



克拉通岩石圈的生长和再造

郑永飞^①, 吴福元^②

① 中国科学院壳幔物质与环境重点实验室, 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026;

② 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

E-mail: yfzheng@ustc.edu.cn

2009-06-07 收稿, 2009-06-08 接受

中国科学院知识创新工程重要方向性项目(编号: KZCX2-YW-Q08)和国家自然科学基金(批准号: 90714009 和 40634019)资助

摘要 华北克拉通岩石圈减薄研究已经成为近一个时期中国乃至世界固体地球科学研究的热点. 本文在讨论大陆地壳形成和演化的基础上, 概括了岩石圈地幔形成机制, 提出克拉通岩石圈减薄主要以两种方式发生在大陆岩石圈地幔下部, 一种是俯冲侵蚀(例如华北), 另一种是俯冲侵蚀与底垫消融相结合(例如扬子).

关键词

克拉通

岩石圈地幔

大陆地壳

板块构造

克拉通是形成于前寒武纪的稳定陆块, 由大陆地壳和陆下岩石圈地幔所组成. 一般认为, 岩石圈地幔是原始地幔经过熔体提取以后形成的. 通常假定这个原始地幔在主要元素上是富沃的, 在放射成因同位素上是亏损的, 因此地球化学上类似于未受到混染的软流圈. 被移走的是富Fe的富沃组分; 剩下的是富Mg的漂浮的地幔残留体, 相对难熔和缺水, 因此在演化过程中具有刚性和稳定的特点. 然而, 并不是所有的前寒武纪克拉通从它们形成以后都是处于稳定状态. 它们中的大多数在自古元古代聚合后一直保持相对稳定, 而另一些克拉通在新元古代和显生宙由于克拉通再活化而发生减薄. 也正因为如此, 克拉通岩石圈的改造和破坏已经成为大陆动力学研究的一个热点. 例如, 若干证据(地表地质学、捕虏体研究、地震和热流数据)表明, 形成于早前寒武纪的华北克拉通, 其厚的岩石圈根部在显生宙发生丢失^[1,2]. 这样, 华北克拉通已经成为世界上研究克拉通活化和再造的典型地区^[3~5]. 因此, 华北克拉通岩石圈地幔减薄的时间和机制就是《科学通报》本期专题的主要研究内容^[6~10].

地球上的克拉通表现出不同的大小, 具体取决于其保存潜力. 许多具有太古代地壳的克拉通, 其下并不存在太古代岩石圈地幔, 有些则是显示太古宙以后的强烈构造/岩浆活动. 太古代克拉通的保存受许多因素支

配, 其中最主要的是岩石圈地幔形成的时间和机制. 一般来说, 岩石圈地幔可以通过弧-陆碰撞把弧下地幔拼合到大陆边缘而发生侧向增生^[11~13], 或者通过高程度的地幔柱熔融发生垂向生长^[14~16]. 岩石圈地幔可以通过大洋岩石圈的平俯冲和底垫作用形成^[17], 或者由软流圈地幔物质沿大陆裂谷构造带板下作用形成^[18]. 由于岛弧玄武质熔体的提取, 弧下地幔通常是贫瘠的, 因此是难熔的. 但是, 如果富水流体流入地幔楔后熔体提取没有立即发生, 或者含水熔体交代地幔橄榄岩形成辉石岩, 岩石圈地幔会变得高度富沃. 从岩石学上来说, 贫瘠的岩石圈地幔主要是与IAB(岛弧玄武岩)、OIB(洋岛玄武岩)或者MORB(洋中脊玄武岩)型地壳熔体的提取相耦合, 结果是高度难熔的残留体成为克拉通岩石圈地幔. 如果富沃的岩石圈地幔没有经过熔体抽取, 那么它可能会与上覆地壳在化学分异时间上出现脱耦.

