

DOI: 10. 16562/j. cnki. 0256-1492. 2017. 04. 009

# 华北克拉通破坏动力学机制:数值模拟的启示

王永明<sup>1,2</sup>, 李三忠<sup>1,2</sup>, 李玺瑶<sup>1,2</sup>, 戴黎明<sup>1,2</sup>

(1. 海底科学探测与技术教育部重点实验室, 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100;

2. 青岛海洋科学与技术国家实验室, 海洋地质过程与环境功能实验室, 青岛 266237)

**摘要:**华北克拉通是古老克拉通遭到破坏的一个典型例子。近几十年的地球物理、地球化学以及地质学等多学科研究都证实了华北克拉通东部自中生代以来遭受了强烈的改造和破坏,表现出大规模的岩浆活动、构造变形以及岩石圈减薄。华北克拉通破坏的动力学过程一直以来都是地球科学领域关心的热点问题,也存在很多争论,而数值模拟手段也逐渐成为研究华北克拉通破坏动力学机制的重要手段之一。前人利用数值模拟手段从拆沉、热侵蚀、俯冲脱水、化学交代等不同角度开展了一系列研究工作,为很多地球物理、地球化学以及地质学观测提供了一定的动力学模型支持,为理解华北克拉通破坏的动力学成因机制奠定了坚实基础。但是需要指出的是,克拉通破坏是一个非常复杂的过程,目前的数值模型还存在很大的局限性,要更加深入透彻地理解华北克拉通破坏的动力学成因机制,在未来还需要从以下几个方面开展进一步深入细致的研究:(1)从二维粗略模型向三维精细模型的过渡;(2)考虑更为实际的岩石流变学特性、相变过程;(3)利用板块重建等技术为数值模型提供板块运动历史等运动学约束;(4)拆沉、热-化学侵蚀、俯冲脱水等作用相互耦合的动力学模拟。

**关键词:**克拉通破坏;动力学机制;数值模拟;华北克拉通

**中图分类号:**P542

**文献标识码:**A

**文章编号:**0256-1492(2017)04-0137-14

克拉通是地球表面古老而稳定的构造单元,保留有大陆内部最古老的地质历史信息,因此克拉通的演化历史对于理解大陆起源、生长、改造和保存起着至关重要的作用。通常情况下,克拉通区域具有低的表面热流<sup>[1,2]</sup>,并保留有巨厚的岩石圈根(> 200 km)<sup>[3-5]</sup>,其岩石圈根具有较低的温度和含水量,岩石圈根的密度相对较低且黏性相对较高,这使得克拉通具有一定的浮力和强度从而可以避免遭到破坏而稳定存在长达几十亿年<sup>[6,7]</sup>。

华北克拉通是地球上最古老的太古代克拉通之一,在华北克拉通发现了 38 亿年的陆壳残留物<sup>[8]</sup>。随着近几十年对华北克拉通地区研究的不断深入,人们发现华北克拉通自其形成以后并不是一直保持稳定的,在中生代和新生代时期曾遭受过强烈的改造和破坏,浅部主要表现为大规模的岩浆活动、构造

变形以及盆地形成等(图 1)<sup>[9,10]</sup>,深部表现为岩石圈减薄和破坏。因此,华北克拉通也成为研究大陆形成与演化的一个很好的实验场所。

## 1 华北克拉通破坏的证据

通过对基底岩石和壳源捕虏体研究以及锆石 U-Pb 同位素定年研究发现,华北克拉通太古宙地壳的年龄范围约为 2.5~3.8 Ga<sup>[8,11,12]</sup>。对不同地区金伯利岩中橄榄岩捕虏体 Os 同位素特征分析发现,华北克拉通古生代时期的岩石圈地幔是太古宙的(2.5~2.7 Ga)<sup>[13-15]</sup>,表明华北岩石圈地幔和地壳的时代具有耦合性。但是对华北东部新生代玄武岩研究发现,其中的幔源捕虏体的 Os 同位素等特征与现代大洋橄榄岩类似,说明岩石圈地幔在整体上表现为新生地幔的特征,这与古生代时期金伯利岩中橄榄岩捕虏体所反映的古老克拉通型岩石圈地幔特征存在差异<sup>[13,16]</sup>。岩石学研究发现古生代金伯利岩中的橄榄岩捕虏体在岩石类型上表现为大量的石榴石方辉橄榄岩<sup>[17,18]</sup>,而新生代玄武岩的地幔橄榄岩则是以尖晶石二辉橄榄岩为主<sup>[19,20]</sup>。从地幔岩石学和地球化学特征来看古生代地幔橄榄岩表现为难熔(refractory)主要元素特征,同时岩石圈地幔富集 Sr-Nd-Hf 同位素;而新生代地幔橄榄岩主要

**基金项目:**国家杰出青年基金(41325009);国家重点研发计划项目(2016YFC0601002, 2017YFC0601400-1);泰山学者特聘教授项目;鳌山卓越科学家计划(2015ASTP-0S10);中国博士后科学基金(2016M602193);大地测量与地球动力学国家重点实验室开放基金(SKJLGED2016-2-1-E)

**作者简介:**王永明(1986—),男,博士,从事地球动力学研究, E-mail: ymwang@ouc.edu.cn

**通讯作者:**李三忠(1968—),男,教授,博导,从事构造地质学研究, E-mail: sanzhang@ouc.edu.cn

**收稿日期:**2017-05-31; **改回日期:**2017-06-19. 文凤英编辑

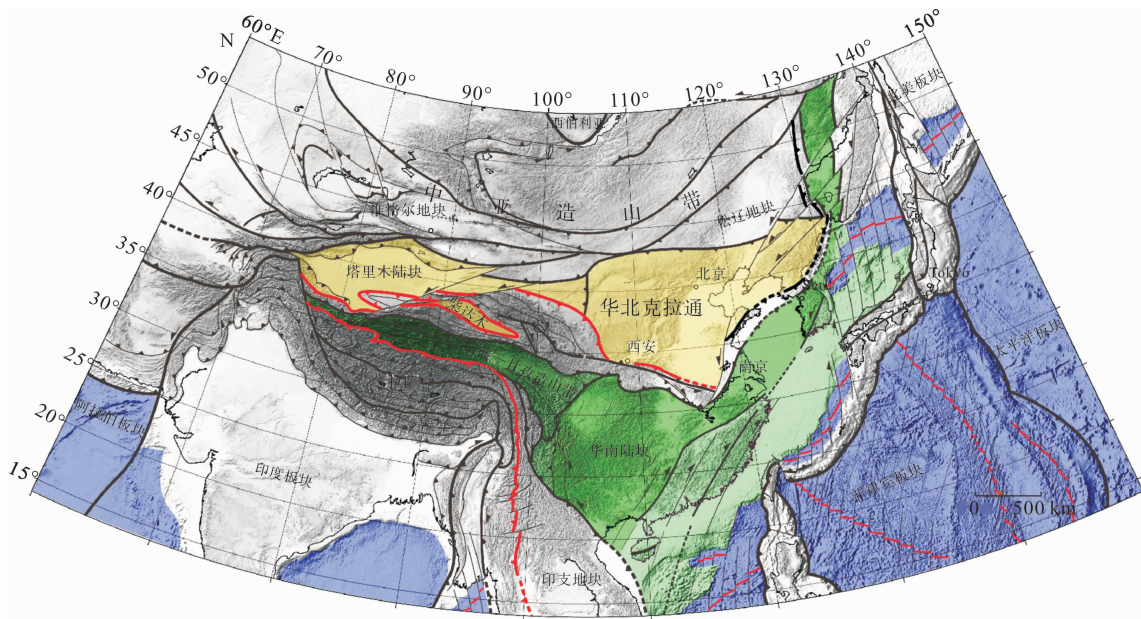


图1 华北克拉通及其邻近大地构造单元划分简图(据文献[10]修改)

Fig. 1 Tectonic map of the North China Craton and its adjacent areas (revised after reference [10])

元素成分表现为相对饱满的特点,其 Sr-Nd-Hf 同位素表现为亏损特征<sup>[21-24]</sup>。

对华北古生代金伯利岩中金刚石及其中矿物包裹体以及橄榄岩包体温压条件研究表明,古生代时期华北克拉通的地表热流约为 40 mW/m<sup>2</sup><sup>[17,25]</sup>,符

合典型的大陆克拉通热流特征;而新生代时期地表热流值明显升高超过 80 mW/m<sup>2</sup><sup>[9,25,26]</sup>。地震层析成像结果显示华北克拉通东西部地壳和岩石圈厚度存在明显差异(图2):在东部地壳和岩石圈的厚度分别为小于40 km

