

不连续生长的金刚石与克拉通地块 内部增生过程中的地幔流体作用

郑建平¹, 余淳梅², 路凤香¹, 陈美华³

1. 中国地质大学 地球科学学院, 湖北 武汉 430074; 2. 中国地质大学 研究生院, 湖北 武汉 430074;
3. 中国地质大学 珠宝学院, 湖北 武汉 430074

摘 要:产于克拉通地块及其边缘褶皱带金伯利岩和钾镁煌斑岩中的原生金刚石,其主体上属地幔捕虏晶并具复杂的生长历史。从克拉通岩石圈存在复杂多发的壳幔相互作用和多层次的流体活动事件的角度,结合金刚石的精细内部结构所反映的不连续生长及微区原位傅立叶变换红外光谱研究成果,认为具复杂生长环带的金刚石是克拉通地块内部增生过程中的地幔流体对已形成金刚石间的相互作用的产物。这一认识有助于增进金刚石微观结构与地块内部改造事件有机联系的研究。地幔交代作用的介质成分主要为SiO₂、不饱和的碳酸岩熔体或富含不相容微量元素的CHON流体。多种年龄数据所给出的1.1~1.2 Ga结果,可能反映华北地块东部的岩石圈深部存在一次明显的地幔增生改造过程。

关键词:金刚石地质;复杂生长环带;地块内部增生;地幔流体

中图分类号:P57;P611 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-2321(2001)03-0103-07

深部地质研究揭示大陆岩石圈地幔经历了复杂的熔融提取和交代富集作用^[1]。原生金刚石主要产自金伯利岩和钾镁煌斑岩,是大陆岩石圈特定温度、压力、氧逸度和流体条件下的产物^[2]。产于“稳定的”克拉通地块金伯利岩或克拉通边缘褶皱带钾镁煌斑岩中的金刚石,其主体上属地幔捕虏晶并具复杂的生长历史。金刚石的周期性生长过程是否与克拉通地块增生中流体作用有联系,是现代深部地质研究的前沿课题。可喜的是,随着现代微区微量测试技术的飞速发展,为“金刚石地质”这一领域的研究创造了有利条件。本文从克拉通岩石圈存在复杂多发的壳幔相互作用和多层次的流体活动事件、金刚石的精细内部结构所反映的不连续生长及微区傅立叶变换红外光谱研究,得出认识:具复杂生长环带的金刚石是克拉通地块增生过程中的地幔流体对已形成金刚石间的相互作用的产物。

1 克拉通岩石圈存在复杂多发的壳幔事件

以不均一性研究为先导的地球圈层相互作用研究所取得的丰硕成果促使人们对地球内部的圈层结构、物质组成和各圈层之间相互作用性质的认识不断提高,加深了对地球内部动力学的了解^[3,4]。特别是随着现代测试手段的进步,为岩石圈事件性质和定年的精细研究创造了条件。如近年来,随着同位素地质年代学研究的不断深入,已充分揭示了对单颗粒钻石进行微区原位定年、微量元素及Hf同位素等全面分析的重要意义,认识到大陆岩石圈不仅形成年龄明显老于大洋岩石圈,而且经历着更为复杂的深部改造作用过程^[5,6]。含矿金伯利岩深源捕虏体的岩石学、地球化学和地质年代学研究提供了大陆深“根”的形成年龄、形成过程和演化的丰富信息,其中橄榄岩的Re-Os同位素研究在大陆岩石圈根形成年龄研究方面起着关键性的作用,而Rb-Sr和Sm-Nd同位素则包含着更丰富的有关岩石圈根所经历改造作用的信息^[7]。与超基性橄榄岩相比,麻粒岩、辉长岩、榴辉岩和辉石岩等镁铁质岩石

收稿日期:2001-03-02;修订日期:2001-06-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40072021;19735110)