另一方面, 根据大陆地壳成因的板块构造模型, 早期的地壳是薄的, 由镁铁质岩石组成, 由软流圈地幔化学分异所形成. 板块构造体系是从洋壳向洋壳俯冲开始, 结果产生岛弧玄武岩(图 1(a)). 大洋板块汇聚引起岛弧之间的相互碰撞, 沿碰撞带发生变质作用和岩浆活动(图 1(b)). 俯冲洋壳在石榴石稳定场的部分熔融形成TTG 岩石, 由此发育成大陆核(图 1(c)). 在陆核和岛弧之下的洋壳俯冲导致新生地壳的进一步生长(图 1(d)),

引用格式: 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

Zheng Y F, Wu F Y. Growth and reworking of cratonic lithosphere. Chinese Sci Bull, 2009, 54, doi: 10.1007/s11434-009-0458-y

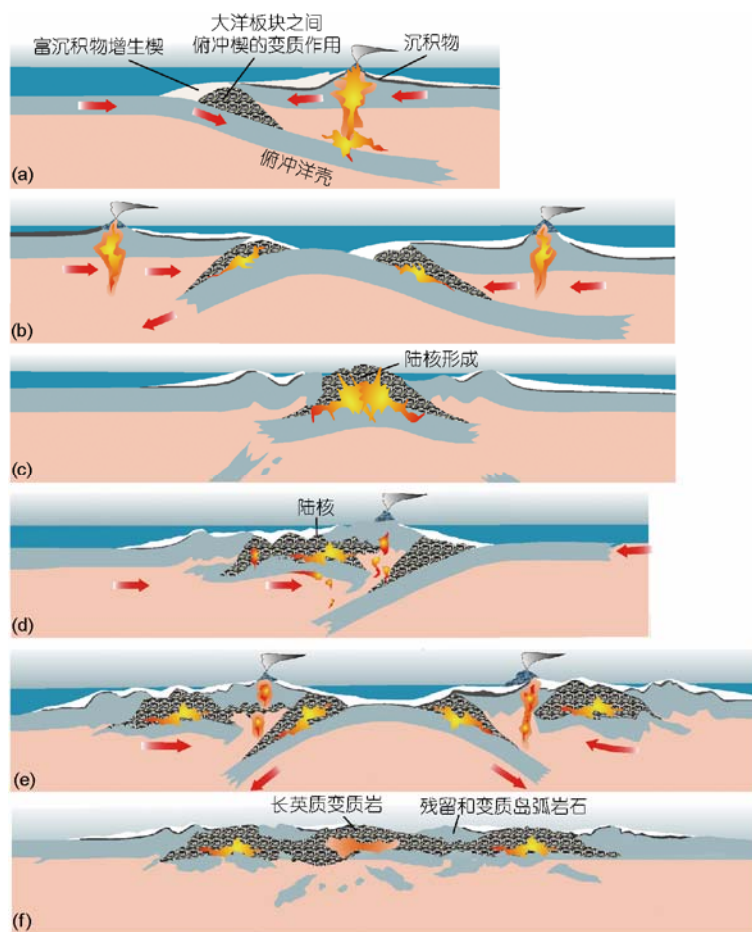


图 1 大陆地壳成因的板块构造模型(修改自Monroe 等人^[19])

(a) 大洋-大洋板块汇聚形成岛弧; (b) 岛弧汇聚引起碰撞带变质作用和岩浆活动; (c) 俯冲洋壳熔融产生 TTG 岩石形成大陆核; (d) 陆核和岛弧之下俯冲导致地壳生长; (e) 弧-陆碰撞和陆核汇聚引起大陆增生; (f) 陆-弧-陆碰撞形成克拉通岩石圈

弧-陆碰撞和陆核汇聚引起大陆增生(图 1(e)), 陆-弧-陆碰撞形成克拉通岩石圈(图 1(f)). 弧-陆碰撞和碰撞造山带构造垮塌是引起大陆地壳化学组成朝长英质方向演化的本质过程^[20]. 如果汇聚大陆之间发育有若干个弧, 由此会形成宽阔的造山带, 其中新生地壳经受广泛再造(例如, 江南造山带、中亚造山带和喜马拉雅-西藏). 与此相反, 如果在两个碰撞大陆之间没有弧的话, 那么就会形成狭窄的造山带, 可能伴有大陆地壳俯冲到地幔深度(例如, 大别-苏鲁和阿尔卑斯).