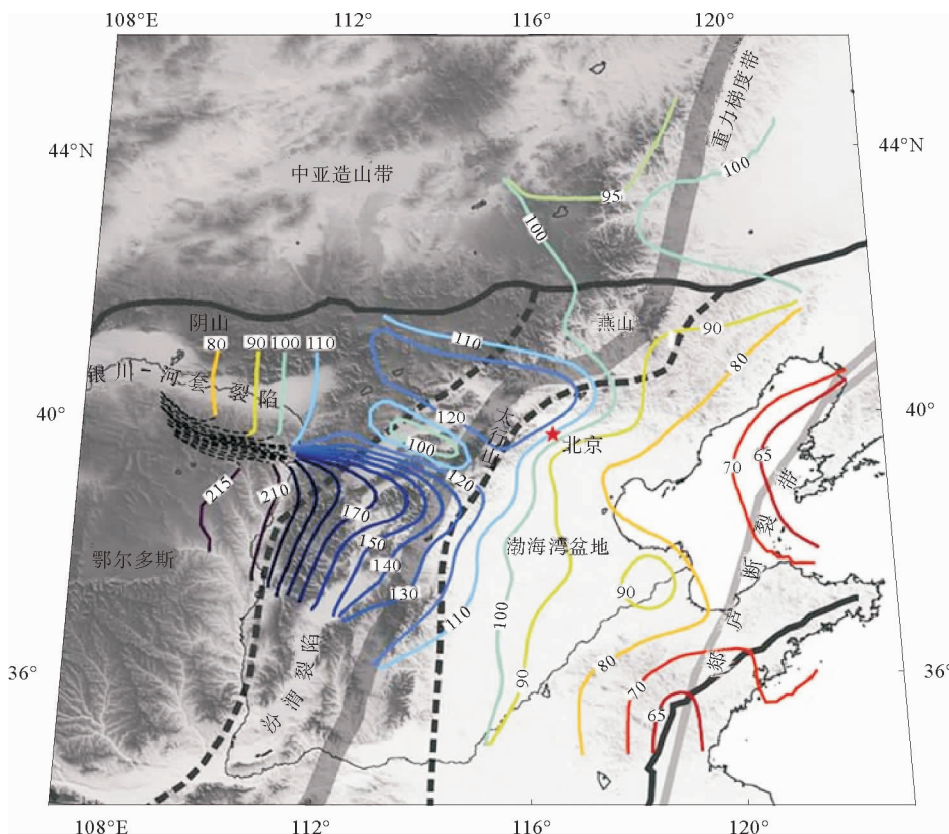


图2 华北克拉通岩石圈厚度等值线图(据文献[44])

Fig. 2 Contour map of the lithospheric thickness of the North China Craton (from reference [44])

和约 100 km,而在克拉通中西部,地壳厚度明显偏厚(40~60 km),岩石圈厚度向西逐渐增加,在稳定的鄂尔多斯盆地可达 200 km<sup>[27-29]</sup>。这与地震学结果和岩石地球化学得到的新生代华北克拉通东部岩石圈减薄约 80 km 的结果基本一致<sup>[17,26]</sup>。利用接收函数综合成像方法对地壳 S 波速度结构研究发现,东部地壳薄、速度低,壳内高低速互层水平延展,体现了地壳减薄、伸展以及大规模韧性变形等被改造的构造特征;而西部地壳厚,具有平坦的分层结构,符合典型克拉通地区地壳特征<sup>[30-33]</sup>。地震成像研究还揭示了壳幔边界结构中保留的地幔岩浆作用的记录,例如燕山地区壳幔边界强烈的速度反差很可能是岩石圈拆沉引起软流圈上涌从而形成速度显著不同的物质分界面的结果<sup>[33]</sup>。进一步的研究还发现,在华北克拉通东部岩石圈地幔内存在一些高速异常体,被认为是拆沉的地壳或者岩石圈的残留物<sup>[34,35]</sup>。

浅表地质记录显示,中生代早期华北克拉通南缘发生了后陆变形,形成了 NWW—SEE 走向的褶断带,同时郯庐断裂带开始活动,以陆内转换断层形式将大别-苏鲁造山带大规模左行错开<sup>[36]</sup>。在中一晚侏罗世期间,华北克拉通东部在区域性压扭作用下形成了一系列以郯庐断裂带为代表的北北东走向的左行平移断裂带<sup>[37,38]</sup>(图 1)。在早白垩世时期华北东部大规模变质核杂岩形成,开始出现广泛发育的断陷盆地、伸展断层活动以及大规模火山喷发和岩体侵入<sup>[39-43]</sup>,暗示华北克拉通破坏进入高峰期。郯庐断裂带这一时期也转变为巨型的伸展断层,在其周围发育了一系列地堑式与半地堑式断陷盆地<sup>[38]</sup>。

## 2 华北克拉通破坏的方式

尽管目前华北克拉通遭到破坏已经成为公认的事实,但是对于克拉通破坏的机制一直存在争论<sup>[45]</sup>。早期提出的模型主要分为拆沉模型<sup>[46,47]</sup>和热(化学-机械)侵蚀模型<sup>[45,48]</sup>。通过对华北东部地壳结构和成分的分析,Gao 等<sup>[13]</sup>发现地壳具有明显的 Eu 负异常和高二氧化硅含量,而且下地壳具有高的演化程度<sup>[49]</sup>,在此基础上他们提出下地壳和岩石圈地幔共同拆沉很可能导致了华北克拉通破坏。此外,Os 同位素研究所揭示的华北东部罕有太古代岩石圈地幔残留<sup>[16,50]</sup>、华北中生代岩浆活动的幕式分布特征<sup>[51,52]</sup>、侏罗纪火山岩中壳源岩浆受到地幔混染<sup>[53]</sup>以及新生代玄武岩地幔橄榄岩中发现的壳

源成因的熔体包裹体<sup>[45]</sup>等证据也在一定程度上支持了拆沉模型的观点。Menzies 等<sup>[26]</sup>和 Xu<sup>[25]</sup>则强调来自软流圈上涌所引起的热侵蚀在华北克拉通岩石圈减薄过程中起着重要的作用,因为华北东部地区中生代幔源岩浆岩主要表现为富集型岩石圈地幔来源<sup>[23]</sup>,而且整个中生代岩浆活动时间跨度超过 90 Ma,是一个相对缓慢而持续的过程。除了以上两种讨论比较多的模型以外,也有研究者提出了其他几种不同的破坏模式。例如,张宏福<sup>[54]</sup>多次提出橄榄岩-熔体的相互作用是导致华北克拉通破坏的重要原因。华北东部晚中生代时期广泛发育的伸展盆地和变质核杂岩表明该地区曾处于伸展构造背景,因此也有学者提出是机械拉张作用导致了岩石圈减薄进而遭到破坏<sup>[45]</sup>。Xia 等<sup>[55]</sup>通过对不同时代橄榄岩捕虏体中主要矿物结构水的赋存状态、含量和氢氧同位素组成的测定,以及实验模拟研究,发现华北克拉通东部岩石圈地幔水含量在约 125 Ma 时总体上远高于 MORB 源区( $(50\sim 200)\times 10^{-6}$ ),表明岩石圈地幔在晚中生代时期经历了强烈的水化作用,这很可能意味着华北克拉通被破坏是与其受到强烈水化作用而导致强度显著降低密切相关。与此同时,牛耀龄<sup>[56]</sup>也提出了岩石圈水化模型,认为中国东部在中新生代期间长期受太平洋板块俯冲作用的影响,大洋板块的俯冲使大量水分进入地幔楔,从而在很大程度上降低了地幔楔的黏性强度,进而促进地幔对流导致岩石圈减薄。

## 3 华北克拉通破坏与古太平洋板块俯冲

华北克拉通地处印度板块、欧亚板块和太平洋板块三大板块汇聚地区,其破坏过程必然和板块构造运动密切相关(图 1)。自古生代以来,华北克拉通作为上覆板块长期处于复杂的俯冲构造环境中,例如,三叠纪时期(245~210 Ma)华南(或扬子)板块向华北板块之下的俯冲<sup>[57,58]</sup>,中生代(约 250 Ma)时期古亚洲洋板片向华北板块的俯冲<sup>[59,60]</sup>,中生代—新生代以来 Izanagi(依泽奈崎板块,即古太平洋板块)向华北和华南板块之下的俯冲<sup>[61]</sup>。由于华北克拉通被多个俯冲带所包围,因此华北克拉通破坏很可能和多个俯冲过程都有关系,因为岩石圈中的水可能来自多个俯冲板块的脱水释放。但是,如果晚中生代华北克拉通岩石圈地幔弱化是由于扬子或者古亚洲洋板片和华北板块之间俯冲的话,那么华北克拉通应该是整体上都发生破坏,因为从这些

俯冲板片中释放的水会导致整个华北克拉通岩石圈地幔富水。考虑到华北克拉通破坏只局限在东部地区,因此,太平洋板块俯冲对华北克拉通东部岩石圈演化的影响很可能是最主要的<sup>[44,62,63]</sup>。太平洋板块俯冲是导致这一地区现今盆地和主要构造线的走向、变质核杂岩展布、岩浆作用性质的演变、晚中生代岩石圈地幔富水以及南北重力梯度带形成的主要动力学因素<sup>[44]</sup>。

随着对华北克拉通研究的不断深入,目前大多数研究者都认为太平洋板块俯冲是华北克拉通破坏的主要构造控制因素。在早白垩世(约 125 Ma)时期太平洋板块俯冲方向由南西向向北西向突然变化<sup>[64,65]</sup>,与此同时,华北克拉通破坏在 135~110 Ma 达到峰期,华北东部出现大规模岩浆活动<sup>[52]</sup>、区域性构造伸展<sup>[66-68]</sup>和大规模成矿<sup>[69,70]</sup>等地质现象。从空间上来说,南北重力梯度带和郯庐断裂带两条中国东部大型构造带的走向也都显示出与太平洋板块俯冲的相关性<sup>[62]</sup>。地震层析成像显示,在华北克拉通东部地幔过渡带存在着延伸达几百千米的高速异常体,被认为是太平洋板块俯冲到地幔深部的物质滞留<sup>[34,71]</sup>。华北新生代玄武岩中微量元素含量显示明显 Nb、Ta 正异常以及 Pb 负异常<sup>[72-74]</sup>,而且玄武岩中橄榄石和斜长石斑晶矿物具有低  $\delta^{18}\text{O}$  值<sup>[44]</sup>,这些化学组成具有典型的洋岛玄武岩组成特

