞(阳)和宁(南京)-芜(湖)盆地内与成矿有关潜火山岩体的SHRIMP锆石U-Pb年龄. 岩石学报, 26: 2653–2664
- 薛怀民, 董树文, 马芳. 2012. 江中下游庐枞盆地火山岩的SHRIMP锆

- 石U-Pb年龄:对扬子克拉通东部晚中生代岩石圈减薄机制的约束.地质学报,86:1569-1583
- 薛怀民,马芳,曹光跃.2015.长江中下游地区晚中生代橄榄玄粗岩系列火山岩:年代学格架、地球化学特征及成因讨论.地质学报,89:1380-1401
- 薛怀民,马芳,关海燕,王一鹏.2013.怀宁盆地火山岩的年代学、地球化学及与长江中下游其他火山岩盆地的对比.中国地质,40:396-416
- 薛怀民,汪应庚,汪诚,王德恩,左延龙.2009.皖南太平-黄山复合岩体的SHRIMP年代学:由钙碱性向碱性转变对扬子克拉通东南部中生代岩石圈减薄时间的约束.中国科学D辑:地球科学,39:979-993
- 杨承海,许文良,杨德彬,刘长春,柳小明,胡兆初.2005.鲁西济南辉长岩的形成时代:锆石LA-ICP-MS U-Pb定年证据.地球学报,26:321-325
- 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,31:81-92
- 杨承海,许文良,杨德彬,王伟,王伟德,刘金民.2008.鲁西上峪辉长-闪长岩的成因:年代学与岩石地球化学证据.中国科学D辑:地球科学,38:44-55
- 杨德彬,许文良,裴福萍,王清海,高山.2008.徐淮地区早白垩世岩石的年代学 and 同位素组成对岩浆源区与华北克拉通东部构造演化的制约.岩石学报,24:1745-1758
- 杨德彬,许文良,裴福萍,王清海,柳小明.2005.蚌埠隆起区花岗岩形成时代及岩浆源区性质:锆石LA-ICPMS U-Pb定年与示踪.地球化学,34:443-454
- 杨进辉,吴福元,钟孙霖,罗清华.2008.华北东部早白至世花岗岩侵位的伸展地球动力学背景:激光 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学证据.岩石学报,24:1175-1184
- 杨兴科,晁霞霞,郑孟林,姚卫华,杨旭升.2008.鄂尔多斯盆地东部紫金山岩体SHRIMP测年地质意义.矿物岩石,28:54-63
- 杨言辰,韩世炯,孙德有,郭嘉,张苏江.2012.小兴安岭-张广才岭成矿带斑岩型钼矿床岩石地球化学特征及其年代学研究.岩石学报,28:379-390
- 杨阳,王晓霞,柯昌辉,李金宝.2012.豫西南泥湖矿集区石宝沟花岗岩体的锆石U-Pb年龄、岩石地球化学及Hf同位素组成.中国地质,39:1525-1542
- 袁峰,周涛发,范裕,黄贻海,张乐骏.2010.安徽繁昌盆地中生代火山岩锆石LA-ICPMS U-Pb年龄及其意义.岩石学报,26:2805-2817
- 袁峰,周涛发,范裕,张乐骏,马良,钱兵.2011.宁芜盆地花岗岩类的锆石U-Pb年龄、同位素特征及其意义.地质学报,85:821-833
- 袁洪林,柳小明,刘勇胜,高山,凌文黎.2005.北京西山晚中生代火山岩U-Pb锆石年代学及地球化学研究.中国科学D辑:地球科学,35:821-836
- 翟明国,孟庆任,刘建明,侯泉林,胡圣标,李忠,张宏福,刘伟,邵济安,朱日祥.2004.华北东部中生代构造体制转折峰期的主要地质效应和形成动力学探讨.地学前缘,11:285-297
- 张二朋,牛道韞,霍有光,李益桂,张兰芳.1992.秦巴地区主要地质——构造特征梗概.西北地质科学,(2):31-46
- 张国伟,董云鹏,姚安平.2001.造山带与造山作用及其研究的新起点.西北地质,34:1-9
- 张宏,柳小明,张晔卿,袁洪林,胡兆初.2005.冀北滦平-辽西凌源地区张家口组火山岩顶、底的单颗粒锆石U-Pb测年及意义.地球科学,30:387-401
- 张宏,王明新,柳小明.2008a.LA-ICP-MS测年对辽西-冀北地区髫髻山组火山岩上限年龄的限定.科学通报,53:1815-1824
- 张宏,韦忠良,柳小明,李栋.2008b.冀北-辽西地区土城子组的LA-ICP-MS测年.中国科学D辑:地球科学,38:960-970
- 张进江,戚国伟,郭磊,刘江.2009.内蒙古大青山逆冲推覆体系中生代逆冲构造活动的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年.岩石学报,25:609-620
- 张旗,钱青,王二七,王焰,赵太平,郝杰,郭光军.2001.燕山中晚期的中国东部高原:埃达克岩的启示.地质科学,36:248-255
- 张田,张岳桥.2007.胶东半岛中生代侵入岩浆活动序列及其构造制约.高校地质学报,13:323-336
- 张玉修,张开均,黎兵,汪洋,魏庆国,唐显春.2007.西藏改则南拉果错蛇绿岩中斜长花岗岩锆石SHRIMP U-Pb年代学及其成因研究.科学通报,52:100-106
- 张岳桥,董树文,李建华,崔建军,施炜,苏金宝,李勇.2012.华南中生代大地构造研究新进展.地球学报,33:257-279
- 张岳桥,董树文,李建华,施炜.2011.中生代多向挤压构造作用与四川盆地的形成和改造.中国地质,38:233-250
- 张岳桥,董树文,赵越,张田.2007.华北侏罗纪大地构造:综评与新认识.地质学报,81:1462-1480
- 张岳桥,廖昌珍,施炜,张田,郭芳芳.2007.论鄂尔多斯盆地及其周围侏罗纪变形.地学前缘,14:182-196
- 张岳桥,施炜,李建华,王瑞瑞,李海龙,董树文.2010.大巴山前陆弧型构造带形成机理分析.地质学报,84:1300-1315
- 张岳桥,徐先兵,贾东,舒良树.2009.华南早中生代从印支期碰撞构造体系向燕山期俯冲构造体系转换的形变记录.地学前缘,16:234-247
- 赵崇贺,李国良.1987.西藏阿里西部地区中酸性侵入岩的岩石化学研究.地球科学,(3):257-264
- 赵越.1990.燕山地区中生代造山运动及构造演化.地质论评,36:1-13
- 赵越,崔盛芹,郭涛,徐刚.2002.北京西山侏罗纪盆地演化及其构造意义.地质通报,21:211-217
- 赵越,徐刚,张拴宏,杨振宇,张岳桥,胡健民.2004a.燕山运动与东亚构造体制的转变.地学前缘,11:319-328
- 赵越,张拴宏,徐刚,杨振宇,胡健民.2004b.燕山板内变形带侏罗纪主要构造事件.地质通报,23:854-863

- 赵宗溥, 何铸文. 1959. 北票地区的侏罗纪地层层序及燕山期火山活动、地壳运动及构造形态的几个问题. *地质科学*, 2: 45–48
- 郑亚东, Davis G A, 王琮, Darby B J, 华永刚. 1998. 内蒙古大青山大型逆冲推覆构造. *中国科学D辑: 地球科学*, 38: 289–295, 385–386
- 周红升, 马昌前, 张超, 陈玲, 张金阳, 余振兵. 2008. 华北克拉通南缘泌阳春水燕山期铝质A型花岗岩类年代学、地球化学及其启示. *岩石学报*, 24: 49–64
- 周建波, 石爱国, 景妍. 2016. 东北地块群: 构造演化与古大陆重建. *吉林大学学报(地球科学版)*, 46: 1042–1055
- 周丽云, 王瑜, 王娜. 2015. 中国东北完达山地区早白垩世同构造岩浆侵位——对晚中生代左行走滑作用的响应. *地质通报*, 34: 400–418
- 周凌, 陈斌. 2005. 南太行洪山正长岩的成因和意义: 锆石SHRIMP年代学、地球化学和Sr-Nd同位素特征. *自然科学进展*, 15: 1357–1365
- 周涛发, 范裕, 袁峰, 陆三明, 尚世贵, David C, Sebastien M, 赵国春. 2008. 安徽庐枞(庐江-枞阳)盆地火山岩的年代学及其意义. *中国科学D辑: 地球科学*, 38: 1342–1349
- 周涛发, 范裕, 袁峰, 宋船中, 张乐骏, 钱存超, 陆三明, David R C. 2010. 庐枞盆地侵入岩的时空格架及其对成矿的制约. *岩石学报*, 26: 2694–3104
- 周涛发, 范裕, 袁峰, 张乐骏, 钱兵, 马良, 杨西飞, David R C. 2011. 宁芜(南京-芜湖)盆地火山岩的年代学及其意义. *中国科学: 地球科学*, 41: 960–971
- 周翔, 余心起, 杨赫鸣, 王德恩, 杜玉雕, 柯宏帆. 2012. 皖南绩溪县靠背尖高Ba-Sr花岗岩闪长斑岩年代学及其成因. *岩石学报*, 28: 3403–3417
- 朱弟成, 潘桂棠, 莫宣学, 王立全, 廖忠礼, 赵志丹, 董国臣, 周长勇. 2006. 冈底斯中北部晚侏罗世-早白垩世地球动力学环境: 火山岩约束. *岩石学报*, 22: 534–546
