1000-0569/2008/024(06)-1145-74 *Acta Petrologica Sinica* 岩石学报

华北岩石圈减薄与克拉通破坏研究的主要学术争论*

吴福元[1] 徐义刚[2] 高山[3] 郑建平[3]

WU FuYuan[1], XU YiGang[2], GAO Shan[3] and ZHENG JianPing[3]

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中国科学院同位素年代学和地球化学重点实验室，广州 510640
3. 中国地质大学（武汉）地质过程与矿产资源国家重点实验室，武汉 430074
1. *State Key Laboratory of Lithoshperic Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029, *China*
2. *Key Laboratory of Isotopic Geochronology and Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou* 510640, *China*
3. *State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan* 430074, *China*

2008-01-28 收稿，2008-05-30 改回.

Wu FY, Xu YG, Gao S and Zheng JP. 2008. Lithospheric thinning and destruction of the North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 24(6):1145 - 1174

Abstract Lithospheric thinning and destruction of the North China Craton are intensively discussed in recent literature. It is unclear, however, about its time, thinning degree, spatial variation, mechanism and tectonic controlling factors for this kind of geodynamic phenomena. A comprehensive review and discussion is given in this paper, including: (1) Difference between lithospheric thinning and cratonic destruction; (2) Lithospheric mantle ages beneath the North China Craton since Paleozoic and crust-mantle decoupling; (3) Time of the lithospheric thinning and destruction; (4) Vertical thining variations in the lithosphere; (5) Spatial variations in whole eastern China; (6) Mechanism; (7) Geodynamic controlling factors; (8) Uniqueness of the destruction of the North China Craton on the Earth. Finally, a compilation of references on the lithospheric thinning and destruction of the North China Craton is given in the appendix.

Key words Lithospheric thinning; Cratonic destruction; North China Craton

摘 要 华北岩石圈减薄是近十年来国内外研究的热门课题，但关于岩石圈减薄的具体时间、减薄幅度、空间分布范围、机制及其构造控制因素，多有争论。本文对上述问题进行了全面的回顾与讨论，内容包括：(1) 是克拉通破坏还是岩石圈减薄；(2) 古生代以来华北克拉通岩石圈地幔时代与壳幔解耦；(3) 岩石圈减薄与克拉通破坏发生的时间；(4) 岩石圈减薄的垂向幅度；(5) 克拉通破坏在中国东部的空间分布；(6) 克拉通破坏机制；(7) 克拉通破坏的地球动力学原因；(8) 华北克拉通破坏在世界上的特殊性等。文后，汇编了近10余年来华北岩石圈减薄与克拉通破坏研究的重要文献。

关键词 岩石圈减薄；克拉通破坏；华北

中图法分类号 P542

克拉通是地球表面上相对稳定的构造单元，它由上部古老的大陆地壳和下部的岩石圈地幔所组成。根据壳幔分异作用的理论，地球在演化的早期主要表现为核幔的形成，继而地幔发生较大规模部分熔融造成壳幔分异。由于除氧和硅以外，地幔主要由铁和镁组成，它在部分熔融过程中，铁具有相对于镁较低的熔融温度而优先熔出形成玄武岩浆，剩下富镁的残留。但由于镁的密度相对于铁较小，因而此残留漂浮在早期形成的地壳之下，构成岩石圈地幔。很显然，部分熔融程度越高，壳幔分异程度越大，所形成的岩石圈地幔密度越小。因此，克拉通岩石圈，特别是其古老岩石圈地幔具有较低的密度，因而能够长久漂浮在地球的表面。而它本身巨大的岩石圈厚度（约200km）和较低的热流，

* 国家自然科学基金资助项目(40634019, 90714001, 90714002)研究成果.

第一作者简介：吴福元，男，1962年生，研究员，岩石学与地球化学专业，E-mail：wufuyuan@mail.igcas.ac.cn

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

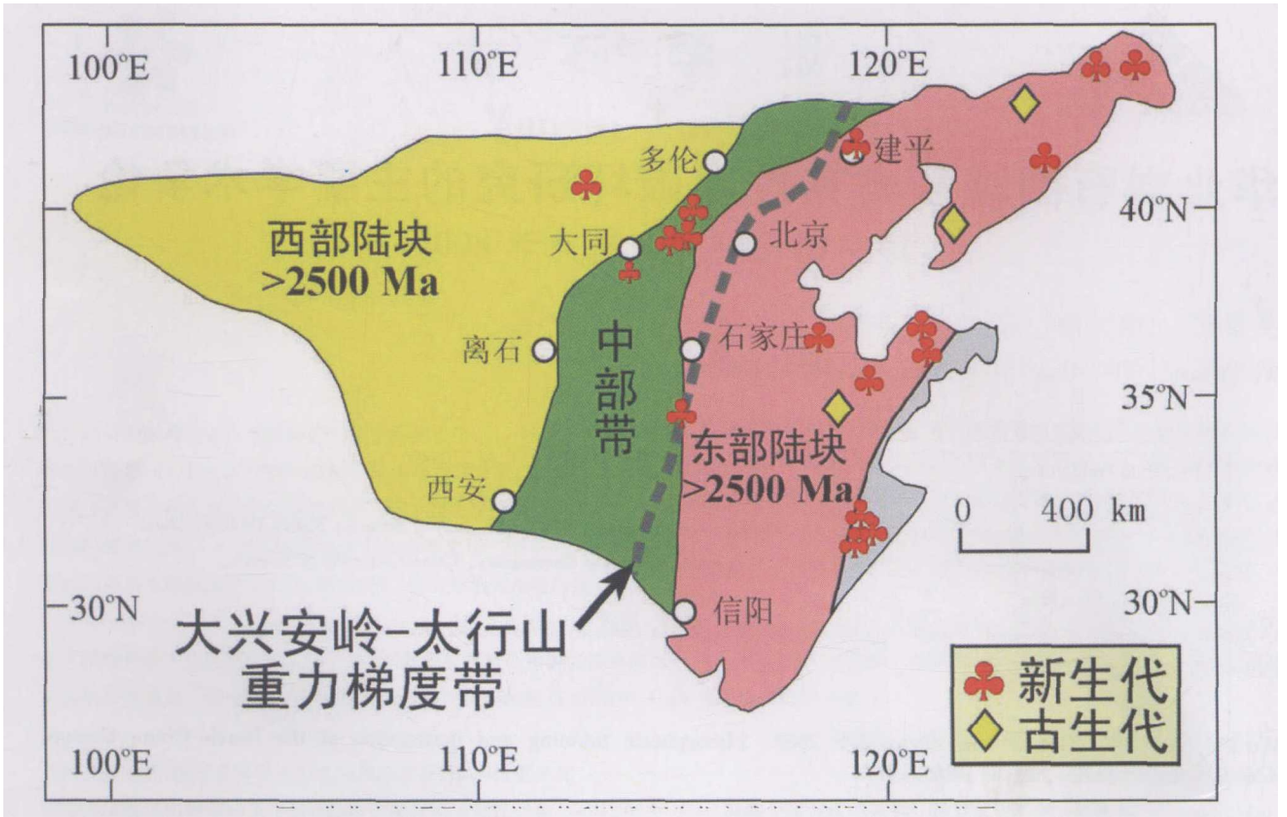


图 1 华北克拉通早古生代金伯利岩和新生代玄武岩中地幔包体产出位置
(早前寒武纪构造分区据 Zhao *et al.*, 2001)

Fig. 1 Locations of the mantle xenoliths in the early Plaeozoic kimberlites and Cenozoic basalts of the North China Craton
(Early Precambrian tectonic subdivisions is after Zhao *et al.* (2001))

不易被俯冲破坏，能够使其较少受到其它地质作用的影响而保持其长期的稳定性。这就是克拉通为什么是地球上最稳定的构造单元的原因（Carlson *et al.*, 2005）。

但是，我国的华北克拉通却显示出另一番景象。90 年代期间中外学者的大量研究成果已经显示（Fan and Menzies, 1992; Griffin *et al.*, 1992, 1998; Menzies *et al.*, 1993; Menzies and Xu, 1998; Xu *et al.*, 1995a; Zheng *et al.*, 1998），华北克拉通东部早期古老的巨厚富集岩石圈地幔在古生代以后被薄的亏损型软流圈或大洋型地幔所取代，且从中生代以后进入岩浆、构造变形、成矿、盆地形成等强烈发育的时期，表明华北克拉通，至少在其东部，其原有的克拉通性质自早古生代以来发生过变化。尽管目前大家对这一事件的认定少有争议，但对其发生的时间、机制及其控制因素等，存在激烈的争论，甚至同一作者在不同的研究时段，其认识也随着资料的积累而发生某种程度的变化。本文根据最近几年研究的有关资料，对上述问题进行适当的归纳。但由于受本文作者知识背景和学术观点不同的限制，我们对某些问题的探讨存在明显的认识分歧，但我们还是尽可能抛弃各自观点的不同，为读者尽量提供较为客观的分析。

1 克拉通破坏还是岩石圈减薄?

近几年来关于华北克拉通破坏的研究可追溯到上世纪 90 年代早期华北岩石圈减薄概念的提出。山东蒙阴和辽宁复县金伯利岩中的金刚石及其中的矿物包裹体资料显示，该金伯利岩在形成时（约 470 Ma）具有大约 200km 厚的岩石圈（Fan and Menzies, 1992; Griffin *et al.*, 1992, 1998; Menzies *et al.*, 1993; Menzies and Xu, 1998; 路凤香等, 1991; 郑建平, 1999），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（Fan and Hooper, 1989; 鄂莫岚和赵大升, 1987; 池际尚, 1988），地球物理探测资料也基本与上述结果一致（马杏垣, 1986; Chen *et al.*, 2006, 2008），这就表明华北东部自早古生代以来发生了百余公里的岩石圈减薄。

目前学术界对上述华北克拉通东部的岩石圈减薄少有疑义。但问题是，目前的岩石圈是否仅仅是减薄后的残留。上世纪 80 年代以来，对该区古生代金伯利岩和新生代玄武岩中地幔捕虏体研究发现（图 1），岩石圈地幔的性质在减薄前后至少存在以下方面的变化：(1) 古生代金伯利岩中

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

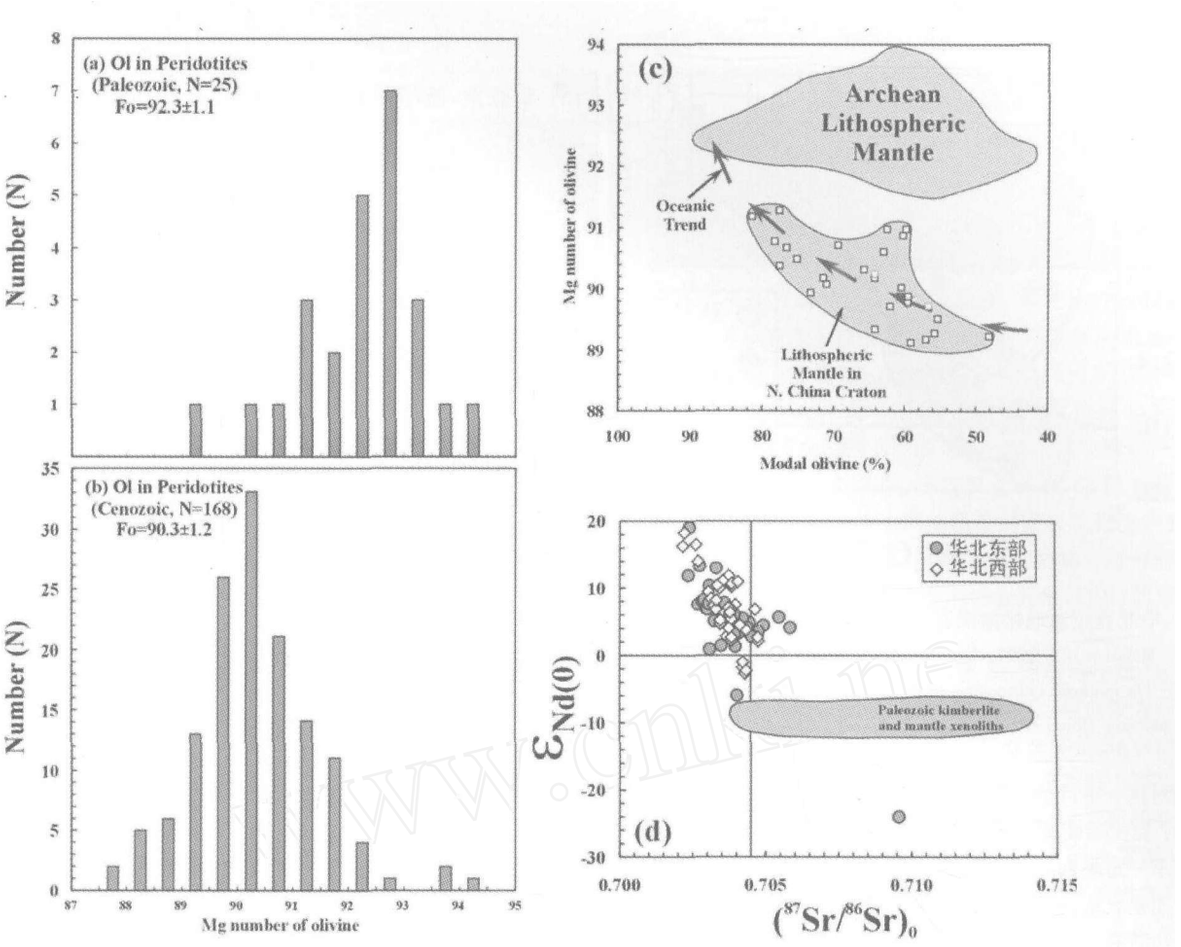


图2 华北地台橄榄岩包体地球化学特点（吴福元等，2000）

Fig. 2 Geochemical characteristics of peridotitic xenoliths in the North China Craton (Wu *et al.*, 2000)

的橄榄岩包体不仅表现为出现大量的石榴石，并且与金刚石共生，从而暗示较大的来源深度，而且在岩石类型上出现大量的方辉橄榄岩（池际尚和路凤香，1996；Griffin *et al.*，1998；郑建平和路凤香,1999）。相反，众多地点的新生代玄武岩中的地幔橄榄岩则是以尖晶石二辉橄榄岩为主（鄂莫岚和赵大升，1987；池际尚，1988；Fan and Hooper，1989；Fan *et al.*，2000）；（2）从主要元素成分上看（图2），古生代橄榄岩主要表现为难熔（refractory）的特点，表明是经历过较高程度熔体抽取后的地幔残留，而新生代地幔橄榄岩则为相对饱满（fertile）的特点，反映只经历过较低程度的部分熔融（郑建平，1999；郑建平等，2006a）；（3）从Sr-Nd-Hf同位素来看（图2），古生代岩石圈地幔主要表现为富集（enriched）的特点（郑建平和赵磊，1996；郑建平，1999），而新生代岩石圈地幔主要表现为亏损（depleted）特点，表明它们经历的历史完全不同（吴福元等，1999，2000，2003a）；（4）Os同位素的研究发现（图3），古生代岩石圈地幔具有太古宙的形成年龄（Gao *et al.*，2002；Wu *et al.*，2006；Zhang *et al.*，2008），并与上覆地壳的形成年龄一致；但新生代玄武岩中的地幔橄榄岩包体的Os同位素特征与显生宙大洋地幔的特点极为接近，除个别地点如鹤壁外（Zheng *et al.*，2007），很少有太古宙年龄（Gao *et al.*，2002；Wu *et al.*，2003b，2006），从而表明两者的形成时代可能有所不同；（5）橄榄岩包体及产于金伯利岩的金刚石中矿物包裹体的温压研究显示，古生代时的地热状况与世界上典型的克拉通相似，约为40mW/m2（Griffin *et al.*，1998；Xu，2001）；而新生代时的地热梯度为80mW/m2（Menzies and Xu，1998；Xu，2001；徐义刚等，1995b）与裂谷等现代大陆活动区类似（Griffin *et al.*，1998；Menzies and Xu，1998；付明希等，2004）。

从上述情况的分析我们可以看出，华北岩石圈减薄不仅仅是岩石圈厚度的变化，它同时伴随岩石圈性质和热状态的转变。从约1.85 Ga克拉通化以后，华北一直表现为稳定的克拉通特点，但从中生代以后，华北原应具有的稳定性质便不复存在，或者说，华北克拉通的稳定性质发生了破坏，有人称之为地幔置换（郑建平，1999；Gao *et al.*，2002；张宏福等，2004；Zheng *et al.*，2007），也有学者将其称之为岩石圈转型（周新华，2006；Zhang *et al.*，2007a）。从岩石圈减薄到克拉通破坏，这不仅仅是称谓上的简单变化，它反

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

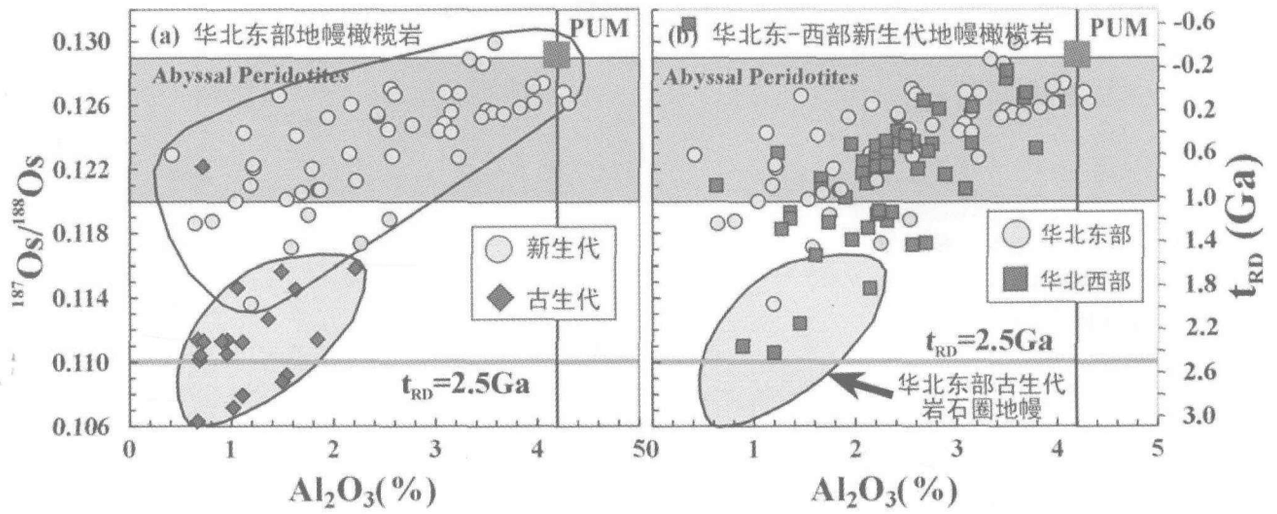


图3 华北克拉通地幔橄榄岩包体的 Os 同位素特征

(资料: Meisel *et al.*, 2001; Gao *et al.*, 2002; Wu *et al.*, 2003, 2006; Xu YG *et al.*, 2008; 夏琼霞等, 2004)

Fig. 3 Os isotopic compositions of the peridotitic xenoliths from the North China Craton

(Data sources: Meisel *et al.*, 2001; Gao *et al.*, 2002; Wu *et al.*, 2003b, 2006; Xu YG *et al.*, 2008; Xia *et al.*, 2004)

映我们对这一事件的本质有了更深刻的认识。尽管我们可以认为，克拉通破坏并不一定伴随有岩石圈的减薄，岩石圈减薄也不一定表明克拉通有破坏。但在华北地区，岩石圈减薄可能是表象，它所揭示的科学问题可能与克拉通破坏存在密切的联系。

2 华北克拉通岩石圈地幔时代与壳幔解耦

2.1 华北克拉通地壳的形成时代

大陆地壳的形成时代是指地壳物质从地幔分异出来的时间。根据目前的研究结果，华北地区最古老岩石形成年龄大于3.8 Ga，主要分布在辽宁鞍山（Liu *et al.*, 1992; Wu *et al.*, 2008）和河南信阳（Zheng *et al.*, 2004a）一带，但华北古老岩石形成的峰值年龄在2.5 Ga左右。可是，根据地壳年龄的定义，岩石的形成年龄与地壳形成时代是不同的，岩石的形成只是表示存在这一时期的热事件，它可以伴有新生地壳的形成，但也可以只是古老先存地壳的再循环。因此，目前学术界多采用岩石的 Nd 同位素和 Hf 同位素模式年龄来确定地壳的形成时间。

由于积累的限制，目前我们可供用来制约华北地区地壳形成时代的资料主要来自 Nd 同位素模式年龄（Wu *et al.*, 2005c）。近年来 Hf 同位素资料的获得也为此问题的讨论提供了重要信息。这些研究所提供的主要结论有：(1) 华北地区最古老的地壳形成信息可追溯到4.0 Ga左右，但目前还未发现3.8～4.0 Ga的岩石（Zheng *et al.*, 2004a; Wu *et al.*, 2008; 吴福元等, 2005d）；(2) 华北地区地壳的形成时代主要集中在2.5～3.0 Ga左右，峰值在2.8～2.9 Ga，比普遍发育的2.5 Ga岩石的形成年龄略为偏大。由于取样的偏在性，在3.3～3.5 Ga存在一个小的模式年龄峰值；(3) 对华北东西部陆块和中部碰撞带的对比研究发现，上述三大块体不显示地壳形成年龄上的根本差别；(4) 尽管目前大多赞同华北克拉通是东西部陆块在1.85 Ga左右拼合而成，但该时期并不显示明显的地壳增生，反映此时地壳以再循环为主。同样，从中元古-显生宙，华北地区也不显示显著的地壳增生；(5) 与东北和华南地区相比（图4），华北克拉通的地壳形成时代明显老于华南地区，也更老于东北地区，反映它们三者具有完全不同的地壳形成历史。关于这一点，也是我们后面讨论克拉通破坏范围的重要证据。

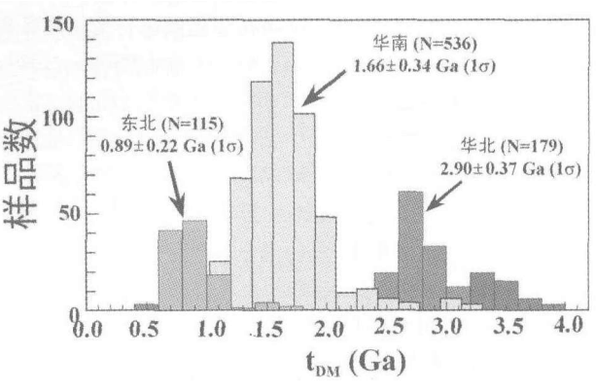


图4 华北克拉通地壳形成时代（吴福元等, 2007）

Fig. 4 Crustal age of the North China Craton (Wu *et al.*, 2007)

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2.2 岩石圈地幔时代的确定方法

岩石圈地幔的时代是目前讨论华北克拉通破坏的关键，后续的一系列讨论均与该问题密切相关，因此我们先对这一问题进行充分的讨论。按照现行地球科学理论，岩石圈地幔是指早先地幔发生熔体迁出形成地壳后的残留。从这一定义出发，岩石圈地幔的时代应与地壳的形成时代相对应。尽管我们通过 Nd 同位素可以有效地确定地壳的形成年龄，但岩石圈地幔时代的确定却是固体地球科学研究的难点。传统上，我们多依据地幔的亏损程度来推测岩石圈地幔的大致时代（Boyd，1989；Griffin *et al.*，1999a），即地球演化早期较高的地热梯度可以使地幔发生较高程度部分熔融，从而使所形成的岩石圈地幔具有较高的镁含量相吻合；而在显生宙期间，地球的地热梯度明显降低，且由于其较年轻，相对经历的熔融次数要少，从而所产生的年轻岩石圈地幔的镁含量明显偏低。但该方法主要依据地幔的主要元素组成特征，而该特征的实质是受部分熔融程度的控制，即熔融程度高时残留的地幔具有较低的 Al_2O_3 与 CaO 含量及高的橄榄石号码。尽管我们可以概念性地认为，时代较老的地幔由于受到多次熔融作用的影响而使其总熔融程度偏高，但不排除年轻的岩石圈地幔当经受高程度部分熔融时，其残留也表现出与古老地幔相同的元素特征（Lee *et al.*，2001），因此寻找更直接的定年方法是解决岩石圈地幔时代的关键。通过多年的摸索，人们发现，Os 同位素可以对岩石圈地幔的时代给予有效的约束。