征。对这些玄武岩源区再循环组分的研究显示,华北东部约 100 Ma 以来的 OIB 型玄武岩地幔源区中的再循环洋壳组分很可能来自于俯冲的太平洋板块<sup>[44]</sup>。在中—晚侏罗世,华北克拉通东部形成了一系列以郯庐断裂带为代表的北北东走向的左行平移断裂带,这被认为是由于古太平洋(Izanagi)板块向东亚大陆之下高速的斜向俯冲所造成的。通过郯庐断裂带周边断陷盆地的断层分析,发现华北克拉通东部在破坏峰期从早白垩世早—中期到早白垩世晚期再到晚白垩世—古近纪期间分别经历了 NWW—SEE 向拉伸、NW—SE 向拉伸以及南北向拉伸,显示拉伸方向沿顺时针方向变化,这一变化规律与太平洋区大洋板块运动方向在此期间的变化相吻合<sup>[75]</sup>,但是,很多盆地中多向断裂同期活动不支持这种转向观点。朱日祥等<sup>[44,62,63]</sup>提出,太平洋板块俯冲对华北东部地区从浅表到地幔深部的结构和状态都产生了强烈影响,俯冲板片进入上地幔并脱水,改变了原有的地幔流动状态,导致华北克拉通下面产生不稳定的地幔对流体系,从而促进了古老岩石圈根的拆沉以及地幔对流引起的热-化学-机械侵蚀作用(图 3)。另一方面,上述不稳定的地幔流动体系及古太平洋板块的俯冲还引起弧后拉张作用,导致华北克拉通东部普遍发育 NWW—SEE 向伸展构造。

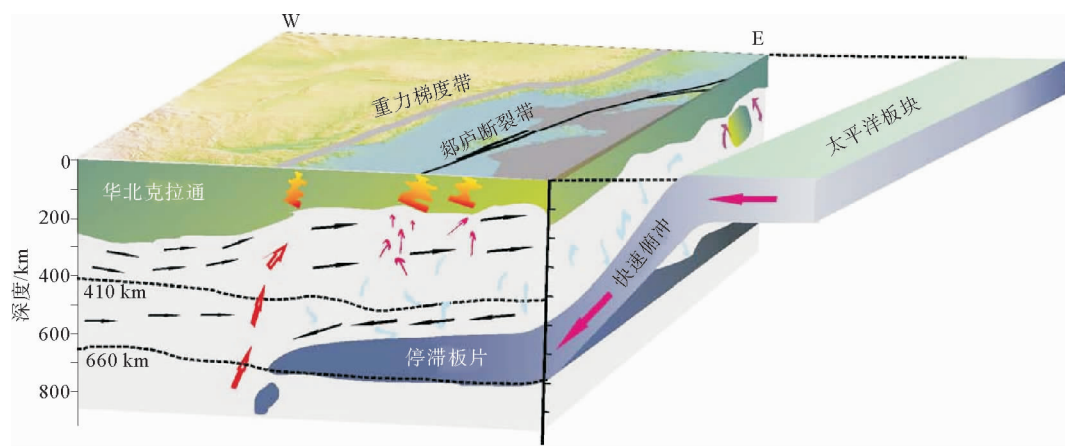


图 3 华北克拉通破坏与古太平洋板块俯冲(据文献[62])

Fig. 3 Dynamic couplings between the destruction of the North China Craton and the subduction of the Paleo-Pacific plate (from reference [62])

#### 4 华北克拉通破坏机制的数值模拟

尽管目前对于华北克拉通破坏的动力学机制已经提出了各种各样的解释和模型,但是以上这些认识都只是基于一些地质学、地球化学或者地球物理

学等观测的定性描述,对其内在的精细的物理和化学演化过程还缺乏深入细致的检验。随着计算机技术和数值模拟方法的不断发展,对地球内部物理、化学演化过程的精细研究也不断得到加强,数值模拟方法也成为研究克拉通稳定、破坏等动力学过程的有效手段。

一般认为,克拉通本身固有的一些物理和化学特性是维持克拉通稳定的主要控制因素,例如巨厚的岩石圈根、亏损的地球化学组分所导致的化学浮力以及高的黏性强度<sup>[76,77]</sup>。因此很多数值模拟研究都是基于对克拉通本身物性参数影响的讨论。例如,数值模拟结果显示,克拉通岩石圈的化学浮力有助于保持克拉通的稳定性,但是单凭化学浮力并不足以使得克拉通岩石圈长期保持稳定<sup>[78,79]</sup>;如果只考虑克拉通岩石圈的化学浮力,那么随着时间演化克拉通根要么在自身重力作用下发生伸展作用,要么逐渐被地幔对流运动侵蚀移除,甚至可能大范围的拆沉再循环进入地幔<sup>[78,80,81]</sup>。而除了化学浮力以外,克拉通岩石圈根相对于软流圈地幔所固有的高强度也有助于克拉通岩石圈根维持较高的稳定性。而且大多数的数值模拟研究都认为,相对于化学浮力而言,克拉通本身的强度(黏性)在克拉通的长期稳定过程中起着更为重要的作用<sup>[78,79,81]</sup>。例如,Leonardic 等<sup>[78]</sup>研究认为如果克拉通岩石圈根和地幔的黏性差异达到 1 000 倍,那么岩石圈根就可以保持稳定超过 3 Ga。进一步研究表明,在克拉通周围存在俯冲构造的背景条件下,即使提高了克拉通岩石圈根的固有黏性(1 000 倍),克拉通岩石圈的厚度也至少需要是周围海洋岩石圈厚度的两倍才能保证克拉通的长期稳定性<sup>[79]</sup>。此外,他们还认为克拉通岩石圈高的脆性屈服强度可以更为有效地帮助维持克拉通的长期稳定性<sup>[79]</sup>。Sleep<sup>[82]</sup>指出当考虑较弱的和温度相关黏性结构的情况下,克拉通岩石圈的固有黏性(脱水引起)只需要提高 20 倍就可以保证克拉通稳定。Beuchert 等<sup>[83]</sup>则认为当和温度

相关黏性结构引起的黏性差异足够高的话( $10^7 \sim 10^{10}$ ),即使没有任何的化学组分浮力,克拉通岩石圈也可以保持长期稳定。这些数值模拟工作为进一步研究克拉通的破坏过程提供了良好的认识基础。

拆沉和热(化学)侵蚀作为最早被关注的两种华北克拉通破坏机制,自然也成为了数值模拟研究的主要出发点。乔彦超等<sup>[84]</sup>通过二维数值模型论证了下地壳榴辉岩重力失稳引起岩石圈大规模减薄的可能性。结果显示,中生代华北克拉通岩石圈受挤压增厚,下地壳玄武岩相变为密度较大的榴辉岩,榴辉岩重力失稳能够引起下地壳的拆沉,而且在拆沉减薄过程中,拆沉中心区域两侧出现两个减薄伸展区域,与华北克拉通岩浆分布规律比较符合。程华东等<sup>[85]</sup>则对下地壳榴辉岩的拆沉过程和拆沉时间进行了量化的研究。通过对下地壳榴辉岩的黏性、密度、总体规模和岩石圈地幔黏性等参数影响的分析发现,下地壳榴辉岩的重力不稳定性可以使得它与其下稳定的岩石圈一起发生拆沉,拆沉过程持续时间和以上参数密切相关;岩石圈地幔的黏性对拆沉时间有着更重要的影响,岩石圈地幔黏性的降低可促进下地壳榴辉岩的拆沉,而且拆沉时间可以缩短到几个到十几个百万年尺度。Wang 等<sup>[86]</sup>对不同流变性条件下克拉通岩石圈的重力失稳过程进行了细致的研究(图 4),结果发现,在非牛顿流变条件下,岩石圈的不稳定过程表现为分期、多阶段的特征,整个破坏过程持续时间可长达约 100 Ma,这与华北克拉通破坏过程中岩浆活动幕式分布、长持续时间等特征相吻合;数值模拟结果还显示,重力失稳过程中克拉通岩石圈地幔被显著加热以及弱化,这

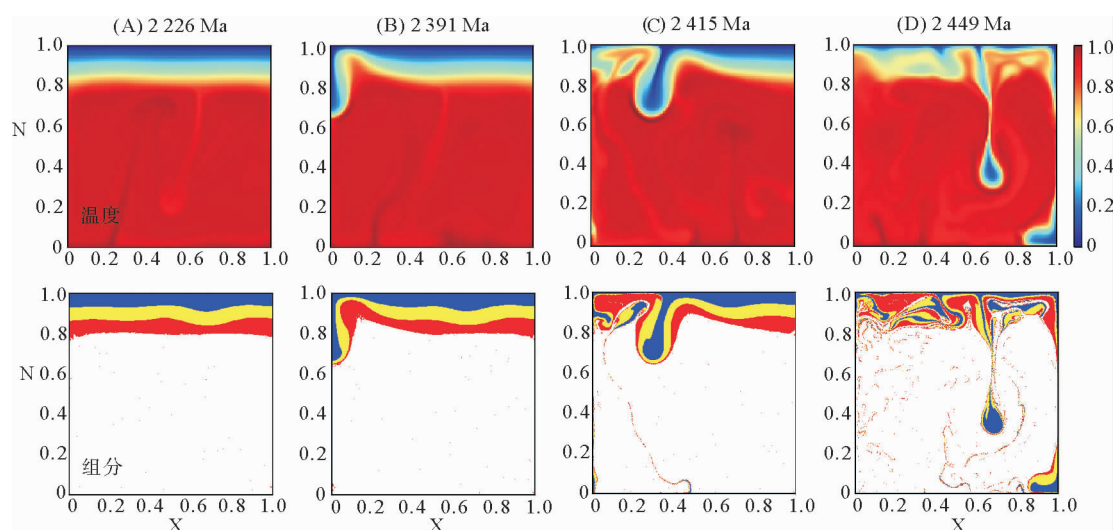


图 4 克拉通岩石圈在非牛顿流变条件下重力失稳过程的动力学演化特征(据文献<sup>[86]</sup>)

