# 华北克拉通南缘碱性基性岩金刚石成因探讨 ——来自红外光谱的证据

蔡逸涛<sup>1,2)</sup>,张洁<sup>1)</sup>,施建斌<sup>3)</sup>,周琦忠<sup>3)</sup>,马玉广<sup>4)</sup>,刘吉强<sup>5)</sup>,徐敏成<sup>1)</sup>,

万方来<sup>6)</sup>,徐华<sup>6)</sup>,肖丙建<sup>7)</sup>,吴祥珂<sup>8)</sup>,袁秋云<sup>9)</sup>

1) 中国地质调查局南京地质调查中心,南京,210016;

2) 加拿大阿尔伯塔大学地球科学与大气环境系,埃德蒙顿,T6H5J1;

3) 江苏省地质矿产局第五地质大队,江苏徐州,221004;

4) 安徽省地勘局第二水文地质工程勘察院,安徽芜湖,241000;

5) 自然资源部第二海洋研究所,自然资源部海底科学重点实验室,杭州,310012;

6) 辽宁省第六地质大队,辽宁大连,116200;7) 山东省第七地质矿产勘查院,山东临沂,276006;8) 广西壮族自治区地质调查院,南宁,530023;9) 南京宏创地质勘查技术服务有限公司,南京,210093

内容提要:我国最主要的金刚石产地均位于华北克拉通。目前在华北克拉通苏皖北部的碱性基性岩中发现大量的微粒金刚石,经确认这是一种不同于母岩为金伯利岩和钾镁煌斑岩的新类型金刚石。本文利用傅里叶可变红外光谱对这些金刚石进行测试和分析。研究结果表明,大多数金刚石中包含单原子氮(C心),少部分包含双原子氮(A心)和聚集氮(B心),其中Y心(1145~1150cm<sup>-1</sup>)与C心伴生,指示了这些金刚石大多为天然的Ib型、Ib/IaA型和IaAB型,其中以Ib型为主。N元素是金刚石中最常见的与晶格缺陷有关的杂质。该地区出土的金刚石N的含量普遍不高,通过对其中IaAB型金刚石的计算,认为该区IaAB型金刚石在地幔中赋存时间为550Ma左右,温度在1225℃左右,相当于地下150km深度。而大量Ib型金刚石的出现,说明在金刚石的初生阶段就被带出稳定区域。导致了N元素没有发生向A心的转化。

关键词:红外光谱;Ib型金刚石;碱性基性岩;华北克拉通;苏北;皖北

我国华北克拉通分布着多个金刚石产区(Lu Fengxiang et al.,1998; Chen Hua et al.,2013)。其 中最重要的两个矿集地为辽宁瓦房店和山东蒙阴 (Zhang Peiyuan,1998)。他们分布在郯庐断裂的两 侧,东侧为辽宁瓦房店金刚石矿集区,西侧为山东蒙 阴金刚石矿集区。然而在郯庐断裂带的西侧,华北 克拉通南缘的苏皖北部地区(图1),也一直不断地 有金刚石以及找矿指示矿物的发现,苏北新沂地区 还开采过品位非常高的砂矿(Shi Jianbin et al., 2010)。因此,近十年来该地区也受到了国内金刚石 找矿勘察和研究队伍的重视。 2012~2015年中国地质调查局南京地质调查 中心、安徽省第二水文地质工程勘察院查明栏杆地 区含原生金刚石的载体岩石主要有辉绿岩、橄榄玄 武岩等(Cai Yitao et al.,2014,2018;Zhang Jie et al.,2015)。该类型金刚石不同于金伯利岩型、钾镁 煌斑岩型和蛇绿岩型(Bai Wenji et al.,2001;Yang Jingsui et al.,2002,2007,2014;Xu Xiangzhen et al.,2018),为我国首次发现。2017~2018年,安徽 第二水文地质工程勘察院对皖北栏杆老寨山地区进 行金刚石普查,在辉绿岩基岩及强风化带中圈定2 个强风化残积型金刚石工业矿体。这是在金刚石找

注:本文为江苏省自然科学基金项目(编号 BK20191132)、国家自然科学基金青年基金项目(编号 41402075)和国家留学基金委(编号 201908575036)联合资助的成果。

收稿日期:2020-04-22;改回日期:2020-06-25;网络发表日期:2020-06-29;责任编辑:周健。

作者简介:蔡逸涛,男,1982年生。博士,高级工程师,矿床学专业,主要从事金刚石找矿及研究工作。Email:cyitao@cgs.cn。

引用本文:蔡逸涛,张洁,施建斌,周琦忠,马玉广,刘吉强,徐敏成,万方来,徐华,肖丙建,吴祥珂,袁秋云. 2020. 华北克拉通南缘碱性基性岩金刚石成因探讨. 地质学报,94(9):2736~2747, doi: 10.19762/j. cnki. dizhixuebao. 2020241.
 Cai Yitao, Zhang Jie, Shi Jianbin, Zhou Qizhong, Ma Yuguang, Liu Jiqiang, Qu Mingchen, Wan Fanglai, Xu Hua, Xiao Binjian, Wu Xiangke, Yuan Qiuyun. 2020. A discussion on the origin of basite type diamonds in the southern part of North China Craton: evidences from FTIR. Acta Geologica Sinica, 94(9): 2736~2747.

矿上的一次较大的突破,同时填补了安徽省矿产资源储量表中金刚石矿的空白。近期,江苏省地矿局 第五地质大队、南京地质调查中心在苏北徐州白露 山地区开展金刚石原生矿找矿工作中,又分别在橄 榄玄武岩等碱性基性岩中发现了4粒原生金刚石 (Cai Yitao et al.,2019)。苏皖北部地区发现的大 量金刚石都出现了与其他地方不同的特征。结合前 人研究,本文就该地区发现的金刚石进行红外光谱 的分析,提出了该地区新类型金刚石的特征。

## 1 地质背景

郯庐断裂带(包括其北延部分)是东亚大陆上的 一系列北北东向巨型断裂系统中的一条主干断裂 带,在中国境内延伸2400多千米,切穿中国东部不 同大地构造单元。郯庐断裂带沿线发育早前寒武纪 结晶基底,其中,华北克拉通基底是由大小不等的太 古宙深变质岩构成,辽宁地区结晶基底为太古宙鞍 山群和古元古代辽河群等;苏皖北部、鲁西地区出露 太古宙沂水岩群(Sm-Nd同位素模式年龄为2744~ 3020 Ma)、泰山岩群(锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 2700~2800 Ma)、济宁岩群(锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为2561~2700 Ma)(Zhang Yueqiao and Dong Shuwen,2008)。

目前大多数学者认为从断裂构造等级控矿作用 看,郑庐断裂带是金伯利岩的主要导矿构造,它控制 了金刚石成矿带的区域展布。隐伏的基底断裂控制 了矿带展布,岩石圈断裂与一些基底深大断裂带交 汇部位,控制金刚石矿田展布。矿田内盖层中的密 集节理带、角砾岩带或者几组断裂交汇部位,控制了 金伯利岩管或岩脉的产出。本区北北西向的深大断 裂与郑庐断裂带相交,而一些北北东向、北东向的密 集节理带、角砾岩带或断裂带十分发育,提供了岩管 或岩脉的就位场所。