作者简介:郑建平(1964—),男,博士,教授,从事岩石学教学和科研工作。

包体尽管在捕虏体系列中所占的比例非常小,但它们在窥探克拉通形成和演化的构造-岩浆作用背景方面所起作用的决定性的。如含金刚石榴辉岩捕虏体^[8]和金刚石中的榴辉岩型矿物组合包体^[9]揭示古老再循环物质在克拉通形成中的地位。澳大利亚南部基性麻粒岩、榴辉岩和长英质麻粒岩捕虏体中锆石年龄分析表明,不同类型的捕虏体代表着不同的形成时间和来源,而且所反映的壳幔事件是耦合的^[10],然而也有不耦合的实例^[11]。来自太古宙陆壳深源岩石中的下地壳捕虏体有元古宙锆石的生长^[12]和新生代事件的记录^[13],表明克拉通下地壳遭受过强烈的改造作用。Kaapvaal 克拉通的 MARID 矿物组合中的锆石 U-Pb 年龄^[14]则说明有些地幔交代作用与其寄主的金伯利岩浆存在成因联系。世界上著名的 Kaapvaal 克拉通和 Siberia 克拉通都不存在简单的垂直年代分布特征,而表现为不同年龄并置的复杂结构图案。如具 2.7~3.6 Ga 陆壳年龄的 Kaapvaal 克拉通(图 1),不论是在 1.18 Ga 时喷发的 Premier 岩管金伯利岩,还是在 0.09 Ga 时喷发的 Jagersfontein 和 North Lesotho 岩管金伯利岩,所捕获的橄榄岩年龄明显老于其寄主的金伯利岩且具复杂的年代学特征。

我国东部古生代(0.4~0.5 Ga)喷发的金伯利岩除含丰富的橄榄岩类捕虏体^[16]外,也含镁铁质麻粒岩等非橄榄岩类捕虏体^[17]。橄榄岩类捕虏体包括石榴石方辉橄榄岩、石榴石/铬铁矿二辉橄榄岩、铬铁矿纯橄榄岩、异剥橄榄岩以及具辉石岩脉的橄

榄岩复合岩石等,它们又可进一步分为原生粒状结构、残碎斑结构、剪切结构和细粒结构和少量具火成结构特征的粒状镶嵌结构组成。辉石岩包括金云母辉石岩、金云母磷灰石辉石岩以及磷灰石石榴石辉石岩,它们的共同特点是主要矿物粒度粗大,而且构成粒状镶嵌的火成结构特征。金云母岩类有金云母岩、石榴石金云母岩和橄榄石金云母岩等,依变形强弱可以分为强变形和基本未变形或弱变形两种类型。强变形者又可进一步分为变形定向者和无定向杂乱者。其中变形定向者,具残碎斑结构,残碎斑晶和基质全由金云母构成。无定向杂乱者由蛇纹石化橄榄石和金云母组成,表现为强烈变形的金云母和蛇纹石化橄榄石杂乱排列无固定取向,属多期变形叠加的综合结果。此外,在残碎斑结构橄榄岩中的残碎斑晶石榴石和辉石中分别有橄榄石、白云石、石英和铬铁矿、橄榄石等矿物包裹体。这些多旋回和多种结构在橄榄岩、金云母岩中并存,说明我国东部岩石圈地幔经历过复杂的多旋回、多阶段熔融岩浆、重结晶、变质和剪切变形历史。对橄榄岩 Nd 同位素研究表明,蒙阴的橄榄岩 Nd 模式年龄有 1.0 Ga 和 1.9 Ga 两组;复县橄榄岩的 Nd 模式年龄为 1.1~1.2 Ga(与蒙阴低者接近),辉石岩的 Nd 年龄为 1.9 Ga(与蒙阴高者相当)。它们的等时年龄参考值分别为 0.9 Ga 和 0.8 Ga(MSWD 值为 0.48),可能分别代表着两地金伯利岩侵位前的岩石圈地幔所发生深部作用过程的最晚年龄^[17],同样说明华北岩石圈地幔经历了克拉通化作用及其后续改造事件的