目前, 学术界对克拉通岩石圈的改造和破坏进行了许多研究^[5]. 国家自然科学基金委员会从 2008 年起设立重大研究计划来认识华北克拉通破坏. 这个研究计划围绕以下 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. 其总体科学目标是: 从地球系统科学的角度, 高度集成地质学、地球物理学和地球化学的分析技术、探测手段和利用高新技术为先导的观测、实验和理论研究成果, 认识华北克拉通破坏的时空分布范围、过程与机理, 克拉通破坏时地球内部不同圈层物质的性状、结构与相互作用, 克拉通破坏的浅部效应及对矿产资源、能源、灾害的控制机理, 提升人类对大陆形成与演化的认知水平. 本期《科学通报》为此组织一个专题^[6~10], 全面评述迄今为止已经获得的有关华北克拉通破坏的地球物理、地质学和地球化学观察和解释.

通过对比古生代金伯利岩和新生代玄武岩中地幔包体表明, 由厚的、冷的、难熔的太古代岩石圈组成的华北克拉通东部块体已经被薄的、热的、富沃的年轻岩石圈地幔所取代. 就华北克拉通岩石圈地幔减薄的时

间、程度和机制来说,存在两种端员假说,即热/化学侵蚀和下地壳拆沉。侵蚀假说认为,少量的SCLM被上涌的地幔逐渐消耗,而拆沉认为下部地壳整体移入岩石圈。无论哪一种假说,熔体与橄榄岩之间的相互作用都在SCLM的减薄中发挥着重要的作用^[7,9,21]。同时也有可能克拉通内部SCLM的减薄是侵蚀的结果,而克拉通边缘造山带根部的减薄则是拆沉的结果^[22]。

为了深入研究华北克拉通在物理化学变化和空间-时间变化的地球动力学,需要彻底地对整个克拉通以及其周边区域的岩石圈地壳和地幔的状态和结构进行研究。根据地震学构建的华北克拉通地壳和上地幔速度结构,朱日祥和郑天愉^[6]分析研究了岩石圈厚度、壳-幔边界特性、上地幔结构和变形的构造特征和变化规律等地球物理结果。结合岩石学和地球化学研究结果,他们提出了华北克拉通构造演化的一个上地幔流动模型,认为位于东亚陆块下的上地幔由于太平洋板块的中生代俯冲发生快速和不稳定的流动。这种区域地幔流动体系引起华北克拉通上地幔熔体/流体含量的增加,促进了大陆岩石圈的软化。

高山等人^[2]评述了近年来对华北克拉通岩石圈拆沉的化学和物理过程研究的有关进展,强调来自于榴辉岩的熔体与橄榄岩之间的相互作用而形成的辉石岩源区是拆沉的直接结果。从华北克拉通中生代玄武岩所表现的特点可以看出,这种辉石岩源区具有唯一的矿物学和地球化学特点。因此,熔体-橄榄岩反应对于华北克拉通破坏发挥了重要的作用。他们认为,这个过程在热-化学侵蚀模型中是导致克拉通破坏的驱动力,但是在拆沉模型中则是必然的结果。

徐义刚等人^[8]讨论了华北克拉通破坏的年代和持续时间,认为这些是理解华北克拉通破坏机制和动力学控制因素的关键所在。根据岩浆和盆地演化的趋势,他们认为华北克拉通的破坏是一个相对缓慢的过程,而不是一个突变的过程。尽管太平洋向东亚陆块的俯冲对于克拉通破坏发挥了决定性的作用,晚石炭纪古亚洲洋板块的向南俯冲和三叠纪华北与华南陆块之间的碰撞通过影响克拉通热和整体结构导致克拉通的再活化。

