中国科学: 地球科学 2012 年 第 42 卷 第 8 期: 1135 ~ 1159
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

自然科学基金项目进展专栏

评 述

华北克拉通破坏

朱日祥[①*], 徐义刚[②], 朱光[③], 张宏福[①], 夏群科[④], 郑天愉[①]

① 中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室, 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 合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥 230009;
④ 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026
* E-mail: rxzhu@mail.igcas.ac.cn

收稿日期: 2012-03-27; 接受日期: 2012-06-18
国家自然科学基金委《华北克拉通破坏》重大研究计划(批准号: 90714001, 90714004, 90714008, 90714009, 91014006, 91114206)资助

摘要 《华北克拉通破坏》重大研究计划, 围绕克拉通破坏的时空范围、克拉通破坏的浅部效应和深部结构响应、克拉通破坏的动力学机制等核心科学问题, 开展了系统与深入的探测、测试与研究. 计划执行四年来的重要研究进展包括: (1) 发现华北克拉通岩石圈厚度以及地壳-上地幔结构存在显著的空间差异, 确定了华北克拉通破坏的时空范围; (2) 厘定了华北克拉通古生代、中生代、新生代岩石圈的属性, 发现了晚中生代华北克拉通岩石圈地幔富水而新生代岩石圈地幔贫水的特征; (3) 根据岩浆作用和浅部地质响应的相关性, 证实了地表地质构造受控于克拉通破坏的深部过程; (4) 发现太平洋板块俯冲是华北克拉通破坏的主要动力因素的证据, 揭示了华北克拉通破坏在板块构造体系中的科学意义.

关键词
重大研究计划
研究进展
克拉通破坏
华北

地球是太阳系中充满活力的子系统, 在持续的变动中生存了 46 亿年. 地球科学家们从物质、运动、化学变化、物理场、地质构造各种角度探测人类赖以生存的地球, 不断寻找她的行为规律. 20 世纪 60 年代提出的板块构造理论, 从全球尺度看到了地球各部分发生的动力构造作用的关联. 自此, 以动力学体系为思考点, 地球科学开启了新的篇章.

大陆漂移假说和海底扩张模型启蒙了板块构造理论, 海底磁异常条带为板块构造理论提供了最有力的观测证据. 然而, 从海底扩张到海洋板块俯冲的几亿年海底循环, 只是地球漫长演化历史中的一个片段. 有几十亿年寿命的大陆, 如何在全球动力学体系中生长、消亡? 是被地幔对流、海底扩张掌控的周而复始的变动? 还是有被大陆演化掌控的过去与未来? 地球科学研究没有止步于板块构造理论, 在对大陆动力学的研究中不断提出了诸如地壳增生、壳幔循环、大陆俯冲/折返、大陆再造等等新的命题.

无论是关注人类生存环境, 还是被自然的奥秘所吸引, 华北地区一直备受地球科学家的亲睐. 从 1927 年翁文灏教授[1]提出“燕山运动”来表述中国东部地区中生代中后期发生的强烈构造运动, 到 1956~1960 年陈国达教授[2]创立的“地台活化”理论; 近百年来, 我国的地质学家运用不同的学术观点, 对华北大地构造的发展规律, 作了认真的探索. 20 世纪 80 年代以来, 基于地质观测和实验研究, “大陆深俯冲”[3](华北南缘, 秦岭-大别)和“岩石圈减薄”[4](华北克拉通东部)等重要设想脱颖而出. 比如,

英文引用格式: Zhu R X, Xu Y G, Zhu G, et al. Destruction of the North China Craton. Sci China Earth Sci, 2012, doi: 10.1007/s11430-012-4516-y

通过对华北克拉通东部出露的早奥陶世含金刚石金伯利岩(山东蒙阴和辽宁复县)中地幔捕虏体的研究, 提出了早古生代华北东部岩石圈地幔具有典型克拉通性质的推论. 在该金伯利岩形成时(约 470 Ma), 华北克拉通具有大约 200 km 厚的岩石圈. 然而, 由新生代玄武岩中的幔源包体研究获得的岩石圈厚度约为 80~120 km, 表明华北克拉通东部自早古生代以来发生了百余公里的岩石圈减薄. 岩石学和地球化学研究, 获得了许多来自地球深部样品的直接数据, 探讨了可能改变岩石圈地幔性质的物理和化学过程, 提出了拆沉作用、热-化学/机械侵蚀作用、橄榄岩-熔体相互作用和机械拉张, 以及进入岩石圈的水弱化模型等有关破坏方式的多种见解[5~11].

在追寻导致岩石圈减薄的动力构造作用的研究中, 我们逐渐认识到, 华北克拉通不仅仅是经历了岩石圈减薄, 同时伴随着岩石圈性质和热状态的转变. 原本具有克拉通地壳属性的华北地壳发生了大规模韧性变形和岩浆-成矿活动, 这说明华北克拉通显生宙以来遭受了破坏, 克拉通原有的属性已不复存在. 我们将这种克拉通属性整体丧失的地质现象称之为克拉通破坏. 显然, “岩石圈减薄”只是华北克拉通演化的表象之一, 而“克拉通破坏”才是其演化的本质所在[12]. 克拉通破坏的方式可以是多样性的, 既可能是拆沉方式, 也可能是热侵蚀方式; 熔体-橄榄岩反应既可能是板片-地幔相互作用的体现, 也可能是不同地幔岩石之间相互作用的体现. 不同的先存构造背景会产生破坏方式的相应差异. 在地球动力学机制上, 华北克拉通破坏主要受控于太平洋板块的西向俯冲[11].

过去几年, 中国科学家以全球的视野, 采用“天然实验室研究”的科学模式, 全面推开了对华北克拉通的地质、地球物理、地球化学综合研究. 特别是国家自然科学基金委员会从 2007 年起设立的重大研究计划《华北克拉通破坏》主要围绕以下 5 个核心科学问题开展研究: (1) 华北克拉通破坏的时空分布; (2) 华北克拉通破坏的深部结构和热-构造-流体过程; (3) 华北克拉通破坏与地表环境、资源聚集和地震活动之间的关系; (4) 华北克拉通破坏的机制、过程和动力学; (5) 克拉通破坏在全球地质和大陆演化中的意义. 以流动地震台阵观测和微区微量原位同位素示踪技术等为支撑, 获取高精度、高分辨、规模性、多属性的观测测试数据, 进行海量信息(数据)的分析研究. 以观测和实验证据为基础, 通过多学科综合研究, 获得了有关华北克拉通破坏的时空分布范围、过程与机理, 克拉通破坏的深部结构响应和动力构造体制, 克拉通破坏的浅部效应及对矿产资源、能源、灾害控制机理的新证据和新认识, 提升了对大陆形成与演化的认知水平. 本文概要评述迄今为止已经获得的对于华北克拉通破坏的新认识.

1 深部结构探测研究

“克拉通破坏”在全球克拉通演化中担当什么角色? 能为大陆动力学研究提供什么新认识? 探讨这个问题, 不仅仅要研究岩石圈形态和性质变化及其过程, 也必定要研究造成华北克拉通破坏的动力构造体制. 从伸展构造和岩浆作用考虑, 地幔柱、岩石圈拆沉诱发软流圈上升, 或者是与板块俯冲相关联的独特地幔物质流动系统, 这些动力构造作用都有可能提供改变岩石圈性质的能量和物质. 地壳-上地幔的结构和性质是识别这些动力构造作用的不可缺少的依据. 针对这一科学目标, 《华北克拉通破坏》研究计划在华北克拉通及周缘部署了密集的流动台阵(975 个台站)的地震观测; 并结合主动源地震探测的互补性, 完成了 3 条长观测距人工地震宽角反射/折射剖面(总长度 3400 km)和 2 条气枪源 OBS 深地震海陆联合观测剖面(总长度 900 km). 观测剖面覆盖华北克拉通及周缘主要构造边界(图 1). 新的高质量、密集采样的地震记录数据, 为我们进行全区域的深部结构探测提供了可靠的观测依据.

1.1 华北克拉通破坏的空间范围

冷的、难熔、亏损、古老岩石圈根的丢失是人们提出华北克拉通活化(被改造/破坏)的基本依据. Chen 等[13]发展了基于波动方程叠后深度偏移的接收函数成像方法; 采用覆盖华北克拉通的地震观测, 用 S 波和 P 波接收函数对岩石圈底界面转换波进行偏移成像, 获得了华北克拉通岩石圈的厚度分布(图 2)[14~17]. 结果表明, 华北克拉通东部普遍分布着薄的岩石圈, 从东南边缘郯庐断裂带的 60~70 km 向西北内部逐渐增加至 90~100 km. 中-西部岩石圈厚度显示出强烈的横向非均匀性; 即在鄂尔多斯盆地之下保留着约 200 km 厚的岩石圈, 在环鄂尔多斯的新生代银川-河

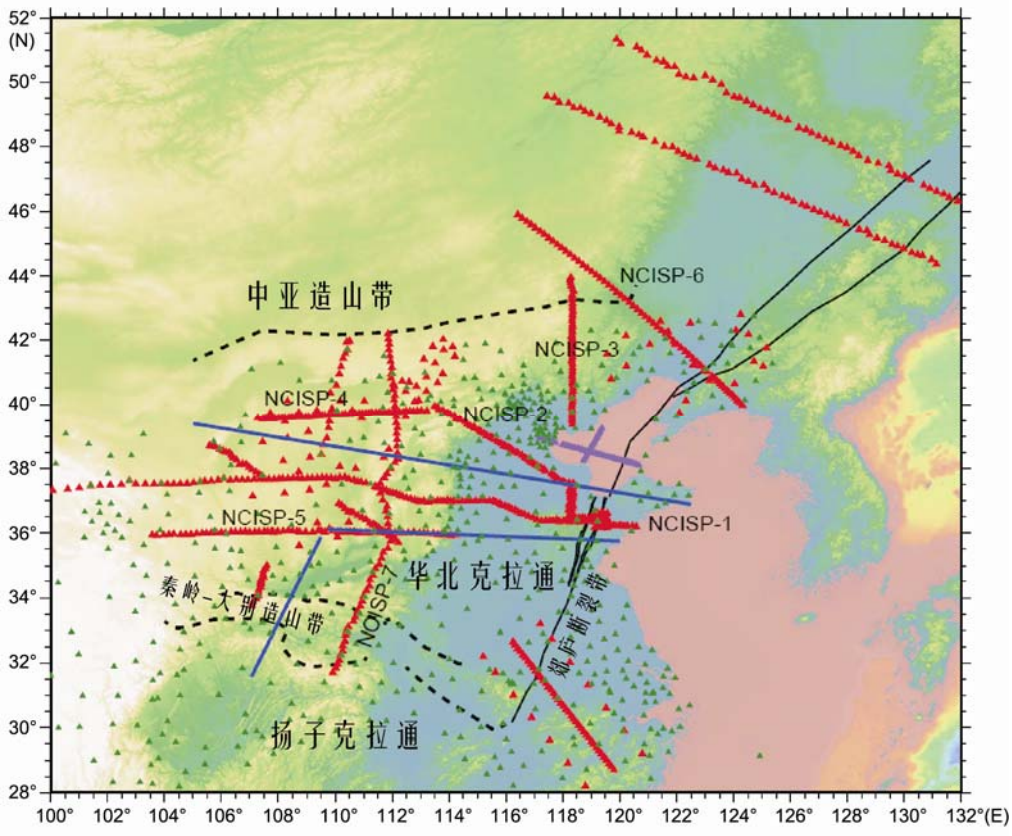

图 1　华北及周缘地区地震观测台站和观测剖面分布

红色三角表示流动台, 紫色三角是在水下的海底地震台, 蓝线是人工地震宽角反射/折射剖面; 绿色三角是研究采用了数据的中国国家数字台网的固定台站. 文中以及图 2 和图 4 中用到的剖面名称标注在图中

套和汾渭裂陷区岩石圈厚度薄, 且横向变化大. 岩石圈厚度在华北克拉通东部与中部边界附近的显著变化, 与南北重力梯度带和地形的突然改变密切相关. 根据华北克拉通东部和西部岩石圈厚度[14~17]以及地壳结构[18~22]存在的显著差异, 可以确定华北克拉通破坏主要发生在太行山以东地区.

1.2　地壳结构纪录了克拉通自形成以来的构造演化信息

华北克拉通最古老的地壳形成信息可追溯到 40 亿年左右, 25~30 亿年是华北克拉通地壳形成的主要时代. 处在相对低的温度、压力条件下, 地壳结构中能够最大程度保留长期构造演化的记录. Zheng 等[18~22]采用接收函数综合成像方法, 完成了沿地震观测剖面的地壳精细结构成像. 图 3 展示了东西走向贯通华北克拉通的利津-大同-鄂托克(NCISP-2, NCISP-4)剖面的地壳 S 波速度结构. 对比剖面穿过的东、中、西三部分的结构变化, 清楚显示了华北克拉通演化留下的构造痕迹. 东部渤海湾盆地下有 2~12 km 厚的沉积盖层, 地壳薄(~30 km)、速度低, 壳内的高低速互层水平延展; 充分表现了地壳的伸展、减薄, 大规模韧性变形等一系列被改造的构造特征. 而在剖面西部, ~40 km 厚的平坦的分层地壳结构具有克拉通地壳的特征. 在中部地区, 地层起伏, 壳内有倾斜的和水平展布的低速层, 以及深度达 46 km 的地壳根带, 推测是陆块碰撞拼合构造作用的痕迹[20]. 东部和西部地壳结构存在的显著差异及相应的构造面貌, 进一步揭示了华北克拉通破坏主要发生在太行山以东地区.