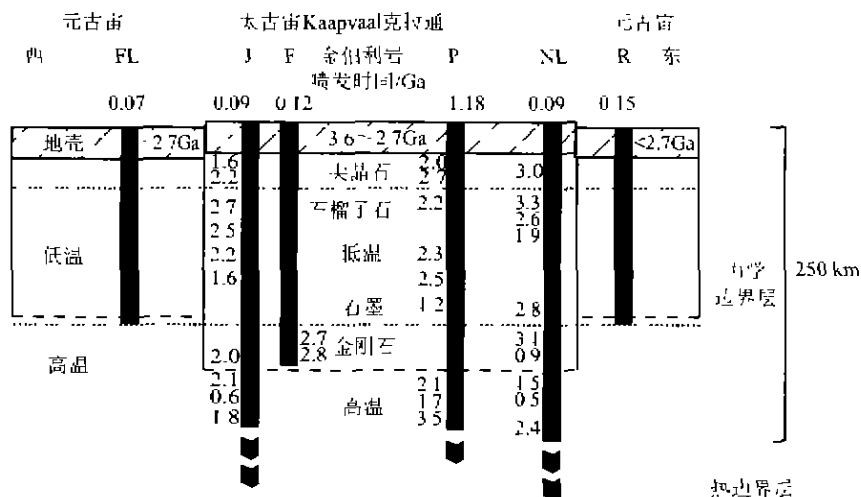


图 1 Kaapvaal 克拉通金伯利岩中橄榄岩捕虏体的 Re 亏损模式年龄^[15]

Fig. 1 Depleted Re modal age of peridotite xenoliths in kimberlites from Kaapvaal craton
岩管位置: F 代表 Fench; J 代表 Jagersfontein; NL 代表 North Lesotho; P 代表 Premier

叠加作用影响。在我国东部, 1.8~1.9 Ga 和 0.8~0.9 Ga 分别对应着吕梁运动和晋宁运动, 1.1~1.2 Ga 年代段的地质意义还不清楚。

2 古老岩石圈地幔中存在多层次的流体活动

在岩石圈地幔演化和超大型矿床研究中流体的地位显得特别突出, 这是由于流体是固体地球活动的枢纽, 它不仅影响着体系能量的传输, 而且还控制着物质成分的时、空分布和输运过程, 因此流体研究是把地质过程之间结合起来加以整体考察的关键环节。流体是用来描述岩浆、熔体、溶有挥发份的硅酸盐熔体(有时也称熔/流体)、蒸汽以及硅酸盐成分极少的水溶液, 常处于超临界状态。地幔中的流体活动通常表现为如下几个方面:

(1) 地幔橄榄岩中的交代现象: 是大陆岩石圈地幔的普遍现象, 表现为显交代作用与隐交代作用。前者按其强度由弱到强依次划分为石榴石橄榄岩(GP)、石榴石金云母橄榄岩(GPP)、金云母橄榄岩(PP)和金云母钾碱镁闪石橄榄岩(PKP)系列^[18]; 后者则更多地表现为不相容微量元素的富集作用^[19]。目前的研究表明, 地幔交代作用的流体介质通常有碳酸岩熔体^[21]、与俯冲作用有关的 H_2O-CO_2 流体^[22] 和富含挥发份的硅酸盐熔体^[23] 等。

(2) 地幔伟晶岩与地幔熔/流体活动: 地幔伟晶岩属软流层(体)发生部分熔融作用所形成的熔体, 因数量少或因通道条件不畅未能上侵到或喷出地表, 而在岩石圈地幔中结晶, 构成“夭折的岩浆”。它们在上地幔高压条件下缓慢冷却结晶并产生小范围的分异, 往往晶体粗大, 在产状上常以脉状或透镜状出现。古老岩石圈地幔中含流体包裹体的石榴石辉石岩^[24]、部分金云母岩以及复合包体中的脉状岩石(主要为辉石岩)可能属地幔中熔/流体活动的产物。

(3) “无水”地幔矿物中的不纯净组分与地幔流体: 地幔矿物如橄榄石、辉石、石榴石中的不纯净组分除以固体包裹体、流体包裹体形式存在外, 还可以充填晶格缺陷等多种形式存在。红外吸收光谱已经揭示出 H_2O 或 OH 在普通认为“无水”的石榴石^[25] 和单斜辉石^[26] 中存在。

(4) 地幔岩中的自然元素和元素互化物与地幔流体: 金伯利岩人工重砂中曾发现种类繁多的以沂蒙矿、钛钼铬石、钛钾铬石和富铬黑镁钛镁矿等稀少

矿物^[27] 为代表的含大阳离子的复杂钛酸盐矿物^[28], 和硅-铁、硅-碳及钨-碳等元素的互化物及金、银等自然元素^[29, 30]。新生代玄武岩的地幔捕虏体也有微粒合金和高还原气体^[31]。最近在所报道的金伯利岩的石榴石橄榄岩捕虏体中发现了自然铁和自然铁-透铁橄榄石文象共生体, 被认为是含自然铁和非化学计量方铁矿的超深流体作用于古老克拉通岩石圈地幔的产物^[32]。