根据岩石圈地幔的形成定义，地幔在熔体提取时，Re 等不相容元素较易进入熔体，而 Os 等相容元素则较多地残留在地幔之中。因此，当某一地幔遭受不同程度熔融后，其不同部分残留的 Re、Os 含量及比值会有不同的变化，这样通过构筑 Re-Os 等时线便可确定出上述熔体抽取的时间，即岩石圈地幔的时代。但是，上述等时线方法在实际应用过程中具有很大的局限性。主要是岩石圈地幔多具有较古老的历史，容易受到来自下部流体的改造，从而导致 Re 的含量发生重新富集。为克服这种影响，Walker *et al.*（1989）提出了 Os 模式年龄（t_{MA}）和 Re 亏损年龄（t_{RD}）的方法。其中 t_{MA} 的定义与 Nd 同位素中的模式年龄定义相同。当 Re =0 时，t_{MA} 记为 t_{RD}（Re 亏损年龄）。很显然，特征 T_{MA} 和 T_{RD} 分别代表了岩石圈地幔形成的最大和最小年龄。大量的研究发现，岩石圈地幔中 Re 的含量较低，其 T_{RD} 可近似代表岩石圈地幔的形成时代。特别是对于亏损程度较高的方辉橄榄岩而言，所获得的 T_{RD} 和 T_{MA} 年龄相近，且具有较高的可信度。但 T_{RD} 年龄在解释过程中的一个重要问题是 Re 的活动性问题。由于地幔在形成后可能受到交代作用的影响，从而导致 Re 的加入，进而通过衰变使 $^{187}Os/^{188}Os$ 比值升高和 T_{RD} 年龄变小，从而使获得的 T_{RD} 年龄失去应有的意义。如近来对俯冲带上方岩石圈地幔的研究发现，俯冲带释放出的大量流体可在一定程度上改变岩石圈地幔的 Os 同位素组成（Saha *et al.*，2005）。但对大多数地区而言，流体交代作用的规模是有限的。现行研究还发现（Chesley *et al.*，2004），一般的流体或地壳物质尽管有较高的 $^{187}Os/^{188}Os$ 比值和 Re 含量，但它们的 Os 含量太低，以至于不可能对地幔本身的 $^{187}Os/^{188}Os$ 比值产生明显的影响。即使有影响的话，它将导致地幔样品的 Os 含量大幅度降低，并伴有 Re/Os 比值的升高，而这在 Re-Os 数据上都会明显地体现出来。如 Walker *et al.*（2002）通过计算发现，即使俯冲板片的 Os 全部通过流体进入上覆的地幔楔，它也只能使原来地幔的 Os 同位素比值上升 0.2%（如从 0.127 上升到 0.1273），充分表明地壳来源流体或/和熔体的改造不可能使原来地幔的 Os 同位素比值发生根本性的变化，除非该地幔经历了多次高比例的流体/熔体渗透，而这又会在 Os 含量上留下明显的印迹。但是，如果岩石圈地幔受到富硫化物流体和/或熔体的交代作用，其对 $^{187}Os/^{188}Os$ 比值的影响有时可能不能忽视，但这可以通过 S 元素含量和铂族元素（PGE）的分析来解决。

尽管采用了以上方法来克服 Re 的活动性对 Os 同位素岩石圈地幔定年的影响，但为保险起见，目前较为可靠的讨论 Os 模式年龄或 Re 亏损年龄的样品大多是 Re 含量较低的橄榄岩。但另一方面，国际学术界目前正在努力寻找能直接进行岩石圈地幔年龄测试的方法。其中最重要的突破是澳大利亚 MacQuarie 大学倡导的硫化物 Os 同位素激光测定。已有的研究发现，橄榄岩中往往存在多期硫化物事件，而激光原位技术可以对这些不同事件的时代和意义进行深入的讨论（Alard *et al.*，2002）。但大量学者对这一方法的适用性提出质疑（Carlson *et al.*，2005；Pearson *et al.*，2004；Chesley *et al.*，2004；Walker *et al.*，2005）：（1）硫化物的形成机制比较复杂，且存在明显的后期出溶现象，而原位的有限测定给出的 Os 同位素比值有可能不能代表整个硫化物颗粒的 Os 同位素组成；（2）对于给出的不同时代的 Re 模式年龄，我们有时也很难判断哪一个代表的是真正岩石圈地幔的形成时代。尽管我们在实际应用过程中，强调粒内的硫化物可能代表了岩石圈地幔的形成，而粒间硫化物与后期交代作用有关，但实际情况并不是像上面所述的那样一一对应。而且，目前的研究发现，地幔中往往还存在少数与橄榄岩其它矿物不平衡的硫化物，可能是更早期熔融事件的反映，与岩石圈地幔本身的形成无关；（3）地幔橄榄岩是硫不饱和的，其中的硫化物绝大多数应是后期交代成因的，与地幔熔融事件无关。尽管如此，激光方法还是充分展示了它在原位测定方面的优势，所获得的不同类型硫化物的 Os 同位素及相关资料为我们讨论岩石圈地幔的详细演化过程提供了可能。

2.3 华北克拉通古生代岩石圈地幔时代

Gao *et al.*（2002）对郑建平采集的辽宁复县两个橄榄岩包体进行 Os 同位素测定获得的 Re 亏损年龄为 2.5 ~ 2.

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

6Ga，第一次真正意义上获得了华北克拉通古生代时岩石圈地幔年代。尽管他们对蒙阴金伯利岩中的橄榄岩的测定未能获得满意的结果（由于后期大量 Re 的加入），但本文第一作者对该区金伯利岩中铬铁矿的测定获得了 2.7 Ga 的 Re 亏损年龄（Wu *et al.*, 2006）。此外，我们还对辽宁铁岭金伯利岩中的橄榄岩包体进行了 Re-Os 同位素测定，获得的 Re 亏损年龄也为 2.5 Ga（Wu *et al.*, 2006）。尽管目前对铁岭金伯利岩的时代还存在认识上的分歧，但该地金刚石的出现以及这些橄榄岩的岩石类型和地球化学特点与蒙阴和复县同类岩石相似的特点仍表明它可能是古生代的。最近，Zhang *et al.*（2008）提供了较多的蒙阴和复县橄榄岩包体的 Os 同位素资料，获得的 Re 亏损年龄也为太古宙。同时，不同矿物组合样品的测定发现，古生代时岩石圈地幔的年龄不具有分层性。因此，华北克拉通古生代时的岩石圈地幔是太古宙的（图 3a），且岩石圈地幔与地壳的时代是耦合的。对于这一点，目前基本上不存在争议。

2.4 华北克拉通新生代岩石圈地幔时代

以太行山为界，华北东部的吉林龙岗、辽宁宽甸、山东栖霞、蓬莱和山旺等地区新生代玄武岩中的幔源包体的 Os 同位素特点与现代大洋橄榄岩较为类似，即岩石圈地幔在整体上表现为新生特点，目前还没有发现任何太古宙地幔存在的痕迹，这一特点与蒙阴、复县和铁岭地区金伯利岩中地幔橄榄岩包体的太古宙年龄截然不同（图 3a）。在东西部交界处的河南鹤壁地区，其岩石圈总体表现为古老地幔的浅部残留（Zheng *et al.*, 2001）。Os 同位素资料还显示，这一古老地幔形成于太古宙（Zheng *et al.*, 2007）。华北西部汉诺坝玄武岩中的橄榄岩包体有较多的资料（图 1），可能反映了古元古宙的地幔事件（Gao *et al.*, 2002），与当时华北东西部陆块沿中部造山带的拼合有关。但由于该区缺乏主要元素亏损的方辉橄榄岩，导致目前对该区岩石圈地幔的时代仍需要进一步的工作。结合汉诺坝以南阳原和繁峙地区橄榄岩包体的资料发现（Xu YG *et al.*, 2008；图 3b），华北西部新生代玄武岩中的地幔橄榄岩的 Os 同位素特征与东部基本类似，或略有降低，只是少部分样品显示太古宙的模式年龄。因此，尽管我们可以认为，华北西部岩石圈地幔的年龄可能要老于华北东部，并存在太古宙的年龄，但其具体的年龄特征仍需进一步的工作。

但是，上述新生代玄武岩中的橄榄岩包体均出现介于太古宙和显生宙之间的元古宙 Os 同位素模式年龄（图 3）。对这一年龄确切含义理解上的不同，是近几年华北克拉通破坏研究若干分歧存在的重要缘由。一种观点认为，该年龄代表了华北固有的一次岩石圈地幔形成事件，如 Gao *et al.*（2002）就将汉诺坝地区 1.9 Ga 的年龄解释为当时华北东西部陆块拼合时形成的岩石圈地幔。但该解释方案是否能够适用于其它地区还存在一定的疑问：（1）目前的 Nd 同位素资料没有发现华北地区存在这样一次地壳生长事件（Wu *et al.*, 2005c）；（2）目前在华北发现多处存在 1.8～1.9 Ga 的碰撞带，而如果此时有新生岩石圈地幔的形成，它应该在古生代金伯利岩中的橄榄岩包体中有所反映。如辽宁复县的金伯利岩位置非常靠近 1.85Ga 的辽吉古元古宙碰撞带，但该地的橄榄岩包体却无任何元古宙岩石圈地幔的痕迹。第二种观点认为元古宙年龄是太古宙和显生宙年龄的混合的结果。由于物理性质的原因，固体的岩石圈地幔之间不可能产生混合，而可能的方式只能是太古宙强难熔的岩石圈地幔与软流圈熔体混合。这时，所形成的混合物应从方辉橄榄岩向二辉橄榄岩转变，而目前获得的可靠的元古宙年龄来自强亏损的方辉橄榄岩。或者，该岩石圈地幔受到大量地壳来源流体或熔体的强烈改造，但这在岩石结构、微量元素、Sr-Nd-Hf-Os 同位素上还缺乏确切资料的支持。如目前大量研究发现，具有交代作用特征的样品主要是亏损程度较高的方辉橄榄岩（或单斜辉石含量较低的二辉橄榄岩），而亏损程度较低的正常二辉橄榄岩大多显示未经历交代作用的特征，应为新形成的岩石圈地幔。第三种观点认为，该元古宙年龄可能确实代表了一次地幔形成事件，但它是在古生代以后以外来的方式底侵拼贴到华北克拉通之下的（Wu *et al.*, 2006）。这方面有两种可能性：其一，尽管我们确定出软流圈地幔具有较高的 Os 同位素比值，但也有越来越多的证据显示，软流圈中存在较早期的古老岩石圈地幔残留（Parkinson *et al.*, 1998；Alard *et al.*, 2005；Harvey *et al.*, 2006；Shi *et al.*, 2007；Liu *et al.*, 2008），它们的成因与上覆地壳无关。目前从软流圈地幔或其来源的岩石中获得的最低 $^{187}Os/^{188}Os$ 比值为 0.114（Liu *et al.*, 2008），如果我们接受这一比值的话，图 3 所包含的所有新生代玄武岩中地幔橄榄岩包体都是软流圈来源的，只不过它们是早先就存在于软流圈中的古老地幔残留。支持这一解释的另一个证据是华北地区具有元古宙 Re 亏损年龄的样品均表现为 Sr-Nd 的亏损特点，与古生代金伯利岩中橄榄岩包体 Sr-Nd 富集的特点完全不同；其二，考虑华北显生宙以来的构造演化历史，它非常有可能是在华北和扬子碰撞时及之前下插到华北之下的扬子岩石圈地幔，但华北该元古宙岩石圈地幔之上没有发现太古宙地幔的事实难以支持这一解释。

另外一种可能，以蒙阴、复县和铁岭金伯利岩中地幔橄榄岩为代表的古生代岩石圈地幔可能并不能代表当时华北克拉通的所有状况。或者说，具有太古宙年龄的岩石圈地幔当时在华北只是局部分布，也就是在这些地区，其金伯利岩中才发育了金刚石，而其它地区岩石圈地幔全是元古宙的（对应古元古宙的克拉通化），并可能是由于冷却而形成的弱亏损-未亏损的地幔，新生代时又发生了少量增生。但问题是，即使是在蒙阴和复县，它们这些地区现在岩石圈的厚度均小于 100km，明显比古生代时的岩石圈厚度要薄。

目前华北地区岩石圈地幔时代的研究仅是初步的。正如前面提及的那样，目前获得的年龄主要是 Re 亏损年龄，Re-Os 等时线年龄仅在汉诺坝地区获得。但可靠的 Re 亏损

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

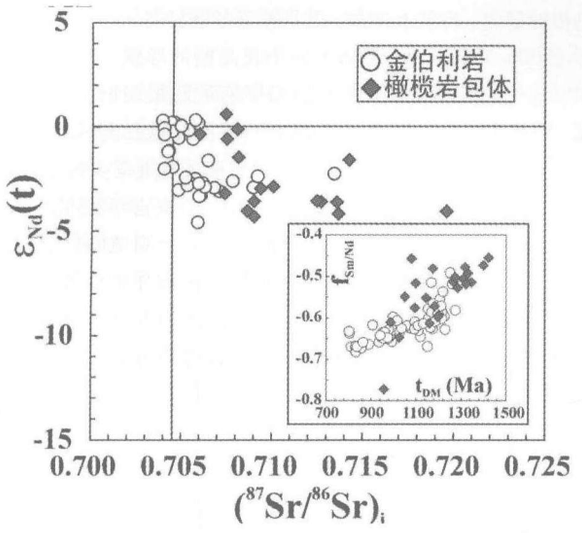


图5 华北克拉通古生代金伯利岩及其地幔包体的Sr-Nd同位素特征（资料来源：池际尚和路凤香，1996；郑建平，1999；罗声宣等，1999；Wu *et al.*，2006；Zhang *et al.*，2008；和部分作者未发表资料）

Fig. 5 Sr-Nd isotopic variation of the Paleozoic kimberlites and mantle xenoliths (Data sources: Chi and Lu (1996); Zheng (1999); Luo *et al.* (1999); Wu *et al.* (2006); Zhang *et al.* (2008); and unpublished data of authors)

年龄主要来自于难熔的方辉橄榄岩，而恰恰是这一岩石类型在华北新生代玄武岩的地幔包体中较少出现。我们以前大多根据其元素的饱满性质和Sr-Nd同位素的亏损特点认定其为新生岩石圈地幔，而实际上这种岩石圈地幔的准确定年是极为困难的。另外，目前我们认定的古生代Sr-Nd富集的岩石圈地幔主要来自于有限的古生代金伯利岩中橄榄岩包体的研究资料，而这些包体已经发生了强烈的蚀变，不排除它们的Sr-Nd同位素特征只是寄主金伯利岩及后期蚀变作用的表现（图5）。如果这一假设成立，那么我们便不能用Sr-Nd同位素来判断古生代和新生代时岩石圈地幔的变化。支持这一论点的证据来自汉诺坝和栖霞地区橄榄岩包体的研究。Os同位素资料显示（Gao *et al.*，2002），两者所代表的岩石圈地幔分别形成于古元古宙和显生宙，但它们在主量元素和Sr-Nd同位素上并没有本质的差别（Rudnick *et al.*，2004）。因此，减薄前岩石圈地幔的深入研究对我们今后准确理解华北地区现今岩石圈地幔时代至关重要，甚至，目前我们还不能排除蒙阴和复县只是"两孔之见"，所携带的地幔包体甚至可能不代表当时华北克拉通岩石圈地幔的整体状况。

但是，我们还是可以有其它的办法来对华北中生代以前的岩石圈地幔时代作出一定的制约。其一是出露在华北周边造山带地区的橄榄岩地质体，其二是中生代时形成的过碱性岩石。对于前者，目前有较多资料的是华北以南大别-苏鲁地区经历超高压变质的超镁铁杂岩，如大别地区的饶拔寨岩体和苏鲁地区的迟家店、梭罗树、北沟、芝麻坊、毛北等岩体。它们均以方辉橄榄岩为主，并有少量的纯橄岩、二辉橄榄岩和辉石岩，显示经历过较高熔体抽取的残留地幔特点。Os同位素资料显示（靳永斌等，2003；Yuan *et al.*，2007），它们可能是1.8～2.0 Ga的古元古宙之前的岩石圈地幔。但对这些地质体能否反映华北岩石圈地幔时代存在如下方面的问题。第一，这些地质体是否是当时扬子向华北之下俯冲的地幔楔的组成部分（Zhang RY *et al.*，2000，2003，2005；Zheng *et al.*，2006c，2008），有些学者认为它可能是俯冲的扬子地块内的侵入体或岩石圈地幔组成（Yang and Jahn，2000；Yuan *et al.*，2007）；第二，岩石学研究显示，这些橄榄岩均遭受过一定程度的后期交代作用（Zheng *et al.*，2005b，2006b，2006c），而这一交代作用是否对岩石圈地幔的Os同位素组成产生过影响。从目前这些岩石的Os含量来看，后期交代作用的影响可能非常有限，所获得的Os同位素比值应代表了原始的岩石圈地幔组成。因此，如果这些橄榄岩是华北的地幔楔，它至少是古元古宙的，而不可能是显生宙时形成的岩石圈地幔。同时，对这些岩石进行Sr-Nd同位素的研究发现，它们具有较大的变化范围（Jahn，1998），与华北现今岩石圈地幔亏损的特点明显不同（Zheng *et al.*，2006c，2008）。显然，加强这方面的研究与识别对华北岩石圈地幔的时代研究具有重要意义。

在华北地区，还存在一定数量的含霞石的过碱性杂岩体，虽然我们无法通过它来获悉岩石圈地幔的时代，但它主体来源于岩石圈地幔的特点，使我们可以通过适当的岩石学与地球化学方法反演出其岩石圈地幔的组成，进而通过对比对所来源的岩石圈地幔时代进行约束。根据我们目前对辽东半岛的赛马-柏林川霞石正长岩（221±1Ma与222±3Ma）、辽西的河坎子霞石正长岩（227±2 Ma）、山西的紫金山霞石正长岩（132±2Ma～125±3 Ma）和安阳的九龙山霞石正长岩（时代不详，可能为早白垩世）的研究，它们均具有Sr-Nd同位素富集的特点，与吉林省南部新生代的永胜霞石正长岩体（31.6±1.3Ma～30.8±0.2Ma）的亏损特点截然不同。因此，我们有理由认为，华北中生代前的岩石圈地幔在Sr-Nd同位素上应是富集的，与现今岩石圈地幔Sr-Nd亏损的特征差别较大，这一点对我们约束新生代岩石圈地幔中元古宙橄榄岩的成因有重要意义。

不过，最好的办法仍是直接获得古生代-新生代之间岩石圈地幔的年代学资料。由于受样品的限制，目前仅在鲁西-太行山地区的少数早白垩世的闪长岩体中发现有地幔橄榄岩（黄福生和薛绥洲，1990；许文良等，1993；Xu WL *et al.*，2008）。岩石学研究发现，这些橄榄岩包体主要为方辉橄榄岩，其橄榄岩的Fo号码与古生代金伯利岩中金刚石内的橄榄石包裹体的号码类似，而且在Sr-Nd同位素上是富集的。Os同位素成分分析显示（Gao *et al.*，2008），它们具有2.6～2.7 Ga的Re亏损年龄，反映太古宙的地幔属性。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3 克拉通破坏发生的时间

在回顾这一问题之前，我们有必要明确，克拉通破坏与岩石圈减薄是不同的概念，克拉通的破坏可能并不一定伴随岩石圈的减薄（Zheng *et al.*, 2006a, 2006b, 2007）。但在华北地区，它们之间可能存在内在的联系。

3.1 如何确定克拉通破坏发生的时间?

目前对华北克拉通破坏时间的约束是间接的，认识上的分歧主要来自于克拉通破坏的鉴别标志上，即以何种地质标志来确定克拉通破坏的存在。很显然，对这一问题的理解带有很大的人为主观性。况且，我们目前并不知晓克拉通破坏发生的机制，而机制才是和标志联系在一起的。只有明确了机制，标志的寻找才有可能。但地质学就是如此，我们必须透过现象去看本质。

无论机制如何，克拉通破坏可能主要来源于深部地质作用的影响，而这一过程非常可能表现为岩石圈厚度的变薄，这势必引起软流圈的上涌及可能发生的部分熔融，并诱发地壳范围内的一系列岩浆、变质等地质作用。从改造的角度来看，软流圈的上涌对应地表的隆升和地壳表层的伸展，从而导致大规模岩浆活动、地壳深部岩石向浅层的剥露和地表沉积盆地的广泛发育。因此，目前学术界大多通过上述不同类型地质作用发生的情况来讨论华北克拉通破坏发生的时间。其中最主要的标志是：（1）大面积的强烈岩浆活动；（2）幔源岩浆显示从岩石圈地幔向软流圈地幔的转变；（3）地势从高向低的转变；（4）变质核杂岩及伴随的伸展盆地的发育。

3.2 克拉通破坏发生的时间下限

所谓的克拉通破坏显然暗示其由稳定向非稳定的转变。从华北克拉通的地质发展演化历史可知，它在整个古生代基本保持稳定的性质，只是从晚三叠世开始，其稳定性才发生了变化。在此期间，华北以南的扬子克拉通通过秦岭-大别-苏鲁造山带与华北克拉通拼贴，而其北部，中亚造山带的地壳物质增生到华北北缘之上。此时，华北北缘出现近东西走向的非造山型碱性岩，表明其仍处于稳定的构造环境之中。在华北的东侧，目前只确定出山东荣城的甲子山正长岩形成于晚三叠世（Yang *et al.*, 2005）。目前鉴定出的另一个晚三叠世岩浆岩比较发育的地区是辽东半岛和吉林南部地区（路孝平等，2003；Yang *et al.*, 2007b, 2007c）。除其北部赛马-柏林川碱性岩可能属于近东西向的华北北缘碱性岩带外，区内南部发育少量晚三叠世的I型闪长岩-花岗闪长岩，浅成侵位的辉绿岩和正长岩等。因此，尽管部分学者提出，三叠纪或更早时期华北就已存在岩石圈减薄（韩宝福等，2004），但从岩浆作用特点来看，此时段华北地区仍相对稳定，即使有减薄，其规模应该非常有限。但许文良等（2006c）认为，由于扬子向华北的俯冲导致了华北东缘加厚地壳的形成，而此加厚的榴辉岩可能很快就发生了拆沉，因此华北克拉通的破坏可能从三叠纪就已开始。但此认识需要克服的问题是，如果克拉通破坏发生在三叠纪，为何榴辉岩最发育的大别山地区却缺乏此期的岩浆活动（Wu *et al.*, 2003）。无论如何，华北周边地区板块的俯冲与碰撞对华北后来的岩石圈破坏可能产生了重要影响（Zheng *et al.*, 2006b, 2006c, 2006d, 2008; Yang *et al.*, 2008），它要么是华北克拉通破坏的开始，要么就是唤醒了后来的岩石圈减薄，特别是早期造山带的岩石圈加厚可能为后来的破坏提供了重要前提。

3.3 克拉通破坏发生的时间上限

克拉通破坏的时间上限就是它基本结束的时间。显然对这一问题的讨论也不简单。克拉通破坏以后，其深部必将进入热衰减阶段，从而引起地温梯度的降低，其岩浆发育的源区将逐步向深部迁移。具体的地质表现是岩浆活动，特别是壳源岩浆活动将逐步减少以至消失；第二，热衰退将导致新岩石圈地幔的增生，其幔源岩浆主要来源于软流圈地幔。

从实际地质情况来看，华北地区新生代玄武岩总体上显示随时代变新，岩石碱性程度增高的特点，表明岩浆来源深度逐步增加（Menzies and Xu, 1998；吴福元等，2000；Xu *et al.*, 2004b）。岩石圈热结构的研究也发现，现今的大地热流值（约60mW/m2）较新生代初期（约80mW/m2）有降低的趋势（何丽娟等，2001）。因此，新生代为岩石圈地幔增生时期，表明华北的克拉通破坏应发生在新生代之前的中生代。最近几年的进一步研究发现，辽西阜新地区在110 Ma左右出现软流圈地幔来源的玄武质岩石（Zhang *et al.*, 2003），且其所携带的地幔橄榄岩主体显示与华北东部新生代玄武岩中地幔橄榄岩包体完全相同的特点（许文良等，1999；Zheng *et al.*, 2007）。因此，我们有理由相信，华北的克拉通破坏发生在110 Ma之前。但从另一方面来看，华北地区110 Ma时的玄武岩是碱性的，之后才在很多地方出现亚碱性的玄武岩。因此，在岩浆间隙期后出现软流圈来源的玄武岩也应是岩石圈减薄的直接标志。另外120～130 Ma时期的镁铁质岩浆大多表现为富集岩石圈地幔来源性质，真正软流圈地幔来源的玄武岩相当有限。这说明120～130 Ma虽然为减薄的重要时期，但并没有减薄到现今岩石圈的厚度（徐义刚，2006）。同样，根据在山东胶洲发现的新证据（闫峻等，2003），不少研究者提出华北岩石圈减薄和破坏的时间在空间上是不均匀的（徐义刚，2004；Zheng *et al.*, 2006b, 2007）。

但另有学者认为，华北晚白垩-新生代软流圈来源玄武岩就是岩石圈减薄的直接标志（路凤香等，2006），因而岩石圈减薄的高峰期应在65 Ma之后的新生代。中生代期间

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

尽管有减薄，但减薄的幅度不大。

3.4 克拉通破坏发生的时间：侏罗纪还是白垩纪？

上面的约束表明，华北的克拉通破坏非常可能发生在侏罗-白垩纪，但其具体时间仍不得而知。一种观点认为，整个侏罗-白垩纪都是克拉通破坏的时期；但另一种观点则认为，克拉通破坏只发生在侏罗-白垩纪的某一时段。显然正如后面要论述的那样，前一观点的学者大多持热侵蚀的破坏机制，而持后一种观点者多赞成拆沉机制。