Fig. 4 Dynamic characteristics of gravitational instabilities of the cratonic lithosphere with non-Newtonian rheology (from reference<sup>[86]</sup>)

为下地壳榴辉岩能够在破坏早期过程就拆沉进入地幔提供了可能性;此外拆沉进入地幔的克拉通岩石圈物质在一定条件下还可能重新回到岩石圈层,并与上升进入岩石圈的软流圈物质相混合,从而解释了华北克拉通新生代捕虏体中古老的克拉通地幔与新生的海洋型岩石圈地幔并存的地球化学观测<sup>[87]</sup>。在进一步的工作中,Wang等<sup>[88]</sup>以华北克拉通东西部残余地形和热流特征作为约束,结合数值模拟结果发现,在克拉通岩石圈失稳以后200 Ma时仍然有大约20%~50%的古老岩石圈地幔物质还保留在岩石圈层,但是由于在破坏过程中这些残留的岩石圈物质在很大程度上被搅拌并与上涌的软流圈物质混合了,因此在现今的橄榄岩捕虏体中很难发现原始的克拉通地幔成分。

除了以上从拆沉角度开展的数值模拟工作以外,另外一些研究者则从热-化学侵蚀角度开展了一系列的数值模拟工作。乔彦超等<sup>[89]</sup>研究了岩石圈的热侵蚀过程,并提出小尺度地幔对流的加剧可以使得原本稳定的岩石圈减薄80~100 km,与华北克拉通观测结果相符合;岩石圈减薄速率基本在毫米每年的量级,减薄的时间尺度在十几个百万年。程华冬等<sup>[90]</sup>利用二维有限元模拟方法研究了增厚的克拉通岩石圈的对流减薄过程,并且讨论了多个控制参数对模型演化的影响,包括增厚岩石圈的宽度和厚度、化学组分差异导致的黏性和密度差异等(图5)。结果显示,岩石圈的减薄时间受组分密度变化和增厚宽度影响不大,组分密度差异的增大会延长对流移除时间,但幅度有限,只有100 Ma量级;而

组分黏性差和增厚厚度,特别是黏性差对减薄时间尺度有显著影响,对流移除时间随着组分黏性差的增大可以从几百个Ma急速增加到几个Ga。对比华北克拉通的实际观测证据,作者认为要使得华北克拉通200 km厚的岩石圈在140 Ma内减薄到120 km,需要熔融、交代和水化等作用过程来有效地降低克拉通岩石圈的黏性和密度才能实现<sup>[90]</sup>。

随着太平洋板块俯冲对华北克拉通破坏过程认识的逐渐加强,越来越多的研究也逐渐将板块俯冲过程引入到克拉通破坏的数值模拟研究当中。为了研究华北克拉通破坏的热源问题,He<sup>[91]</sup>提出了一个包含克拉通初始稳定状态、大地幔楔的形成以及活跃地幔对流三部分的二维数值模型(图6)。模拟结果显示,板块俯冲过程本身难以减薄厚而冷的固体克拉通岩石圈,但是可以促进低黏性大地幔楔的形成。地幔对流随着大地幔楔内地幔黏度的降低而逐渐加强,从而压缩、减薄岩石圈底部的流变边界层,导致岩石圈底部形成异常高的地温梯度。在此过程中,克拉通岩石圈原有的热平衡状态被打破,岩石圈被地幔对流加热侵蚀并减薄,并且随着流变边界层的不断减薄,地幔对流对岩石圈的侵蚀作用逐渐增强。与此同时,停滞板块所释放的流体不仅会造成地幔黏度的降低,还会因橄榄岩-熔体相互作用造成岩石圈熔点的降低,橄榄岩-熔体相互作用会加快岩石圈破坏早期的减薄速率。该模型显示,在俯冲板块形成的大地幔楔内,在地幔对流与橄榄岩-熔体相互作用的共同作用下,克拉通有可能在短时间(几十个百万年)内迅速减薄。

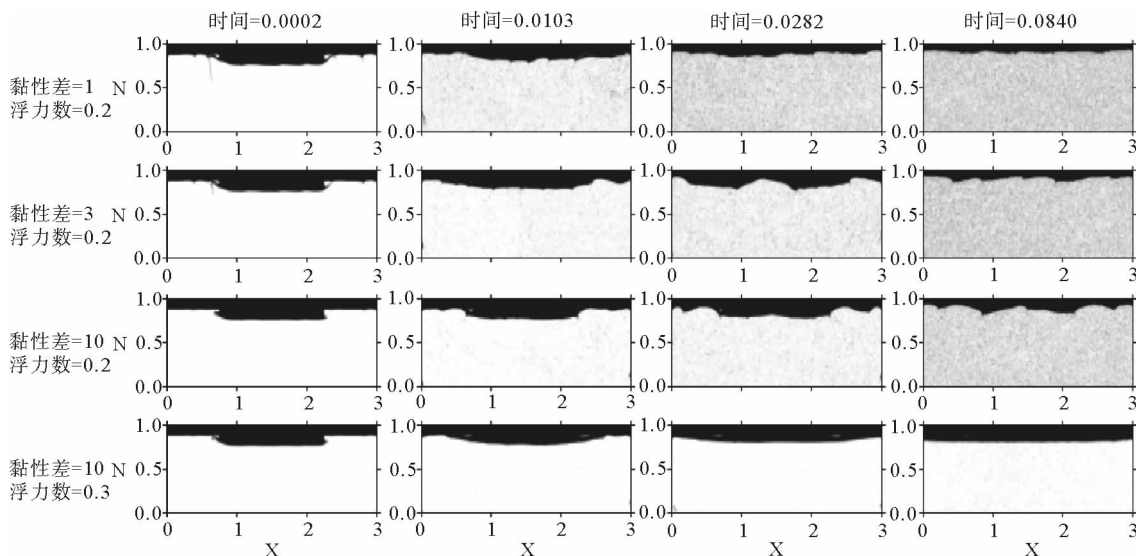


图5 不同控制参数下加厚克拉通岩石圈的对流减薄过程(据文献<sup>[90]</sup>)

Fig. 5 Convective thinning process of thickened cratonic lithosphere with different controlling parameters (from reference <sup>[90]</sup>)

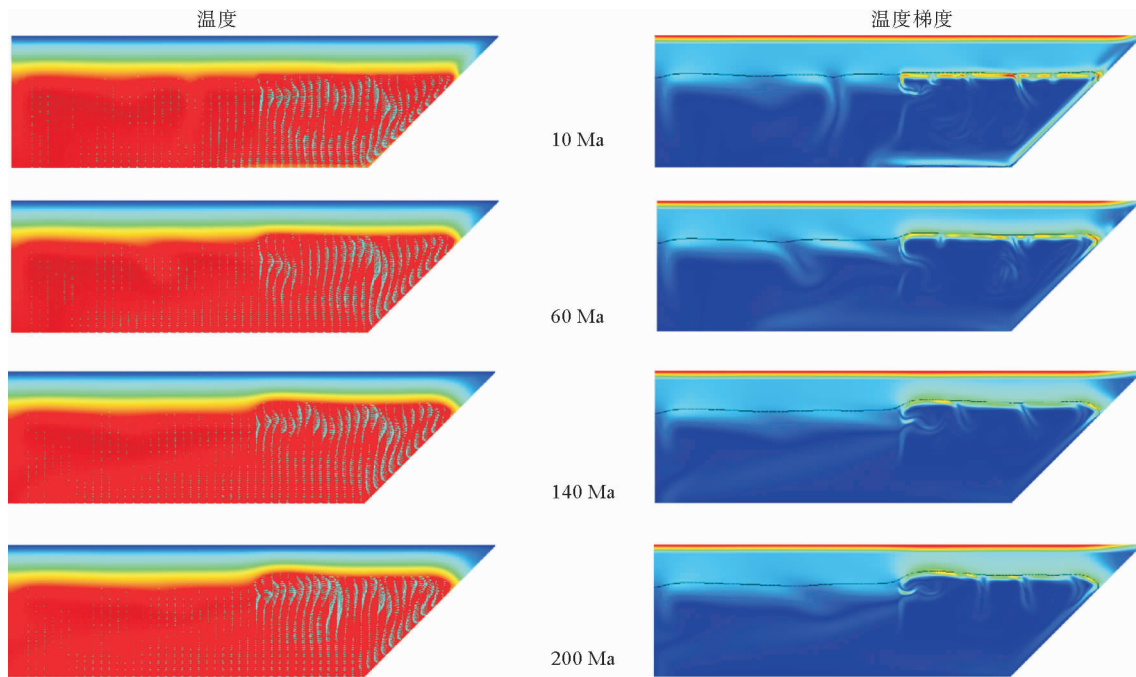


图 6 大地幔楔内对流侵蚀引起的克拉通岩石圈减薄(据文献[91])

Fig. 6 Lithospheric thinning due to convective erosion in a big mantle wedge (from reference [91])

Wang 等<sup>[92]</sup>则重点讨论了水化作用在克拉通岩石圈减薄中的作用(图 7)。他们的研究认为,克拉通地区快速、大规模的岩石圈减薄过程是和水化作