3 金刚石的形成与地幔流体活动

由于金刚石特殊的形成条件、独特的机械强度、化学成分和稳定性, 其生长阶段所捕虏的固态的、流体的或充填晶格缺陷的不纯净组分, 直接或间接地指示着其形成过程中的地幔流体活动。

(1) 金刚石中的流体包裹体: Navon 和 Hutchison (1988)^[33] 最早报道了皮壳状金刚石的皮壳中有显微流体包裹体的存在, 发现它们的成分富含 $H_2O-CO_2-SiO_2-K_2O$, 该成分被认为是金刚石形成晚期阶段的残物, 代表着金伯利岩浆形成时或形成后的地幔残余流体。继在山东金刚石中发现石盐、钾盐及高钾高氯包裹体^[34, 35] 之后, 郑建平等 (1994)^[36] 又在辽宁复县八面体金刚石中发现了富 H_2O-CO_2 的流体包裹体, 并且发现这些流体包裹体经历了复杂的自催化反应作用^[37]。

(2) 晶格及晶格缺陷中的流体组分: 氮是金刚石主要的杂质组分, 它在金刚石中以单个氮(N)、A 中心、B 中心及 N_3 小晶片等形式出现。陈丰等 (1994)^[38] 和薛里辉等 (1994)^[39] 对辽宁金刚石进行了拉曼光谱扫描, 发现反映高压分子氢和结构水的谱峰。对具云雾状包裹体的金刚石进行熔融实验表明 H_2, N_2, CH_4, CO_2, CO 等^[40] 和其他不相容微量元素^[41] 是金刚石中流体的主要成分; 同时也发现无色八面体的金刚石含 H_2 最高, 立方体金刚石含 H_2 最低, 但含 H_2O 最高^[42]。激光红外也已揭示我国原生金刚石的中心含氢量总体高于边部^[43], 但也有无一定规律性的现象^[44], 反映不同金刚石或不同生成条件下的流体组分差异。金刚石本身就代表着富碳的流体组分, 因而说明 C, H, O, N 及其他不相容微量元素所代表的流体在金刚石中形成过程中的地位。

(3) 金刚石中超深流体组分: 金刚石中也有自然银和含银铁-金合金等自然元素和元素互化物包裹

体^[42]。Haggerty 等(1994)^[45]最早确认了金伯利岩及金刚石中诸如方铁矿等超深流体组分的存在。Harris 等(1997)^[47]和 McCammon(1997)^[48]对金刚石中反映下地幔特征的四方铝镁铝榴石相(TAAP)和方铁矿包体进行了穆斯堡尔研究,发现它们的 $x(\text{Fe}^{2+})/x(\text{Fe}^{2+}+\text{Fe}^{3+})$ 值分别高达 64.83%~77.81%和 50%。这些包体矿物的发现,促使人们把超金伯利岩省的起源与来自地幔不连续面(特别是核幔边界 D''层)的超地幔柱联系起来。

4 金刚石的复杂生长环带与地块内部增生作用

金刚石中杂质氮最初是以单个原子形式存在的^[49],然后在上地幔的高温高压条件下经历一定的地质历史时期,由于氮的扩散可以形成氮的各种聚集体形式,因此可通过动力学方程把氮的聚集过程、状态与金刚石在地幔中的平衡温度和存留年龄等信息联系起来。金刚石中的杂质氮由单个原子形式聚集成两个氮原子组成的 A 中心,进而又聚集成由 4 个氮原子和一个空隙聚集在一起的 B 中心和具 3 个氮原子和 1 个空隙组成的 N_3 中心,满足二级方程^[50]: $dc^2/dt = -kc^2$, 即 $kt = 1/C - 1/C_0$, 其中 $K = A \cdot e^{-E/RT}$, 式中 t 是地幔存留热作用时间, C_0 为原始单个氮浓度, C 为温度 T 条件下热作用时间 t (Ma) 后的单个氮浓度, A 为常数(取值 $8.875 \cdot 10^{-5}$), E 为活化能(6.83eV), R 为速率常数($1.249 \cdot 10^{23}$), T 为温度(K)。金刚石中的 A 中心和 B 中心引起红外光谱 $7 \sim 10 \mu\text{m}$ 之间具特征的吸收,其浓度 N_A 和 N_B 可以从红外底面吸收谱中求得^[51] $N_A = \alpha \cdot r/30(1+r)$, $N_B = 1/(1+r)$, $r = (2.72m - 1)/(1 - 0.41m)$, m 为 $7.8 \mu\text{m}$ 处的吸收与 $8.5 \mu\text{m}$ 处的吸收比, α 为 $7.8 \mu\text{m}$ 处的总吸收量;分散氮的丰度(C)是通过测量 $8.85 \mu\text{m}$ (1130 cm^{-1}) 处的吸收系数($\mu_{1,0}$)来确定。Zheng 等(1994)^[52]曾计算了 3 颗 $-2 \sim +1 \text{ mm}$ 级和 1 颗 $+2 \text{ mm}$ 级金刚石的年龄: $-2 \sim +1 \text{ mm}$ 级金刚石的计算年龄为 $1.1 \sim 1.2 \text{ Ga}$, 而 $+2 \text{ mm}$ 级金刚石为 2.2 Ga 。这两组年龄都比金伯利岩的侵位年龄老,支持金刚石主要是捕虏晶和多期生长的特征。其中低年龄者,即细粒金刚石的形成年龄,与金伯利岩的全岩 Rb-Sr 等时年龄(1.1 Ga , 赵磊未刊资料)相当,代表着地幔深部作用过程中的就近一次重要富集事件;而高年龄