本区岩浆活动期主要有三个阶段:元古宙变粒 岩、角闪岩类以及辉绿岩为主;中生代(燕山期)中酸 性侵入及喷出岩类为主;新生代(喜马拉雅期):橄榄 玄武玢岩和辉绿玢岩为主(Cai Yitao et al.,2019)。 与金刚石成矿有关的基性-超基性岩遍布全区。空 间上,郯庐断裂以东主要为方辉橄榄岩、方辉辉橄 岩、纯橄岩、二辉橄榄岩等超基性岩及碱性玄武岩, 断裂带以西的徐州一邳县地区主要是橄榄玄武岩、 辉绿岩及少量苦橄玢岩。时间上,自元古宙就有基 性、超基性岩浆的侵入和喷出。国内外已知金伯利 岩区都有基性、超基性岩的广泛分布,本区这类岩浆 岩的发育,预示着寻找金刚石原生矿具有良好的远景(Shu Liangshu et al.,1994; Pan Guoqiang et al., 2000; Wang Luchao et al., 2011)。

安徽北部的玻基辉橄角砾熔岩、辉绿岩、橄榄玄 武岩等暗色岩中选获大量金刚石,使得徐州中部存 在大量的辉绿岩、橄榄玄武岩,具有了重新认识的意 义。尤其是苏北的张集地区,其构造位置和成矿条 件,与栏杆地区极其相似。还有苏北利国一柳泉等 地发现的苦橄玢岩、煌斑岩等超基性岩,其岩石结构 构造、矿物组合、化学成分、微量及稀土元素等特征, 与金伯利岩和钾镁煌斑岩比较,都有一定的亲缘性 (Shi Jianbin et al.,2010)。

该区域沉积了新元古界至古生界(缺上奥陶统 至下石炭统)的盖层,与基底不整合接触。新元古界 青白口系土门群属于相对稳定的泻湖相-海相碎屑 岩、碳酸盐岩沉积组合,区域上不整合于泰山岩群之 上。之上继承沉积了震旦系,沉积建造自下而上为 碎屑岩一碳酸盐岩一碎屑岩,属一套陆表海(或浅海 陆架)沉积环境。古生界寒武系一中奥陶统主要为碳 酸盐岩夹碎屑岩沉积,发育较齐全,主要分布于复式 背向斜的核部或翼部,构成本地区的主要山体;区域 上缺失上奥陶统一志留系一泥盆系一下石炭统(Shu Liangshu et al.,1994;Pan Guoqiang et al.,2000)。

这些地区沉积盖层发育,岩浆岩活动频繁,满足 金刚石成矿的三大条件(古老的克拉通、深大断裂、 稳定的盖层)(Zheng Jianping et al.,2013;Zheng Jianping and Zhou Xinhua,2013)。为超基性-基性 岩浆储聚和侵爆创造了良好的封闭环境,对金刚石 成矿十分有利。自开展金刚石普查工作以来,本区 内共发现 500 多颗金刚石(除新沂金刚石砂矿之外) 及大量金刚石找矿指示矿物。

## 2 样品描述

徐州白露山地区的样品是来自于江苏省地矿局 第五地质大队 2017 年的选矿样,其中分选出 4 粒金 刚石(图 2a~d)。山东地质七队对同一岩体碱性基 性岩体进行了选矿样的实验,分选出一粒金刚石。

宿州栏杆地区的样品来自于安徽地勘局第二水 文工程地质勘察院进行的选矿样,选矿样一部分来 自于 2013 年实施的钻孔(ZK06)岩性中,一部分来 自于地表人工重砂大样(15LDK09RZ03)图 2e~ f),岩性为辉绿辉长岩。

进行采样和选矿试验的三个地质队前身均为金 刚石找矿专业队,已有 50 多年的金刚石找矿、分选



图 1 华北克拉通及苏皖北部基性岩体地质简图

Fig. 1 Sketch map of the northern Jiangsu & Anhui in North China Craton

(a)—华北克拉通示意图;(b)—苏北徐州白露山岩体地质简图: YPI—勘探剖面 I; YPII—勘探剖面 II;  $\sigma\beta$ —橄榄玄武岩;

F48, F4-断层;(c)-皖北栏杆老寨山地质简图

(a)—Sketch map of North China Craton; (b)—sketch map of Bailushan basite of northern Jiangsu: YPI—exploration profile I; YPII—exploration profile II; σβ—olivine basalt; F48, F4—fault; (c)—sketch map of Laozhaishan basite of northern Anhui

经验。为了保证在研究过程中全程无人造金刚石的 混入,在各个环节均采取了必要措施。如:钻孔所用 的钻头为合金钻头,而非金刚石钻头;样品处理过程 中均不采用含人造金刚石的砂轮、锯片等。因此,本 文所用样品有效,可以代表该地区天然金刚石的特征。所有样品进行分选出来之后,进行光谱测试之前,均使用丙酮浸泡、酒精冲洗。目的是为了去除表面可能沾有的有机物质。

表 1 苏皖北部金刚石样品特征表

Table 1	Characteristic	of the	e tested	diamonds	from	northern	Jiangsu	&	Anhui
---------	----------------	--------	----------	----------	------	----------	---------	---	-------

样品号	出土点	颜色	晶型	表面特征
BLS-1	白露山	黄色	立方体、八面体聚形	表面见有溶蚀凹坑,无解理,内部有少量黑色包体
BLS-2	白露山	微黄	菱形十二面体聚形	表面生长阶梯,溶蚀现象,无解理,内部干净无包体
BLS-3	白露山	无色带褐色调	碎片	表面见溶蚀横纹,未见三角溶蚀现象,见阶梯状解理现象,内部无 10X 下可见包体
zj-1	张集	黄色	立方体、八面体聚形	表面见溶蚀现象,无生长丘和三角蚀像,无解理,内部有少量黑色包体
zj-2	张集	黄色	立方体、八面体聚形	表面平滑,无解理,内部有少量黑色包体
LGLZS-1	栏杆地区	黄色	立方体、八面体聚形	
LGLZS-2	栏杆地区	黄色	立方体、八面体聚形	金刚光泽,表面轻微溶蚀凹坑,无解理。部分样品表面可见破损,10X放大可见
LGLZS-3	栏杆地区	黄色	立方体、八面体聚形	黑色包体。无磁性
LGLZS-4	栏杆地区	黄色	立方体、八面体聚形	
LGLZS-5	栏杆地区	黄色	立方体、八面体聚形	

