金伯利岩在华北克拉通东部演化过程的研究意义

黄珊珊1

中山大学地球科学与地质工程学院，广东广州 510275

**摘要:**从20世纪90年代初期开始，国内外学者开始探讨中国东部岩石圈从200km减薄至80～120km的机制、时限及过程。含金刚石及捕虏体的金伯利岩侵位于华北克拉通东部，提供了自古生代以来板内岩石圈地幔特征及其演化的深源岩石探针。本文综述前人对金伯利岩侵位年龄、同位素、流体包裹体、岩相学的研究，旨在提出金伯利岩在华北克拉通东部演化过程的研究意义， 认为华北东部早古生代时含金刚石的金伯利岩侵位，表示当时存在冷、厚的克拉通岩石圈根，大陆克拉通的造陆运动是形成金伯利岩岩浆必要的大地构造背景。

**关键词:** 金伯利岩；华北克拉通；地幔演化

**the Significance of Kimberlite Reseach During the Evolution**

**in Eastern North China Craton**

HUANG Shan-shan1

1. School of Earth Science and Geological Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, Guangdong, China

**Abstract:** Since the beginning of the 1990s, domestic and foreign scholars began to explore the China from thinning of lithosphere in Eastern 200km to 80 ~ 120km, the mechanism and process of time. With diamond and capture xenoliths from kimberlites emplaced in the North China Craton through Eastern Paleozoic since the plate in the characteristics of the lithospheric mantle and the evolution of deep source rock probe is provided. This paper summarizes the former research of kimberlite emplacement age, isotope, fluid inclusion body, petrography, to the kimberlite in North China Craton through Eastern significance on the research of evolution and that in the eastern part of North China in the early Paleozoic containing diamond kimberlite emplacement, said there was cold and thick cratonic lithosphere root, carat, pass the epeirogenic movement is kimberlite magma necessary geotectonic background of the formation.

**Keywords:** Kimberlites; North China craton; Mantle evolution

**0引言**

克拉通作为地球表层最稳定的构造单元，它不仅保存了地球早期的演化历史，而且也记录了克拉通形成以后地球表层的形成与发展过程。与世界其它主要克拉通相比，华北克拉通却表现出与之不同的特征，这主要体现在自中生代以来它表现出明显的活动特征—大规模的构造变形与岩浆活动、大规模的成矿作用等。从20世纪90年代初期开始，国内外学者开始探讨中国东部岩石圈从200km减薄至80～120km的机制、时限及过程。而含金刚石及捕虏体的金伯利岩侵位于华北克拉通东部，提供了自古生代以来板内岩石圈地幔特征及其演化的深源岩石探针。华北含金刚石及捕虏体的金伯利岩所携带的深源岩石类型丰富，捕虏体以剪切变形结构为主,同时发育粒状结构、火成结构和较为广泛的交代结构,反映克拉通型岩石圈地幔在长期的演化过程中的复杂改造。所以本文综述前人对金伯利岩侵位年龄、同位素、流体包裹体、岩相学的研究，旨在提出金伯利岩在华北克拉通东部演化过程的研究意义，

1金伯利岩岩浆活动时代讨论

**1.1我国金伯利岩的分布**

我国华北克拉通由两个太古代陆核，即东部的冀鲁辽陆核和西部的鄂尔多斯陆核组成(图1)。两陆核于早元古代碰撞拼合形成一个统一的华北克拉通[1]。后华北克拉通一直处于稳定状态，直到古生代金伯利岩岩浆喷发为止[2]。四个含金刚石金伯利岩岩区：山东蒙阴、辽宁复县、辽宁铁岭[3]和辽宁桓仁岩区分布在冀鲁辽陆核东部(图1)。此外，金伯利岩也分布于冀鲁辽陆核的西侧(图1),靠近元古带造山带，例如山西应县金伯利岩、河北涉县金伯利岩和河南鹤壁金伯利岩。这些金伯利岩都不含矿，且皆遭受强烈的碳酸岩化。柳林金伯利岩是唯一一个出现在华北太古代那尔多斯陆核上的金伯利岩岩区，它分布在其东缘(图1)，皆是强碳酸岩化的金云母金伯利岩。近年来发现的第5个金伯利岩岩区：辽宁锦西[4]与复县金伯利岩岩区隔渤海相望(图1)。这个新报道的金伯利岩岩区也由岩脉或岩管组成，主要侵入到寒武-中奥陶石灰岩中。该岩区的金伯利岩皆遭受了强烈的碳酸岩化，含大量的金云母，但不含金刚石[5] 。