者,即粗粒金刚石的形成,与高的橄榄岩 Nd 模式年龄相当,反映更为古老地幔的富集事件发生的信息。这些表明不同粒级的金刚石在地幔中的存留时间有差别,更重要的是,这些数据结果反映古老岩石圈地幔中存在多阶段发生的地幔富集事件。

随着现代技术的进步,高精度的阴极发光(CL)和傅立叶变换红外光谱(FTIR)技术在研究单颗粒金刚石内部结构、生长过程、温压条件和成因解释方面都取得进展^[53-54]。最近陈美华等(2000)^[55]对我国辽宁复县的金刚石进行了 CL 分析,发现同一颗 $-2 \sim +1 \text{ mm}$ 级金刚石中有多期生长的复杂环带(图 2)。金刚石生长过程的熔蚀、刻蚀现象,与脉动

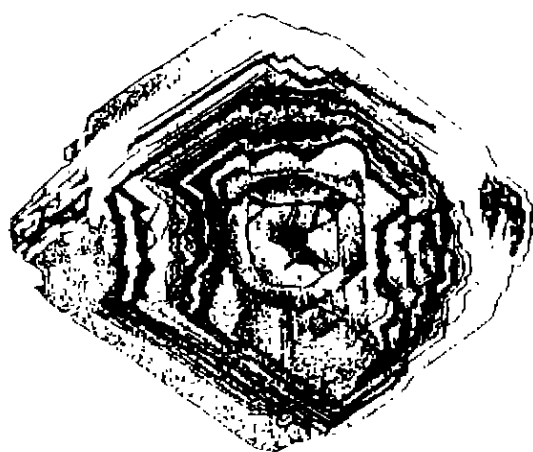


图 2 多期生长复杂环带金刚石 CL 式样^[55]

Fig. 2 CL diagram showing the complex zonation with the multistage cl diamond growth

式结晶环境有关的密集圈层结构以及似玛瑙状结构均说明了熔/流体的参与作用。结合微区 FTIR 分析计算的年龄结果表明:中心($1.1 \sim 1.2 \text{ Ga}$)与边缘(0.52 Ga)的结晶时间相差 0.65 Ga ,这一结果与发现于澳大利亚西部 Argyle 的少数金刚石边缘与中心的结晶时间相差 1.2 Ga ^[56]有些相似。更有意义的是,金刚石中心的年龄与低的橄榄岩 Nd 模式年龄相当;边部年龄与金伯利岩的侵位年龄相当。看来金伯利岩中的金刚石中仍保留有早期不同历史时期的痕迹,因此在金刚石内部精细结构研究基础上的微区 FTIR 研究,可以很好地反演克拉通地幔的深部过程。在“稳定的”克拉通区域内,古老地幔孕育着多次熔融岩浆作用,熔融岩浆不能顺利地侵位于地壳或喷出地表,在岩石圈剖面的不同深度部位形成岩浆脉体,发现多种辉石岩和金云母岩等深源捕虏体。此外,地幔橄榄岩中石榴石的多层圈交