大量的中生代火成岩, 特别是花岗岩在华北克拉通东部地区的广泛分布, 由变质核杂岩标志的壳内韧性变形, 以及伸展、减薄和高低速互层的东部地

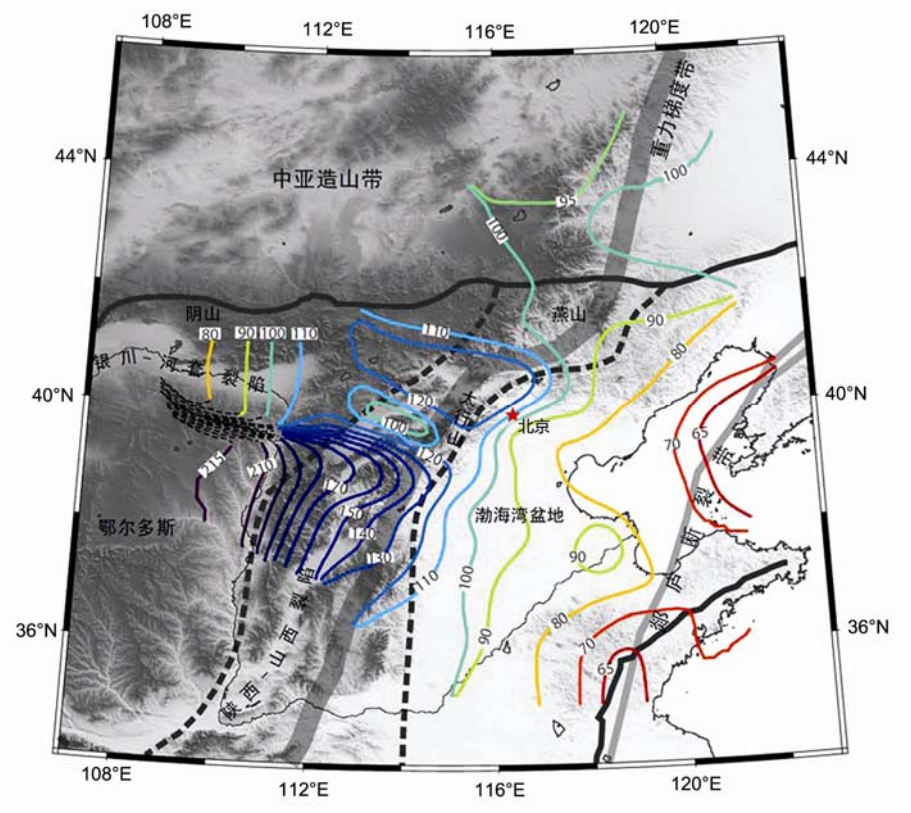

图 2　华北克拉通岩石圈厚度等值线图

引自文献[12]. 等值线上的数字表示岩石圈厚度值

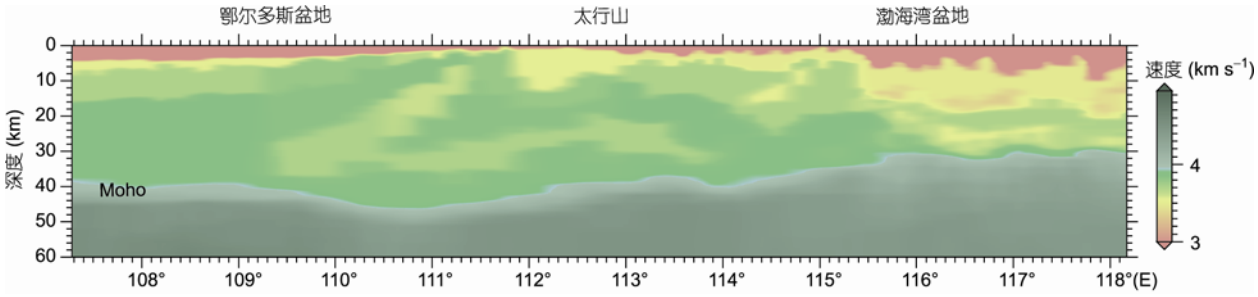

图 3　沿东西走向贯通华北克拉通的地震观测剖面(NCISP-2 和 NCISP-4)的地壳 S 波速度结构

速度结构数据来自文献[18, 20]. S 波速度值由右侧色标标注

壳结构, 表明岩石圈的破坏不单是岩石圈地幔性质被改变, 同时与之相伴的是地壳, 特别是下地壳被强烈改造. 地震成像研究揭示了在壳幔边界结构中保留了地幔岩浆作用的记录. 从燕山地区的接收函数数据的叠加剖面可清晰追踪到振幅强、波形尖锐的 Moho 面 PpPs 震相; 而在太行山地区 Moho 面的 PpPs 震相则是散布的数个小振幅波[22]. 通过对 Moho 面的 Ps 转换波(上行 P 波在 Moho 面折射后的 S 波部分)和 PpPs 多次波(上行 P 波在 Moho 面折射后进入地壳, 经表面反射和 Moho 面反射后的 S 波部分)波形的正、反演分析, 确认这两个相邻地区 Moho 面震相特征的差异是二者壳幔边界结构不同的结果[22]. 燕山地区壳幔边界强烈的速度反差可能是下地壳和岩石圈拆沉诱发软流圈上升, 形成速度显著不同的物质分界

面; 岩浆底侵有可能造成太行山地区的厚的壳幔过渡带. 对燕山和太行山地区壳幔边界结构的地震观测结果, 揭示了华北克拉通破坏过程中不同地区经历了不同的岩浆作用和地壳改造过程.

1.3　在岩石圈地幔内残留的大陆演化痕迹

在对华北克拉通演化的研究中, 壳-幔界面和岩石圈-软流圈界面是地震探测的主要目标; 较强的速度变化以及可以连续追踪的速度间断面有利于对地震信号的识别. 对岩石圈地幔内部, 由于地震信号弱, 又有地壳多次波的混扰, 结构识别变得相当困难. Zheng 等[23]采用了对共转换点(CCP)叠加成像的理论图测试方法, 来区分地壳多次波与岩石圈地幔间断面转换波; 在 Moho 面到 100 km 的深度范围内, 识别出岩石圈地幔内的速度界面. 图 4 是对位于华北克拉通不同区域 6 条剖面的地壳和岩石圈地幔内界面的 CCP 成像结果. 剖面 NCISP-4 大部分(111°E 以西)和 NCISP-7 北半部位于华北克拉通西部, 岩石圈地幔内结构均匀. 剖面 NCISP-1, NCISP-3 和 NCISP-6 位于华北克拉通东部, 岩石圈地幔内有零星的高速断片, 推测是拆沉的岩石圈或俯冲板片的残留物. 在华北克拉通南部, 秦岭以北的的两个剖面中(NCISP-5 和 NCISP-7 南半部), 都有断续分布的速度界面; 剖面 NCISP-7 中两条岩石圈内部界面的上端对应的地表位置分别为勉略缝合带和商丹缝合带. 推测这些界面是扬子板块向北俯冲到华北克拉通下方的残留构造. 对华北克拉通岩石圈内结构的地震学研究表明, 元古代华北克拉通拼合的构造痕迹只在地壳内得以

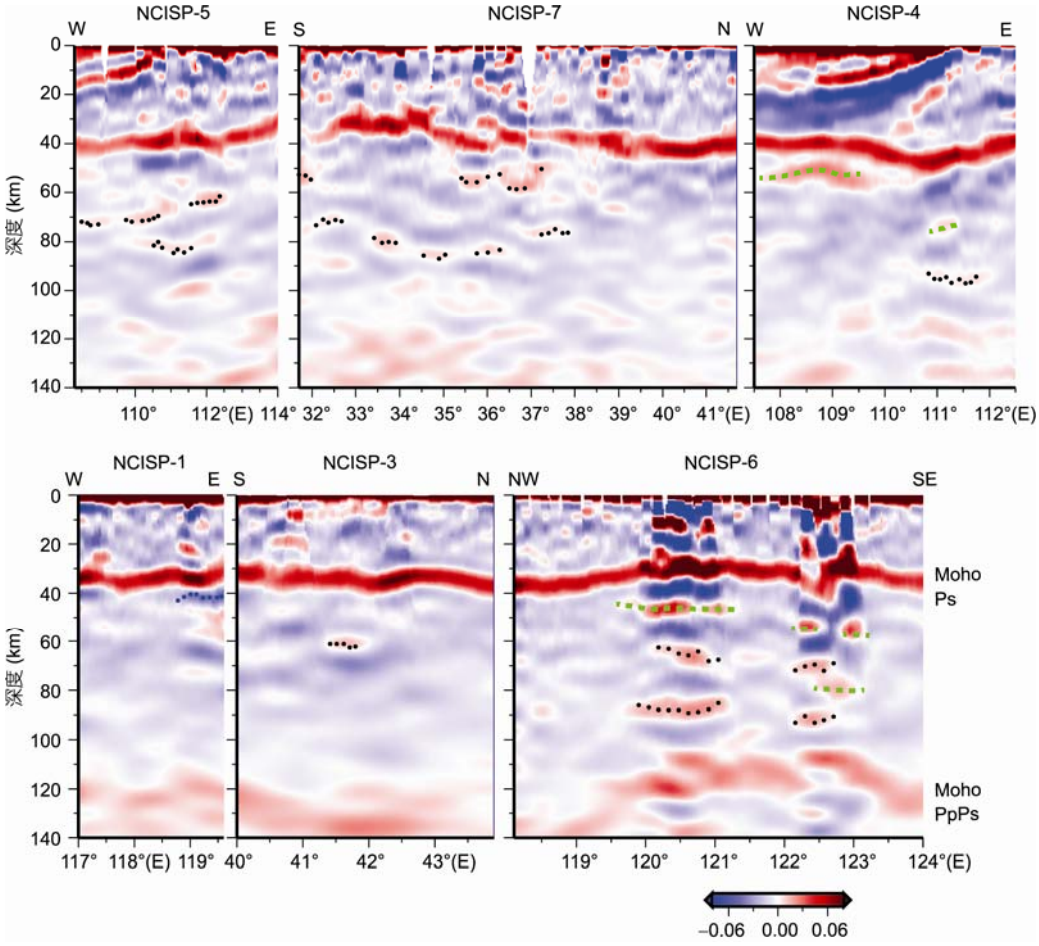

图 4　位于华北克拉通不同区域 6 条剖面的岩石圈内部速度界面的 CCP 成像结果

CCP 叠加数据来自文献[23], 红色(蓝色)表示速度向下增大(减小), 黑点和蓝点处是岩石圈内部的界面, 绿虚线处是地壳内多次波的叠加振幅

保留[20,23]; 显生宙的陆-陆拼合构造痕迹依然残留在岩石圈地幔中. 而在被破坏的华北克拉通东部, 利用地震信号很难在岩石圈地幔内识别早期构造演化痕迹.

1.4 岩石圈-板块俯冲相互作用

自古生代以来, 华北克拉通经历的主要构造事件包括南部秦岭洋闭合, 华北与扬子克拉通碰撞拼合; 北部古亚洲洋和蒙古洋先后闭合, 中国大陆与西伯利亚板块碰撞; 中生代中国大陆东部成为环太平洋活动大陆边缘的组成部分. 这些大尺度构造事件都会对华北克拉通演化产生一定的影响. 地震记录数据的大量增加以及新发展的地震成像技术, 提升了探测上地幔结构的分辨能力和可信度. Zhao 等[24,25]利用固定和流动地震台站的远震体波走时数据, 采用有限频层析成像方法, 得到中国东部700 km深度以上范围地幔的 P 波和 S 波速度结构(图 5). Jiang 等[26]

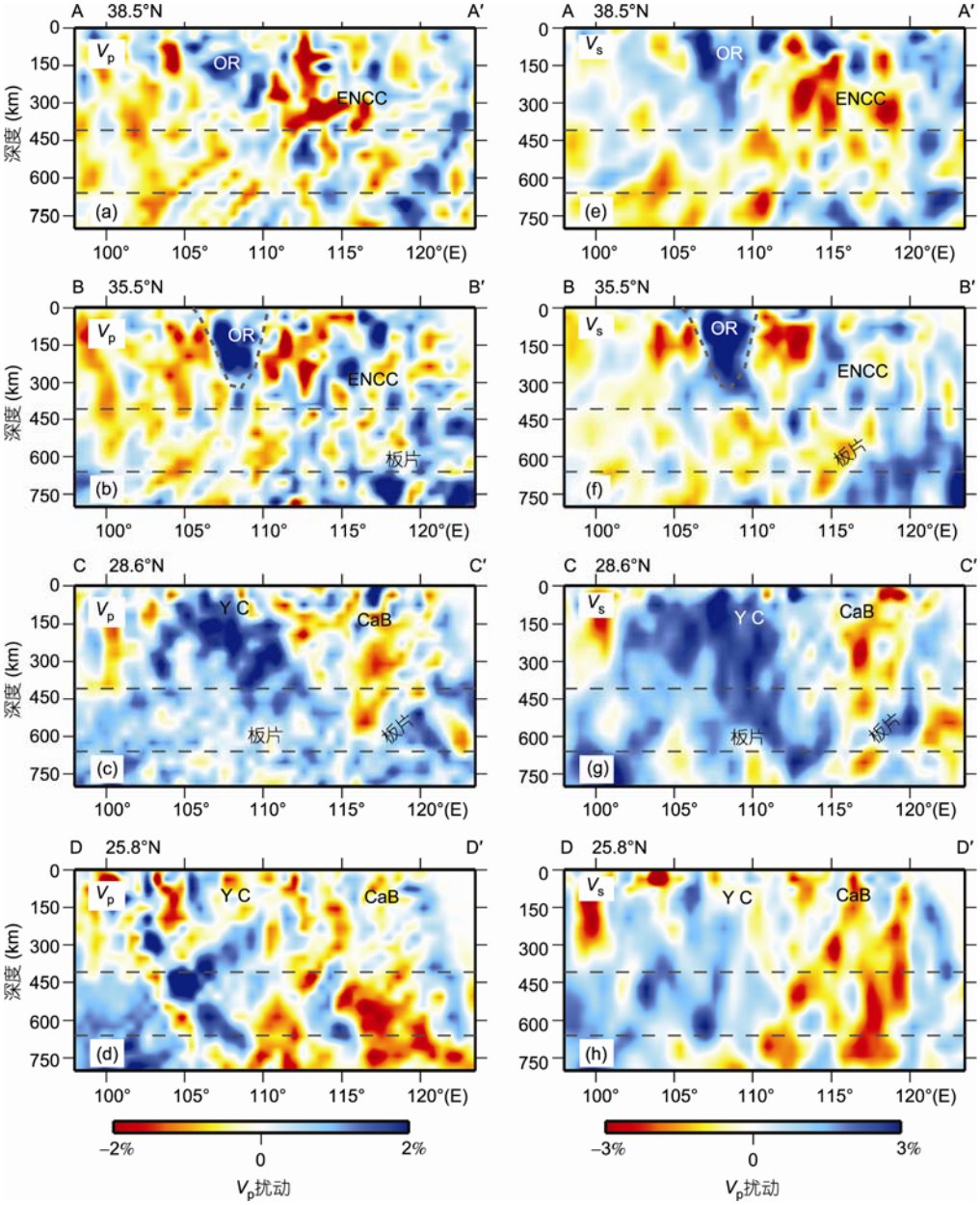

图 5 P 波((a)~(d))和 S 波((e)~(h))速度扰动垂直剖面-有限频层析成像结果

引自文献[24]. 剖面为东西向, 位置标注在图左上方. ENCC, 华北克拉通东部; OR, 鄂尔多斯; CaB, 华夏陆块; YC, 扬子克拉通

用对面波的多平面波层析成像构建了华北克拉通中、西部 300 km 深度以上范围地幔的 S 波速度结构. 在华北克拉通东部, 上地幔表现了多尺度不均匀的速度分布; 在华北克拉通中部下方发现低速带, 其起源深度大于 500 km(图 5), 可能代表起源于地幔转换带甚至下地幔的上升热物质的"通道". Zhao 等[27~32]利用固定和流动地震台站记录的 SKS 震相, 探测到地震各向异性参数的剧烈空间变化. 发现了地幔各向异性性质变化与岩石圈结构差异相关; 发现了华北克拉通中部低速带以及郯庐断裂带地区各向异性参数的规律性变化[21,29,32].

接收函数叠加是成像地幔过渡带界面结构的有效方法. 利用流动地震台阵剖面的密集观测数据, 测定了华北克拉通地幔过渡带厚度和界面深度的分布[33~37]. 成像结果揭示了华北克拉通东部 660 km 界面下沉区和多重界面区, 与层析成像获得的高速异常吻合; 推测是因太平洋板块俯冲到深处的物质滞留在地幔过渡带, 导致过渡带处于较低的温度环境. 经过对地幔过渡带上方的地壳和地幔速度校正, 许卫卫等[37]发现了 410 km 界面的局部下沉区. 这些下沉区与华北克拉通中部地幔低速带关联, 推测可能是滞留的板片物质前端进入下地幔造成局部热异常.

上述对上地幔结构和各向异性的探测研究结果, 使我们获得了板块俯冲和地幔流动与岩石圈地幔相互作用的结构证据, 以进而探究造成华北克拉通破坏的动力构造作用[23].

2　华北克拉通古、中、新生代岩石圈属性及其改造过程

中生代火成岩的广泛分布, 指示了华北克拉通岩石圈减薄伴随着岩石圈地幔性质的改变. 通过对横跨华北克拉通主要构造块体(东部块体、西部块体)和构造带(郯庐断裂带和太行山重力梯度带)产出的不同时代捕虏体/晶的系统研究, 特别是采用新近发展起来的放射性同位素(Hf, Os)和非传统稳定同位素(Li, Mg, Fe)示踪技术的实验研究, 对华北克拉通古生代、中生代、新生代岩石圈的属性及其改造过程有了诸多新的认识.