郑建平^[9]对比了不同捕获时间(如,古生代、中生代、新生代)和不同地点(如,板块内部或边缘、超岩石圈邻庐断裂或南-北重力梯度线)的火山岩中的地幔包体,以及华北克拉通南缘大别-苏鲁超高压变质带中的造山带橄榄岩。结果显示,克拉通岩石圈在结构和组成上存在不均一性。他认为,三叠纪华南陆块的俯冲和碰撞破坏了华北克拉通的整体性,而华北克拉通岩石圈地幔的拉张和构造侵位与俯冲陆块(造山带根部)拆离引起的软

流圈上涌有关。在早白垩-早第三纪时期,太平洋板块俯冲导致了软流圈上涌,结果触发了克拉通岩石圈的显著减薄。

无论是热-化学侵蚀模型还是下地壳拆沉模型,熔体-橄榄岩相互作用对于克拉通岩石圈地幔的再富化发挥了重要作用。为了对克拉通破坏的深入研究提供新的思路,张宏福^[10]评述了最近对华北克拉通中不同年龄地幔橄榄岩捕虏体和捕虏晶的研究结果,认为橄榄岩与不同来源熔体之间的相互作用引起了岩石圈地幔在成分、热体制和物理性质上的变化,这对于低密度和高难熔的太古代岩石圈地幔的减薄发挥了关键作用。因此,华北克拉通的破坏和减薄是橄榄岩-熔体(加上挥发分)相互作用、区域热异常(温度增加)和岩石圈拉张(减压)的综合结果。

虽然对华北克拉通减薄机制仍然存在很大争论,但是引起太古代地壳之下厚的地幔根部减薄的构造机制可以概括成两种:(1)大洋板块平俯冲到克拉通岩石圈之下所引起的侧向侵蚀(俯冲侵蚀);(2)大洋板块平俯冲引起的侧向侵蚀与超大陆裂解时裂谷岩浆作用引起的垂向侵蚀相结合(俯冲侵蚀+底垫消融)。

第一种机制的例子就是华北克拉通。中国东部新生代大陆玄武岩为此打开了一扇窗户^[21]。一般认为,东亚板内火山作用的亏损和富集端员分别来源于软流圈和陆下岩石圈地幔^[23~25]。与此相反,Zhang等人^[21]认为中国东部新生代玄武岩的地幔源区主要是不同成分的辉石岩,而这些辉石岩是太平洋板块俯冲到亚洲东部陆块之下时由熔体与橄榄岩之间的相互作用所产生。通过对辉石岩地球化学特征的确定和熔体交代事件年龄的约束,Zhang等人^[21]提出俯冲侵蚀是中国东部古老岩石圈地幔减薄的一个有效机制(图2)。这类减薄可以通过俯冲洋壳之上软流圈侧向对流来实现,伴随着造山带根部(岩石圈底部)的优先拆沉。这个构造过程的出现可能是对太平洋板块早白垩世旋转俯冲的响应^[26]。

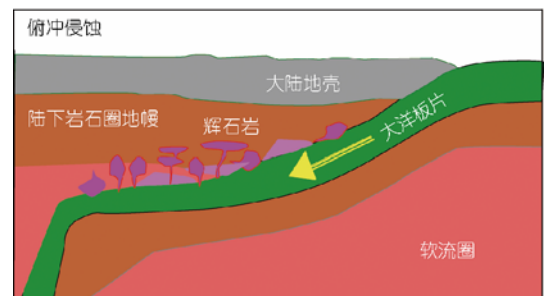


图2 中生代太平洋板块俯冲到中国大陆边缘之下的侧向侵蚀引起陆下岩石圈地幔减薄的构造模型(修改自Zhang等人^[21])