代结构,地幔中发育不同阶段不同层次的地幔流体以及地幔捕虏体中两种变质作用程度截然不同的基性岩(基性麻粒岩和辉长岩)的存在,无疑指示着多发地幔事件、流体活动事件和金刚石形成的内在联系。尽管目前还不能完全证实金刚石的形成与克拉通地块内部增生过程是否同步,但包含于辽宁金刚石中的交代类型单斜辉石所指示的碳酸岩熔体^[57]与亏损橄榄岩的相互作用,无疑进一步揭示着岩石圈中地幔熔/流体与金刚石形成的联系。多种年龄数据所给出的 1.1~1.2 Ga 结果,如果它们不是多重地幔事件的混合结果,则可能反映华北地块东部的岩石圈深部存在一次明显的地幔增生改造过程。

参考文献:

- [1] NORMAN M D. Melting and metasomatism in the continental lithosphere: laser ablation ICP-MS analysis of minerals[J]. *Contrib Petro Mineral*, 1998, 130: 240-255.
- [2] 路凤香,郑建平,陈美华. 有关金刚石形成条件的讨论[J]. *地学前缘*, 1998, 5(3): 125-132.
- [3] MENZIES M A, XU Y G. Geodynamics of the North China Craton[A]. FLOWER M E J, CHUNG S L, LOU C H, et al. *Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia* [C]. *Amer Geophysical Union Geodynamics Series*, 27, 1998. 155-165.
- [4] 郑永飞. 化学地球动力学: 从同位素到板块构造[A]. 郑永飞. *化学地球动力学* [M]. 北京: 科学出版社, 1999. 1-12.
- [5] GRIFFIN W L, O'REILLY S Y. Harzburgite to lherzolite and back again: metasomatic processes in ultramafic xenoliths from the Wesselton kimberlite, Kimberley, South Africa[J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1999, 134: 232-250.
- [6] SMITH D. Water-rock interactions, orthopyroxene growth, and Sr-enrichment in the mantle: evidence in xenoliths from the Colorado Plateau, Southwestern United States[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1999, 165: 45-54.
- [7] PEARSON D G. The age of continental roots[J]. *Lithos*, 1999, 48: 171-194.
- [8] JACOB D E, FOLEY S F. Evidence for Archean ocean crust with low high-field strength element signature from diatrematiferous eclogite xenoliths[J]. *Litho*, 1999, 48: 317-336.
- [9] WANG W. Formation of diamond with mineral inclusions of "mixed" eclogite and peridotite paragenesis[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1998, 160: 831-843.
- [10] CHEN Y D, O'REILLY S Y, GRIFFIN W L. Dating lower crust and upper mantle events: an ion microprobe study of xenoliths from kimberlitic pipes, South Australia[J]. *Lithos*, 1994, 32: 77-94.
- [11] KINNY P D, MEYER H O A. Zircon from the mantle: a new way to date old diamonds[J]. *Journal of Geology*, 1994, 102: 475-481.
- [12] MOSER D E, HEAMAN L M. Proterozoic zircon growth in Archean lower crustal xenoliths, Southern Superior craton: a consequence of Matachewan ocean opening[J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1997, 128: 164-175.
- [13] SCHER F E. Lu-Hf geochronology applied to dating Cenozoic events affecting lower crustal xenoliths from Kilbourne Hole, New Mexico[J]. *Chemical Geology*, 1997, 142: 63-78.
- [14] KONZETT J. The timing of MARID metasomatism in the Kaapvaal mantle: an ion probe study of zircons from MARID xenoliths[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1998, 160: 133-145.
- [15] PEARSON D G. Evolution of cratonic lithospheric mantle: an isotopic perspective[A]. FIEI Y, BERKA C M, MYSEN B O. *Mantle Petrology: Field Observations and High-Pressure Experimentation* [C]. The Geochemical Society, Special Publication, 1999, 6: 57-78.
- [16] 郑建平, 路凤香. 胶辽半岛金伯利岩中地幔捕虏体岩石学特征: 古生代岩石圈地幔及其不均一性[J]. *岩石学报*, 1999, 15: 65-76.
- [17] 郑建平. 中国东部地幔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. 125.
- [18] MENZIES M A, BODINIER J L. Growth of the European lithospheric mantle dependence of upper mantle peridotite facies and chemical heterogeneity on tectonics and age[J]. *Physics of Earth and Planetary Interiors*, 1993, 79: 219-240.
- [19] BAILEY D Y. Mantle metasomatism continuing chemical change within the Earth[J]. *Nature*, 1982, 296(13): 525-530.
- [20] BLUSZTAJN J, SHIMIZU N. Trace-element variations in clinopyroxenes from spinel peridotite xenoliths from Southwest Poland[J]. *Chemical Geology*, 1994, 111: 227-243.
- [21] YAXLEY G M, GREEN D H, KAMENETSKY V. Carbonatite metasomatism in the southeastern Australian lithosphere [J]. *J Petrol*, 1998, 39: 1917-1930.
- [22] STALDER R, FOLEY S F, BREY G P, et al. Mineral-aqueous fluid partitioning of trace elements at 900~1200°C and 3.0~5.7 GPa: new experimental implications for mantle metasomatism[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1998, 62: 1781-1801.
- [23] ZANGANA N A, DOWNES H, THIRLWALL M F, et al. Geochemical variation in peridotite xenoliths and their constituent clinopyroxenes from Ray Pic (French Massif Central): implications for the composition of the shallow lithospheric mantle[J]. *Chem Geol*, 1999, 153: 11-35.
- [24] 郑建平, 路凤香, 成中梅. 辽宁金伯利岩中含流体石榴石辉石岩的成因研究[J]. *地球科学*, 1998(1): 49-54.
- [25] 夏群科, 陈道公, GEORGE R, 等. 高压-超高压变质流体的