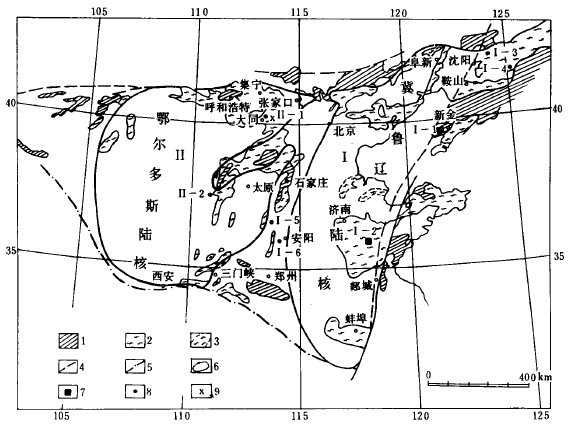


图1华北地台金伯利岩和钾镁煌斑岩分布图（引自路凤香，1995）

1.元古界露头;2.太古界结晶基底;3.隐伏太古界结晶基底;4.深断裂;5.地台边界;6.古陆核边界;7.含金刚石金伯利岩;8.金伯利岩;9.钾镁煌斑岩;I.冀鲁辽岩省; I-1.复县岩区; I-2.蒙阴岩区; I-3.铁岭岩区; I-4桓仁岩区; I-5.涉县岩区; I-6.鹤壁岩区; II.鄂尔多斯岩省; II-1.阳高金伯利岩及钾镁煌斑岩区; II-2.柳林岩区

综合前人分析，华北地台金伯利岩岩浆活动可分为三个时期：(1)中元古代金伯利岩和钾镁煌斑岩岩浆活动期，以鄂尔多斯陆核边缘山西阳高岩区为代表(1649-1811Ma), (2)古生代金伯利岩岩浆活动，以冀鲁辽陆核边缘的铁岭岩区、中部的复县和蒙阴岩区为代表(含矿金伯利岩，457-462Ma); (3)中~新生代金伯利岩岩浆活动时期，以鹤壁和涉县岩区为代表(117-52Ma)。含矿金伯利岩岩浆活动与华北地台中奥陶世晚期的造陆抬升作用有关[6]。

**1.2金伯利岩定年分析**

1980年前，前人大多通过全岩K-Ar定年法对金伯利岩进行测试。1980年之后，测试方法逐渐变多，有对含矿岩体做Rb-Sr、Sm-Nd等时年龄、金云母K-Ar年龄的、钙钛矿U-Pb年龄，近年还有一些关于金伯利岩的Ar同位素、Pb同位素、离子探针等测试结果[5-7]。不同方法的测试结果多处于440~750Ma之间，少部分达到2000多Ma，具体结果见表1。这样的结果可能是由样品来源、实验方法及操作误差等多种原因导致，也有可能代表金伯利岩的不同形成阶段，有待进一步的讨论。

金伯利岩岩浆是处于地幔-岩浆-CHO体系中在一定的岩石圈动力学环境里形成的,金伯利岩是由地幔物质、低熔程度的钾质超基性岩浆及以CHONS为主的流体这三种组分组成的混杂体系固结的。这样复杂的矿物组成其全岩测年结果则带有混合的特点，增加了不确定性。而金伯利岩中钙钛矿是基质矿物，代表金伯利岩岩浆的最后结晶的产物，所以，其U-Pb年龄可代表金伯利岩岩浆侵位固结的最后时间。巨晶金云母是金伯利岩岩浆早期结晶的产物，则它的年龄值可代表金伯利岩岩浆活动的时代。在方法中单矿物金云母等时年龄、钙钛矿U-Pb年龄、锆石U-Pb年龄及单矿物离子探针的测定被认为是可信度较高的。同时再辅以地层、古地磁、节理构造对金伯利岩侵入时间的约束，可推出其侵位时间[8]。综合前人的研究，蒙阴与富县的金伯利岩为同期侵位，侵位时间距今465Ma。

