中国科学: 地球科学 2018 年 第 48 卷 第 5 期: 521 ~ 535
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
评 述 克拉通破坏与西太平洋板块俯冲专题

燕山运动与华北克拉通破坏关系的讨论

王瑜[1*], 孙立新[2], 周丽云[1], 谢玥婷[1]

1. 中国地质大学(北京)科学研究院, 北京 100083;
2. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170
* E-mail: wangy@cugb.edu.cn

收稿日期: 2017-06-29; 收修改稿日期: 2018-01-26; 接受日期: 2018-02-02; 网络版发表日期: 2018-03-27
国家自然科学基金项目(编号: 90914004)资助

摘要 燕山运动与华北克拉通破坏的关系、华北克拉通破坏与西太平洋板块俯冲作用的关系等是探讨和解决中生代中晚期东亚大陆构造演化过程的关键. 燕山运动是具有全球意义的重要地壳构造变动, 其形成和演化时间及沉积-火山作用的表现已得到了系统地研究. 但关于其全球意义, 整体性的表现特征仍有诸多的争议. 而争议的焦点在于是否以不整合为基本的出发点. 对于一个形成于陆内环境、具有强烈变形但不整合发育并不具有普遍性、且火山活动大量出现的地壳变动, 到底是一个构造事件还是一个过程, 以及它所代表的区域性或全球地质构造意义, 仍有待进一步深思. 在简要综述燕山运动及华北克拉通破坏的研究成果基础上, 讨论了燕山运动的时空变化、形成机制与华北克拉通的变形、破坏、古太平洋板块的俯冲作用等的相关性. 强调指出了燕山运动的发生发展时限是以中晚侏罗世为主, 与白垩纪期间的伸展作用、大规模的岩浆活动等为代表的华北克拉通岩石圈减薄是不同动力系统下的产物, 或者是不同构造事件或构造过程的产物. 另外其形成的大地构造背景及是否能代表华北克拉通破坏的主要过程或某一环节, 是本文关注的重要命题之一.

关键词 燕山运动, 华北克拉通破坏, 古太平洋板块俯冲, 大陆内部变形, 层圈状旋转

1 引言

燕山运动为侏罗、白垩纪期间广泛发育于中国全境的重要构造运动, 主要表现为褶皱断裂变动、岩浆喷发侵入活动及部分地带的变质作用(地球科学大辞典编委会, 2006). 燕山运动是(中国)地质发展史上一次十分重要的构造运动, 对中国大地构造的发展和地貌轮廓的奠定, 具有重要意义. 其实质是该时期东亚构造体制发生了重大转变, 在这一过程中, 构造格局由东西向转为北东走向, 强烈的挤压作用发生, 随之形成早白垩世大规模岩浆侵入、火山作用. 中侏罗世燕辽生物群向早白垩世热河生物群发生更替, 成为中国大陆和东亚重大构造变革事件.

克拉通破坏是指克拉通稳定性整体丧失的地质现象(吴福元等, 2008; 朱日祥等, 2011), 或称去克拉通化(Yang等, 2008). 华北克拉通破坏最重要的表现是岩石圈减薄之后的强烈岩浆活动(吴福元等, 2008, 2014). 朱日祥等(2012)认为, 华北克拉通东部的破坏不仅表现为岩石圈地幔的改造和破坏, 而且表现为下地壳甚至整个地壳的改造和破坏, 之后华北克拉通东部已不

中文引用格式: 王瑜, 孙立新, 周丽云, 谢玥婷. 2018. 燕山运动与华北克拉通破坏关系的讨论. 中国科学: 地球科学, 48: 521–535, doi: 10.1360/N072017-00219
英文引用格式: Wang Y, Sun L X, Zhou L Y, Xie Y T. 2018. Discussion on the relationship between the Yanshanian Movement and cratonic destruction in North China. Science China Earth Sciences, 61: 499–514, https://doi.org/10.1007/s11430-017-9177-2

© 2018 《中国科学》杂志社

再具有典型克拉通的属性.

Wong(1926)以燕山为标准地区创名的燕山运动, 原意代表侏罗纪末期、白垩纪初期产生的不整合、火成岩活动和成矿作用(地球科学大辞典编委会, 2006). 燕山运动自1927年翁文灏命名以来(Wong, 1926, 1927, 1929), 已有90年的研究历史, 可谓论著颇丰(Lee, 1948; 陈国达, 1956, 1992; 赵宗溥, 1959, 1963; 黄汲清, 1960; 鲍亦冈等, 1983; 聂宗笙, 1985; 任纪舜等, 1990; 赵越, 1990; 赵越等, 1994, 2004, 2006; 邓晋福等, 1996; 董国臣, 1996; Davis等, 1996, 1998, 2001; 张宏仁, 1998; 张宏仁等, 2013; 董树文等, 2000, 2007, 2008; 吴福元等, 2000; 崔盛芹等, 2002; 张长厚等, 2004a, 2004b). 关于燕山运动的时限、年代格架、物质记录及区域表现已有系统地深入研究, 这对燕山运动本质及其内涵的正确认识有着重要影响. 从整个亚洲大陆东部的宏观角度来看, 燕山运动无疑与东部大陆构造地质演化有关. 由于燕山运动具有鲜明中国特色的地质现象, 对这一地质事件本质的正确认识, 将是中国地质学家为世界地质科学的发展做出贡献的领域所在(吴福元等, 2000). 因此, 有必要阐明"燕山运动的内涵"及其时限以及区域上的表现, 以便正确理解燕山运动及其大地构造意义.

同样地, 燕山运动的时间、空间变化是否等同于华北克拉通破坏的时空变化? 已有研究者认为, 华北克拉通破坏的构造响应主要是以伸展作用为标志, 表现为中国东部的裂谷作用(盆地)、变质核杂岩等, 其形成于130~110Ma, 峰期时间为125Ma(翟明国等, 2003; Liu等, 2005, 2013; 王涛等, 2007; 吴福元等, 2008; Wang T等, 2011; 朱日祥等, 2011, 2012), 而燕山运动的时间有不同认识, 如中晚侏罗世, 或者中晚侏罗世至中白垩世(Wong, 1929; 任纪舜等, 1990; 崔盛芹等, 2002). 燕山运动的成因机制与华北克拉通破坏是否一致同样没有解决. 燕山运动所体现的变形时间、火山活动与沉积过程, 是否也是华北克拉通破坏过程所具有的? 有待深入地探讨.

本文通过对目前已发表文献以及作者们近年来的研究工作, 阐明燕山运动的涵义, 以及与华北克拉通破坏的关系、大地构造背景, 特别是依据构造变形、火山作用以及岩脉的时-空分布对燕山运动的时限以及是否与华北克拉通的破坏有关进行了年代学约束, 进而探讨燕山运动的大地构造意义.

2 有关燕山运动的已有研究成果

2.1 燕山运动的期次划分

自1926年翁文灏提出燕山运动以来(Wong, 1926, 1927, 1929), 许多学者相继对燕山运动和燕山地区的构造运动期次、岩浆活动和成矿作用等属性进行过许多探讨. 燕山运动的概念最先由翁文灏在东京泛太平洋科学大会上提出(Wong, 1926), 是指发生在华北燕山地区中晚侏罗世时期的重大构造事件. 1929年他详细地阐述并明确定义(Wong, 1929), 将华北燕山运动分为A、B两幕, 分别代表前髫髻山组、前王氏组的不整合, 并且分别与北美西部的侏罗纪和拉拉米运动对比, 燕山运动B幕以强烈的褶皱和冲断层为特征. 崔盛芹等(2000, 2002)将燕山地区的燕山运动分为两个时期, 即早-中侏罗世的早燕山期和晚侏罗世-白垩纪的晚燕山期. 任纪舜等(1990)将燕山运动分为早、中、晚3个旋回, 时限包括整个侏罗纪和白垩纪. 谢家荣(Hsieh, 1936)将中国东部燕山期的构造运动限定在侏罗纪-白垩纪. 其中多数研究者根据区域地层之间的角度不整合将燕山期的构造变形划分为3~5个构造幕.

尽管不同学者对燕山运动提出不同的分期意见, 但是1927年翁文灏命名的燕山运动A幕——髫髻山组火山岩下的不整合和B幕——张家口组火山岩下的不整合, 却始终未能改变对"燕山运动"主期的划分. 翁文灏根据他在燕山地区的观察和中国东部的资料将其划分为九龙山砂岩沉积之后、髫髻山火山岩堆积之前的A幕和以褶皱作用、强烈逆掩作用为特征的B幕, 两者之间为强烈的火山喷发和花岗岩侵入的中间幕.