第二种机制的一个可能例子是华南陆块的扬子克拉通。扬子克拉通具有古元古代-太古代的地壳生长年龄^[22]，但是具有新元古代的地壳再造年龄^[20]。扬子克拉通之下岩石圈地幔具有不同的前寒武纪年龄，但总体上比太古代克拉通地幔更为富沃，密度较大。迄今为止，Re-Os同位素研究没有得到太古代地幔年龄^[27~30]。因此，太古代岩石圈地幔在中元古代时由于中元古代格林威尔期洋壳俯冲受到不同程度的替代，在新元古代中期由于Rodinia超大陆裂解引起的裂谷岩浆活动发生底垫消融。正是由于扬子克拉通具有减薄的岩石圈，可能使得其较小的太古代岩石圈块体在新元古代中期Rodinia超大陆裂解过程中难以受到构造“保护”而免遭破坏。这样在太古代地壳之下可能并不保存有厚的岩石圈根部。从这个角度来说，华南钾镁煌斑岩中具有太古代U-Pb年龄的锆石^[31]可能来自于俯冲的碎屑沉积物的再循环，与扬子克拉通太古代基底性质无关。

地震层层析成像结果显示，华北克拉通的岩石圈厚度存在明显的横向变化，在鄂尔多斯盆地是200~250 km，在太行山、燕山-辽西和辽东是100~150 km，在华北盆地是60~100 km，山东半岛和渤海则小于60 km^[32~35]。如果黄海是朝鲜半岛从中国陆块东部边缘分离而去所形成的弧后裂谷盆地，胶东和渤海的岩石圈厚度最薄(<60 km)则可能与黄海的形成有关。不过，华北克拉通的厚度变化的总体趋势是由西向东呈逐渐变薄。这是陆下岩石圈地幔由东到西逐渐减薄的构造显示。这个观察支持Zhang等人^[21]的推论，即中生代太平洋板块低角度俯冲在中国东部古老岩石圈地幔减薄中发挥了主要作用。下地壳拆沉模型最早是由Kay与Kay^[36]在解释造山带岩石圈减薄时提出的。应用这个模型的问题就是，虽然镁铁质地壳转变为榴辉岩是个密度变大的过程，但是榴辉岩与橄榄岩之间的密度差并不足以导致重力不稳定。这是因为在克拉通岩石圈内部，下地壳榴辉岩层的厚度远薄于岩石圈地幔层的厚度。而俯冲侵蚀对于陆下岩石圈地幔下部拆沉进入软流圈来说是一个有效的机制^[21]。这个机制不仅可以解释在华北克拉通岩石圈厚度小于~100 km的区域之下410 km不连续面

之上存在的高速异常^[35]，而且能够解释部分地幔化学不均一性^[37]。

也曾认为克拉通可以由地幔柱产生的活动热点所破坏^[38]。这需要详细论证地幔柱与克拉通破坏之间的因果关系，但是这已超出本文的范畴。以非洲南部克拉通为例，曾设想白垩纪年龄的地幔柱产生了大量金伯利岩浆，但是克拉通仍然保持其稳定性。这说明厚的稳定的克拉通的破坏并不是与地幔柱相关联。从物质组成来说，金伯利岩浆含有充分的再循环地壳(特别是交代的大洋玄武岩及其上覆大洋沉积物)的地球化学信息，指示了板块构造的作用^[39]。同样的情形也可能出现在世界上其他克拉通中，包括美国南部、澳大利亚、北大西洋、西伯利亚、印度和扬子。事实上，对于地幔柱是否存在，以及大火山岩省、洋岛玄武岩和大陆溢流玄武岩是否来自地幔柱，其本身就是有争议的问题^[39]。虽然已经有一些研究发现陆下岩石圈地幔减薄是紧随着大火山岩省的侵位而发生的，但是仍然亟待发现能够确切证明地球上存在地幔柱的地质学证据。如果假设地幔柱作用等同于软流圈上涌，并且上涌物质中含有溶解的再循环地壳和陆下岩石圈地幔组分，这个争论就可以得到平息。