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **测定方法** | **蒙阴（Ma）** | **复县（Ma）** | **样品名称** | **来源** |
| K-Ar | 497 | 434 | 斑晶金云母 | 路凤香1995 |
| Rb-Sr等时 | 633.34 | 1109.30 | 斑状金伯利岩 | 赵磊1998 |
| 560±10 |  | 全岩+基质金云母 | 王瑛1997 |
| 573±16 |  | 全岩+金云母巨晶 | 王瑛1997 |
| 616±32 |  | 全岩 | 王瑛1997 |
|  | 462±4.8 | 斑晶金云母 | Bristow1988 |
| 651±24 |  | 石榴石 | 王瑛1997 |
| 605±30 |  | 蛇纹石 | 王瑛1997 |
| Sm-Nd等时 | 2511.67 |  | 金伯利岩岩球 | 朱源1989 |
| 619.48 |  | 斑状金伯利岩 | 朱源1989 |
| U-Pb | 457±7 |  | 钙钛矿 | Bristow1988 |
| Sr同位素 | 499.61 |  | 金云母巨晶 | 路凤香1995 |
| 765.32 |  | 细粒金伯利岩 | 路凤香1995 |
| Ar同位素 | 465±2 | 465 | 金云母巨晶 | 张宏福2007 |
| Pb同位素 | 2567±13～  2636±42 |  | 金伯利岩中的锆石 | 尹作为2004 |
| 离子探针 | 628 |  |  | Meyer1995 |

表1 金伯利岩不同定年方法的测试结果

2 华北克拉通的演化概况

**2.1关于克拉通一词的用法**

Kober 1921年划分出克拉通和造山带这2个地壳构造单元，前者指大陆中相对稳定的地块，包括地盾和地台。槽台学说基于地壳活动和稳定性的差别，将地壳的一级构造单元划分为地槽（褶皱系）和地台；板块构造说认为地球表层是由为数不多的大小不等的岩石圈板块拼合起来的，将六大板块作为全球的一级构造单元，并将分隔它们的边界也作为构造带看待。华北地台、华北板块词汇分别是上述2种学说中的一级单元内部进一步划分出的次一级，乃至更小的构造单元，分属于2种学说的专有名词[9]。

地台又称为陆台，指地壳上稳定的、形成后未再遭受褶皱变形的地区。华北地台挟持于阴山-燕山-与秦岭-大别两条造山带之间，范围包括华北、东北南部、渤海湾等地。因它包括朝鲜半岛，黄汲清（1945）又称之为中朝地台；鉴于它的面积较世界上其他地台小得多，且活动性较大，又称为中朝准地台。有些学者又称为中朝克拉通[10]。

克拉通是地壳形成之后(至少自显生宙以来)保持稳定状态、极少经受强烈构造变形的构造单元。现今的克拉通指大陆克拉通[10]。华北(中朝)克拉通范围同华北地台。论文描述的时候，如果采用板块构造学说，那么就应称为华北板块；若采用槽台学说就称为华北地台(中朝地台、中朝准地台)。至于华北克拉通，可以分别与华北板块和华北地台一起使用，但华北板块和华北地台不能一起使用。