2.2 燕山运动的变形特征

众所周知, 燕山运动是在有关华北北缘辽西、北京西山变形以及地层研究基础上提出的(Wong, 1927, 1929), 认为是发育于侏罗纪-白垩纪期间的与太平洋地区活动有关的具有挤压、火山作用的变革作用. 虽然在此后有过对一些细节的讨论和分析(例如, 赵宗溥, 1963; 赵越等, 2004; 张宏仁等, 2013; 李海龙等, 2014), 总体上, 认为燕山运动是华北乃至中国东部至关重要的一次构造作用. 以华北北缘燕山地区发育燕山运动的地质特征来说, 从中晚侏罗世到白垩纪期间, 构造变形发育清晰的地区在辽西、北京西山, 主体上以北东走向为主(图1), 而真正的燕山地区由于受到东

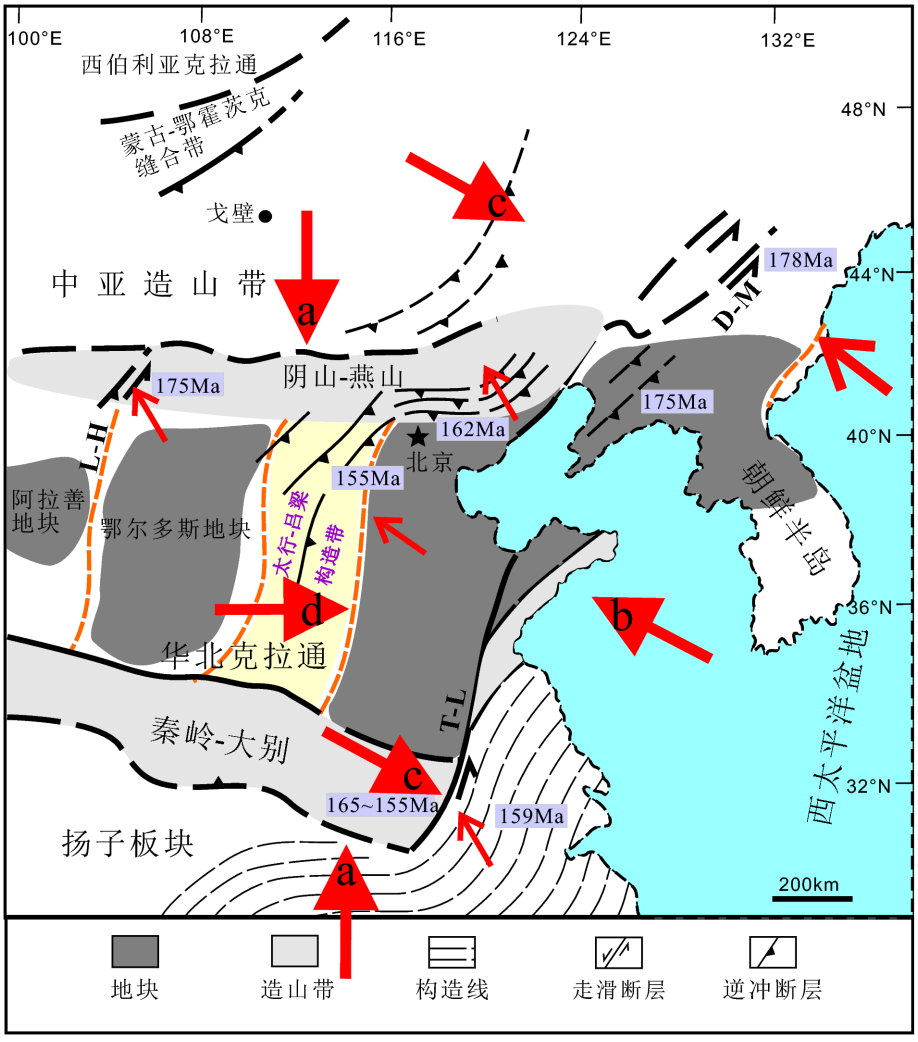

图 1　华北克拉通及邻区中晚侏罗世构造特征及分布图

T-L, 郯庐断裂带; D-M, 敦化-密山断裂带. 年代数据为该位置的构造变形$^{40}Ar/^{39}Ar$年龄, 红色粗箭头为古太平洋板块运动方向, 细箭头为华北及邻区陆内构造变形的运动学方向. 图中箭头上a表示中生代早期近南北向大陆汇聚, b表示180~150Ma古太平洋板块的俯冲作用, c表示140~110Ma蒙古-鄂霍茨克海的关闭与班公-怒江缝合带的最终关闭, d表示新生代的环境

西走向早期构造的制约, 所以构造线的方向以及由此带来的多解性一直存在. 加之这一地区发育有多期活动的火山作用以及花岗岩的侵位, 导致该区变形和沉积序列复杂, 砾石层多次发育.

2.3　燕山运动的时限

关于燕山运动发生的时限, 赵越等(2004)根据中侏罗世日本海沟增生楔和东亚火山弧的出现, 认为作为燕山运动主幕构造转换时代为中侏罗世. 牛宝贵等(2003)在张家口火山岩底部获得锆石U-Pb SHRIMP年龄, 将135Ma定为从挤压构造体制向伸展构造体制转换时间.

盆地的沉积记录和构造变形是重要构造事件的表现和响应. 准确理解"燕山运动"应遵循1927年翁文灏的原始含义, 从燕山地区中生代盆地的沉积演化和构造变形出发, 限定燕山运动A、B幕发生的时代. 近20年来, Davis等(2001)、袁洪林等(2005)、刘健等(2006)、柳永清等(2006)、张宏等(2008)以火山作用与地层形成相结合, 特别是以髫髻山组火山岩及其上下、土城子组(后城组)、张家口组等为代表进行了研究. 高精度锆石SIMS、SHRIMP及LA-ICP-MS对于火山岩层的定年, 极大地推动了有关这一地区的地层和

火山活动时限的研究. 虽然没有共识, 但很大程度上, 年代测定以及沉积作用的研究表明(表1; 图2和3), 燕山地区的火山活动时间序列为: 南大岭组(兴隆沟组)玄武岩系列(近东西走向)形成时间175~176Ma, 髫髻山组火山岩形成于165~155Ma(东部), 向西至北京西山和太行山北部一带, 如果按以往的命名不变, 其形成时间为155~150Ma. 土城子组中的火山岩为154~139Ma, 在不同地区有所不同, 张家口组具有近类似的时间144~135Ma, 义县组(九佛堂组)134~120Ma (表1; 图2). 以此为代表的燕山运动也主要被划分为二期: 髫髻山组火山岩之下的不整合, 张家口组之下的不整合, 也有进一步地划分为三期(增加了土城子组之下)以及中晚白垩世(早期的划分)等.

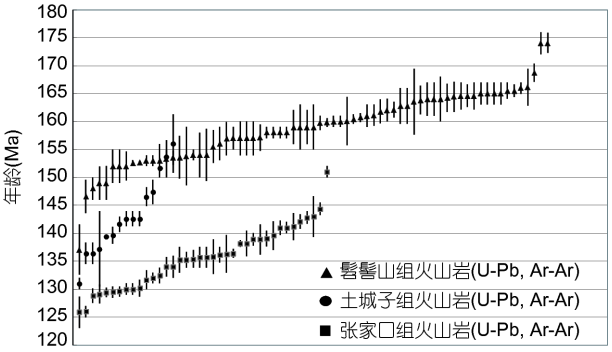

图 2　华北北缘髫髻山组、土城子组及张家口组火山岩年龄分布图

髫髻山组、土城子组数据主要来源于Davis等(2001)、柳永清等(2003, 2006)、袁洪林等(2005)、刘健等(2006)、张宏等(2008)以及作者等未发表的资料). 175~170Ma髫髻山组火山岩年龄数据为全岩及斜长石单矿物Ar-Ar年龄Davis等(2001)

3　燕山运动与华北克拉通破坏的相关性

发育于华北北缘的以燕山地区为研究主体的中生代晚期燕山运动在形成和演化的主要时间、沉积、岩浆过程方面有一定的共识. 除此而外, 依然有诸多争议和讨论的空间. 特别是燕山运动与华北克拉通的破坏是否有直接关系, 或者说从构造背景方面, 燕山运动的形成与华北克拉通的破坏是受制于古太平洋板块的俯冲作用还是多方向俯冲作用影响? 争议主要有以下几个方面.

3.1　燕山运动的初始时间或绪动

普遍性地, 认为燕山运动的形成发生于髫髻山组火山活动之前, 但有一个事实是在此之前是否有过山体剥露? 张宏仁等(2013)和李海龙等(2014)均提到了燕山运动的"绪动". 事实上更早时期的地质学家们亦已认识到此问题. 以北京西山地区龙门组砾岩为代表的岩层虽然局限性较大, 但至少存在过, 而且区域内在角度不整合或者火山活动存在前, 以九龙山组为代表的岩层中已有沉积环境的变化. 但是这一问题并没有变形方面或区域性的变形约束. 特别是火山活动前张宏仁等(2013)认为变形并没有强烈的褶皱发生, 是否如此?

3.2　燕山运动期间的变形方式及空间展布

中晚侏罗世-白垩纪期间, 华北北部地区的变形方式是提出"燕山运动"的另一重要依据(图3a). 早先主要是以辽西北票地区向北西方向逆冲的断层为重要依据. 但是在此同时, 燕山地区发育的近东西走向的向北、南的逆冲断层是否与其为同一动力学环境下形成的多次变形, 以及北京西山地区发育大量的褶皱变形是否也是同时期的产物? 更多的地质特征是, 在燕山地区即便是划分的燕山一期、二期的火山活动上下并没有发育大规模变形或逆冲断层作用, 而且早白垩世期间发育在东部地区的向南东方向的伸展线理以及相关的变形作用认为是变质核杂岩(Davis等, 1996; 刘俊来等, 2006; Lin等, 2008). 这些具有伸展特征的变形以及区内同时期发育的北东和近东西走向的走滑断层的出现是否属于"燕山运动"的演化过程, 仍是需要探讨的问题.

