中国科学: 地球科学 2019 年 第 49 卷 第 9 期: 1346 ~ 1356
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

评 述

西太平洋板块俯冲与华北克拉通破坏

朱日祥[1,3*], 徐义刚[2,3]

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;
2. 中国科学院广州地球化学研究所, 同位素地球化学国家重点实验室, 广州 510640;
3. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049
* E-mail: rxzhu@mail.iggcas.ac.cn

收稿日期: 2018-10-14; 收修改稿日期: 2019-04-02; 接受日期: 2019-04-08; 网络版发表日期: 2019-04-30
国家自然科学基金项目(批准号: 41688103)和中国科学院战略性先导科技专项B类项目(编号: XDB18000000)资助

摘要 华北克拉通破坏与西太平洋板块俯冲相关是学界的重要共识, 但西太平洋板块何时开始向东亚大陆俯冲、早白垩世西太平洋俯冲带在何处、东亚大地幔楔何时形成、晚中生代西太平洋俯冲板块如何演化等重要科学问题一直没有很好地解决. 文章通过综合分析与研究, 认为西太平洋板块起始俯冲的时间早达早侏罗世; 早白垩世西太平洋俯冲带位于东亚大陆边缘, 比现今西太平洋板块俯冲带靠西2200km; 与此相对应, 欧亚大陆自早白垩世以来向东漂移了大约900km. 西太平洋俯冲板块后撤始于~145Ma, 说明东亚大地幔楔开始形成于早白垩世; 西太平洋板块俯冲作用对华北克拉通的影响可能是通过地幔楔增大过程中物质和能量的迁移和交换来实现的. 利用地质构造事件反演了大洋板块在俯冲到地球内部之前的演化过程, 提出燕山运动A幕和B幕发生的原因分别是西太平洋板块向东亚大陆边缘以高速低角度俯冲和俯冲角度逐渐变低两种不同的地球深部动力学过程新观点. 在早白垩世大约130~120Ma期间, 西太平洋板块可能已经转变为高角度俯冲、回转与后撤速率达到最大、最终在地幔过渡带产生滞留体. 这个过程可能显著改变了所在区域和上覆地幔的物性和黏滞度, 导致上覆地幔楔产生非稳态流动, 从而导致岩石圈地幔中熔/流体含量急剧增加、黏滞度降低以及岩石圈伸展/减压, 并使其转变为年轻地幔——克拉通破坏. 这些认识对揭示西太平洋俯冲板块与华北克拉通岩石圈地幔之间相互作用过程具有重要意义.

关键词 早白垩世, 克拉通破坏, 西太平洋板块俯冲

1 引言

地球表面由大陆和大洋两部分组成, 20世纪60年代建立的板块构造理论成功解释了大洋板块的形成、发展和消亡过程, 为了解全球构造格局做出了重大贡献, 是地球科学的一场革命. 然而, 传统的板块构造理论却无法解释大陆的演化, 比如大陆改造或破坏、大陆增生和陆内成矿等基本问题. 由于大陆是人类生存和资源能源供给的主要场所, 因此, 认识大陆演化成为地学最基本的科学问题, 更是解决资源能源等国家重大需求的根本所在. 大陆主要由克拉通和造山带组成, 克拉通由地壳和岩石圈地幔两部分构成. 克拉通岩石圈具有形成时代老、密度低、水含量低、巨厚岩石圈根、构造稳定、缺乏大规模火山-构造活动和大地震等特点, 因此

中文引用格式: 朱日祥, 徐义刚. 2019. 西太平洋板块俯冲与华北克拉通破坏. 中国科学: 地球科学, 49: 1346–1356, doi: 10.1360/N072018-00282
英文引用格式: Zhu R, Xu Y. 2019. The subduction of the west Pacific plate and the destruction of the North China Craton. Science China Earth Sciences, 62: 1340–1350, https://doi.org/10.1007/s11430-018-9356-y

© 2019 《中国科学》杂志社

传统理论认为克拉通是稳定的; 可是华北克拉通却发生了大规模的岩浆活动和大地震(如唐山地震、邢台地震等), 说明华北克拉通丧失了稳定性, 这是经典地质学或传统板块构造理论无法解释的重大地质现象.

近十几年来, 国内外地球科学家从地球系统科学的角度对华北克拉通开展了深入系统的研究; 提出岩石圈减薄、大规模岩浆活动和构造变形只是华北克拉通演化过程中的表现形式, 其实质是岩石圈地幔的物质组成与物理化学性质发生了根本性的转变, 从而导致克拉通固有稳定性遭到破坏, 建立了克拉通破坏理论; 这一新理论的核心就是阐明了洋-陆相互作用导致克拉通破坏与大陆增生是全球大陆演化的普遍规律, 发展了板块构造理论(Zhu等, 2017).

值得注意的是, 华北克拉通东部破坏期间岩石圈伸展方向与西太平洋板块运动方向具有相同的变化规律, 破坏区域展布与西太平洋俯冲带平行, 地震层析成像揭示了古太平洋俯冲板块可能滞留在地幔过渡带(朱日祥等, 2012, 2015). 这些观测事实说明, 西太平洋板块俯冲控制着华北克拉通拉张和破坏过程, 即早白垩世西太平洋板块俯冲作用是导致华北克拉通破坏的一级外部控制因素和驱动力(Xu, 2001; Niu, 2005, 2014; Zhang等, 2009; 朱日祥和郑天愉, 2009; 郑永飞和吴福元, 2009; 吴福元等, 2014). 但西太平洋板块何时开始向东亚大陆下俯冲? 早白垩世西太平洋俯冲带在何处? 东亚大地幔楔何时形成的? 晚中生代西太平洋俯冲板块的演化过程如何? 这些都是亟待解决的科学问题, 对重建西太平洋板块的俯冲历史, 揭示西太平洋俯冲板块与华北克拉通岩石圈地幔之间的相互作用过程, 评估中国东部矿产资源形成与富集机理(朱日祥等, 2015)都具有重要意义. 为此, 《中国科学: 地球科学》于2018年组织出版了“克拉通破坏与西太平洋板块俯冲”专题(李曙光和汪洋, 2018; 刘明启和李忠海, 2018; 刘少峰等, 2018; 唐杰等, 2018; 王坤等, 2018; 王瑜等, 2018; 徐义刚等, 2018; 郑建平和戴宏坤, 2018; 郑永飞等, 2018; 朱光等, 2018; 宗克清和刘勇胜, 2018), 对上述科学问题进行了集中阐述.

2　西太平洋板块向东亚大陆下俯冲的起始时间

古太平洋板块俯冲显著控制着中国东部中生代地质演化, 然而其俯冲开始时间一直存在争议, 已有的观点包括二叠纪(Li和Li, 2007; Li等, 2012)、三叠纪(Zhou等, 2014)、侏罗纪(Zhou等, 2006; Xu等, 2013; Wang F等, 2015)、白垩纪(Chen等, 2008)等. 产生上述分歧的原因很多, 不在此进行详细的讨论. 本文强调, 对俯冲作用的起始时间, 最好的约束来自于与俯冲作用直接相关的增生杂岩和在陆缘分布的弧岩浆作用.