苏北地区出土的金刚石中,样品 BLS-2 和 BLS-3 具有相似的表面特征(表 1)。这两粒金刚石晶粒 大小在 1.2~1.5mm。其中 BLS-2 颜色为微黄色, BLS-3 无色,带中等褐色调。样品均为金刚光泽,表 面无皮壳。BLS-2 为菱形十二面体,BLS-3 为卵圆 形碎块。表面可见明显解理,并且在晶体一面出现 宽窄疏密不等的沟槽状复合表面。另一面可见细小 密集鳞片状丘,晶面溶蚀现象较强。BLS-1 和 ZJ-1、 ZJ-2 颜色为黄色。晶型为八面体和立方体聚形,表 面有溶蚀现象,但无阶梯状解理或者生长丘。皖北 地区金刚石样品多呈黄色,个别无色到浅黄色。晶 型为立方体与曲面菱形十二面体聚形、立方体与八 面体聚形、八面体与菱形十二面体聚形、歪晶、碎片 等。金刚石晶体透明,金刚光泽,粒径 0.20~ 0.60 mm。

# 3 分析结果

#### 3.1 金刚石拉曼特征

拉曼光谱(Raman)在金刚石鉴定时具重要作用。纯净的金刚石拉曼光谱图具明显的 1332cm<sup>-1</sup> 附近拉曼特征峰。当金刚石晶格内部发生畸变或有 杂质进入时,就会产生内部振动模式。若晶格缺陷



#### 图 2 苏皖北部出土的金刚石照片

Fig. 2 Pictures of diamonds from northern Jiangsu & Anhui

(a)—BLS-2样品,菱形十二面体聚形,微黄色;(b)—BLS-3样品,碎片,无色;(c)—zj-1样品,立方体和八面体聚形,黄色;

(d)-zj-2 样品,立方体和八面体聚形,黄色;(e,f)-栏杆地区金刚石样品,立方体和八面体聚形,黄色

(a)—Sample BLS-2, dodecahedra, light yellow; (b)—sample BLS-3, fragment, colorless; (c)—sample zj-1, cubo-octahedra, yellow;
 (d)—sample zj-2, cubo-octahedra, yellow; (e, f)—diamond samples from Langan area, cubo-octahedra, yellow

未影响金刚石的主体结构特征,其1332cm<sup>-1</sup>附近的 拉曼峰位基本不变。激光拉曼分析(激光波长 637nm,能量 0.5%)显示,测试样品均在1331~ 1332cm<sup>-1</sup>附近显示尖锐的C峰(图 3),为典型的金 刚石位移峰。

#### 3.2 傅里叶可变红外光谱特征

在自然资源部第二海洋研究所所用测试仪器为 德国 Bruker 公司生产的配有 HYPERION1000 型 光学显微的 Vertex80 真空型红外光谱仪。分束器 KBr片,检测器为设置为 LN-MCT。仪器配有可水 平移动的自动控制台进行二维成像扫描。光谱基线 校正和峰位标识可以通过 OPUS 软件进行自动处 理。在加拿大阿尔伯塔大学大气环境与地球科学系 德比尔斯钻石研究实验室所用测试仪器为 Thermo Fisher Nicolet Nexus 470 傅里叶可变红外光谱仪。 测试条件均为室温,扫描范围在 4000~650 之间,扫



图 3 苏皖北部出土金刚石拉曼光谱图

Fig. 3 Raman spectrums of diamonds from northern Jiangsu & Anhui

描次数为 200 次,分辨率 1cm<sup>-1</sup>,扫描束斑大小为 100μm×100μm。在海洋二所进行测试时,微粒金 刚石置于纯 KBr 压片之上进行透射扫描,以空气中 扫描 KBr 压片作为本底,并在金刚石测试中进行扣 除。在阿尔伯塔大学测试时,使用胶带固定金刚石 于薄片边部,在空气中进行本底扫描并扣除(Lai et al.,2020a)。

通过测试得到的红外光谱数据,利用 Omnic 软件进行谱峰分析和拟合。使用 Origin 8.0 软件进行 图谱绘制。使用 DiaMap 软件(DiaMap\_CABX 17\_ 11\_07 版本)进行图谱分析、N 含量计算(Howell et al., 2012a, 2017)。其中 C 心氮浓度计算使用 1344cm<sup>-1</sup>处波峰,影响因子 37 进行计算(Liggins, 2010;Lai et al., 2020b)。

利用 FTIR 得到的光谱在 DiaMap 中进行标准 化和 N 浓度的计算(表 2)。发现进行本次测试的 10 粒金刚石中有 1 粒为 IaAB型,1 粒为 IaA 型,均 出土于苏北橄榄玄武岩中,一同出土的其他三粒金 刚石为 Ib 型。而在安徽栏杆地区出土的 5 例金刚 石均为 Ib 型金刚石。这些 Ib 型金刚石中,又有 3 粒金刚石存在 A 心。从氮的浓度来看最低的 N 浓 度只有 4.5×10<sup>-6</sup>,最高的有 503×10<sup>-6</sup>,中位数在

表 2 苏皖北部出土金刚石红外光谱谱峰及类型

Table 2	Type and the	e data of the Il	R spectrums	of the tested	diamonds	from	northern	Jiangsu	&	Anhui
---------	--------------	------------------	-------------	---------------	----------	------	----------	---------	---	-------

样晶号	主要光谱(cm <sup>-1</sup> )	金刚石类型	N 类型	$N_A$ (×10 <sup>-6</sup> )	$N_B$ (×10 <sup>-6</sup> )	$N_{\rm C}$ $(\times 10^{-6})$	$N_{\text{total}}$ (×10 <sup>-6</sup> )
BLS-1	1280. 5,1344. 2,1976. 7,2852. 2,2925. 5	Ia/Ib	A,C			143.0	143.0
BLS-2	1172. 5, 1288. 2, 1361. 5, 1650. 8, 1976. 7, 1851. 3, 2919. 7	IaAB	A, B', B	60.9	134.2		195.1
BLS-3	1650.8,1976.7,2850.3,2919.7	Ia	А	4.5			4.5
zj-1	1130. 1, 1344. 2, 1976. 7	Ib	С			10.7	10.7
zj-2	1128. 2,1344. 1,1650. 8,1976. 7,2850. 3,2919. 7,3290	Ib	С			76.9	76.9
LGLZS-1	1130,1284,1344.6,1645,1976.7,2848,2919.7,3201,3394	Ia/Ib	A,C			23.6	23.6
LGLZS-2	1128. 2,1272. 8,1344. 2,1976. 7,2848. 4,2921. 7	Ib	С			393.5	393.5
LGLZS-3	1128. 2,1282. 5,1344. 2,1596. 8,1976. 7,2854. 1,2919. 8	Ia/Ib	A,C			240.9	240.9
LGLZS-4	1344. 1,1645. 1,1976. 7,2848. 4,2919. 8,3191. 7,3394. 2	Ib	С			137.0	137.0
LGLZS-5	1128. 2,1272. 8,1344. 2,1600. 7,1976. 1,2848. 4,2917. 9	Ib	С			503.5	503.5

 $172.9 \times 10^{-6}$ 

4 讨论

#### 4.1 碱性基性岩中的金刚石红外光谱特征

(1) 金刚石 C-C 峰: 所有的金刚石样品都在 1970~2300 cm<sup>-1</sup>之间出现清晰的吸收峰,主要表现 在以 1976 cm<sup>-1</sup>、2027 cm<sup>-1</sup>、2158 cm<sup>-1</sup>为主的 C-C 之间振动吸收峰,其中 1976 cm<sup>-1</sup>处的吸收峰最为 明显和稳定(图 4)(Sun Yuan et al., 2012)。