**2.2华北克拉通的演化史**

华北克拉通是世界上为数不多的具有大于36亿年古老陆壳[11, 12]的地区之一，自太古宙陆壳形成以后，经历了早元古代的多次洋-陆及陆-陆作用[13, 14]和岩石圈-地慢柱作用[15, 16]相关的陆壳增生，并最终于18亿年左右完成基底的克拉通化作用[14]，随后其一直基本处于“稳定'的状态，直至早古生代奥陶纪含金刚石的金伯利岩岩浆侵位。基于华北克拉通古生代金伯利岩和新生代碱性玄武岩中携带的深源橄榄岩类捕虏体详细的岩石学和地球化学的对比研究揭示古生代时存在一个低热流值、厚度超过200km、强烈亏损玄武质组份的古老同位素弱富集型岩石圈地慢，到新生代时己被高热流值、厚度在60-120km、相对富集玄武质组份的新生大洋型岩石圈地慢所取代[17, 18]。

目前国内外学术界对于华北克拉通东部古生代到新生代岩石圈发生巨厚减薄，且地幔性质发生转变这一地质事实已达成共识。但就华北东部岩石圈减薄的机制而言，一直是华北岩石圈演化研究的核心问题和争议对象。不同学者对减薄机制提出了不同看法，Menzies et al较早提出华北岩石圈减薄与印度板块和欧亚板块的远程碰撞效应有关[19]。邓晋福等首先提出华北克拉通减薄的拆沉机制[20]，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，最近，他们还对早期提出的模型做了进一步的完善[21, 22]，提出了与碰撞造山及地慢柱有关的岩石圈“去根”减薄模式。Gao etal指出下地壳与岩石圈地慢的整体拆沉作用可能是中国东部岩石圈减薄机制[23]，辽西兴隆沟组火山岩[24]、徐淮埃达克质岩石[25, 26]及其榴辉岩包体[27]被认为是拆沉发生的代表性证据。吴福元等[28]和Wu et al[29]也倾向于拆沉模式在华北东部岩石圈减薄中占有重要地位，多方位板块的俯冲碰撞[30, 31](如蒙古板块、扬子地块以及太平洋板块向华北的俯冲)是华北岩石圈破坏的重要构造基础。Xu et al[32]强调热-机械侵蚀和随后的化学侵蚀对岩石圈地慢减薄的突出作用。路凤香等提出白垩纪晚期-新生代，以饱满的二辉橄榄岩为主的高热地幔物质呈“蘑菇云“，状上涌引起岩石圈的伸展并减薄[33, 34]。然而，也有学者认为有岩浆活动是否就代表有岩石圈减薄，本身就是一个问题[31]。从以上讨论可以看出对华北东部岩石圈减薄的机制还未取得广泛共识。

3 金伯利岩对岩石圈地幔多次事件的启示

金伯利岩通常受稳定地台及其边缘、环绕地台造山带的地堑区等构造背景控制。侵入活动主要见于稳定地台的深断裂带两侧或一侧的高角度断裂上盘地区,以及两个稳定地台相连接的边缘地区。岩浆活动受到通过这个地区的深断裂带控制。在地慢的局部地段,若能源(主要是热能)大量聚集,会促使富镁铁质组分出现“重熔”,形成新的岩浆房。金伯利岩岩浆房也许就是这样形成的。这些岩浆房形成后,当出现造山活动,或由于深断裂在深部出现张性活动,这些岩浆房中的岩浆物质便沿着此类张性断裂作缓慢的、脉动式的上升、侵入。酸性、中性和基性岩浆岩及其派生浅成侵入相和喷出相自40亿年以后,已有侵入和喷出活动,各种超基性岩和金伯利岩却自20亿年后才出现侵入活动。原因在于初始地壳的壳层远较今日为薄,硅铝层物质在低压下熔融,容易形成酸性或中性岩浆,侵入到地壳上部。但硅镁层物质由于地壳较薄,静压力低而难于重熔。因此,在20亿年前,超基性岩和金伯利岩未出现大规模的侵入活动,以后,地壳增厚,便出现了侵入活动。每一次造山运动,都会促使地壳增厚。基本上属于全球性的造山运动主要是吕梁-晋宁期、加里东期、海西-燕山期和燕山-喜马拉雅期。因此,金伯利岩岩浆的侵入活动主要发生在这四个时期[35]。