位于中国东北地区东缘, 毗邻俄罗斯远东滨海区的那丹哈达地体, 是晚古生代-中生代环太平洋增生型造山带的一部分, 是中国境内唯一明确与古太平洋板块向东亚大陆边缘俯冲有关的增生杂岩(刘德来和马莉, 1997). 它由饶河杂岩和早白垩世岩浆岩组成. 位于饶河杂岩西侧的跃进山蛇绿混杂岩可能代表了更早期(二叠纪)的增生产物, 其中的变玄武岩显示洋中脊玄武岩(MORB)和洋岛玄武岩(OIB)的地球化学特征(Bi等, 2017), 相伴生的辉长岩的年龄为二叠纪(Sun等, 2015a; Bi等, 2016).

饶河杂岩由三叠纪-侏罗纪硅质岩、泥质岩、火山岩以及永福桥组陆源海相碎屑岩组成. 前者发生强烈的构造变形, 构成了增生楔的组成部分, 而后者则可能为上覆的海沟-斜坡沉积. 饶河杂岩中的枕状熔岩具有OIB的地球化学特征, 年龄为167Ma. 永福桥组砂岩的碎屑锆石U-Pb同位素年龄分布和Hf同位素特征与中国东北地区花岗岩的分布特征具有一致性, 其中最年轻的一组锆石U-Pb年龄为140~137Ma(Zhou等, 2014; Sun等, 2015b), 从而限定了饶河杂岩增生就位的时间为晚侏罗世末-早白垩世初, 增生的位置在佳木斯地块东缘. 与饶河杂岩相对应, 根据放射虫等化石研究发现, 俄罗斯远东哈巴杂岩最年轻的变形地层时代为晚侏罗世晚期-早白垩世最早期, 说明该杂岩的就位时代晚于早白垩世早期(Zyabrev和Matsuoka, 1999). 最近通过古地磁研究, 并结合已有的地层和古生物证据, 提出晚侏罗世-早白垩世处于东亚大陆边缘的那丹哈达地体、日本列岛的美浓地体以及西锡霍特阿林地体构成了统一的增生杂岩带, 这些地体属于环太平洋活动带的一部分(任收麦等, 2015; Sun等, 2015b).

需要指出的是, 饶河杂岩增生就位的时间并不代表西太平洋板块向东亚大陆边缘俯冲的初始时间. 日本中生代最早的美浓地体到达海沟的时间约为190Ma, 最终构造就位的时间约为175Ma(Isozaki, 1997), 说明西太平洋板块起始俯冲的时间至少不晚于

早侏罗世(Xu等, 2013; Zhou等, 2014; Sun等, 2015a), 这一认识得到黑龙江杂岩中蓝片岩变质年龄的佐证(Zhou等, 2009).

确定西太平洋板块初始俯冲时代的另一种方法是考察与俯冲相关的岩浆活动记录(Xu等, 2013; Wang F等, 2015; Wang T等, 2015). 难点是东北和华北北部的中生代岩浆活动可能受到古亚洲洋、蒙古-鄂霍茨克洋以及太平洋三大构造域的叠加影响, 如何区分不同构造域活动的时空范围成为关键. 一般认为晚三叠世古亚洲洋已经封闭(Xu等, 2013), 因此区分蒙古-鄂霍茨克洋和太平洋构造域的影响是关键.

图1展示了从辽东经辽西至冀北一带中生代岩浆活动的迁移规律(马强和徐义刚, 2017). 在讨论这个岩浆迁移规律之前, 有必要评估蒙古-鄂霍茨克构造体系的影响. 基于以下考虑, 我们认为这一区域受蒙古-鄂霍茨克构造体系的影响不大.

(1) 蒙古-鄂霍次克洋是古生代至早中生代在西伯利亚南缘的拼贴缝合带(Gordienko, 1994). van der Voo等(1999)发现蒙古-鄂霍次克洋俯冲的洋壳迄今为止滞留在地幔中, 其主体向西伯利亚方向俯冲. Hangay-Hentey增生杂岩的分布位置也表明是北向俯冲(Ruppen等, 2014). Xu等(2013)认为是蒙古-鄂霍次克洋存在双向俯冲, 但现有资料支持蒙-鄂洋缝合带以南地区是被动大陆边缘, 没有主动大陆边缘的证据(Wu等, 2011), 因此南向俯冲的证据不足.

(2) 虽然有些古地磁的研究认为蒙古-鄂霍茨克洋一直存在到早白垩世, 但沉积学-岩浆年代学资料指示大洋关闭发生在中侏罗世, 而且其封闭自西南向东北逐渐扩展. 例如, 黑龙江西北部漠河-额尔古纳地区发育晚三叠世至早侏罗世钙碱性系列岩浆活动, 而晚侏罗世至早白垩世发育A型花岗岩, 标志着蒙-鄂洋的最终闭合发生在中侏罗世(Sun等, 2013; Tang等, 2014). 从东北岩浆的时空分布看, 自张广才岭经小兴安岭到大兴安岭, 岩浆年龄逐渐变年轻(Wu等, 2011). 当然自额尔古纳向大兴安岭岩浆活动也有变年轻的趋势. 这种岩浆活动规律至少说明大兴安岭以东为太平洋构造域, 大兴安岭以西为蒙古-鄂霍次克洋构造域. 那么大兴安岭究竟受哪个构造域控制, 还是两大构造域的叠置区? 由于蒙古-鄂霍茨克洋缝合带的走向主要是NE向, 而大兴安岭主体是NNE, 因此推测大兴安岭岩浆活动主要受控于太平洋构造域. 该观点的另一个支持

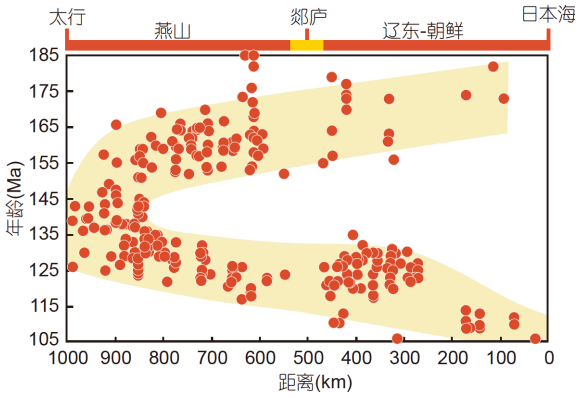


图 1　东亚大陆边缘中生代岩浆活动的时空迁移规律

据Ma等(2019)

证据来自于矿床研究; 大兴安岭南段发育晚侏罗-早白垩的W-Sn矿, 与中国东部受太平洋板块俯冲影响的巨型W-Sn成矿带在时间上和空间上相一致(毛景文, 个人通信). 如果将大兴安岭晚侏罗世-早白垩世岩浆活动归为太平洋构造域的产物, 那么自张广才岭经小兴安岭到大兴安岭的岩浆迁移趋势与西太平洋俯冲的动力学背景相协调. 相反, 如果把大兴安岭晚侏罗世-早白垩世岩浆活动归为蒙古-鄂霍茨克构造域的产物, 那么自西北向东南的岩浆迁移规律与蒙古-鄂霍茨克洋板块北向俯冲相矛盾.