- 朱光, 刘国生, Dunlap W J, Teyssier C, 王勇生, 牛漫兰. 2004. 郯庐断裂带同造山走滑运动的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学证据. *科学通报*, 49: 190–198
- 朱光, 牛漫兰, 刘国生, 王勇生, 谢成龙, 李长城. 2005a. 郯庐断裂带肥东段走滑运动的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法定年. *地质学报*, 79: 303–316
- 朱光, 谢成龙, 王勇生, 牛漫兰, 刘国生. 2005b. 郯庐高压走滑韧性剪切带特征及其 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 法定年. *岩石学报*, 21: 1687–1702
- 朱日祥, 陈凌, 吴福元, 刘俊来. 2011. 华北克拉通破坏的时间、范围与机制. *中国科学: 地球科学*, 41: 583–592
- Besse J, Courtillot V. 2002. Apparent and true polar wander and the geometry of the geomagnetic field over the last 200 Myr. *J Geophys Res*, 107: 6-1–6-31
- Charles N, Augier R, Gumiaux C, Monié P, Chen Y, Faure M, Zhu R X. 2013. Timing, duration and role of magmatism in wide rift systems: Insights from the Jiaodong Peninsula (China, East Asia). *Gondwana Res*, 24: 412–428
- Chen C H, Lee C Y, Shinjo R. 2016. The epilog of the western paleo-Pacific subduction: Inferred from spatial and temporal variations and geochemistry of the Late Cretaceous to Early Cenozoic silicic magmatism in coastal South China. *J Asian Earth Sci*, 115: 520–546
- Chen Z G, Zhang L C, Wan B, Wu H Y, Cleven N. 2011. Geochronology and geochemistry of the Wunugetushan porphyry Cu-Mo deposit in NE china, and their geological significance. *Ore Geol Rev*, 43: 92–105
- Cogné J P, Kravchinsky V A, Halim N, Hankard F. 2005. Late Jurassic–Early Cretaceous closure of the Mongol-Okhotsk Ocean demonstrated by new Mesozoic palaeomagnetic results from the Trans-Baikal area (SE Siberia). *Geophys J Int*, 163: 813–832
- Cui J J, Zhang Y Q, Dong S W, Jahn B M, Xu X B, Ma L C. 2013. Zircon U-Pb geochronology of the Mesozoic metamorphic rocks and granitoids in the coastal tectonic zone of SE China: Constraints on the timing of Late Mesozoic orogeny. *J Asian Earth Sci*, 62: 237–252
- Daoudene Y, Gapais D, Ledru P, Cocherie A, Hocquet S, Donskaya T V. 2009. The Ereendavaa Range (north-eastern Mongolia): An additional argument for Mesozoic extension throughout eastern Asia. *Int J Earth Sci-Geol Rundsch*, 98: 1381–1393
- Daoudene Y, Ruffet G, Cocherie A, Ledru P, Gapais D. 2013. Timing of exhumation of the Ereendavaa metamorphic core complex (north-eastern Mongolia)—U-Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ constraints. *J Asian Earth Sci*, 62: 98–116
- Darby B J, Davis G A, Zheng Y D. 2001. Structural evolution of the southwestern Daqing Shan, Yinshan belt, Inner Mongolia, China. *Geol Soc Am Memoirs*, 194: 199–214
- Davis G A, Darby B J. 2010. Early Cretaceous overprinting of the Mesozoic Daqing Shan fold-and-thrust belt by the Hohhot metamorphic core complex, Inner Mongolia, China. *Geosci Front*, 1: 1–20
- Davis G A, Qian X L, Zheng Y D. 1996. Mesozoic deformation and plutonism in the Yunmeng Shan: A metamorphic core complex north of Beijing, China. In: Yin A, Harrison M, Rubey V, eds. *The Tectonic Evolution of Asia*. Cambridge: Cambridge University Press. 253–280
- Davis G A, Wang C, Zheng Y D, Zhang J J, Zhang C H, Gehrels G E. 1998. The enigmatic Yinshan fold-and-thrust belt of northern China: New views on its intraplate contractional styles. *Geology*, 26: 43–46
- Davis G A, Zheng Y D, Wang C, Darby B J, Zhang C H, Gehrels G E. 2001. Mesozoic tectonic evolution of the Yanshan Fold and Thrust Belt, with emphasis on Hebei and Liaoning Provinces, Northern China. *Geol Soc Am Memoir*, 194: 171–197
- Deng J F, Su S G, Niu Y L, Liu C, Zhao G C, Zhao X G, Zhou S, Wu Z X. 2007. A possible model for the lithospheric thinning of North

- China Craton: Evidence from the Yanshanian (Jura-Cretaceous) magmatism and tectonism. *Lithos*, 96: 22–35
- Dewey J F, Shackleton R M, Chengfa C, Yiyin S. 1988. The tectonic evolution of the Tibetan Plateau. *Philos Trans R Soc A-Math Phys Eng Sci*, 327: 379–413