金伯利岩在全球所有的古老克拉通上几乎都有产出。金伯利岩尽管分布较少,但因其能携带金刚石和地幔岩捕虏体和/或捕虏晶至地表,故对其研究能够提供地幔深部过程的重要信息。金伯利岩岩浆通常起源于碳酸岩化的地幔二辉橄榄岩的低程度部分熔融，或是上升的挥发份与浅部地慢橄榄岩相互作用的产物。金伯利岩携带的金刚石和地慢岩捕虏体中超高压矿物包裹体的相继发现揭示至少有些金伯利岩最初起源于地幔转换带（410-670km)或下地幔、甚至核-幔边界，即与地幔柱活动有关。张宏福等人通过对金伯利岩Sr-Nd-Hf同位素组成的研究，认为华北金伯利岩可能来源于多组分混合的地幔源区，并排除了我国金伯利岩来源于地幔柱的可能性[5]。郑建平[36]认为金伯利岩浆起源条件的特征都与具富含流体组分有关,流体不仅降低了地幔的熔融温度,产生低熔岩浆,而且对保持冷的岩石圈状态起了有效的调节作用。金伯利岩的均匀基质和分凝基质结构、嵌晶结构、交代脉状与交代围岩结构,橄榄岩中的交代脉、交代团块,原生和次生金云母的存在,反映了金伯利岩及古老岩石圈地幔流体的活动及所引起的交代作用。金伯利岩中自然元素及元素互化物的存在,表明地幔中有深部还原流体,来源大于220km。金刚石中有流体包裹体,说明岩石圈底部的流体活动,稳定深度150~220km。华北中奥陶世晚期发生大规模造陆上升，同时代金伯利岩中携带大量的地慢捕虏体反映岩石圈所处的拉伸状态,表明大陆克拉通造陆运动与金伯利岩浆形成存在内在联系。

李江海等提出,华北克拉通前寒武纪有3次超大陆聚合期(2.8～2.5,2.0～1.8,1.3～1.0 Ga)及相间超大陆存在期,并且至少发生3次大规模的伸展裂解事件(2.5～2.4,1.8～1.7,0.8～0.7Ga)[37]。太古宙阜平旋回(2.5～3.0 Ga)是中国境内陆壳最初形成时代,中朝准地台陆核得以迅速增长,伴随陆核的形成而使其中的物质降温结晶,蒙阴和复县金刚石在这一时期开始形成。在1.8～1.7 Ga,华北处于非造山岩浆作用和地壳隆升阶段。非造山岩浆作用已被假设是元古宙伸展体制下超大陆裂解时形成的,非造山岩浆作用的特点归因于成熟的大陆岩石圈的再活化、相对小规模的重熔和侵位到克拉通核部的古老地壳中[38]。邵济安等认为,华北克拉通元古宙存在有三次伸展事件,它们是:1.8～1.7,1.3～1.2,0.8～0.7 Ga,其中1.3～1.2 Ga的伸展事件是以白云鄂博-渣尔泰裂谷发育以及晋、冀、蒙交接地带发育的一套基性岩墙群为标志[39]。在新元古代华北克拉通又开始了伸展裂解作用。扬子旋回(0.6～1.0 Ga)的构造运动使扬子准地台和塔里木准地台形成,并与中朝准地台连成一体,形成巨大的古中国地台。尹作为根据金刚石中N的聚集状态，估算了蒙阴金伯利岩中的金刚石主要形成于三个时期:1.8~1.7,1.3~1.1和0.9~0.6Ga[40]。综上，金伯利岩中金刚石的三个形成时期与华北克拉通三次伸展事件时间相吻合，华北克拉通的构造事件无论是碰撞聚合还是伸展裂解都会造成地球深处压力的增加或温度的变化,为金刚石的生长提供了条件。