(3) Wang T等(2015)统计了蒙古-鄂霍茨克构造带的岩浆活动, 发现有两阶段岩浆活动, 分别为200~170和150~110Ma, 反映了同俯冲阶段和俯冲后两个动力学背景的产物. 两个岩浆活动之间存在岩浆间歇期(165~150Ma), 而这个岩浆间歇期恰恰是华北北缘广泛发育的髫髻山组火山的峰期. 从这个意义上说, 髫髻山组火山不可能是蒙古-鄂霍茨克洋构造域的产物. 即使假设燕辽地区的髫髻山组火山岩是造山带垮塌拆沉所致, 但蒙古-鄂霍茨克洋的封闭自西南向东北逐渐扩展, 那么造山带垮塌造成的岩浆作用总体上也应是自西南向东北迁移, 这个与观察到的自西向东迁移的规律不相吻合.

上述讨论可以排除蒙古-鄂霍茨克构造体系对辽东和燕辽地区的影响, 那么图1的岩浆迁移规律反映的就是太平洋板块俯冲过程. 从180~145Ma岩浆活动从海沟向陆内迁移, 代表了西太平洋板块前进俯冲的响应(见后), 说明西太平洋板块向东亚大陆的俯冲在早侏罗世时期就已经开始了, 这与前述的增生杂岩研究

结论相一致.

3　早白垩世西太平洋板块古俯冲带的位置

如果西太平洋板块俯冲是导致华北克拉通破坏的一级动力, 那么确定克拉通破坏峰期即早白垩世西太平洋板块古俯冲带的位置就显得十分重要. 基于磨拉石剥蚀厚度, Chen(2000)认为东亚边缘海岸山脉在晚白垩世的高度在海拔3500~4000m, 从海岸向内陆延伸大约500km. 最近, Zhang等(2016)利用盐酸盐团簇同位素温度计研究表明, 在80Ma时东亚大陆边缘海岸山脉的高度大于2000m. 类比于现今东太平洋俯冲带的情况, 我们可以推断白垩纪西太平洋俯冲带位于东亚大陆边缘, 比现今西太平洋板块俯冲带要靠西得多(图2). 综合分析洋壳磁异常观测、全球板块重建模型、数值模拟、海洋盆地动力学、岩石地球化学、古地磁等研究结果(Funiciello等, 2003; Seton等, 2012; Müller等, 2008a, 2008b; Bird, 2003; Yang, 2013; Tarduno, 2007; Liu S F等, 2017)发现, 早白垩世早期(~140Ma)位于西太平洋俯冲带的大洋板块年龄约为160Ma, 从俯冲带向东大洋板块的年龄逐渐年轻; 在距今130和60Ma, 位于西太平洋俯冲带的大洋板块年龄分别约为130和10Ma, 从俯冲带往东大洋板块的年龄继续逐渐年轻. 洋中脊大约在距今45Ma开始进入西太平洋俯冲带; 洋中脊俯冲之后, 从俯冲带向东大洋板块的年龄逐渐增加. 在距今40和20Ma, 位于西太平洋俯冲带的大洋板

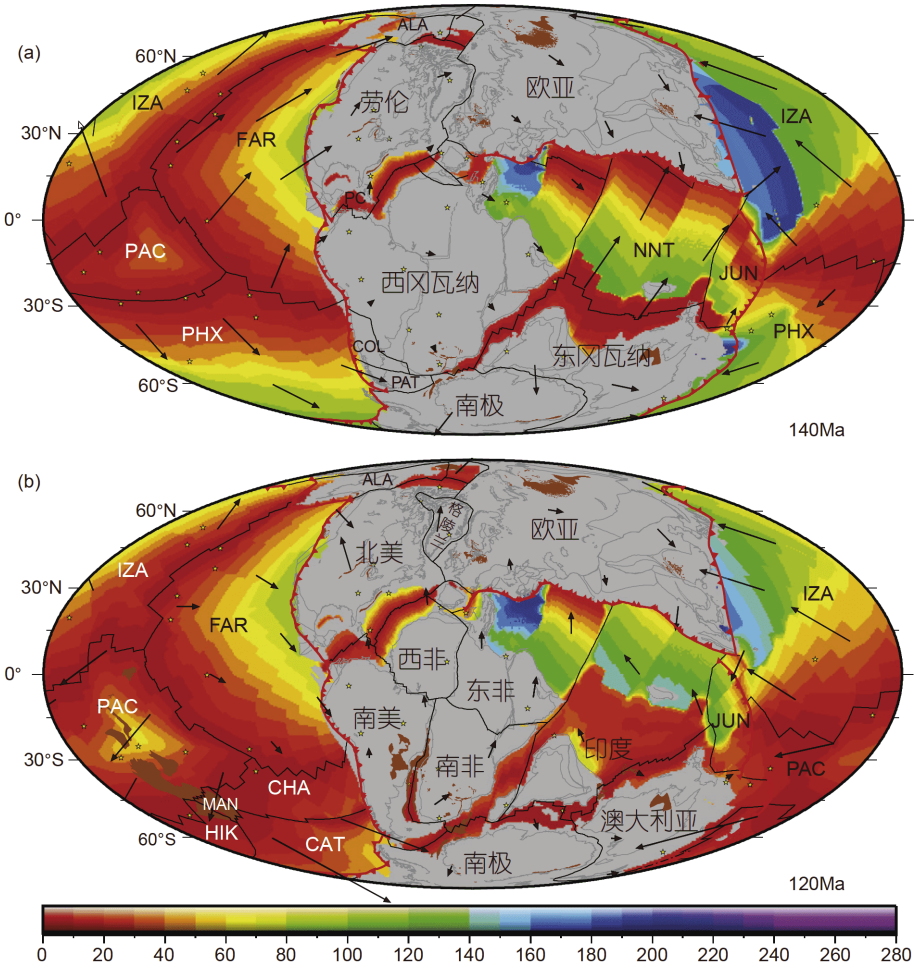


图 2　早白垩世西太平洋俯冲带的位置

修改自Seton等(2012)和Zhu等(2017). ALA: 阿拉斯加; CAR: 加勒比板块; CHA: 查斯卡板块; COL: 科罗拉多; FAR: 法拉龙板块; IZA: 依扎奈几板块; JUN: 联合板块; MANHIK: 曼尼核基板块; NNT: 北新特提斯; PAC: 太平洋板块; PAT: 帕塔戈尼亚; PHX: 费尼克斯板块

块年龄分别为10和70Ma, 从俯冲带往东大洋板块的年龄继续逐渐增加; 现今在日本海沟处西太平洋板块的年龄约为130Ma, 从俯冲带往东南大洋板块的年龄逐渐增加.