- 种重要载体;名义上的无水矿物[J].地质论评,2000,16(5): 461-465.
- [26] MATSYUK S S, LANGER K, HOSCH A. Hydroxyl defects in garnets from mantle xenoliths in kimberlites of the Siberian platform[J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1998, 132:163-179.
- [27] 赵磊. 华北地台金伯利岩矿物学[A]. 池际尚, 路凤香. 华北地台金伯利岩及古生代岩石圈地幔特征[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [28] 陆琦, 周湖云, 雷新荣. 金伯利岩及钾镁煌斑岩中含太阳离子复杂钛酸盐矿物晶体结构[J]. 地质科技情报, 1994, 13(1): 37-44.
- [29] 张建洪. 在我国发现的自然碳化钨[J]. 矿物学报, 1986, 6(1): 344-349.
- [30] 张宏福. 在金伯利岩中首次发现二硅铁矿与自然硅[J]. 地质科技情报, 1989, 4: 10-42.
- [31] 杜乐天, 戎嘉树, 陈安福. 地幔岩中微粒合金和还原气体[J]. 科学通报, 1995, 19: 1788-1790.
- [32] 郑建平, 路凤香, 郑曙. 地幔中自然铁-偏离正常矿物化学成分的矿物共生体与深源流-岩作用[J]. 地质科技情报, 2000, 19(2): 27-30.
- [33] NAVON O, HUTCHEON I D. Mantle-derived fluid in diamond micro-inclusions[J]. *Nature*, 1988, 335: 784-789.
- [34] 陈丰, 郭九皋, 陈积昌, 等. 金刚石中首次发现高钾高氯包体[J]. 科学通报, 1992, 37(10): 921-923.
- [35] 陈丰, 王智, 王明再, 等. 金刚石中首次发现高铜高氯包体[J]. 科学通报, 1992, 37(9): 1782-1784.
- [36] 郑建平, 路凤香, 郭晖, 等. 金刚石中流体包裹体研究[J]. 科学通报, 1991, 39(3): 253-256.
- [37] 郑建平, 路凤香, 成中梅, 等. 金刚石中的下纯净组分与地幔流体[J]. 地质科技情报, 1995(2): 52-56.
- [38] 陈丰, 薛里辉, 丁振华, 等. 金刚石中的分子氢[J]. 科学通报, 1994, 39(15): 1403-1404.
- [39] 薛里辉, 邓尔森, 陈丰, 等. 金刚石中发现结构水[J]. 科学通报, 1994, 39(18): 1691-1692.
- [40] GUBELIN E, KOIVUJA J I. Proto atlas of inclusions in gemstones[J]. *Zurich ABC Edition*, 1985, 11-17.
- [41] SCHRANDER M. Trace element analyses of fluid bearing fibrous diamond from Botswana by neutron activation analysis[J]. *Mineralogical Magazine*, 1994, 58A: 811-812.
- [42] IVAMKIN V. 廖群安译. 金伯利岩的发展阶段和金刚石形成的演化条件[J]. 地质科技情报, 1988, 4: 15-20.
- [43] 陈美华, 路凤香, 郑建平. 辽宁复县金刚石阴极发光特征及意义[J]. 地球科学, 1999, 24(2): 179-182.
- [44] 杨明星, 潘兆儒, 郭孝明. 湖南金刚石的红外光谱研究[J]. 宝石与宝石学杂志, 2000, 2(4): 29-32.
- [45] 赵磊, 路凤香, 郑建平, 等. 金刚石中首次发现自然银和含银铁-金合金包裹体[J]. 科学通报, 1995, 19(12): 1114-1115.
- [46] HAGGERTY S E. Superkimberlites: a geodynamic diamond window to the Earth's core[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1994, 122: 57-70.
- [47] HARRIS J, HUTCHISON M J. A new tetragonal silicate mineral occurring as inclusions in lower-mantle diamonds[J]. *Nature*, 1997, 387: 486-488.
- [48] McCAMMON C A. Perovskite as a possible sink for ferric iron in the lower mantle[J]. *Nature*, 1997, 387: 694-696.
- [49] EVANS T, QI Z. The kinetics of aggregation of nitrogen atoms in diamond[J]. *Proc Roy Soc Lond*, 1982, A381: 159-178.
- [50] EVANS T. Nitrogen aggregation, inclusion equilibration temperatures and the age of diamonds[J]. *4th International Kimberlite Conference Extended Abstracts Geological Society of Australia, Abstracts Series*, 1986 (16): 386-388.
- [51] CLARK C D, DAVEY S T. One-phonon infrared absorption in diamond[J]. *J Phys*, 1984, C17: 1127-1140.
- [52] ZHENG J P, LU F X, GOU H. Study of fluid inclusions in diamonds[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1994, 39(8): 670-675.
- [53] MENDELSSOHN M J, MILLEDGE H J. Geologically significant information from routine analysis of the mid-infrared spectra of diamonds[J]. *International Geology Review*, 1997, 37: 95-110.
- [54] TAYLOR W R, MILLEDGE H J, GRIFFIN B J. Characteristics of microdiamond from ultramafic massifs in Tibet: authentic ophiolitic diamonds or contamination[A]? *Amor Sixth IKC Extended Abstract* [C]. Novosibirsk: Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 1995, 623-624.
- [55] 陈美华, 路凤香, 狄敬如, 等. 辽宁瓦房店金刚石的阴极发光和红外光谱分析[J]. 科学通报, 2000, 45(13): 1424-1428.
- [56] HEERDEN L A, BOYD S R, MILLINGER C T, et al. The fractionation of nitrogen and carbon stable isotope ratios in Western Australian diamonds[A]. *Amor Sixth IKC Extended Abstract* [C]. Novosibirsk: Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 1995, 228-230.
- [57] WANG W Y, GASPARIK T. Metasomatic clinopyroxene inclusions in diamonds from the Liaoning province, China[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2001, 65: 611-620.