(2)金刚石中 N 吸收峰:金刚石中 N 的存在类型可以帮助我们判别金刚石类型。如果金刚石中的 N 以单原子的形式出现替代 C 原子,会形成 C 心,也就是 1130 cm<sup>-1</sup>、1344 cm<sup>-1</sup>左右的单原子氮的吸收峰(Davies, 1981)。在本次样品中,苏北地区 BLS-1、ZJ-1、ZJ-2 样品中有明显的 1130 cm<sup>-1</sup> 和 1344 cm<sup>-1</sup>孤原子氮的峰(图 4)。而在安徽栏杆地区出土的金刚石均有明显的孤原子氮吸收峰。显示了它们为 Ib 型金刚石。在测试中江苏白露山出土的金刚石样品 BLS-2 和 BLS-3 显示了明显的 1282

cm<sup>-1</sup>左右的双原子氮吸收峰,说明存在 A 心。而安 徽栏杆地区出土金刚石只有样品 LGLZS-1、 LGLZS-3显示了非常不明显的双原子吸收峰,说明 栏杆地区的金刚石在地幔中氮的转化率较低,仍保 留着大部分的单原子氮。可以表明该地区的金刚石 在从 C 心向 A 心转变的过程中,由于某些原因,如 地幔温度过低,或者在地幔中存在时间较短等,导致 了氮的聚集缓慢而不明显(Davies, 1976)。BLS-2 样品中,除了 A 心,还显示了 1175 cm<sup>-1</sup>左右的 B 心,及 N<sub>49</sub>,俗称聚合氮。同时存在有 1361 cm<sup>-1</sup>左 右 B'心及N₃V,是 A 心向 B 心转变过程中的另一 个产物,俗称偏析氮。因此 BLS-2 是 IaAB 型金刚 石。样品 BLS-3 在 1175 cm<sup>-1</sup> 和 1360 cm<sup>-1</sup> 附近没 有出现明显氮的 B 心和 B'心吸收峰,因此该样品不 存在聚合氮和偏析氮,所以该样品应该为 Ia 型金 刚石。

(3)H<sub>2</sub>O分子吸收峰:在本次测试的样品中,绝 大多数样品出现了 1645 cm<sup>-1</sup>左右的 H<sub>2</sub>O 的吸收 峰,这是由于 H<sub>2</sub>O 分子的弯曲振动引起的。同时不



图 4 苏皖北部出土金刚石红外光谱光谱图 Fig. 4 FTIR spectrums of diamonds from northern Jiangsu & Anhui 少样品还伴有 3200 cm<sup>-1</sup>左右的 H<sub>2</sub>O 分子的对称 伸缩振动峰。该批样品中未检测出 3630 cm<sup>-1</sup>左右 的 H<sub>2</sub>O 的反对称伸缩振动峰。

(4)C-H 键吸收峰:C-H 振动吸收峰在本次测试 中常见,绝大多数样品都可见清晰的 2920 cm<sup>-1</sup>、2850 cm<sup>-1</sup>标志性双峰。并且两者相伴出现。样品 BLS-2 和 BLS-3 还出现特征吸收峰~3107 cm<sup>-1</sup>(图 4)。

(5)N-H 键吸收峰:同时在 3394 cm<sup>-1</sup>附近的吸 收峰是由 N-H 键引起的吸收,本次测试样品中,安 徽栏杆地区出土金刚石出现该吸收峰。



(6)Y心:本次研究在其中的四粒 Ib 型金刚石 中,还发现了1145~1150 cm<sup>-1</sup>左右的Y心(图 5)。 另外4粒金刚石的Y心并不明显,认为可能是较高 强度的 1130  $\text{cm}^{-1}$  处的 C 心掩盖了 Y 心光谱。该缺 陷是由 Hainschwang(2012)通过对大量的天然和合 成的黄色 Ib 型金刚石进行红外光谱测定和分析所 发现的(Hainschwang et al., 2012)。Hainschwang (2012)通过大量的光谱分析认为,该缺陷目前只发 现于天然的 Ib 金刚石中, 而在合成金刚石中还没有 发现该缺陷的存在。同时,我们在本次研究中,没有 发现普遍存在于合成金刚石中的 X 心的存在,也可 以与我们发现的 Y 心相互验证。该缺陷形成的原 理尚未清楚,但可以肯定这是一种与天然金刚石中 于"单原子氮"吸收有关的光谱(Hainschwang et al.,2012),这种新的单原子氮的缺陷结构还需要进 一步工作。

#### 4.2 苏北碱性基性岩金刚石赋存年龄及形成温度

本次研究中未在金刚石中发现可用于定年的包裹体,因此我们利用金刚石中氮的转变过程及影响

因素和动力学机制对金刚石的赋存年龄进行了研究。前人认为一定的温度、压力条件下,金刚石中的 C中心逐渐聚集为 A 中心、B 中心和 B'中心。该过 程分为两个阶段:第一阶段由 C 中心聚集为 A 中 心;第二阶段为 A 中心聚集为 B 中心。B'中心是在 A 向 B 的转变过程中产生的(Allen and Evans, 1981)。

在上地幔的温压条件下绝大部分天然金刚石经 历了相似的过程,其中的氮是以集合态的形式出现。 金刚石中不同的氮聚集态(如A中心或B中心)的 丰度值是聚集温度  $T_{NA}$ 、地幔存留时间  $t_{MR}$ 和氮丰度 值的函数。氮的丰度或不同聚集态的丰度值可根据 Davies (1981)、Clark and Davey (1984)、Allen and Evans (1981)和 Woods (1990)提出的计算公式获 得,这些计算公式是基于对金刚石红外光谱的解析 得出的。对金刚石由中心至边缘进行 FTIR 分析, 可获得金刚石从早至晚的热演化历史 (Chen Meihua et al.,2000,2006)。

我们对苏北出土的金刚石进行了由内到外的微 区 FTIR 分析,计算结果见表 3。测点 55 号点位于 金刚石内部中心,测点 76 位于最靠近金刚石的边 缘,测点 41、35、80 分别位于测点 55 号的周围。由 中心向边缘分别为测点 55、41、35、80、76。我们分 别获得了由中心到边缘不同位置的红外光谱图,并 采用国际通用的计算方法,获得了样品自中心到边 缘 A 心、B 心以及 N 总量和转化程度(A-B)变化情 况(表 3)。

本次微区 FTIR 分析结果表明,苏北地区金刚 石生长过程中 N、H 丰度的聚集态均发生了明显变 化。由分析结果可知,金刚石中不同位置 N 的含量 及聚集程度不同。FTIR 谱图亦证实了这一结论, 金刚石中间部位的曲线 1370cm<sup>-1</sup>和 1175cm<sup>-1</sup>,吸 收率强,为 IaAB 型,而逐渐向边缘过渡时,该两处 吸收率减弱,到边部以 1282cm<sup>-1</sup>吸收为主,为 IaA 型。这些特点反映了具复杂结构的金刚石在从早至 晚不同的生长时期(或阶段)所处的结晶环境和条 件、或者金刚石捕虏 N 的能力发生变化。