- Ding L, Kapp P, Zhong D, Deng W. 2003. Cenozoic volcanism in Tibet: Evidence for a transition from oceanic to continental subduction. *J Petrol*, 44: 1833–1865
- Ding L, Lai Q. 2003. New geological evidence of crustal thickening in the Gangdese block prior to the Indo-Asian collision. *Chin Sci Bull*, 48: 1604–1610
- Dong S W, Gao R, Yin A, Guo T L, Zhang Y Q, Hu J M, Li J H, Shi W, Li Q S. 2013. What drove continued continent-continent convergence after ocean closure? Insights from high-resolution seismic-reflection profiling across the Daba Shan in central China. *Geology*, 41: 671–674
- Dong S W, Zhang Y Q, Long C X, Yang Z Y, Ji Q, Wang T, Hu J M, Chen X H. 2008. Jurassic tectonic revolution in China and New Interpretation of the “Yanshan Movement”. *Acta Geol Sin*, 82: 334–347
- Dong S W, Zhang Y Q, Zhang F Q, Cui J J, Chen X H, Zhang S H, Miao L C, Li J H, Shi W, Li Z H, Huang S Q, Li H L. 2015. Late Jurassic-Early Cretaceous continental convergence and intracontinental orogenesis in East Asia: A synthesis of the Yanshan Revolution. *J Asian Earth Sci*, 114: 750–770
- Donskaya T V, Gladkochub D P, Mazukabzov A M, Ivanov A V. 2013. Late Paleozoic-Mesozoic subduction-related magmatism at the southern margin of the Siberian continent and the 150 million-year history of the Mongol-Okhotsk Ocean. *J Asian Earth Sci*, 62: 79–97
- Donskaya T V, Gladkochub D P, Mazukabzov A M, de Waele B, Presnyakov S L. 2012. The Late Triassic Kataev volcanoplutonic association in western Transbaikalia, a fragment of the active continental margin of the Mongol-Okhotsk Ocean. *Rus Geol Geophys*, 53: 22–36
- Donskaya T V, Windley B F, Mazukabzov A M, Kröner A, Sklyarov E V, Gladkochub D P, Ponomarchuk V A, Badarch G, Reichow M K, Hegner E. 2008. Age and evolution of late Mesozoic metamorphic core complexes in southern Siberia and northern Mongolia. *J Geol Soc*, 165: 405–421
- Gaetani M, Jadoul F, Erba E, Garzanti E. 1993. Jurassic and Cretaceous orogenic events in the North Karakoram: Age constraints from sedimentary rocks. *Geol Soc Lond Spec Publ*, 74: 39–52
- Gong W B, Hu J M, Chen H, Li Z H, Qu H J, Yang Y. 2015. Late Mesozoic tectonic evolution and kinematic mechanisms in the Daqing Shan at the northern margin of the North China craton. *J Asian Earth Sci*, 114: 103–114
- Griffin S A, Hendrix M S, Johnson C L, Badamgarav D, Badarch G, Amory J, Porter M, Barsbold R, Griffin W L, Zhang A D, O'Reilly S Y, Ryan C G. 1998. Phanerozoic evolution of the lithosphere beneath the Sino-Korean craton. In: Flower, M F J, Chung, S L, Lo, C H, Lee T Y, eds. *Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia*. AGU Geodynamic Series 100. 107–126
- Guo F, Fan W M, Li C W, Zhao L, Li H X, Yang J H. 2012. Multi-stage crust-mantle interaction in SE China: Temporal, thermal and compositional constraints from the Mesozoic felsic volcanic rocks in eastern Guangdong-Fujian provinces. *Lithos*, 150: 62–84
- Guynn J H, Kapp P, Pullen A, Heizler M, Gehrels G, Ding L. 2006. Tibetan basement rocks near Amdo reveal “missing” Mesozoic tectonism along the Bangong suture, central Tibet. *Geology*, 34: 505–508
- Han R, Ree J H, Cho D L, Kwon S T, Armstrong R. 2006. SHRIMP U-Pb zircon ages of pyroclastic rocks in the Bansong Group, Taebaeksan Basin, South Korea and their implication for the Mesozoic tectonics. *Gondwana Res*, 9: 106–117
- Hankard F, Cogné J P, Kravchinsky V. 2005. A new Late Cretaceous paleomagnetic pole for the west of Amuria block (Khurmen Uul, Mongolia). *Earth Planet Sci Lett*, 236: 359–373
- Hankard F, Cogné J P, Quidelleur X, Bayasgalan A, Lkhagvadorj P. 2007. Palaeomagnetism and K-Ar dating of Cretaceous basalts from Mongolia. *Geophys J Int*, 169: 898–908