用导致的岩石圈弱化密切相关的,其中水主要是来源于先前水化了的地幔转换带而不是来自于某一个俯冲板片所携带的水。在Izanagi板块向中国东部

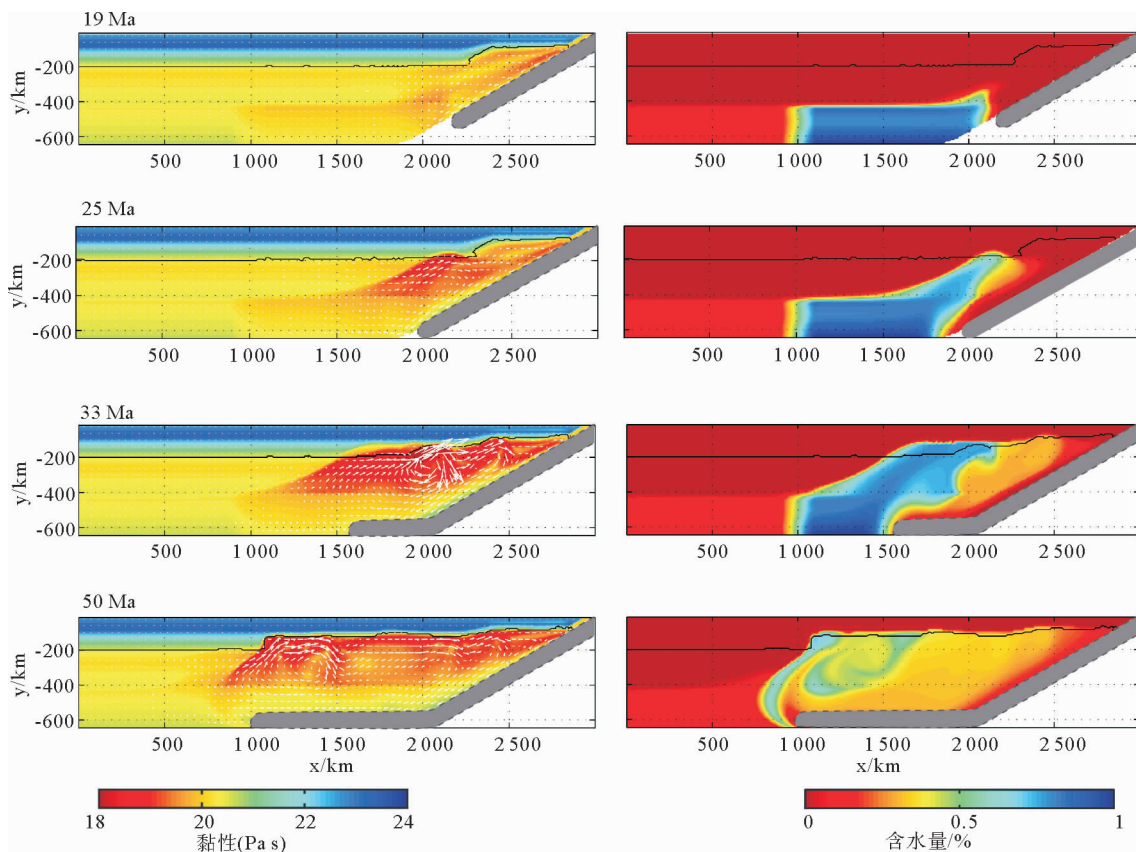


图 7 板块俯冲引起地幔转换带脱水造成岩石圈减薄(据文献[92])

Fig. 7 Lithospheric thinning induced by subduction-triggered dehydration of mantle transition zone (from reference [92])

俯冲之前,在这一地区发生了一系列的大洋闭合,包括古亚洲洋和古特提斯洋的闭合,这些地质过程造成大量大洋板片俯冲进入下地幔,从而造成了大量的水进入地幔转换带;随后 Izanagi 板块向中国东部下面俯冲滞留在地幔转换带,从而扰动富水的地幔转换带使得水进入岩石圈,造成岩石圈弱化,小尺度地幔对流作用加强,对应着华北克拉通在中生代(135~115 Ma)被强烈减薄破坏。Yang 等<sup>[93]</sup>最新的数值模拟研究则显示,冷的板块俯冲携带大量水进入地幔转换带,俯冲板块引起含水地幔上涌并造成部分熔融,随后形成的有浮力的熔体渗透到克拉通底部,最终形成包含岩石圈地幔、软流圈以及大洋地壳来源的混合岩浆源区,从而解释了华北地区 90~40 Ma 岩石的地球化学特征。

除了以上的数值模拟研究以外,还有一些研究者从另外的角度探讨了华北克拉通破坏的动力学机制。例如,Liu 等<sup>[94]</sup>结合地震层析成像研究发现,从青藏高原到中国东部存在着一系列连续的低速、低黏的软流圈地幔结构。结合数值模拟研究表明,由于这一低黏度软流圈的存在,印度-欧亚碰撞带地区过去 50 Ma 以来持续的物质注入很可能造成了软流圈地幔大规模的侧向挤出,软流圈物质向中国东部扩散并在边缘处上涌,进而造成裂谷以及新生代广泛的岩浆活动,导致华北克拉通破坏。吕刚等<sup>[95]</sup>通过对伸展条件下地壳黏度分层结构对变质核杂岩的成因的研究发现,变质核杂岩的形成和上、下地壳的强度有密切关系,对于通常具有强上地壳的克拉通地区,下地壳弱化是变质核杂岩形成的必要条件。Wang 等<sup>[96]</sup>利用黏性薄片模型模拟了华北板块中生代时期的构造演化过程,并提出这一时期的构造演化过程可以概括为两个阶段:第一个阶段是三叠纪时期华北-华南板块碰撞所引起的南北向缩短,第二个阶段是晚中生代形成一系列盆地系统的东西向伸展。这一伸展作用是由于区域应力状态的改变所引发的,而引起区域应力状态改变的可能因素有两个:地壳汇聚引起的岩石圈重力不稳定性造成加厚的岩石圈地幔被移除缺失,从而引起岩石圈的重力势能快速增加;俯冲的太平洋板块的板片回卷作用造成华北东部边界的约束应力发生改变,造成东西向的侧向应力充分降低从而激活伸展作用。

## 5 展望

目前针对华北克拉通破坏的动力学机制问题已经开展了一系列卓有成效的数值模拟工作,也使得

对克拉通破坏的动力学机制有了更为深入的认识。克拉通岩石圈本身固有的物理和化学性质(例如流变特性、化学浮力)的改变在克拉通稳定和破坏过程中起着相当重要的作用,而板块构造运动引起的俯冲脱水、岩石圈弱化、地幔对流增强等效应在克拉通岩石圈的失稳过程中也扮演着不可或缺的角色。但是需要指出的是,目前的数值模拟工作还存在很多的局限性,还有很多问题需要开展进一步深入、细致的工作:

(1)目前的数值模拟大多采用二维模型进行研究。尽管二维模型在一定程度上能够体现三维运动的某些特征,但是三维结构带来的几何结构变化对于地幔对流以及板块俯冲等过程还是会造成明显的影响。最近的三维大洋俯冲带的数值模型揭示了俯冲板块中部和侧向边缘的不同动力学特征<sup>[97]</sup>。例如,三维板块旋回效应的存在会使得板块下方地幔会流向俯冲板块上表面附近,从而导致俯冲板块上表面中心温度较高;反之则是俯冲板块的边界温度较高<sup>[98,99]</sup>。而对于华北克拉通而言,不仅克拉通东西部存在明显的差异性,即便是在破坏的东部也存在明显的空间差异性<sup>[44,62]</sup>,表现出明显的三维特征,因此建立三维模型研究克拉通破坏的动力学过程是非常有必要的。

(2)数值模拟研究已经表明,岩石圈的流变强度是影响克拉通稳定性的重要因素。对上地幔的地震波各向异性研究表明,上地幔岩石的形变机制主要分为两种:以牛顿流体性质为特征的扩散蠕变特性以及以非牛顿流体性质为特征的位错蠕变特性<sup>[100,101]</sup>。对橄榄石的岩石物理实验表明,岩石的黏性流变强度和众多因素相关,包括温度、压强、组分、水含量、应力、晶粒大小等<sup>[102]</sup>。此外,岩石圈浅部还会表现出一定的弹性和塑性特征。而数值模拟研究也发现,在不同的流变条件下,无论是地幔对流还是板块俯冲等过程会表现出不同的动力学特征<sup>[86,103-105]</sup>。例如,相对于常黏性流体,变黏性流变结构对于地幔对流尤其是地幔楔中流体的流动状态有着很大的影响<sup>[106]</sup>。上覆板块的流变特性对于俯冲过程中海沟发生后撤或者是前进、平板俯冲是否会出现、俯冲板片进入地幔的角度和形态以及是否能够进入下地幔等过程都有着重要的影响<sup>[107]</sup>。而目前对于华北克拉通破坏开展的数值模拟工作中,大多采用了比较简单或者简化了的黏性结构。因此,在下一步的数值模拟工作中还需要考虑更为实际、复杂的岩石流变特性,结合岩石物理实验以及地球物理学所能给出的约束,完善数值模型,从而使得



数值模拟能够捕捉到更多的动力学演化特征。

(3)前人的数值模拟工作中有一些已经开始考虑板块俯冲的影响<sup>[91-93]</sup>,但是需要指出的是,目前这些模型中对于板块俯冲的设置还是相对简化的,例如俯冲板块大多设置为以固定的位置、角度和速度向地幔下俯冲,而且模型大多限制在上地幔区域(660 km 以上)<sup>[91,92]</sup>。而实际上板块俯冲的演化过程是随时间变化的,包括海沟的位置、俯冲板块的速度以及板块进入地幔以后的角度等<sup>[107]</sup>,另外俯冲板块进入地幔以后,也有可能穿过 660 km 不连续面进入下地幔。这些都将直接影响板块俯冲对地幔对流状态的改变。这就使得我们需要在数值模拟过程中考虑更为符合实际的板块运动历史。板块重建一般是通过板块构造模型来构建基准图,以特定时间和现今海岸线轮廓为基础描绘板块边界(缝合线)、被动大陆边缘、转换断层、洋中脊及板块位置,综合现有的全球和区域古地理图,以及近年来逐渐丰富的全球岩相和古环境、古地磁、古生物、岩石地球化学、同位素地球化学、高精度年代学等数据库信息,最终汇集重建板块的运动历史<sup>[108]</sup>。随着板块重建技术的不断发展,我们对于板块的运动历史以及俯冲带的历史都有了更加深入的了解,这也为我们完善数值模型提供了更多的地质约束条件。