3.3　燕山运动期间的火山活动与沉积作用

华北北部中晚侏罗世-白垩纪期间, 除了发育不整合、变形之外, 另一重要的地质现象是大量的火山活动以及相关的岩浆侵入作用. 在相同或相近地区火山活动的形成时间基本上没有太大争议. 通常意义上人们认为出现火山活动是伸展作用的表现, 相应地把与火山活动盆地相关的沉积作用也认为是伸展环境的产物, 因此燕山地区中晚侏罗世期间的变形和火山活动、沉积等被认为是东北亚裂谷作用形成的(Meng等, 2014). 由此提出了这些变形、岩浆活动和沉积作用是与华北克拉通破坏相关的. 而与此同时, 同时期的沉积

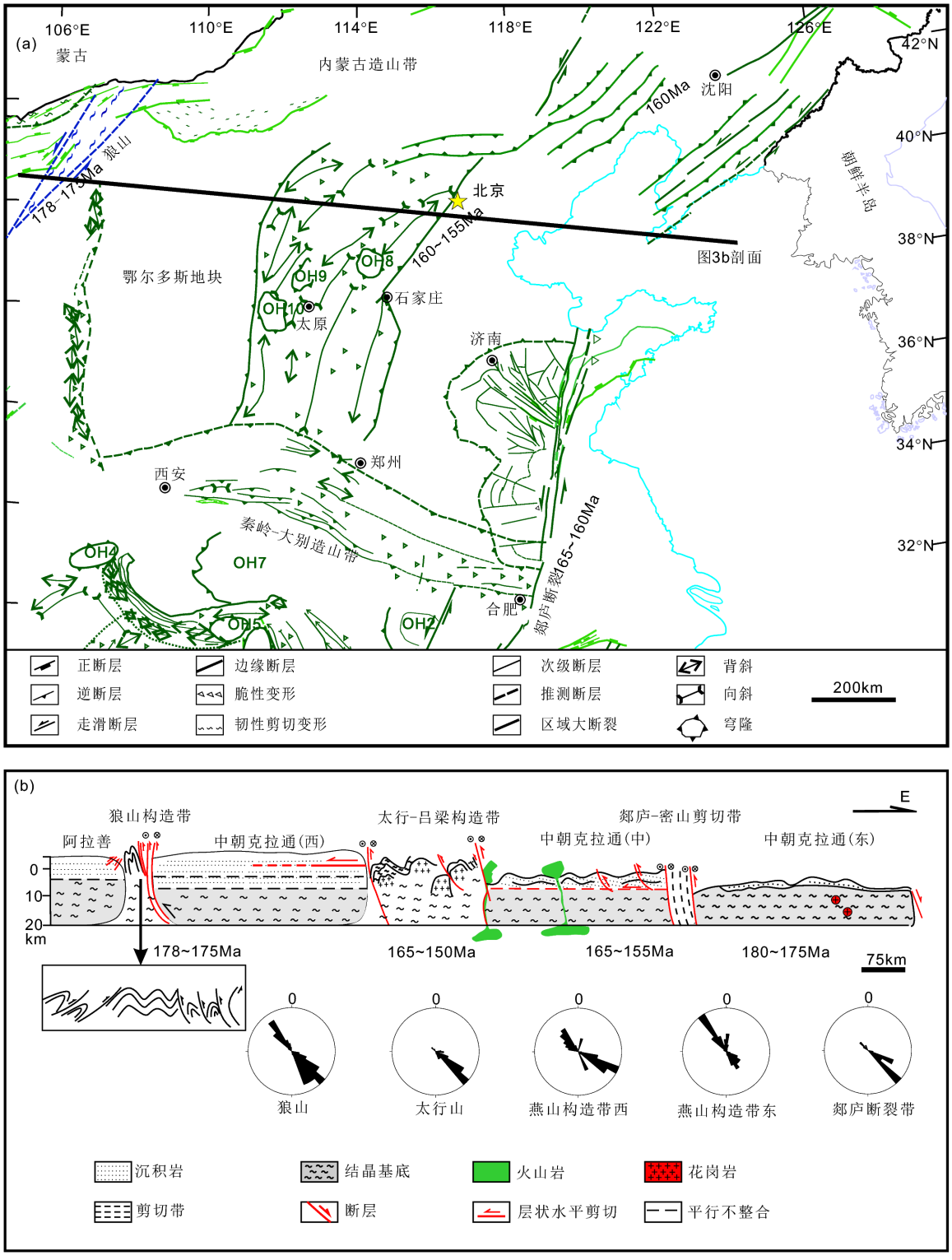

图 3　**华北及邻区180~155Ma期间的构造变形(a)和从东到西综合剖面图及运动学方向(b)**

底图改编自李锦轶和张进(2015); 年代数据引自Wang (2006)、Wang和Li(2008)、Wang Y等(2011, 2017). (a)中标出了(b)剖面位置, 简化自Wang等(2017)

表 1　燕山地区中生代地层序列及地质时间简表[a)]

事件 / 年代		地层系统 京西	冀北	辽西	沉积建造	火山岩	同位素年龄 (Ma)	古气候	构造环境
白垩纪	K_2	夏庄组	南天门组	孙家湾组	磨拉石			干旱	挤压
白垩纪	K_1	坨里组	青石垃组 下店组	阜新组	含煤建造 湖盆沉积			潮湿	伸展
白垩纪	K_1	大灰厂组	九佛堂组	九佛堂组	湖盆沉积			潮湿	伸展
白垩纪	K_1	东狼沟组	义县组 大北沟组	义县组	火山湖盆沉积	中基性	125 132~128	潮湿	伸展
白垩纪	K_1	东岭台组	张家口组			酸性岩	135 142~138	潮湿 干旱	伸展
白垩纪	K_1	后城组	土城子组		类磨拉石		150~139	干旱	挤压
侏罗纪	J_3								
侏罗纪	J_2	髫髻山组		兰旗组	红色建造	中性岩	165~145	干旱	挤压
侏罗纪	J_2	九龙山组		海房沟组	红色建造			干旱	挤压
侏罗纪	J_1	龙门组 窑坡组	下花园组	北票组	类磨拉石			潮湿	伸展
侏罗纪	J_1	南大岭组		兴隆沟组	含煤建造	中基性	175~190	潮湿	伸展
三叠纪	T_3	杏石口组		老虎沟组	磨拉石			干旱	挤压
三叠纪	T_2	双泉组	二马营组	后富隆山组 红垃组	红色建造			干旱	挤压
三叠纪	T_2	双泉组	和尚沟组	后富隆山组 红垃组	红色建造			干旱	挤压
三叠纪	T_1	双泉组	刘家沟组	后富隆山组 红垃组	红色建造			干旱	挤压

a) 中髫髻山组、土城子组数据主要来源于Davis等(2001)、袁洪林等(2005)、柳永清等(2003, 2006)、刘健等(2006)、张宏等(2008); 南大岭组数据来源于赵越等(2006). 表格中折线, 角度不整合; 虚线, 平行不整合

作用，认为是逆冲推覆前缘的沉积作用(张长厚等, 2004b)，或者是挤压作用(前陆)相关的盆地沉积类型(刘少峰等, 2004). 然而火山活动是否一定指示伸展环境, 是值得商榷的. 这一问题可以进一步分解为两个方面的问题, 一是火山喷发区局部应力环境, 一是其区域地球动力学背景. 在现今, 地球上的火山活动, 绝大部分发生在太平洋周缘地区，而这些地区是典型的挤压地球动力学环境. 作为伸展环境的火山活动，以洋脊和东非裂谷为代表，但是其岩石组合与环太平洋地区有明显差别. 因此，讨论燕山运动期间的火山活动的地球动力学环境，需要明确该火山活动形成的产物, 与上述两种典型地球动力学环境的火山产物进行对比. 简单地认为中晚侏罗世(燕山运动)期间的火山活动形成于伸展环境, 是不合适的.

3.4　燕山运动的区域属性与形成的构造背景

提出于燕山地区的燕山运动, 几十年来, 在中国其他地区, 与此时间相近的变形或不整合, 总是认为属于“燕山运动”的产物. 是否不同的动力学环境, 不同的变形特征或有无火山作用均可以认为是燕山运动的产物? 从区域上来说, 燕山运动是一次或多次事件还是一次构造过程的产物? 20世纪50年代, 陈国达(1956)提出的地台活化, 以及之后更进一步强调的中国东部大陆改造(陈国达, 1996)认为是燕山运动的产物. 任纪舜等(1990)认为燕山运动是中国东部中生代压倒性的构造事件, 其受古太平洋板块俯冲作用的影响显著. 董树文等(2007, 2008)、张岳桥等(2007)、Dong等(2015)认为燕山运动是蒙古-鄂霍茨克海的关闭、班公-怒江洋关闭、太平洋板块俯冲三个不同方向事件的共同作用的产物. 而很大一部分人认为是古太平洋板块俯冲作用的产物(例如, 任纪舜等, 1990; Wang和Li, 2008; Wang等, 2015, 2017; 朱日祥等, 2011, 2012).