- Hsieh C Y. 1936. On the late Mesozoic- early Tertiary orogenesis and volcanism, and their relation to the formation of Metallic deposits in China. *Bull Geol Soc China*, 15: 61–74
- Huang F, Li S G, Dong F, He Y S, Chen F K. 2008. High-Mg adakitic rocks in the Dabie orogen, central China: Implications for foundering mechanism of lower continental crust. *Chem Geol*, 255: 1–13
- Huang T K. 1945. On major tectonic forms of China. National Geological Survey of China under the Ministry of Economic Affairs, 1945
- Kapp P, Murphy M A, Yin A, Harrison T M, Ding L, Guo J. 2003. Mesozoic and Cenozoic tectonic evolution of the Shiquanhe area of western Tibet. *Tectonics*, 22: 1029
- Kim J, Yi K, Jeong Y J, Cheong C S. 2011. Geochronological and geochemical constraints on the petrogenesis of Mesozoic high-K granitoids in the central Korean peninsula. *Gondwana Res*, 20: 608–620
- Li C M, He D F, Sun Y P, He J Y, Jiang Z X. 2016. Out-of-sequence thrusting in polycyclic thrust belts: An example from the Mesozoic Yanshan belt, North China Craton. *Tectonics*, 35: 2082–2116
- Li C X, He D F, Sun Y P, He J Y, Jiang Z X. 2015. Structural characteristic and origin of intra-continental fold belt in the eastern

- Sichuan basin, South China Block. *J Asian Earth Sci*, 111: 206–221
- Li H, Ling M X, Li C Y, Zhang H, Ding X, Yang X Y, Fan W M, Li Y L, Sun W D. 2012. A-type granite belts of two chemical subgroups in central eastern China: Indication of ridge subduction. *Lithos*, 150: 26–36
- Li J H, Ma Z L, Zhang Y Q, Dong S W, Li Y, Lu M A, Tan J Q. 2014a. Tectonic evolution of Cretaceous extensional basins in Zhejiang Province, eastern South China: Structural and geochronological constraints. *Int Geol Rev*, 56: 1602–1629
- Li J H, Zhang Y Q, Dong S W, Johnston S T. 2014b. Cretaceous tectonic evolution of South China: A preliminary synthesis. *Earth-Sci Rev*, 134: 98–136
- Li J H, Dong S W, Cawood P A, Zhao G C, Johnston S T, Zhang Y Q, Xin Y J. 2018. An Andean-type retro-arc foreland system beneath northwest South China revealed by SINOPROBE profiling. *Earth Planet Sci Lett*, 490: 170–179
- Li J H, Zhang Y Q, Dong S W, Li H L. 2012. Late Mesozoic-Early Cenozoic deformation history of the Yuanma Basin, central South China. *Tectonophysics*, 570–571: 163–183
- Li J H, Zhang Y Q, Dong S W, Shi W. 2013a. Structural and geochronological constraints on the Mesozoic tectonic evolution of the North Dabashan zone, South Qinling, central China. *J Asian Earth Sci*, 64: 99–114
- Li J H, Zhang Y Q, Dong S W, Su J B, Cui J J, Shi W. 2013b. The Hengshan low-angle normal fault zone: Structural and geochronological constraints on the Late Mesozoic crustal extension in South China. *Tectonophysics*, 606: 97–115
- Li J H, Dong S W, Yin A, Zhang Y Q, Shi W. 2015. Mesozoic tectonic evolution of the Daba Shan Thrust Belt in the southern Qinling orogen, central China: Constraints from surface geology and reflection seismology. *Tectonics*, 34: 1545–1575
- Li W P, Liu S F, Wang Y, Qian T, Gao T J. 2017. Duplex thrusting in the South Dabashan arcuate belt, central China. *J Struct Geol*, 103: 120–136
- 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. *Int Geol Rev*, 56: 288–312
- Li Z X, Li X H. 2007. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model. *Geology*, 35: 179
- Li Z Z, Qin K Z, Li G M, Ishihara S, Jin L Y, Song G X, Meng Z J. 2014. Formation of the giant Chalukou porphyry Mo deposit in northern Great Xing'an Range, NE China: Partial melting of the juvenile lower crust in intra-plate extensional environment. *Lithos*, 202–203: 138–156
- Lim C, Cho M. 2011. Formation of the giant Chalukou porphyry Mo deposit in northern Great Xing'an Range, NE China: Partial melting of the juvenile lower crust in intra-plate extensional environment. *Tectonics*, 31: 104