(4)目前的数值模型大多是从单一的破坏机制角度出发,有的只考虑热(化学)侵蚀过程<sup>[89,90]</sup>,有的只侧重于拆沉<sup>[84-86]</sup>,有的则只考虑水化作用<sup>[92]</sup>。而从目前的多学科观测证据来看,华北克拉通破坏很可能是多个破坏过程共同作用的结果<sup>[44,62]</sup>。例如在华北克拉通边缘地区很可能是以拆沉破坏为主,而在华北内部则是以热侵蚀破坏为主<sup>[44,45]</sup>(图 3)。华北克拉通经历过多个板块的俯冲作用(特提斯洋俯冲、古亚洲洋俯冲、古太平洋俯冲),这些板块俯冲过程将大量的水带入地幔中,尤其是古太平洋板块的俯冲脱水,致使华北克拉通东部岩石圈遭受强烈的水化和弱化,岩石圈强度大幅降低,同时地幔对流系统状态发生改变,继而在华北克拉通东部引发一系列拆沉、热侵蚀、熔体交代等破坏过程<sup>[44]</sup>。如何将不同的动力学过程有机地结合到一起,是未来数值模拟研究华北克拉通破坏动力学机制的一个发展方向。

### 参考文献(References)

- [1] Artemieva I M, Mooney W D. Thermal thickness and evolution of Precambrian lithosphere: a global study[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(B8): 16387-16414.
- [2] Nyblade A A, Pollack H N. A global analysis of heat flow from precambrian terrains: implications for the thermal structure of archean and proterozoic lithosphere[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1993, 98(B7): 12207-12218.
- [3] James D E, Fouch M J, VanDecar J C, et al. Tectospheric structure beneath southern Africa[J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(13): 2485-2488.
- [4] Lee C T A. Geochemical/petrologic constraints on the origin of cratonic mantle[M]//Benn K, Mareschal J C, Condie K C. *Archean Geodynamics and Environments*. Washington, DC: American Geophysical Union, 2006: 89-114.
- [5] Pollack H N, Hurter S J, Johnson J R. Heat flow from the Earth's interior: analysis of the global data set[J]. *Reviews of Geophysics*, 1993, 31(3): 267-280.
- [6] Carlson R W, Pearson D G, James D E. Physical, chemical, and chronological characteristics of continental mantle[J]. *Reviews of Geophysics*, 2005, 43(1), doi: 10.1029/2004RG000156.
- [7] Lee C T A, Luffi P, Chin E J. Building and destroying continental mantle[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2011, 39(1): 59-90.
- [8] Liu D Y, Nutman A P, Compston W, et al. Remnants of  $\geq 3800$  Ma crust in the Chinese part of the sino-korean craton[J]. *Geology*, 1992, 20(4): 339-342.
- [9] Menzies M, Xu Y G, Zhang H F, et al. Integration of geology, geophysics and geochemistry: a key to understanding the North China Craton[J]. *Lithos*, 2007, 96(1-2): 1-21.
- [10] Li S Z, Zhao S J, Liu X, et al. Closure of the Proto-Tethys Ocean and Early Paleozoic amalgamation of microcontinental blocks in East Asia[J]. *Earth-Science Reviews*, 2017, doi: 10.1016/j.earscirev.2017.01.011.
- [11] Liu Y S, Gao S, Yuan H L, et al. U-Pb zircon ages and Nd, Sr, and Pb isotopes of lower crustal xenoliths from North China Craton: insights on evolution of lower continental crust[J]. *Chemical Geology*, 2004, 211(1-2): 87-109.
- [12] Qiu Y M, Gao S, McNaughton N J, et al. First evidence of  $>3.2$  Ga continental crust in the Yangtze craton of South China and its implications for Archean crustal evolution and Phanerozoic tectonics[J]. *Geology*, 2000, 28(1): 11-14.
- [13] Gao S, Rudnick R L, Carlson R W, et al. Re-Os evidence for replacement of ancient mantle lithosphere beneath the North China craton[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 198(3-4): 307-322.
- [14] Wu F Y, Walker R J, Yang Y H, et al. The chemical-temporal evolution of lithospheric mantle underlying the North China Craton[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, 70(19): 5013-5034.
- [15] Zhang H F, Goldstein S L, Zhou X H, et al. Evolution of subcontinental lithospheric mantle beneath eastern China: Re-Os isotopic evidence from mantle xenoliths in Paleozoic kimberlites and Mesozoic basalts[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2008, 155(3): 271-293.

[1] Artemieva I M, Mooney W D. Thermal thickness and evolution of Precambrian lithosphere: a global study[J]. *Journal of*

- [16] Wu F Y, Walker R J, Ren X W, et al. Osmium isotopic constraints on the age of lithospheric mantle beneath northeastern China[J]. *Chemical Geology*, 2003, 196(1-4): 107-129.
- [17] Griffin W L, Andi Z, O'Reilly S Y, et al. Phanerozoic evolution of the lithosphere beneath the Sino-Korean Craton[M]// Flower M F J, Chung S L, Lo C H, et al. *Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia*. Washington, DC: American Geophysical Union, 1998: 107-126.
- [18] 郑建平, 路凤香. 胶辽半岛金伯利岩中地幔捕虏体岩石学特征: 古生代岩石圈地幔及其不均一性[J]. *岩石学报*, 1999, 15(1): 65-74. [ZHENG Jianping, LU Fengxiang. Mantle xenoliths from kimberlites, Shandong and Liaoning: paleozoic mantle character and its heterogeneity[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1999, 15(1): 65-74.]
- [19] Fan Q C, Hooper P R. The mineral chemistry of ultramafic xenoliths of Eastern China: implications for upper mantle composition and the paleogeotherms[J]. *Journal of Petrology*, 1989, 30(5): 1117-1158.
- [20] Fan W M, Zhang H F, Baker J, et al. On and off the North China craton: where is the Archaean keel? [J]. *Journal of Petrology*, 2000, 41(7): 933-950.
- [21] Zheng J P, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. A refractory mantle protolith in younger continental crust, east-central China: age and composition of zircon in the Sulu ultrahigh-pressure peridotite[J]. *Geology*, 2006, 34(9): 705-708.
- [22] Zheng J P, Sun M, Griffin W L, et al. Age and geochemistry of contrasting peridotite types in the Dabie UHP belt, eastern China: petrogenetic and geodynamic implications[J]. *Chemical Geology*, 2008, 247(1-2): 282-304.
- [23] 吴福元, 葛文春, 孙德有, 等. 中国东部岩石圈减薄研究中的几个问题[J]. *地学前缘*, 2003, 10(3): 51-60. [WU Fuyuan, GE Wenchun, SUN Deyou, et al. Discussions on the lithospheric thinning in eastern China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10(3): 51-60.]
- [24] 郑建平, 路凤香, 余淳梅, 等. 华北东部橄辉岩岩石学特征及其岩石圈地幔演化意义[J]. *地球科学-中国地质大学学报*, 2006, 31(1): 49-56. [ZHENG Jianping, LU Fengxiang, YU Chunmei, et al. Peridotitic petrochemistry of the eastern North China: significance for lithospheric mantle evolution [J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2006, 31(1): 49-56.]
- [25] Xu Y G. Thermo-tectonic destruction of the archaean lithospheric keel beneath the sino-Korean craton in China: evidence, timing and mechanism[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 2001, 26(9-10): 747-757.
- [26] Menzies M A, Xu Y G. Geodynamics of the North China craton[M]//Flower M F J, Chung S L, Lo C H, et al. *Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia*. Washington, DC: American Geophysical Union, 1998: 155-165.
- [27] Chen L. Lithospheric structure variations between the eastern and central North China Craton from S- and P-receiver function migration[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2009, 173(3-4): 216-227.
- [28] Chen L. Concordant structural variations from the surface to the base of the upper mantle in the North China Craton and its tectonic implications[J]. *Lithos*, 2010, 120(1-2): 96-115.
- [29] Chen L, Tao W, Zhao L, et al. Distinct lateral variation of lithospheric thickness in the northeastern North China Craton [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 267(1-2): 56-68.
- [30] Zheng T Y, Chen L, Zhao L, et al. Crust-mantle structure difference across the gravity gradient zone in North China Craton; seismic image of the thinned continental crust[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2006, 159(1-2): 43-58.
- [31] Zheng T Y, Chen L, Zhao L, et al. Crustal structure across the Yanshan belt at the northern margin of the North China Craton[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2007, 161(1-2): 36-49.
- [32] Zheng T Y, Zhao L, Xu W W, et al. Insight into modification of North China Craton from seismological study in the Shandong Province[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(22), doi: 10.1029/2008GL035661.
- [33] Zheng T Y, Zhao L, Zhu R X. Insight into the geodynamics of cratonic reactivation from seismic analysis of the crust-mantle boundary[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(8), doi: 10.1029/2008GL033439.
- [34] Huang J L, Zhao D P. Seismic imaging of the crust and upper mantle under Beijing and surrounding regions[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2009, 173(3-4): 330-348.
- [35] Xu P F, Zhao D P. Upper-mantle velocity structure beneath the North China Craton: implications for lithospheric thinning[J]. *Geophysical Journal International*, 2009, 177(3): 1279-1283.
- [36] Zhu G, Liu G S, Niu M L, et al. Syn-collisional transform faulting of the Tan-Lu fault zone, East China[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2009, 98(1): 135-155.
- [37] Zhu G, Niu M L, Xie C L, et al. Sinistral to normal faulting along the Tan-Lu fault zone: evidence for geodynamic switching of the East China continental margin[J]. *The Journal of Geology*, 2010, 118(3): 277-293.
- [38] Zhu G, Wang Y S, Liu G S, et al.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating of strike-slip motion on the Tan-Lu fault zone, East China[J]. *Journal of Structural Geology*, 2005, 27(8): 1379-1398.
- [39] Li S Z, Zhao G C, Dai L M, et al. Mesozoic basins in eastern China and their bearing on the deconstruction of the North China Craton[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 47: 64-79.
- [40] Li S Z, Zhao G C, Dai L M, et al. Cenozoic faulting of the Bohai Bay Basin and its bearing on the destruction of the eastern North China Craton[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 47: 80-93.
- [41] 刘俊来, 关会梅, 纪沫, 等. 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[J]. *自然科学进展*, 2006, 16