DIAMOND WITH MULTISTAGE GROWTH AND ITS SIGNIFICANCE FOR MANTLE FLUID WITHIN ACCRETED CRATON

ZHENG Jian-ping¹, YU Chun-mei², LU Feng-xiang¹, CHEN Mei-hua¹

- (1. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;
2. College of Graduate Student, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;
3. Gemmological Institute, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: Diamonds derived from kimberlites within craton and from lamproites within cycle-craton are generally xenocrystals with complex growth history. Based on the consideration of multistage crust-mantle interaction events and multicycle mantle fluid activity within continental lithosphere, and the combination with the discontinuous growth reflected by inter-structure of diamond and the FTIR research results in situ, a conclusion can be drawn that the diamonds with complex growth were the production of the carbonatic melts or the incompatible elements-rich CHON fluid interaction with the pre-existed diamonds in lithospheric mantle during cratonic accretion. The results of 1.1~1.2 Ga derived from different methods probably show that a strong accretion and modification took place beneath the lithosphere mantle in the eastern part of the North China Block.

Key words: diamond geology; multistage growth zone; accreted craton; mantle fluid

本刊编辑部声明:

为适应我国信息化建设需要,扩大作者学术交流渠道,本刊已加入《中国学术期刊(光盘版)》和“中国期刊网”、“万方数据——数字化期刊群”,并提供网络信息服务。作者著作权使用费与本刊稿酬一次性给付。如作者不同意将文章编入,请在来稿时声明,本刊将作适当处理。