- Lin W, Charles N, Chen Y, Chen K, Faure M, Wu L, Wang F, Li Q, Wang J, Wang Q. 2013. Late Mesozoic compressional to extensional tectonics in the Yiwulüshan massif, NE China and their bearing on the Yinshan-Yanshan orogenic belt. *Gondwana Res*, 23: 78–94
- Lin W, Faure M, Monié P, Schärer U, Zhang L, Sun Y. 2000. Tectonics of SE China: New insights from the Lushan massif (Jiangxi Province). *Tectonics*, 19: 852–871
- Liu L, Xu X, Xia Y. 2015. Asynchronizing paleo-Pacific slab rollback beneath SE China: Insights from the episodic Late Mesozoic volcanism. *Gondwana Res*, 37: 397–407
- Liu Q, Yu J H, Wang Q, Su B, Zhou M F, Xu H, Cui X. 2012. Ages and geochemistry of granites in the Pingtan-Dongshan Metamorphic Belt, Coastal South China: New constraints on Late Mesozoic magmatic evolution. *Lithos*, 150: 268–286
- Liu J, Zhao Y, Liu X M, Wang Y, Liu X W. 2012. Rapid exhumation of basement rocks along the northern margin of the North China craton in the early Jurassic: Evidence from the Xiabancheng Basin, Yanshan Tectonic Belt. *Basin Res*, 24: 544–558
- Liu S F. 1998. The coupling mechanism of basin and orogen in the western Ordos Basin and adjacent regions of China. *J Asian Earth Sci*, 16: 369–383
- Liu S F, Gurnis M, Ma P, Zhang B. 2017. Reconstruction of northeast Asian deformation integrated with western Pacific plate subduction since 200 Ma. *Earth-Sci Rev*, 175: 114–142
- Liu S F, Li W P, Wang K, Qian T, Jiang C X. 2015. Late Mesozoic development of the southern Qinling-Dabieshan foreland fold-thrust belt, Central China, and its role in continent-continent collision. *Tectonophysics*, 644–645: 220–234
- Liu S F, Su S, Zhang G W. 2013. Early Mesozoic basin development in North China: Indications of cratonic deformation. *J Asian Earth Sci*, 62: 221–236
- Ma A, Hu X, Garzanti E, Han Z, Lai W. 2016. Sedimentary and tectonic evolution of the southern Qiangtang basin: Implications for the Lhasa-Qiangtang collision timing. *J Geophys Res-Solid Earth*, 122: 4790–4813
- Matte P, Tapponnier P, Arnaud N, Bourjot L, Avouac J P, Vidal P, Qing L, Yusheng P, Yi W. 1996. Tectonics of Western Tibet, between the Tarim and the Indus. *Earth Planet Sci Lett*, 142: 311–330
- Mazukabzov A M, Donskaya T V, Gladkochub D P, Sklyarov E V, Ponomarchuk V A, Sal'nikova E B. 2006. Structure and age of the metamorphic core complex of the Burgutui Ridge (southwestern Transbaikalian region). *Dokl Earth Sci*, 407: 179–183

- Menzies M A, Fan W M, Zhang M. 1993. Palaeozoic and Cenozoic lithoprobe and the loss of >120 km of Archean lithosphere, Sino-Korean craton, China. In: Prichard H M, Alabaster T, Harris N B W, Neary C R, eds. *Magmatic Processes and Plate Tectonics*. Geol Soc Spec Publ, 76: 71–81
- Menzies M A, Xu Y G. 1998. Geodynamics of the North China Craton. In: Flower F J, Chung S L, Lo C H, Lee T Y, eds. *Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia*. Washington D C: American Geophysical Union. 155–165
- Metelkin D V, Vernikovsky V A, Kazansky A Y, Wingate M T D. 2010. Late Mesozoic tectonics of Central Asia based on paleomagnetic evidence. *Gondwana Res*, 18: 400–419
- Mitchell R N, Kilian T M, Evans D A D. 2012. Supercontinent cycles and the calculation of absolute palaeolongitude in deep time. *Nature*, 482: 208–211
- Murphy M A, Yin A, Harrison T M, Dürr S B, Chen Z, Ryerson F J, Kidd W, Wang X, Zhou X. 1997. Did the Indo-Asian collision alone create the Tibetan plateau? *Geology*, 25: 719
- Nance R D, Murphy J B. 2013. Origins of the supercontinent cycle. *Geosci Front*, 4: 439–448
- Pei F P, Xu W L, Yang D B, Yu Y, Meng E, Zhao Q G. 2011a. Petrogenesis of late Mesozoic granitoids in southern Jilin Province, northeastern China: Geochronological, geochemical, and Sr-Nd-Pb isotopic evidence. *Lithos*, 125: 27–39
