

湖南现代河流砂矿金刚石的红外光谱测定及其源区指示

邓小芹¹, 丘志力^{1*}, 马 瑛^{1,2}, 薄昊楠¹

1. 中山大学地球科学与工程学院, 广东省地质过程与矿产资源探查重点实验室, 广东省地球动力作用与地质灾害重点实验室, 广东 广州 510275
2. 国家珠宝玉石质量监督检验中心, 广东 深圳 518000

摘要 红外光谱分析可以有效地厘定金刚石类型和杂质成分, 揭示金刚石形成的物理化学条件及其源区特征, 约束金刚石的形成机制。对湖南现代河流砂矿金刚石红外光谱原位分析结果显示, 样品以 I aAB 型为主(93%), 含有少量 I aA 型(5%)、I aB 型(<1%)和 II a 型(1%); 大部分表现为中-低氮含量(35.0~436 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)和中-低氮聚集度(3%~57%, 平均转化率为 37%), 少数具有高氮特征(517~2 848 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, 甚至高达 6 829 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)。这些金刚石在地幔中的存储温度集中在 1 100~1 230 $^{\circ}\text{C}$, 与前人根据金刚石内包裹体矿物得出的形成温度基本一致。此外, 它们在地幔中的存储时间普遍较短(大部分<0.2 Ga)。这些特点暗示湖南现代河流砂矿的金刚石可能主要形成于上地幔, 其来源与超基性岩或榴辉岩有关; 少数高氮含量、低聚集氮特征的金刚石的存在则显示它们与榴辉岩关系更密切。与扬子克拉通贵州原生金刚石红外光谱数据的对比显示, 贵州金刚石以高比例极低氮含量的 II a 型金刚石为主(占约 75%), 同时具有破碎度大、表面熔蚀强烈等特点, 表明其来源较深, 且在岩浆上升过程中经历了高温熔蚀作用。红外光谱数据显示, 湖南砂矿和贵州原生矿来源的金刚石形成深度及其地球化学环境存在明显的差异, 可能是在扬子克拉通地幔不同深度范围或者不同阶段形成的产物。进一步分析表明, 湖南砂矿金刚石和贵州原生金刚石可能构成了扬子克拉通内一个完整的金刚石形成序列, 它们分别与不同源区或不同的地球化学环境相对应。前者搬运距离较短, 推测其源区可能主要来自近源补给区。现代河流砂矿金刚石的红外光谱分析为进一步探索扬子克拉通金刚石的源区特征和形成环境提供了新的指示和约束。

关键词 金刚石; 红外光谱; 氮杂质; 源区; 现代河流砂矿

中图分类号: O657.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)12-3833-06

引言

金刚石具有极高的硬度和化学稳定性, 保存了地球深部和早期重要的地球动力学线索, 是深部地球信息的传递者^[1]。湖南是我国最主要的砂矿金刚石产地, 在沅水、湘水、资水、澧水均有分布, 尤其以沅水分布最广。尽管前人对湖南砂矿金刚石的成矿条件和成矿环境等进行了诸多研究^[2], 并取得了重要的研究成果, 但是至今仍未找到与之相匹配的原生矿或其他具有经济开发价值的规模性原生矿。贵州马坪地区的“东风一号”是我国发现的第一个原生金刚石矿体, 从地理位置上看, 贵州位于湖南沅水的上游, 前人对这两个产地金刚石的表面微形貌和类型判别进行了系统研究并取得了

一定成果^[2-3], 但对二者源区性质和形成机制等的认识仍存在明显不足。扬子克拉通金刚石成矿理论的研究仍然有待深入。

通过对金刚石内部杂质元素(特别是氮杂质)的红外光谱分析, 可以揭示金刚石源区特征及其生长过程中的物理化学条件变化^[4-5]。此外, 金刚石中的杂质组成蕴含了一定的成因信息, 可为限定金刚石成因和来源提供有效约束^[4, 6]。例如通过红外光谱和 CL 图像的研究, Davies 等^[8]对澳大利亚 Wellington 砂矿的金刚石源区进行了探讨, 发现根据内部结构特征、氮丰度值及转化程度可以将该区金刚石明显地分为两类, 并综合金刚石微形貌、包裹体及碳同位素等的研究, 认为该砂矿的金刚石分别来源于超基性岩和榴辉岩。进一步的对比研究显示, 与超基性岩有关的金刚石大多数具有不含

收稿日期: 2018-10-29, 修订日期: 2019-03-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(41703028, 41473030), 高校青年教师培育项目(19lgph74)和中国博士后基金项目(2017M610563)资助