2.1　古生代岩石圈属性: 克拉通型

岩石圈地幔时代的厘定是固体地球科学的难点. 传统上, 依据岩石圈地幔中常量元素的亏损程度即橄榄石的镁橄榄石分子(Fo)大致可以推测岩石圈地幔的形成时代[38]. 太古代岩石圈地幔橄榄岩中 Fo 高(>92), 而显生宙地幔橄榄岩中 Fo 低(<91)(图 6). 华北克拉通奥陶纪金伯利岩中橄榄岩捕虏体以及金刚石中橄榄石包裹体都具有很高的 Fo, 均落在了全球太古代构造域中地幔橄榄岩的组成范围内(图 6), 暗示其代表的岩石圈地幔很可能形成于太古代. 对这些金伯利岩中橄榄岩捕虏体系统的 Os 测定表明, 其 Re 亏损模式年龄大多为太古代(图 7), 而岩浆亏损模式年龄皆为太古代[44]. 这与以前的研究结果完全一致[47,48]. 结合温压计算结果, 进一步证明华北克拉通东部岩石圈减薄前存在一个古老的(太古代)、地温梯度低的、厚达 200 多公里的难熔岩石圈.

华北克拉通不同时代基性、碱性岩浆活动携带的下地壳麻粒岩捕虏体中锆石和锆石捕虏晶的年代学和 Hf 同位素系统研究发现, 华北克拉通下地壳很可能亦形成于 25~27 亿年前的太古代. 下地壳来源的样品中普遍存在 25 亿年形成的锆石[49], 这说明 25 亿年前的太古代一定是形成华北克拉通古陆核的重要时期.

综上所述, 华北克拉通岩石圈减薄前其下地壳

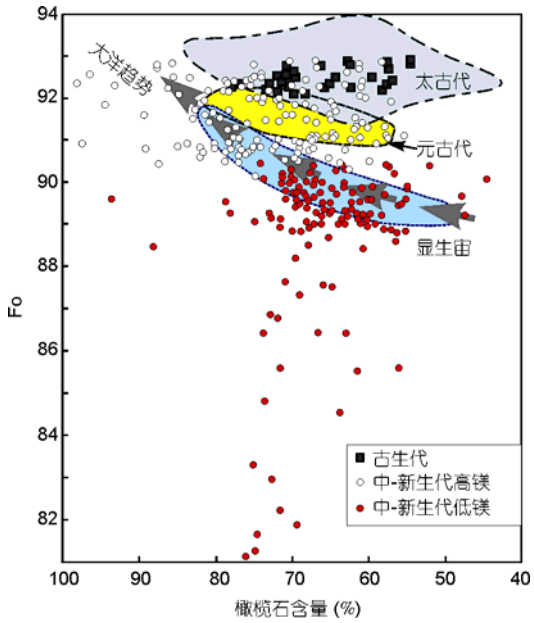

图 6　华北克拉通地幔橄榄岩中橄榄石的含量与 Fo 的协变图

古生代代表华北克拉通古生代金伯利岩中的橄榄岩捕虏体, 中-新生代高镁和低镁橄榄岩分别代表华北克拉通中生代和新生代玄武岩所携带的高镁和低镁橄榄岩捕虏体. 数据来自文献[9, 39~43]

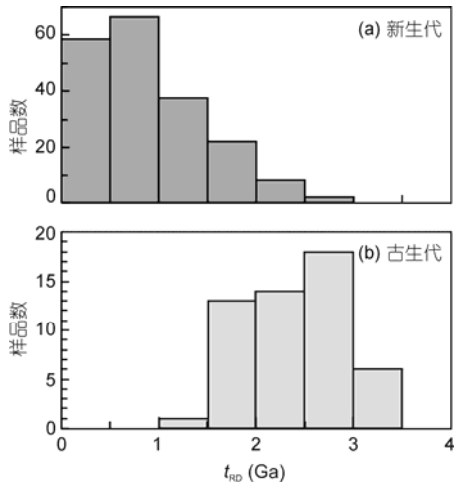

图 7　华北克拉通地幔橄榄岩的 t_{RD} 年龄分布直方图

华北克拉通新生代(a)和古生代(b)地幔橄榄岩的 t_{RD} 年龄数据来自文献[40, 44~46]

和岩石圈地幔皆具有典型的克拉通属性.

2.2　中生代岩石圈不均一性及其形成过程

中生代以来, 华北克拉通型岩石圈地幔的组成和性质发生了明显的转变[9]. 同古生代相比, 华北克拉通东部中生代岩石圈地幔主要由主量元素相对饱满、大离子亲石元素富集、高场强元素亏损、高的 Sr 同位素和低的 Nd 同位素组成的二辉橄榄岩和辉石岩组成[50~53]. 这些特征表明华北克拉通古老岩石圈地幔曾经历了再循环地壳物质的强烈改造, 从而造成华北克拉通中生代岩石圈地幔存在明显的时空不均一性[9]. 但对再循环的壳源物质的来源仍存在很大争议, 特别是华北克拉通南缘地区. 较流行的一种观点认为其壳源物质来源于深俯冲的扬子陆壳物质[50~53]. 另一种观点认为其来源于拆沉的华北克拉通下地壳[54~56]. 胶东地区晚白垩世基性岩石携带的下地壳麻粒岩捕虏体中的锆石给出了古元古代-太古代的年龄信息[57,58]. 该年龄信息可能具有两种含义: (1) 由于采样地点位于苏鲁造山带内部, 由基性岩墙所包裹的麻粒岩捕虏体可能是大陆碰撞带的物质; 麻粒岩捕虏体中前寒武纪 U-Pb 年龄的锆石也可能是碎屑锆石, 与古老下地壳无关; (2) 该年龄年代学研究可能指示该地区太古代下地壳仍然存在[57,58], 从而暗示华北克拉通下地壳整体拆沉模式很难成立. Liu 等[59]对华北克拉通南缘(蚌埠地区)中生代火成岩的研究给出了另一种全新的解释, 认为华北克拉通南北缘加厚的下地壳随着早期的熔融、长英质熔体的抽取而密度增大, 由于重力不稳定曾经发生了拆沉. 这种情形类似于造山带山根的垮塌, 在造山带和克拉通边缘岩石圈地幔的演化中可能具有重要意义.

华北克拉通中生代产出的地幔橄榄岩捕虏体同样证明华北克拉通中生代时期岩石圈地幔存在明显的不均一性(图 6). 其中华北克拉通东部的胶东地区岩石圈存在双层结构, 其上部为残留的以高 Mg 橄榄岩为代表的古老岩石圈地幔, 下部为以低 Mg 橄榄岩为代表的晚白垩世以来新增生的岩石圈地幔[60]. 橄榄岩的原位 Li 同位素研究进一步证明了上述结论, 并确证其中高Mg橄榄岩的确遭受过熔体交代作用的改造[42]. 华北克拉通中部带长治地区中生代时期亦存在古老的残留岩石圈地幔, 其辉长岩中橄榄石捕虏晶的核心的 Fo 可高达 92~94(图 6)[61].

同样, 华北克拉通中、新生代基性和碱性岩石携带的下地壳麻粒岩捕虏体中锆石或捕虏晶锆石年代学和 Hf 同位素示踪结果揭示显生宙以来华北克拉通古老下地壳也普遍遭受过多阶段的岩浆底侵作用的强烈改造, 并与华北克拉通周边发生的早古生代、晚古生代、早中生代、晚中生代和新生代的构造事件相对应[62~65]. 其中华北克拉通北缘海西期的岩浆很可能来源于古亚洲洋闭合过程中俯冲洋壳的部分熔融[58], 普遍存在的 120 Ma 的岩浆底侵事件可能与同时期活动的南太平洋地幔柱甚至太平洋的俯冲有关[64]. 因此, 华北克拉通古老的下地壳也存在类似于岩石圈地幔的组成改造过程.

综上所述, 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. 其破坏程度在晚中生代达到高峰, 之后华北克拉通东部已不再具有典型的克拉通属性. 现有的研究表明, 中生代时期造成岩石圈被改造的熔体主要为壳源的; 华北克拉通南缘可能主要来源于俯冲陆壳, 而华北克拉通北缘主要来源于俯冲洋壳.

2.3　新生代岩石圈的再富集作用: 岩石圈-软流圈相互作用

新生代时期华北克拉通的改造和破坏主要表现为岩石圈的再富集作用, 即岩石圈-软流圈的相互作用. 例如华北克拉通东南部的胶东地区, 新生代时期岩石圈地幔仍继承了中生代时期的上老下新的“双层

结构”: 上部为古老的残留岩石圈地幔, 而下部为新增生的岩石圈地幔. 但在郯庐断裂带内部, 随着岩石圈的进一步伸展减薄, 其古老岩石圈地幔已经不存在, 皆由相对年轻的岩石圈地幔构成; 而且这些新增生的岩石圈地幔同样遭受了来自软流圈的富碳酸盐的硅酸盐熔体的强烈改造, 形成一些极低 Fo(图 6)富单斜辉石的二辉橄榄岩和易剥橄榄岩[39,46]. 这些结论进一步得到地球物理[17]、古地温[66]和 Re-Os 同位素资料的支持[45].

在太行山地区和华北克拉通西部, 新生代时期岩石圈地幔亦具有和华北克拉通东部类似的“双层结构”. 即上部为 Fo 较高的方辉橄榄岩和二辉橄榄岩组成(图 6), 部分来自河北阳原、山西繁峙和河南鹤壁的样品还具有太古代 Re-Os 模式年龄(图 7)[40,67,68]. 下部为相对年轻(t_{RD}年龄以元古代为主; 图 7), 主量元素饱满(Fo<90; 图 6)、Sr-Nd 同位素组成亏损的二辉橄榄岩和辉石岩组成[45,67~69], 即具有类似“大洋型”岩石圈地幔的同位素特征. 但该“大洋型”岩石圈地幔却完全不同于华北克拉通东部新增生的岩石圈地幔, 而是橄榄岩-软流圈来源熔体相互作用造成的, 即岩石圈-软流圈相互作用的结果[45,67~69]. 而且, 橄榄岩与不同来源的熔体的相互作用是导致地幔橄榄岩组成矿物间存在明显的 Sr-Nd, Li-Fe-Mg 同位素不平衡现象的重要原因(图 8)[42,68~73]. 橄榄岩与硫不饱和熔体的相互作用导致橄榄岩中硫化物的分解很可能是华北克拉通地幔橄榄岩 Os 含量低和 Os 同位素比值高的重要原因[46,74].

多元同位素体系(Sr-Nd-Os-Li-Mg-Fe)的示踪研究表明, 橄榄岩-熔体的相互作用具有多阶段性和熔体多来源的特点. 反复和复杂的岩石-熔体相互作用不仅造成了华北克拉通东部岩石圈的大规模破坏, 也造成了华北克拉通中部带和西部块体周缘岩石圈厚度不同程度的减薄和地球化学组成的高度不均一性[42,69~73]. 而且, 华北克拉通岩石圈厚度和物质组成在空间上的变化, 反映了周边块体俯冲/碰撞作用对华北克拉通演化的重要影响[9,41,64,74].

3 华北克拉通中生代岩石圈地幔富水、新生代岩石圈地幔缺水的特征

3.1 晚中生代岩石圈地幔的富水特征

克拉通地幔之所以能够长期保持其属性不变,

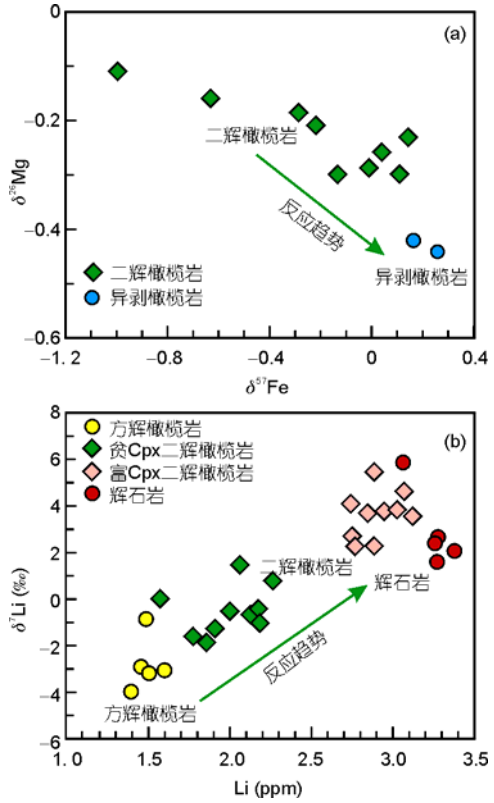

图 8 华北克拉通地幔捕虏体的 Li, Mg 和 Fe 同位素组成特征

(a) 地幔橄榄岩全岩 Mg-Fe 同位素组成的变化, 数据来自文献[71, 73]; (b) 地幔捕虏体中橄榄石的 Li 含量和 Li 同位素组成特征, 数据来自文献[70]. 同一地区不同岩石类型之间同位素组成的系统变化反映了地幔橄榄岩-熔体相互作用的结果

是与其低含水量有关的. 低含水量造成了岩石圈地幔的高粘滞度, 从而使得其能够抵抗软流圈地幔的“干扰”[75]. 无论克拉通地幔的破坏机制如何, 降低粘滞度是其能够被破坏的力学前提. 低粘滞度是与高含水量密切相连的. 已有的岩石学和地球化学研究已经表明, 山东费县~120 Ma 高镁玄武岩的源区是岩石圈地幔[55]. 通过对费县玄武岩中单斜辉石斑晶的红外光谱和电子探针分析[76], 发现最早结晶的单斜辉石(Mg#在 90 左右)的 H_2O 含量为 210~370 ppm. 根据单斜辉石-玄武质熔体之间 H_2O 的分配系数[77]计算出的玄武岩浆的 H_2O 含量为(3.4±0.7) wt%; 进而反演出的玄武岩源区的 H_2O 含量为>1000 ppm (1 ppm = 1 μg/g). 这远高于 MORB 源区(50~200 ppm)[78~81]和长期保持克拉通属性的南非克拉通(~120 ppm)[82,83](图 9). 计算还表明, 中生代时岩石圈地幔的粘滞度已经

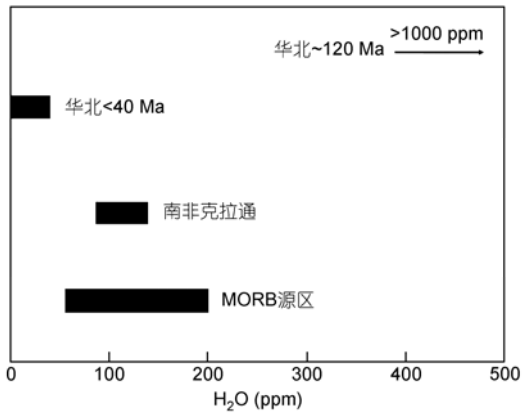

图 9　华北克拉通中-新生代岩石圈地幔的水含量对比
华北克拉通数据来自文献[76, 85, 86]; 南非克拉通的数据来自文献[82, 83]; MORB 源区的范围来自文献[78~81]

接近于软流圈[76]. 由于~120 Ma是华北克拉通破坏的峰期时段[6], 因此上述结果验证了多年来学界的一个推测: 克拉通之所以能够被破坏, 是与其被强烈水化导致的强度显著降低密切相关的[84].