3.5　燕山运动与华北克拉通破坏的相关性

燕山运动期间, 变形作用为由南东向北西方向挤压变形, 形成了不同地带的断层、褶皱作用, 其时间为180~150Ma(图3b和4). 火山作用具有穿时特征, 以髫髻山组火山作用为例, 从东到西具有穿时特征. 而华北克拉通的变形过程是一个长期过程, 燕山运动时期的变形在华北克拉通地区从东到西具有普遍性, 强烈地改造了华北克拉通的地壳构造、结构, 以及深部地壳的新生和改造. 而白垩纪期间的变形主要集中于中国东部地区.

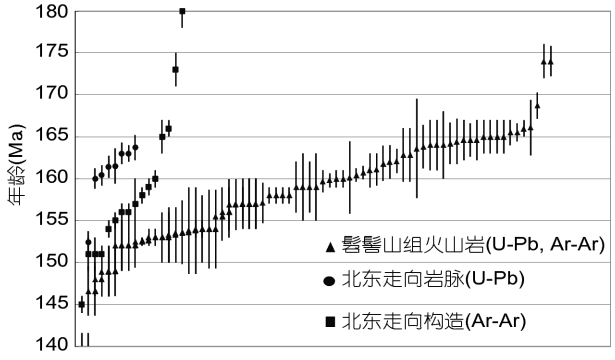

图 4　165~150Ma期间的构造变形、火山活动及花岗岩岩脉形成时间对比图

火山岩年代数据整理自Davis等(2001)、袁洪林等(2005)、柳永清等(2003, 2006)、刘健等(2006)、张宏等(2008), 岩脉及构造年代数据引自Wang等(2011, 2015, 2017). 约140~145Ma髫髻山组火山岩年龄来自北京西山. 175~170Ma髫髻山组火山岩年龄数据为全岩及斜长石单矿物Ar-Ar年龄(Davis, 2001)

华北克拉通的活化、破坏、去根作用等均指克拉通性质的失去, 或者一个地壳内部稳定的单元失去了稳定性. 因此, 发生于中晚侏罗世期间的燕山地区的变形、岩浆活动即可确定性地认为是华北克拉通的破坏. 从更大的区域来看, 华北克拉通的变形和改造到底在何时、何空间变化, 才可与燕山运动的时间和空间相一致? 邓晋福等(2003, 2006)研究了燕山以及整个东部地区中生代花岗岩以及地壳层次的变化和特征, 认为这些均为克拉通变化的重要依据, 而岩石圈根的去除(Deng等, 2004)是与新生代火山活动相关联的. 高山等(2009)以及很大一部分人认为华北克拉通的破坏是由于拆沉作用形成. 华北克拉通破坏的峰期时间认为是在125Ma(吴福元等, 2008; 徐义刚等, 2009; 朱日祥等, 2011, 2012; Zhu等, 2012), 或者中国东部岩浆活动、伸展作用的主要时期是130~120Ma(翟明国等, 2003; Lin等, 2008). 单从这些变形如变质核杂岩(伸展作用)、时间(远晚于中晚侏罗世)来看, 如果认为华北克拉通破坏的地壳浅层表现形式为伸展作用而且形成于130~120Ma, 似乎华北克拉通的破坏与燕山运动没有关联.

3.6　燕山运动与岩石圈及地幔结构和成分变化

早期燕山运动的提出并没有涉及大陆岩石圈、地幔的结构和成分的变化. 而华北克拉通破坏很大程度上认为是地幔的性质发生了变化(周新华, 2006; 万天丰, 2004), 或者岩石圈发生了减薄(100km)(吴福元等, 2008; 朱日祥等, 2011, 2012). 所看到的变形主要发生在块体的边部或者先存构造带的再活化, 而克拉通块体内部并没有强的变形、以及相关联的变形和沉积响应、岩浆事件. 这些成分的变化是否与以变形和地壳结构发生变化为前提的燕山运动相关联?

4　中生代构造变形及同位素年代数据提供的约束

4.1　东西走向构造

华北北缘具有不同的构造格架并形成于不同时间. 东西走向构造的强烈变形主要有三期变形: 早期

270~200Ma强烈地由北向南的挤压作用(王瑜, 1996, 1998), 涉及中地壳层次, 形成韧性剪切变形. 与此同时或其前后时期, 大量岩浆活动出现, 因此中下地壳原有的华北克拉通的物质出露于地表. 中下地壳的热作用、强烈的韧性剪切变形以及浅层次的脆性断层, 向南倒的褶皱以及之后的以上三叠统杏石口组为代表的磨拉石的出现, 标志着华北北缘具有一致的与内蒙古造山带变形同期的克拉通边缘活化的形成, 并形成具有典型造山作用极性的变形演化特征. 该期东西走向构造从内蒙古南缘向东到辽西地区被后期改造呈北东走向, 但其时间为230~210Ma(王瑜, 1996; Hu等, 2010; Wang等, 2015).

第二期近东西走向构造其实是与北东走向构造同期的, 只是由于燕山中部地区受早期构造的制约, 以及其独特的陆内变形影响, 在这些地区表现为向北或北北西方向的挤压作用的变形形成(Davis等, 1998; Chen, 1998; 张长厚等, 2004a). 沿该部位发育有从燕山东向北京西山、太行山大量的火山活动.

第三期东西走向构造主要发育在内蒙古南缘-华北北缘地区以及燕山中部地区, 但也有一些如燕山西延一带出现有东西走向构造, 如燕山与太行山交叉出露的地区. 主体上该期构造表现为向南的挤压, 以及近同期的东西走向右行走滑断层. 该挤压变形主体上是白垩纪早期形成的, 但出露的位置并不多.

4.2 北东走向构造

该时期的构造在区内表现复杂, 在整个中国东部具有普遍性. 从华北东部边缘、太行山一直到鄂尔多斯西缘(Darby和Ritts, 2002, 2007)主体为具有北或北北东走向的特征(图3a). 变形特点为边缘挤压和走滑, 华北克拉通内部的太行山一带具有主要向西逆冲的特征, 发育大量的平卧以及倒转褶皱, 在燕山地区沿褶皱轴面可见岩脉侵入. 变形时间在东部边缘和西部边缘具有同时性(图3b), 但从边缘向内部到郯庐断裂带、燕山地区发育的时间为165~155Ma, 而在太行山地区发育的时间为160~150Ma, 并被146~142Ma的花岗岩和花岗闪长岩所侵入(Wang, 2006; Li等, 2007; Wang和Li, 2008; Wang等, 2017). 该时期的构造改变了整个中国东部的构造格局, 即从东西走向构造转变为北东走向构造. 这也是燕山运动主期的变形表现形式. 沿不同部位的构造变形带, 发育少量的花岗岩岩株以及大量的花岗岩、基性岩脉等, 特别是平行北东走向的断层以及沿褶皱轴面劈理发育.

4.3 北西-南东方向拉伸线理构造与盆地构造

白垩纪期间形成于中国东部, 特别是发育于华北北部和东部边缘、以及中国东北地区的变质核杂岩, 其形成时间集中于130~120Ma(刘俊来等, 2006; Liu等, 2005, 2013; Lin等, 2008, 2013). 北西-南东方向拉伸线理发育, 同时有大量的北东走向及东西走向的走滑断层出现(图5). 伸展或裂谷盆地也形成于此时, 而在华北内部只有晚白垩世靠近山前的粗碎屑岩沉积. 该时期华北北缘、太行山、东缘具有大量的花岗岩以及相应的成矿作用.

4.4 近南北走向的高角度正断层

华北太行山山前以及沿郯庐断裂带南段发育的近南北走向高角度正断层形成于75~65Ma(Wang和Zhou, 2009). 这些断层也是华北盆地边缘断层或者初始裂谷的产物. 伴随着这些变形, 沿郯庐断裂带南段发育有大量的火山活动. 新生代华北盆地的形成正是以此为基础的.

5 古太平洋板块的俯冲与华北克拉通地区变形的响应

尽管对于古太平洋板块是何时形成有不同的认识, 但古太平洋板块向欧亚大陆之下的俯冲认为从180Ma或稍早开始(Wang等, 2017). 如果单从上述变形特征以及岩浆活动的分布看, 似乎难以确认中晚侏罗世的变形与古太平洋板块有多少联系. 然而近期的两个研究成果可以清楚地证明古太平洋板块的俯冲作用与北东走向变形具有明确的关系(朱日祥等, 2011; Wang等, 2015, 2017). 华北燕山地区形成的北东走向变形以及火山盆地从东向西具有从老到新的迁移特征(图6). 从东部边缘到内部, 有一个从老到新的时间差约15~20Myr(图3b和4)(Wang等, 2017). 其具有相同的运动学特征, 相似的变形几何形态. 而从东部边缘向内部从老到新的应力传递, 清楚地表明变形的应力来自于东侧. 另外岩浆作用也从辽东地区的175~180Ma, 到燕山地区的172~161Ma, 到太行山北部的146~142Ma, 同样从边部到陆内有15~20Myr的时间差(图