徐义刚等多次撰文认为（Xu，2001；Xu *et al.*，2004a；徐义刚，2004，2006），克拉通的破坏可能不是一个极为短暂的过程，它可能有开始、巅峰和结束时间之分。一般说来，克拉通破坏刚开始时，岩浆作用以消耗岩石圈地幔为特征，当时的岩石圈的厚度大于100km。岩石圈地幔中易熔组份的提取使其再难发生部分熔融，从而导致岩浆间歇期的存在。但当岩石圈减薄最强烈时，软流圈抬升至最高处，根据岩石圈盖效应，此时的软流圈应产生大规模熔融形成拉斑玄武岩。针对华北地区在晚白垩-老第三纪出现此类岩石，徐义刚等认为华北克拉通破坏的高峰应在晚白垩世，而整个岩石圈的破坏过程持续时间超过100 Ma。

通过对辽西地区中生代火山岩的研究，Gao *et al.*（2004）发现中侏罗世的火山岩为高镁的adakite，结合该岩石高的Ni和Cr的含量及其在矿物中的分布特征，作者提出这些岩石是拆沉进入地幔的地壳岩石部分熔融而成，从而暗示华北的克拉通破坏至少在中侏罗世已经开始。但Yang and Li（2008）最近对这一解释提出疑问。他们根据Pb同位素等资料认为，这些岩石是板片来源熔体与地幔相互作用的产物，不能反映当时有地壳拆沉，真正的岩石圈拆沉应发生在120～130 Ma左右（相当于义县期）。姜耀辉等（2005）根据辽东半岛的研究认为，华北应该存在两期岩石圈减薄，早期的岩石圈减薄可能在155 Ma之前已经开始，而120～130 Ma左右的早白垩世是减薄的峰期，他们通过胶东半岛花岗岩的研究进一步论证了这一思想（Hou *et al.*，2007）。

但吴福元等认为（吴福元等，1999，2000，2003a；Wu *et al.*，2003b，2005a，2005b，2006），（1）并不是所有的岩浆活动均与克拉通破坏有关。从目前的资料来看，华北地区大约从中侏罗世开始出现较大范围的岩浆活动，具体时限集中在180～155Ma和135～115 Ma两个时段。因此作者原曾提出此应对应于岩石圈减薄开始或第一阶段发生的时间，但考虑180～155 Ma左右的岩浆活动广泛分布在中国东部的大陆边缘，向内陆方向，该时期岩浆活动基本不发育。结合侏罗纪期间的构造变形以挤压为主，我们现在更倾向于认为侏罗纪岩浆作用可能是太平洋板块向亚洲大陆下俯冲的结果，与岩石圈破坏无关，或者说，此阶段岩石圈减薄的幅度极为有限。（2）岩石圈减薄到最大程度后，由于热衰退的影响，新的岩石圈地幔由于冷却而发生增生。因此，最早具有Sr-Nd同位素亏损特点的新岩石圈地幔的存在应表明岩石圈减薄的峰期已经结束，即华北克拉通破坏应发生在由辽西地区确定的110 Ma之前；（3）大约从110 Ma以后，华北地区壳源岩浆活动基本绝迹，取而代之的是碱性玄武岩浆活动。这表明从110 Ma以后，岩浆源区向深部发生了迁移，华北地区的地热梯度自那以后是降低的；（4）目前大多认为华北地区中生代镁铁质岩浆岩来源于岩石圈地幔的部分熔融，但实际上，镁铁质岩浆作用在华北地区是比较微弱的，占优势的仍是长英质组份。即使是镁铁质的岩浆岩，当我们仔细考察它们的同位素特点便就发现，它们具有非常低的$\varepsilon_{Nd}(t)$值（图6），不可能是纯粹岩石圈地幔起源的。一种可能的解释是它们在形成过程中受到地壳组份的污染，即这些岩石的地幔源区受到地壳物质的混染（图6，Huang *et al.*，2007），而另一个端元不是很明确。但Yang *et al.*（2004，2006，2007a）对辽东地区古道岭岩体及其所含包体的研究发现，其地壳端元既有古老的，也有新生的，而地幔端元既包括古老的岩石圈地幔，也包括软流圈地幔。更详细的研究还发现（Yang *et al.*，2008），该地区不少120～130 Ma左右的花岗岩具有正的$\varepsilon_{Nd(t)}$值，显然它们来自年轻的软流圈地幔来源的地壳物质的部分熔融，表明软流圈在120～130 Ma左右已参与到岩浆的形成，只不过由于地壳的混染作用，使人们大多相信它是岩石圈地幔来源的；（5）早白垩世（135～115 Ma）时期的岩浆活动在华北克拉通范围内广泛分布，不同成因、来源和侵位深度的岩石共存，反映强烈的深部地质作用过程和地表的快速隆升，应该对应岩石圈的减薄与克拉通的破坏。特别是，135～115 Ma时期的岩浆岩具有相对180～155 Ma高得多的形成温度支持这一解释；（6）从盆地和变质核杂岩的角度来看，华北地区在早白垩世是岩石圈伸展的高峰期，盆地发生断陷（Ren *et al.*，2002），大量中高级变质岩或中下地壳物质从深部地壳向浅部折返（Darby *et al.*，2004；Liu *et al.*，2005；Lin and Wang，2006；Yang *et al.*，2007d；刘俊来等，2006；王涛等，2007），

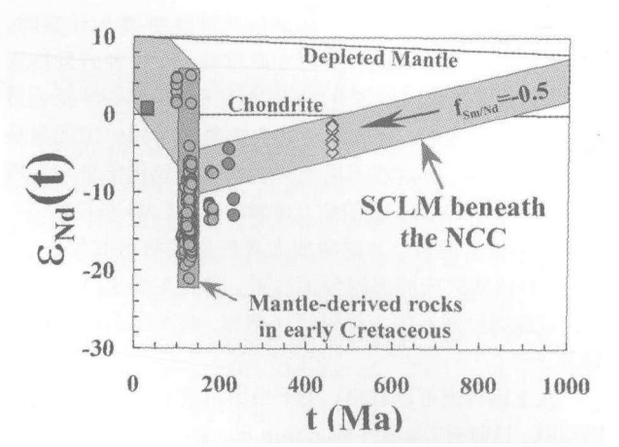


图6 华北克拉通岩石圈地幔Nd同位素演化

Fig. 6 Nd isotopic evolution of the lithospheric mantle beneath the NCC

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

此应对应于克拉通的破坏。而早白垩世晚期-新生代期间，华北盆地只表现为坳陷，缺乏变质核杂岩，代表的是热衰退，是克拉通破坏以后新生岩石圈增生的结果；(7) 从金属成矿作用角度来看，华北地区显生宙最重要的矿床类型是金矿床的发育。对这些不同地区金矿床的年代学研究发现(Yang *et al.*, 2003)，它们惊人地形成于125 Ma左右的一个狭窄的时间范围内，与同时期大规模岩浆活动时代一致。同时，对这些矿床的成因分析表明，它们在形成过程中曾发生过地壳尺度上的大规模流体循环，暗示大尺度上的热异常。

从上述讨论可以看出，关于中国东部岩石圈减薄的时间问题，目前远未定论(Menzies *et al.*, 2007)。特别是关于岩石圈减薄开始的时间，目前还缺乏应有的资料，这一问题的解决很显然需要对该区幔源镁铁质岩石进行深入的研究。但从另外一个角度来看，120～130 Ma的早白垩世是中国东部岩浆、成矿等作用最为强烈的时期，很可能对应岩石圈减薄的最大时期，其后进入热衰减时期，并出现以碱性玄武岩为代表的新生代岩浆活动。在新生代期间，岩石圈也可能发生过减薄，但减薄的幅度不大，主要表现为由于热冷却而导致的新生岩石圈地幔的增生和岩石圈增厚。

4 克拉通破坏的垂向幅度

目前最不明确的是垂向上岩石圈减薄的幅度，基本上有两种观点(图7)。绝大多数人认为岩石圈减薄只发生在岩石圈地幔内部。如果减薄是均匀的，则现今的岩石圈地幔是由上部减薄后的残留和下部新生地幔组成(Menzies *et al.*, 1993; Xu *et al.*, 1995a; Menzies and Xu, 1998; Zheng *et al.*, 2001, 2006a, 2006b, 2007; Ying *et al.*, 2006; 图7a)。支持这一论点的主要证据是在众多新生代玄武岩的地幔橄榄岩捕虏体中存在高镁的橄榄岩包体或高镁的橄榄石捕虏晶，它们应该是古老的岩石圈地幔残留。由于古老的克拉通岩石圈经历过长期的复杂改造过程，其内部可能存在由地幔伟晶岩、地幔交代体和地幔剪切带等组成的薄弱带(郑建平, 1999)。郯庐断裂带的深切作用可以把古老岩石圈地幔中业已存在的薄弱带更好地连通起来，从而形成不规则网络状的幔内薄弱带，构成新生地幔物质上涌顶蚀古老岩石圈地幔并发生地幔置换和混合作用的通道(Zheng *et al.*, 1998, 2001, 2005, 2007)，从而进一步形成蘑菇云状不规则的地幔组成结构(郑建平, 1999; 路凤香等, 2000)，产生新、老地幔交叉并存的岩石圈特征(Zheng *et al.*, 2007)。由于不同地点岩石圈减薄的程度可能存在差异，有些地方(如郯庐断裂)岩石圈减薄程度大，几乎没有古老地幔的残余，而主要有新生地幔组成；而有些地方岩石圈减薄的程度相对较弱，因此出现古老地幔残余和新生地幔共生的情况，例如在河北鹤壁和山东莒南存在两类橄榄岩包体，一类为难熔的方辉橄榄岩，在Fo-橄榄石含量图解上与太古代克拉通型地幔相似；另一类为饱满的二辉橄榄岩，成分与大洋地幔相似，可能是新生地幔(Zheng *et al.*, 2001; Ying *et al.*, 2006)。

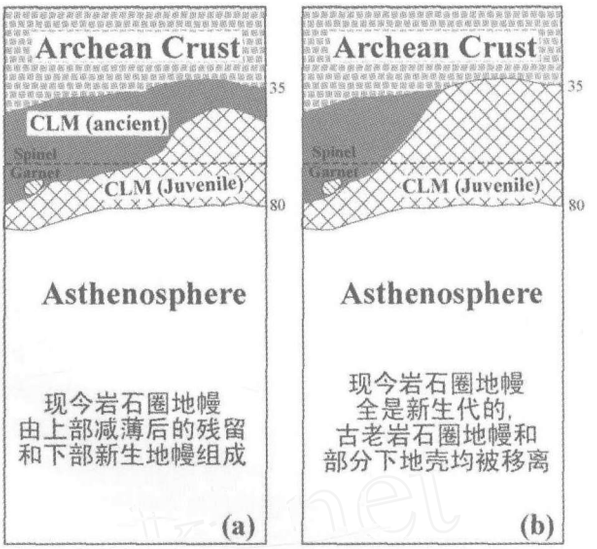


图7 华北克拉通岩石圈剖面年龄解释模型

Fig. 7 Explanation models of the age structure of the NCC

反对这一论点的主要依据有：(1) 新生代时岩石圈地幔的岩石类型、主要元素及Sr-Nd同位素特点均与古生代时的岩石圈地幔极不相同。尽管我们可以认为，古生代金伯利岩中地幔橄榄岩的同位素特点反映的是当时下部岩石圈的状况，而当时的上部岩石圈地幔与现今岩石圈地幔类似，但这一解释与目前的矿物化学和同位素研究并不相符；(2) 如果现今岩石圈地幔是减薄后的残留，其时代应仍是太古宙，并具有上老下新的年代分层结构，但目前的Os同位素资料没有发现新生代期间任何存在太古宙地幔的信息；(3) 橄榄岩的高镁并不一定意味着年龄就一定古老，因为镁含量的高低取决于岩石圈地幔的熔融程度，而与年代并不直接相关；(4) 即使是较为古老的岩石圈地幔，它也不一定是当时减薄后的残留，因为越来越多的证据显示，软流圈地幔中存在很多相对古老的岩石圈地幔碎片，它们与上覆岩石圈地幔在成因上毫不相干。

第二种观点认为，减薄已涉及到地壳，应是部分下地壳连同下部的岩石圈地幔一同被减薄(移离)(吴福元等, 1999, 2000, 2003a; Gao *et al.*, 2002, 2004; Wu *et al.*, 2003b, 2005a, 2005b, 2006; 邓晋福等, 1994, 1996, 2006; Deng *et al.*, 2007; 图7b)。这一观点的主要依据是：(1) 由新生代玄武岩中幔源包体的岩石学与地球化学特点反映的该时期岩石圈地幔以亏损型的海洋型地幔为主，与由蒙阴和复县及铁岭等地金伯利岩所反映的古生代时富集的岩石圈地幔性质截然不同，反映古生代时的岩石圈地幔在新生代已不存在；(2) Os同位素资料约束的岩石圈地幔年龄是，

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

古生代时的岩石圈地幔为太古宙，而新生代时期的岩石圈地幔为年轻性质；(3) 目前研究发现，中国东部不同地域上下地壳的成分差别不大，同时总体地壳成分明显比全球平均成分偏酸性（Gao *et al.*，1992，1998），这势必要求有下地壳的移离或拆沉。而从理论上讲，下地壳是很难拆沉进入较为刚性的岩石圈地幔，最合理的解释是该下地壳连同岩石圈地幔一起沉入软流圈；(4) 根据目前的理论研究成果，如果目前的岩石圈地幔是减薄后的残留，那么，它应该记录有早期升温到晚期降温的热演化过程，但目前有限的研究并没有发现这一现象（刘勇胜等，2003）。

反对这一论点的主要依据有：(1) 如果原有的古老岩石圈地幔全部被移离，那么剩下的应全是后来冷却形成的年轻岩石圈地幔。但目前的实际是，华北地区众多地点发现有元古宙地幔的存在；(2) 我们以前大多认为，饱满的二辉橄榄岩是新生的，其亏损的 Sr-Nd 同位素是这一论点成立的主要佐证。但实际上，岩石圈地幔的时代只有通过难熔的方辉橄榄岩的 Os 同位素测定才能获得答案。对华北地区的大量二辉橄榄岩来说，其准确的岩石圈地幔时代是不确定的。尽管古老岩石圈地幔遭受交代作用而成为富集地幔的可能性较大，但不排除部分岩石圈地幔在形成后就一直保持其亏损性质。如果这一假设成立，那些 Sr-Nd 同位素亏损的所谓新生岩石圈地幔实际上可能仍是非常古老的；(3) 如果岩石圈发生如此程度的减薄，其软流圈由于急剧减压而势必发生较大规模的部分熔融，形成大量亏损地幔来源的玄武岩，而目前的研究还未发现这一点。

以张宏福为代表的研究集体认为（张宏福，2006；Zhang，2005；Zhang *et al.*，2007；Tang *et al.*，2008），我们以前所认定的年轻岩石圈地幔是古老的岩石圈地幔与软流圈来源熔体相互作用的结果。那么，一个自然引出的问题是，华北的岩石圈是否经历过减薄。这有两种解释，其一，正是由于熔体或者流体与古老岩石圈地幔的相互作用，才造成岩石圈地幔性质的改变，从而导致其不稳定而发生丢失；其二，这种古老的岩石圈地幔与熔体的混合作用是岩石圈减薄后残存地幔演化的结果，与克拉通破坏本身无关。另一个重要问题是，以前我们均将饱满（fertile）的地幔橄榄岩视为新增生的年轻岩石圈地幔（Menzies and Xu，1998；Menzies *et al.*，2007；Zheng *et al.*，1998，2005a，2006a，2006b，2007；Xu，2001；Xu YG *et al.*，2008），但如果这种饱满的岩石圈地幔是由于软流圈来源熔体渗入的结果，那么，对年轻岩石圈地幔性质的界定将成为现今工作的一个重要问题。看来，该问题的深入研究对理解华北克拉通的破坏机制意义重大。同样，袁学诚（2007）在详细论述中国东部岩石圈地幔的蘑菇云模型时得出结论，华北岩石圈实际上并未减薄，其地幔性质的改变与深部软流圈物质的上涌有关。很显然，这一问题亟待深入研究，因为这是目前华北岩石圈减薄研究的前提。

5 克拉通破坏的空间分布

华北克拉通破坏的空间分布主要是指涉及多大的地理范围。目前倾向于认为，克拉通破坏主要发生在太行山以东地区.其主要证据是西部的鄂尔多斯盆地在中新生代期间基本保持稳定，且岩浆活动微弱，地热梯度低。同时，在太行山附近的汉诺坝、阳原、繁峙和鹤壁地区，新生代玄武岩中的地幔橄榄岩显示太古宙-古元古代的年龄（Gao *et al.*，2002；Xu YG *et al.*，2008；Zheng *et al.*，2007），这与太行山以东地区的情况有所不同。

另外一种观点认为，华北的岩石圈减薄只是局限在周边的造山带范围内，而华北的腹地并未发生减薄。但我们认为，目前用来制约新生代岩石圈地幔特征的新生代玄武岩中的地幔橄榄岩包体确实大多发育在华北的周边地区，但并不表明华北的内部没有发生减薄，只是盆地沉积物的掩盖使我们对这一问题难以讨论。但实际上，地球物理资料已经显示，在华北中部的盆地之下，其岩石圈的厚度与周围地区相同（何丽娟等，2001；Chen *et al.*，2006，2008），并不显示巨厚岩石圈的存在，表明其也发生了减薄。

在讨论克拉通破坏空间分布时，一个重要的问题是我国东部的东北和华南地区是否也经历过同种过程。部分学者认为（Gao *et al.*，2002；Zhang *et al.*，2003），仅华北克拉通东部具有明确的克拉通破坏证据。其它作者认为，尽管并无明确的反映岩石圈厚度变化的证据，岩石圈减薄和克拉通破坏应同样发育在我国东部的其它地区（Wu *et al.*，2005a；Xu，2007；Xu XS *et al.*，2008；Zheng *et al.*，2006b，2007）。由于这一问题的讨论已超出本文的范围，我们拟不在此做详细的讨论，但我们提出以下几点作为今后工作的重点。(1) 大兴安岭-太行山-武陵山重力梯度带是否可以作为克拉通破坏的边界？克拉通破坏的最重要表现是岩石圈减薄，而大兴安岭-太行山-武陵山重力梯度带两侧地壳和岩石圈厚度存在明显的变化，且其西部的鄂尔多斯和四川盆地显示较为稳定的特点。因此，将上述重力梯度带作为克拉通破坏的边界是在情理之中的（Xu，2007）。但实际上，我们目前对上述重力梯度带的成因并不确定，不排除它为新生代形成的可能性。如果是新生的，则该带被认为是克拉通破坏边界的认识需要重新审视。而如果假设它是岩石圈减薄的边界，则克拉通破坏不应仅限于华北地区，而是发育在整个中国东部。(2) 圈定克拉通破坏范围的依据和地质标志究竟是什么？在华北地区，古生代含金刚石金伯利岩的存在使我们可以知晓其岩石圈厚度的变化，而东北和华南及华北的其它地区却较少存在足以限定早期岩石圈厚度的金伯利岩等岩石。因此，寻找确定克拉通破坏范围的标志是未来研究的一个重要问题。我们在此提出两项研究途径。其一是克拉通破坏时期不同地域的区域地质事件对比，第二仍是岩石圈地幔时代的研究。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

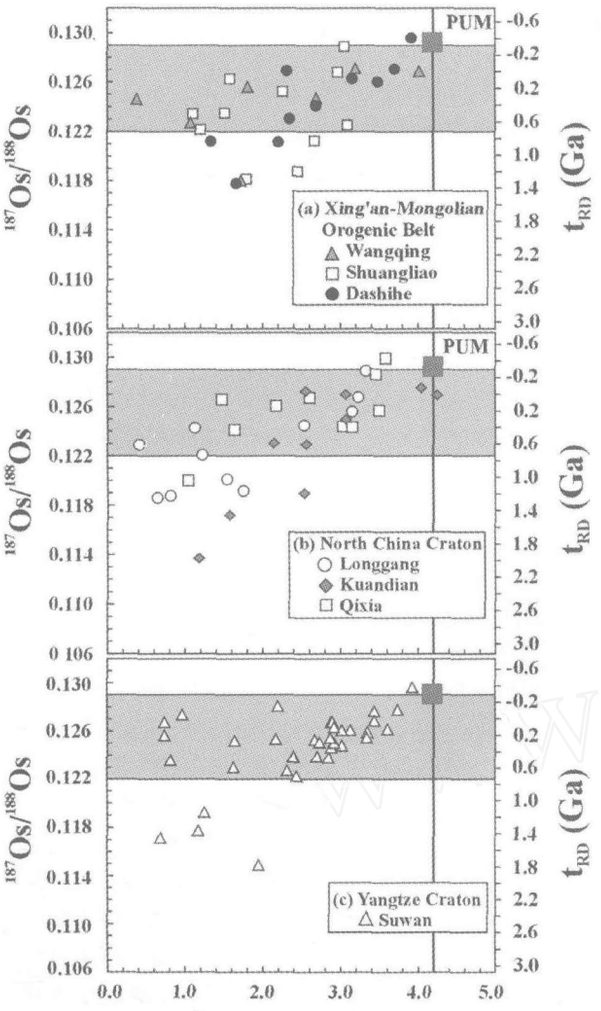


图 8 中国东部不同地区岩石圈地幔的 Os 同位素特征

(资料: Meisel *et al.*, 2001; Gao *et al.*, 2002; Wu *et al.*, 2003b, 2006; Xu YG *et al.*, 2008; 夏琼霞等, 2004; Reisberg *et al.*, 2005; 周琴等, 2007)

Fig. 8 Os isotopic characteristics of the peridotitic xenoliths from different areas of eastern China

(Data sources: Meisel *et al.*, 2001; Gao *et al.*, 2002; Wu *et al.*, 2003b, 2006; Xu YG *et al.*, 2008; Xia *et al.*, 2004; Reisberg *et al.*, 2005; Zhou *et al.*, 2007)

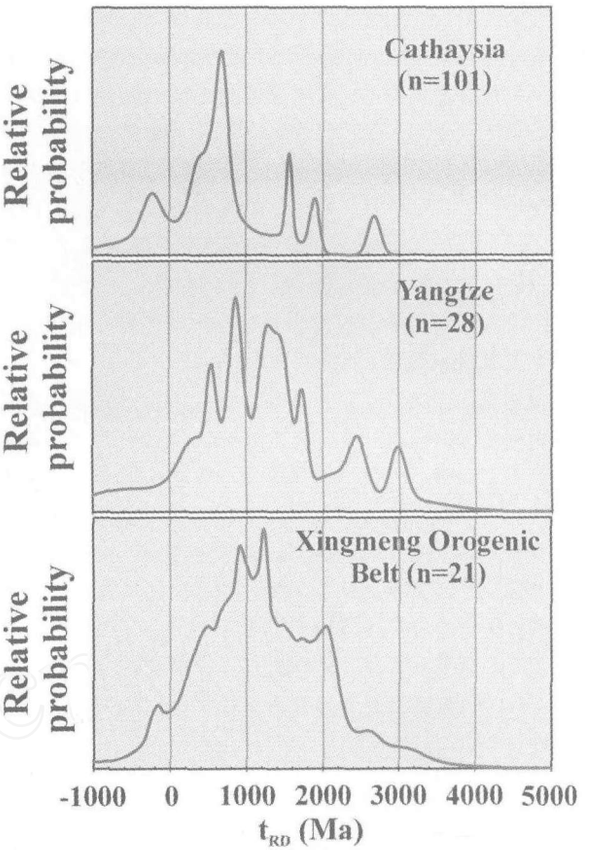


图 9 中国东部不同地块新生代玄武岩橄榄岩包体中硫化物 Os 同位素特征(资料来源: Xu XS *et al.*, 2008)

Fig. 9 Os isotopes of sulfides within mantle xenoliths from Cenozoic basalts in eastern China (Xu XS *et al.*, 2008)

从中国东部中新生代火成岩的整体特点出发，本文第一作者已多次论述过，东北、华北和华南地区的岩浆活动时代和岩石性质均可进行对比。如果这些地质事件是克拉通破坏的产物，那么岩石圈减薄就应该同样发生在华南和东北地区。在这方面，东北和华北地区早白垩世（120 ~ 130 Ma）大规模岩浆活动被认为与华北克拉通破坏过程有关，而华南地区此期岩浆活动似乎与上述两地有所不同。但值得注意的是，120 ~ 130 Ma 的岩浆活动在长江中下游和华南沿海地区广泛发育。华南腹地虽然此期岩浆活动相对较弱，但它的存在也是肯定的。因此，如果认为 120 ~ 130 Ma 是华北克拉通破坏的时期，那该克拉通破坏也一定同样发生在东北、华北和华南的整个中国东部地区，只不过在华北是古老克拉通的破坏，而华南和东北是新生的元古宙-显生宙克拉通的破坏。从新生代时期岩石圈地幔的特点出发，东北、华北和华南地区新生代玄武岩中的地幔橄榄岩包体无论在岩石类型、矿物成分特点和地球化学组成上均有很好的对比性（Fan and Hooper, 1989; 鄂莫岚和赵大升, 1988; Xu *et al.*, 1998; Fan *et al.*, 2000; Xu *et al.*, 2000; Zheng *et al.*, 2004b）。上述三个地区岩石圈地幔样品的全岩 Os 同位素特征也基本一致（图 8）。即使是硫化物的激光原位测定，除目前还没有华北东部的资料外，东北兴蒙造山带、扬子和华夏地块所获得的结果基本雷同（Wang *et al.*, 2003; Xu XS *et al.*, 2008; 余淳梅等, 2007; 图 9）。但是，这些地区的地壳演化历史与时代是完全不同的（图 4）。按照现行地球演化的基本理论模式，岩石圈地幔是由于地壳的移去而残留下的地幔物质，其年代应与上覆地壳的年龄一致，但本区表现的情况并非如此。一个合理的解释是，这些岩石圈地幔都是新生的，是克拉通破坏后的新生岩石圈地幔。