3.2　新生代岩石圈地幔的贫水特征

对华北克拉通东部和西部 12 个产地新生代玄武岩中的橄榄岩捕虏体矿物进行了详细的结构水含量和分布的观察[85,86], 结果发现华北克拉通新生代岩石圈地幔具有低的水含量(图 9): 华北克拉通橄榄岩的单斜辉石水含量多<200 ppm, 而世界上其他地区(包括南非克拉通、美国新墨西哥地区、美国 Colorado 高原、美国盆岭省地区、墨西哥南部、法国中央地体以及加拿大 West Kettle 地区) 橄榄岩的单斜辉石水含量多>200 ppm[82,83,87~89]; 华北克拉通的斜方辉石水含量多<100 ppm, 而世界上其他地区多>100 ppm; 华北克拉通的橄榄岩全岩水含量多<50 ppm, 而世界上其他地区多>100 ppm. 华北克拉通新生代岩石圈水含量的最大特点是: 不仅低于典型克拉通地区的岩石圈, 也低于非克拉通大陆地区岩石圈. 这个特点说明, 华北克拉通岩石圈地幔在新生代处于相对“干”状态, 而不是减薄前的“湿”状态而易于破坏.

华北克拉通中生代、新生代岩石圈地幔的水含量特征可能暗示: 中生代富水可能主要是由于太平洋板块俯冲所致; 而新生代贫水则可能反映了随着岩石圈的减薄、软流圈的上涌, 岩石圈地幔受到部分熔融导致其中水含量随熔体提取而降低.

4　克拉通破坏的浅部地质记录

4.1　浅部地质演变

华北克拉通在约 18 亿年前通过东、西部块体沿着中部造山带的陆-陆碰撞而成为统一的大陆克拉通[90]. 在中元古代至早三叠世期间(近 16 亿年), 华北克拉通处于典型的克拉通状态, 接受浅海型地台盖层沉积. 期间, 可能由于南部古特提斯洋的俯冲影响, 在晚奥陶-早石炭世期间处于隆起状态而整体缺失沉积, 但并没有造成克拉通内部的缩短变形. 晚古生代期间, 北部古亚洲洋向华北克拉通下俯冲, 最终在二叠纪末发生了华北克拉通与蒙古地块的碰撞[91]. 随后蒙古-鄂霍茨克洋在侏罗纪的关闭[92], 使得华北-蒙古陆块与西伯利亚克拉通发生拼合. 因而, 华北克拉通北缘的阴山-燕山构造带在晚古生代至早中生代期间受到了北部板块汇聚的影响, 在区域挤压中形成了近东西向的褶皱带[93]与部分火山弧岩浆岩[94], 在后造山伸展影响下发生过短暂的区域拉张与岩浆活动[8,95]. 中生代早期华北克拉通与南部的华南板块发生陆-陆碰撞, 华南陆块向北俯冲于华北克拉通之下, 使得华北克拉通南缘发生了后陆变形, 形成了 NWW-SEE 向褶断带[96]. 在此碰撞造山中, 郯庐断裂带开始出现, 以陆内转换断层形式将大别与苏鲁造山带大规模左行错开[96]. 与华北克拉通北缘形成鲜明对照的是, 其南缘在晚古生代至早中生代期间以贫岩浆活动为特征. 与华南板块碰撞之后, 华北克拉通西部形成了大型的挠曲型后陆盆地-鄂尔多斯盆地(晚三叠-中侏罗世), 而东部仅在大别造山带北侧出现了同类的合肥盆地(早-中侏罗世), 总体上呈现为西部拗陷东部隆起的格局[90]. 在中-晚侏罗世之交, 由于西太平洋伊佐奈歧(Izanagi)板块向东亚大陆之下的高速斜向俯冲[97], 华北克拉通东部在区域性压扭中一方面形成了北北东走向的郯庐左行平移断裂带[98~101], 另一方面还形成了一系列平行的左行平移断裂, 从而标志着华北克拉通东部大地构造演化开始受控于西太平洋板块活动[98,101].

克拉通破坏的本质是其克拉通属性的整体丧失[12]. 岩石圈减薄只会发生在区域性伸展动力学背景下, 因而华北克拉通破坏关键的浅部地质标志就是广泛而强烈的伸展活动. 晚侏罗世时, 华北克拉通广泛缺失沉积, 指示为整体的隆起状况[94,102]. 唯一的例外是燕山构造带出现了较大规模的火山岩盆地[103],

以形成髫髻山/蓝旗组火山岩为代表, 还有同时代的酸性侵入岩. 华北克拉通东部南缘的胶北地区与合肥盆地北缘也分别出现了晚侏罗世的玲珑岩基与荆山-涂山花岗岩体. 岩石地化研究表明[104~107], 这些晚侏罗世的岩浆活动发生在岩石圈减薄中. 近年来的构造研究也显示[108,109], 华北克拉通东部南、北缘在晚侏罗世局部已开始了伸展活动. 但是, 华北克拉通内部在晚侏罗世还很少发育岩浆与伸展构造, 反映该时期华北克拉通东部岩石圈的改造只发生在其南、北缘, 而内部为较为平静的区域性隆起状态.

早白垩世华北克拉通东部进入破坏峰期, 浅部地质明显地记录了华北克拉通破坏峰期的信息; 比如系列的变质核岩形成、广泛的断陷盆地出现、伸展断层活动与大规模的火山喷发及岩体侵入(图 10(a)). 燕山-辽南构造带上分别出现了早白垩世的房山、云蒙山、赤峰、瓦子峪、辽南、万福等变质核杂岩[110~116], 其间发育了一系列上叠盆地. 华北克拉通东部南缘分别出现了早白垩世的周口盆地、固镇盆地、信阳-潢川盆地、合肥盆地与胶莱盆地等[101,102]. 华北克拉通内部主要为小型断陷盆地群, 包括鲁西南盆地群(包括曲府、泗水、平邑、大汶口、新泰、蒙阴、莱芜盆地等)及渤海湾盆地群[101,102]. 郯庐断裂带这一时期也转变为巨型的伸展断层, 其内部与旁侧控制发育了一系地堑式与半地堑式断陷盆地[101]. 华北克拉通东部这些陆相伸展盆地内, 既有大量的碎屑岩充填, 也有大规模中酸性为主的火山岩. 控盆的正断层主要为 NNE 走向(图 10(b)), 各个变质核杂岩拆离剪切带也为 NNE 走向. 通过对早白垩世伸展活动的详细分析发现[101,102,117], 断陷盆地出现的高峰期在 145~115 Ma 之间, 变质核杂岩的形成时代集中在 130~120 Ma[118]. 早白垩世晚期(115~100 Ma)盆地发生了萎缩(图 10(b)), 局限在较大型正断层附近(如郯庐断裂带、太行山东缘断层、兰聊断层). 华北克拉通东部在晚白垩世时浅部地质特征发生了显著的改变. 这一时期总体上为一区域性隆起状态, 只是在南部发育了合肥、固镇、胶莱等断陷盆地, 渤海湾盆地的局部、辽南与燕山构造带上局部也出现了小型断陷盆地(图 10(c)). 这时期没有变质核杂岩的形成, 基本上缺乏火山活动与岩浆侵入, 控盆正断层转变为近东西走向, 总体上为弱拉伸的动力学背景. 在古近纪期间, 华北克拉通东部形成了大量的断陷盆地(图 10(d)), 并常伴随着玄武岩喷发. 这一时期是华北克拉通东部含油气盆地的主要形成期. 古近纪早期(孔店组至沙四下亚段沉积期)在克拉通中部与南部断陷盆地广泛出现, 古近纪中期(沙四上亚段至沙一段沉积期)断陷盆地仅限于渤海湾盆地, 而古近纪晚期(东营组沉积期)渤海湾盆地内的沉积主要集中在渤海海域内郯庐断裂带附近[119,120].

4.2 浅部地质与深部过程的联系

华北克拉通破坏中, 浅部地质以伸展活动为特征, 而深部过程以岩石圈转型与减薄为特征, 后者的主要表现形式为岩浆活动. 因而, 将伸展活动与岩浆活动进行对比可以揭示浅部地质与深部过程的关联性. 晚中生代华北克拉通东部岩浆活动峰期(130~120 Ma)[73,94]与代表最强伸展的变质核杂岩集中形成时代的一致性表明, 华北克拉通破坏的深部过程与浅部地质构造活动密切相关. 将晚侏罗世至古近纪浅部伸展活动与岩浆活动进行对比, 也显示了两者密切的时空关系.

华北克拉通南、北边缘早期受到板块汇聚的显著影响, 一方面在缩短变形中会造成地壳与整个岩石圈的加厚[93,96], 另一方面会使岩石圈的成分与性质发生改变[119], 从而易于先发生克拉通破坏. 深部结构与性质影响浅部地质的另一个实例是郯庐断裂带. 这一在克拉通破坏之前就存在的巨型断裂带, 具有较低的岩石圈强度及有利的岩浆活动通道. 在华北克拉通东部破坏中该断裂带成为强伸展活动带与岩浆活动带[99,117], 成为华北克拉通东部岩石圈减薄最强的部位[17], 其下的地幔属性变化也最显著[9,121].

华北克拉通东部在早白垩世中酸性为主的巨量岩浆活动之后, 晚白垩世转变为岩浆活动的平静期, 古近纪出现拉斑玄武岩喷发, 新近纪与第四纪分别有零星的碱性与强碱性玄武岩喷发. 辽西与胶莱盆地南缘早白垩世末与晚白垩世玄武岩内地幔包体显示地幔转型在早白垩世基本完成[9,121]. 因而, 一些学者认为华北克拉通的破坏在早白垩世已经完成, 新生代转变为岩石圈小幅度增厚[8]. 大陆岩石圈在拉伸中发生减薄是必然的. 因而, 发育古近纪断陷盆地的华北克拉通东部表明(图 10(d)), 在古近纪岩石圈整体增厚的背景下仍有可能经历减薄的时段, 但岩石圈地幔转型在此之前已完成. 古纪近强烈断陷的渤海湾盆地具有华北克拉通最薄的岩石圈[12]也支持这一推断. 发现早白垩世地幔转型完成的辽西与胶莱

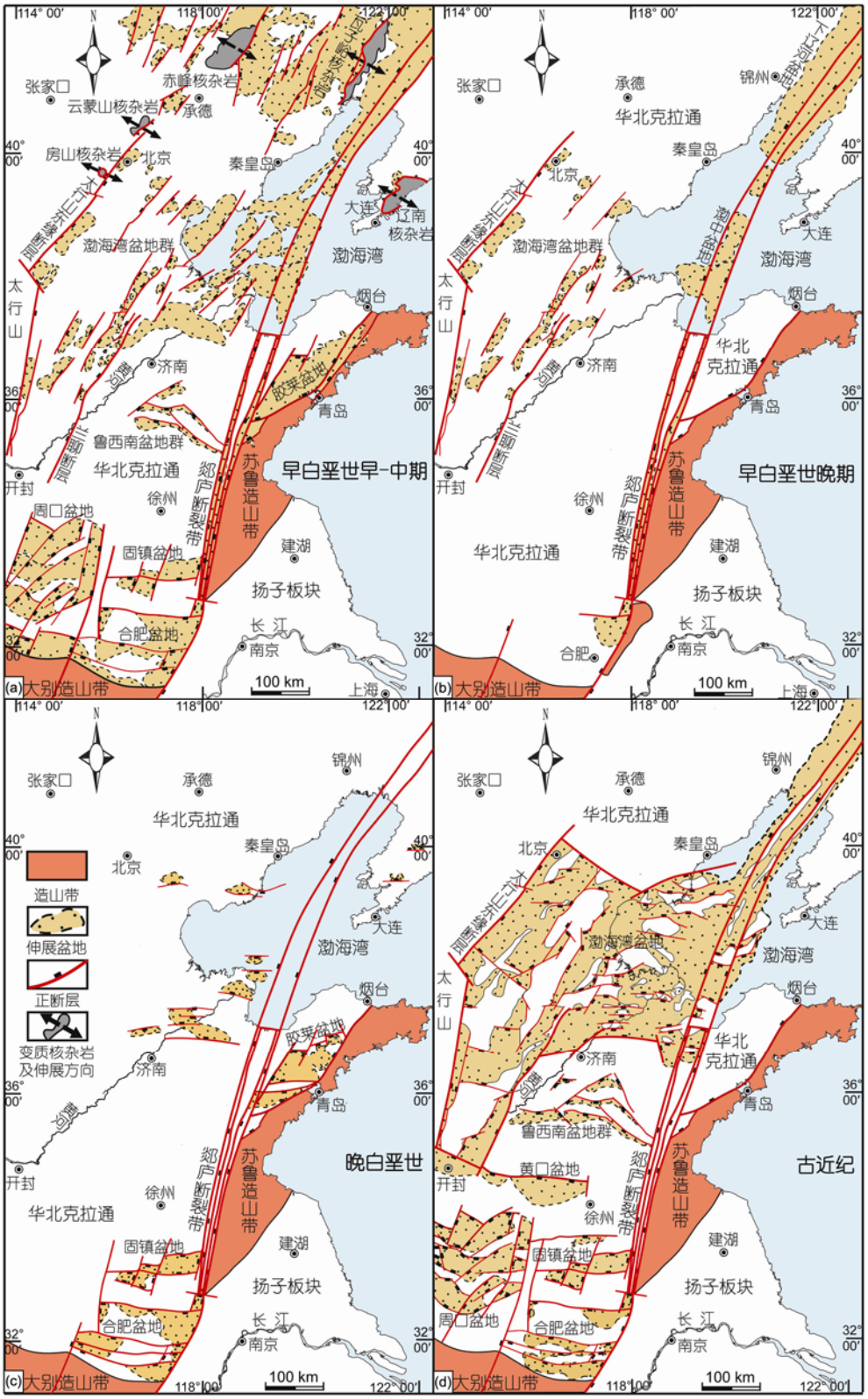

图 10　华北克拉通东部伸展构造图

盆地并没有出现古近纪的伸展活动. 因而, 华北克拉通东部地幔转型与减薄可能具有时空的不均一性, 在不同部位具有不同的结束时间.

5 太平洋板块俯冲是华北克拉通破坏的主要动力因素

克拉通岩石圈的形成和破坏与板块构造过程具有密切的时空关系[122]. 关于导致华北克拉通破坏的地球动力学原因一直有不同的观点, 主要包括: (1) 印度同欧亚板块的碰撞[123,124]; (2) 地幔柱[125,126]; (3) 扬子和华北板块的碰撞拼合[47,127]; (4) 太平洋板块的俯冲[11,12,128~136]. 对于这四种主要观点的评述, 读者可参见吴福元等[6]. 其中前两者已较少人涉及, 近几年主要的争论集中在后两者.

扬子和华北板块在早中生代碰撞拼合显然对华北克拉通的演化产生了重要的影响, 如对鄂尔多斯盆地中碎屑锆石的物源分析发现, 侏罗纪沉积物来自于秦岭-大别造山带[137]. Xu 等[53,54,138]在华北克拉通东南缘的徐淮地区晚中生代火成岩中发现了榴辉岩, 并确定其变质时代为三叠纪, 与大别-苏鲁造山带超高压变质作用时代(240~225 Ma)一致. 这一结果暗示, 扬子与华北的碰撞可能会导致华北下地壳加厚, 继而发生拆沉作用. 但是, 判断这一模型是否成立的关键是克拉通破坏的时空分布. 如果华北克拉通破坏发生在晚中生代, 那为什么 240~225 Ma 左右的加厚地壳到早白垩纪才发生拆沉[6]. 鲁西铜石中侏罗纪二长花岗岩的源区为华北克拉通早元古代下地壳[139], 但这些花岗岩并不具有埃达克岩的成分, 说明当时华北克拉通内部并没有发生地壳加厚, 至少暗示扬子与华北克拉通碰撞引起的地壳加厚在空间上是局限的. 更为重要的是, 从空间分布来看, 大别-苏鲁呈近东西向分布, 且表现的是扬子向北的俯冲而导致华北克拉通地壳的加厚. 对华北东南缘中生代镁铁质岩浆岩的地球化学研究指示, 扬子陆块北向俯冲对华北克拉通南缘影响的限制在 200~400 km 的空间范围内[140]. 因此, 其后的岩石圈拆沉应呈东西向分布, 且应集中在华北克拉通东南缘. 而目前较为共识的是, 华北克拉通破坏导致的岩石圈减薄区域呈 NNE 向分布与上述讨论的方向不相吻合[6].