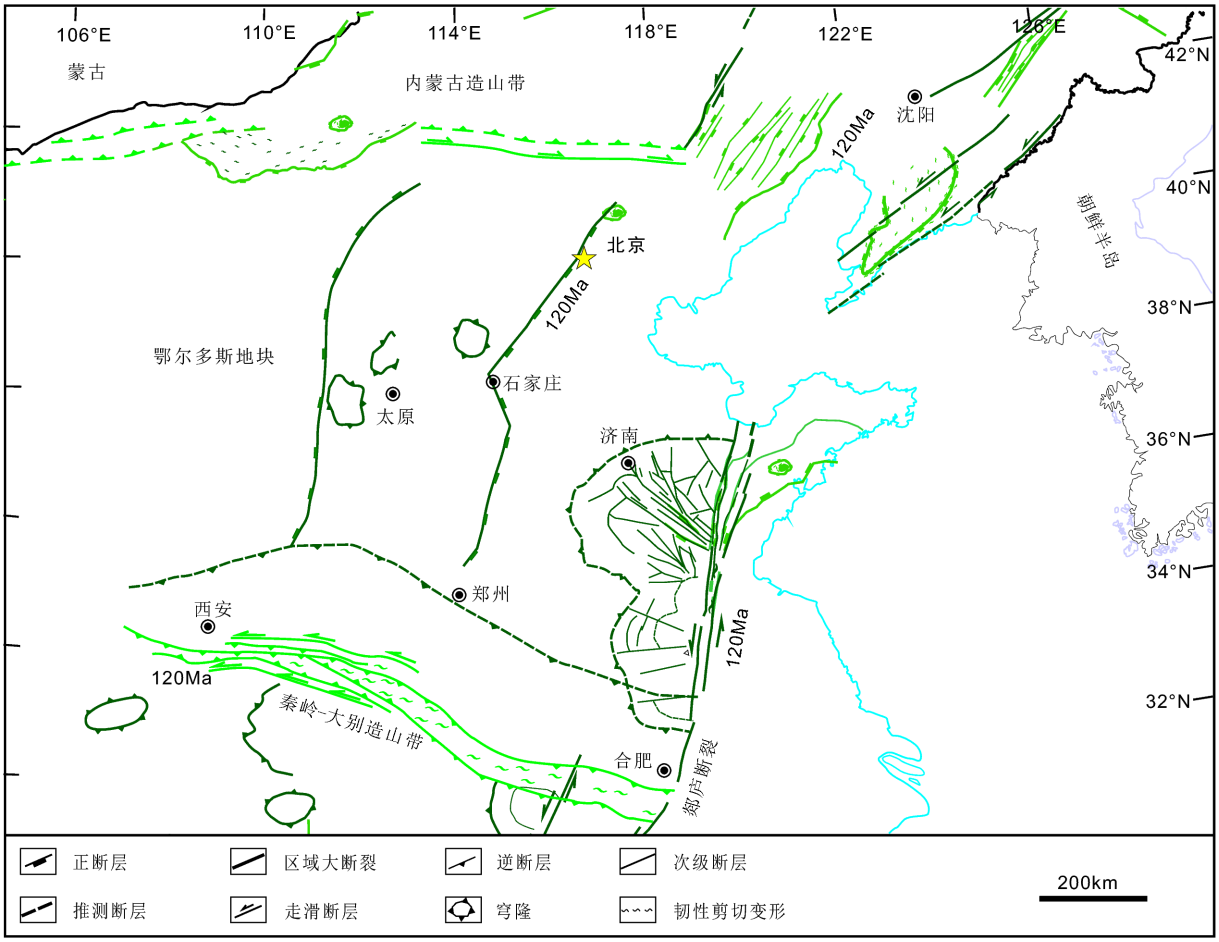

图 5　华北及邻区130~120Ma期间的构造变形

底图改编自李锦轶和张进(2015); 年代数据引自Liu等(2005, 2013)、Lin等(2008, 2013)和Wang等(2011)

3b)(Wang等, 2017).

以燕山地区为代表的挤压变形和火山活动同时存在，而且具有从东到西火山作用如髫髻山组以及土城子组具有穿时的特征，亦即从东到西由老到新. 这种既有挤压作用，几乎同时发育火山活动的特征并非个例，例如弧后拉张时处于挤压环境，但同样出现拉张. 而对于燕山地区这种陆内环境来说，层圈状旋转可以对其作很好地解释(Wang等, 2015). 华北以及整个东部地区从东西走向的构造变为北东走向的构造时，总是发育向北西方向的挤压作用，同时深层构造保持原有的变质片麻理等的方向不变，也就是说基底和盖层间发育有拆离带，从而导致二者发育解耦. 而在构造线方向转换的地方，块体的撕裂深切岩石圈地幔，因此壳幔相互作用以及地幔物质会沿此通道上涌，从而形成既有岩浆喷发同时发育逆冲和褶皱等挤压作用的产物(图7). 大陆内部的变形不同于造山带的变形，发生于盆地边缘以及层圈状旋转作用，很大程度上变形表现为近水平的剪切作用，因此，有时可能并不会出现角度不整合.

燕山运动是否存在绪动, 一直不被人们所重视. 这种绪动认为只是地壳或山体突然抬升而形成砾岩层的沉积. 从变形特征上来看, 中国东部古太平洋板块俯冲作用影响到东部边缘, 其时间为180~175Ma, 而在燕山地区发生变形的时间为165~160Ma. 因此当在陆内看到地质现象时，其实此构造事件或者俯冲或碰撞作用亦已发生. 初始的陆块对俯冲的响应表现为弹性应变(Wang等, 2017), 之后发生的进一步变形才是塑性应变. 这种弹性应变在陆内会形成块体的撕裂、山体或

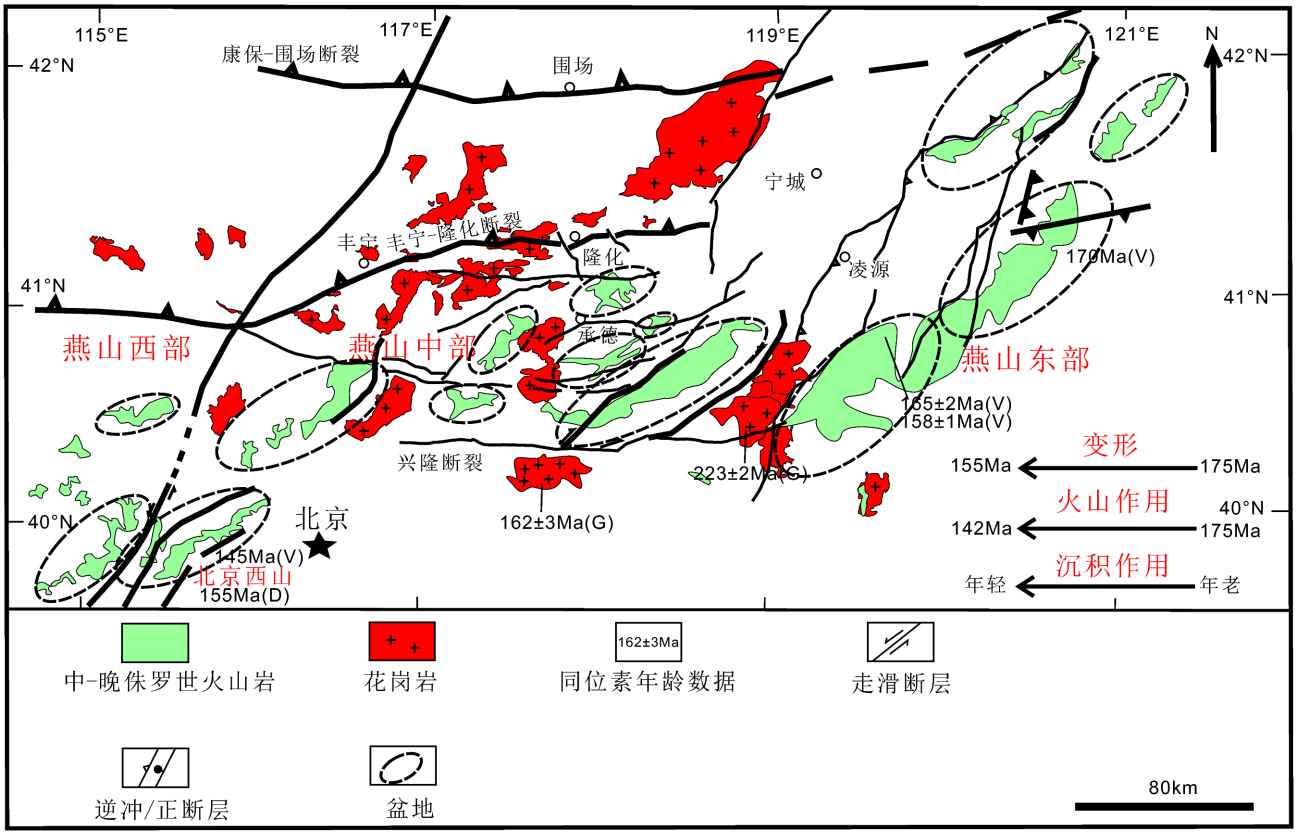

图 6　燕山地区构造-岩浆活动-沉积作用分布图

图中的沉积作用时间主要依据地层的上、下火山岩及火山碎屑岩年龄确定. D, 变形时间; V, 火山活动时间; G, 花岗岩(脉)形成时间. 年代数据为锆石U-Pb以及白云母$^{40}Ar/^{39}Ar$年龄. 改编自Wang等(2015)

块体的突然抬升. 因此燕山运动的绪动, 确切地来说是对于俯冲作用的初始响应. 这种响应不仅有砾岩的沉积, 同样具有变形以及岩石圈失去稳定性等的表现特征. 与此同时或之后的岩浆热事件、挤压变形也导致了太行山-吕梁山构造带的活动和改造.