关于这一问题的进一步资料来自橄榄岩包体的 Sr-Nd

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

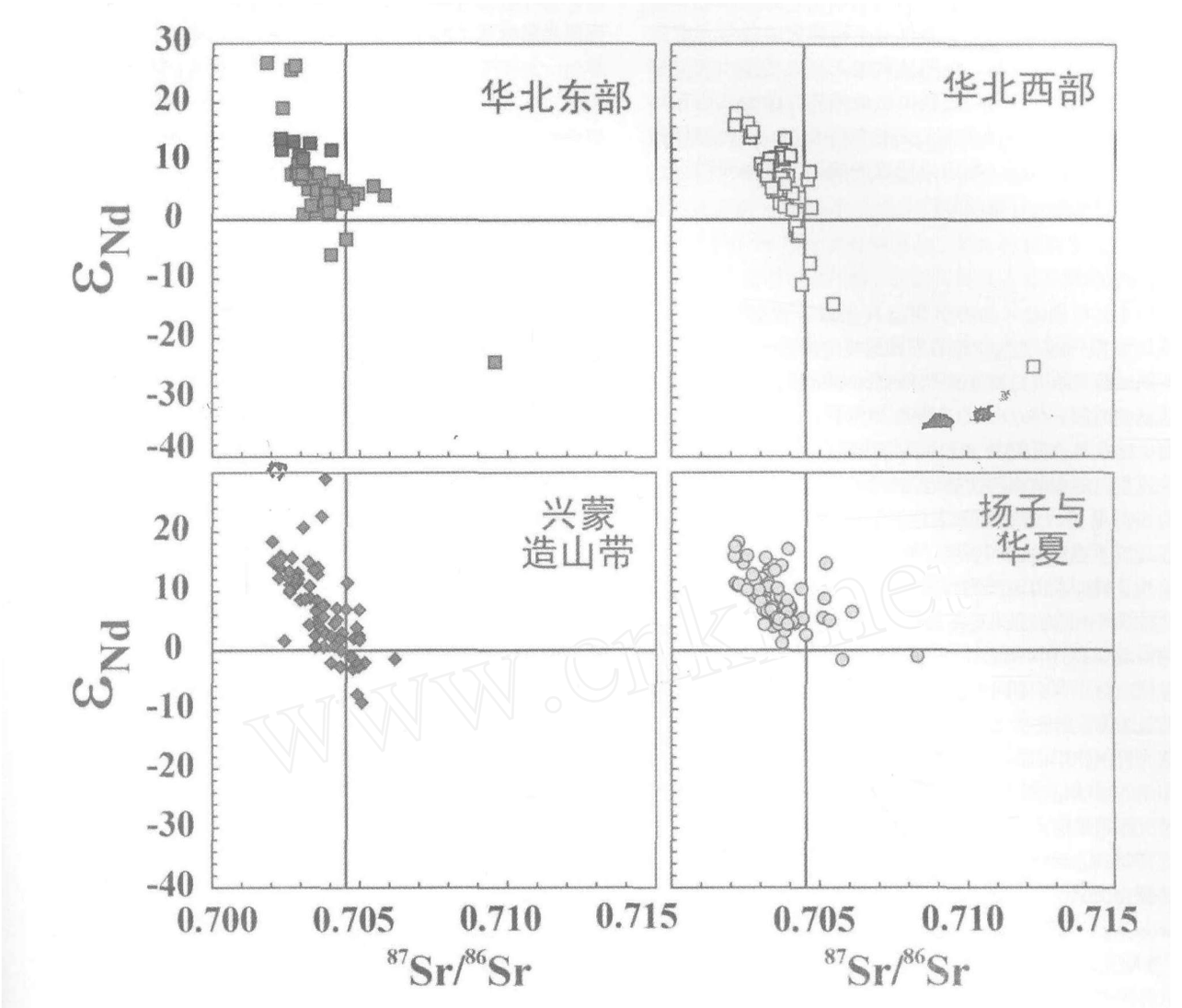


图 10 中国东部不同构造单元新生代玄武岩中地幔橄榄岩 Sr-Nd 同位素特征

Fig. 10 Sr-Nd isotopes of peridotite xenoliths in the different tectonic units of eastern China

同位素。尽管我们不能用这两种同位素来获得地幔的年代，但它们能给出大概的制约。目前积累的资料至少反映(图 10)，华北、东北与华南地区新生代玄武岩中的地幔橄榄岩包体具有相同的 Sr-Nd 同位素组成，且均具有高的ε_{Nd}值，反映三地区之下的岩石圈地幔均具有 Sr-Nd 同位素亏损性质。然而，上述三地区地壳的时代是不同的，所应具有的岩石圈地幔时代也应有所差别，由此而导致的后期岩石圈地幔的演化历史不可能完全相同。因此，对这一资料的最合理解释是这些岩石圈地幔都是新生的。

具体到华北地区本身的资料，以太行山为界，华北地区东西部橄榄岩包体并不显示 Sr-Nd 同位素上的本质差别，且两者都存在少量 Sr-Nd 富集的样品，反映存在少量经历过古老地幔交代作用的地幔。然而，正如前面我们所指出的那样，Sr-Nd 亏损岩石圈地幔的年代是我们目前还难以取得共识的问题。例如，宽甸和汉诺坝地区的橄榄岩绝大多数是 Sr-Nd 亏损的，但 Os 同位素给出的地幔时代却是古元古宙的。而如果我们承认华北岩石圈在 Sr-Nd 同位素上一直是亏损的，那又如何解释中生代时存在大量富集地幔来源的火成岩和鲁西地区发现有富集的岩石圈地幔样品呢？因此，对上述资料最好的解释是华北的西部也发生过岩石圈减薄与后期增生。或者说，我们现在还不能否认华北的西部未发生过减薄，或者华北西部新生代以来正处于岩石圈减薄过程中（Xu *et al.*，2004b），当然也不能排除该区部分地幔为新生的可能性。

6 克拉通破坏机制

华北克拉通破坏机制是目前争论最激烈的问题。导致

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

这一现象产生的原因一方面与当前很多地区的基础地质资料不太翔实有关，但另一方面也与不同研究者的学术背景有关。以本文作者为例，长期从事地壳研究的高山和吴福元倾向于拆沉机制，但一直致力于地幔研究的徐义刚和郑建平则更倾向于热侵蚀模型。无论何种模型，它都能解释一些现象，但都存在一些难以回答的问题。下面我们对这一方面的争论作一仔细的分析。

6.1 拆沉作用

华北克拉通破坏的拆沉模型首先由邓晋福等（1994，1996）提出，他们认为下部岩石圈地幔的拆沉导致了华北的岩石圈减薄，并用此模型来解释我国东部燕山期大规模岩浆活动的原因。Gao *et al.*（1992，1998a，1998b，2002）根据对中国东部大陆成分和地壳结构的研究，发现包括华北克拉通在内的中国东部大陆地壳整体具明显 Eu 负异常和较高的 SiO_2 含量。他们还测定了中国东部典型地壳深部岩石高温高压下地震波速和密度（Kern *et al.*，1996，1999），结合前人获得的我国地震测深成果及其与全球大陆地壳的对比，揭示出中国东部无论下地壳还是地壳整体的地震 P 波速均偏低 0.2～0.4 km/s、下地壳具独特的双层结构和中性的总体成分，明显不同于全球单层基性下地壳模型，演化程度明显较高，由此提出了华北克拉通和秦岭－大别造山带下地壳拆沉作用的多学科证据，建立了定量模型下地壳拆沉作用的地球化学模型，并指出下地壳与岩石圈地幔的整体拆沉作用可能是中国东部岩石圈减薄的可能机制（Gao *et al.*，1998a）。近年他们通过对辽西高镁火山岩和徐淮榴辉岩的研究，提出了下地壳和岩石圈地幔拆沉的更多证据（Gao *et al.*，2002，2004；Xu WL *et al.*，2006a，2008）。近来，李曙光、吴福元等也提出下地壳与岩石圈地幔一起发生拆沉的思想（吴福元等，1999，2000，2003a，Wu *et al.*，2003b，2005a，2006；Huang *et al.*，2007；Yang and Li，2008），邓晋福等也修改了早先提出的模型，提出了类似的想法（邓晋福等，2006；Deng *et al.*，2007）。当然，岩石圈是整体一次拆沉还是分块多次拆沉，目前并不清楚。

拆沉作用的本质是指由于重力不稳定性而导致的重力垮塌。在拆沉过程中，加厚的下地壳转变成榴辉岩，此榴辉岩与下伏的岩石圈地幔一起被拆沉进入软流圈地幔。显然，该模型预测的现今岩石圈地幔几乎都是新生的，且岩石圈减薄已涉及到地壳。支持这一模型的主要证据是：（1）岩石学和地球化学资料已经证明，现今岩石圈地幔的状况与古生代时的岩石圈地幔完全不同，表明早先存在的岩石圈地幔已全部消失；（2）Os 同位素资料已经显示，古生代时的岩石圈地幔为太古宙，但新生代时的岩石圈地幔主要表现为年轻性质，除东西交界部位的鹤壁地区以及山东莒南外，其它地区到目前为止还未发现有太古宙的残留存在；（3）华北中生代岩浆活动明显呈幕式分布，无论那一期对应克拉通破坏、都表明该事件的发生是相对快速而短暂的；（4）Gao *et al.*（2004）对辽西侏罗纪火山岩的研究发现，该壳源岩浆受到了地幔的污染，在排除岩浆混合成因的可能后，一个自然的解释是拆沉进入地幔后的地壳物质发生了熔融。许文良等对徐淮和鲁西地区中生代火成岩的研究得出类似的认识（Xu WL *et al.*，2006a，2006b，2006c，2008）；（5）在新生代玄武岩的地幔橄榄岩中，目前发现有地壳成因的熔体包裹体，它很可能就是拆沉进入地幔的物质存在的证据（樊祺诚等，2005）；（6）华北东部在晚中生代发育大规模的沉积盆地，其中碎屑沉积岩粒度变化很大，多出现表征不稳定性存在的砾岩，显示显著的地形差异与快速剥蚀；（7）目前有证据表明华北东部在中生代期间可能存在加厚的地壳，其中目前讨论颇为热烈的高镁 adakite 就是例证；（8）目前在华北东部发现有多处存在变质核杂岩，它们的发育时代都集中在 120～130 Ma 的早白垩世，且在运动方向上极为一致，表明短时间内地壳的大规模拆离（Liu *et al.*，2005；Lin *et al.*，2006；Yang *et al.*，2007d；王涛等，2007）。

目前对拆沉模型的质疑是：（1）除在徐淮和信阳等局部地区外，目前还无足够的证据证明华北东部在拆沉以前存在加厚的地壳；（2）古生代时的岩石圈地幔在主量元素上是难熔的，因而具有较轻的密度而不容易拆沉。即使其拆沉是高密度下地壳拆沉引起的，考虑到当时难熔岩石圈地幔的厚度有约 100km，较薄的高密度下地壳（10～20km）也难以抵消难熔岩石圈地幔的浮力；（3）尽管该地区中生代岩浆活动呈幕式分布，但其经历的时间大于 100 Ma，因对应缓慢的破坏过程。或者说，中生代岩浆活动的幕式分布与岩石圈减薄的"量变"与"突变"有关，并不一定对应岩石圈的拆沉；（4）拆沉作用的直接结果是软流圈的上涌，而此压力的降低必然使其发生相当程度的部分熔融而形成玄武岩，但目前的事实是，中生代期间软流圈地幔来源的玄武岩在华北分布极为有限；（5）尽管在新生代玄武岩的地幔橄榄岩包体中发现有富硅的熔体包裹体，但目前还不能确切地证明它来源于地壳，特别是上覆地壳物质的部分熔融，因为有实验证明地幔橄榄岩减压熔融可以形成一定的富 Si 熔体；（6）拆沉模型不能解释的另一个重要事实是，现今的岩石圈地幔在垂向上是不分层的，反而是交叉并置的（Zheng *et al.*，2007），且部分样品给出的元古代 Os 模式年龄与拆沉模式所预测的新生岩石圈地幔有所矛盾。同时，岩石圈地幔的年轻性质也可以用热侵蚀模型来解释。

6.2 热侵蚀作用

热侵蚀模型自提出华北岩石圈减薄以后就一直被众多研究者所青睐（Menzies *et al.*，1993；Menzies and Xu，1998；Griffin *et al.*，1998；Xu，2001；Xu YG *et al.*，2004a，2008；Zhang *et al.*，2003，2004；Zheng *et al.*，1998，1999，2001，2006a，2006b，2007）。它的基本涵义是，上涌软流圈的热传导"烘烤"会使岩石圈最底部物质发生软化，在软流圈水平流动产生的切向剪切应力作用下，这一部分物质就会转变

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

成软流圈的一部分。这样的剥蚀会加剧软流圈向上覆岩石圈传导热的程度，从而进一步软化岩石圈底层，导致新一轮的剥蚀. 这种相互关联的热软化和机械剥蚀被称为热－机械侵蚀(thermo-mechanic erosion)。不过热－机械侵蚀并不是岩石圈减薄的唯一机制，这是因为软流圈的上升必然会伴随岩石圈力学边界层（MBL）的初始熔融，以及深部熔体以渗透性反应孔隙流的方式通过软流圈－岩石圈界面而进入岩石圈地幔（这一过程就是所谓的岩石圈的化学侵蚀，chemical erosion)。熔体－岩石反应可以改变岩石圈地幔的矿物组成，改变其渗透率和流变学性质，导致岩石圈底部的重力不稳定性。例如，地幔交代作用可以使原先具有高浮力的方辉橄榄岩变成与软流圈浮力相差不大的二辉橄榄岩，这种变化肯定会加速岩石圈减薄的进程（徐义刚，1999)。很显然，热侵蚀模型要求残留的岩石圈地幔具古老性质。尽管克拉通破坏某种程度上也可在侧向上发生，但它总体上是自下而上进行的，破坏只涉及到下部的岩石圈地幔，而不涉及到地壳。支持这一模型的主要证据有：(1) 克拉通岩石圈是低密度的，它的破坏不可能自上而下，而更可能是自下而上，抑或从侧向开始发展；(2) 华北地区中生代岩浆作用的发育年代大约在 180～80 Ma，显示克拉通破坏的时间跨度较大，也表明岩浆的产生不是一步到位的，而是发展演化的结果；(3) 中生代岩浆岩主要表现为岩石圈地幔来源，是软流圈上升情形下对岩石圈地幔侵蚀的结果。

反对这一模型的主要证据有：1) 除在东西部交界处的鹤壁这一特例以外，目前的 Os 同位素数据还未发现在新生代有古老的太古宙岩石圈地幔残留存在；(2) 交代作用的流体或熔体大多富集大离子亲石元素，它们交代古老的岩石圈地幔以后必将使原本富集的特点更加显著，而这与目前的观察相矛盾；(3) 华北中生代岩浆作用尽管持续时间长，但并不是有岩浆活动就表明有岩石圈破坏。此外，构造分析的研究发现（Davis *et al.*，2001)，华北在侏罗纪期间主要以挤压和推覆变形为主，而只是到早白垩世才发育大规模的伸展构造；(4) 热侵蚀模型要求深部上升的物质具有较高的温度，或者说，热侵蚀作用大多发生在地幔柱的背景之中。但目前我们还没有足够的证据证明华北在中生代时存在有地幔柱；(5) 热侵蚀模型依赖的重要基础是早期秦岭-华北地区的地震层析成像结果-蘑菇云。且不说这一地球物理探测结果表示的是现今的深部物质状态，更重要的是这一资料的可靠性在最新的研究中未得到证实（Huang and Zhao, 2006)；(6) 热侵蚀作用难以解释华北克拉通为何具有更演化的下地壳与地壳整体成分整体上偏长英质的特点；(7) 如果热侵蚀是通过正常的软流圈地幔的作用而实现的话，那为何世界上其它的克拉通多不遭受破坏，因为它们同样位于较为均匀的热软流圈之上。

6.3 橄榄岩-熔体相互作用

除上述两种较多讨论的模型外，张宏福等多次提出，橄榄岩与熔体的相互作用是导致克拉通破坏的重要原因（Zhang *et al.*，2002，2007；Zhang，2005；张宏福等，2004；张宏福，2006；Tang *et al.*，2008)。这一论点的主要依据是：(1) 目前的研究发现，古生代、中生代和新生代时华北岩石圈地幔的性质各不相同，反映它们经历了极为复杂的历史；(2) 在不少地点的橄榄岩捕虏体或橄榄石捕获晶中，其橄榄石边部的 Fo 号码明显偏低，是熔体与橄榄岩相互作用的结果；(3) Os 同位素资料显示，新生代岩石圈地幔显示元古宙-显生宙的形成年龄，它们可能是古老的岩石圈地幔与熔体相互作用的结果。

该模型的提出，为华北克拉通破坏机制的研究提供了新思路。但该模型需要澄清的问题是：(1) 橄榄岩与熔体的相互作用是发生在岩石圈减薄之前还是之后？如果发生在其后，则该过程与克拉通破坏无关。如果发生在之前，该机制是如何导致了岩石圈的减薄和克拉通的破坏？(2) 交代橄榄岩的熔体是来自于包裹地幔橄榄岩的中-新生代玄武岩本身还是抑或有其它来源？(3) 从华北南部方城玄武岩的情况来看，交代的介质与南侧大别造山带的大陆深俯冲有关，但为何现今的岩石圈地幔在 Sr-Nd 同位素上均表现为亏损的特点；(4) 尽管从理论上说，古老的岩石圈地幔与软流圈来源熔体的相互作用可以改变其 Os 同位素组成，但所要求的熔体比例极高，而这在岩石学上还没有确定的证据，而有限比例熔体的加入是不能改变地幔橄榄岩的 Os 同位素组成的；(5) 大陆地区软流圈来源的熔体并不是大洋玄武岩（MORB)，它的稀土元素型式表现为轻稀土富集性质，它加入到古老的岩石圈地幔势必将导致新形成的地幔橄榄岩也表现为轻稀土富集特点，但现实是现今的大多数地幔橄榄岩表现为轻稀土亏损的特点。

6.4 机械拉张作用

华北东部在晚中生代期间处于伸展构造背景有大量资料的支持，如广泛发育的伸展盆地和变质核杂岩等。一个自然的推测是，是否正是这一伸展才导致了克拉通的破坏。但目前这一解释所涉及的主要问题是：(1) 如果没有特殊的原因，克拉通型岩石圈一般具有较高的刚性，其机械拉伸而导致减薄的可能性较小；(2) 纯粹的伸展是一种等体积的物理学过程，它难以解释岩石圈（包括地壳和岩石圈地幔）本身物质组成的变化；(3) 尽管目前对这些伸展构造有较多研究，但不能证实华北东部在晚中生代时的拉伸系数(β)足以高到使岩石圈产生巨量的减薄；(4) 尽管华北地区地壳浅部有较多伸展作用的证据，但目前还没有可靠的资料说明其地幔也经历过类似地壳的伸展；(5) 像岩浆作用与岩石圈减薄的关系那样，究竟是机械拉张导致了岩石圈减薄，还是由于岩石圈减薄而导致的浅部地壳的拉伸，这也是目前还不太明确的问题。尽管如此，对伸展构造的深入研究将会对华北克拉通破坏问题提出新的启示。由于目前发现，华北地区中生代变质核杂岩及相关的伸展构造大量

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

发育，它对岩石圈厚度的减薄应该起到了重要的贡献。如果我们能够确认现今的岩石圈地幔主要是减薄后的残留，那么机械拉伸而减薄后的岩石圈地幔本身由于受到软流圈上涌影响而发生改变将不是不可能。

6.5 岩浆提取作用

一个显著的事实是，华北地区中生代岩浆作用极为强烈，其中部分火成岩是古老的岩石圈地幔来源的。因此陈斌等认为（Chen *et al.*, 2004），这种通过消耗岩石圈地幔来产生岩浆可能是华北岩石圈减薄的重要机制。但该模型存在的问题是：(1) 从质量守恒的角度来看，如果形成岩浆后的岩石圈地幔残留不发生拆沉，其总体岩石圈厚度不可能有大的变化；(2) 尽管华北地区中生代岩浆作用极为发育，但主体是长英质的，它们基本上都是地壳来源的。即使部分岩石显示壳幔混合作用的存在，但地幔物质的比例仍非常有限；(3) 即使岩石圈地幔发生较高程度的部分熔融，所产生的镁铁质岩浆大多以底侵方式侵位于地壳之中，这会导致地壳的显著增厚，而这与目前的资料不太吻合。

6.6 岩石圈地幔水化模型

如此同时，牛耀龄认为（Niu, 2005），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份进入俯冲带上盘的地幔楔，从而使其粘性程度发生显著降低而表现为类似软流圈的性质，进而由于流动而发生岩石圈减薄。这一思想的重要之处在于强调了岩石圈地幔的弱化作用，因为无论是何种机制，岩石圈的弱化是克拉通发生破坏和减薄的重要前提。因此，未来一段时间内，加强流体作用的研究对我们深化华北克拉通破坏与岩石圈减薄有非常重要的意义。

从上述分析可以看出，关于华北克拉通破坏机制的研究目前远未定论。可以预见，这一争论还将在未来一段时间内持续存在。目前出现一个倾向，即认为在华北的周边地区，板块俯冲而导致的拆沉作用可能是岩石圈减薄的主要机制，但在华北内地，热侵蚀可能更为重要. 我们认为，该观点可能是对的，但我们目前还没有可靠的实证资料来评价减薄机制在空间上的变化。值得指出的是，目前对机制的认识主要在于岩石圈减薄是快速还是慢速的过程，而对这一过程的判定可能需要结合地表或地壳浅层的研究资料，特别是中生代期间深部岩石剥露、盆地充填和地势变迁历史的研究会对这一问题提供很好的约束。但是，上述不同的模式也并不是完全相互排斥的。就像对流型岩石圈移离（convective removal）与拆沉作用很难区分一样，但实质上，对流型岩石圈减薄可能就是热侵蚀的一种类型。

7 克拉通破坏的地球动力学原因

在探讨这一问题之前，我们必须明确涉及克拉通破坏的两个问题。其一是它发生时克拉通的状况，这种状况是该构造单元经历长期演化的结果。其二，克拉通破坏的机制只能是导致它发生时的构造触发因素。例如，我国的大别造山带在三叠纪时发生了显著的地壳增厚，但此加厚的地壳一直到白垩纪才发生了垮塌。很显然，我们不能说该造山带的垮塌是三叠纪华北与扬子板块碰撞的结果，而必须寻找另外的原因。再比如，欧亚大陆交界处的乌拉尔造山带目前仍保留有古生代时由于板块汇聚而形成的加厚山根，但如果该山根在未来由于某种地质作用而发生了拆沉，我们显然不能说，该造山带的垮塌是古生代造山作用的结果，而只能说它是由于后来某种地质作用过程的结果。虽然早期形成的加厚地壳是上述地区后来拆沉发生的重要条件，但它只是后来发生该作用的基础，即早期状况。因此，我们在讨论这一问题之前，首先需要明确华北地区古生代以来的构造演化历史。

根据目前的研究结果，华北克拉通最早的地壳形成在约3.8～4.0 Ga左右。太古宙期间，华北克拉通以广泛发育2.5 Ga岩浆与变质作用为特色，并可划分为东部陆块、西部陆块和中间的碰撞造山带。东西两陆块约在1.85 Ga左右沿华北中部造山带发生拼合，并完成克拉通化（Zhao *et al.*, 2001）。此后，华北进入稳定的盖层演化阶段，元古宙-显生宙以广泛发育克拉通型盆地沉积为主，除在局部阶段存在微弱的岩浆活动外，1.85～0.2 Ga期间的沉积作用保持相对的连续性。从早古生代开始，由于北部古亚洲洋向南俯冲的影响，华北北缘发生隆升，使早先的海水逐渐向南退出，并造成中奥陶-早石炭世之间的沉积不整合。但此时华北克拉通仍保持较高的整体稳定性，发育含金刚石的金伯利岩，只是在北缘由于古亚洲洋的俯冲而发育一定程度的岩浆活动。晚古生代末期-中生代初期，南部扬子克拉通向北运动并逐渐与华北克拉通发生拼合，同时形成以发育大量高压-超高压变质岩为特色的大别-苏鲁造山带，但该时期发育在华北克拉通上的岩浆活动仍然相对有限，仅在北缘发育一定程度相当于非造山型的、象征稳定地块性质的碱性岩浆活动。侏罗纪-早白垩世期间，由于受到东侧太平洋板块俯冲的影响，华北东缘发育大量的钙碱性岩浆活动，成为东亚活动大陆边缘的一部分。大约从100 Ma的早白垩世晚期开始，华北地区不再发育钙碱性岩浆活动，取而代之的是碱性玄武岩浆活动。这一概念性的地质演化历史是我们后面讨论华北克拉通破坏构造机制的重要基础。