上述板块重建可以帮助我们约束早白垩世古太平洋板块俯冲带的位置. 从40Ma开始太平洋俯冲板块进入晚白垩世以来的第二次高速后撤, 导致日本海的形成, 当时的华北克拉通东部处于这一弧后盆地的西侧. 俯冲板块后撤的距离由日本海的东西宽度所决定, 也就是说新生代西太平洋俯冲带后撤了大约1300km. 考虑到130~120Ma期间, 西太平洋俯冲板块后撤了880km(朱日祥等, 2015), 由此我们推测, 130Ma以来西太平洋俯冲带向东后撤了大约2200km(1300+880km); 与此相对应, 欧亚大陆自130Ma以来向东漂移了大约900km.

4 东亚大地幔楔的形成时代

上述地质记录表明, 西太平洋开始向东亚大陆边缘俯冲的时代至少为早侏罗世, 俯冲带位于东亚大陆边缘. 接下来需要回答的问题是西太平洋俯冲板块何时开始在地幔过渡带滞留或者说东亚大地幔楔是何时形成的? 这对认识华北克拉通破坏机制是至关重要的问题.

地震层析成像揭示, 晚新生代西太平洋板块俯冲在到达410~660km深度时滞留在地幔过渡带, 随着俯冲板块后撤, 滞留在地幔过渡带的俯冲板块在俯冲方向扩展到大约1500km. Zhao等(2004)以及Ohtani和Zhao(2009)将平躺在上下地幔过渡带的滞留大洋板块之上的上地幔称为大地幔楔(Big Mantle Wedge, BMW), 大地幔楔系统与靠近海沟的小地幔楔有很大的不同. 由于与海沟的距离达上千公里, 大地幔楔涉及的区域一般认为是板内环境. 大地幔楔、平躺在地幔过渡带中的滞留俯冲板块和下地幔构成一个独特的"三明治"式的地幔结构(徐义刚等, 2018).

目前对东亚大地幔楔的形成年龄主要有两种观点. 第一种观点认为, 地球物理探测揭示的东亚大地幔楔结构只代表现今深部结构的影像(郑永飞等, 2018). Liu X等(2017)根据古洋壳年龄数据和高精度P波层析成像模型, 限定现今观察到的平躺在地幔过渡带中的板片是太平洋板块, 而不是伊萨纳基板块, 是不超过20Ma前形成的. 另一种观点则认为, 东亚大地幔楔早在早白垩世就已形成了(朱日祥等, 2012; 马强和徐义刚, 2017; 徐义刚等, 2018). 根据大地幔楔的定义(Zhao等, 2004; Ohtani和Zhao, 2009), 俯冲板块在地幔过渡带滞留是其形成的必要条件, 而俯冲板块在地幔过渡带滞留的必要条件是俯冲带后撤(Griffiths等, 1995), 因此确定西太平洋板块后撤的起始时间可以大致限定东亚大地幔楔的形成时代(马强和徐义刚, 2017; Ma等, 2018, submitted).

马强和徐义刚(2017)认为, 俯冲板块在地幔过渡带开始滞留的时间与俯冲带后撤开始的时间大致相同. 基于这一思路, 他们对东亚大陆边缘晚中生代岩浆岩时空迁移规律进行了深入的研究, 发现180~145Ma期间, 岩浆活动从海沟向陆内迁移, 而自145Ma起, 岩浆活动自内陆向海沟方向迁移(图1). 通过分析这两期岩浆的形成条件, 认为它们分别代表了西太平洋板块向东亚大陆边缘前进俯冲和后撤的响应. 这些认识得到其他研究组的证实(郑建平和戴宏坤, 2018; 郑永飞等, 2018). 例如, 郑永飞等(2018)根据晚中生代基性岩浆研究认为, 古太平洋板块自侏罗纪开始向欧亚大陆边缘俯冲, 大约144Ma左右, 俯冲的古太平洋板块发生回转.

虽然对古太平洋俯冲板块后撤的时间已有共识, 但从板块后撤到地幔过渡带产生滞留体需要多长时间尚没有一致的看法, 导致了对东亚大地幔楔形成时代的激烈争论(徐义刚等, 2018; 郑永飞等, 2018). Mao和Zhong(2018)针对部分俯冲板块在地幔过渡带上方停滞这个问题进行了数值模拟研究, 假设在670km过渡带之下存在一个弱黏性的薄层, 那么停滞在过渡带之上的俯冲板块可由近20~30个百万年发生的俯冲所导致, 由此推测俯冲板块从停滞到穿透到下地幔的转换时间大概是~10个百万年尺度. 如果这个模拟结果符合实际的话, 由于古太平洋板片后撤始于~145Ma, 那么大地幔楔形成于~120Ma左右. 这一时间尺度与中国东部中生代玄武岩地球化学研究结果相吻合. Dai等(2016)发现, 以~121Ma为分界点, 华北克拉通岩石圈地幔的地球化学性质发生了根本性转变, 这时具有洋岛玄武岩地球化学特征的大陆玄武岩开始出现, 而在此之前出现的镁铁质火成岩具有岛弧玄武岩地球化学特征. Li等(2016)对中国东部晚中生代-新生代大陆玄武岩和部分环太平洋岛弧玄武岩进行了系统的Mg同

位素地球化学研究，圈定了北从黑龙江省中俄边境南到海南岛，西部大致以大兴安岭-太行山重力梯度带为界的低δ^{26}Mg异常区．由于只有沉积碳酸盐具有极低δ^{26}Mg同位素特征，而且在板块俯冲过程中，沉积碳酸盐的Mg同位素组成没有大的变化，因此低δ^{26}Mg异常反映岩浆源区含有再循环的沉积碳酸盐，很可能来自于地幔过渡带中的滞留板块．最早出现低δ^{26}Mg异常的玄武岩的年龄为106Ma(李曙光和汪洋, 2018)．李曙光和汪洋(2018)研究该区域玄武岩Mg-Sr同位素组成与年龄关系后发现，106Ma以来该异常区地幔源区碳酸盐发生初熔的深度为300~360km，即在106Ma以前古西太平洋俯冲板块已经与地幔楔发生相互作用．考虑到岩浆上升和喷发所需要的时间，他们推测东亚大地幔楔可能在早白垩世已经开始形成．在300~360km这个深度，俯冲板片上层的地壳岩石不仅会发生脱水熔融，而且超高压变质榴辉岩中的金红石会发生分解，由此产生的硅酸盐-碳酸盐混合熔体交代上覆软流圈成因地幔楔，就可以形成具有洋岛玄武岩地球化学特征的地幔源区(徐义刚等, 2018; 郑永飞等, 2018)．