由图谱计算得到的最老年龄为1.29Ga,最年轻的年龄为0.74Ga。按照位置其形成的时间也是从中间1.29Ga 到边缘部位0.74Ga。之间相差的550Ma的时间就是该地区金刚石在地幔中赋存的时间。

我们对本次研究的 IaAB 金刚石的 A 心、B 心 浓度进行了计算。样品 BLS-2 中 A 心浓度为 41×

了聚合。在上文计算得到的 550Ma 赋存的条件下, 该金刚石当时形成的温度在 1225℃左右,深度大约 在 150km 左右(Howell et al.,2012a)。

表 3 苏皖北部 IaAB 金刚石 N 浓度及年龄计算表

Table 3	N concentration and	t <sub>MR</sub> of IaAB diamonds	from northern Jiang	su & Anhui	

样品及测点	吸收系数	氮浓度(×10 <sup>-6</sup> )	吸收系数	氦浓度(×10 <sup>-6</sup> )	氯浓度(×10 <sup>-6</sup> )	年龄(Ga)
	$U_{\rm A}(\sim 1282)$	$N_{A}(\sim 1282)$	$U_{B}(\sim 1175)$	$N_{B}(\sim 1175)$	N <sub>T</sub>	
055	1.247705	41.59016835	0.481228	56.6150921	98.20526	1.289432
041	1.763018	58.76725349	0.611849	71.9822426	130.7495	0.871448
035	1.686884	56.22945647	0.504183	59.3156438	115.5451	0.849269
080	1.84584	61.52799326	0.659727	77.6149258	139.1429	0.84334
076	2.237616	74.58718615	0.930984	109.527578	184.1148	0.741929



图 6 苏皖北部 IaB 型金刚石 N 浓度与 B 心浓度的比值 (以 500Ma 存留时间计算)(底图据(Howell et al.,2012) Fig. 6 Nitrogen content plotted against the percentage of B (100B/[A+B]) aggregation in 550 Ma for IaB diamonds from northern Jiangsu & Anhui (after Howell et al.,2012)

在前人的研究中,在 N 原子浓度低于 1000× 10<sup>-6</sup>,1150~1300℃的温度下,C 心完全转变到 A 心只需要 10000a(Taylor et al.,1996),因此在 550Ma 期间,该地区的金刚石完全有时间完成 C 心向 A 心的转变,并开始向 B 心发生转变(氮的 聚集)。

#### 4.3 碱性基性岩型 Ib 金刚石形成

Ib 型金刚石在自然界中非常稀少(少于自然界中开普系列钻石的1%)。目前世界范围内报道的 Ib 型金刚石出土地点有,Kaapvaal 克拉通东部地块的 Helam/Swartruggens (Logan,1999; Mc Kenna et al.,2004), Slave 克拉通的 Lac de Gras(Davies et al., 2004), Amazon 克拉通的 Dachine (Cartigny,2010; Smit et al., 2010; Smith et al., 2016), Zimbabwe 克拉通西南地区的 Orapa 岩筒 (Timmerman et al., 2017), Rae 克拉通的 Qilalugaq<sup>•</sup>以及 West African 克拉通中 kankan 钻 石的多晶外壳(Weiss and de Floriani, 2009; Weiss et al., 2009)。

金刚石中的 C 心、A 心、B 心在一定的温度和时 间条件,按照 C—A—B 的顺序进行转换。然而这一 转换需要在一定的地幔存留时间和地幔温度下实现 (Taylor et al.,1990)。在金刚石稳定的典型压力和 温度下,氮主要以聚集态氮的形式出现 A 心和 B 心。天然金刚石中 Ib 型金刚石的形成目前普遍认 为是由于在地幔中赋存的时间很短(几个百万年), 或者地幔保存的温度比较低(低于 850°C)(Taylor et al.,1996),或者这两个条件都存在。比如在津巴 布韦,同样出土的 Ib 型金刚石,以在地幔存留 500Ma 的时间来计算,金刚石生长的最高温度只有 850~900°C,而低温低至 650~700°C(Smit et al., 2016)。

通过 IaAB 金刚石的计算已经知道,该区金刚 石形成并稳定的温度在 1225℃左右,这是一个典型 的金刚石稳定区域。而前人的实验证实了,立方体 的金刚石在进行 N 的转化时需要更高的温度。与 八面体晶型相比,立方体的金刚石将 C 心转化为 A 心需要的能量为  $6.0 \pm 0.2$  eV(Taylor et al., 1996),表明纯立方体的金刚石可以在岩石圈地幔更 高的温度下保存 C 心。然而即使这样,在这个温度 下  $1000 \times 10^{-6}$ 的 C 心向 A 心的转变只需要 10a,这 在地质时间中微不足道的。而在 Ib 型金刚石生成 的初期地幔温度为多少,还需要我们进一步的工作。

但我们注意到,皖北地区栏杆出土的金刚石寄 主母岩为新元古代 870~890Ma(Cai Yitao et al., 2018)。也就是说碱性基性岩是作为携带含金刚石 的金伯利岩的寄主岩石,皖北的 Ib 型金刚石一定是 在早于 890Ma 被带出金刚石稳定区域的。而苏北 地区的白露山出土金刚石的母岩为 146Ma 的碱性 基性岩(未公开发表数据)。之间的年龄相差 740Ma,大于我们计算得到的 IaAB 型金刚石在地 幔中赋存的年龄。说明 Ib 型金刚石远早于 IaAB 金 刚石被带出了金刚石稳定区域。前人称这样的金刚 石为"初生"金刚石。前人也对此类金刚石作出详 细研究,认为此类金刚石特征是 N 含量在 50×10<sup>-6</sup> ~1500×10<sup>-6</sup>之间,结晶年龄小于 0.1Ma(金刚石 在地幔中赋存年龄),颜色为黄色,存在 Ib 型光谱或 者 Ib/Ia 共存的光谱(Taylor et al.,1996)。

因此,苏皖北部碱性基性岩中仍有部分金刚石 的氮仍然保持为单原子氮。而这种单原子氮仍然在 金刚石中出现的情况,可能的原因是因为其在地幔 存留时间过短,还处在初生金刚石的阶段就被带出 了金刚石稳定区域而停止了生长和转换。另外由于 氮含量低而阻碍了单原子氮(C心)向双原子氮(A 心)的聚集,加上立方体金刚石需要更高的能量来完 成氮的转化。这些因素导致了在本区域出现大量的 Ib 型金刚石。

### 5 结论

通过本次对华北克拉通苏皖北部的碱性基性岩 中发现的金刚石进行红外光谱的分析。并对其中 N 元素的浓度、赋存时间进行了计算和分析。我们可 以得出以下几点结论:

(1)华北克拉通南缘存在有碱性基性岩型的金 刚石,此类金刚石往往为淡黄色一黄色,少数为无 色。晶型为立方体与八面体聚形或菱形十二面体、 八面体和立方体聚形的微粒金刚石。表面有溶蚀痕 迹,少见三角蚀像或三角生长丘。

(2)该地区金刚石的红外光谱显示,大多数金刚石保留着 C 心,少数金刚石中可见 A 心和 B 心,甚至 B'心。总体 N 的浓度不高,平均 N 浓度为 172.9×10<sup>-6</sup>。具有 A 心的金刚石,A 心浓度也较低。不具备 A 心和 B 心的金刚石往往存在 Y 心。

(3)通过其中 IaAB 型金刚石中心到边缘 N 的 显微 FTIR 测定,显示了该金刚石在地幔中赋存了 至少 550Ma。

(4)我们认为该地区出现的大量 Ib 型天然的微 粒金刚石,主要是由于金刚石处于初生状态时就被 带出了稳定区域而停止生长,同时立方体的金刚石 更高的转化温度以及过低的 N 浓度也可能是引发 其 N 元素未发生聚集的原因。 致谢:感谢中国地质调查局南京中心毛晓长研 究员、舒思齐研究员对本文提供的学术交流的机会。 感谢 Pilar Lecumberri-Sanchez 提供在阿尔伯塔大 学交流的机会。感谢加拿大阿尔伯塔大学大气环境 与地球科学系 Thomas Stachel 教授和 Meiyan La 博士研究生提供红外光谱测试和分析的建议。感谢 英国布里斯托大学 Laura Speich 教授在金刚石红外 光谱数据处理方面给出的建议。感谢宏创地质公司 在样品处理和挑选给出的帮助。

#### 注 释

 The Naujaat Diamond Project. www. northarrowminerals. com/ projects/qilalugaq

#### References

- Allen B P, Evans T. 1981. Aggregation of nitrogen in diamond, including platelet formation. Mathematical and Physical Sciences, 375(1760):93~104.
- Bai Wenji, Yang Jingsui, Robinson P, Fang Qingsong, Zhang Zhongming, Yan Binggang, Hu Xufeng. 2001. Study of diamonds from chromitites in the Luobusa ophiolite, Tibet. Acta Geologica Sinica, 75 (03): 404 ~ 409 (in Chinese with English abstract).
- Cai Yitao, Chen Guoguang, Zhang Jie, Dong Zhongdou, Zhou Shiwen. 2014. Geochemical features of the olivine-gabbros and its relationship with diamond-forming in the Langan area, Anhui Province. Resources Survey and Environment, 35(04): 245~253(in Chinese with English abstract).
- Cai Yitao, Zhang Jie, Dong Zhongdou, Cao Zhengqi, Xiao Shuyue, Li Shuai, Li Chengkai, Chen Lezhu, Fan Feipeng. 2018. Neoproterozoic basic magmatism in the north of Anhui Province: Evidence from whole- rock geochemistry and U-Pb geochronology of diabase in Langan area. Geology in China, 45 (02):351~366(in Chinese with English abstract).
- Cai Yitao, Shi Jianbin, Zhou Qizhong. 2019. Study on the geochemistry of the diamondiferous olivine basalt and magma evolution in Bailushan area, Xuzhou. (accepted, in Chinese with English abstract).
- Cartigny P. 2010. Mantle-related carbonados? Geochemical insights from diamonds from the Dachine komatiite (French Guiana). Earth and Planetary Science Letters, 296(3-4):329~339.
- Chen Hua, Qiu Zhili, Lu Taijin, Stern R, Stachel T, Sun Yuan, Zhang Jian, Ke Jie, Peng Shuyi, Qin Shecai. 2013. Variations in carbon isotopic composition in the subcontinental lithospheric mantle beneath the Yangtze and North China Cratons. Evidence from in-situ analysis of diamonds using SIMS. China Science Bull., 58(04): 355~364(in Chinese with English abstract).
- Chen Meihua, Lu Fengxiang, Di Jingru, Zheng Jianping. 2000. Cathodoluminescence and infrared spectroscopy of Wafangdian diamond in Liaoning Province. Chinese Science Bulletin, 45 (13):1424~1428(in Chinese with English abstract).
- Chen Meihua, Li Yan, Di Jingru, Lu Fengxiang, Zheng Jianping. 2006. Agate-like structure and heterogeneities of nitrogen and hydrogen impurities of diamond in Mengyin, China. Acta Geologica Sinica, 80(08):1197~1201(in Chinese with English abstract).
- Clark C D, Davey S T. 1984. One-phonon infrared absorption in diamond. Journal of Physics C: Solid State Physics, 17 (6):1127.
- Davies G. 1976. The A nitrogen aggregate in diamond-its symmetry

and possible structure. Journal of Physics C: Solid State Physics, 9(19):L537~L542.

- Davies G. 1981. Decomposing the IR absorption spectra of diamonds. Nature, 290:40~41.
- Davies R M, Griffin W L, O'Reilly S Y, Doyle B J. 2004. Mineral inclusions and geochemical characteristics of microdiamonds from the DO27, A154, A21, A418, DO18, DD17 and Ranch Lake kimberlites at Lac de Gras, Slave Craton, Canada. Lithos, 77(1-4):39~55.
- Hainschwang T, Fritsch E, Notari F, Rondeau B. 2012. A new defect center in type Ib diamond inducing one phonon infrared absorption: The Y center. Diamond and Related Materials, 21:  $120 \sim 126$ .
- Howell D, O'Neill C J, Grant K J, Griffin W L, O'Reilly S Y, Pearson N J, Stern R A, Stachel T. 2012a. Platelet development in cuboid diamonds: insights from micro-FTIR mapping. Mineralogy and Petrology, 164(06):1011~1025.
- Howell D, O'Neill C J, Grant K J, Griffin W L, Pearson N J, O' Reilly S Y. 2012b. μ-FTIR mapping: Distribution of impurities in different types of diamond growth. Diamond and Related Materials, 29:29~36.
- Howell D, Weiss Y, Smit K V, Loudin L, Nestola F. 2017. DiaMap: New applications for processing IR spectra of fluid-rich diamonds and mapping diamonds containing isolated nitrogen (Type Ib) and boron (Type IIb). 11th International Kimberlite Conference, Gaborone, Botswana, Gaborone, Botswana; Spring.
- Lai Meiyan, Breeding C M, Stachel T, Stern R A. 2020a. Spectroscopic features of natural and HPHT-treated yellow diamonds. Diamond and Related Materials, 101:107642.
- Lai Meiyan, Stachel T, Breeding C M, Stern R A. 2020b. Yellow diamonds with colourless cores-evidence for episodic diamond growth beneath Chidliak and the Ekati Mine, Canada. Mineralogy and Petrology, 114(2):91~103.
- Logan F. 1999. A mineralogical and isotope study of macrodiamonds from the Helam Mine, South Africa. Unpublished Honor's Thesis. Queens University, Canada.
- Liggins S. 2010. Identification of point defects in treated single crystal diamond. Doctoral dissertation of University of Warwick.
- Lu Fengxiang, Zheng Jianping, Chen Meihua. 1998. Discussion on formation condition of diamonds. Earth Science Frontiers, 5 (3):125~132(in Chinese with English abstract).
- Mc Kenna N, Gurney JJ, Klump J, Davidson J M. 2004. Aspects of diamond mineralisation and distribution at the Helam Mine, South Africa. Lithos, 77(1-4):193~208.
- Pan Guoqiang, Kong Qingyou, Wu Junqi, Liu Jiarun, Zhang Qinglong, Ceng Jiahu, Liu Daozhong. 2000. Geochemical features of Neo-Proterozoic diabase sills in Xuzhou-Suzhou area. Geological Journal of China Universities, 6(01):53~63(in Chinese with English abstract).
- Shi Jianbin, Cao Qiang, Cai Chenggang. 2010. Geological feature of the diamond placer in Xinyi, Jiangsu and the discussion on the direction of the source. Geology of Chemical Minerals, 32(01): 39~43(in Chinese with English abstract).
- Shu Liangshu, Wu Junqi, Liu Daozhong. 1994. Thrust tectonics of Xuzhou-Suzhou region, eastern China. Journal of Nanjing University, 30 (04):  $638 \sim 647$  (in Chinese with English abstract).
- Smit K V, Shirey S B, Richardson S H, le Roex A P, Gurney J J. 2010. Re-Os isotopic composition of peridotitic sulphide inclusions in diamonds from Ellendale, Australia: Age constraints on Kimberley cratonic lithosphere. Geochimica et Cosmochimica Acta, 74(11):3292~3306.
- Smit K V, Shirey S B, Wang Wuyi. 2016. Type Ib diamond