7.1 印度同欧亚板块的碰撞

印度与欧亚大陆碰撞对我国东部的影响是一个很早就被讨论的话题，但该碰撞是否与华北的克拉通破坏存在联系却较少有人涉及（Menzies and Xu, 1998; Liu *et al.*, 2004），因为如果认为岩石圈减薄发生在晚中生代的话，那时印度和欧亚板块还未发生碰撞。更为重要的是，印度与亚洲的碰撞远发生在华北以西，而目前揭示的克拉通破坏

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

主要发育在华北的东部，两者在空间关系上不匹配。

7.2 地幔柱

这也是一个较少提及的模型，主要有三种类似的解释方案。其一认为，华北克拉通破坏起因于下部软流圈的隆升，而此隆升可能是地幔柱上升的结果（袁学诚，1996，2007；路凤香等，2000）。第二种模型认为，在早白垩世，西南太平洋发育以 Ontong Java 为代表的巨型地幔柱，而该地幔柱对我国东部的地质演化可能产生了影响，并导致了克拉通的破坏（Zhao *et al.*，2004）。第三种模型则认为，晚中生代是冈瓦纳大陆由于受地幔柱影响而发生裂解的时期，这种全球地幔柱活动导致了华北克拉通的破坏（Wilde *et al.*，2003；洪大卫等，2003）。从岩石学、地球化学和地球物理学的角度出发，目前还缺乏可信的能够证明华北地区在古生代以来存在过地幔柱的资料。同时，如果我们接受克拉通的破坏过程发生在东北到华南的整个中国东部，这一线状展布现象则很难用地幔柱机制来进行解释。

但是，针对当前东亚地区的大量地震层析资料，袁学诚（2007）经分析后认为，除东北地区可能存在早期俯冲的太平洋板块残留外，华北和华南地区之下不存在太平洋板块俯冲的迹象。相反，来自地球核幔边界的质量异常导致了华北和华南地区蘑菇云构造的产生，进而改造岩石圈地幔使其发生了破坏。

由于这一问题比较重大，我们认为今后应加强这方面的研究。由于本文作者都不是地震层析研究方面的专家，建议读者去阅读相关的原始文献（Fukao *et al.*，2001；Stern，2002；Kim *et al.*，2003；Romanowicz，2003；Huang and Zhao，2006），去研读究竟在华北和华南地区下面是否存在俯冲的大洋板块。如果有，来自核幔的地幔柱就不可能或者还未穿过滞留或俯冲的大洋板块而对我国东部产生影响。即使有地幔的上涌，那也是浅部的，与核幔边界的异常相差甚远。此时，中国东部地下深处是相对冷的，而不是热的。反之，我们则需要转换思路，需要有新的认识。

7.3 扬子和华北板块的拼合

这是本文作者高山教授及其研究集体一直致力讨论的方案（Gao *et al.*，2002），它最早由 Menzies and Xu（1998）提出，认为扬子和华北板块之间的碰撞破坏了华北克拉通的整体性，从而为后来岩石圈的减薄奠定了基础。Gao *et al.*（2002）则认为扬子与华北的碰撞导致了地壳加厚，形成大量的榴辉岩，这是华北岩石圈发生拆沉作用而减薄的起因。提出该模式的主要理由包括：（1）作者认为华北岩石圈减薄起因于拆沉作用，而拆沉作用的发生需要加厚地壳转变成榴辉岩，而扬子与华北的碰撞正好产生了大量的榴辉岩；（2）华北东南缘的徐淮地区晚中生代火成岩中确实发现了榴辉岩，且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（245～220 Ma）一致（Xu *et al.*，2006a）；（3）辽西地区存在年龄为 222Ma 的高镁埃达克岩和高镁安山岩（Gao *et al.*，2006）。正如前面所讨论的那样，判断这一模型是否成立的关键是克拉通破坏的时空分布。第一，如果华北克拉通破坏发生在晚中生代，那为什么 240 Ma 左右的加厚岩石圈到差不多 100 Ma 以后才发生拆沉。其二，从空间分布来看，大别-苏鲁，包括相关的秦岭造山带，整体上呈近东西向分布，只是在苏鲁地区才呈 NNE 向，它们是扬子与华北碰撞而形成的造山带。因此，如果其后发生岩石圈拆沉的话，其展布方向应呈东西向，且应集中在华北地区东缘和南缘。而目前大家认定的岩石圈减薄区域呈 NNE 向分布在我国东部的东北、华北和华南地区，与上述讨论的方向不相吻合。

7.4 太平洋板块的俯冲

针对中国东部宽广区域的岩浆作用，有不少学者认为中国东部中生代地质演化与太平洋板块俯冲无关。尽管如此，大部分学者还是认为中国东部东侧大洋板块的俯冲是导致该区岩石圈减薄的首要构造控制因素（Sun *et al.*，2007），但不同学者认识的细节不尽相同。我们不拟在此讨论当时中国东部是否存在活动大陆边缘，因为对这一问题有大量的宏观地质证据，北美宽广的活动大陆边缘也是中国东部可以存在这一构造背景的佐证，但我们在此只是简单分析一下不同学者观点上的差别。

吴福元等（1999，2000，2003a）多次撰文认为，中生代时太平洋板块向欧亚大陆下的俯冲可分为侏罗纪的俯冲和白垩纪的拉张两个阶段。正是侏罗纪时的大规模俯冲，使中国东部形成类似安第斯山的活动大陆边缘，并发生岩石圈的增厚，而此增厚的岩石圈在白垩纪发生了拆沉。拆沉作用发生时，软流圈发生隆升，地壳进入伸展状态，而地表表现为正地形，称之为东部海岸沿岸山脉。Xu YG *et al.*（2008）和 Zheng *et al.*（2006b，2007）则认为，太平洋板块的俯冲产生弧后扩张，扩张区软流圈不断地对上部岩石圈地幔进行侵蚀。特别是沿郯庐断裂等深大断裂软流圈上涌最强烈，相应的热侵蚀作用也最为活跃，从而造成岩石圈的减薄。

从上述不同模型可以看出，问题的实质是以下几个方面。其一，软流圈上涌的机制是什么？是岩石圈的拆沉导致了软流圈的上涌，还是上涌软流圈的侵蚀才导致了克拉通的破坏？其二，从目前的资料来看，西太平洋深部地幔似乎富水是大家的共识（Komiya and Maruyama，2007）。板块俯冲使大量的水进入地幔楔，并进而使其软化而被易于拆沉或侵蚀，这是可以理解的（Sleep，2005），模拟实验研究也证明了这一点（Lenardic *et al.*，2003；Currie *et al.*，2008）。但这一富水的地幔以及由太平洋板块长期俯冲而产生的巨大地幔楔（BMW，big mantle wedge；Zhao *et al.*，2007）对中国东部地质作用影响的细节则是目前认识还十分有限的科学问题。第三，中国东部在中生代时是否为造山带？如果我

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

们认为俯冲带也是造山带，那在造山带地区，岩石圈发生破坏是易于理解的，尽管要在该地区区分拆沉和对流型减薄（convective removal）却是困难的。

尽管有不少学者承认太平洋板块在中生代对包括华北在内的我国东部的地质演化产生了重要影响，但不承认这种观点的文章也随处可见。问题的关键是如下几个方面，第一，中国东部在中生代是否存在活动大陆边缘。关于这一问题，目前国内外有大量的研究成果，并提供了较为确凿的宏观地质证据，特别是日本和我国东北地区大量中生代增生杂岩的存在是当时中国东部存在太平洋俯冲的最重要证据（Isozaki, 1997; Wu *et al.*, 2007b）。第二，中国东部在中生代时是以正向俯冲的活动大陆还是以走滑为主要特征的剪切性大陆边缘为主，这涉及太平洋及相关的大洋板块在中生代时的运动方向。关于这一问题，学术界积累的资料很不系统，得出的结论变化较大（Maruyama, 1997; Sun *et al.*, 2007），是今后我国东部研究中值得关注的重要问题。第三，我国学者大多感觉疑惑的是，如果中国东部在中生代是活动大陆边缘的话，为何当时的岩浆活动可以延伸到内陆达1000km以上，且岩石组合与太平洋东岸相差甚大。我们认为，活动大陆边缘模型是在发展的，太平洋东岸只是实例之一。更何况，即使在北美，活动大陆边缘的岩浆岩也延伸到内陆达1500km左右（如Idaho岩基）。另外，我国东部中生代岩浆作用一个非常突出的特点是爆发性火山作用，表明有大量的挥发份，这与活动大陆边缘模型是吻合的。有学者认为，中国东部不存在中生代活动大陆边缘岩石建造，但本文作者现在还需要时间去理解这一点.

7.5 多方位板块俯冲

除上述讨论的模型外，另有部分学者认为太平洋板块的俯冲只是使华北发生克拉通破坏的一个方面。在显生宙期间，除东部的太平洋板块俯冲外，华北的北部有古亚洲洋的俯冲，南部有扬子与华北间大洋的俯冲，西部有特提斯的俯冲，上述俯冲作用的联合导致深部地幔上涌，进而使华北克拉通发生了破坏（Zhang *et al.*, 2003; 翟明国等, 2004; Zhai *et al.*, 2007）。很显然，这种观点所预测的岩石圈减薄应发生在整个华北克拉通内部，且呈面状展布。我们目前还很难理解，为何四周有俯冲，但克拉通破坏仅发生在东部。另外，从方法论的角度出发，任何问题应该有它的主要矛盾，只有抓住主要矛盾，我们才能明确事情的本质。因此，郑建平等提出了多阶段的演化模型（郑建平等, 2006; Zheng *et al.*, 2007），指出华北东部克拉通破坏作用包括地幔伸展、熔-岩作用、侵蚀置换等复杂的物理、化学过程：1）早中生代扬子地块向北深俯冲碰撞所引起华北岩石圈的熔/流体交代富集作用、地幔伸展和受扰动软流圈物质上涌并侵蚀被改造了的岩石圈；2）晚中生代-早第三纪，因太平洋板块俯冲引起华北进一步伸展，同时热扰动致使软流圈物质进一步的强烈侵蚀作用引起岩石圈巨大减薄；3）晚第三纪以来软流圈热沉降作用所带来的小幅度岩石圈增厚过程。岩石圈先大幅减薄、后小幅增厚实现了最终的地幔置换和岩石圈整体减薄过程。喷发时代为100 Ma的阜新玄武岩所捕获的橄榄岩主体是饱满的，说明华北东部部分地区在此之前有过地幔置换作用发生。

从上述情况可以看出，目前对中国东部岩石圈减薄机制的认识还相当肤浅，主要是对很多地质事实的认知程度有限，特别是克拉通破坏发生的时间、涉及的空间范围和经历的具体过程对该问题的讨论有着至关重要的约束作用。因此可以相信，在未来相当一段时间内，关于构造控制因素的认识分歧还将继续存在下去。

8 华北克拉通破坏在世界上是否具有特殊性?

华北克拉通破坏是近几年来国内外研究的热门课题。但从科学的角度来看，克拉通的破坏是发生在华北的一个特殊地质现象还是大陆演化的正常格式是我们十分关心的问题。从全球分布来看（图11），华北克拉通要明显比世界上其它主要克拉通小得多。那么，小型的克拉通是否就一定会较易发生克拉通破坏呢？下面，我们来看看全球的情况。

目前世界上最主要的克拉通包括北美、南美、非洲（包括阿拉伯）、东欧、西伯利亚、印度、澳大利亚、南极等，其中北美和非洲是研究较为详细的地区。对于非洲克拉通，其南部的南非克拉通由于其巨量的金刚石资源而受人瞩目，而含金刚石的金伯利岩中丰富的地幔橄榄岩包体为研究该克拉通的演化提供了宝贵材料。但是，尽管该克拉通下存在活跃的地幔柱，该克拉通自形成后一致保持其稳定状态而未受到破坏（Carlson *et al.*, 2000, 2005; Griffin *et al.*, 2004）。对于北美的克拉通，目前的研究显示，该克拉通在中生代以来发生了岩石圈的减薄与破坏。其主要证据有：（1）在Wyoming克拉通，380 Ma的Sloan金伯利岩喷发时的岩石圈厚度为200 km左右，而50 Ma的金伯利岩喷发时，其岩石圈厚度只有150 km（Carlson *et al.*, 1999）；（2）该区克拉通的岩石圈地幔是成分分层的（Griffin *et al.*, 1999b; Kopylova and Russell, 2000），上部岩石圈地幔具有太古宙的形成年龄，但其下部岩石圈地幔形成于显生宙（Carlson *et al.*, 1999, 2004; Irvine *et al.*, 2003; Aulbach *et al.*, 2004）；（3）同华北地区类似，从380Ma到50Ma，其地热梯度从40mW/m^{2}转变到60mW/m^2（Irving *et al.*, 2003）；（4）上述克拉通以西的Basin and Range和Colorado地区，它原是北美克拉通的一部分（Canil *et al.*, 2003; Dickinson, 2004），但由于其位于向东俯冲的增生型活动大陆边缘附近，该区的岩石圈结构遭到严重破坏，甚至可能是世界上岩石圈减薄与破坏研究最详细的地区（Wernicke *et al.*, 1996; Sonder and Jones, 1999; Song and Helmberger, 2007; Wells and

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

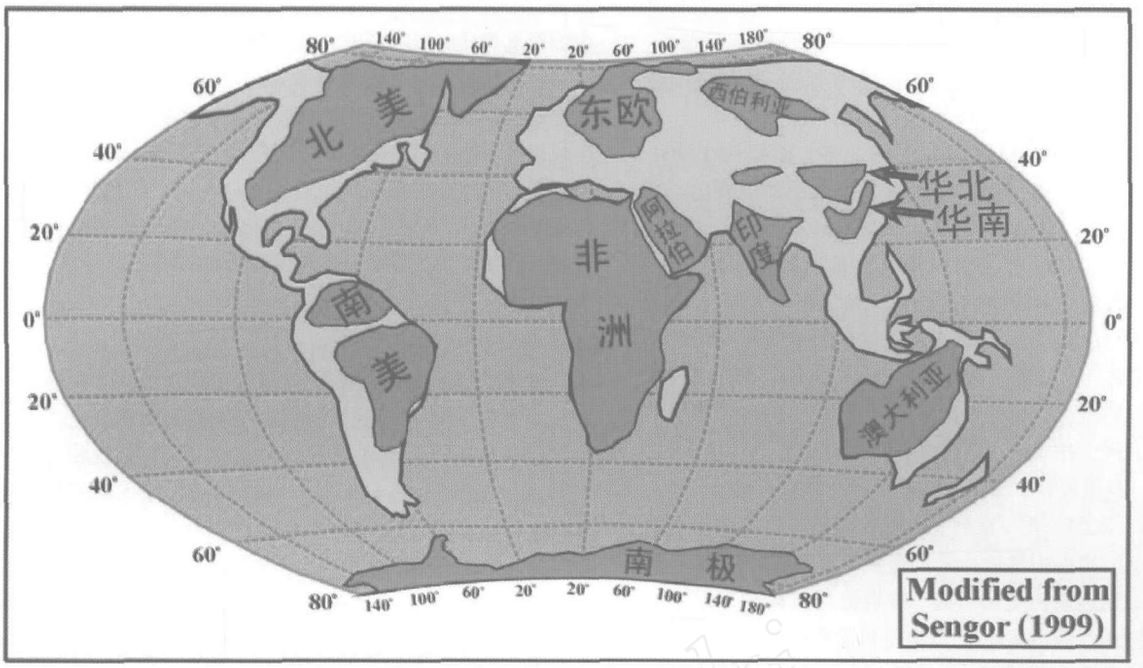


图 11 世界前寒武纪克拉通分布图

Fig. 11 Precambrian cratons in the world

Hoisch, 2008)。对于该地区克拉通破坏的机制，目前研究较多，提出的观点有拆沉作用（Bird, 1979; Ducea and Saleeby, 1998; Meissner and Mooney, 1998; Manley *et al.*, 2000; Lee *et al.*, 2000; Farmer *et al.*, 2002; Zandt *et al.*, 2004; Boyd *et al.*, 2006; Pourhiet *et al.*, 2006; Sine *et al.*, 2008）、热侵蚀作用（Wang *et al.*, 2002）、机械拉张作用（Depaolo and Daley, 2000）等。但由于该区位于板块俯冲带上或其附近，多数学者认为可能与岩石圈拆沉有关。特别值得指出的是，同我国东部类似，该区在岩石圈减薄和破坏期间也发育巨量的花岗岩浆与碱性岩浆活动、大量的变质核杂岩及盆地的形成等，详细情况此处不再作介绍。

除上述研究较为详细的地区外，也有报道南美克拉通和澳大利亚克拉通遭受破坏的研究成果（Beck and Zandt, 2002），但这些克拉通的研究程度明显不及北美。因此，从目前的资料来看，克拉通破坏并不是华北独有的现象，这种地质过程在世界上的其它克拉通，特别是一些大型的诸如北美和南美的克拉通，也曾发生过。和华北克拉通地区一样，对这些地区克拉通破坏时间、机制等的探讨也是处于激烈的争论之中。但有一点是肯定的，世界上其它克拉通的破坏程度明显不及华北。或者说，华北是目前资料揭示的克拉通破坏最典型的地区（Carlson *et al.*, 2005），这就是华北克拉通破坏研究的科学意义。

9 结语

华北克拉通破坏的提出并不是某些学者的突发奇想，它是在以我国为主的科学家数十年资料积累基础上提出的科学命题。我国地质学者早年提出的准地台、地台活化、地洼等都是对这一现象的生动描述，但缺乏科学上的升华。同样，我国学者在上世纪七八十年代进行了大量的岩石学与地球化学工作，并已意识到岩石圈减薄等重要问题，但终究未能逃脱被外国学者率先提出重要科学命题的怪圈。科学发展到今天，我们是否还会重蹈覆辙呢？公平地说，岩石圈减薄或克拉通破坏概念的提出得益于我国科学家长期的工作积累，但现在不少学者在向国际学术界介绍他们成果的同时，却有意无意地遗漏了我国科学家的贡献，我们是否还应该更公正地对待自己呢？

在我们即将结束本文讨论的时候，我们仍然发现，我们不可能对数十年来的资料进行全面的归纳和整理。如果某位或某些研究者发现自己的研究成果未能在本文中有所体现，或阐述可能存在偏差，那并不是作者刻意所为，因为我们的知识实在是太有限。正因为如此，我们建议读者在做深入研究时，查阅原始文献，了解各家学术观点的资料来源与理论基础，从而作出正确的判断，以避免以讹传讹。

感谢王涛研究员和陈斌教授对本文的仔细审阅及提出的中肯修改意见。

附录：华北克拉通破坏研究文献编年记

地台（platform），又称克拉通。但按照国外的定义，地台与克拉通是有区别的。一般将克拉通中不具有沉积盖层

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的古老前寒武纪岩石分布区称地盾（shield），而将具有后期沉积盖层的区域才称地台（platform）。但在大多数情况下，人们以克拉通统称之，而地台、地盾这些概念，由于具有固定论的烙印，现在应用较少。

华北克拉通位于我国东部的偏北部，面积约1,700,000km^2。它的研究是伴随中国地质学的发展而展开的。几十年的研究获得了大量的资料，为我们深入认识华北的地质特征奠定了基础。在目前对华北克拉通研究的过程中，我们需要提及几个重要的问题。（1）黄汲清（1945）首先提出了华北地台的概念。考虑该地台在后期地质历史中的不稳定性，作者后来提出了准地台（paraplatform，即活动性大的小地台）的概念，以示华北与世界上其它克拉通的区别；（2）几代人的工作确认，华北的克拉通化发生在1.8 Ga左右。Zhao（赵国春）*et al.*（1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005）在一系列文章中将这一事件归属于当时华北东西部陆块沿中部造山带的碰撞（图1）；（3）关于华北克拉通后期地质历史的研究，特别值得指出的是翁文灏（1927）提出的"燕山运动"，这也是目前在国际文献中引用频率较高的地质专业词汇，它导致了其后我国广泛开展的中生代地质研究。此外，继俄罗斯学者提出"活化"这一概念以后，我国地质学家陈国达（1956,1959）提出了"后地台造山作用"和"地洼"的概念，以期对华北克拉通的活化现象进行大地构造学的概括。因此,我国地质学家实际上在很早就已发现，华北克拉通与世界上典型的克拉通存在明显的区别。

由于受作者学术背景的限制，我们在此仅列出与岩石地球化学研究相关的重要文献。但实际上,华北是我国地质研究较为详细的重要地区，近百年来的研究积累了浩瀚的地质资料。1976年唐山地震以后，华北地区还进行了大量的地球物理探测，为以后岩石圈结构的研究提供了重要基础。近年来，随着分析技术的进步，地球化学在华北地区的研究也取得了显著进展。但限于文章篇幅，我们在此难以全部列出。如果我们列举的文献有重要遗漏，这只能说明我们的无知，而不是刻意所为。

早期文献

华北岩石圈减薄概念的提出在很大程度上归功于上世纪七八十年代我国科学家对中国东部新生代玄武岩及其橄榄岩包体的工作，这些研究成果集中反映在两本国内出版的专著中（鄂莫岚和赵大升，1987；池际尚，1988）及相关的文献当中。很显然，这一阶段的工作主要是从岩石学和地球化学角度出发研究新生代玄武岩及其橄榄岩包体的岩石类型和地球化学属性，确定出新生代时中国东部陆下岩石圈地幔为大洋型，且厚度较薄。对古生代金伯利岩及其中的橄榄岩包体也进行了一定的工作，并在90年代初期就已确定出华北地区古生代时的岩石厚度至少有170km（路凤香等，1991）。但由于各种因素的限制，我国学者未能及时提出岩石圈减薄的概念。即使在有些文献中提到岩石圈减薄这一名词，但大多意味岩石圈由于受到拉张作用而发生的厚度变化，与后来理解的岩石圈减薄概念相差甚远。

与此相关的是，我国学者在这一时段对华北地区的构造变形、沉积建造、成矿作用等进行了大量研究。如提出中生代以来，包括华北在内的我国东部以伸展体制为主，后来发现的若干变质核杂岩也验证了这一认识。但到目前为止，包括盆地形成、变形作用、地势变化等一系列浅部地质现象与岩石圈破坏的关系，一直未得到明确的阐述。

1992年

该年度的最主要文献是"中国新生代火山岩年代学与地球化学"，这是当时对我国新生代玄武岩及橄榄岩包体同位素年代学和地球化学工作的一个总结。同年，在北京召开了"Cenozoic volcanic rocks and deep-seated xenoliths of China and its environ（中国及邻区新生代火山岩及深源包体）"国际研讨会，Griffin *et al.*（1992）率先提出了华北古生代以来岩石圈减薄的思想（The thick lithosphere beneath Liaoning Province during Paleozoic time constrasts with the thin lithosphere (ca. 85 km) suggested by seismic traverses. The removal of at least 100 km of lithosphere in this area following kimberlite intrusion may be the result of Tertiary rifting）。同年，陈国达等（1992）和范蔚茗等（1992）根据古生代和新生代岩石圈地幔在热状态和地球化学特征上的差别，首次明确地在公开出版物上提出了古老岩石圈减薄或被破坏的概念，并提出地幔热侵蚀可能是中国东部大陆后地台活化的一种深部过程。但由于这些文献发表在国内杂志上，因而未能引起国外学术界的广泛注意。

1993年

该年度是华北岩石圈减薄研究的转折点。Menzies *et al.*（1993）首先提出了华北有大于100km岩石圈在显生宙被丢失的论断，从而将华北克拉通的这一科学问题推向了国际学术界。这篇文章有以下几点值得注意：（1）作者提出的岩石圈丢失是针对整个中国东部而言的，而非仅限于华北地区，只不过华北地区的证据明显而已；（2）作者认为，岩石圈丢失发生在新生代；（3）现今的岩石圈地幔是减薄后的残留；（4）关于丢失机制，作者倾向于印度与欧亚板块的碰撞而产生的地幔流动以及所伴生的郯庐断裂的破坏。但可以相信的是，当时大多数国内学者对Menzies发表的文章并不知晓，从而导致在其后几年内，华北岩石圈减薄问题并未引起足够的注意。同年，许文良等（1993）全面报道了华北地区中生代火成岩中的地幔橄榄岩包体的情况，为后来讨论华北中生代岩石圈地幔性质提供了重要对象。

目前大家好奇的一个问题是，谁首先提出了华北岩石圈减薄这一命题？由于本文作者均未参与早期华北克拉通的研究，因而对这一问题的实际情况了解甚少。但从目前文献的情况来看，有以下几点供大家参考。（1）岩石圈减薄