- (1): 21-26. [LIU Junlai, GUAN Huimei, JI Mo, et al. Tectonic structures of the Late Mesozoic metamorphic core complex in North China and its constraints on mechanisms of lithospheric thinning[J]. *Progress in Natural Science*, 2006, 16(1): 21-26.]
- [42] 李三忠, 张国伟, 周立宏, 等. 中、新生代超级汇聚背景下的陆内差异变形: 华北伸展裂解和华南挤压逆冲[J]. *地学前缘*, 2011, 18(3): 79-107. [LI Sanzhong, ZHANG Guowei, ZHOU Lihong, et al. The opposite Meso-Cenozoic intracontinental deformations under the super-convergence: rifting and extension in the North China Craton and shortening and thrusting in the South China Craton[J]. *Earth Science Frontiers*, 2011, 18(3): 79-107.]
- [43] 李三忠, 索艳慧, 戴黎明, 等. 渤海湾盆地形成与华北克拉通破坏[J]. *地学前缘*, 2010, 17(4): 64-89. [LI Sanzhong, SUO Yanhui, DAI Liming, et al. Development of the Bohai Bay Basin and destruction of the North China Craton[J]. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(4): 64-89.]
- [44] 朱日祥, 徐义刚, 朱光, 等. 华北克拉通破坏[J]. *中国科学: 地球科学*, 2012, 42(8): 1135-1159. [ZHU Rixiang, XU Yigang, ZHU Guang, et al. Destruction of the North China craton[J]. *Science China Earth Sciences*, 2012, 55(10): 1565-1587.]
- [45] 吴福元, 徐义刚, 高山, 等. 华北岩石圈减薄与克拉通破坏研究的主要学术争论[J]. *岩石学报*, 2008, 26(6): 1145-1174. [WU Fuyuan, XU Yigang, GAO Shan, et al. Lithospheric thinning and destruction of the North China Craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(6): 1145-1174.]
- [46] 高山, 金振民. 拆沉作用(delamination)及其壳幔演化动力学意义[J]. *地质科技情报*, 1997, 16(1): 1-9. [GAO Shan, JIN Zhenmin. Delamination and its geodynamical significance for the crust-mantle evolution[J]. *Geological Science and Technology Information*, 1997, 16(1): 1-9.]
- [47] 高山, 章军锋, 许文良, 等. 拆沉作用与华北克拉通破坏[J]. *科学通报*, 2009, 54(14): 1962-1973. [GAO Shan, ZHANG Junfeng, XU Wenliang, et al. Delamination and destruction of the North China Craton[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(19): 3367-3378.]
- [48] 徐义刚. 岩石圈的热-机械侵蚀和化学侵蚀与岩石圈减薄[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 1999, 18(1): 1-5. [XU Yigang. Roles of thermo-mechanic and chemical erosion in continental lithospheric thinning[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 1999, 18(1): 1-5.]
- [49] Gao S, Luo T C, Zhang B R, et al. Chemical composition of the continental crust as revealed by studies in East China[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1998, 62(11): 1959-1975.
- [50] 高山, Rudnick R L, Carlson R W, 等. 华北克拉通岩石圈地幔置换作用和壳幔生长耦合的 Re-Os 同位素证据[J]. *地学前缘*, 2003, 10(3): 61-67. [GAO Shan, Rudnick R L, Carlson R W, et al. Removal of lithospheric mantle in the North China Craton: Re-Os isotopic evidence for coupled crust-mantle growth[J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10(3): 61-67.]
- [51] Gao S, Rudnick R L, Xu W L, et al. Recycling deep cratonic lithosphere and generation of intraplate magmatism in the North China Craton[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 270(1-2): 41-53.
- [52] Wu F Y, Lin J Q, Wilde S A, et al. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 233(1-2): 103-119.
- [53] Gao S, Rudnick R L, Yuan H L, et al. Recycling lower continental crust in the North China craton[J]. *Nature*, 2004, 432(7019): 892-897.
- [54] 张宏福. 橄榄岩-熔体相互作用: 克拉通型岩石圈地幔能够被破坏之关键[J]. *科学通报*, 2009, 54(14): 2008-2026. [ZHANG Hongfu. Peridotite-melt interaction: a key point for the destruction of cratonic lithospheric mantle[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(19): 3417-3437.]
- [55] Xia Q K, Liu J, Liu S C, et al. High water content in Mesozoic primitive basalts of the North China Craton and implications on the destruction of cratonic mantle lithosphere[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 361: 85-97.
- [56] Niu Y L. Generation and evolution of basaltic magmas: some basic concepts and a new view on the origin of mesozoic-cenozoic basaltic volcanism in Eastern China[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2005, 11(1): 9-46.
- [57] Ames L, Tilton G R, Zhou G Z. Timing of collision of the sino-Korean and Yangtze cratons: U-Pb zircon dating of coesite-bearing eclogites[J]. *Geology*, 1993, 21(4): 339-342.
- [58] Li S G, Xiao Y L, Liou D L, et al. Collision of the North China and Yangtze blocks and formation of coesite-bearing eclogites: timing and processes[J]. *Chemical Geology*, 1993, 109(1-4): 89-111.
- [59] Kusky T M, Windley B F, Zhai M G. Tectonic evolution of the North China Block: from orogen to craton to orogen [M]//Zhai M G, Windley B F, Kusky T M, et al. *Mesozoic Sub-Continental Lithospheric Thinning under Eastern Asia*. London: Geological Society, Special Publication, 2007, 280: 1-34.
- [60] Xiao W J, Windley B F, Hao J, et al. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: termination of the central Asian orogenic belt[J]. *Tectonics*, 2003, 22(6), doi: 10.1029/2002TC001484.
- [61] Seton M, Müller R D, Zahirovic S, et al. Global continental and ocean basin reconstructions since 200 Ma[J]. *Earth-Science Reviews*, 2012, 113(3-4): 212-270.
- [62] 朱日祥, 陈凌, 吴福元, 等. 华北克拉通破坏的时间、范围与机制[J]. *中国科学: 地球科学*, 2011, 41(5): 583-592. [ZHU Rixiang, CHEN Ling, WU Fuyuan, et al. Timing, scale and mechanism of the destruction of the North China Craton[J]. *Science China Earth Sciences*, 2011, 54(6): 789-797.]
- [63] 朱日祥, 郑天愉. 华北克拉通破坏机制与古元古代板块构造体系[J]. *科学通报*, 2009, 54(14): 1950-1961. [ZHU Rix-