华北北缘大青山组、土城子组砾岩等的形成标志着燕山运动的结束. 其北东走向展布具有普遍性, 而其上不整合的张家口组火山活动、沉积岩等则并不属于燕山运动的范畴. 是另一个不同的动力学环境的产物.

华北克拉通白垩纪期间发生的岩石圈减薄被认为是克拉通破坏的峰期特征, 有几种不同的解释分析其岩石圈的减薄或地幔性质的改变: 西太平洋板块的俯冲作用、板块的后退、挤压作用后的松弛、拆沉作用、华北高原的垮塌等. 如果考虑到华北的变形或者燕山运动的形成为单一因素的话, 则华北的伸展只是挤压之后的结果, 而并非是基本因素. 由于三叠纪时的强烈岩浆作用和深达中下地壳的变形作用, 华北北缘已经具有造山带特征. 当中晚侏罗世发生北东走向的强烈变形时(燕山运动的变形表现), 它已经失去了克拉通的稳定性, 它是在造山带特征基础上叠加的构造.

目前流行的观点认为, 克拉通破坏的最重要表现是减薄岩石圈的再活化(吴福元等, 2008, 2014; Liu等, 2005, 2013; 朱日祥等, 2011, 2012; 其他的大量文献), 这也是提出"岩石圈拆沉、地幔底侵、变质核杂岩形成、白垩纪早期大规模岩浆活动等"被认为是与华北克拉通破坏有关的重要基础, 也是探讨华北克拉通破坏的时间、空间、成因机制和大地构造背景等的必要前提. 然而克拉通破坏, 暗示其由稳定向非稳定的转变. 中晚侏罗世期间的构造变形(燕山运动)使得中国东部构造格局发生了根本性地变革, 也使华北克拉通大面积失去了稳定性. 壳幔相互作用也使得华北克拉

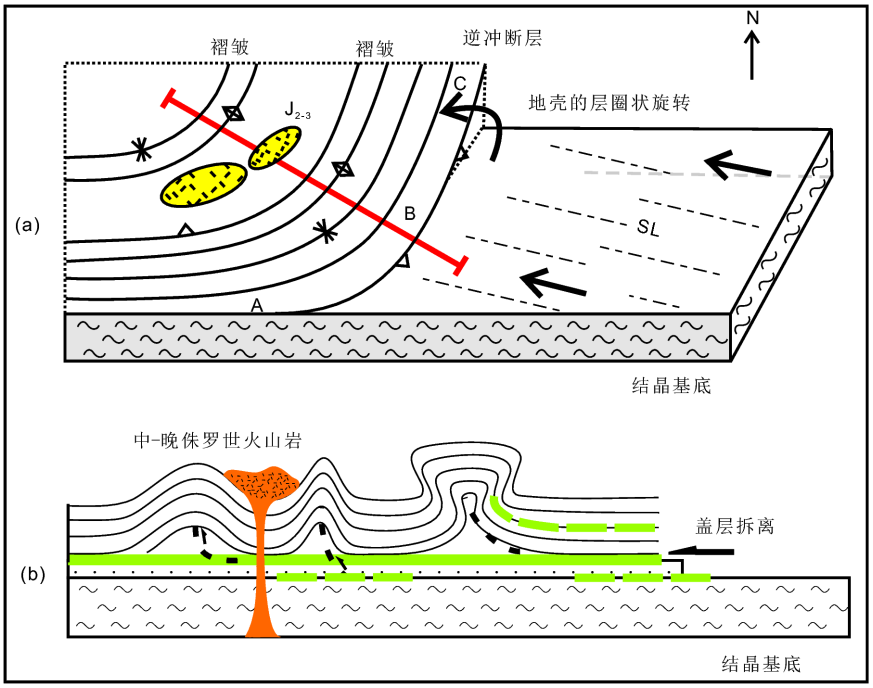

图 7　中国东部燕山地区中晚侏罗世北东走向构造形成模式

引自Wang等(2015). (a)为平面特征, (b)为剖面. (a) A~C表示不同的构造部位, J_{2-3}, 中晚侏罗世, SL, 拉伸线理. 箭头指示剪切方向

通岩石圈地幔失去稳定性. 因此燕山运动可能是华北克拉通破坏形成的主要阶段.

6　燕山运动形成的动力学背景分析

目前大多数学者认为, 燕山运动的本质是中国东部近东西向的特提斯构造域向北北东向的滨太平洋构造域的转换. 崔盛芹等(1985, 2002)认为自印支运动开始, 濒太平洋构造带的活动性加强, 到燕山期达到高潮, 将印支运动视为燕山运动的前奏. 赵越等(1994, 2004)则强调燕山运动是特提斯构造域向太平洋构造域和动力体制转变的产物. 如何看待燕山运动形成的构造背景, 必须既有燕山运动形成时间, 也同时需有周边块体或俯冲-碰撞作用时间上的一致性以及运动学极性的一致性等. 但是也有不同的认识存在. Davis等(2001)认为燕山运动是北方蒙古-鄂霍茨克海关闭、向南推挤缩短和太平洋向西俯冲作用交替影响的结果. 翟明国等(2003)强调华北中生代构造转换不是陆内造山结果, 而是与周边块体夹击引起华北地慢大规模上隆有关. 张宏仁(1998)则提出了中侏罗世天体事件引发燕山运动的观点, 并且一直强调燕山事件是突发的. 现有资料表明, 班公-怒江洋盆关闭表现为两阶段: 165~150和130~110Ma(Wang等, 2007). 这早期似乎与燕山运动的两幕在时间上相适应, 但是华北以及整个中国东部地区并没有此时间任何与此相关的构造变形特征. 而Wang等 (2011)认为130~110Ma期间中国东部强烈地向东挤出作用可能受到了班公-怒江洋盆最终关闭的影响. 蒙古-鄂霍茨克海的关闭形成了燕山运动的特征, 一直受到人们的关注. 董树文等(2000)认为燕山运动记录了侏罗纪来自北、东、西南3个方向向东亚汇聚挤压的变形图像. 虽然Dong等(2015)认为该地区170~160Ma时间关闭, 燕山地区东西走向构造与此有关. 然而新近的古地磁资料表明, 在155Ma时西伯利亚和华北克拉通之间相距1600km(Pei等, 2011; van der Voo等, 2015; Ren等, 2016), 因此在燕山运动发生时并没有受到蒙古-鄂霍茨克海关闭的影响. 另外, 中国东部如此大规模的北东走向构造在运动学上也与蒙古-鄂霍茨克海的关闭所发生的南北向的挤压作用没有关系. 而华北燕山中西段的东西走向变形形成时间较晚, 属于白垩纪早期向南挤压以及近东西走向的走滑作用叠加在三叠纪或更早的东西走向变形构造带(Wang等, 2011)之上的产物. 因此可能并不存在多方向

汇聚形成燕山运动的变形特征.

燕山运动时期, 从时间跨度上看, 全球正在发生古太平洋板块的俯冲, 大西洋洋盆的打开、劳亚大陆周边的强烈变形改造, 以及墨西哥地区的强烈变形挤压、北冈瓦纳的裂解等一系列重要事件(Anderson等, 2015). 而且此时也正是中国东部地壳构造从东西向转为北东走向的时期. 从燕山具体的变形来说, 古太平洋板块的俯冲作用是直接的动力作用, 无论从时间上、运动学极性上分析均如此.

太平洋的强烈扩张和快速形成发生于180~160Ma (Bartolini和Larson, 2001), 也正是古太平洋俯冲作用在东亚大陆边缘形成了大量的岩浆活动以及相关的变形作用(Isozaki, 1997; Kim等, 2011). 燕山运动在单一的形成看是一次突然发生的构造事件, 以及相关联的岩浆热作用. 或许不同的动力源可以解释其可能的形成. 然而如果从太平洋边缘向陆内, 从东部向陆内演化看, 它具有180~155Ma演化特征, 是一个陆内应力和应变以及岩浆热传递的过程. 充分考虑到这一过程的形成, 并结合形成时间和运动学特征, 特别是岩浆活动从东到西的演化, 则燕山运动形成的唯一动力源是古太平洋板块的俯冲作用. 更进一步地来说, 使华北克拉通发生全面的变形改造、结构的破坏以及失去稳定性, 也是受制于古太平洋板块的初始和持续俯冲作用.

7 与燕山运动相关的大陆内部构造

对于从槽-台学说基础上建立的“构造运动”这一概念的内涵已发生了重要变化. 传统意义上的“运动”是建立在地槽闭合(造山带)基础上的、由于水平运动导致了褶皱或断层作用, 垂直运动使得变形抬升再沉降而接受沉积. 这样的过程中形成的变形+抬升+沉降的作用组合称之为“运动”. 但随着构造研究的深入, 特别是发生在陆上或陆内的构造或者克拉通活动再造山(变形)的地区来说, 发生了不同类型的构造作用, 形成于不同时间, 因此对于深入的变形样式的识别, 不是单纯意义上依造山带环境所见到的褶皱或断层, 来分析陆内环境的变形改造特征. 而且造山运动出现于不同环境, 有些可能在时间上是一致的, 但具有不同的运动学特征, 以及不同的构造动力学环境下. 也许这些不应该用类似“燕山运动”这样的术语来描述如喜马拉雅地区的变形, 以及如早年强调燕山地区为板内造山时, 有人用到了美国西部拉拉米运动的变形等.