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

概念的提出主要得益于80年代我国东部地幔的研究。介入这一工作的我国研究人员主要来自中国地质大学(原武汉地质学院及北京研究生部)、中国科学院地质与地球物理研究所(原中国科学院地质研究所)、中国地震局(原国家地震局)地质研究所等单位；(2) 第一次真正影响较大的文献是 Menzies *et al.* (1993)，但 Griffin *et al.* (1992) 确实在北京的会议摘要中已经提出这样的思想。

1994 年

该年度邓晋福等(1994)根据古生代和新生代时华北岩石圈厚度的明显变化，明确提出了岩石圈去根的思想。关于去根机制，作者提出可能同时受地幔柱和拆沉作用的影响。该文的另一个重要思想是，作者认为岩石圈去根作用是燕山期以来我国东部发生"活化"的重要原因，是一系列重要地质事件的联系纽带所在。刘若新等(1994)对当时我国东部地幔研究进行了系统总结：(1) 中国东部地幔捕虏体以尖晶石二辉橄榄岩为主，方辉橄榄岩少见，含石榴石的橄榄岩也只见于少数地区。反映新生代期间，岩石圈厚度较薄而与古生代不同；(2) 地温梯度和流变参数均显示，东部岩石圈地幔与大洋地幔接近。(3) 地球化学资料显示东部岩石圈地幔存在一定的不均一性。Dobbs *et al.* (1994) 发表了蒙阴和复县金伯利岩的喷发年龄，运用 Rb-Sr 等时线方法，获得蒙阴胜利1号岩管中金云母的年龄为 475 ± 3 Ma，而辽宁复县50号岩管的年龄为 461.7 ± 4.8Ma，两者基本接近，确认它们形成于古生代。在这篇文章中，作者还引用了 Bristow 未发表的钙钛矿的 U-Pb 年龄 (456 ± 8 Ma)，但考虑单点年龄的误差较大，作者认为该年龄可能偏新。因此，作者提出，华北金伯利岩的喷发时代应在475 Ma 左右。后来，李秋立等 (2005) 对复县50号岩管中单片云母进行的 Rb-Sr 年龄测定 (463 ± 7 Ma) 证实了这一年龄的可靠性。我们最近对蒙阴金伯利岩中金云母 Rb-Sr 和钙钛矿 U-Pb 年龄的测定，均证实山东和辽宁的金伯利岩形成于早古生代，但对铁岭金伯利岩的时代，目前还没有可靠的数据。

1995 年

本年度的重要文献是徐义刚等(1995) 全面总结了当时我国东部新生代玄武岩中橄榄岩包体的温度压力资料，并据此总结了新生代时我国东部上地幔的地温梯度。同时，根据渤海周边地区中新生代火山岩的研究，他在《大地构造与成矿学》英文版上发表了华北现今岩石圈地幔下部是新生的思想 (Xu *et al.*, 1995)。

1996 年

该年度邓晋福等 (1996) 详细阐述了岩石圈去根的思想，并认为其控制机理为太平洋板块俯冲而导致的岩石圈拆沉。池际尚和路凤香 (1996) 根据金刚石中矿物包裹体资料给出了华北古生代时的地温情况。袁学诚(1996) 发表横穿华北的地震层析成像结果，并提出该区 (并包括秦岭) 深部地幔的蘑菇云构造模型。这一成像结果成为后20年岩石圈地幔被侵蚀交代论点的主要依据。

1997 年

本年度未见有重要的文献发表。

1998 年

该年度是华北岩石圈减薄研究的转折时期。美国地球物理学会发表了"东亚地幔动力学与板块相互作用"一书，Griffin *et al.* (1998) 和 Menzies and Xu (1998) 都对华北岩石圈减薄问题进行了仔细的论述，是目前华北克拉通破坏研究中的重要参考文献。同时，Zheng (郑建平) *et al.* (1998)对这一问题也进行了仔细的讨论，并强调了郯庐断裂带在地幔演化中的重要作用。Gao (高山) *et al.* (1998a, b) 通过对地壳成分的研究，提出了拆沉作用影响地壳成分变化的模式。

Griffin *et al.* (1998) 文章通过系统的矿物成分测定恢复了华北克拉通古生代时岩石圈地幔的物质组成，确定当时岩石圈地幔的厚度在200km 左右，贫瘠的方辉橄榄岩占很大比例，且发现蒙阴和复县的岩石圈剖面存在一定的差异。该文章的另一个重要之处是提出现今岩石圈地幔主要为新生的，尽管没有太多的证据，但作者认为现在华北之下仍存在局部的古老岩石圈地幔残留。关于岩石圈减薄的原因，作者认为古老岩石圈地幔的低密度不可能发生拆沉，因而倾向于侵蚀机制。关于构造控制因素，因为认为岩石圈减薄的西界为大兴安岭-太行山重力梯度带，而该带穿过了秦岭-大别造山带，因而三叠纪扬子与华北的碰撞不是发生岩石圈减薄的原因，而最可能的机制是太平洋板块的俯冲。关于岩石圈减薄的时间，作者认为可能在侏罗纪就已开始，它对应于中国东部裂谷盆地的发育。

Menzies and Xu (1998) 对华北克拉通不同时期的地质演化历史进行了分析，如以前认识不同的是，本次作者认为中生代是岩石圈减薄的重要时期，而新生代是新生岩石圈的增长时期，并由此导致中生代地温梯度最高。

1999 年

本年度《矿床地质》发表专辑，讨论我国东部中生代的爆发成矿作用。郑建平(1999) 仔细讨论了地幔置换作用的思想。这一思想主要来自于对新、老岩石圈地幔，特别是新生代郯庐断裂带内和带外以及南北重力梯度带上的岩石圈地幔特征的对比，并且发现郯庐断裂带的深切作用把古老岩石圈地幔中业已存在的薄弱带更好地连通起来，以及由此所共同构成幔内薄弱带的不规则网络，是新生地幔物质上涌侵蚀古老岩石圈地幔并发生地幔置换和混合作用的通道。吴福元等(1999) 明确提出由于拆沉而产生软流圈与地壳直接接触的思想。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2000 年

该年度的重要文献是 Fan（范蔚茗）*et al.*（2000）详细而全面地总结了华北及邻区岩石圈地幔的情况，这也是一篇引用很高的文献。Xu（徐夕生）*et al.*（2000）提出华南可能也存在与华北类似的年轻岩石圈地幔。吴福元等（2000）详细论述了地壳与软流圈直接接触的证据，并给出了一个概念性的演化模型，该文坚持认为，岩石圈减薄与东侧大洋板块俯冲有关，且起因于板块俯冲所导致的加厚岩石圈的拆沉。相反，路凤香等（2000）仔细论证了侵蚀作用的"蘑菇云"模型。

2001 年

本年度 Xu（徐义刚）（2001）根据新的进展情况对华北的岩石圈演化问题进行了总结，认为现今华北之下岩石圈地幔分两层，上部为减薄后的残留，下部是新增生的。但值得注意的是，作者认为岩石圈的减薄主要发生在老第三纪，而不是当时大多数人认为的晚中生代。Zheng *et al.*（2001）报道在鹤壁地区，岩石圈地幔在减薄后仍有残留，这一认识被后来的 Os 同位素所证实（Zheng *et al.* 2007），从而表明太行山附近地区，岩石圈在减薄后有残留。Meisel *et al.*（2001）报道了汉诺坝玄武岩中橄榄岩包体的 Os 同位素资料，两个样品的资料显示，华北地区的现今岩石圈地幔可能不是太古宙的，但由于数据太少，缺乏足够的说明力. 同年，张旗等（2001）认为华北东部在中生代时存在高原，但该高原的与岩石圈减薄的关系并不明确。何丽娟等（2001）发表了中国东部热岩石圈厚度图。

本年度的另一篇重要文献是 Davis *et al.*（2001）发表的关于燕山地区中生代构造变形演化历史的长篇文章。该文章同时还集中报道了该地区若干火成岩的年代学资料。从该文献可以看出，我们以前认定的燕山地区的构造变形历史与样式在很大程度上应该重新认识。

2002 年

本年度的重要文献是 Gao *et al.*（2002）发表汉诺坝和栖霞玄武岩中橄榄岩包体的 Os 同位素资料，获得汉诺坝地区的地幔年龄在古元古宙，可能对应于当时华北东西部陆块的碰撞。同时，复县金伯利岩中橄榄岩包体反映的古生代岩石圈地幔是太古宙的，但华北东部现今岩石圈地幔是新生的，反映当时整个岩石圈地幔以拆沉方式发生了丢失。在该文章，作者认为上述拆沉机理是由于扬子向华北之下的俯冲导致华北岩石圈加厚。

同年，翟明国和樊祺诚（2002）提出华北下地壳换底的思想。Zhang（张宏福）*et al.*（2002）通过山东方城玄武岩的研究，提出华北克拉通的破坏可能与扬子向华北下面的俯冲有关，这一研究的更重要之处是，至少在华北南部，岩石圈地幔的性质可能经历了两次改变。陈斌等提出由于岩石圈地幔发生大规模熔融而使岩石圈得以减薄（Chen *et al.*, 2004）。

2003 年

该年度文献涉及的问题较多。（1）Yang（杨进辉）*et al.*（2003）全面论述了华北岩石圈减薄与金成矿作用的关系，强调由于岩石圈减薄而产生的地壳规模的流体循环对华北中生代金成矿作用的控制；（2）Wu（吴福元）*et al.*（2003）报道了华北地台内龙岗和北部兴蒙造山带内汪清与双辽地幔橄榄岩的 Os 同位素资料，进一步论证了软流圈与地壳直接接触的动力学模型。同时强调指出，华北与东北地壳演化历史和年代是不同的，由此设想的地幔年代也应存在差异，但 Os 同位素未能证明这一点，即同 Gao *et al.*（2002）报道的资料一致，华北和东北地区之下的现今岩石圈地幔都是新生，华北之下不出现太古宙地幔，但却发现有元古宙地幔的存在；（3）Wilde *et al.*（2003）提出华北岩石圈减薄可能与冈瓦纳大陆的裂解有关；（4）吴福元等（2003）对华北岩石圈减薄的情况进行了总结，对岩石圈减薄的空间范围、垂向幅度、减薄时间、机制和地球动力学控制因素等进行了全面的回顾，提出了拆沉作用的概念性模型。同年，邓晋福等（2003）修改了早先提出的拆沉模型，强调了岩石圈减薄时，原有古老岩石圈地幔的全部丢失。

同年，Zhang *et al.*（2003）对华北北缘的中生代火山岩进行了工作，讨论了北部造山作用对华北岩石圈地幔的改造。同时，翟明国等（2003）对华北地区中生代以来的演化情况进行了总结，并提供了热岩石圈厚度的变化情况。该图反映，华北地区在晚侏罗-早白垩世，热岩石圈厚度最薄，应对应岩石圈减薄的峰期。另外，张宏福和郑建平（2003）及阎峻等（2003）分别报道了辽西和胶东地区早白垩世晚期（约 110 Ma）和晚白垩世早期（约 74 Ma）具亏损地幔来源性质的玄武岩，其中前者与王冬艳等（2002）报道的情况一致，反映在辽西地区，岩石圈减薄至少在 110 Ma 之前就已完成，而在胶东地区，这一时限至少在 73 Ma。因此，这两地的资料均反映华北的岩石圈减薄发生在中生代。

2004 年

本年度文献论述的问题有：（1）Gao *et al.*（2004）通过辽西中生代火山岩的研究提供了下地壳拆沉的范例；（2）Zhang（张宏福）*et al.*（2004）提出熔体与橄榄岩相互作用使古老岩石圈发生破坏的思想；（3）Xu（徐义刚）*et al.*（2004）对山西地区玄武岩的工作认为太行山以西地区目前的岩石圈正在减薄，显示华北东西部岩石圈减薄进程与机制的差异；（4）Zhao（赵子福）*et al.*（2004）提出我国东部早白垩世大规模岩浆作用的发生与西南太平洋的超级地幔柱有关。

关于岩石圈减薄机制，翟明国等（2004）提出受华北周边地区多板块相互作用的影响，但没有提出受控制的主要

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

因素。Liu *et al.*（2004）提出华北的岩石圈减薄与印度-欧亚板块碰撞的关系模型，尽管类似的模型在10年前就已被国内学者所提及（池际尚，1988），但其可能性目前不被大多数人所赞同，因为目前的研究已证明华北岩石圈减薄主要发生在中生代，那时，印度与欧亚还未发生碰撞。此外，韩宝福等(2004）提出华北岩石圈减薄可能发生在中生代早期的思想。

2005年

本年度的重要文献是：（1）Wu（吴福元）*et al.*（2005a, 2005b）通过对中生代花岗岩年代学资料的总结，提出早白垩世为岩石圈减薄的峰期，而侏罗纪是东部太平洋板块俯冲时期。资料的总结还发现，中国东部不同地区的中生代岩浆活动历史基本可以对比，反映它们受控于统一的地球动力学因素。同时，岩浆活动的幕式特征反映岩石圈的减薄并不是细水长流式，而可能是暴风骤雨式进行的，因而岩浆活动的年代学资料支持岩石圈减薄的拆沉模型；（2）樊祺诚等（2005）报道中国东部新生代玄武岩中地幔橄榄岩所含熔体包裹体的成分资料，如果能够确认这些长英质的熔体是来自上覆地壳的话，那将无疑证明岩石圈地幔和部分地壳发生了拆沉；（3）Niu（牛耀龄）（2005）讨论了太平洋板块俯冲-脱水对上覆岩石圈地幔的改造作用，进而讨论了其对岩石圈减薄的影响。从目前的研究来看，俯冲板块脱水至少是先存岩石圈地幔发生弱化的重要机制，它的存在可能对岩石圈的减薄有重要促进作用。

本年度的另一个重要事件是，有两篇国外杂志文献利用数值模拟技术来讨论华北岩石圈的演化（Lin *et al.*, 2005, Wang *et al.*, 2005）。其中Lin *et al.*（2005）的工作显示，单纯的机械拉伸不足以导致目前所见到的岩石圈减薄，而必须有深部的热异常，而这种热异常可能与中生代的全球超级地幔柱有关。Wang *et al.*（2005）的研究显示，中生代早期的挤压与重力不稳定和后来太平洋俯冲导致的俯冲带后撤可以用来解释华北地区中生代的变形特征。由于受专业知识水平所限，本文作者难以对上述论断作适当的评述。

另外，Zheng *et al.*（2005）较系统地发表了华北橄榄岩的PGE资料。Zhang（2005a）通过对华北中生代碱性侵入岩的研究，提出岩石圈减薄可能在侏罗纪就开始发生的思想。Zhang（2005b）系统地论述了橄榄岩与熔体的相互作用方式与机理及其对华北岩石圈地幔的改造与影响。更值得一提的是，Carlson *et al.*（2005）在一篇关于全球大陆地幔的综述文章中提及，华北东部是世界上古老大陆地幔被移离的最佳实例，充分肯定了华北地区岩石圈减薄对全球科学的研究意义。

此外，Yang *et al.*（2005）对胶东甲子山岩体进行了详细的工作，提出其为post-orogenic成因。如果这一说法成立，则表明大别-苏鲁对华北的构造影响在晚三叠世时已经结束，此后的地质演化应属于另一个构造范畴。

2006年

《地学前缘》和《地球科学》开辟专辑和专栏，发表多篇华北岩石圈减薄方面的文献。Wu *et al.*（2006）报道辽宁铁岭金伯利岩和宽甸玄武岩中橄榄岩包体的Os同位素资料，并对目前华北地区的资料进行了总结；对华北下存在的元古宙地幔提出新的解释，认为可能与扬子板块的俯冲有关。如果这一设想成立，华北的岩石圈减薄有可能在三叠纪就已开始，而早白垩世减薄的是原来以构造方式底侵在华北克拉通之下的扬子岩石圈地幔，但作者承认，此解释有很多矛盾之处。

Zheng *et al.*（2006）详细对比了山东蒙阴和山旺石榴石橄榄岩的矿物成分资料，并论证了苏鲁超高压变质带中石榴石橄榄岩可能为华北岩石圈地幔的可能性。该文的重要性主要是：（1）报道了山旺新生代玄武岩中石榴石橄榄岩的温压资料，这是继河北汉诺坝、安徽女山和福建明溪之后，我国东部石榴石橄榄岩的又一重要产地，为构建我国东部新生代地温曲线提供了重要资料。这样，结合吉林大石河、河北汉诺坝和辽宁宽甸等地区的石榴石辉石岩，以及河北汉诺坝、安徽女山、广东麒麟等地的麻粒岩资料，我们有可能勾画出整个中国东部新生代岩石圈的热状态；（2）和以往认识一致，作者仍坚持，华北地区之下的现今岩石圈地幔主要是新生的，但也有大量残留存在；（3）作者在文中明确提出，岩石圈的破坏在早期与扬子和华北的汇聚有联系，但岩石圈的减薄主要发生在中-新生代，且其构造控制因素主要与东侧大洋板块的俯冲有关。

本年度，韩国学者报道了该地区新生代玄武岩中橄榄岩包体的Os同位素资料（Lee and Walker, 2006），结果表明该区岩石圈地幔主要形成于1.8 Ga左右，与由Nd同位素制约的太古宙地壳年龄明显不同，反映该地区的壳幔年龄解耦。

值得提出的是，Xu（2006）正式探讨了大兴安岭-太行山重力梯度带的形成与华北岩石圈减薄的关系，考虑上述梯度带呈NNE向贯穿整个中国东部，作者认为，太平洋板块的俯冲作用可能是岩石圈减薄的首要原因。

Yang（杨进辉）*et al.*（2006）对北京西山地区晚古生代-中生代地层中的碎屑沉积岩进行了详细的锆石U-Pb年龄和Hf同位素研究，讨论了该时期燕山地区盆地沉积物源的变化。值得注意的是，该文的资料反映，以前关于西山地区中生代地层时代的厘定可能存在一定的问题，这一情况在华北地区可能广泛存在。因此，开展华北地区中生代火山-沉积地层时代的详细研究可能是将来重溯该区地质演化历史的重要基础。袁洪林等(2006）对西山髫髻山组火山岩形成时代的研究也得出同样的认识。

本年度，有3篇重要的地球物理资料发表在JGR杂志上。Chen（陈凌）*et al.*（2006）运用接受函数方法，获得了山东地区横跨郯庐断裂的岩石圈厚度。这一资料的获得，

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

为今后获取岩石圈厚度，特别是盆地下岩石圈厚度的精细资料提供了重要途径。Huang and Zhao（2006）发表了中国大陆高精度地震层析成像的研究结果，再次确认俯冲的太平洋板块的存在。我们也再次强调，目前中国东部岩石圈之下的深部地幔并非是来自核幔边界的地幔柱，其主要原因是由于俯冲板块的阻隔，这方面实际上有大量的资料发表。部分国内学者提出，我国东部之下存在上涌的软流圈，并被广为引用。但从这些高精度的资料来看，以往资料的可靠性是值得怀疑的（其实该资料从一发表开始就未得到同行的认可）。换句话讲，即使存在上涌的软流圈，那也是规模有限，来源深度有限，它不可能对我国东部的岩石圈破坏产生显著影响。

Priestley *et al.*（2006）发表了整个东亚地区的地震层析成像资料，并提供了该区的岩石圈厚度分布图。该文同时还强调华北克拉通东部岩石圈厚度明显低于世界上的典型克拉通，也低于华北克拉通的西部。对华北东部岩石圈厚度变薄的原因，作者认为，古老岩石圈地幔的低密度不可能发生拆沉，而中-新生代以来岩石圈的伸展或软流圈的侵入可能是主要因素。同时，作者提出，目前的分辨率还不能排除该区有薄的古老残留的存在。因此，开展详细的深部地球物理探测是未来十分重要的研究任务。

2007 年度

2007 年 1 月 24 日，国家自然科学基金委员会发布《华北克拉通破坏》重大研究计划申请指南，华北克拉通破坏研究进入一个新的阶段。

References

Alard O, Griffin WL, Pearson NJ, Lorand JP and O'Reilly SY. 2002. New insights into the Re-Os systematics of sub-continental lithospheric mantle from in situ analysis of sulphides. Earth Planet. Sci. Lett., 203: 651 – 663

Alard O, Luguet A, Pearson NJ, Griffin WL, Lorand JP, Gannoun A, Burton KW and O'Reilly SY. 2005. In situ Os isotopes in abyssal peridotites bridge the isotopic gap between MORBs and their source mantle. Nature, 436: 1005 – 1008

Aulbach S, Griffin WL., Pearson NJ, O'Reilly SY, Kivi K and Doyle BJ. 2004. Mantle formation and evolution, Slave Craton: Constraints from HSE abundances and Re-Os isotope systematics of sulfide inclusions in mantle xenocrysts. Chem. Geol., 208: 61 – 88

Beck SL and Zandt G. 2002. The nature of orogenic crust in central Andes. J. Geophys. Res., 107: 1029/2000JB000124

Bird P. 1979. Continental delamination and the Colorado Plateau. J. Geophys. Res., 84: 7561 – 7571

Boyd FR. 1989. Compositional distinction between oceanic and cratonic lithosphere. Earth Planet. Sci. Lett., 96: 15 – 26

Boyd OS, Jones CH and Sheehan AF. 2006. Foundering lithosphere imaged beneath the southern Sierra Nevada, California, USA. Science, 305: 660 – 662

Canil D, Schulze DJ, Hall D, Hearn Jr BC and Milliken SM. 2003. Lithospheric roots beneath western Laurentia: the geochemical signal in mantle garnets. Can. J. Earth Sci., 40: 1027 – 1051

Carlson RW, Irving AJ and Hearn Jr BC. 1999. Chemical and isotopic systematics of peridotite xenoliths from the Williams kimberlite, Montana: clues to processes of lithosphere formation, modification and destruction. In: Gurney JL, Pascoe M. D and Richardson SH (eds.). Proceedingsof the 7th International Kimberlite Conference. Cape Town, South Africa, 90 – 98

Carlson RW, Boyd FR, Shirey SB, Janney PE, Grove TL, Bowring SA, Schmitz MD, Bell DR, Gurney JJ, Richardson SH, Pearson DC, Hart RJ, Eilson AH and Moser D. 2000. Continental growth, preservation, and modification in Southern Africa. GSA Today, 10 (2): 1 – 7

Carlson RW, Irving AJ, Schulze DJ and Hearn Jr BC. 2004. Timing of Precambrian melt depletion and Phanerozoic refertilization events in the lithospheric mantle of the Wyoming Craton and adjacent Central Plains Orogen. Lithos, 77: 453 – 472

Carlson RW, Pearson DG, James DE. 2005. Physical, chemical, and chronological characteristics of continental mantle. Rev. Geophys., 43: 2004RG000156

Chen B, Jahn BM, Arakawa Y and Zhai MG. 2004. Petrogenesis of the Mesozoic intrusive complexes from the southern Taihang orogen, north China Craton: elemental and Sr-Nd-Pb isotopic constraints. Contrib. Mineral. Petrol., 148: 489 – 501

Chen L, Zheng TY and Xu WW. 2006. A thinned lithospheric image of the Tanlu Fault Zone, eastern China: Constructed from wave equation based receiver function migration. J. Geophy. Res., 111: 2005JB003974

Chen L, Tao W, Zhao L and Zheng TY. 2008. Distinct lateral variation of lithospheric thickness in the northeastern North China Craton. Earth Planet. Sci. Lett., 267: 56 – 68.