当然，在地幔过渡带中的滞留板片不是永久的，大约经过10Ma之后就开始部分进入下地幔，因此东亚深部结构是动态演化的，但这并不排除东亚自早白垩世以来主体上具有大地幔楔结构，因为西太平洋俯冲体系自晚中生代以来多数时间处在板块后撤的动力学背景(Seton等, 2012)．另一方面，在Mao和Zhong(2018)的动力学模型中，存在于地幔过渡带下方的薄弱层对模拟俯冲板块的停滞起到了决定性作用．如果在地幔过渡带之下不存在这么一个弱黏性的薄层，那么停滞在过渡带之上的俯冲板块就有可能由120~100Ma持续发生的俯冲所导致(Seton等, 2012)，并且俯冲板块从停滞到穿透到下地幔的转换时间也可能远大于10Ma这个尺度．因此，该薄弱层的存在与否及其物理化学性质是个关键问题，还亟待进一步研究．

中国大陆东部边缘晚中生代岩浆迁移规律(图1)有两个重要的启示：(1) 西太平洋板块后撤的起始时间在早白垩世的~145Ma，早于华北克拉通破坏的峰期时间130~120Ma，说明西太平洋板块俯冲过程中的后撤行为对华北克拉通破坏的控制；(2) 东亚大地幔楔在早白垩世的~145Ma就开始形成，在130~120Ma期间西太平洋板块俯冲作用对华北克拉通的影响可能是通过地幔楔加大过程中物质和能量的剧烈迁移和交换来实现的．碳酸盐交代地幔形成碳酸盐化橄榄岩，其固相线温度下降而发生部分熔融，导致岩石圈地幔物理化学性质发生变化——克拉通破坏(李曙光和汪洋, 2018; 徐义刚等, 2018; 郑永飞, 2018)，这时至少华北克拉通岩石圈地幔下部的性质类似于软流圈——岩石圈减薄．这项工作的重要性在于不仅约束了东亚大地幔楔形成的时代，而且还提出了西太平洋板块俯冲、华北克拉通破坏以及深部碳循环动力学机制．另一方面，碳酸盐熔体交代作用对华北克拉通破坏过程中巨量金成矿是非常重要的(宗克清和刘勇胜, 2018)．

西太平洋板块俯冲在东亚大陆边缘深部形成了大地幔楔结构，不仅对华北克拉通破坏产生了重要影响，也控制了这一地区板内玄武岩的形成．徐义刚等(2018)系统总结了中国东部新生代板内玄武岩的地球化学性质，发现玄武岩源区存在大量再循环物质，其来源与地幔过渡带的滞留板块密切相关，认为中国东部新生代玄武岩大致可以解释为高硅和低硅端元熔体的混合，其中前者为印度洋型地幔特征，而后者具太平洋型地幔特征，分别来自大地幔楔的上部和下部．他们提出了东亚大地幔楔的垂向不均一结构模型，强调地幔过渡带滞留板块的脱碳和脱水作用及相关熔融、交代作用是大地幔楔体系中板内岩浆成因的主要驱动力．这一模型初步回答了长期困扰学术界的一些问题，诸如为什么中国东部新生代玄武岩产于大陆环境却显示与洋岛玄武岩相似的组成．本文强调的大地幔楔体系中不同组分的相互作用过程、岩浆形成机制以及潜在的地球动力学驱动对完善板块构造理论具有重要意义．

5　西太平洋板块俯冲与华北克拉通破坏过程

至此，我们确定了西太平洋向东亚大陆边缘初始俯冲的时代以及早白垩世古俯冲带的位置，也大致限定了东亚大地幔楔形成的时代，揭示了西太平洋板块俯冲与华北克拉通破坏的联系．那么，西太平洋板块俯冲过程是如何演化的？华北克拉通破坏的机制是什么？

如果东亚大地幔楔确实形成于早白垩世，那么东亚大地幔楔在华北克拉通破坏中的作用不可忽视．东亚大地幔楔是一个规模巨大的碳库和水库(Li等,

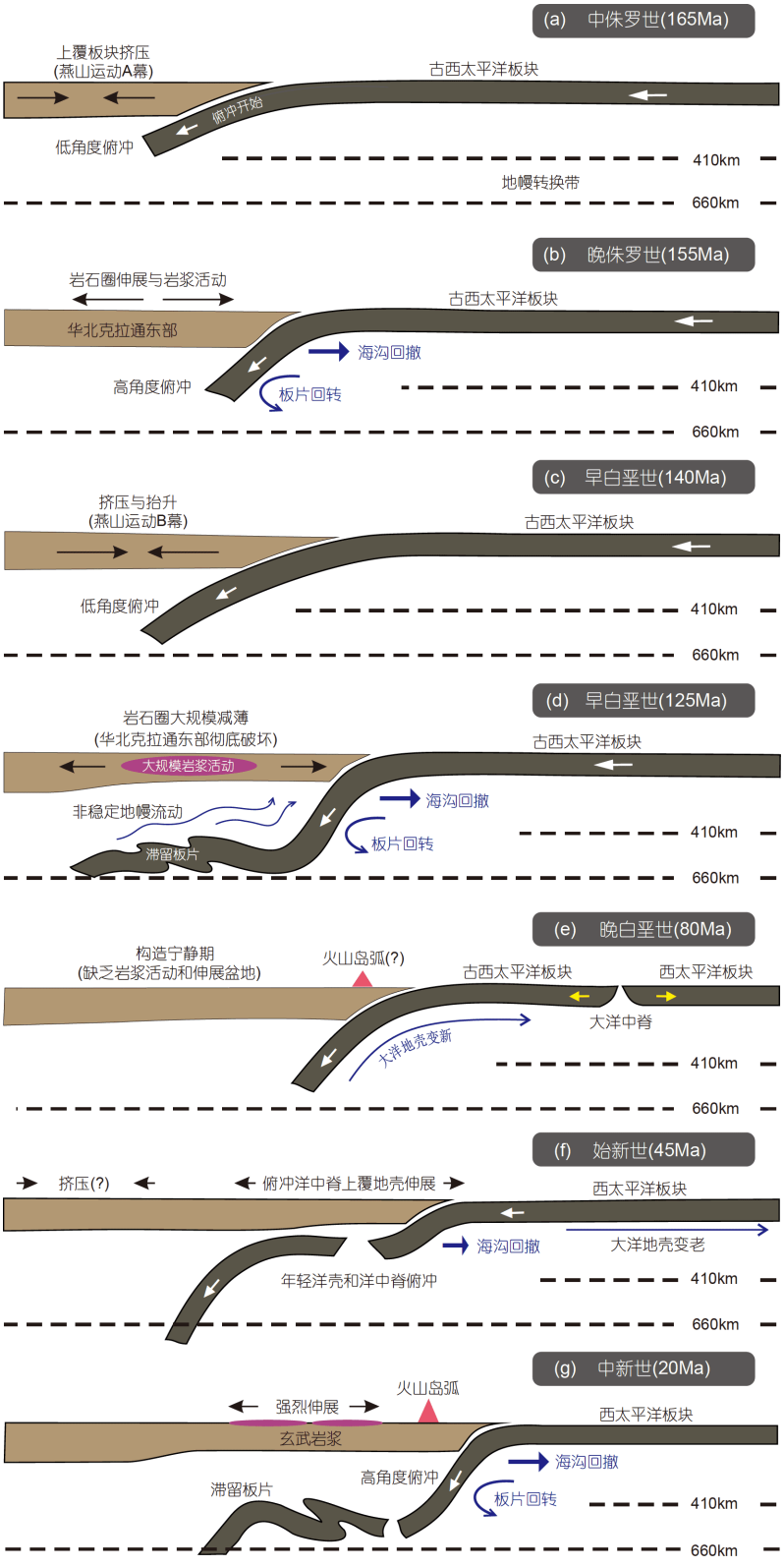


图 3　晚侏罗世以来西太平洋板块俯冲演化过程

修改自Zhu等(2017)