作者简介: 邓小芹, 女, 1988年生, 中山大学地球科学与工程学院副研究员 e-mail: deng_xiaoqin@126.com

* 通讯联系人 e-mail: qiuzhili@mail.sysu.edu.cn

氮(Ⅱa型)或低氮高聚集度的特征,与榴辉岩有关的金刚石则表现为相对高氮低聚集度的特点^[4, 6, 8]。

前人对湖南和贵州地区的金刚石进行了较多的红外光谱测试^[3],但局限于确定其类型,深入分析两地金刚石生长过程物理化学条件差异,探讨其形成机制和湖南砂矿金刚石产地来源的较少。本文通过取自现代河流砂矿湖南金刚石的红外光谱测试分析,对不同金刚石的氮含量及转换率定量计算和金刚石在地幔中的存储时间和温度的估算,探讨了金刚石生长过程中的物理化学条件变化;通过与贵州原生金刚石对比,探讨了不同类型金刚石的形成机制及内在成因联系,旨在进一步指导扬子克拉通金刚石找矿工作。

1 实验部分

1.1 样品

对 290 颗天然金刚石进行了红外光谱分析,它们均来自湖南沅水流域现代河流砂矿(挖砂过程中获得),同时与已发表的 199 颗贵州原生金刚石红外光谱数据^[3]进行对比。

湖南沅水现代河流砂矿(以下简称砂矿)金刚石样品颗粒

完整度较高,大小为(1~6 mm),颜色以无色、黄色为主,其次为褐色、绿色和紫色等,透明至半透明,具较强的金刚光泽。晶形以八面体、菱形十二面体及其变形为主[图 1(a, b)]。大多数晶体表面可见较明显的原生生长纹或生长丘形貌,具有熔蚀坑或熔蚀沟/滴状丘或叠瓦状蚀像/闭合晕线或平行晕线等[图 1(a, b)]。贵州镇远原生金刚石样品破碎程度严重,完整度差,大小为 1~8 mm,颜色以无色、黄色为主,表面普遍附着褐色、红色、橘黄色等物质,局部沿裂隙进入晶体内部[图 1(c)]。

1.2 仪器和测试条件

实验在国家珠宝玉石质量监督检验中心深圳实验室完成。红外光谱测试仪器为 Nicolet6700 型傅里叶变换红外光谱仪,扫描范围为 400~4 000 cm^{-1} ,分辨率 8 cm^{-1} ,扫描次数 32 次以上。利用 OMNIC 软件对金刚石红外光谱数据曲线进行基线校正,并对特定区域进行分峰拟合,分别得出相应特征峰位的吸光度。