总的来说，克拉通岩石圈地壳以太古代年龄为主的长英质岩石为特征，它们构成了地球上的一部分大陆核。世界上大多数陆核都形成于冥古宙和太古宙。在板块构造的作用下，克拉通作为岩石圈板块的一部分在地球表面移动，通过弧-弧和弧-陆碰撞作用而发展成为克拉通而得以稳定。克拉通化构造事件主要发生在晚太古代和中元古代。从此以后，它们既不会受到后期地幔柱的影响，也不会受到洋盆打开和闭合的影响，更不会受到地壳物质再循环进入地幔的影响。但是，俯冲侵蚀或者俯冲侵蚀与底垫消融相结合过程能够引起它们发生不同程度的破坏。另外，在部分熔融过程中水优先配分进入熔体。在地幔橄榄岩和辉石岩发生部分熔融时，水随熔体的移去导致难熔岩石圈地幔的形成。移去的水越多，要求地幔熔融的程度越高。由此所形成的岩石圈地幔越稳定。因此，水在克拉通的形成、改造和破坏过程发挥着关键作用。

参考文献

- 1 Menzies M A, Fan W, Zhang M. Palaeozoic and Cenozoic lithoprobes and loss of >120 km of Archaean lithosphere, Sino-Korean craton, China. In: Prichard H M, Alabaster T, Harris N B W, et al, eds. *Magmatic Processes and Plate Tectonics*. Geol Soc Spec Pub, 1993, 76: 71—81[[doi](#)]
- 2 Griffin W L, Zhang A, 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*. Am Geophys Union Geodyn Ser, 1998, 27: 107—126
- 3 Carlson R W, Pearson D G, James D E. Physical, chemical, and chronological characteristics of continental mantle. *Rev Geophys*,