国际上, 对于板块俯冲或碰撞作用所导致的大陆或克拉通边缘活化有过一定的研究(Holdsworth等, 1997; Flowers等, 2008; Raimondo等, 2014)以及板内变形的研究等(van der Pluijm等, 1997; Spotila等, 2007; Kennett和Iaffaldano, 2013). 因此, 陆内变形典型特征的识别, 以及精细的年代学约束才能解决“燕山运动”的科学内涵. 华北北缘燕山运动发育地区, 在中晚侏罗世期间, 发生的变形特征在陆内其他地区也具有普遍性, 但不具有造山带变形的特征或者说以“构造运动”的传统概念无法解释. 其中包括: (1) 壳内水平剪切运动或层圈状旋转, 并不能形成真正意义上的角度不整合. (2) 壳-幔相互作用发生的既是热作用, 同时也是构造作用的表现, 但并不一定会形成地壳上层的角度不整合. (3) 板块运动强调水平运动, 当洋壳发生俯冲作用时, 必然会对陆内的变形或应变产生影响, 而这种未必会形成垂直方向的变形. (4) 大陆内构造有些是远程响应的产物, 与造山带构造完全不同, 也与造山作用没有直接关系, 能否称作是一次事件, 还是一次构造运动? (5) 通常意义上认为只有发生了俯冲-碰撞作用才算是造山作用, 而燕山地区的变形是否属于造山, 具有造山极性? 因此燕山是否为造山带还是简单意义上的构造带? 这些问题仍有待进一步研究和探讨.

8 结论

燕山运动主体的形成时间为中晚侏罗世, 它的形成是以北东走向构造为主的, 初始作用和持续过程是古太平洋板块向欧亚大陆之下俯冲作用的产物, 并且从时空上具有由东到西, 由老到新的变化特征. 就燕山运动本身来说, 存在着“绪动”. 构造变革的表现为地壳层圈状的旋转, 因此华北北缘燕山运动的特征并没有真正意义上的造山带特征, 也没有韧性剪切带和强烈地因地壳增厚所导致的变质作用. 华北克拉通破坏地壳结构的稳定性丧失发生于中晚侏罗世(180~155Ma), 大规模的岩浆活动及岩石圈的部分减薄可能发生于早白垩世(130~120Ma). 从燕山运动初始时间和持续过程的全球格局来看, 中国东部燕山运动的形成与华北克拉通的破坏相关联, 它是受制于古太平洋板块的俯冲作用, 因此燕山运动是华北克拉通破坏的重要的且是必要的过程.

致谢　十分感谢主编以及三位匿名审稿人的宝贵意见和建议. 成文过程中与邵济安教授、刘少峰教授、刘俊来教授、刘健研究员、李海龙博士等进行了有益的讨论, 深表谢意. 真诚感谢前人在华北地区岩石学、地球化学、构造地质学和地球物理学方面所做的大量的、艰苦的、开创性的研究工作.

参考文献

鲍亦冈, 谢德源, 陈正帮, 穆炳涛. 1983. 论北京地区燕山运动. 地质学报, 57: 195–204

陈国达. 1956. 中国地台"活化区"的实例并着重讨论"华夏古陆"问题. 地质学报, 36: 239–271

陈国达. 1992. "燕山运动"的历史意义. 大地构造与成矿学, 16: 111–112

陈国达. 1996. 地洼学说——活化构造及成矿理论体系概论. 长沙: 中南工业大学出版社. 455

崔盛芹, 李锦蓉, 赵越. 1985. 论中国及邻区滨太平洋带的燕山运动. 见: 国际交流地质学术论文集(2). 北京: 地质出版社. 221–234

崔盛芹, 李锦蓉, 孙家树, 王建平, 吴珍汉, 朱大岗. 2000. 华北陆块北缘构造运动序列及区域构造格局. 北京: 地质出版社. 326

崔盛芹, 李锦蓉, 吴珍汉, 易明初, 沈淑敏, 尹华仁, 马寅生. 2002. 燕山地区中新生代陆内造山. 北京: 地质出版社. 386

邓晋福, 赵海玲, 莫宣学, 吴宗絮, 罗照华. 1996. 中国大陆根-柱构造——大陆动力学的钥匙. 北京: 地质出版社. 100

邓晋福, 苏尚国, 赵海玲, 莫宣学, 肖庆辉, 周肃, 刘翠, 赵国春. 2003. 华北地区燕山期岩石圈减薄的深部过程. 地学前缘, 10: 41–50

邓晋福, 苏尚国, 刘翠, 赵国春, 赵兴国, 周肃, 吴宗絮. 2006. 关于华北克拉通燕山期岩石圈减薄的机制与过程的讨论: 是拆沉、还是热侵蚀和化学交代? 地学前缘, 13: 105–119

地球科学大辞典编委会. 2006. 地球科学大辞典——基础科学卷. 北京: 地质出版社. 1017

董国臣. 1996. 论燕山地区燕山运动. 河北地质学院学报, 19: 660–667

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: 8–12

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, 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

高山, 章军锋, 许文良, 刘永胜. 2009. 拆沉作用与华北克拉通破坏. 科学通报, 54: 1962–1973

黄汲清. 1960. 中国地质构造基本特征的初步总结. 地质学报, 40: 1–37

李海龙, 张宏仁, 渠洪杰, 蔡向民, 王锰. 2014. 燕山运动"绪动/A幕"的本意及其锆石U-Pb年代学制约. 地质论评, 60: 1026–1042

李锦轶, 张进. 2015. 中国大型变形构造图(1:2500000). 北京: 地质出版社

刘俊来, 关会梅, 纪沫, 胡玲. 2006. 华北晚中生代变质核杂岩构造及其对岩石圈减薄机制的约束. 自然科学进展, 16: 21–26

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

刘健, 赵越, 柳小明. 2006. 冀北承德盆地髫髻山组火山岩的时代. 岩石学报, 22: 2617–2630

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I): 19–31

聂宗笙. 1985. 华北地区的燕山运动. 地质科学, (4): 320–333

牛宝贵, 和政军, 宋彪, 任纪舜. 2003. 张家口火山岩SHRIMP定年及其重大意义. 地质通报, 22: 140–141

任纪舜, 陈廷愚, 牛宝贵, 刘志刚, 刘凤仁. 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. 205

万天丰. 2004. 侏罗纪地壳转动与中国东部岩石圈转型. 地质通报, 23: 966–972

王涛, 郑亚东, 张进江, 王晓霞, 童英. 2007. 华北克拉通中生代伸展构造研究的几个问题. 地质通报, 26: 1154–1166

王瑜. 1996. 中国东部内蒙古-燕山造山带晚古生代晚期-中生代的造山作用过程. 北京: 地质出版社. 142

王瑜. 1998. 中生代以来华北地区造山带与盆地的演化及动力学. 北京: 地质出版社. 92

吴福元, 孙德有, 张广良, 任向文. 2000. 论燕山运动的深部地球动力学本质. 高校地质学报, 6: 379–389

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: 1145–1174

吴福元, 徐义刚, 朱日祥, 张国伟. 2014. 克拉通岩石圈减薄与破坏. 中国科学: 地球科学, 44: 2358–2372

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: 1974–1989

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, 朱日祥, 刘建明, 孟庆任, 侯泉林, 胡圣标, 李忠, 张宏福, 刘伟. 2003. 华北东部中生代构造体制转折的关键时限. 中国科学D辑: 地球科学, 33: 913–920