目前大部分学者认为西太平洋板块的俯冲是导致华北克拉通东部岩石圈破坏的首要构造控制因素, 主要包括如下依据:

(1) 深部地球物理资料和地形地貌分析揭示, 华北克拉通破坏主要发生在重力梯度带以东地区; 而以西地区, 特别是鄂尔多斯盆地依然保存了典型克拉通的特征[5,12,17,67,132,141]. 华北克拉通破坏的空间分布特征以及中国东部盆地、主要构造线, 以及变质核杂岩主要沿北东-北北东向展布的事实[117,142,143]均与太平洋板块俯冲方向相协调.

(2) 大兴安岭-太行山重力梯度带东西两侧新生代玄武岩显示不同的演化趋势, 而且两地的地幔组成也有差异. Xu 等[144]认为这与两地不一致的地壳拉张历史相关. 东部的拉张早于西部, 并与太平洋板块的俯冲有关; 西部则可能与印度-欧亚大陆的碰撞有关.

(3) 在中国东部晚中生代存在侏罗纪和白垩纪两期岩浆作用, 分别对应于太平洋板块向欧亚大陆下的俯冲和伸展拉张[145,146].

(4) 深部地球物理探测揭示了俯冲的太平洋板片滞留在地幔过渡带的现象[35,37,147~149]; 表明向西俯冲的太平洋板块下插在太行山以东的华北克拉通东部之下, 使后者位于俯冲大洋板片之上.

值得注意的是, 如果太平洋板块的俯冲是华北克拉通破坏的首要因素, 我们可以设想如下预测: (1) 华北克拉通东部岩石圈拉张和伸展的时空变化应与太平洋板块运动方向以及俯冲角度的变化相协调; (2) 随着太平洋板块俯冲到东亚大陆下面的地幔中, 俯冲板片物质组分可成为这一地区中-新生代岩浆的源区物质之一; (3) 太平洋板块的俯冲使大量水进入俯冲带上盘的地幔楔, 那么东亚上地幔应具有较高的含水量. 在《华北克拉通破坏》重大研究计划实施过程中, 通过不同学科的综合研究, 在上述三个方面获得了观测事实的支持, 从而为西太平洋板块俯冲是华北克拉通东部破坏的主要动力因素的认识提供了关键证据.

5.1 华北克拉通东部岩石圈伸展与太平洋俯冲作用

通过郯庐断裂带周边断陷盆地正断层擦痕反演应力场、断陷盆地构造与沉积格局、变质核杂岩、断层运动学、岩脉展布规律等方面的综合分析, 发现华北克拉通东部在破坏峰期经历了早白垩世早-中期的 NWW-SEE 向拉伸、早白垩世晚期的 NW-SE 向拉伸及晚白垩世-古近纪期间的南北向拉伸, 显示拉伸方

向发生了顺时针转变; 并且这一变化规律与太平洋区大洋板块运动方向的变化相吻合(图 11). 由此指示华北克拉通东部的破坏发生在弧后拉张的动力学背景下. 大洋板块的运动方向控制了大陆边缘的弧后拉伸方向, 即板缘动力控制着克拉通东部破坏所引起的地壳浅部拉张方向[117].

5.2 华北中、新生代基性岩浆中的俯冲板片组分

虽然太平洋板块俯冲作用很早就被认为是中国东部岩浆作用的动力学控制因素[150], 但太平洋板块参与岩浆作用的物质证据一直没有找到. 哪些是鉴别大陆板内玄武岩中俯冲大洋板片的地球化学指标呢? 一般认为, 洋岛玄武岩(OIB)源区含有再循环洋壳组分; 因此, OIB 特有的地球化学特征可以作为鉴别俯冲大洋板片组分的指标. 如: (1) 斑晶矿物低 $\delta^{18}O$ 值(与高温水岩反应有关); (2) OIB 型微量元素组成, 如强不相容元素 Rb, Ba, Th, U 相对 Nb-Ta 的明显亏损, 全岩 Pb 负异常, 与 OIB 相似的 Nb/U 和 Ce/Pb 比值(这些特征与脱水后的洋壳玄武岩有关), 以及 K 负异常; (3) HIMU 型 Pb 同位素特征, 如 $^{206}Pb/^{204}Pb>19.5$. 华北东部新生代玄武岩显示了与 OIB 一致的地球化学组成, 为其源区存在俯冲大洋板片组成提供了证据. 例如, 山东-苏北-皖东北一带的新生代玄武岩的微量元素蛛网图显示了强不相容元素的亏损和 Pb 负异常[136,151,152]. 特别是这些玄武岩中的橄榄石、单斜辉石和斜长石斑晶的 $\delta^{18}O$ 值低于地幔值, 暗示其源区存在经过变质脱水和高温水岩反应的俯冲洋壳. 就华北东南部岩石圈地幔的属性来说, 新生代玄武岩研究同样揭示了上老下新的"双层结构": 上部为残留的古老岩石圈地幔, 下部为新生的年轻岩石圈地幔. 根据这些信息, 并结合华北大陆岩石圈厚度的空间变化, Zhang 等[136]认为太平洋板块的西向俯冲引起华北大陆岩石圈地幔由东向西的侧向减薄. 他们推测俯冲侵蚀发生在侏罗纪, 在早白垩世发生强烈的板片-地幔化学相互作用, 交代新生岩石圈地幔形成局部富化和富集的杂质. 这些杂质在新生代发生部分熔融, 形成新生代玄武岩.

位于东北的双辽渐新世火山岩[153]也记录了再循环洋壳的地球化学信息. 这些玄武岩具有高达 13.4%~14.6%的 Fe_2O_3 含量; 在蛛网图中, 特别是碧玄岩中 Rb, Ba, Th 相对 U 的明显亏损, 并且出现特征性的 K 负异常, 其 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i \leq 0.7036$, 是迄今为止已报道的东北地区新生代玄武岩中最亏损的 Sr 同位素比值. 这些地球化学特征十分类似于 OIB 中的 HIMU 组分, 因而可能与再循环洋壳具有密切的成因联系. Xu 等[153]认为这些洋壳成分来自于中国东部地幔转换带中的俯冲的太平洋板片.

由于双辽位于东北, 说明太平洋板块俯冲作用也影响了东北地区. 事实上, 整个中国东部新生代地球化学特征也显示了太平洋板块俯冲效应[236,151,152]. 这一认识与为中国东部新生代玄武岩中地幔组分的空间分布特征是一致的. 以往的研究认为, 华北和东北地区新生代玄武岩来源于 DMM-EM1 混合地幔的熔融[154]. 但对华北和东北新生代玄武岩的进一步研

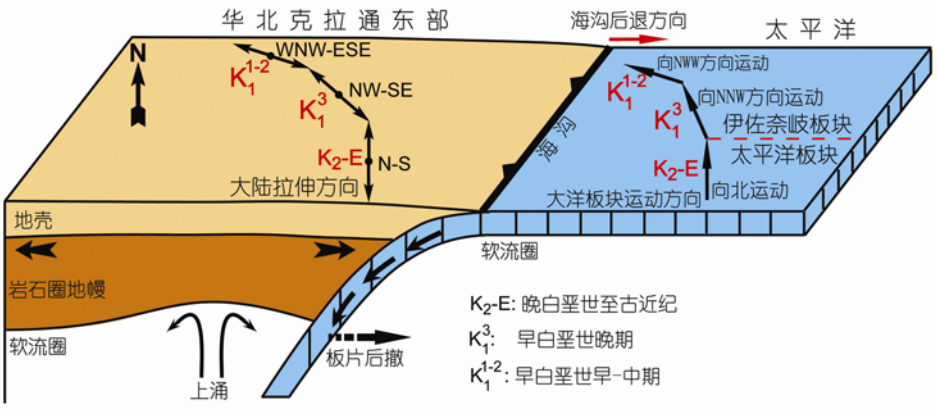

图 11 华北克拉通东部晚中生代岩石圈伸展方向与太平洋板块运动方向之对比

引自文献[117]

究发现, 其源区除了 DMM 和 EM1 外, 还有较多的 EM2 组分(图 12(a)), 表现为高 $^{206}Pb/^{204}Pb$ 和 $^{208}Pb/^{204}Pb$ 比值以及在 Nd 同位素比值相近时有高的 Sr 同位素比值, 与日本海盆地弧后拉斑玄武岩相似. 更为重要的是, <20 Ma 玄武岩组成显示华北和东北沿海为 EM1 和 EM2 型地幔, 而内陆为 EM1 型地幔(图 12(b)). 由于 EM1 型地幔形成与俯冲洋壳玄武岩有关, EM2 型地幔形成与俯冲的洋壳沉积物有关; 因此中国东部地幔分区格局显示太平洋板块俯冲对中国东部岩石圈地幔演化的影响.

值得指出的是, 新生代玄武岩中发现大洋板片组分只能说明太平洋板块在新生代岩浆形成过程中的作用, 并不能证明太平洋板块俯冲与华北克拉通破坏之间的因果关系. 显然, 俯冲板片组分在华北中-新生代岩浆中最早出现的时间应是回答上述问题的关键. 华北中-新生代基性岩浆地幔源区在~100 Ma 左右发生了转变. ~100 Ma 之前的岩浆均来自于富集的古老岩石圈地幔, 而~100 Ma 之后的岩浆显现了亏损的年轻地幔成分并且记录了俯冲板片的信息. 为此, 对华北克拉通~100 Ma 以来的基性岩浆的 Nd-Sr 同位素研究发现, 其源区至少含有三个端员: (1) 亏损端员(ε_{Nd}>7, $^{87}Sr/^{86}Sr$<0.7030), 来源于正常软流圈地幔及其衍生物; (2) 富集端员 I (ε_{Nd}~3, $^{87}Sr/^{86}Sr$=0.7030~0.7060), 可能来源于洋壳上部蚀变玄武岩; (3) 富集端员 II (ε_{Nd}<0, $^{87}Sr/^{86}Sr$>0.7060), 可能来源于洋壳沉积物, 与前两者相比该组分较弱. 这说明完整的俯冲洋壳部分参与了该时期的岩浆活动. 这些端员在俯冲过程中或者发生熔体-橄榄岩反应形成辉石岩[136,151,152], 或者其中的洋壳直接变质成榴辉岩或石榴石辉石岩[157].

根据岩浆 Eu/Eu^* 和 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 随时代变新分别逐渐增高和降低的现象(图 13), Xu 等[158]认为 100~40 Ma 岩浆源区经历了从上部洋壳向下部洋壳的转变, 这与前者的熔点低于后者有关. 在岩石圈破坏或改造过程中, 含有再循环洋壳的上升地幔流, 低熔点的洋壳上部发生熔融, 形成 FeO 含量高、Eu/Eu^*~1, $^{87}Sr/^{86}Sr$ 高的碱性玄武岩; 随着岩石圈厚度的变化,

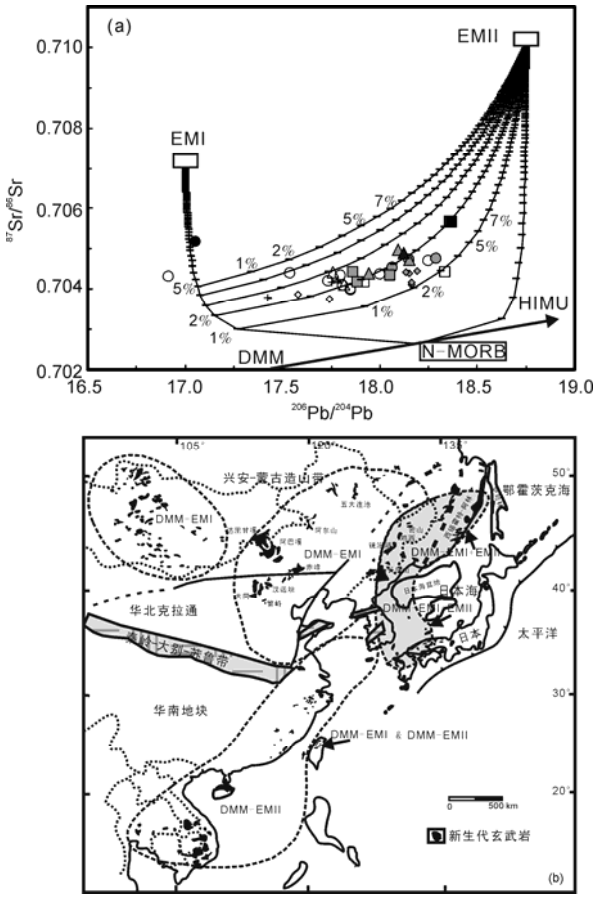

图 12　华北克拉通和东北晚新生代玄武岩 Sr-Pb 同位素组成(a)以及东亚晚新生代玄武岩地幔源区分布图(b)

引自文献[155]; DM, EM1, EM2 和 HIMU 等地幔端员引自文献[156]

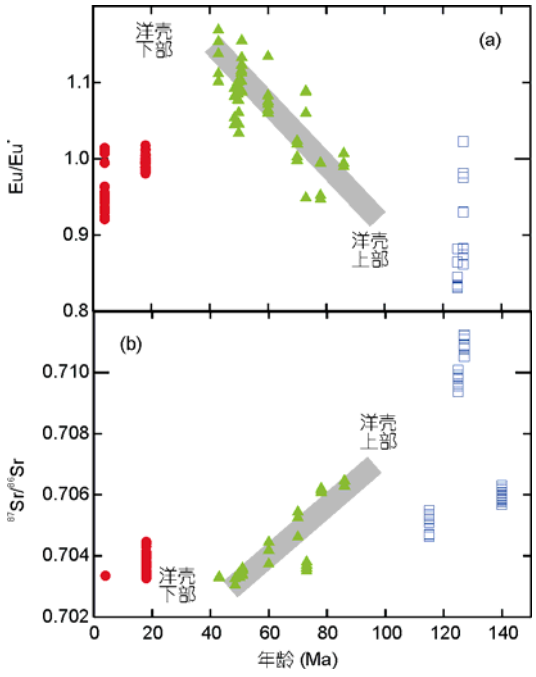

图 13　华北克拉通和东北 100~40 Ma 玄武岩(MgO>8 wt%)的 Eu/Eu^* 和 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比值随时间变化趋势

引自文献[158]

再循环洋壳发生熔融, 形成具有 Eu 正异常, 亏损 Sr 同位素的亚碱性岩浆.

这些再循环洋壳组分均具有印度洋 MORB 的 Pb 同位素组成(图 14)[153]; 这恰与残存在太平洋西北部、目前绝大多数已俯冲至东亚大陆之下的 Izanaghi-太平洋板块的印度洋 MORB 型同位素组成相对应. 结合地震层析显示的俯冲太平洋板片滞留在地幔过渡带的现象[146~148], 我们认为华北克拉通~100 Ma 以来基性岩浆中再循环洋壳组分来自于俯冲太平洋板块.