formation and preservation in the West African lithospheric mantle: Re-Os age constraints from sulphide inclusions in Zimmi diamonds. Precambrian Research,  $286:152 \sim 166$ .

- Smith C B, Walter M J, Bulanova G P, Mikhail S, Burnham A D, Gobbo L, Kohn S C. 2016. Diamonds from Dachine, French Guiana: a unique record of Early Proterozoic subduction. Lithos, doi: 10.1016/j.lithos.2016.09.026.
- Sun Yuan, Qiu Zhili, Lu Taijin, Chen Hua, Chen Binghui, Peng Shuyi, Wei Ran, Li Liufen. 2012. Micro-FTIR mapping tracer for the heterogeneity growth of nitrogen impurities in natural diamond from three localities in China. Spectroscopy and Spectral Analysis, 32(8):2070~2074(in Chinese with English abstract).
- Taylor W R, Jaques A L, Ridd M. 1990. Nitrogen-defect aggregation characteristics of some Australasian diamonds; time-temperature constraints on the source regions of pipe and alluvial diamonds. American Mineralogist, 75 (11-12): 1290 ~1310.
- Taylor W R, Canil D, Judith M H. 1996. Kinetics of Ib to IaA nitrogen aggregation in diamond. Geochimica et Cosmochimica Acta, 60(23):4725~4733.
- Timmerman S, Koornneef J M, Chinn I L, Davies G R. 2017. Dated eclogitic diamond growth zones reveal variable recycling of crustal carbon through time. Earth and Planetary Science Letters, 463:178~188.
- Wang Luchao, Wang Jilin, Li Lei. 2011. Tectonic characteristics and their evolution in Xu-Su area. Journal of Geology, 35(3): 247~250(in Chinese with English abstract).
- Weiss K, De Floriani L. 2009. Diamond hierarchies of arbitrary dimension. Computer Graphics Forum, 28(5):1289~1300.
- Weiss Y, Kessel R, Griffin W L, Kiflawi I, Klein-Ben D O, Bell D R, Harris J W, Navon O. 2009. A new model for the evolution of diamond-forming fluids: Evidence from microinclusionbearing diamonds from Kankan, Guinea. Lithos, 112: 660 ~674.
- Xu Xiangzhen, Yang Jingsui, Xiong Fahui, Ba Dengzhu, Zhang Zhongming, Li Yuan. 2018. Diamond and other exotic minerals discovered from the Xigaze mantle peridotite in the Yarlung-Zangbo suture zone, Tibet. Acta Geologica Sinica, 92(5):1389 ~1400(in Chinese with English abstract).
- Yang Jingsui, Xu Zhiqin, Pei Xianzhi, Shi Rendeng, Wu Cailai, Zhang Jianxin, Li Haibing, Meng Fancong, Rong He. 2002. Discovery of diamond in North Qinling: Evidence for a giant UHPM belt across Central China and recognition of Paleozoic and Mesozoic dual deep subduction between North China and Yangtze Plates. Acta Geologica Sinica, 76(4):484~495(in Chinese with English abstract).
- Yang Jingsui, Bai Wenji, Fang Qingsong, Meng Fancong, Chen Songyong, Zhang Zhongmin, Rong He. 2007. Discovery of Diamond and an unusual group from the podiform chromite, Polar Ural. Geology in China, 34(05):950~952(in Chinese with English abstract).
- Yang Jingsui, Xu Xiangzhen, Bai Wenji, Zhang Zhongming, Rong He. 2014. Features of diamond in ophiolite. Acta Petrologica Sinica, 30(08):2113~2124(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jie, Cai Yitao, Dong Zhongdou, Ma Yuguang, Fan Feipeng, Chen Lezhu, Li Chengkai, Yang Diwei. 2015. Investigation on mineral characteristic of diamond and geochemical characteristic of its host in the Langan area, Anhui Province. Journal of Gems &. Gemmology, 17 (05): 1 ~ 11 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Peiyuan. 1998. Actively explore a new type diamond primary deposit. Management on Geological Science and Technology, 15 (05):1~8(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yueqiao, Dong Shuwen. 2008. Mesozoic tectonic evolution

history of the Tan-Lu fault zone, China: Advances and new understanding. Geological Bulletin of China, 27(09):  $1371 \sim 1390$ (in Chinese with English abstract).

- Zheng Jianping, Zhou Xinhua. 2013. Research progress on petrology of the lithospheric mantle in North China. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 32(04):392~401(in Chinese with English abstract).
- Zheng Jianping, Ping Xianquan, Xia Bing, Yu Chunmei. 2013. The weak Neoproterozoic thermal records in North China and its significances for the lithospheric thickness. Acta Petrologica Sinica, 29(07):2456~2464(in Chinese with English abstract).