**4 总结**

在古生代，华北是一个稳定的地块。经金伯利岩的定年分析，其侵位年龄为465Ma。此时的岩石圈厚度大，且含矿金伯利岩的喷发说明了当时的低温低（~40Mw/m2）。华北克拉通自中奥陶世发生大规模的造陆上升,正是这个时期形成含矿金伯利岩，且金伯利岩岩浆中携带大量的地慢捕虏体反映了岩石圈所处的拉伸状态，说明大陆克拉通的造陆运动是形成金伯利岩岩浆必要的大地构造背景。但目前关于华北东部岩石圈减薄的机制还未取得广泛共识。将我国金伯利岩岩区与南非相比，在岩石圈厚度、低温梯度、地幔交代等特征等方面十分相似，但华北克拉通的岩石圈地幔遭受了更为强烈的蚀变,其程度随着金伯利岩岩管开采深度加大而加强。那么，是否可以从金伯利岩的蚀变特征方面进行研究，对地幔岩石圈的演化提供一点依据的？文章将会进行后续研究。

**参考文献**

[1] Zhao G, Wilde S A, Cawood P A, et al. SHRIMP U-Pb zircon ages of the Fuping Complex: Implications for Late Archean to Paleoproterozoic accretion and assembly of the North China Craton[J]. American Journal of Science,2002,302(3):191-226.

[2] 池际尚. 中国原生金刚石成矿地质条件研究[M]. 中国地质大学出版社,1996.

[3] 张宏福. 辽宁铁岭地区金伯利岩的地球化学特征及其成因初探[J]. 现代地质,1993(4):458-464.

[4] 冯闯，张宏福，周新华. 辽西发现金伯利岩[J]. 地震地质,2000(B12):95-98.

[5] 张宏福，杨岳衡. 华北克拉通东部含金刚石金伯利岩的侵位年龄和Sr-Nd-Hf同位素地球化学特征[Z]. 2007285-294.

[6] 路凤香，赵磊，邓晋福，等. 华北地台金伯利岩岩浆活动时代讨论[J]. 岩石学报,1995(04):365-374.

[7] 王瑛，凌文黎，路凤香. 山东蒙阴金伯利岩侵位年代研究新成果[J]. 地质科技情报,1997(03):9-13.

[8] 王照波，王庆军. 华北板块东缘金刚石成矿区域地质背景分析与成矿预测[Z]. 20148-14.

[9] 邱殿明，蒋函，刘雅琴. 华北地台、华北克拉通、华北板块、华北古陆、华北地块等名词的用法[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2014(05):1686.

[10] 编委会地球科学大词典. 地球科学大词典：基础学科卷[M]. 北京:地质出版社,2006.

[11] Liu D Y, Nutman A P, Compston W, et al. Remnants of > 3800 Ma crust in the Chinese part of the Sino-Korean Craton[J]. Geology,1992,20(4):339.

[12] Griffin W L, Lu S Y F, O'Reilly S Y, et al. 3.6 Ga lower crust in central China: New evidence on the assembly of the North China craton[J]. Geology,2004,32(3):229-232.

[13] 李继亮，王凯怡，王清晨，等. 五台山早元古代碰撞造山带初步认识[J]. 地质科学,1990(1):1-11.

[14] 伍家善，耿元生. 华北陆台早前寒武纪重大地质事件[C]. 1992.

[15] Zhao G, Wilde S A, Cawood P A, et al. Thermal evolution of Archean basement rocks from the eastern part of the North China Craton and its bearing on tectonic setting[J]. International Geology Review,1998,40(8):706-721.

[16] Wang W. Formation of diamond with mineral inclusions of “mixed” eclogite and peridotite paragenesis[J]. Earth & Planetary Science Letters,1998,160(s 3–4):831-843.

[17] 郑建平. 中国东部地慢置换作用与中新生代岩石圈减薄[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1999.

[18] 郑建平，路凤香，S. Y. O. Reilly，等. 华北地台东部古生代与新生代岩石圈地幔特征及其演化[J]. 地质学报,1999(01):47-56.