2016; Xia等, 2019), 在中国东部这样的板内环境下的上地幔有与岛弧上地幔差不多的含水量(Xia等, 2013), 这在世界上是不多见的. 而这一特点很可能与滞留在地幔过渡带的太平洋俯冲板片脱水和脱碳有关(Xia等, 2019; 徐义刚等, 2018; 李曙光和汪洋, 2018). 滞留在地幔过渡带的太平洋板块释放大量水和碳酸盐熔体, 引发大地幔楔发生部分熔融, 促进深部流体向浅部岩石圈地幔的运移, 从而导致华北克拉通岩石圈地幔的强烈水化和东部地幔对流系统失稳, 上覆岩石圈被交代-熔融-弱化, 最终导致岩石圈的减薄和克拉通的破坏.

另一方面, 根据朱日祥等(2015)的估计, 在早白垩世的130~120Ma期间西太平洋俯冲板块后撤了880km, 说明在这个时间段板片后撤速率最大, 对大地幔楔的扰动也最大. 如果这个时间段大地幔楔内部的不稳态流动对上覆克拉通岩石圈发生显著物理化学影响, 则有可能成为克拉通破坏的主导因素.

这里我们尝试用地质构造事件反演进入地球内部的俯冲大洋板块演化过程. 根据构造地质学和年代学研究结果, 燕山运动A幕开始的时代大约是165Ma(董树文等, 2007; Yang和Li, 2008; Zhang等, 2008; 赵越等, 2010), 最显著的标志是晚侏罗世华北克拉通普遍发育的角度不整合事件, 对应的构造环境为挤压状态, 持续时间约为5Ma左右; 导致燕山运动A幕发生的地球深部动力学过程可能是西太平洋板块向东亚大陆边缘以高速低角度俯冲(图3a), 在活动大陆边缘地表造成燕山运动A幕及郯庐断裂平移活动. 到晚侏罗世晚期华北克拉通东部出现岩浆活动与裂谷盆地(吴智平等, 2007; 杨明慧等, 2012), 表明这个时期华北克拉通东部的构造环境已经转变为伸展状态, 导致构造环境重大转折的动力学因素主要是西太平洋板块的俯冲由低角度转变为高角度(郑永飞等, 2018), 并伴随俯冲板块的回转与俯冲带的后撤(图3b).

华北克拉通在138Ma左右广泛发育的地壳缩短和褶皱以及地层的角度不整合事件标志着燕山运动B幕的发生. 此时中国东部又表现为一次挤压事件, 郯庐断裂带再次左行平移、盆地反转与短暂的区域抬升; 引起燕山运动B幕的地球动力学机制就是西太平洋板块俯冲角度逐渐变低(图3c). 根据华北克拉通破坏的峰期为~125Ma以及这个时期西太平洋俯冲板块的年龄和俯冲速率分别为160Ma和60~120km/Ma的事实(Zhu等, 2017), 结合对地震层析成像结果(Huang和Zhao, 2006)的再分析(朱日祥等, 2015), 我们推测在早白垩世大约130~120Ma期间, 西太平洋板块可能已经变成高角度俯冲、回转与后撤速率达到最大、并最终在地幔过渡带产生滞留体(图3d); 这个时期的岩浆活动广泛分布于整个华北克拉通东部和中部地区, 岩浆活动呈现双峰式, 不仅发育大量侵入岩(显生宙侵入岩有80%形成于这一时期), 而且形成巨厚的玄武岩地层. 同时, 上述俯冲板块在地幔楔之下的脱水改变了上覆地幔的物性和黏滞度, 导致上覆地幔产生非稳态流动. 俯冲板块的脱水和上覆地幔楔的不稳定流动进一步造成岩石圈地幔中熔/流体含量急剧增加、黏滞度降低、区域热异常增加以及岩石圈伸展/减压, 并使其逐步转变为强烈交代富集的年轻地幔——克拉通破坏(Zhu等, 2017).

一系列同位素年代学结果显示, 120~105Ma华北克拉通表现为弱伸展与均衡隆升(Liu等, 2013; Liu S F等, 2017). 随后华北克拉通东部岩浆活动基本停止以及伸展构造比早白垩世大大减弱, 总体上呈现为岩浆与构造活动的平静期. 大约从80Ma年轻且富浮力的古西太平洋板块逐渐进入俯冲带, 造成这一时期岩浆活动和构造活动的暂时停滞, 华北克拉通处于构造相对平静期(图3e); 始新世洋中脊俯冲导致华北克拉通东部伸展和发生基性岩浆活动, 渤海湾盆地开始形成(图3f); 老的洋壳俯冲导致海沟后退、板片回转及俯冲板片在地幔过渡带的滞留(图3g). 华北克拉通东部由于逐渐远离俯冲带, 伸展作用明显减弱, 总体以大面积坳陷沉降为特征.

上述认识得到了郯庐断裂带研究的支持. 郯庐断裂带纵贯华北克拉通东部, 是认识克拉通破坏与西太平洋俯冲作用的重要窗口. 朱光等(2018)通过对比分析发现, 郯庐断裂带在中侏罗世末发生的左行平移活动, 指示了古太平洋板块俯冲作用影响华北克拉通的开始. 该断裂带在早白垩世初与早白垩世末所发生的另外两期左行平移活动, 皆为区域挤压作用的结果, 对应着古太平洋板块的低角度高速俯冲. 这两期挤压事件之间的早白垩世期间, 郯庐断裂带经历着强烈的伸展活动, 与华北克拉通东部峰期破坏相吻合, 并指示古太平洋俯冲板块的后撤. 在晚白垩世期间, 郯庐断裂断裂带呈现为弱伸展活动. 郯庐断裂带详细的演化历史表明, 华北克拉通东部在晚中生代经历着挤压与伸展的多次交替, 伸展活动持续时间相对较长. 这

些构造过程反映了古太平洋板块俯冲速度与角度在中生代时期的多次调整.

致谢 感谢许文良和刘少峰教授的审阅以及郑永飞主编的意见和建议.