Chesley J, Righter K and Ruiz J. 2004. Large-scale mantle metasomatism: a Re – Os perspective. Earth Planet. Sci. Lett., 219: 49 – 60

Chi JS. 1988. The study of Cenozoic basalts and upper mantle beneath eastern China. Wuhan: China University of Geosciences Publishing House, 277(in Chinese)

Chi JS and Lu FX. 1996. Kimberlites and the features of Paleozoic lithospheric mantle in North China craton. Beijing: Science Press, 292(in Chinese)

Currie CA, Huiamans RS and Beaumont C. 2008. Thinning of continental backarc lithosphere by flow-induced gravitational instability. Earth Planet. Sci. Lett., 269: 435 – 446

Darby BJ, Davis GA, Zhang XH, Wu FY, Wilde S and Yang JH. 2004. The newly discovered Waziyu metamorphic core complex, Yiwulushan, western Liaoning Province, North China. Earth Sci. Frontiers, 11: 145 – 155

Davis GA, Zheng YD, Wang C, Darby BJ, Zhang CH and Gehrels G. 2001. Mesozoic tectonic evolution of the Yanshan fold and thrust belt, with emphasis on Hebei and Liaoning Provinces, northern China. In: Hendrix MS and Davis GA (eds.). Paleozoic and Mesozoic tectonic evolution of central Asia: From continental assembly to intracontinental deformation. Geol. Soc. of Am. Memoir., 194: 171 – 198

Deng JF, Mo XX, Zhao HL, Luo ZH and Du YS. 1994. Lithosphere root/de-rooting and activation of the east China continent. Geoscience, 8: 349 – 356 (in Chinese with English abstract)

Deng JF, Zhao HL, Mo XX, Wu ZX and Luo ZH. 1996. Continental roots-plume tectonics of China – Key to the continental dynamics. Beijing: Geological Publishing House, 110pp (in Chinese with English abstract)

Deng JF, Su SC, Liu C, Zhao GC, Zhao XG, Zhou S and Wu ZX. 2006. Discussion on the lithospheric thinning of the North China craton: delamination? or thermal erosion and chemical metasomatism? Earth Sci. Frontiers, 13(2): 105 – 119(in Chinese with English abstract)

Deng JF, Su SG, Niu YL, Liu C, Zhao GC, Zhao XG, Zhou S and Wu ZX. 2007. A possible model for the lithospheric thinning of North China Craton: Evidence from the Yanshanian (Jura-Cretaceous) magmatism and tectonism. Lithos, 96: 22 – 35

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

DePaolo DJ., Daley EE. 2000. Neodymium isotopes in basalts of the Southwest Basin and range and lithospheric thinning during extension. Chem. Geol., 169: 157 – 185

Dickinson WR. 2004. Evolution of the North American Cordillera. Annu. Rev. Earth Planet Sci., 32: 13 – 45

Ducea M and Saleeby J. 1998. A case for delamination of the deep batholithic crust beneath the Sierra Nevada, California: Inter. Geol. Rev., 40: 78 – 93

E ML and Zhao DS. 1987. Cenozoic basalts and deep-seated rock xenoliths in eastern China. Science Press, Beijing, 490pp (in Chinese)

Fan QC and Hooper PR. 1989. The mineral chemistry of ultramafic xenoliths of eastern China: Implications for upper mantle composition and the paleogeotherms. J. Petrol., 30: 1117 – 1158

Fan QC, Sui JL, Xu P, Li N, Sun Q and Wang TH. 2006. Si- and alkali-rich melt inclusions in minerals of mantle peridotites from eastern China: Implication for lithospheric evolution. Sci. China (D), 49: 43 – 49

Fan WM and Menzies MA. 1992. Destruction of aged lower lithosphere and accretion of asthenosphere mantle beneath eastern China. Geotectonica Metallogenia, 16: 171 – 180

Fan WM, Zhang HF, Baker J, Jarvis KE, Mason PRD and Menzies MA. 2000. On and off the North China Craton: where is the Archean keel? J. Petrol., 41: 933 – 950

Farmer GL, Glazner AF and Manley CR. 2002. Did lithospheric delamination trigger late Cenozoic potassic volcanism in the southern Sierra Nevada, California? Geol. Soc. Am. Bull., 114: 754 – 768

Fu MX, Hu SB, Wang JY. 2005. Thermal regime transition in eastern North China and its tectonic implication. Sci. China (D), 35: 840 – 848

Fukao Y, Widiyantoro S and Obayashi M. 2001. Stagnant slabs in the upper and lower mantle transition region. Rev. Geophys., 39: 291 – 323

Gao S, Zhang BR, Luo TC, Li ZJ, Xie QL, Gu XM, Zhang HF, Ouyang JP, Wang DP and Gao CL. 1992. Chemical composition of the continental crust in the Qinling Orogenic Belt and its adjacent North China and Yangtze Cratons. Geochim. Cosmochim. Acta, 56: 3933 – 3950

Gao S, Zhang BR, Jin ZM, Kern H, Luo TC and Zhao ZD. 1998a. How mafic is the lower continental crust? Earth Planet. Sci. Lett., 161: 101 – 117

Gao S, Luo TC, Zhang BR, Zhang HF, Han YW, Hu YK and Zhao ZD. 1998b. Chemical composition of the continental crust as revealed by studies in East China. Geochim. Cosmochim. Acta, 62: 1959 – 1975

Gao S, Kern H, Jin ZM, Zhang HF and Zhang BR. 2003. Poisson's ratio of eclogite: Implications for lower crustal delamination of orogens. Sci. China (D), 46: 909 – 918

Gao S, Rudnick RL, Carlson RW, McDonough WF and Liu YS,. 2002. Re-Os evidence for replacement of ancient mantle lithosphere beneath the North China Craton. Earth Planet. Sci. Lett., 198: 307 – 322

Gao S, Rudnick RL, Yuan HL, Liu XM, Liu YS, Xu WL, Ling WL, Ayers J, Wang XC and Wang QH. 2004. Recycling lower continental crust in the North China craton. Nature, 432: 892 – 897

Gao S, Rudnick RL, Xu WL, Yuan HL, Hu ZC and Liu XM. 2006. Lithospheric evolution of the North China Craton: Evidence from high-Mg adakitic rocks and their entrained xenoliths (Abstract for Goldschmidt Conference). Geochim. Cosmochim. Acta, 70 (18), Suppl. 1, A193

Gao S, Rudnick RL, XuWL, Yuan HL, Liu YS, Puchtel I, Liu X, Huang H and Wang XR. 2008. Recycling deep cratonic lithosphere and generation of intraplate magmatism. Earth Planet. Sci. Lett., 270: 41 – 53

Griffin WL, O'Reilly SY and Ryan CG. 1992. Composition and thermal structure of the lithosphere beneath South Africa, Siberia and China: porton microprobe studies. Abstract of the International Symposium on Cenozoic Volcanic Rocks and Deep-seated Xenoliths of China and its Environs. Beijing, 65 – 66

Griffin WL, Zhang AD, O'Reilly SY and Ryan CG. 1998. Phanerozoic evolution of the lithosphere beneath the Sino-Korean craton. In Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia (eds. Flower MFJ, Chung SL, Lo CH, Lee TY). Am. Geophy. Union, Washington, D. C., Geodyn. Ser., 27: 107 – 126

Griffin WL, O'Reilly SY and Ryan CG. 1999a, The composition and origin of subcontinental lithospheric mantle, in Fei, Y., *et al.*, eds., Mantle petrology: Field observations and high-pressure experimentation: A tribute to Francis R. (Joe) Boyd: Houston, Texas, The Geochemical Society, Special Publication, 6: 13 – 43

Griffin WL, Doyle BJ, Ryan CG, Pearson NJ, O'Reilly SY, Davies R, Kikv K, Van Achterbergh E and Natapov LM. 1999b. Layered Mantle Lithosphere in the Lac de Gras Area, Slave Craton: Composition, Structure and Origin. J. Petrol., 40: 705 – 727.

Griffin WL, Graham S, O'Reilly SY and Pearson NJ. 2004. Lithosphere evolution beneath the Kaapvaal craton: Re-Os systematics of sulfides in mantle-derived peridotites, Chem. Geol., 208: 89 – 118

Han BF, Kagami H and Li HM. 2004. Age and Nd-Sr isotopic geochemistry of the Guangtoushan alkaline granite, Hebei province, China: implications for early Mesozoic crust-mantle interaction in North China Block. Acta Petrol. Sinica, 20: 1375 – 1388 (in Chinese with English abstract)

Harvey J, Gannoun A, Burton KW, Rogers NW, Alard O and Parkinson IJ. 2006. Ancient melt extraction from the oceanic upper mantle revealed by Re – Os isotopes in abyssal peridotites from the Mid-Atlantic ridge. Earth Planet. Sci. Lett., 244: 606 – 621

He LJ, Hu SB and Wang JY. 2001. Lithospheric thermal characterization in eastern China. Progress Natural Sci., 11: 966 – 969 (in Chinese)

Hong DW, Wang T, Tong Y and Wang XX. 2003. Mesozoic granitoids from North China Block and Qinling-Dabie-Sulu orogenic belt and their deep dynamic process. Earth Sci. Frontiers, 10: 231 – 256 (in Chinese with English abstract)

Hou ML, Jiang YH, Jiang SY, Ling HF and Zhao KD. 2007. Contrasting origins of late Mesozoic adakitic granitoids from the northwestern Jiaodong Peninsula, east China: implications for crustal thickening to delamination. Geol. Mag., 144: 619 – 631

Huang FS and Xue SZ. 1990. The discovery of the mantle-derived ultramafic xenoliths in Handan-Xingtai intrusive complex and their mineralogical-geochemical characteristics. Acta Petrol. Sinica, No. 4: 40 – 45 (in Chinese with English abstract)

Huang F, Li SG and Yang W. 2007. Contributions of the lower crust to Mesozoic mantle derived mafic rocks from the North China Craton: implications for lithospheric thinning. In: Zhai MG, Windley BF, Kusky TM, Meng QR. (eds), Mesozoic Sub-Continental Lithospheric Thinning Under Eastern Asia. Geological Society Special Publication, 280: 55 – 75

Huang JL and Zhao DP. 2006. High-resolution mantle tomography of China and surrounding regions. J. Geophy. Res., 111: 2005JB004066

Irvine GJ, Pearson DG, Kjarsgaard BA, Carlson RW, Kopylova MG and Dreibus G. 2003. A Re – Os isotope and PGE study of kimberlite-derived peridotite xenoliths from Somerset Island and a comparison to the Slave and Kaapvaal cratons. Lithos, 71: 461 – 488

Isozaki Y. 1997. Jurassic accretion tectonics of Japan. Island Arc, 6: 25 – 51

Jahn BM. 1998. Geochemical and isotopic characteristics of UHP eclogites and ultramafic rocks of the Dabie orogen: implications for continental subduction and collisional tectonics. In: Hacker BR, Liou JG. (Eds.), When Continental Collide: Geodynamics and Geochemistry of Ultrahigh-Pressure Rocks. Kluwer Academic Publishers, Wetherlands, pp. 203 – 239

Jiang YH, Jiang SY, Zhao KD, Ni P, Ling HF and Liu DY. 2005. SHRIMP U-Pb zircon dating for lamprophyre from Liaodong Peninsula: Constraints on the initial time of Mesozoic lithosphere thinning beneath eastern China. Chinese Sci. Bull., 50: 2612 – 2620

Jin YB, Zhi XC, Meng Q, Gao TS and Peng ZC. 2004. Re – Os dating

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

of the Raobazhai ultramafic massif in North Dabie. Chinese Sci. Bull., 49: 508 - 513

Kern H, Gao S and Liu QS. 1996. Seismic properties and densities of middle and lower crustal rocks exposed along the North China Geoscience Transect. Earth Planet. Sci. Lett., 139: 439 - 455

Kern H, Gao S, Jin ZM, Popp T and Jin SY. 1999. Petrophysical studies on rocks from the Dabie Ultrahigh-Pressure (UHP) Belt, Central China: Implications for the composition and delamination of the lower crust. Tectonophysics, 301: 191 - 215

Kim HJ, Jou HT, Cho HM, Bijwaard H, Sato T, Hong JK, Yoo HS and Baag CE. 2003. Crustal structure of the continental margin of Korea in the East Sea (Japan Sea) from deep seismic sounding data: evidence for rifting affected by the hotter than normal mantle. Tectonophysics, 364: 25 - 42

Komiya T and Maruyama S. 2007. A very hydrous mantle under the western Pacific region: Implications for formation of marginal basins and style of Archean plate tectonics. Gondwana Res., 11: 132 - 147

Kopylova MG and Russell JK. 2000. Chemical stratification of cratonic lithosphere: constraints from the northern Slave craton, Canada. Earth Planet. Sci. Lett., 181: 71 - 87

Lee CT, Yin QZ, Rudnick RL, Chesley JT and Jacobsen SB. 2000. Osmium isotopic evidence for Mesozoic removal of lithospheric mantle beneath the Sierra Nevada, California. Science, 289: 1912 - 1916

Lee CT, Yin QZ, Rudnick RL and Jacobsen SB. 2001. Preservation of ancient and fertile lithospheric mantle beneath the southwestern United States. Nature, 411: 69 - 73

Lenardic A, Moresi LN and Mühlhaus H. 2003. Longevity and stability of cratonic lithosphere: insights from numerical simulations of coupled mantle convection and continental tectonics. J. Geophys. Res. 108: 10.1029/2002JB001859

Lin W and Wang Q C. 2006. Late Mesozoic extensional tectonics in the North China block: a crustal response to subcontinental mantle removal? Bull. Soc. Geol. France, 177: 287 - 297

Liu CZ, Snow JE, Hellebrand E, Brugmann G, von der handt A, Buchl A and Hofmann AW. 2008. Ancient, highly heterogeneous mantle beneath Gakkel ridge, Arctic Ocean. Nature, 452: 311 - 316

Liu DY, Nutman AP, Compston W, Wu JS and Shen QH. 1992. Remmants of ≥ 3800Ma crust in the Chinese part of the Sino-Korean Craton. Geology, 20: 339 - 342

Liu JL, Davis GA, Lin ZY and Wu FY. 2005. The Liaonan metamorphic core complex, Southeastern Liaoning Province, North China: A likely contributor to Cretaceous rotation of Eastern Liaoning, Korea and contiguous areas. Tectonophysics, 407: 65 - 80

Liu JL, Guan HM, Ji M and Hu L. 2006. Late Mesozoic metamorphic core complexes: new constraints on lithosphere thinning in North China. Progress Natural Sci., 16: 633 - 638

Liu M, Cui XJ and Liu FT. 2004. Cenozoic rifting and volcanism in eastern China: a mantle dynamic link to the Indo - Asian collision? Tectonophysics, 393: 29 - 42

Liu YS, Gao S, Liu XM, Chen XM, Zhang WL and Wang XC. 2003. Thermodynamic evolution of lithosphere of the North China craton: Records from lower crust and upper mantle xenoliths from Hannuoba. Chinese Sci. Bull.. 48: 2371 - 2377

Lu FX, Han ZG, Zheng JP and Ren YX. 1999. Characteristics of Palaeozoic lithospheric mantle in Fuxian, Liaoning Province. Geol. Sci. Tech. Info., 10 (Suppl): 2 - 20 (in Chinese with English abstract)

Lu FX, Zheng JP, Li WP, Chen MH and Cheng ZM. 2000. The main evolution pattern of Phanerozoic mantle in the eastern China: the 'Mushroom Cloud' model. Earth Sci. Frontier, 7 (1): 97 - 107 (in Chinese with English abstract)

Lu FX, Zheng JP, Shao JA, Zhang RS, Chen MH and Yu CM. 2006. Asthenospheric upwelling and lithospheric thinning in late Cretaceous-Cenozoic in eastern North China. Earth Sci. Frontiers, 13(2): 86 - 92 (in Chinese with English abstract)

Lu XP, Wu FY, Zhao CB and Zhang YB. 2003. Zircon U-Pb Ages of the Indosinian Granites in the Tonghua Region, and the Response of Liaoji Region to the Dabie-Sulu Ultrahigh-pressure Collisional Orogenesis. Chinese Sci. Bull., 48: 1616 - 1623

Luo SX, Ren XR, Zhu Y, Chen JC, Guo YP and Wei TL. 1999. Geology of Shandong diamond deposits. Jinan: Shandong Sci Tech. Press, 131p (in Chinese with English abstract)

Ma X. 1987. The Outline of China Lithospheric Dynamics. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese)

Manley CR, Glazner AF and Farmer GL. 2000. Timing of volcanism in the Sierra Nevada of California: Evidence for the Pliocene delamination of the batholithic root? Geology, 28: 811 - 814

Maruyama S. 1997. Pacific-type orogeny revisited: Miyashiro-type orogeny proposed. Island Arc, 6: 91 - 120

Meisel T, Walker RJ, Irving AJ and Lorand JP. 2001. Osmium isotopic compositions of mantle xenoliths: a global perspective. Geochim. Cosmochim. Acta, 65: 1311 - 1323

Meissner R and Mooney W. 1998. Weakness of the lower continental crust: a condition for delamination, uplift, and escape. Tectonophysics, 296: 47 - 60

Menzies MA, Fan WM and Zhang M. 1993. Palaeozoic and Cenozoic lithoprobe and the loss of > 120km of Archean lithosphere, Sino-Korean craton, China. In Magmatic Processes and Plate Tectonic (eds. Prichard HM, Alabaster T, Harris NBW, Neary CR). Geol. Soc. Special Publ., 76: 71 - 81

Menzies MA and Xu YG. 1998. Geodynamics of the North China Craton. In Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia (eds. Flower MFJ, Chung SL, Lo CH, Lee TY), Am. Geophy. Union, Washington, D. C., Geodyn. Ser., 27: 155 - 165

Menzies M, Xu YG, Zhang HF and Fan WM. 2007. Integration of geology, geophysics and geochemistry: A key to understanding the North China Craton. Lithos, 96: 1 - 21

Niu YL. 2005. 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., 11: 9 - 46

Parkinson IJ, Hawkesworth CJ and Cohen AS. 1998. Ancient mantle in a modern arc: osmium isotopes in Izu-Bonin-Mariana forearc peridotites. Science, 281: 2011 - 2013

Pearson DG, Irvine GJ, Ionov DA, Boyd FR and Dreibus GE. 2004. Re-Os isotope systematics and platinum group element fractionation during mantle melt extraction: A study of massif and xenolith peridotite suites, Chem. Geol., 208: 29 - 59

Pourhiet L, Gurnis M and Saleeby J. 2006. Mantle instability beneath the Sierra Nevada Mountains in California and Death Valley extension. Earth Planet. Sci. Lett., 251: 104 - 119

Reisberg L, Zhi XC, Lorand JP, Wagner C, Peng ZC and Zimmermann C. 2005. Re - Os and S systematics of spinel peridotite xenoliths from east central China: Evidence for contrasting effects of melt percolation. Earth Planet. Sci. Lett., 239: 286 - 308

Ren JY, Tamaki K, Li ST and Zhang JX. 2002. Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in Eastern China and adjacent areas. Tectonophysics, 344: 175 - 205

Romanowicz B. 2003. Global mantle tomography: progress status in the past 10 years. Ann. Rev. Earth Planet. Sci., 31: 303 - 328

Rudnick RL, Gao S, Ling WL, Liu YS and McDonough WF. 2004. Petrology and geochemistry of spinel peridotite xenoliths from Hannuoba and Qixia, North China craton. Lithos, 77: 609 - 637

Saha A, Basu AR, Jacobsen SB, Poreda RJ, Yin QZ and Yogodzinski GM. 2005. Slab devolatization and Os and Pb mobility in the mantle wedge of the Kamchatka arc. Earth Planet. Sci. Lett., 236: 182 - 194

Sengor AMC. 1999. Continental interiors and craton: any relation? Tectonophysics, 305: 1 - 42

Shi RD, Alard O, Zhi XC, O'Reilly SY, Pearson NJ, Griffin WL, Zhang M and Chen XM. 2007. Multiple events in the Neo-Tethyan oceanic upper mantle: Evidence from Ru - Os - Ir alloys in the Luobusa and Dongqiao ophiolitic podiform chromitites, Tibet. Earth Planet. Sci. Lett., 261: 33 - 48

Sine CR, Wilson D, Gao W, Grand SP, Aster R, Ni J and Baldridge WS. 2008. Mantle structure beneath the western edge of the

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Colorado Plateau. Geophy. Res. Lett., 35: L10303, doi10.1029/2008GL033391

Sleep NH. 2005. Evolution of the continental lithosphere. Annu. Rev. Earth Planet. Sci., 33: 369 - 393

Sonder LJ and Jones CH. 1999. Western United States extension: How the West was widened. Annu. Rev. Earth Planet. Sci., 27: 417 - 462

Song TRA and Helmberger DV. 2007. A depleted, destabilized *continental lithosphere near the Rio Grande rift. Earth Planet.* Sci. Lett., 262: 175 - 184

Stern RJ. 2002. Subduction zones. Rev. Geophy., 40: 2001RG00108

Sun WD, Ding X, Hu YH and Li XH. 2007. The golden transformation of the Cretaceous plate subduction in the west Pacific. Earth Planet. Sci. Lett., 262: 533 - 542

Tang YJ, Zhang HF, Ying JF, Zhang J and Liu XM. 2008. *Refertilization of ancient lithospheric mantle beneath the central* North China Craton: Evidence from petrology and geochemistry of peridotite xenoliths, Lithos, 101: 435 - 452

Walker RJ, Carlson RW, Shirey SB and Boyd FR. 1989. Os, Sr, Nd, and Pb isotope systematics of southern African peridotite xenoliths: Implications for the chemical evolution of subcontinental mantle. Geochim. Cosmochim. Acta, 53: 1583 - 1595

Walker RJ, Prichard HM, Ishiwatari A and Pimentel M. 2002. The osmium isotopic composition of convecting upper mantle deduced from ophiolite chromites. Geochim. Cosmochim. Acta, 66: 329 - 345

Walker RJ, Brandon AD, Bird JM, Piccoli PM, McDonough WF and Ash RD. 2005. 187Os - 186Os systematics of Os - Ir - Ru alloy grains from southwestern Oregon. Earth Planet. Sci. Lett., 230: 211 - 226

Wang K, Plank T, Walker JD and Smith EI. 2002. A mantle melting profile across the Basin and Range, SW USA. J. Geophys. Res., 107: 2001JB000209

Wang KL, O'Reilly SY, Griffin WL, Chung SL and Pearson NJ. 2003. Proterozoic mantle lithosphere beneath the extended margin of the South China block: in situ Re-Os evidence. Geology, 31: 709 - 712

Wang T, Zheng YD, Zhang JJ, Wang XS, Zeng LS and Tong Y. 2007. Some problems in the study of Mesozoic extensional structure in the North China Craton and its significance for the study of lithospheric thinning. Geol. Bull. China, 26: 1154 - 1166 (in Chinese with English abstract)

Wells ML and Hoisch TD. 2008. The role of mantle delamination in widespread Late Cretaceous extension and magmatism in the Cordilleran orogen, western United States. Geol. Soc. Am. Bull., 120: 515 - 530

Wernicke B, Clayton R, Ducea M, Jones CH, Park S, Ruppert S, Saleeby J, Snow JK, Squires L, Fliedner M, Jiraceck G, Keller R, Klemperer S, Luetgert J, Malin P, Miller K, Mooney W, Oliver H and Phinney R. 1996, Origin of high mountains in the continents: The southern Sierra Nevada. Science, 271: 190 - 193.

Wilde SA, Zhon XH, Nemchin AA and Sun M. 2003. Mesozoic crust - mantle interaction beneath the North China craton: a consequence of the dispersal of Gondwanaland and accretion of Asia. Geology, 31: 817 - 820

Wu FY and Sun DY. 1999. The Mesozoic magmatism and lithospheric thinning in Eastern China (in Chinese with English abstract). J. Changchun Uni. Sci. Tech., 29: 313 - 318

Wu FY, Sun DY, Zhang GL and Ren XW. 2000. Deep geodynamics of Yanshain Movement (in Chinese with English abstract). Geol J China Uni., 6: 379 - 388 (in Chinese with English abstract)

Wu FY, Ge WC, Sun DY and Guo CL. 2003. Discussions on the lithospheric thinning in eastern China. Earth Science Frontiers, 10 (3): 51 - 60 (in Chinese with English abstract)

Wu FY, Walker RJ, Ren XW, Snn DY and Zhou XH. 2003b. Osmium isotopic constraints on the age of lithospheric mantle beneath northeastern China. Chem. Geol., 197: 107 - 129

Wu FY, Lin JQ, Wilde SA, Zhang XO and Yang JH. 2005a. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in Eastern China. Earth Planet. Sci. Lett., 233: 103 - 119

Wu FY, Yang JH, Wilde SA and Zhang XO. 2005b. Geochronology, petrogenesis and tectonic implications of Jurassic granites in the Liaodong Peninsula, NE China. Chem. Geol., 221: 127 - 156

Wu FY, Zhao GC, Wilde SA and Sun DY. 2005c. Nd Isotopic constraints on the crustal formation of the North China Craton. J. Asian Earth Sci. 24, 523 - 545

Wu FY, Yang JH, Liu XM, Li TS, Xie LW and Yang YH. 2005. Hf *isotopes of the 3.8 Ga zircons in eastern Hebei Province*, China: Implications for early crustal evolution of the North China Craton. Chinese Sci. Bull., 50: 2473 - 2480.