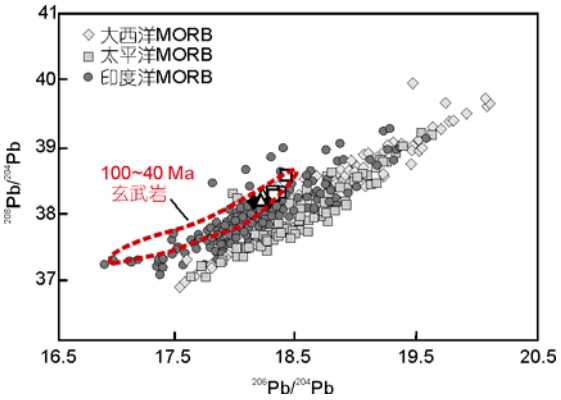

图 14　华北克拉通和东北 100~40 Ma 玄武岩(MgO>8 wt%)的 Pb 同位素组成与不同 MORB 之对比

MORB 数据来自[159]. 据文献[153, 158]

约 100 Ma 以来岩浆源区中俯冲洋壳组分的发现, 暗示太平洋俯冲作用在物质上的体现最少可以追索到晚白垩世. 考虑到从俯冲板块分解进入对流地幔所需的时间, 太平洋板块俯冲作用对中国东部岩石圈演化的影响可能更早[136].

5.3　华北克拉通东部晚中生代岩石圈地幔曾经历强烈的水化

岩浆岩源区和不同时代岩石圈地幔中含水量是验证太平洋俯冲作用是华北克拉通破坏的主要动力因素的关键. 因为大陆岩石圈的属性在很大程度上取决于其流变学强度, 而后者受流体的影响很大. Xia 等[76]通过对不同时代橄榄岩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的水含量从~125 Ma 时总体上远高于 MORB 源区(50~200 ppm)、约 80 Ma 时总体上略高于 MORB 源区、到晚于 40 Ma 后总体上远低于 MORB 源区. 由于~125 Ma 是华北克拉通破坏的高峰期, 此时岩石圈地幔的水含量远高于 MORB 源区, 这说明华北克拉通之所以在约 125 Ma 被破坏是与其被强烈水化导致其强度显著降低密切相关的. 同时也说明, 太平洋板块俯冲对华北克拉通的影响在 125 Ma 可能是最强烈的. 晚于 40 Ma 的华北克拉通岩石圈地幔的水含量远低于 MORB 源区, 这可能与其从被破坏和改造重新进入新的克拉通化状态是一致的, 说明大陆岩石圈属性能保持不变与其经历过强烈脱水而导致的高强度有关. 华北克拉通岩石圈地幔水含量从~125 Ma 到~80 Ma 到<40 Ma 逐渐降低, 暗示水含量的变化与华北克拉通破坏过程密切相关. 华北克拉通东部新生代玄武岩中橄榄岩包体矿物具有异于正常地幔的δD, δ^{18}O 以及共存矿物之间的不平衡分馏, 暗示其岩石圈地幔曾经受到过俯冲洋壳流体的影响.

由于华北克拉通被多个俯冲带所包围, 因此华北克拉通岩石圈中的水可能来自多个俯冲板块的脱水释放. 但如果晚中生代华北克拉通岩石圈地幔中的水来自于介于华南和华北板块之间的大洋, 或是南向俯冲的古亚洲洋板块, 那么从这些俯冲板块中释放的水会导致整个华北克拉通岩石圈地幔富水. 考虑到水的加入会大大降低岩石圈的强度[88,154], 那么华北克拉通要么是整体上发生破坏, 要么是发生南北向的分野, 这与现今观察到的东西向分野格局相矛盾. 如果华北克拉通岩石圈中富水特征主要来自于西向俯冲的太平洋板块, 这一矛盾就可以很到地解决. 华北克拉通东部地幔过渡带中存在太平洋俯冲板块残留的事实[146]也说明太平洋板块俯冲只影响到了华北克拉通东部.

由上可见, 不同学科的研究均显示了太平洋板块俯冲对华北克拉通东部岩石圈演化的影响是至关重要的[12]. 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因, 也是华北克拉通破坏主要发生在东部的原因.

5.4　克拉通破坏与板块构造体系

《华北克拉通破坏》重大研究计划实施以来取得的阶段性成果, 为探讨克拉通破坏与板块构造体系之间的联系提供了重要启示.

(1) 华北克拉通不仅发生了岩石圈的巨量减薄,

而且还发育了强烈的地壳变形、地震活动以及岩浆作用, 显示晚中生代以来已不再具备典型克拉通的特点. 岩石圈减薄在全球其他克拉通中也多有发生, 但大多并不伴随克拉通的破坏; 而只有当受到大洋板块俯冲作用的影响时, 克拉通破坏才有可能发生[12].

(2) 同典型克拉通相比, 华北克拉通规模小, 更为重要的是经历了多板块的不同方向俯冲作用(特提斯洋的北向俯冲, 古亚州洋的南向俯冲, 古太平洋的西向俯冲). 特别是古太平洋板块的俯冲脱水, 并释放大量水至华北克拉通东部岩石圈地幔导致其强烈水化和弱化, 使华北克拉通东部地幔对流系统局部失稳, 上覆岩石圈黏滞系数大幅降低[88,160,161], 继而发生拆沉或侵蚀而使华北克拉通遭受破坏. 同时由于俯冲板片后退中的远场弧后拉张导致了岩石圈强烈伸展. 这一过程与东太平洋 Farallon 板块俯冲作用导致科迪勒拉活动带的形成和北美克拉通部分被破坏[162]十分相似. 从这个角度而言, 克拉通破坏是板缘构造活动的结果.

6 结论

对于华北克拉通的地质、地球物理、地球化学综合探测研究, 在以下几个方面取得新的证据和认识:

(1) 厘定了华北克拉通古生代、中生代、新生代岩石圈的属性, 发现了晚中生代岩石圈地幔富水而新生代岩石圈地幔缺水的特征.

(2) 发现岩石圈厚度以及地壳结构存在显著空间差异, 确定了克拉通破坏的范围.

(3) 根据岩浆作用和浅部地质响应的相关性, 证实了地表地质构造受控于克拉通破坏的深部过程.

(4) 发现了太平洋板块俯冲是华北克拉通破坏的主要动力因素的证据, 揭示了克拉通破坏在板块构造体系中的地位. 因此, 太平洋板块西向俯冲是引起华北克拉通破坏的一级地球动力学机制. 在克拉通破坏过程中, 可能既存在下地壳侧向拆沉作用也存在自下而上的地幔热侵蚀作用, 伴有不同形式的熔体-橄榄岩反应, 不过这些是二级机制或者说只是不同的作用方式.

地震成像确定的华北克拉通岩石圈结构、上地幔速度结构、各向异性状态以及地幔过渡带结构, 揭示了俯冲板块和岩石圈根以及周围软流圈地幔之间存在相互作用. 大陆边缘岩石圈厚度的显著变化, 以及滞留的板片物质前端进入下地幔诱发下地幔物质上升, 可能造成小尺度对流和局部地幔流动的不稳定性(如图 15 中 E-W 向的纵剖面示意). 研究岩石圈地幔与软流圈地幔对流之间存在的相互作用, 是深入认识华北克拉通破坏的构造动力作用的重要途径. 深部结构的地震学研究探测到了扬子板块向北俯冲到华北克拉通下方的残留构造. 根据它们与勉略缝合带和商丹缝合带的关联, 推测该残留构造分别是中古生代北秦岭与华北克拉通聚合, 以及三叠纪南秦岭与扬子板块聚合产生的两个低角度俯冲物质通道(如图 15 中 S-N 向的纵剖面示意). 深部结构探测将为我们理解岩石圈地幔在大陆演化中的作用提供重要信息和证据.

华北克拉通东部的破坏不仅表现在岩石圈厚度的大规模减薄, 更重要的是表现在岩石圈的组成、性质和结构的巨大改变以及广泛发育的构造-岩浆作用. 华北克拉通岩石圈经历了多期的熔体/流体的改造过程, 复杂的岩石-熔体作用最终导致了华北克拉通岩石圈物质组成和性质的巨大变化. 通过地幔橄榄岩的岩石学和地球化学特征的综合对比研究, 发现全球其他地区(如非洲、南美、北美、澳洲、欧洲和亚洲等)的古老克拉通及其周边地区的古老岩石圈地幔同样都受到熔体不同程度的改造[67]. 因此, 华北克拉通岩石圈的这一演化规律很可能具有普遍意义, 应在古老克拉通研究中给予足够的重视.

7 展望

上述研究结果表明, 华北克拉通破坏不是一个特殊的地质现象, 而是特定动力学背景下大陆岩石圈演化的产物. 重视不同学科之间的相互印证, 将华北克拉通破坏的研究置于全球大陆演化背景下, 开展全球克拉通对比研究, 开展与造山带演化的对比研究; 从全球的视角理解大陆形成和演化规律, 从区域差异性和共性不同的角度进一步认识大陆岩石圈属性保持不变与破坏以及大陆形成和演化规律, 将是继续深入研究的关键问题.

尽管目前已获得了太平洋板块俯冲是造成华北克拉通破坏主要动力作用的一些证据, 但还需要多学科综合集成, 进一步认识太平洋板块俯冲与华北克拉通破坏的机制、状态、过程、规律等问题. 例如, 中国东部中-新生代岩浆源区中水和俯冲板片组分的

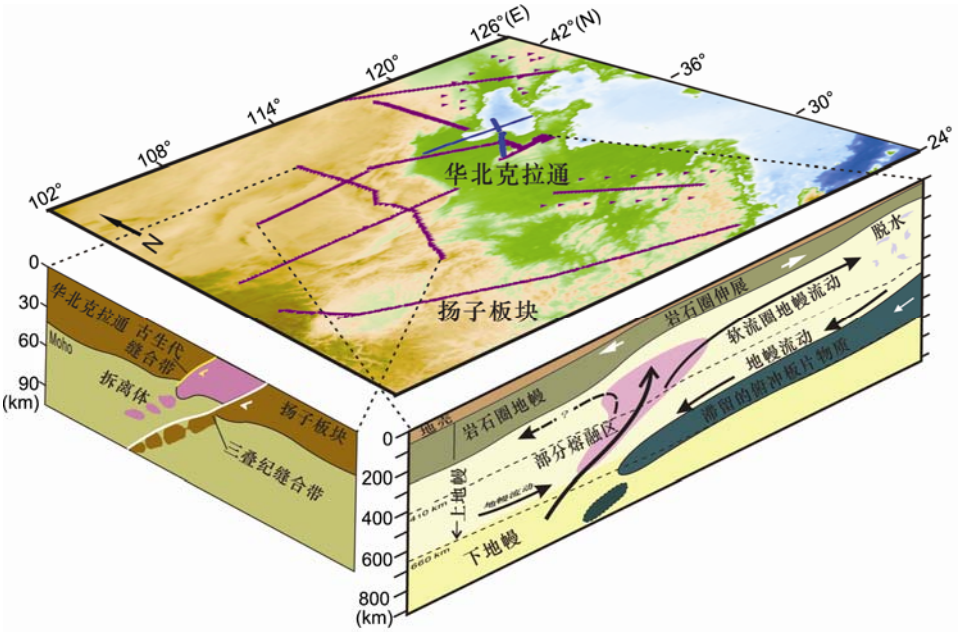

图 15　研究华北克拉通地壳-上地幔结构揭示的深部过程示意图

紫红色三角表示流动地震台阵观测台站, 蓝色圆点表示海陆联合观测台站. E-W 向纵剖面表示俯冲板块与岩石圈相互作用对华北克拉通的改造; S-N 向纵剖面表示华北克拉通-扬子板块拼合的残留构造痕迹

来源, 太平洋板块俯冲历史的重建, 俯冲板片与岩石圈地幔之间相互作用的方式及其物理化学记录, 俯冲板片组分识别, 岩石圈地幔的富水和脱水机制和时间, 地幔流动状态, 岩石圈地幔与软流圈地幔之间的转换关系和相互作用等. 对这些问题的深入探索, 有赖于获得新的观测资料及其新的研究思路. 记录太平洋板块俯冲及其与大陆岩石圈相互作用过程的岩石样品和构造信息十分难得, 通过物理模拟和数值模拟研究认识这些作用的机制, 判断可能发生的构造作用, 是尤为重要的工作.

目前的研究已经发现, 岩石圈减薄在全球其他克拉通中也多有发生, 但大多并不伴随克拉通的破坏.我们初步认为, 保留整体属性不变的克拉通岩石圈减薄(如印度克拉通)主要与地幔热柱活动有关; 只有当受到大洋板块俯冲作用的强烈影响时(如华北克拉通和北美怀俄明克拉通), 克拉通破坏才有可能发生. 我们需要继续深入研究这一基本特征所反映的深部构造作用规律, 特别是岩石圈-软流圈界面在克拉通破坏过程中的物理化学作用; 需要理解大洋板块俯冲对克拉通岩石圈地幔侧向减薄与上地幔对流垂向侵蚀对克拉通破坏之间在时间和空间上的联系.

研究克拉通破坏, 提供了窥测地球内部动力学过程的一个窗口. 大陆再造, 涉及大陆岩石圈的变形、变质和熔融, 是另一源于地球内部的标志性动力学过程. 与华北克拉通长期保持属性不变、直到晚中生代遭受破坏不同, 中国华南自古元古代早期开始克拉通化到新元古代中期发生破坏[122], 在显生宙一直保持着长期构造活动性以及多次强烈的岩浆与成矿作用, 代表了完全不同的另一类大陆演化方式. 以对克拉通破坏的新认识为基础, 对比研究华北与华南大陆差异性演化的机制与原因, 是全面理解大陆再造、深化大陆形成与演化研究的另一个突破口.

《华北克拉通破坏》重大研究计划实施的重要启示是, 地球科学研究必须要有全球视野. 从理解大陆形成演化的角度出发, 碰撞造山带是地球上与克拉通同等重要的另一类构造单元. 特提斯造山带西起西欧南缘, 向东经地中海、伊朗高原、青藏高原、进入东南亚, 是不同时代特提斯洋(海)在消亡过程中逐步形成的弧陆碰撞造山带[163]. 值得关注的是, 同为大陆之间的碰撞, 特提斯造山带在其西端形成线性的阿尔卑斯山, 那里是近代地质学的发源地; 在其中部形成著名的伊朗高原和青藏高原; 而在其东端则留下大片的多岛海, 其构造样式以大规模走滑为主. 构造地貌的巨大差异表明不同地段的深部过程显著

不同; 其中阿尔卑斯山和青藏高原南端喜马那雅山产有超高压变质岩, 指示那里的大陆地壳俯冲进入到地幔深度. 对特提斯造山带的深入研究, 是中国地球科学家走向世界的桥梁.

致谢 感谢陈颙院士邀请撰写本文, 感谢张国伟、李曙光、金振民、邹广田、范蔚茗、张先康等诸位先生有益的建议. 感谢郑永飞、万天丰和匿名审稿人对本文的修改和建议.