参考文献

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: 1449–1464

李曙光, 汪洋. 2018. 中国东部大地幔楔形成时代和华北克拉通岩石圈减薄新机制——深部再循环碳的地球动力学效应. 中国科学: 地球科学, 48: 809–824

刘德来, 马莉. 1997. 中生代东亚大陆边缘构造演化. 现代地质, 11: 444–451

刘明启, 李忠海. 2018. 克拉通岩石圈减薄与破坏机制的动力学数值模拟. 中国科学: 地球科学, 48: 844–877

刘少峰, 林成发, 刘晓波, 庄其天. 2018. 冀北张家口地区同构造沉积过程及其与褶皱-逆冲作用耦合. 中国科学: 地球科学, 48: 705–731

马强, 徐义刚. 2017. 东亚中生代岩浆的时空变迁与大地幔楔的形成时间. 见: 中国地球科学联合学术年会论文集(四)

任收麦, 朱日祥, 邱海峻. 2015. 黑龙江省饶河枕状玄武岩古地磁学研究及其构造意义. 地球物理学报, 58: 1269–1283

唐杰, 许文良, 王枫, 葛文春. 2018. 古太平洋板块在欧亚大陆下的俯冲历史: 东北亚陆缘中生代-古近纪岩浆记录. 中国科学: 地球科学, 48: 549–583

王坤, 赵亮, 徐小兵, 杨建锋. 2018. 华北克拉通非均匀破坏的动力学原因: 来自地震学和地球动力学的约束. 中国科学: 地球科学, 48: 536–548

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

吴福元, 王建刚, 刘传周, 刘通, 张畅, 纪伟强. 2019. 大洋岛弧的前世今生. 岩石学报, 35: 1–15

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

吴智平, 侯旭波, 李伟. 2007. 华北东部地区中生代盆地格局及演化过程探讨. 大地构造与成矿学, 31: 385–399

徐义刚, 李洪颜, 洪路兵, 马亮, 马强, 孙明道. 2018. 东亚大地幔楔与中国东部新生代板内玄武岩成因. 中国科学: 地球科学, 48: 825–843

杨明慧, 刘池洋, 曾鹏, 白桦, 周进. 2012. 华北克拉通晚三叠世沉积盆地原型与破坏早期构造变形格局. 地质论评, 58: 1–18

赵越, 陈斌, 张拴宏, 刘建民, 胡健民, 刘健, 裴军令. 2010. 华北克拉通北缘及邻区前燕山期主要地质事件. 中国地质, 37: 900–915

郑建平, 戴宏坤. 2018. 西太平洋板片俯冲与后撤引起华北东部地幔置换并导致陆内盆-山耦合. 中国科学: 地球科学, 48: 436–456

郑永飞, 吴福元. 2009. 克拉通岩石圈的生长和再造. 科学通报, 54: 1945–1949

郑永飞, 徐峥, 赵子福, 戴立群. 2018. 华北中生代镁铁质岩浆作用与克拉通减薄和破坏. 中国科学: 地球科学, 48: 379–414

朱光, 刘程, 顾承串, 张帅, 李云剑, 苏楠, 肖世椰. 2018. 郯庐断裂带晚中生代演化对西太平洋俯冲历史的指示. 中国科学: 地球科学, 48: 415–435

朱日祥, 范宏瑞, 李建威, 孟庆任, 李胜荣, 曾庆栋. 2015. 克拉通破坏型金矿床. 中国科学: 地球科学, 45: 1153–1168

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

朱日祥, 郑天愉. 2009. 华北克拉通破坏机制与古元古代板块构造体系. 科学通报, 54: 1950–1961

宗克清, 刘勇胜. 2018. 华北克拉通东部岩石圈地幔碳酸盐熔体交代作用与克拉通破坏. 中国科学: 地球科学, 48: 732–752

Bi J H, Ge W C, Yang H, Wang Z H, Tian D X, Liu X W, Xu W L, Xing D H. 2017. Geochemistry of MORB and OIB in the Yuejinshan complex, NE China: Implications for petrogenesis and tectonic setting. J Asian Earth Sci, 145: 475–493

Bi J H, Ge W C, Yang H, Wang Z H, Xu W L, Yang J H, Xing D H, Chen H J. 2016. Geochronology and geochemistry of late Carboniferous-middle Permian I- and A-type granites and gabbro-diorites in the eastern Jiamusi Massif, NE China: Implications for petrogenesis and tectonic setting. Lithos, 266-267: 213–232

Bird P. 2003. An updated digital model of plate boundaries. Geochem Geophys Geosyst, 4: 1027

Chen C H, Lee C Y, Shinjo R I. 2008. Was there Jurassic paleo-Pacific subduction in South China?: Constraints from $^{40}Ar/^{39}Ar$ dating, elemental and Sr-Nd-Pb isotopic geochemistry of the Mesozoic basalts. Lithos, 106: 83–92

Chen P J. 2000. Paleoenvironmental changes during the Cretaceous in eastern China. Dev Palaeontol Stratigr, 17: 81–90

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

Funiciello F, Faccenna C, Giardini D, Regenauer-Lieb K. 2003. Dynamics of retreating slabs: 2. Insights from three-dimensional laboratory experiments. J Geophys Res, 108: 2207

Gordienko I V. 1994. Paleozoic geodynamic evolution of the Mongol-Okhotsk fold belt. J Southeast Asian Earth Sci, 9: 429–433

Griffiths R W, Hackney R I, van der Hilst R D. 1995. A laboratory investigation of effects of trench migration on the descent of subducted slabs. Earth Planet Sci Lett, 133: 1–17