- Pei F P, Xu W L, Yang D B, Yu Y, Wang W, Zhao Q G. 2011b. Geochronology and geochemistry of Mesozoic mafic-ultramafic complexes in the southern Liaoning and southern Jilin Provinces, NE China: Constraints on the spatial extent of destruction of the North China Craton. *J Asian Earth Sci*, 40: 636–650
- Pei J L, Sun Z M, Liu J, Liu J, Wang X S, Yang Z Y, Zhao Y, Li H B. 2011. A paleomagnetic study from the Late Jurassic volcanics (155 Ma), North China: Implications for the width of Mongol-Okhotsk Ocean. *Tectonophysics*, 510: 370–380
- Qiu R Z, Zhou S, Li T D, Deng J F, Xiao Q H, Wu Z X, Cai Z Y. 2007. The tectonic-setting of ophiolites in the western Qinghai-Tibet Plateau, China. *J Asian Earth Sci*, 29: 215–228
- Ratschbacher L, Hacker B R, Calvert A, Webb L E, Grimmer J C, McWilliams M O, Ireland T, Dong S, Hu J. 2003. Tectonics of the Qinling (Central China): Tectonostratigraphy, geochronology, and deformation history. *Tectonophysics*, 366: 1–53
- Ritts B D, Darby B J, Cope T. 2001. Early Jurassic extensional basin formation in the Daqing Shan segment of the Yinshan belt, northern North China Block, Inner Mongolia. *Tectonophysics*, 339: 239–258
- Sagöng H, Kwon S T, Ree J H. 2005. Mesozoic episodic magmatism in South Korea and its tectonic implication. *Tectonics*, 24: TC5002
- Schettino A, Scotese C R. 2005. Apparent polar wander paths for the major continents (200 Ma to the present day): A palaeomagnetic reference frame for global plate tectonic reconstructions. *Geophys J Int*, 163: 727–759
- Shi W, Zhang Y Q, Dong S W, Hu J M, Wiesinger M, Ratschbacher L, Jonckheere R, Li J H, Tian M, Chen H, Wu G L, Ma L C, Li H L. 2012. Intra-continental Dabashan orocline, southwestern Qinling, Central China. *J Asian Earth Sci*, 46: 20–38
- Sklyarov E V, Mazukabzov A M, Mel'nikov A I. 1997. Cordilleran-Type Metamorphic-Core Complexes (in Russian). Izd. So Ran, Nits Oiggm, Novosibirsk
- Song G X, Qin K Z, Li G M, Evans N J, Li X H. 2014. Mesozoic magmatism and metallogeny in the Chizhou area, Middle-Lower Yangtze Valley, SE China: Constrained by petrochemistry, geochemistry and geochronology. *J Asian Earth Sci*, 91: 137–153
- Su Y P, Zheng J P, Griffin W L, Zhao J H, O'Reilly S Y, Tang H Y, Ping X Q, Xiong Q. 2013. Petrogenesis and geochronology of Cretaceous adakitic, I- and A-type granitoids in the NE Yangtze block: Constraints on the eastern subsurface boundary between the North and South China blocks. *Lithos*, 175–176: 333–350
- Sun H R, Huang Z L, Li W B, Leng C B, Zhang X C. 2014. Chronology, geochemistry and Sr-Nd isotope studies of Jurassic intrusions in the Diyanqinamu porphyry Mo mine, central Inner Mongolia, China. *J Asian Earth Sci*, 88: 85–97
- Sun Y J, Dong S W, Zhang H, Li H, Shi Y L. 2013. 3D thermal structure of the continental lithosphere beneath China and adjacent regions. *J Asian Earth Sci*, 62: 697–704
- Tang J, Xu W L, Wang F, Zhao S, Li Y. 2015. Geochronology, geochemistry, and deformation history of Late Jurassic-Early Cretaceous intrusive rocks in the Erguna Massif, NE China: Constraints on the late Mesozoic tectonic evolution of the Mongol-Okhotsk orogenic belt. *Tectonophysics*, 658: 91–110
- Tomurtogoo O, Windley B F, Kroner A, Badarch G, Liu D Y. 2005. Zircon age and occurrence of the Adaatsag ophiolite and Muron shear zone, central Mongolia: Constraints on the evolution of the Mongol-Okhotsk ocean, suture and orogen. *J Geol Soc*, 162: 125–134
- Wang F, Zhou X H, Zhang L C, Ying J F, Zhang Y T, Wu F Y, Zhu R X. 2006. Late Mesozoic volcanism in the Great Xing'an Range (NE China): Timing and implications for the dynamic setting of NE Asia. *Earth Planet Sci Lett*, 251: 179–198