参考文献

1 翁文灏. 中国东部中生代以来之地壳运动及火山活动. 中国地质学会志, 1927, 6: 9–37
2 陈国达. 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, 1956, 36: 239–272
3 Xu Z. Etude tectonique et microtectonique de la chaine Poleozoique et triasique des Quilings (Chine). These Dedoctorat. Univ Sci Tech Languedoc, Montpellier, 1987
4 范蔚茗, Menzies M A. 中国东部古老岩石圈下部的破坏和软流圈地幔的增生. 大地构造与成矿学, 1992, 16: 171–180
5 Menzies M, Xu Y G, Zhang H F, et al. Integration of geology, geophysics and geochemistry: A key to understanding the North China Craton. Lithos, 2007, 96: 1–21
6 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. 岩石学报, 2008, 24: 1145–1174
7 高山, 章军锋, 许文良, 等. 拆沉作用与华北克拉通破坏. 科学通报, 2009, 54: 1962–1973
8 徐义刚, 李洪颜, 庞崇进, 等. 论华北克拉通破坏的时限. 科学通报, 2009, 54: 1974–1989
9 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. 科学通报, 2009, 54: 2008–2026
10 郑建平. 不同时空背景幔源物质对比与华北深部岩石圈破坏和增生置换过程. 科学通报, 2009, 54: 1990–2007
11 朱日祥, 郑天愉. 华北克拉通破坏机制和古元古代板块构造体系. 科学通报, 2009, 54: 1950–1961
12 朱日祥, 陈凌, 吴福元, 等. 华北克拉通破坏的时间、范围与机制. 中国科学: 地球科学, 2011, 41: 583–592
13 Chen L, Wen L, Zheng T Y. A wave equation migration method for receiver function imaging: 1. Theory. J Geophys Res, 2005, 110: B11309, doi: 10.1029/2005JB003665
14 Chen L. Lithospheric structure variations between the eastern and central North China Craton from S- and P-receiver function migration. Phys Earth Planet Inter, 2009, 173: 216–227
15 Chen L, Cheng C, Wei Z G. Seismic evidence for significant lateral variations in lithospheric thickness beneath the central and western North China Craton. Earth Planet Sci Lett, 2009, 286: 171–183
16 Chen L, Wang T, Zhao L, et al. Distinct lateral variation of lithospheric thickness in the Northeastern North China Craton. Earth Planet Sci Lett, 2008, 267: 56–68
17 Chen L, Zheng T Y, Xu W. A thinned lithospheric image of the Tanlu Fault Zone, eastern China: Constructed from wave equation based receiver function migration. J Geophys Res, 2006, 111: B09312, doi: 10.1029/2005JB003974
18 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. Phys Earth Planet Inter, 2006, 159: 43–58
19 Zheng T Y, Chen L, Zhao L, et al. Crustal structure across the Yanshan belt at the northern margin of the North China Craton. Phys Earth Planet Inter, 2007, 161: 36–49
20 Zheng T Y, Zhao L, Zhu R X. New evidence from seismic imaging for subduction during assembly of the North China Craton. Geology, 2009, 37: 395–398
21 Zheng T Y, Zhao L, Xu W W, et al. Insight into modification of North China Craton from seismological study in the Shandong Province. Geophys Res Lett, 2008, 35: L22305, doi: 10.1029/2008GL035661
22 Zheng T Y, Zhao L, Zhu R X. Insight into the geodynamics of cratonic reactivation from seismic analysis of the crust-mantle boundary. Geophys Res Lett, 2008, 35: L08303, doi: 10.1029/2008GL033439
23 Zheng T Y, Zhu R X, Zhao L, et al. Intra-lithospheric mantle structures recorded continental subduction. J Geophys Res, 2012, 117: B03308, doi: 10.1029/2011JB008873
24 Zhao L, Allen R, Zheng T Y, et al. High-resolution body-wave tomography models of the upper mantle beneath eastern China and the adjacent areas. Geochem Geophys Geosyst, 2012, 13: Q06007, doi: 10.1029/2012GC004119
25 Zhao L, Allen R M, Zheng T Y, et al. Reactivation of an Archean craton: Constraints from P- and S-wave tomography in North China. Geophys Res Lett, 2009, 36: L17306, doi: 10.1029/2009GL039781

26 Jiang M M, Ai Y, Chen L, et al. Local modification of the lithosphere beneath the central and western North China Craton: 3-D constraints from Rayleigh wave tomography. Gondwana Res, 2012, accepted

27 Zhao L, Xue M. Mantle flow pattern and geodynamic cause of the North China Craton reactivation: Evidence from seismic anisotropy. Geochem Geophys Geosyst, 2010, 11: Q07010, doi: 10.1029/2010GC003068

28 Zhao L, Zheng T Y. Using shear wave splitting measurements to investigate the upper mantle anisotropy beneath the North China Craton: Distinct variation from east to west. Geophys Res Lett, 2005, 32: L10309, doi: 10.1029/2005GL022585

29 Zhao L, Zheng T Y. Complex upper-mantle deformation beneath the North China Craton: Implications for lithospheric thinning. Geophys J Int, 2007, 170: 1095–1099

30 Zhao L, Zheng T Y, Chen L, et al. Shear wave splitting in eastern and central China: Implications for upper mantle deformation beneath continental margin. Phys Earth Planet Inter, 2007, 162: 73–84

31 Zhao L, Zheng T Y, Lü G. Insight into craton evolution: Constraints from shear wave splitting in the North China Craton. Phys Earth Planet Inter, 2008, 168: 153–162

32 Zhao L, Zheng T Y, Lü G, et al. No direct correlation of mantle flow beneath the North China Craton to the India-Eurasia collision: Constraints from new SKS wave splitting measurements. Geophys J Int, 2011, 187: 1027–1037

33 Ai Y, Zheng T Y. The upper mantle discontinuity structure beneath eastern China. Geophys Res Lett, 2003, 30: 2089, doi: 10.1029/2003GL017678

34 Ai Y, Zheng T Y, Xu W, et al. Small scale hot upwelling near the North Yellow Sea of eastern China. Geophys Res Lett, 2008, 35: L20305, doi: 10.1029/2008GL035269

35 Chen L, Ai Y. Discontinuity structure of the mantle transition zone beneath the North China Craton from receiver function migration. J Geophys Res, 2009, 114: B06307, doi: 10.1029/2008JB006221

36 Chen L, Zheng T Y, Xu W. Receiver function migration image of the deep structure in the Bohai Bay Basin, eastern China. Geophys Res Lett, 2006, 33: L20307, doi: 10.1029/2006GL027593

37 许卫卫, 郑天愉, 赵亮. 华北地区 410 km 间断面和 660 km 间断面结构——克拉通活化的地幔动力学状态探测. 中国科学: 地球科学, 2011, 41: 678–685

38 Griffin W L, Zhang A D, O'Reilly S Y, et al. Phanerozoic evolution of the lithosphere beneath the Sino-Korean Craton. In: Flower M, Chung S L, Lo C H, et al, eds. Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia. American Geophysical Union, 1998. 107–126

39 Xiao Y, Zhang H F, Fan W M, et al. Evolution of lithospheric mantle beneath the Tan-Lu fault zone, eastern North China Craton: Evidence from petrology and geochemistry of peridotite xenoliths. Lithos, 2010, 117: 229–246

40 Liu J, Rudnick R L, Walker R J, et al. Mapping lithospheric boundaries using Os isotopes of mantle xenoliths: An example from the North China Craton. Geochim Cosmochim Acta, 2011, 75: 3881–3902

41 Tang Y J, Zhang H F, Ying J F, et al. Highly heterogeneous lithospheric mantle beneath the Central Zone of the North China Craton evolved from Archean mantle through diverse melt refertilization. Gondwana Res, 2012, doi: 10.1016/j.gr.2012.1001.1006

42 Zhang H F, Deloule E, Tang Y J, et al. Melt/rock interaction in remains of refertilized Archean lithospheric mantle in Jiaodong Peninsula, North China Craton: Li isotopic evidence. Contrib Mineral Petrol, 2010, 160: 261–277

43 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. Lithos, 2001, 57: 43–66

44 Zhang H F, Goldstein S, 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. Contrib Mineral Petrol, 2008, 155: 271–293

45 Zhang H F, Goldstein S L, Zhou X H, et al. Comprehensive refertilization of lithospheric mantle beneath the North China Craton: Further Os-Sr-Nd isotopic constraints. J Geol Soc London, 2009, 166: 249–259

46 Xiao Y, Zhang H F. Effects of melt percolation on platinum group elements and Re-Os systematics of peridotites from the Tan-Lu fault zone, eastern North China Craton. J Geol Soc London, 2011, 168: 1201–1214

47 Gao S, Rudnick R L, Carlson R W, et al. Re-Os evidence for replacement of ancient mantle lithosphere beneath the North China Craton. Earth Planet Sci Lett, 2002, 198: 307–322

48 Wu F Y, Walker R J, Yang Y H, et al. The chemical-temporal evolution of lithospheric mantle underlying the North China Craton. Geochim Cosmochim Acta, 2006, 70: 5013–5034

49 Zhang H F, Ying J F, Santosh M, et al. Episodic growth of Precambrian lower crust beneath the North China Craton: A synthesis. Precambrian Res, 2012, doi: 10.1016/j.precamres.2011.1004.1006

50 Zhang H F, Sun M, Zhou M F, et al. Highly heterogeneous Late Mesozoic lithospheric mantle beneath the North China Craton: Evidence

from Sr-Nd-Pb isotopic systematics of mafic igneous rocks. Geol Mag, 2004, 141: 55–62
51 Zhang H F, Sun M, Zhou X H, et al. Mesozoic lithosphere destruction beneath the North China Craton: Evidence from major-, trace-element and Sr-Nd-Pb isotope studies of Fangcheng basalts. Contrib Mineral Petrol, 2002, 144: 241–254
52 Zhang H F, Nakamura E, Kobayashi K, et al. Recycled crustal melt injection into lithospheric mantle: Implication from cumulative composite and pyroxenite xenoliths. Int J Earth Sci, 2010, 99: 1167–1186
53 Xu Y G, Ma J L, Huang X L, et al. Early Cretaceous gabbroic complex from Yinan, Shandong Province: Petrogenesis and mantle domains beneath the North China Craton. Int J Earth Sci, 2004, 93: 1025–1041
54 Gao S, Rudnick R L, Xu W L, et al. Recycling deep cratonic lithosphere and generation of intraplate magmatism in the North China Craton. Earth Planet Sci Lett, 2008, 270: 41–53
55 Xu W, Hergt J M, Gao S, et al. Interaction of adakitic melt-peridotite: Implications for the high-$Mg^{\#}$ signature of Mesozoic adakitic rocks in the eastern North China Craton. Earth Planet Sci Lett, 2008, 265: 123–137
56 Xu W, Yang D, Gao S, et al. Geochemistry of peridotite xenoliths in Early Cretaceous high-$Mg^{\#}$ diorites from the Central Orogenic Block of the North China Craton: The nature of Mesozoic lithospheric mantle and constraints on lithospheric thinning. Chem Geol, 2010, 270: 257–273
57 Ying J F, Zhang H F, Tang Y J. Lower crustal xenoliths from Junan, Shandong Province and their bearing on the nature of the lower crust beneath the North China Craton. Lithos, 2010, 119: 363–376
58 Zhang H F. Destruction of ancient lower crust through magma underplating beneath Jiaodong Peninsula, North China Craton: U-Pb and Hf isotopic evidence from granulite xenoliths. Gondwana Res, 2012, 21: 281–292
59 Liu S A, Li S, Guo S, et al. The Cretaceous adakitic-basaltic-granitic magma sequence on south-eastern margin of the North China Craton: Implications for lithospheric thinning mechanism. Lithos, 2012, 134–135: 163–178
60 Ying J F, Zhang H F, Kita N, et al. Nature and evolution of Late Cretaceous lithospheric mantle beneath the eastern North China Craton: Constraints from petrology and geochemistry of peridotitic xenoliths from Jünan, Shandong Province, China. Earth Planet Sci Lett, 2006, 244: 622–638
61 Ying J F, Zhang H F, Tang Y J. Zoned olivine xenocrysts in a late Mesozoic gabbro from the southern Taihang Mountains: Implications for old lithospheric mantle beneath the central North China Craton. Geol Mag, 2010, 147: 161–170
62 Ying J F, Zhang H F, Tang Y J. Crust-mantle interaction in the central North China Craton during the Mesozoic: Evidence from zircon U-Pb chronology, Hf isotope and geochemistry of syenitic-monzonitic intrusions from Shanxi Province. Lithos, 2011, 125: 449–462
63 Zhang H F, Yang Y H, Santosh M, et al. Evolution of the Archean and Paleoproterozoic lower crust beneath the Trans-North China Orogen and the Western Block of the North China Craton. Gondwana Res, 2012, doi: 10.1016/j.gr.2011.1008.1011
64 Zhang H F, Zhu R X, Santosh M, et al. Episodic widespread magma underplating beneath the North China Craton in the Phanerozoic: Implications for craton destruction. Gondwana Res, 2012, doi: 10.1016/j.gr.2011.1012.1006
65 Zheng J P, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. Continental collision and accretion recorded in the deep lithosphere of central China. Earth Planet Sci Lett, 2008, 269: 497–507
66 Hu S, He L, Wang J. Heat flow in the continental area of China: A new data set. Earth Planet Sci Lett, 2000, 179: 407–419
67 Xu Y G, Blusztajn J, Ma J L, et al. Late Archean to Early Proterozoic lithospheric mantle beneath the western North China Craton: Sr-Nd-Os isotopes of peridotite xenoliths from Yangyuan and Fansi. Lithos, 2008, 102: 25–42
68 Tang Y J, Zhang H F, Ying J F, et al. Widespread refertilization of cratonic and circum-cratonic lithospheric mantle. Earth-Sci Rev, 2012, in revision
69 Tang Y J, Zhang H F, Nakamura E, et al. Multistage melt/fluid-peridotite interactions in the refertilized lithospheric mantle beneath the North China Craton: Constraints from the Li-Sr-Nd isotopic disequilibrium between minerals of peridotite xenoliths. Contrib Mineral Petrol, 2011, 161: 845–861
70 Tang Y J, Zhang H F, Deloule E, et al. Slab-derived lithium isotopic signatures in mantle xenoliths from northeastern North China Craton. Lithos, 2012, doi: 10.1016/j.lithos.2011.12.001
71 Yang W, Teng F Z, Zhang H F. Chondritic magnesium isotopic composition of the terrestrial mantle: A case study of peridotite xenoliths from the North China craton. Earth Planet Sci Lett, 2009, 288: 475–482
72 Zhao X, Zhang H, Zhu X, et al. Iron isotope variations in spinel peridotite xenoliths from North China Craton: Implications for mantle metasomatism. Contrib Mineral Petrol, 2010, 160: 1–14
73 Zhao X, Zhang H, Zhu X, et al. Iron isotope evidence for multistage melt-peridotite interactions in the lithospheric mantle of eastern China. Chem Geol, 2012, 292–293: 127–139

74 Zhang H F, Sun Y L, Tang Y J, et al. Melt-peridotite interaction in the Pre-Cambrian mantle beneath the western North China Craton: Petrology, geochemistry and Sr, Nd and Re isotopes. Lithos, 2012, doi: 10.1016/j.lithos.2012.1001.1027

75 Peslier A H, Woodland A B, Bell D R, et al. Olivine water contents in the continental lithosphere and the longevity of cratons. Nature, 2010, 467: 78–81

76 Xia Q, Liu J, Liu S, et al. High water content in the Mesozoic lithospheric mantle of the North China Craton and implications for its destruction. Earth Planet Sci Lett, 2012, under review

77 O'Leary J A, Gaetani G A, Hauri E H. The effect of tetrahedral Al^{3+} on the partitioning of water between clinopyroxene and silicate melt. Earth Planet Sci Lett, 2010, 297: 111–120

78 Michael P J. The concentration, behavior and storage of H_2O in the suboceanic upper mantle: Implications for mantle metasomatism. Geochim Cosmochim Acta, 1988, 52: 555–566

79 Sobolev A V, Chaussidon M. H_2O concentrations in primary melts from supra-subduction zones and mid-ocean ridges: Implications for H_2O storage and recycling in the mantle. Earth Planet Sci Lett, 1996, 137: 45–55