Huang J, Zhao D. 2006. High-resolution mantle tomography of China

and surrounding regions. J Geophys Res, 111: B09305
Isozaki Y. 1997. Jurassic accretion tectonics of Japan. Isl Arc, 6: 25–51
Li S G, Yang W, Ke S, Meng X N, Tian H C, Xu L J, He Y S, Huang J, Wang X C, Xia Q K, Sun W D, Yang X Y, Ren Z Y, Wei H Q, Liu Y S, Meng F C, Yan J. 2016. Deep carbon cycles constrained by a large-scale mantle Mg isotope anomaly in eastern China. Natl Sci Rev, 298: 111–120
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: 179–182
Li Z X, Li X H, Chung S L, Lo C H, Xu X, Li W X. 2012. Magmatic switch-on and switch-off along the South China continental margin since the Permian: Transition from an Andean-type to a Western Pacific-type plate boundary. Tectonophysics, 532-535: 271–290
Liu J, Shen L, Ji M, Guan H, Zhang Z, Zhao Z. 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
Liu S F, M G, Ma P F, Zhang B. 2017. Reconstruction of northeast Asian deformation integrated with western Pacific plate subduction since 200 Ma. Earth-Sci Rev, 175: 114–142
Liu X, Zhao D, Li S, Wei W. 2017. Age of the subducting Pacific slab beneath East Asia and its geodynamic implications. Earth Planet Sci Lett, 464: 166–174
Ma Q, Xu Y G, Griffin W L, Chung S L, Yang J H. 2019. The big mantle wedge in East Asia formed at Early Cretaceous. Earth Planet Sci Lett, under review
Mao W, Zhong S J. 2018. Slab stagnation due to a reduced viscosity layer beneath the mantle transition zone. Nat Geosci, 11: 876–881
Müller R D, Sdrolias M, Gaina C, Roest W R. 2008b. Age, spreading rates, and spreading asymmetry of the world's ocean crust. Geochem Geophys Geosyst, 9: Q04006
Müller R D, Sdrolias M, Gaina C, Steinberger B, Heine C. 2008a. Long-term sea-level fluctuations driven by ocean basin dynamics. Science, 319: 1357–1362
Niu Y L. 2005. Generation and evolution of basaltic magmas: Some basic concepts and a hypothesis for the origin of the Mesozoic-Cenozoic volcanism in eastern China. Geol J China Univ, 11: 9–46
Niu Y L. 2014. Geological understanding of plate tectonics: Basic concepts, illustrations, examples and new perspectives. Global Tect Metal, 10: 23–46
Ohtani E, Zhao D P. 2009. The role of water in the deep upper mantle and transition zone: Dehydration of stagnant slabs and its effects on the big mantle wedge. Rus Geol Geophys, 50: 1073–1078
Ruppen D, Knaf A, Bussien D, Winkler W, Chimedtseren A, von Quadt A. 2014. Restoring the Silurian to Carboniferous northern active continental margin of the Mongol-Okhotsk Ocean in Mongolia: Hangay-Hentey accretionary wedge and seamount collision. Gondwana Res, 25: 1517–1534
Seton M, Müller R D, Zahirovic S, Gaina C, Torsvik T, Shephard G, Talsma A, Gurnis M, Turner M, Maus S, Chandler M. 2012. Global continental and ocean basin reconstructions since 200 Ma. Earth-Sci Rev, 113: 212–270
Sun D Y, Gou J, Wang T H, Ren Y S, Liu Y J, Guo H Y, Liu X M, Hu Z C. 2013. Geochronological and geochemical constraints on the Erguna massif basement, NE China—Subduction history of the Mongol-Okhotsk oceanic crust. Int Geol Rev, 55: 1801–1816
Sun M D, Xu Y G, Wilde S A, Chen H L. 2015a. Provenance of Cretaceous trench slope sediments from the Mesozoic Wandashan Orogen, NE China: Implications for determining ancient drainage systems and tectonics of the Paleo-Pacific. Tectonics, 34: 1269–1289
Sun M D, Xu Y G, Wilde S A, Chen H L, Yang S F. 2015b. The Permian Dongfanghong island-arc gabbro of the Wandashan Orogen, NE China: Implications for Paleo-Pacific subduction. Tectonophysics, 659: 122–136
Tarduno J A. 2007. On the motion of Hawaii and other mantle plumes. Chem Geol, 241: 234–247
van der Voo R, Spakman W, Bijwaard H. 1999. Mesozoic subducted slabs under Siberia. Nature, 397: 246–249
Wang F, Xu W L, Xu Y G, Gao F H, Ge W C. 2015. Late Triassic bimodal igneous rocks in eastern Heilongjiang Province, NE China: Implications for the initiation of subduction of the Paleo-Pacific Plate beneath Eurasia. J Asian Earth Sci, 97: 406–423
Wang T, Guo L, Zhang L, Yang Q, Zhang J, Tong Y, Ye K. 2015. Timing and evolution of Jurassic-Cretaceous granitoid magmatisms in the Mongol-Okhotsk belt and adjacent areas, NE Asia: Implications for transition from contractional crustal thickening to extensional thinning and geodynamic settings. J Asian Earth Sci, 97: 365–392
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 northeastern China. J Asian Earth Sci, 41: 1–30
Xia Q K, Liu J, Kovács I, Hao Y T, Li P, Yang X Z, Chen H, Sheng Y M. 2019. Water in the upper mantle and deep crust of eastern China: Concentration, distribution and implications. Natl Sci Rev, 6: 125–144
Xia Q K, Liu J, Liu S C, Kovács I, Feng M, Dang L. 2013. High water content in Mesozoic primitive basalts of the North China Craton and implications on the destruction of cratonic mantle lithosphere. Earth Planet Sci Lett, 361: 85–97
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 Y G. 2001. Thermo-tectonic destruction of the archaean lithospheric keel beneath the Sino-Korean Craton in China: Evidence, timing and mechanism. Phys Chem Earth, 26: 747–757

Yang W, Li S G. 2008. Geochronology and geochemistry of the Mesozoic volcanic rocks in Western Liaoning: Implications for lithospheric thinning of the North China Craton. Lithos, 102: 88–117

Yang Y T. 2013. An unrecognized major collision of the Okhotomorsk Block with East Asia during the Late Cretaceous, constraints on the plate reorganization of the Northwest Pacific. Earth-Sci Rev, 126: 96–115

Zhang H, Wang M X, Liu X M. 2008. Constraints on the upper boundary age of the Tiaojishan Formation volcanic rocks in West Liaoning-North Hebei by LA-ICP-MS dating. Chin Sci Bull, 53: 3574–3584

Zhang J J, Zheng Y F, Zhao Z F. 2009. Geochemical evidence for interaction between oceanic crust and lithospheric mantle in the origin of Cenozoic continental basalts in east-central China. Lithos, 110: 305–326

Zhang L M, Wang C S, Cao K, Wang Q, Tan J, Gao Y. 2016. High elevation of Jiaolai Basin during the Late Cretaceous: Implication for the coastal mountains along the East Asian margin. Earth Planet Sci Lett, 456: 112–123

Zhao D, Lei J, Tang R. 2004. Origin of the Changbai intraplate volcanism in Northeast China: Evidence from seismic tomography. Chin Sci Bull, 49: 1401–1408

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

Zhou J B, Cao J L, Wilde S A, Zhao G C, Zhang J J, Wang B. 2014. Paleo-Pacific subduction-accretion: Evidence from geochemical and U-Pb zircon dating of the Nadanhada accretionary complex, NE China. Tectonics, 33: 2444–2466

Zhou J B, Wilde S A, Zhang X Z, Zhao G C, Zheng C Q, Wang Y J, Zhang X H. 2009. The onset of Pacific margin accretion in NE China: Evidence from the Heilongjiang high-pressure metamorphic belt. Tectonophysics, 478: 230–246

Zhu R X, Zhang H F, Zhu G, Meng Q R, Fan H R, Yang J H, Wu F Y, Zhang Z Y, Zheng T Y. 2017. Craton destruction and related resources. Int J Earth Sci-Geol Rundsch, 106: 2233–2257

Zyabrev S, Matsuoka A. 1999. Late Jurassic (Tithonian) radiolarians from a clastic unit of the Khabarovsk complex (Russian Far East): Significance for subduction accretion timing and terrane correlation. Island Arc, 8: 30–37

(责任编委: 郑永飞)