- Wang G G, Ni P, Zhao K D, Wang X L, Liu J Q, Jiang S Y, Chen H. 2012. Petrogenesis of the Middle Jurassic Yinshan volcanic-intrusive complex, SE China: Implications for tectonic evolution and Cu-Au mineralization. *Lithos*, 150: 135–154
- Wang Q, Wyman D A, Xu J F, Zhao Z H, Jian P, Xiong X L, Bao Z W, Li C F, Bai Z H. 2006. Petrogenesis of Cretaceous adakitic and

- shoshonitic igneous rocks in the Luzong area, Anhui Province (eastern China): Implications for geodynamics and Cu-Au mineralization. *Lithos*, 89: 424–446
- Wang Q, Wyman D A, Xu J F, Jian P, Zhao Z H, Li C F, Xu W, Ma J L, He B. 2007. Early Cretaceous adakitic granites in the Northern Dabie Complex, central China: Implications for partial melting and delamination of thickened lower crust. *Geochim Cosmochim Acta*, 71: 2609–2636
- Wang Y, Zhou L Y, Liu S F, Li J Y, Yang T N. 2018. Post-cratonization deformation processes and tectonic evolution of the North China Craton. *Earth-Sci Rev*, 177: 320–365
- Wang Y C, Dong S W, Shi W, Chen X H, Jia L M. 2017. The Jurassic structural evolution of the western Daqingshan area, eastern Yinshan belt, North China. *Int Geol Rev*, 59: 1885–1907
- Wang Y H, Zhao C B, Zhang F F, Liu J J, Wang J P, Peng R M, Liu B. 2015. SIMS zircon U-Pb and molybdenite Re-Os geochronology, Hf isotope, and whole-rock geochemistry of the Wunugetushan porphyry Cu-Mo deposit and granitoids in NE China and their geological significance. *Gondwana Res*, 28: 1228–1245
- Webb L E, Graham S A, Johnson C L, Badarch G, Hendrix M S. 1999. Occurrence, age, and implications of the Yagan-Onch Hayrhan metamorphic core complex, southern Mongolia. *Geology*, 27: 143–146
- 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. *Bull Geol Soc China*, 6: 9–37
- Wong W H. 1929. The Mesozoic orogenic movement in Eastern China. *Bull Geol Soc China*, 8: 33–44
- Wu F Y, Ji W Q, Sun D H, Yang Y H, Li X H. 2012. Zircon U-Pb geochronology and Hf isotopic compositions of the Mesozoic granites in southern Anhui Province, China. *Lithos*, 150: 6–25
- Wu F Y, Lin J Q, Wilde S A, Zhang X, Yang J H. 2005a. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China. *Earth Planet Sci Lett*, 233: 103–119
- Wu F Y, Sun D Y, Li H M, Jahn B M, Wilde S A. 2002. A-type granites in northeastern China: Age and geochemical constraints on their petrogenesis. *Chem Geol*, 187: 143–173
- Wu F Y, Yang J H, Lo C H, Wilde S A, Sun D Y, Jahn B M. 2007. The Heilongjiang Group: A Jurassic accretionary complex in the Jiamusi Massif at the western Pacific margin of northeastern China. *Isl Arc*, 16: 156–172
- Wu F Y, Yang J H, Wilde S A, Zhang X O. 2005b. Geochronology, petrogenesis and tectonic implications of Jurassic granites in the Liaodong Peninsula, NE China. *Chem Geol*, 221: 127–156
- Wu F Y, Sun D Y, Ge W C, Zhang Y B, Grant M L, Wilde S A, Jahn B M. 2011. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in north-eastern China. *J Asian Earth Sci*, 41: 1–30
- Xie G Q, Mao J W, Li X W, Duan C, Yao L. 2011. Late Mesozoic bimodal volcanic rocks in the Jinniu basin, Middle-Lower Yangtze River Belt (YRB), East China: Age, petrogenesis and tectonic implications. *Lithos*, 127: 144–164
- Xie J R. 1933. *New Geological Research on Xishan*. Beijing: Geological Publishing House. 115–121
- 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. *J Asian Earth Sci*, 74: 167–193
- Xu C H, Zhang L, Shi H S, Brik M R, Huhma H, Chen L H, Zhang M Q, Zhou Z Y. 2017. Tracing an Early Jurassic magmatic arc from South to East China Seas. *Tectonics*, 36: 466–492
- Yang Q Y, Santosh M, Shen J F, Li S R. 2014. Juvenile vs. recycled crust in NE China: Zircon U-Pb geochronology, Hf isotope and an integrated model for Mesozoic gold mineralization in the Jiaodong Peninsula. *Gondwana Res*, 25: 1445–1468