#### 参考文献

- 白文吉,杨经绥, Robinson P,方青松,张仲明,颜乘刚,胡旭峰. 2001. 西藏罗布莎蛇绿岩铬铁矿中金刚石的研究. 地质学报, 75(03):404~409.
- 蔡逸涛,陈国光,张洁,董钟斗,周世文.2014. 安徽栏杆地区橄榄辉 长岩地球化学特征及其与金刚石成矿的关系.资源调查与环境,35(04):245~253.
- 蔡逸涛,张洁,董钟斗,曹正琦,肖书阅,李帅,李成凯,陈乐柱,范飞 鹏,2018.皖北栏杆地区新元古代岩浆活动:含金刚石母岩 U-Pb 年代学及地球化学制约.中国地质,45(02):351~366.
- 蔡逸涛,施建斌,周琦忠. 2019. 徐州白露山含金刚石橄榄玄武岩地 球化学特征及其岩浆演化特征. 中国地质(已接受).
- 陈华,丘志力,陆太进, Stern R, Stachel T,孙媛,张健,柯捷,彭淑 仪,秦社彩. 2013.扬子克拉通及华北克拉通大陆岩石圈地幔 碳同位素组成及其差异:金刚石碳同位素原位测试证据.科学 通报,58(04):355~364.
- 陈美华,路凤香,狄敬如,郑建平. 2000. 辽宁瓦房店金刚石的阴极 发光和红外光谱分析. 科学通报, 45(13):1424~1428.
- 陈美华,李艳,狄敬如,路凤香,郑建平.2006.山东蒙阴金刚石的 "似玛瑙状"生长结构及氮、氢杂质分布的不均一性.地质学报, 80(08):1197~1201.
- 路凤香,郑建平,陈美华. 1998. 有关金刚石形成条件的讨论. 地学 前缘, 5(3):125~132.
- 潘国强,孔庆友,吴俊奇,刘家润,张庆龙,曾家湖,刘道忠. 2000. 徐

宿地区新元古代辉绿岩床的地球化学特征. 高校地质学报,6 (01):53~63.

- 施建斌,曹强,蔡承刚. 2010. 江苏新沂金刚石砂矿地质特征及供源 方向探讨. 化工矿产地质, 32(01);39~43.
- 舒良树,吴俊奇,刘道忠. 1994. 徐宿地区推覆构造. 南京大学学报 (自然科学版), 30(04):638~647.
- 孙媛,丘志力,陆太进,陈华,陈炳辉,彭淑仪,魏然,李榴芬. 2012. 显微红外光谱填图法示踪中国三个产地的天然钻石中氮杂质的非均匀生长.光谱学与光谱分析,32(8):2070~2074.
- 王陆超,汪吉林,李磊. 2011. 徐宿地区构造特征及其演化. 地质学 刊, 35(3):247~250.
- 徐向珍,杨经绥,熊发挥,巴登珠,张仲明,李源. 2018. 西藏雅鲁藏 布江缝合带中段日喀则地幔橄榄岩中发现金刚石等异常矿物. 地质学报,92(5):1389~1400.
- 杨经绥,许志琴,裴先治,史仁灯,吴才来,张建新,李海兵,孟繁聪, 戎合. 2002. 秦岭发现金刚石:横贯中国中部巨型超高压变质 带新证据及古生代和中生代两期深俯冲作用的识别. 地质学 报,76(4):484~495.
- 杨经绥,白文吉,方青松,孟繁聪,陈松永,张仲民,戎合. 2007. 极地 乌拉尔豆荚状铬铁矿中发现金刚石. 中国地质, 34(05):950 ~952.
- 杨经绥,徐向珍,白文吉,张仲明,戎合. 2014. 蛇绿岩型金刚石的特征. 岩石学报, 30(08):2113~2124.
- 张洁,蔡逸涛,董钟斗,马玉广,范飞鹏,陈乐柱,李成凯,杨迪威. 2015. 安徽栏杆金刚石矿物特征及其寄主母岩地球化学特征研究.宝石和宝石学杂志,17(05):1~11.
- 张培元. 1998. 积极探索突破新类型金刚石原生矿床. 地质科技管理, 15(05):1~8.
- 张岳桥,董树文. 2008. 郯庐断裂带中生代构造演化史:进展与新认 识.地质通报,27(09):1371~1390.
- 郑建平,周新华.2013.华北岩石圈地幔岩石学研究进展.矿物岩石 地球化学通报,32(04):392~401.
- 郑建平,平先权,夏冰,余淳梅. 2013. 华北深部岩石圈存在弱的新 元古代热活动的同位素年代学信息:证据及意义. 岩石学报, 29(07):2456~2464.

第9期

# A discussion on the origin of basite type diamonds in the southern part of North China Craton: evidences from FTIR

CAI Yitao<sup>\*1,2)</sup>, ZHANG Jie<sup>1)</sup>, SHI Jianbin<sup>3)</sup>, ZHOU Qizhong<sup>3)</sup>, MA Yuguang<sup>4)</sup>, LIU Jiqiang<sup>5)</sup>, QU Mingchen<sup>1)</sup>, WAN Fanglai<sup>6)</sup>, XU Hua<sup>6)</sup>, XIAO Binjian<sup>7)</sup>, WU Xiangke<sup>8)</sup>, YUAN Qiuyun<sup>9)</sup> 1) Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing, 210016, China;

2) Department of Earth and Atmospheric Sciences, University of Alberta, Edmonton, Canada, T6G2E3;

3) No. 5 Geological Team of Jiangsu Geology and Mineral Bureau, Xuzhou, Jiangsu, 221004, China;

 The Second Institute of Hydrology and Engineering Geological Prospecting of Anhui Geological Prospecting Bureau, Wuhu, Anhui, 241000, China;

5) Key Laboratory of Submarine Geosciences, State Oceanic Administration, Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou, 310012, China;

6) The Sixth Geological Brigade of Liaoning Province, Dalian, Liaoning, 116200, China;

7) The Seventh Institute of Geology and Mineral Resources Exploration of Shandong, Linyi, Shandong, 276006, China;
 8) Guangxi Geological Exploration General Institute, Nanning, 530023, China;

9) Nanjing Hongchuang Geological Exploration Technology Service Co. LTD, Nanjing, 210093, China \* Corresponding author: cyitao@cgs.cn

#### Abstract

Most major diamond deposits are located in North China Craton (NCC). Recently large number of micro-diamonds from alkalic basic rocks were discovered in south of NCC (in northen Jiangsu & Anhu provinces). These are new type of diamonds that differ from the kimberlite and lamproite types. In this research, these diamonds were tested and analyzed by FTIR. Most diamonds contain isolated nitrogen (C center), while a few contain nitrogen pairs (A centers) and nitrogen aggregates (B centers), in which Y center ( $1145 \sim 1150 \text{ cm}^{-1}$ ) is associated with C center, indicating that these diamonds are mostly of natural Ib, Ib/IaA and IaAB types, of which Ib is the dominant type. Nitrogen is the most common substitutional impurity in diamonds and is present in numerous combinations of nitrogen±vacancy centres. The content of N in diamonds from this area is generally not high. From the calculation of IaAB diamond's FTIR data, it is believed that the mantle residence time of the IaAB diamond is about 550 Ma, the temperature recorded by the diamond is about 1225 °C and is derived from a depth of 150 km. The large number of Ib type diamonds from this area indicated that the diamonds were rapidly uplifted from the diamond stability field when they were still "young", so most of isolated nitrogen was preserved and not aggregated to A centers.

Key words: FTIR; Ib-type diamond; alkalic basic rock; North China Craton; northern Jiangsu; northern Anhui