Wu FY, Walker RJ, Yang YH, Yuan HL and Yang JH. 2006. The chemical-temporal evolution of lithospheric mantle underlying the North China Craton. Geochim. Cosmochim. Acta, 70: 5013 - 5034

Wu FY, Li XH, Yang JH and Zheng YF. 2007a. Discussions on the *petrogenesis of granites*. Acta Petrol. Sinica, 23: 1217 - 1238 (*in* Chinese with English abstract)

Wu FY, Yang JH, Lo CH, Wilde SA, Sun DY and Jahn BM. 2007. The Heilongjiang Group: a Jurassic accretionary complex in the Jiamusi Massif at the western Pacific margin of northeastern China. Island Arc, 16: 156 - 172

Wu FY, Zhang YB, Yang JH, Xie LW and Yang YH. 2008. Zircon U-Pb and Hf isotopic constraints on the Early Archean crustal evolution of the North China Craton. Precambrian Res., in review

Xia QX, Zhi X C, Meng Q, Zheng L and Peng ZC. 2004. The trace element and Re-Os isotopic geochemistry of mantle-derived peridotite xenoliths from Hannuoba: nature and age of SCLM beneath the area. Acta Petrol. Sinica, 20: 1215 - 1224 (in Chinese with English abstract)

Xu WL, Chi XG, Yuan C, Huang YM and Wang W. 1993. Mesozoic dioritic rocks and deep-seated inclusions in central North China Platform. Beijing: Geological Publishing House, 164p (in Chinese with English abstract)

Xu WL, Zheng CQ and Wang DY. 1999. Discorey of mantle- and lower crustal-derived xenoliths in Mesozoic trachybasalts from Western Liaoning, and their geological implications. Geol. Rev., 45 (supp.): 444 - 449 (in Chinese with English abstract)

Xu WL, Gao S, Wang QH, Wang, DY and Liu YS. 2006a. Mesozoic crustal thickening of the eastern North China craton: Evidence from eclogite xenoliths and petrologic implications. Geology, 34: 721 - 724

Xu WL, Wang QH, Wang DY, Guo JH and Pei FP. 2006b. Mesozoic adakitic rocks from the Xuzhou-Suzhou area, eastern China: Evidence for partial melting of delaminated lower continental crust. J. Asian Earth Sci., 27: 230 - 240

Xu WL, Yang CH, Yang DB, Pei FP, Wang QH and Ji WQ. 2006c. Mesozoic high-Mg diorites in eastern North China craton: constraints on the mechanism of lithospheric thinning. Earth Sci. Frontiers, 13: 120 - 129 (in Chinese with English abstract)

Xu WL, Hergt JM, Gao S, Pei FP, Wang W and Yang DB. 2008. 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., 265: 123 - 137

Xu XS, O'Reilly SY, Griffin WL and Zhou XM. 2000. Genesis of young lithospheric mantle in Southeastern China: an LAM-ICPMS trace element study. J Petrol, 41: 111 - 148

Xu XS, Griffin WL, O'Reilly SY, Pearson NJ, Geng HY and Zheng JP. 2007. Re - Os isotopes of sulfides in mantle xenoliths from eastern China: Progressive modification of lithospheric mantle. Lithos, 102: 43 - 64

Xu YG, Fan W. M and Lin G. 1995a. Lithosphere-asthenosphere interaction: a comparative study on Cenozoic and Mesozoic basalts around Bohai area. Geotectonic Metallogeny, 19 (4): 1 - 13

Xu YG, Lin CY, Shi LB, Mercier JCC and Ross JV. 1995b. Upper mantle geotherm for eastern China and its geological implications. Sci. China (B), 38: 1482 - 1492

Xu YG, Menzies MA, Vroon P, Mercier JCC and Lin CY. 1998. Texture-temperature-Geochemistry relationship in the upper mantle as

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

revealed from spinel peridotite xenoliths from Wangqing, NE China. J. Petrol., 39: 469 - 493

Xu YG. 1999. Roles of thermo-mechanic and chemical erosion in continental lithospheric thinning. Bull. Mineral. Petrol. Geochem., 18: 1 - 5 (in Chinese with English abstract)

Xu YG. 2001. Thermo-tectonic destruction of the Archean lithospheric keel beneath eastern China: evidence, timing and mechanism. Phy. Chem. Earth (A), 26: 747 - 757

Xu YG. 2004. Lithospheric thinning beneath North China: A temporal and spatial perspective. Geol. J. China Uni., 10: 324 - 331 (in Chinese with English abstract)

Xu YG, Huang XL, Ma JL, Wang YB, Iizuka Y, Xu JF, Wang Q and Wu XY. 2004a. 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., 147: 750 - 767

Xu YG, Chung, SL, Ma JL and Shi LB. 2004b. Contrasting Cenozoic lithospheric evolution and architecture in western and eastern Sino-Korean Craton: Constraints from geochemistry of basalts and mantle xenoliths. J. Geol., 112: 593 - 605

Xu YG. 2006. Using basalt geochemistry to constrain Mesozoic-Cenozoic evolution of the lithosphere beneath North China Craton. Earth Sci. Frontier, 13(2): 93 - 104 (in Chinese with English abstract)

Xu YG. 2007. Diachronous lithospheric thinning of the North China Craton and formation of the Daxin' anling-Taihangshan gravity lineament. Lithos, 96: 281 - 298

Xu YG, Blusztajn J, Ma JL, Suzuki K, Liu JF and Hart SR. 2008. 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, 102: 25 - 42.

Yan J, Chen JF, Xie Z and Zhou TX. 2003. Mantle xenoliths from Late Cretaceous basalt in eastern Shandong Province: New constraint on the timing of lithospheric thinning in eastern China. Chinese Sci. Bull., 48: 2139 - 2144

Yang JH, Wu FY, Wilde SA. 2003. Geodynamic setting of large-scale Late Mesozoic gold mineralization in the North China Craton: an association with lithospheric thinning. Ore Geol. Rev., 23: 125 - 152

Yang JH, Wu FY, Chung SL, Chu MF, Wilde SA, Liu W and Zhai MG. 2004. Multiple sources for the origin of granites: Geochemical and Nd/Sr isotopic evidence from the Gudaoling granite and its mafic enclaves, northeast China. Geochim. Cosmochim. Acta, 68: 4469 - 4493

Yang JH, Chung SL, Wilde SA, Wu FY, Chu MF, Lo CH and Fan HR. 2005. Petrogenesis of post-orogenic syenites in the Sulu Orogenic Belt, East China: geochronology, geochemical and Nd-Sr isotopic evidence. Chem. Geol., 214: 99 - 125

Yang JH, Wu FY, Chung SL, Wilde SA and Chu MF. 2006. A hybrid origin for the Qianshan A-type granites, northeast China: Geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic evidence. Lithos, 89: 89 - 106

Yang JH, Wu FY, Wilde SA, Xie LW, Yang YH and Liu XM. 2007a. Tracing magma mixing in granite genesis: in situ U-Pb dating and Hf-isotope analysis of zircons. Contrib. Mineral. Petrol., 153: 177 - 190

Yang JH, Sun JF, Chen FK, Wilde SA and Wu FY. 2007b. Sources and petrogenesis of late Triassic dolerite dikes in the Liaodong Peninsula: Implications for post-collisional lithosphere thinning of eastern North China Craton. J. Petrol., 48: 1973 - 1997

Yang JH, Wu FY and Wilde SA. 2007c. Petrogenesis of Late Triassic granitoids and their enclaves with implications for post-collisional lithospheric thinning of the Liaodong Peninsula, North China Craton. Chem. Geol., 242: 155 - 175

Yang JH, Wu FY, Chung SL, Lo CH, Wilde SA and Davis GA. 2007d. Rapid exhumation and cooling of the Liaonan metamorphic core complex: Inferences from 40Ar/39Ar thermochronology and implications for Late Mesozoic extension in the eastern North China Craton. Geol. Soc. Am. Bull., 119: 1405 - 1414

Yang JH, Wu FY, Wilde SA, Belousova E and Griffin WL. 2008. Mesozoic decratonization of the North China block. Geology, 36: 467 - 470

Yang JJ and Jahn BM. 2000. Deep subduction of mantle-derived garnet peridotites from the Su-Lu UHP metamorphic terrane in China. J. Metamorph. Geol., 18: 167 - 180

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

Ying JF, Zhang HF, Kita N, Morishita Y and Shimoda G. 2006. 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., 244: 622 - 638

Yu CM, Zheng JP and Griffin WL. 2007. In situ Re-Os isotope ages of sulfides in Hannuoba peridotitic xenoliths: Significance for the frequently-occurring mantle events beneath the North China Block. Chinese Sci. Bull., 52: 2847 - 2853

Yuan HL, Gao S, Rudnick RL, Jin ZM, Liu YS, Puchtel IS, Walker RJ and Yu RD. 2005. Re - Os evidence for the age and origin of peridotites from the Dabie - Sulu ultrahigh pressure metamorphic belt, China. Chem. Geol., 236: 323 - 338

Yuan XC. 1996. The lithosphere and mushroom cloud structure modal in Qinling Mt. Sci. China (D), 26: 209 - 215 (in Chinese)

Yuan XC. 2007. Mushroom structure of the lithospheric mantle and its genesis at depth: revisited. Geol. China, 34: 737 - 758 (in Chinese with English abstract)

Zandt G, Gilbert H, Owens TJ, Ducea M, Saleeby J and Jones CH. 2004. Active foundering of a continental arc root beneath the Southern Sierra Nevada, California. Nature, 431: 41 - 46

Zhai MG, Meng QR, Liu JM, Hou QL, Hu SB, Li Z, Zhang HF, Liu W, Shao JA and Zhu RX. 2004. Geological features of Mesozoic tectonic regime inversion in Eastern North China and implication for geodynamics. Earth Sci. Frontiers, 11: 285 - 298 (in Chinese with English abstract)

Zhai MG, Fan QC, Zhang HF, Sui JL and Shao JA. 2007. Lower crustal processes leading to Mesozoic lithospheric thinning beneath eastern North China: Underplating, replacement and delamination. Lithos, 96: 36 - 54

Zhang HF, Sun M, Zhou XH, Fan WM, Zhai MG and Yin JF. 2002. 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., 144: 241 - 253

Zhang HF, Sun M, Zhou XH, Zhou MF, Fan WM and Zheng JP. 2003. Secular evolution of the lithosphere beneath the eastern North China Craton: evidence from Mesozoic basalts and high-Mg andesites. Geochim. Cosmochim. Acta, 67: 4373 - 4387

Zhang HF, Ying JF, Xu P and Ma YG. 2004. Mantle olivine xenocrysts entrained in Mesozoic basalts from the North China craton: Implication for replacement process of lithospheric mantle. Chinese Sci. Bull., 49: 961 - 966

Zhang HF. 2005. Transformation of lithospheric mantle through peridotite-melt reaction: A case of Sino-Korean craton. Earth Planet. Sci. Lett., 237: 768 - 780

Zhang HF. 2006. Peridotite-melt interaction: an important mechanism for the compositional transformation of lithospheric mantle. Earth Sci. Frontiers, 13(2): 65 - 75 (in Chinese with English abstract)

Zhang HF, Nakamura E, Sun M, Kobayashi K, Zhang J, Ying JF, Tang YJ and Niu LF. 2007. Transformation of subcontinental lithospheric mantle through peridotite-melt reaction: evidence from a highly fertile mantle xenolith from the North China Craton. Inter. Geol. Rev., 49: 658 - 679

Zhang HF, Goldstein S, Zhou XH, Sun M, Zheng JP and Cai Y. 2008. Evolution of subcontinental lithospheric mantle beneath eastern China: Re - Os isotopic evidence from mantle xenoliths in Paleozoic kimberlites and Mesozoic basalts. Contrib. Mineral. Petrol., 155: 271 - 293

Zhang RY, Liou JG, Yang JS and Yui TF. 2000. Petrochemical

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

constraints for dual origin of garnet peridotites from the Dabie-Sulu UHP terrane, eastern-central China. J Metamorphic Geol., 18: 149 - 166

Zhang RY, Liou JG, Yang JS and Ye K. 2003. Ultrahigh-pressure metamorphism in the forbidden zone: the Xugou garnet peridotite, Sulu terrane, eastern China. J. Metamorph. Geol., 21: 539 - 550

Zhang RY, Yang JS, Wooden JL, Liou JG and Li TF. 2005. U - Pb SHRIMP geochronology of zircon in garnet peridotite from the Sulu UHP terrane, China: implications for mantle metasomatism and subduction-zone UHP metamorphism. Earth Planet. Sci. Lett., 237: 729 - 743

Zhao DP, Maruyama S and Omori S. 2007. Mantle dynamics of Western Pacific and East Asia: Insight from seismic tomography and mineral physics. Gondwana Res., 11: 120 - 131

Zhao GC, Wilde SA, Cawood PA, Sun M and Lu LZ. 2001. Archean blocks and their boundaries in the North China Craton: lithological, geochemical, structural and P-T path constraints. Precambrian Res., 107: 45 - 73

Zhao ZF, Zheng YF, Wei CS and Wu YB. 2004. Zircon isotope evidence for recycling of subducted continental crust in post-collisional granitoids from the Dabie terrane in China, Geophy. Res. Lett., 31: 2004GL021061

Zheng JP, O'Reilly SY, Griffin WL, Lu FX and Zhang M. 1998. Nature and evolution of Cenozoic lithospheric mantle beneath Shandong Peninsula, Sino-Korean Craton, Eastern China. Inter. Geol. Rev., 40: 471 - 499

Zheng JP. 1999. Mesozoic-Cenozoic mantle replacement and lithospheric thinning beneath East China. Wuhan: China University of Geosciences Press, 126p (in Chinese with English abstract)

Zheng JP and Lu FX. 1999. Mantle xenoliths from kimberlites, Shandong and Liaoning: Paleozoic mantle character and its heterogeneity. Acta Petrol. Sinica, 15: 65 - 74 (in Chinese with English abstract)

Zheng, JP, Lu FX, O'Reilly SY, Griffin WL, Zhang M. 1999. Comparison between Paleozoic and Cenozoic lithospheric mantle in the eastern part of the North China block: with a discussion of mantle evolution. Acta Geol. Sinica, 73: 47 - 56 (in Chinese with English abstract)

Zheng JP, O'Reilly SY, Griffin WL, Lu FX, Zhang M and Pearson NJ. 2001. Relict refractory mantle beneath the eastern North China block: significance for lithosphere evolution. Lithos, 57: 43 - 66

Zheng JP, Griffin WL, O'Reilly SY, Lu FX, Wang CY, Zhang M, Wang FZ and Li HM. 2004a. 3.6 Ga lower crust in central China: new evidence on the assembly of the North China craton. Geology, 32: 229 - 232

Zheng JP, O'Reilly SY, Griffin WL, Zhang M, Lu FX and Liu GL. 2004b. Nature and evolution of Mesozoic - Cenozoic lithospheric mantle beneath the Cathaysia block, SE China. Lithos, 74: 41 - 65

Zheng JP, Griffin WL., O'Reilly SY., Lu FX and Yu CM. 2004c. U-Pb and Hf- Isotope analysis of zircons in mafic xenoliths from Fuxian kimberlites: evolution of the lower crust beneath the North China Craton. Contrib. Mineral. Petrol., 148: 79 - 103

Zheng JP, Sun M, Zhou MF and Robinson P. 2005a. Trace elemental and PGE geochemical constraints of Mesozoic and Cenozoic peridotitic xenoliths on lithospheric evolution of the North China Craton. Geochim. Cosmochim. Acta, 69: 3401 - 3418

Zheng JP, Zhang RY, Griffin WL, Liou JG and O'Reilly SY. 2005b. Heterogeneous and metasomatized mantle recorded by trace elements in minerals of the Donghai garnet peridotites, Sulu UHP terrane, China. Chem. Geol., 221: 243 - 259

Zheng JP, Lu FX, Griffin WL, Yu CM, Zhang RS, Yuan XP and Wu XL. 2006. Lithospheric thinning accompanying mantle lateral spreading, erosion and replacement beneath the eastern part of North China-evidence from peridotites. Earth Scie. Frontiers, 13 (2): 76 - 85 (in Chinese with English abstract)

Zheng JP, Griffin WL, O'Reilly SY, Yang JS, Li TF, Zhang M, Zhang RY and Liou JG. 2006b Mineral chemistry of peridotites from Paleozoic, Mesozoic and Cenozoic lithosphere: constraints on mantle evolution beneath Eastern China. J. Petrol., 47: 2233 - 2256

Zheng JP, Griffin WL, O'Reilly SY, Yang JS and Zhang RY. 2006c. A refractory mantle protolith in younger continental crust, east-central China: age and composition of zircon in the Sulu ultrahigh-pressure peridotite. Geology, 34: 705 - 708

Zheng JP, Griffin WL., O'Reilly SY, Zhang M and Pearson N. 2006d. Zircons in mantle xenoliths record the Triassic Yangtze - North China continental collision. Earth Planet. Sci. Lett., 247: 130 - 142

Zheng JP, Griffin WL, O'Reilly SY, Yu CM, Zhang HF, Pearson N and Zhang M. 2007. 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, 71: 5203 - 5225

Zheng JP, Sun M, Griffin WL, Zhou MF, Zhao GC, Robinson P, Tang HY, Zhang ZH. 2008. Age and geochemistry of contrasting peridotite types in the Dabie UHP belt, eastern China: Petrogenetic and geodynamic implications. Chem. Geol., 247: 282 - 304

Zhou Q, Wu FY, Chu ZY, Yang YH, Sun DY and Ge WC. 2007. Sr-Nd-Hf-Os isotopic characterizations of the Jiaohe peridotite xenoliths in Jilin province and constraints on the lithospheric mantle age in northeastern China. Acta Petrol. Sinica, 23: 1269 - 1280 (in Chinese with English abstract)

Zhou XH. 2006. Major transformation of subcontinental lithosphere beneath eastern China in the Cenozoic-Mesozoic: review and prospect. Earth Sci. Frontiers, 13 (2): 50 - 64 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

池际尚. 1988, 中国东部新生代玄武岩及上地幔研究. 武汉: 中国地质大学出版社

池际尚, 路凤香. 1996. 华北地台金伯利岩及古生代岩石圈地幔特征. 北京: 科学出版社

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

邓晋福, 赵海玲, 莫宣学, 吴宗絮, 罗照华. 1996. 中国大陆根-柱构造—大陆动力学的钥匙. 北京: 地质出版社, 110 页

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

鄂莫岚, 赵大升主编. 1987. 中国东部新生代玄武岩及深源岩石包体. 北京: 科学出版社, 490 页

樊祺诚, 隋建立, 徐平, 李霓, 孙谦, 王团华. 2005. 中国东部地幔矿物中富硅、碱熔融包裹体: 对岩石圈演化的启示. 中国科学, 35, 907 - 913

付明希, 胡圣标, 汪集旸. 2004. 华北东部中生代热体制转换及其构造意义. 中国科学, 34: 514 - 520

高山, Kern H, 金振民, 张宏飞, 张本仁. 2002. 榴辉岩的泊松比及其对造山带下地壳拆沉作用的指示. 中国科学 (D), 32: 881 - 888

韩宝福, 加加美宽雄, 李惠民. 2004. 河北光头山碱性花岗岩的时代、Nd-Sr 同位素特征及其对华北早中生代壳幔相互作用的意义. 岩石学报, 20: 1375 - 1388

何丽娟, 胡圣标, 汪集旸. 2001. 中国东部大陆地区岩石圈热结构特征. 自然科学进展, 11: 966 - 969

洪大卫, 王涛, 童英, 王晓霞. 2003. 华北地台和秦岭—大别—苏鲁造山带的中生代花岗岩与深部地球动力学过程. 地学前缘, 10:

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

231 - 256

黄福生, 薛绥洲. 1990. 邯邢侵入体中幔源超镁铁质包体的发现及其矿物地球化学特征. 岩石学报, No.4: 40 - 45

姜耀辉, 蒋少涌, 赵葵东, 倪培, 凌洪飞, 刘敦一. 2005. 辽东半岛煌斑岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其对中国东部岩石圈减薄开始时间的制约. 科学通报, 50: 2161 - 2168

靳永斌, 支霞臣, 孟庆, 高天山, 彭子成. 2003. 大别山北部饶拔寨超镁铁岩体的形成时代: Re-Os 同位素法定年. 科学通报, 48: 2560 - 2565

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

刘勇胜, 高山, 柳小明, 陈小明, 张文兰, 王选策. 2003. 汉诺坝下地壳-上地幔包体的岩石圈热动力学记录. 科学通报, 48: 1575 - 1581

路凤香, 韩柱国, 郑建平, 任迎新. 1991. 辽宁复县地区古生代岩石圈地幔特征. 地质科技情报, 10 (增刊): 2 - 20

路凤香, 郑建平, 李伍平, 陈美华, 成中梅. 2000. 中国东部显生宙地幔演化的主要样式:"蘑菇云"模型. 地学前缘, 7 (1): 97 - 107

路凤香, 郑建平, 邵济安, 张瑞生, 陈美华, 余淳梅. 2006. 华北东部中生代晚期—新生代软流圈上涌与岩石圈减薄. 地学前缘, 13(2), 86 - 92

路孝平, 吴福元, 赵成弼, 张艳斌. 2003. 通化地区印支期花岗岩锆石 U-Pb 年龄及其与大别-苏鲁超高压带碰撞造山作用的关系. 科学通报, 48: 843 - 849

罗声宣, 任富荣, 朱源, 陈积銭, 郭亚平, 魏同林. 1999. 山东金刚石地质. 济南: 山东科学技术出版社, 131 页

马杏垣. 1987. 中国岩石圈动力学纲要. 北京: 地质出版社

牛耀龄. 2005. 玄武岩浆起源和演化的一些基本概念以及对中国东部中—新生代基性火山岩成因的新思路. 高校地质学报, 11, 9 - 46

王涛, 郑亚东, 张进江, 王新社, 曾令森, 童英. 2007. 华北克拉通中生代伸展构造研究的几个问题及其在岩石圈减薄研究中的意义. 地质通报, 26: 1154 - 1166

吴福元, 孙德有. 1999. 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, 29: 313 - 318

吴福元, 孙德有, 张广良, 任向文. 2000. 论燕山运动的深部地球动力学本质. 高校地质学报. 6: 379 - 388

吴福元, 葛文春, 孙德有, 郭春丽. 2003a. 中国东部岩石圈减薄研究中的几个问题. 地学前缘, 10(3): 51 - 60

吴福元, 杨进辉, 柳小明, 李铁胜, 谢烈文, 杨岳衡. 2005d. 冀东 3.8Ga 锆石 Hf 同位素特征与华北克拉通早期地壳时代. 科学通报, 50: 1996 - 2003

吴福元, 李献华, 杨进辉, 郑永飞. 2007a. 花岗岩研究的几个问题. 岩石学报, 23 : 1217 - 1238

夏琼霞, 支霞臣, 孟庆, 郑磊, 彭子成. 2004. 汉诺坝幔源橄榄岩包体的微量元素和 Re-Os 同位素地球化学: SCLM 的性质和形成时代. 岩石学报, 20: 1215 - 1224

许文良, 迟效国, 袁朝, 黄一鸣, 王微. 1993. 华北地台中部中生代闪长质岩石及深源岩石包体. 北京: 地质出版社, 164 页

许文良, 郑常青, 王冬艳. 1999. 辽西中生代粗面玄武岩中地幔和下地壳捕虏体的发现及其地质意义. 地质论评, 45(增刊), 444 - 449

许文良, 杨承海, 杨德彬, 裴福萍, 王清海, 纪伟强. 2006c. 华北克拉通东部中生代高 Mg 闪长岩—对岩石圈减薄机制的制约. 地学前缘, 13: 120 - 129

徐义刚, 林传勇, 史兰斌, Mercier JC, Ross JV. 1995b. 中国东部上地幔古地温及其地质意义. 中国科学, 25: 874 - 881

徐义刚. 1999. 岩石圈的热-机械侵蚀和化学侵蚀与岩石圈减薄. 矿物岩石地球化学通报, 18: 1 - 5

徐义刚. 2004. 华北岩石圈减薄的时空不均一特征. 高校地质学报, 10: 324 - 331

徐义刚. 2006. 用玄武岩组成反演化中-新生代华北岩石圈的演化. 地学前缘, 13 (2): 93 - 104

闫峻; 陈江峰; 谢智; 周泰禧. 2003. 鲁东晚白垩世玄武岩中的幔源捕虏体: 对中国东部岩石圈减薄时间制约的新证据. 科学通报, 48, 1570 - 1574

余淳梅, 郑建平, Griffin WL. 2007. 汉诺坝橄榄岩捕虏体原位 Re-Os 同位素年龄与多发地幔事件. 科学通报, 52: 1814 - 1819

袁学诚. 1996. 秦岭岩石圈速度结构与蘑菇云构造模型. 中国科学 (D), 26: 209 - 215

袁学诚. 2007. 再论岩石圈地幔蘑菇云构造及其深部成因. 中国地质, 34: 737 - 758

翟明国, 孟庆任, 刘建民, 侯泉林, 胡圣标, 李忠, 张宏福, 刘伟, 邵济安, 朱日祥. 2004. 华北东部中生代构造体制转折峰期的主要地质效应和形成动力学探讨. 地学前缘, 11 (3): 284 - 298

张宏福, 英基丰, 徐平, 马玉光. 2004. 华北中生代玄武岩中地幔橄榄石捕虏晶: 对岩石圈地幔置换过程的启示. 科学通报, 49: 784 - 789

张宏福. 2006. 橄榄岩-熔体的相互作用: 岩石圈地幔组成转变的重要方式. 地学前缘, 13 (1): 65 - 75

郑建平. 1999. 中国东部地幔置换作用与中新生代岩石圈减薄. 武汉: 中国地质大学出版社, 126 页

郑建平, 路凤香. 1999. 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. 岩石学报, 15: 65 - 74

郑建平, 路凤香, O'Reilly SY, Griffin WL, 张明. 1999. 华北地台东部古生代与新生代岩石圈地幔特征及其演化. 地质学报, 73: 47 - 56

郑建平, 路凤香, Griffin WL, 余淳梅, 张瑞生, 袁晓萍, 吴秀玲. 2006a. 华北东部橄榄岩与岩石圈减薄中的地幔伸展和侵蚀置换作用. 地学前缘, . 13: 76 - 85

周琴, 吴福元, 储著银, 杨岳衡, 孙德有, 葛文春. 2007. 吉林蛟河地幔橄榄岩包体的 Sr-Nd-Hf-Os 同位素特征与岩石圈地幔时代. 岩石学报, 23: 1269 - 1280

周新华. 2006. 中国东部中、新生代岩石圈转型与减薄研究若干问题. 地学前缘, 13(2): 50 - 64

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net