- Yao L, Xie G Q, Mao J W, Lu Z C, Zhao C S, Zheng X W, Ding N. 2015. Geological, geochronological, and mineralogical constraints on the genesis of the Chengchao skarn Fe deposit, Edong ore district, Middle-Lower Yangtze River Valley metallogenic belt, eastern China. *J Asian Earth Sci*, 101: 68–82
- Yarmolyuk V V, Vorotsov A A, Ivanov V G, Kovalenko V I, Baikin D N, Sandimirova G P. 2000. Stages of bimodal and alkaline granite magmatism in the western Transbaikalian region: Geochronological data on rocks from the Tugui depression. *Dokl Earth Sci*, 373: 811–815
- Ying J F, Zhang H F, Sun M, Tang Y J, Zhou X H, Liu X M. 2007. Petrology and geochemistry of Zijinshan alkaline intrusive complex in Shanxi Province, western North China Craton: Implication for magma mixing of different sources in an extensional regime. *Lithos*, 98: 45–66
- Yu J J, Wang F, Xu W L, Gao F H, Pei F P. 2012. Early Jurassic mafic magmatism in the Lesser Xing'an-Zhanguangcai Range, NE China, and its tectonic implications: Constraints from zircon U-Pb chronology and geochemistry. *Lithos*, 142–143: 256–266
- Zhang J H, Gao S, Ge W C, Wu F Y, Yang J H, Wilde S A, Li M. 2010. Geochronology of the Mesozoic volcanic rocks in the Great Xing'an Range, northeastern China: Implications for subduction-induced delamination. *Chem Geol*, 276: 144–165
- Zhang J H, Ge W C, Wu F Y, Wilde S A, Yang J H, Liu X M. 2008. Large-scale Early Cretaceous volcanic events in the northern Great Xing'an Range, Northeastern China. *Lithos*, 102: 138–157
- Zhang S, Zhu G, Liu C, Li Y J, Su N, Xiao S Y, Gu C C. 2018. Strike-

- slip motion within the Yalu River Fault Zone, NE Asia: The development of a shear continental margin. *Tectonics*, 37: 1771–1796
- Zhang Y Q, Dong S W, Shi W. 2003. Cretaceous deformation history of the middle Tan-Lu fault zone in Shandong Province, eastern China. *Tectonophysics*, 363: 243–258
- Zhang Z M, Dong X, Santosh M, Zhao G C. 2014. Metamorphism and tectonic evolution of the Lhasa terrane, Central Tibet. *Gondwana Res*, 25: 170–189
- Zhang P Z, Shen Z K, Wang M, Gan W J, Burgmann R, Molnar P, Wang Q, Niu Z J, Sun J Z, Wu J C, Sun H R, You X Z. 2004. Continuous deformation of the Tibetan Plateau from global positioning system data. *Geology*, 32: 809
- Zhang Y Q, Dong S W, Zhao Y, Zhang T. 2008. Jurassic tectonics of North China: A synthetic view. *Acta Geol Sin-English Ed*, 82: 310–326
- Zhao Z F, Zheng Y F, Wei C S, Gong B. 2004. Temporal relationship between granite cooling and hydrothermal uranium mineralization at Dalongshan in China: A combined radiometric and oxygen isotopic study. *Ore Geol Rev*, 25: 221–236
- Zheng Y, Zhang Q, Wang Y, Liu R, Wang S G, Zuo G, Wang S Z, Lkaasuren B, Badarch G, Badamgarav Z. 1996. Great Jurassic thrust sheets in Beishan (North Mountains)—Gobi areas of China and southern Mongolia. *J Struct Geol*, 18: 1111–1126
- Zhou X M, Li W X. 2000. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in Southeastern China: Implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas. *Tectonophysics*, 326: 269–287
- Zhou X M, Sun T, Shen W Z, Shu L S, Niu Y L. 2006. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution. *Episodes*, 29: 26–33
- Zhu G, Wang Y S, Liu G S, Niu M L, Xie C L, Li C C. 2005. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of strike-slip motion on the Tan-Lu fault zone, East China. *J Struct Geol*, 27: 1379–1398
- Zorin Y A. 1999. Geodynamics of the western part of the Mongolia-Okhotsk collisional belt, Trans-Baikal region (Russia) and Mongolia. *Tectonophysics*, 306: 33–56
- Zorin Y A, Belichenko V G, Turutanov E K, Kozhevnikov V M, Ruzhentsev S V, Dergunov A B, Filippova I B, Tomurtogoo O, Arvisbaatar N, Bayasgalan T, Biambaa C, Khosbayar P. 1993. The South Siberia-Central Mongolia transect. *Tectonophysics*, 225: 361–378

(责任编辑: 董云鹏)