[19] Menzies M A, Fan W, Zhang M. Palaeozoic and Cenozoic lithoprobes and the loss of >120 km of Archaean lithosphere, Sino-Korean craton, China[J]. Geological Society of London Special Publications,1993,76(1):71-81.

[20] 邓晋福，莫宣学，赵海玲，等. 中国东部岩石圈根／去根作用与大陆“活化”—东亚型大陆动力学模式研究计划[J]. 现代地质,1994(3):349-356.

[21] 邓晋福，苏尚国，刘翠，等. 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?[J]. 地学前缘,2006(02):105-119.

[22] Deng J F, Mo X X, Zhao H L, et al. A new model for the dynamic evolution of Chinese lithosphere: ‘continental roots–plume tectonics’[J]. Earth-Science Reviews,2004,65(3):223-275.

[23] Gao S, Zhang B R, Jin Z M, et al. How mafic is the lower continental crust?[J]. Earth & Planetary Science Letters,1998,161(s 1–4):101-117.

[24] Shan G, Rudnick R L, Hong-Ling Y, et al. Recycling lower continental crust in the North China craton.[J]. Nature,2004,432(7019):892-897.

[25] Xu W L, Wang Q H, Wang D Y, et al. Mesozoic adakitic rocks from the Xuzhou–Suzhou area, eastern China: Evidence for partial melting of delaminated lower continental crust[J]. Journal of Asian Earth Sciences,2006,27(2):230-240.

[26] Xu W, Hergt J M, Gao S, et al. Interaction of adakitic melt-peridotite: Implications for the high-Mg# signature of Mesozoic adakitic rocks in the eastern North China Craton[J]. Earth & Planetary Science Letters,2008,265(1-2):123-137.

[27] Xu W L, Gao S, Wang Q H, et al. Mesozoic crustal thickening of the eastern North China craton: Evidence from eclogite xenoliths and petrologic implications[J]. Geology,2006,34(9):721.

[28] 吴福元，孙德有. 中国东部中生代岩浆作用与岩石圈减薄[J]. 长春科技大学学报,1999(04):313-318.

[29] Wu F Y, Walker R J, Ren X W, et al. Osmium isotopic constraints on the age of lithospheric mantle beneath northeastern China[J]. Chemical Geology,2003,196(1-4):107-129.

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

[31] 吴福元，徐义刚，高山，等. 华北岩石圈减薄与克拉通破坏研究的主要学术争论[J]. 岩石学报,2008,24(6):1145-1174.

[32] Xu Y G. Thermo-tectonic destruction of the archaean lithospheric keel beneath the Sino-Korean Craton in China: Evidence, timing and mechanism[J]. Physics & Chemistry of the Earth Part A Solid Earth & Geodesy,2001,26(9):747-757.

[33] 路凤香，郑建平，李伍平，等. 中国东部显生宙地幔演化的主要样式：“蘑菇云”模型[J]. 地学前缘,2000(1):97-108.

[34] 路凤香，郑建平，邵济安，等. 华北东部中生代晚期—新生代软流圈上涌与岩石圈减薄[J]. 地学前缘,2006(02):86-92.

[35] 贺灌之. 金伯利岩和金刚石的形成机制[J]. 地质论评,2012,26(5):384-391.

[36] 郑建平，路凤香，赵磊王柏轩，等. 华北地台古生代金伯利岩（包括金刚石）中流体及其在地幔演化中的作用[Z]. 1996105-118.

[37] 李江海，侯贵廷，黄雄南，等. 华北克拉通对前寒武纪超大陆旋回的基本制约[J]. 岩石学报,2001(02):177-186.

[38] 翟明国，郭敬辉，赵太平. 新太古-古元古代华北陆块构造演化的研究进展[J]. 前寒武纪研究进展,2001(01):17-27.

[39] 邵济安，张履桥，李大明. 华北克拉通元古代的三次伸展事件[J]. 岩石学报,2002(02):152-160.

[40] 尹作为，路凤香，陈美华，等. 山东蒙阴金刚石的形成时代及地质环境[J]. 地学前缘,2005(04):614-621.