80 Saal A E, Hauri E H, Langmuir C H, et al. Vapour undersaturation in primitive mid-ocean-ridge basalt and the volatile content of Earth's upper mantle. Nature, 2002, 419: 451–455

81 Simons K, Dixon J, Schilling J G, et al. Volatiles in basaltic glasses from the Easter-Salas y Gomez Seamount Chain and Easter Microplate: Implications for geochemical cycling of volatile elements. Geochem Geophys Geosyst, 2002, 3: 1039, doi: 10.1029/2001GC000173

82 Bell D R, Rossman G R. Water in Earth's mantle: The role of nominally anhydrous minerals. Science, 1992, 255: 1391–1397

83 Grant K, Ingrin J, Lorand J, et al. Water partitioning between mantle minerals from peridotite xenoliths. Contrib Mineral Petrol, 2007, 154: 15–34

84 Windley B F, Maruyama S, Xiao W J. Delamination/thinning of sub-continental lithospheric mantle under Eastern China: The role of water and multiple subduction. Am J Sci, 2010, 310: 1250–1293

85 Xia Q K, Hao Y T, Li P, et al. Low water content of the Cenozoic lithospheric mantle beneath the eastern part of the North China Craton. J Geophys Res, 2010, 115: B07207, doi: 10.1029/2009JB006694

86 Xia Q K, Hao Y T, Liu S C, et al. Water contents of the Cenozoic lithospheric mantle beneath the western part of the North China Craton: Peridotite xenolith constraints. Gondwana Res, 2012, doi: 10.1016/j.gr.2012.01.010:

87 Li Z X, Lee C T A, Peslier A H, et al. Water contents in mantle xenoliths from the Colorado Plateau and vicinity: Implications for the mantle rheology and hydration-induced thinning of continental lithosphere. J Geophys Res, 2008, 113: B09210, doi: 10.1029/2007JB005540

88 Peslier A H, Luhr J F, Post J. Low water contents in pyroxenes from spinel-peridotites of the oxidized, sub-arc mantle wedge. Earth Planet Sci Lett, 2002, 201: 69–86

89 Sundvall R, Stalder R. Water in upper mantle pyroxene megacrysts and xenocrysts: A survey study. Am Mineral, 2011, 96: 1215–1227

90 翟明国. 克拉通化与华北陆块的形成. 中国科学: 地球科学, 2011, 41: 1037–1046

91 Xiao W, 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. Tectonics, 2003, 22: 1069, doi: 10.1029/2002TC001484

92 Zorin Y A. Geodynamics of the western part of the Mongolia-Okhotsk collisional belt, Trans-Baikal region (Russia) and Mongolia. Tectonophysics, 1999, 306: 33–56

93 张长厚, 李程明, 邓洪菱, 等. 燕山-太行山北段中生代收缩变形与华北克拉通破坏. 中国科学: 地球科学, 2011, 41: 593–617

94 Jian P, Liu D, Kröner A, et al. Evolution of a Permian intraoceanic arc-trench system in the Solonker suture zone, Central Asian Orogenic Belt, China and Mongolia. Lithos, 2010, 118: 169–190

95 Yang J H, Wu F Y, Shao J A, et al. Constraints on the timing of uplift of the Yanshan Fold and Thrust Belt, North China. Earth Planet Sci Lett, 2006, 246: 336–352

96 Zhu G, Liu G, Niu M, et al. Syn-collisional transform faulting of the Tan-Lu fault zone, East China. Int J Earth Sci, 2009, 98: 135–155

97 Maruyama S, Isozaki Y, Kimura G, et al. Paleogeographic maps of the Japanese Islands: Plate tectonic synthesis from 750 Ma to the present. Isl Arc, 1997, 6: 121–142

98 Xu J, Zhu G, Tong W, et al. Formation and evolution of the Tancheng-Lujiang wrench fault system: A major shear system to the northwest of the Pacific Ocean. Tectonophysics, 1987, 134: 273–310

99 Zhu G, Niu M, Xie C, et al. Sinistral to normal faulting along the Tan-Lu Fault Zone: Evidence for geodynamic switching of the East China continental margin. Anglais, 2010, 118: 277–293

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

101 Zhu G, Wang Y, Liu G, et al. $^{40}Ar/^{39}Ar$ dating of strike-slip motion on the Tan-Lu fault zone, East China. J Struct Geol, 2005, 27: 1379–1398

102 朱光, 胡召齐, 陈印, 等. 华北克拉通东部早白垩世伸展盆地发育过程对克拉通破坏的指示. 地质通报, 2008, 27: 1594–1604

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

104 Gao S, Rudnick R, Yuan H, et al. Recycling lower continental crust in the North China Craton. Nature, 2004, 432: 892–897

105 Zhang X H, Mao Q, Zhang H F, et al. A Jurassic peraluminous leucogranite from Yiwulüshan, western Liaoning, North China Craton: Age, origin and tectonic significance. Geol Mag, 2008, 145: 305–320

106 Yang D B, Xu W L, Wang Q H, et al. Chronology and geochemistry of Mesozoic granitoids in the Bengbu area, central China: Constraints on the tectonic evolution of the eastern North China Craton. Lithos, 2010, 114: 200–216

107 Jiang Y H, Jiang S Y, Ling H F, et al. Petrogenesis and tectonic implications of Late Jurassic shoshonitic lamprophyre dikes from the Liaodong Peninsula, NE China. Miner Petrol, 2010, 100: 127–151

108 Charles N, Gumiaux C, Augier R, et al. Metamorphic Core Complexes vs. synkinematic plutons in continental extension setting: Insights from key structures (Shandong Province, eastern China). J Asian Earth Sci, 2011, 40: 261–278

109 张必龙, 朱光, 姜大志, 等. 辽西医巫闾山变质核杂岩的形成过程与晚侏罗世伸展事件. 地质论评, 2011, 57: 779–798

110 Davis G A, Qian X L, Zheng Y D, et al. Mesozoic deformation and plutonism in the Yunmeng Shan: A Chinese metamorphic core complex north of Beijing, China. In: Yin A, Harrison T M, eds. The Tectonic Evolution of Asia. New York: Cambridge University Press, 1996. 253–280

111 Darby B J, Davis G A, Zhang X H, et al. The newly discovered Waziyu metamorphic core complex, Yiwulushan, western Liaoning Province, Northwest China. Earth Sci Front, 2004, 11: 145–155

112 Lin W, Faure M, Monié P, et al. Mesozoic extensional tectonics in Eastern Asia: The south Liaodong Peninsula Metamorphic Core Complex (NE China). J Geol, 2008, 116: 134–154

113 Lin W, Monié P, Faure M, et al. Cooling paths of the NE China crust during the Mesozoic extensional tectonics: Example from the south-Liaodong peninsula metamorphic core complex. J Asian Earth Sci, 2011, 42: 1048–1065

114 Liu J, Davis G A, Lin Z, 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. Tectonophysics, 2005, 407: 65–80

115 Yang J H, Wu F Y, Chung S L, et al. Rapid exhumation and cooling of the Liaonan metamorphic core complex: Inferences from $^{40}Ar/^{39}Ar$ thermochronology and implications for Late Mesozoic extension in the eastern North China Craton. Geol Soc Am Bull, 2007, 119: 1405–1414

116 刘俊来, 纪沫, 申亮, 等. 辽东半岛早白垩世伸展构造组合、形成时代及区域构造内涵. 中国科学: 地球科学, 2011, 41: 618–637

117 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. Gondwana Res, 2012, 22: 86–103

118 林伟, 王清晨, 王军, 等. 辽东半岛晚中生代伸展构造——华北克拉通破坏的地壳响应. 中国科学: 地球科学, 2011, 41: 638–653

119 陈印, 朱光, 胡召齐, 等. 华北克拉通东部盆地白垩-古近纪构造沉降的时空变化及其与克拉通破坏的关系. 地质科学, 2009, 44: 836–854

120 漆家福, 邓荣敬, 周心怀, 等. 渤海海域新生代盆地中的郯庐断裂带构造. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2008, 38: 19–29

121 Zhang H F, Sun M, Zhou X H, et al. Secular evolution of the lithosphere beneath the eastern North China Craton: Evidence from Mesozoic basalts and high-Mg andesites. Geochim Cosmochim Acta, 2003, 67: 4373–4387

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

123 Liu M, Cui X, Liu F. Cenozoic rifting and volcanism in eastern China: A mantle dynamic link to the Indo-Asian collision? Tectonophysics, 2004, 393: 29–42

124 Menzies M, Fan W, Zhang M. Palaeozoic and Cenozoic lithoprobe and the loss of >120 km of Archean lithosphere, Sino-Korean Craton, China. In: Prichard M, Alabaster T, Harris N B W, et al, eds. Magmatic Processes and Plate Tectonic. Geol Soc Spec Publ, 1993. 71–81

125 Wilde S A, Zhou X, Nemchin A A, et al. Mesozoic crust-mantle interaction beneath the North China craton: A consequence of the dispersal of Gondwanaland and accretion of Asia. Geology, 2003, 31: 817–820

126 邓晋福, 莫宣学, 赵海玲, 等. 中国东部岩石圈根/去根作用与大陆"活化". 现代地质, 1994, 8: 349–356

127 Menzies M, Xu Y. Geodynamics of the North China Craton. In: Flower M, Chung S L, Lo C H, et al, eds. Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia. Washington DC: Am Geophy Union, 1998. 155–165

128 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. Chem Geol, 2008, 247: 282–304

129 吴福元, 孙德有. 中国东部中生代岩浆作用与岩石圈减薄. 长春科技大学学报, 1999, 29: 313–318
130 吴福元, 孙德有, 张广良, 等. 论燕山运动的深部地球动力学本质. 高校地质学报, 2000, 6: 379–388
131 Xu Y G. Thermo-tectonic destruction of the archaean lithospheric keel beneath the Sino-Korean Craton in china: Evidence, timing and mechanism. Phy Chem Earth (A), 2001, 26: 747–757
132 Xu Y G. Diachronous lithospheric thinning of the North China Craton and formation of the Daxin'anling-Taihangshan gravity lineament. Lithos, 2007, 96: 281–298
133 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. Geol J China Uni, 2005, 11: 9–46
134 Zheng J P, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. Mineral chemistry of peridotites from Paleozoic, Mesozoic and Cenozoic lithosphere: Constraints on mantle evolution beneath Eastern China. J Petrol, 2006, 47: 2233–2256
135 Zheng J P, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. Mechanism and timing of lithospheric modification and replacement beneath the eastern North China Craton: Peridotitic xenoliths from the 100 Ma Fuxin basalts and a regional synthesis. Geochim Cosmochim Acta, 2007, 71: 5203–5225
136 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. Lithos, 2009, 110: 305–326
137 Li H Y, He B, Xu Y G, et al. U-Pb and Hf isotope analyses of detrital zircons from Late Paleozoic sediments: Insights into interactions of the North China Craton with surrounding plates. J Asian Earth Sci, 2010, 39: 335–346
138 Xu W, Gao S, Wang Q, et al. Mesozoic crustal thickening of the eastern North China Craton: Evidence from eclogite xenoliths and petrologic implications. Geology, 2006, 34: 721–724
139 Xu Y, Huang X L, Ma J L, et al. Crust-mantle interaction during the tectono-thermal reactivation of the North China Craton: Constraints from SHRIMP zircon U-Pb chronology and geochemistry of Mesozoic plutons from western Shandong. Contrib Mineral Petrol, 2004, 147: 750–767
140 Yang Q L, Zhao Z F, Zheng Y F. Modification of subcontinental lithospheric mantle above continental subduction zone: Constraints from geochemistry of Mesozoic gabbroic rocks in southeastern North China. Lithos, 2012, 146–147: 164–182
141 Chen L. Concordant structural variations from the surface to the base of the upper mantle in the North China Craton and its tectonic implications. Lithos, 2010, 120: 96–115
142 Ren J, Tamaki K, Li S, et al. Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in Eastern China and adjacent areas. Tectonophysics, 2002, 344: 175–205
143 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. 自然科学进展, 2006, 16: 21–26
144 Xu Y G, Chung S L, Ma J, et al. Contrasting Cenozoic lithospheric evolution and architecture in western and eastern Sino-Korean Craton: Constraints from geochemistry of basalts and mantle xenoliths. J Geol, 2004, 112: 593–605
145 Wu F Y, Lin J Q, Wilde S A, et al. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China. Earth Planet Sci Lett, 2005, 233: 103–119
146 Wu F Y, Yang J H, Wilde S A, et al. Geochronology, petrogenesis and tectonic implications of Jurassic granites in the Liaodong Peninsula, NE China. Chem Geol, 2005, 221: 127–156
147 Fukao Y, Obayashi M, Inoue H, et al. Subducting slabs stagnant in the Mantle Transition Zone. J Geophys Res, 1992, 97: 4809–4822
148 Huang J L, Zhao D. High-resolution mantle tomography of China and surrounding regions. J Geophys Res, 2006, 111: B09305, doi: 10.1029/2005JB004066
149 Li C, van der Hilst R D. Structure of the upper mantle and transition zone beneath Southeast Asia from traveltime tomography. J Geophys Res, 2010, 115: B07308, doi: 10.1029/2009JB006882
150 Zheng X, Cong B, Zhang W, et al. Petrochemistry of Cenozoic basaltic rocks in eastern China-Discussion. Sci Geol Sin, 1978, 3: 253–264
151 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. Lithos, 2011, 125: 940–955
152 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. Lithos, 2012, 146-147: 202–217
153 Xu Y G, Zhang H H, Qiu H N, et al. Oceanic crust components in continental basalts from Shuangliao, Northeast China: Derived from the mantle transition zone? Chem Geol, 2012, doi: 10.1016/j.chemgeo.2012.01.027
154 Zou H, Zindler A, Xu X, et al. Major, trace element, and Nd, Sr and Pb isotope studies of Cenozoic basalts in SE China: Mantle sources, regional variations, and tectonic significance. Chem Geol, 2000, 171: 33–47

155 秦秀峰. 牡丹江-密山地区第三纪玄武岩的年代学和地球化学研究: 地幔源区特征及其时空变化. 博士学位论文. 中国科学院研究生院, 2008. 125
156 Zindler A, Hart S. Chemical geodynamics. Annu Rev Earth Planet Sci, 1986, 14: 493–571
157 Yu S Y, Xu Y G, Ma J L, et al. Remnants of oceanic lower crust in the subcontinental lithospheric mantle: Trace element and Sr-Nd-O isotope evidence from aluminous garnet pyroxenite xenoliths from Jiaohe, Northeast China. Earth Planet Sci Lett, 2010, 297: 413–422
158 Xu Y G, Kuang Y S, Zhang H H. Recycled oceanic crust in the source of 100–40 Ma basalts in North China Craton: Evidence, provenance and significance. 2012
159 Hofmann A W. Sampling mantle heterogeneity through oceanic basalts: Isotopes and trace elements. In: Carlson R W, ed. Treatise on Geochemistry. New York: Elsevier, 2004. 61–101
160 Karato S. Rheology of the upper mantle: A synthesis. Science, 1993, 260: 771–778
161 Dixon J E, Dixon T H, Bell D R, et al. Lateral variation in upper mantle viscosity: Role of water. Earth Planet Sci Lett, 2004, 222: 451–467
162 Hyndman R, Currie C, Mazzotti S. Sunduction zone backarcs, mobile belts, and orogenic heat. GSA Today, 2005, 15: 4–10
163 Zheng Y F. Metamorphic chemical geodynamics in continental subduction zones. Chem Geol, 2012, http://dx.doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.02.005