张长厚, 吴淦国, 徐德斌, 王根厚, 孙卫华. 2004a. 燕山板内造山带中段中生代构造格局与构造演化. 地质通报, 23: 864–875

张长厚, 徐德斌, 张维杰, Cope T, 王根厚, 孙卫华, 肖伟峰, 张忠义, 张

军龙. 2004b. 同构造沉积分析反演逆冲构造变形过程——燕山东段凌源南部中生代逆冲构造变形过程研究. 地学前缘, 11: 227–243
张宏, 王明新, 柳小明. 2008. 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
张宏仁. 1998. 燕山事件. 地质学报, 72: 103–111
张宏仁, 张永康, 蔡向民, 渠洪杰, 李海龙, 王锰. 2013. 燕山运动的“绪动”——燕山事件. 地质学报, 87: 1779–1790
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, 杨振宇, 马醒华. 1994. 东亚大地构造发展的重要转折. 地质科学, 29: 105–119
赵越, 徐刚, 张拴宏, 杨振宇, 张岳桥, 胡健民. 2004. 燕山运动与东亚构造体制的转变. 地学前缘, 11: 319–328
赵越, 宋彪, 张拴宏, 刘健. 2006. 北京西山侏罗纪南大岭组玄武岩的继承锆石年代学及其含义. 地学前缘, 13: 184–190
赵宗溥. 1959. 论燕山运动. 地质论评, 19: 339–346
赵宗溥. 1963. 中国东部的燕山运动. 地质科学, (3): 128–139
周新华. 2006. 中国东部中、新生代岩石圈转型与减薄研究若干问题. 地学前缘, 13: 50–64
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
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: 1135–1159
Anderson T H, Didenko A N, Johnson C L, Khanchuk A I, MacDonald J H Jr. 2015. Late Jurassic Margin of Laurasia—A record of faulting accommodating plate rotation. Geol Soc Amer Spec Pap, 513: 606
Bartolini A, Larson R L. 2001. Pacific microplate and the Pangea supercontinent in the Early to Middle Jurassic. Geology, 29: 735–738
Chen A. 1998. Geometric and kinematic evolution of basement-cored structures: intraplate orogenesis within the Yanshan Orogen, northern China. Tectonophysics, 292: 17–42
Darby B J, Ritts B D. 2002. Mesozoic contractional deformation in the middle of the Asian tectonic collage: The intraplate Western Ordos fold-thrust belt, China. Earth Planet Sci Lett, 205: 13–24
Darby B J, Ritts B D. 2007. Mesozoic structural architecture of the Lang Shan, North-Central China: Intraplate contraction, extension, and synorogenic sedimentation. J Struct Geol, 29: 2006–2016
Davis G A, Qian X L, Zheng Y D, Tong H M, Yu H, Wang C, Gehrels G E, Shafiquallah M, Fryxell J E. 1996. Mesozoic deformation and plutonism in the Yunmeng Shan: A metamorphic core complex, north of Beijing, China. In: Yin A, Harrison T M, 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 segment of the Yinshan fold-and thrust belt, northern China. In: Hedrix M S, Davis G A, eds. Paleozoic and Mesozoic Tectonic Evolution of Central Asia: From Continental Assembly to Intracontinental Deformation, Boulder, Colorado. Geol Soc Amer Memoir, 194: 171–197
Deng J F, Mo X X, Zhao H L, Wu Z X, Luo Z H, Su S G. 2004. A new model for the dynamic evolution of Chinese lithosphere: ‘continental roots-plume tectonics’. Earth-Sci Rev, 65: 223–275
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
Flowers R M, Bowring S A, Mahan K H, Williams M L, Williams I S. 2008. Stabilization and reactivation of cratonic lithosphere from the lower crustal record in the western Canadian shield. Contrib Mineral Petrol, 156: 529–549
Holdsworth R E, Butler C A, Roberts A M. 1997. The recognition of reactivation during continental deformation. J Geol Soc, 154: 73–78
Hsieh B C Y. 1936. An outline of the geological structure of the Western Hills of Peiping. Bull Geol Soc China, 16: 371–388
Hu J M, Zhao Y, Liu X W, Xu G. 2010. Early Mesozoic deformations of the eastern Yanshan thrust belt, northern China. Int J Earth Sci-Geol Rundsch, 99: 785–800
Isozaki Y. 1997. Jurassic accretion tectonics of Japan. Isl Arc, 6: 25–51
Kennett B L N, Iaffaldano G. 2013. Role of lithosphere in intracontinental deformation: Central Australia. Gondwana Res, 24: 958–968
Kim S W, Kwon S, Santosh M, Williams I S, Yi K. 2011. A Paleozoic subduction complex in Korea: SHRIMP zircon U-Pb ages and tectonic implications. Gondwana Res, 20: 890–903
Lee C Y. 1948. A renew of Mesozoic orogenic movements in China. Cont Nat Res Inst Geol, Acad Sin, (8): 331–339
Li S Z, Kusky T M, Zhao G, Wu F, Liu J Z, Sun M, Wang L. 2007. Mesozoic tectonics in the eastern Block of the North China Craton: Implications for subduction of the Pacific plate beneath the Eurasian plate. In: Zhai M G, Windley B F, Kusky T M, Meng Q R, eds. Mesozoic Sub-Continental Lithospheric Thinning Under Eastern Asia. Geol Soc Lond Spec Publ, 280: 171–188
Lin W, Faure M, Monie P, Scharer U, Panis D. 2008. Mesozoic extensional tectonics in Eastern Asia: The South Liaodong

peninsula metamorphic core complex (NE China). J Geol, 116: 134–154

Lin W, Faure M, Chen Y, Ji W B, Wang F, Wu L, Charles N, Wang J, Wang Q C. 2013. Late Mesozoic compressional to extensional tectonics in the Yiwulüshan massif, NE China and its bearing on the evolution of the Yinshan-Yanshan orogenic belt. Gondwana Res, 23: 54–77

Liu J L, Davis G A, Lin Z Y, Wu F Y. 2005. The Liaonan metamorphic core complex, Southeastern Liaoning Province, North China: A likely contributor to Cretaceous rotation of Eastern Liaoning, Korea and contiguous areas. Tectonophysics, 407: 65–80

Liu J L, Shen L, Ji M, Guan H M, Zhang Z C, Zhao Z D. 2013. The Liaonan/Wanfu metamorphic core complexes in the Liaodong Peninsula: Two stages of exhumation and constraints on the destruction of the North China Craton. Tectonics, 32: 1121–1141

Meng Q R, Wei H H, Wu G L, Duan L. 2014. Early Mesozoic tectonic settings of the northern North China craton. Tectonophysics, 611: 155–166

Pei J L, Sun Z M, Liu J, Liu J, Wang X S, Yang Z Y, Zhao Y, Liu 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

Raimondo T, Hand M, Collins W J. 2014. Compressional intracontinental orogens: Ancient and modern perspectives. Earth-Sci Rev, 130: 128–153

Ren Q, Zhang S H, Wu H C, Liang Z K, Miao X J, Zhao H Q, Li H Y, Yang T S, Pei J L, Davis G A. 2016. Further paleomagnetic results from the ~155 Ma Tiaojishan Formation, Yanshan Belt, North China, and their implications for the tectonic evolution of the Mongol-Okhotsk suture. Gondwana Res, 35: 180–191

Spotila J A, Niemi N, Brady R, House M, Buscher J, Oskin M. 2007. Long-term continental deformation associated with transpressive plate motion: The San Andreas fault. Geology, 35: 967–970

van der Pluijm B A, Craddock J P, Graham B R, Harris J H. 1997. Paleostress in cratonic North America: Implications for deformation of continental interiors. Science, 277: 794–796

van der Voo R, van Hinsbergen D J J, Domeier M, Spakman W, Torsvik T H. 2015. Latest Jurassic-earliest Cretaceous closure of the Mongol-Okhotsk Ocean: A paleomagnetic and seismological-tomographic analysis. In: Anderson T H, Didenko A N, Johnson C L, Khanchuk A I, MacDonald J H Jr, eds. Late Jurassic Margin of Laurasia—A Record of Faulting Accommodating Plate Rotation. Geol Soc Amer Spec Pap, 513: 589–606

Wang T, Zheng Y, Zhang J, Zeng L, Donskaya T, Guo L, Li J. 2011. Pattern and kinematic polarity of late Mesozoic extension in continental NE Asia: Perspectives from metamorphic core complexes. Tectonics, 30: TC6007

Wang Y. 2006. The onset of the Tan-Lu fault movement in eastern China: constraints from zircon (SHRIMP) and $^{40}Ar/^{39}Ar$ dating. Terra Nova, 18: 423–431

Wang Y, Zhang X M, Sun L X, Wan J L. 2007. Cooling history and tectonic exhumation stages of the south-central Tibetan Plateau (China): Constrained by $^{40}Ar/^{39}Ar$ and apatite fission track thermochronology. J Asian Earth Sci, 29: 266–282

Wang Y, Li H M. 2008. Initial formation and mesozoic tectonic exhumation of an intracontinental tectonic belt of the Northern Part of the Taihang Mountain Belt, Eastern Asia. J Geol, 116: 155–172

Wang Y, Zhou S. 2009. $^{40}Ar/^{39}Ar$ dating constraints on the high-angle normal faulting along the southern segment of the Tan-Lu fault system: An implication for the onset of eastern China rift-systems. J Asian Earth Sci, 34: 51–60

Wang Y, Zhou L Y, Li J Y. 2011. Intracontinental superimposed tectonics—A case study in the Western Hills of Beijing, eastern China. Geol Soc Am Bull, 123: 1033–1055

Wang Y, Zhou L Y, Zhao L J, Cope T, Liu J. 2015. Tectonic transformations in the north of eastern China during 170–150 Ma: Causal linkage to the rapid formation of the paleo-Pacific plate. In: Anderson T H, Didenko A N, Johnson C L, Khanchuk A I, MacDonald J H Jr, eds. Late Jurassic Margin of Laurasia—A Record of Faulting Accommodating Plate Rotation. Geol Soc Amer Spec Pap, 513: 561–587

Wang Y, Zhou L Y, Luo Z H. 2017. Kinematics and timing of continental block deformation from margins to interiors. Terra Nova, 29: 253–263

Wong W H. 1926. Crustal Movement in Eastern China. In: Proceed 3rd Pan-Pacific Science Congress, Tokyo, Vol. 1: 642–685

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

Yang J H, Wu F Y, Wilde S A, Belousova E, Griffin W L. 2008. Mesozoic decratonization of the North China block. Geology, 36: 467–470

Zhu R X, Yang J H, Wu F Y. 2012. Timing of destruction of the North China Craton. Lithos, 149: 51–60

(责任编委: 郑永飞)