- iang, ZHENG Tianyu. Destruction geodynamics of the North China Craton and its Paleoproterozoic plate tectonics[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(19): 3354-3366.]
- [64] Bartolini A, Larson R L. Pacific microplate and the Pangea supercontinent in the Early to Middle Jurassic[J]. Geology, 2001, 29(8): 735-738.
- [65] Northrup C J, Royden L H, Burchfiel B C. Motion of the Pacific plate relative to Eurasia and its potential relation to Cenozoic extension along the eastern margin of Eurasia[J]. Geology, 1995, 23(8): 719-722.
- [66] Yang J H, Wu F Y, Chung S L, et al. Rapid exhumation and cooling of the Liaonan metamorphic core complex; inferences from  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  thermochronology and implications for Late Mesozoic extension in the eastern North China Craton[J]. Geological Society of America Bulletin, 2007, 119(11-12): 1405-1414.
- [67] Liu J L, Davis G A, Lin Z Y, et al. The Liaonan metamorphic core complex, Southeastern Liaoning Province, North China: a likely contributor to Cretaceous rotation of Eastern Liaoning, Korea and contiguous areas[J]. Tectonophysics, 2005, 407(1-2): 65-80.
- [68] Ren J Y, Tamaki K, Li S T, et al. Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in Eastern China and adjacent areas[J]. Tectonophysics, 2002, 344(3-4): 175-205.
- [69] Sun W D, Ding X, Hu Y H, et al. The golden transformation of the Cretaceous plate subduction in the west Pacific [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2007, 262(3-4): 533-542.
- [70] Yang J H, Wu F Y, Wilde S A. A review of the geodynamic setting of large-scale Late Mesozoic gold mineralization in the North China Craton: an association with lithospheric thinning [J]. Ore Geology Reviews, 2003, 23(3-4): 125-152.
- [71] Huang J L, Zhao D P. High-resolution mantle tomography of China and surrounding regions[J]. Journal of Geophysical Research, 2006, 111(B9), doi: 10.1029/2005JB004066.
- [72] Zhang J J, Zheng Y F, Zhao Z F. Geochemical evidence for interaction between oceanic crust and lithospheric mantle in the origin of Cenozoic continental basalts in east-central China [J]. Lithos, 2009, 110(1-4): 305-326.
- [73] Wang Y, Zhao Z F, Zheng Y F, et al. Geochemical constraints on the nature of mantle source for Cenozoic continental basalts in east-central China[J]. Lithos, 2011, 125(3-4): 940-955.
- [74] Xu Z, Zhao Z F, Zheng Y F. Slab-mantle interaction for thinning of cratonic lithospheric mantle in North China: geochemical evidence from Cenozoic continental basalts in central Shandong[J]. Lithos, 2012, 146-147: 202-217.
- [75] Zhu G, Jiang D Z, Zhang B L, et al. Destruction of the eastern North China Craton in a backarc setting; evidence from crustal deformation kinematics [J]. Gondwana Research, 2012, 22(1): 86-103.
- [76] Jordan T H. Composition and development of the continental tectosphere[J]. Nature, 1978, 274(5671): 544-548.
- [77] Jordan T H. Structure and formation of the continental tectosphere[J]. Journal of Petrology, 1988, S(1): 11-37.
- [78] Lenardic A, Moresi L N. Some thoughts on the stability of cratonic lithosphere; effects of buoyancy and viscosity[J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104(B6): 12747-12758.
- [79] Lenardic A, Moresi L N, Mühlhaus H. Longevity and stability of cratonic lithosphere; insights from numerical simulations of coupled mantle convection and continental tectonics [J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(B6), doi: 10.1029/2002JB001859.
- [80] Doin M P, Fleitout L, Christensen U. Mantle convection and stability of depleted and undepleted continental lithosphere [J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102(B2): 2771-2787.
- [81] Shapiro S S, Hager B H, Jordan T H. Stability and dynamics of the continental tectosphere[J]. Lithos, 1999, 48(1-4): 115-133.
- [82] Sleep N H. Survival of Archean cratonic lithosphere [J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(B6), doi: 10.1029/2001JB000169.
- [83] Beuchert M J, Podladchikov Y Y, Simon N S C, et al. Modeling of craton stability using a viscoelastic rheology [J]. Journal of Geophysical Research, 2010, 115(B11), doi: 10.1029/2009JB006482.
- [84] 乔彦超, 郭子祺, 石耀霖. 数值模拟华北克拉通岩石圈减薄的一种可能机制——下地壳榴辉岩重力失稳引起的拆沉 [J]. 地球物理学报, 2012, 55(12): 4249-4256. [QIAO Yanchao, GUO Ziqi, SHI Yaolin. Numerical simulation of a possible thinning mechanism of the North China Craton-Gravitational instability delamination induced by lower crust eclogite[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(12): 4249-4256.]
- [85] 程华冬, 黄金水. 榴辉岩下地壳拆沉的数值模拟[J]. 中国科学: 地球科学, 2017, 47(1): 82-94. [CHENG Huadong, HUANG Jinshui. Numerical simulation on the detachment of eclogitic lower crust[J]. Science China: Earth Sciences, 2017, 47(1): 82-94.]
- [86] Wang Y M, Huang J S, Zhong S J. Episodic and multistaged gravitational instability of cratonic lithosphere and its implications for reactivation of the North China Craton [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2015, 16(3): 815-833.
- [87] Zheng J P, O'Reilly S Y, Griffin W L, et al. Relict refractory mantle beneath the eastern North China block: significance for lithosphere evolution[J]. Lithos, 2001, 57(1): 43-66.
- [88] Wang Y M, Huang J S, Zhong S J, et al. Heat flux and topography constraints on thermochemical structure below North China Craton regions and implications for evolution of cratonic lithosphere [J]. Journal of Geophysical Research, 2016, 121(4): 3081-3098.
- [89] 乔彦超, 郭子祺, 石耀霖. 数值模拟华北克拉通岩石圈热对流侵蚀减薄机制 [J]. 中国科学: 地球科学, 2013, 43(4): 642-652. [QIAO Yanchao, GUO Ziqi, SHI Yaolin. Thermal

- convection thinning of the North China Craton: numerical simulation[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2013, 56(5): 773-782. ]
- [90] 程华冬, 黄金水, 傅容珊. 克拉通岩石圈对流减薄的数值模拟[J]. *地球物理学报*, 2016, 59(4): 1293-1308. [CHENG Huadong, HUANG Jinshui, FU Rongshan. Numerical simulation on convective thinning of the cratonic lithosphere[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 59(4): 1293-1308. ]
- [91] He L J. Numerical modeling of convective erosion and peridotite-melt interaction in big mantle wedge: implications for the destruction of the North China Craton[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2014, 119(4): 3662-3677.
- [92] Wang Z S, Kusky T M, Capitanio F A. Lithosphere thinning induced by slab penetration into a hydrous mantle transition zone[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43 (22): 11567-11577.
- [93] Yang J F, Zhao L, Kaus B J P, et al. Slab-triggered wet upwellings produce large volumes of melt: Insights into the destruction of the North China Craton[J]. *Tectonophysics*, 2017, doi: 10.1016/j.tecto.2017.04.009.
- [94] Liu M, Cui X J, Liu F T. Cenozoic rifting and volcanism in eastern China: a mantle dynamic link to the Indo-Asian collision? [J]. *Tectonophysics*, 2004, 393(1-4): 29-42.
- [95] 吕刚, 赵亮, 郑天榆, 等. 变质核杂岩形成的关键条件及其对华北克拉通破坏过程的约束: 数值模拟研究[J]. *中国科学: 地球科学*, 2016, 46(9): 1278-1290. [LV Gang, ZHAO Liang, ZHENG Tianyu, et al. Determining the key conditions for the formation of metamorphic core complexes by geodynamic modeling and insights into the destruction of North China Craton[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2016, 59(9): 1873-1884. ]
- [96] Wang Y H, Houseman G A, Lin G, et al. Mesozoic lithospheric deformation in the North China block: numerical simulation of evolution from orogenic belt to extensional basin system[J]. *Tectonophysics*, 2005, 405(1-4): 47-63.
- [97] Schellart W P, Stegman D R, Farrington R J, et al. Influence of lateral slab edge distance on plate velocity, trench velocity, and subduction partitioning[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116 ( B10 ), doi: 10.1029/2011JB008535.
- [98] Kincaid C, Griffiths R W. Variability in flow and temperatures within mantle subduction zones[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2004, 5 ( 6 ), doi: 10.1029/2003GC000666.
- [99] Kincaid C, Griffiths R W. Laboratory models of the thermal evolution of the mantle during rollback subduction[J]. *Nature*, 2003, 425(6953): 58-62.
- [100] Karato S I, Wu P. Rheology of the upper mantle: a synthesis[J]. *Science*, 1993, 260(5109): 771-778.
- [101] Zhang S Q, Karato S I. Lattice preferred orientation of olivine aggregates deformed in simple shear[J]. *Nature*, 1995, 375(6534): 774-777.
- [102] Hirth G, Kohlstedt D. Rheology of the upper mantle and the mantle wedge: a view from the experimentalists[M]// Eiler J. *Inside the Subduction Factory*. Washington, DC: American Geophysical Union, 2004: 83-105.
- [103] van den berg A P, van Keken P E, Yuen D A. The effects of a composite non-newtonian and newtonian rheology on mantle convection[J]. *Geophysical Journal International*, 1993, 115(1): 62-78.
- [104] Zhong S J, Gurnis M. Interaction of weak faults and non-newtonian rheology produces plate tectonics in a 3D model of mantle flow[J]. *Nature*, 1996, 383(6597): 245-247.
- [105] Zhong S J, Gurnis M, Moresi L. Role of faults, nonlinear rheology, and viscosity structure in generating plates from instantaneous mantle flow models[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(B7): 15255-15268.
- [106] van Keken P E, Kiefer B, Peacock S M. High-resolution models of subduction zones: Implications for mineral dehydration reactions and the transport of water into the deep mantle[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2002, 3(10), doi: 10.1029/2001GC000256.
- [107] Sharples W, Jadamec M A, Moresi L N, et al. Overriding plate controls on subduction evolution[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2014, 119(8): 6684-6704.
- [108] 余珊, 李三忠, 索艳慧, 等. 全球三维古地理重建及其地质意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2013, 33(6): 147-163. [YU Shan, LI Sanzhong, SUO Yanhui, et al. Global 3D paleogeographic reconstruction and its geological implications[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2013, 33(6): 147-163. ]

## DESTRUCTION MECHANISMS OF THE NORTH CHINA CRATON: A REVIEW FROM NUMERICAL SIMULATIONS

WANG Yongming<sup>1,2</sup>, LI Sanzhong<sup>1,2</sup>, LI Xiyao<sup>1,2</sup>, DAI Liming<sup>1,2</sup>

(1. Key Lab of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, MOE, College of Marine Geosciences,  
Ocean University of China, Qingdao 266100, China

2. Laboratory for Marine Geology, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China)

**Abstract:** The North China Craton (NCC) is a typical destroyed craton in China. In the past decades, a number of evidence from geophysical, geochemical and geological studies have proved that the eastern part of the NCC had been significantly destroyed or reactivated in Mesozoic and Cenozoic, indicated by extensive magmatic activities, large-scale tectonic deformation and lithospheric thinning. The dynamic process of the destruction of the NCC has been a hot issue in earth sciences and still remained in debate. Meantime, numerical simulation has become a powerful mean to reveal the mechanism of the destruction of the NCC. Numerical simulations of NCC destruction have been carried out from the perspectives of delamination, thermal-chemical erosion, subduction dehydration and metasomatism, that have provide model support to various geophysical, geochemical or geological interpretations and helps to understand better of the mechanism of the NCC destruction. However, it has to be pointed out that the destruction of the NCC is quite complicated and the current models are mostly too simplified to satisfy researchers because of too many limitations. To fully understand the destruction mechanism and dynamic processes of the NCC, some of the following perspectives need to be taken into account: (1) turn the simulation from 2-D to 3-D models, (2) take more realistic rheologic properties of mantle rocks into account, (3) geological constraints such as plate history be fully considered in plate reconstructions, (4) dynamic couplings of delamination, thermal-chemical erosion and subduction dehydration be undertaken.

**Key words:** craton destruction; dynamical mechanism; numerical simulations; North China Craton