- 2005, 43: RG1001,[\[doi\]](#)
- 4 Foley S F. Rejuvenation and erosion of the cratonic lithosphere. *Nature Geosci*, 2008, 1: 503—510[\[doi\]](#)
- 5 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
- 6 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. *科学通报*, 2009, 54: 1950—1961
- 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 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
- 10 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
- 11 Jordan T H. Structure and formation of the continental tectosphere. *J Petrol*, 1988, Spec Lithosph Iss: 11—13
- 12 Lee C T A. Geochemical/petrologic constraints on the origin of cratonic mantle. In: Benn K, Mareschal J C, Condie K C, eds. *Archean Geodynamics and Environments*. Washington D C: Am Geophys Union Monogr, 2006, 164: 89—114
- 13 Pearson D G, Wittig N. Formation of Archean continental lithosphere and its diamonds: The root of the problem. *J Geol Soc*, 2008, 165: 895—914[\[doi\]](#)
- 14 Boyd F R. Compositional distinction between oceanic and cratonic lithosphere. *Earth Planet Sci Lett*, 1989, 96: 15—26[\[doi\]](#)
- 15 Arndt N T, Albarède F, Lewin E. Strange partners: Formation and survival of continental crust and lithospheric mantle. *Geol Soc Spec Publ*, 2002, 199: 91—103[\[doi\]](#)
- 16 Griffin W L, O'Reilly S Y, Abe N, et al. The origin and evolution of Archean lithospheric mantle. *Precambrian Res*, 2003, 127: 19—41[\[doi\]](#)
- 17 Helmstaedt H, Schulze D J. Southern African kimberlites and their mantle sample: Implications for Archean tectonics and lithosphere evolution. *Geol Soc Austr Spec Pub*, 1989, 14: 358—368
- 18 Zheng Y F, Zhao Z F, Wu Y B, et al. Zircon U-Pb age, Hf and O isotope constraints on protolith origin of ultrahigh-pressure eclogite and gneiss in the Dabie orogen. *Chem Geol*, 2006, 231: 135—158
- 19 Monroe J S, Wicander R, Hazlett R. *Physical Geology: Exploring the Earth*. 6th ed. Belmont: Thomson Brooks/Cole, 2007. 600
- 20 Zheng Y F, Wu R X, Wu Y B, et al. Rift melting of juvenile arc-derived crust: Geochemical evidence from Neoproterozoic volcanic and granitic rocks in the Jiangnan Orogen, South China. *Precambrian Res*, 2008, 163: 351—383[\[doi\]](#)
- 21 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[\[doi\]](#)
- 22 郑永飞, 张少兵. 华南前寒武纪大陆地壳的形成和演化. *科学通报*, 2007, 52: 1—10
- 23 Zou H, Zindler A, Xu X S, 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[\[doi\]](#)
- 24 Xu Y G, Ma J L, Frey F A, et al. Role of lithosphere-asthenosphere interaction in the genesis of Quaternary alkalic and tholeiitic basalts from Datong, western North China Craton. *Chem Geol*, 2005, 224: 247—271[\[doi\]](#)
- 25 Choi S H, Mukasa S B, Zhou X H, et al. Mantle dynamics beneath East Asia constrained by Sr, Nd, Pb and Hf isotopic systematics of ultramafic xenoliths and their host basalts from Hannuoba, North China. *Chem Geol*, 2008, 248: 40—61[\[doi\]](#)
- 26 郑永飞. 超高压变质与大陆碰撞研究进展: 以大别-苏鲁造山带为例. *科学通报*, 2008, 53: 2129—2152
- 27 Reisberg L, Zhi X C, Lorand J P, et al. Re-Os and S systematics of spinel peridotite xenoliths from east central China: Evidence for contrasting effects of melt percolation. *Earth Planet Sci Lett*, 2005, 239: 286—308[\[doi\]](#)
- 28 Yuan H L, Gao S, Rudnick R L, et al. Re-Os evidence for the age and origin of peridotites from the Dabie-Sulu ultrahigh pressure metamorphic belt, China. *Chem Geol*, 2007, 236: 323—338[\[doi\]](#)
- 29 Xu X S, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. Re-Os isotopes of sulfides in mantle xenoliths from eastern China: Progressive modification of lithospheric mantle. *Lithos*, 2008, 102: 43—64[\[doi\]](#)
- 30 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. *Contrib Mineral Petrol*, 2008, 155: 271—293[\[doi\]](#)
- 31 Zheng J P, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. Widespread Archean basement beneath the Yangtze craton. *Geology*, 2006, 34: 417—420[\[doi\]](#)
- 32 Tian Y, Zhao D P, Sun R M, et al. Seismic imaging of the crust and upper mantle beneath the North China Craton. *Phys Earth Planet Inter*, 2009, 172: 169—182[\[doi\]](#)
- 33 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[\[doi\]](#)
- 34 Huang J L, Zhao D P. Seismic imaging of the crust and upper mantle under Beijing and surrounding regions. *Phys Earth Planet Inter*, 2009, 173: 330—348[\[doi\]](#)
- 35 Xu P F, Zhao D P. Upper-mantle velocity structure beneath the North China Craton: Implications for lithospheric thinning. *Geophys J Int*, 2009, 177: 1279—1283[\[doi\]](#)
- 36 Kay R W, Kay S M. Delamination and delamination magmatism. *Tectonophysics*, 1993, 219: 177—189[\[doi\]](#)
- 37 Anderson D L. Speculations on the nature and cause of mantle heterogeneity. *Tectonophysics*, 2006, 416: 7—22[\[doi\]](#)
- 38 Sengor A M C. Continental interiors and craton: any relation? *Tectonophysics*, 1999, 305: 1—42 [\[doi\]](#)
- 39 Anderson D L. *New Theory of the Earth*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 1—384