需要说明的是,原有样品 297 件,由于晶体原石表面十分不平整,导致少数样品(7 件)的图谱效果较差,因而只获得 290 件样品数据。

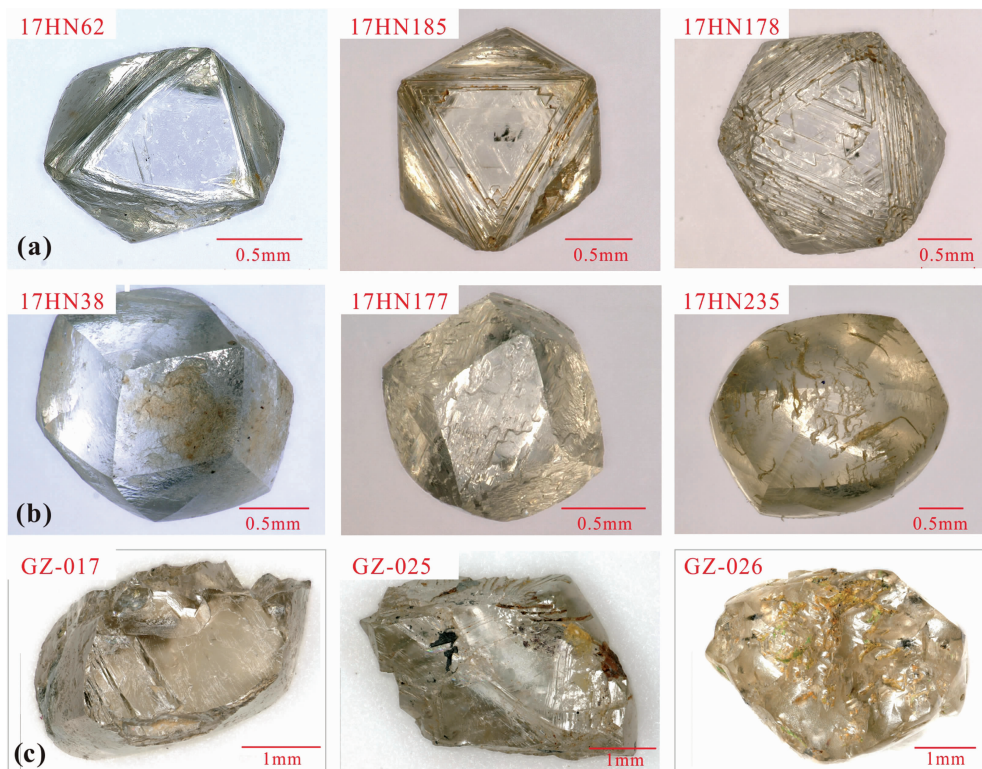


图 1 分别来自湖南和贵州代表性的金刚石样品

17HN: 湖南; GZ: 贵州

Fig. 1 Representative rough diamonds from Hunan and Guizhou

17HN: Hunan; GZ: Guizhou

2 结果及讨论

2.1 金刚石类型对比

根据金刚石红外光谱图中显示的氮、硼杂质等的赋存状态,以及与其含量有关的吸收峰,通常将金刚石分为 I 型($N > 20$ ppm)和 II 型($N < 20$ ppm 或检测不到)^[9]。I 型金刚石根据杂质氮的含量及聚合状态可进一步分为 I aA, I aB 和

I b 型, 其中, I aA 型金刚石的 1 282 cm^{-1} 特征吸收峰是由双原子氮(A 心)引起, I aB 型金刚石是四原子氮(B 心, 1 175 cm^{-1}), I b 型金刚石是单原子氮(C 心, 1 130 cm^{-1})。此外, 片晶氮集合体会出现 1 360 cm^{-1} 的特征峰。II 型金刚石内部氮杂质含量极低, 因此 II a 型在 1 000~1 400 cm^{-1} 范围内没有显著的吸收峰, 而 II b 型由于含少量硼元素, 在 2 800 cm^{-1} 位置上有 B—C 键引起的特征吸收峰。需要指出的是, 多数 II 型金刚石与深源或超深来源有关^[10] (如宝石级大钻石)。

前人对湖南砂矿金刚石(可能混合古河流及现代河流砂矿两种类型)的研究资料显示, 其中约 87% 为 I aAB 型, 2% 为 II a 型, 还有少量 I aA 型、I aB 型、I b 型以及混合过渡类型^[2]。本文通过对湖南 290 颗现代河流砂矿金刚石的红外光谱测试分析, 结果表明其中有 282 颗(占 93%)金刚石样品显示有明显的 1 282 和 1 175 cm^{-1} 峰属于 I aAB 型(图 2), 15 颗显示 1 282 cm^{-1} 峰属于 I aA 型(占 5%), 1 颗显示 1 175 cm^{-1} 峰属于 I aB 型, 3 颗在 1 000~1 400 cm^{-1} 范围内及 2 800 cm^{-1} 位置上均没有显著的吸收峰属于 II a 型(占

1%), 未出现 I b 型和 II b 型金刚石, 和前人结果基本一致^[2]。此外, I a 型金刚石大多还具有 1 360 cm^{-1} 的特征峰(图 2)。而大部分(高达 75%)贵州原生金刚石显示在 1 000~1 400 cm^{-1} 范围内及 2 800 cm^{-1} 位置上均没有显著的吸收峰(II a 型), 表明 II 型极为发育, 还有少数 II b 型和 I a 型及混合型, 没有发现 I b 型金刚石^[3]。

全球金刚石矿床中最常见的类型是 I a 型金刚石, 其中粉色 I a 型金刚石以澳大利亚 Argyle 为代表^[10]; I b 型金刚石少量出现, 典型产地为印度、巴西和南非^[10]; II a 型金刚石(极其低氮)则非常稀有, 不到世界上已发现金刚石总量的 2%, 主要来源于印度 Golconda 地区、巴西和非洲^[1]; II b 型金刚石分布则更少见, 它们大多数来自印度、南非的 Cullinan 矿区和博茨瓦纳的 Karowe 矿区^[1, 5]。由于氮杂质极少, 许多 II 型金刚石具有较高的品质和价值。贵州高比例 II a 型金刚石的出现, 暗示其生长环境的特殊性, 为探讨其成因提供了物质基础。湖南沅水高比例 I aAB 型金刚石则揭示了扬子克拉通金刚石类型的多样性, 可进一步与贵州对比分析它们不同类型金刚石产出的生长环境等条件。

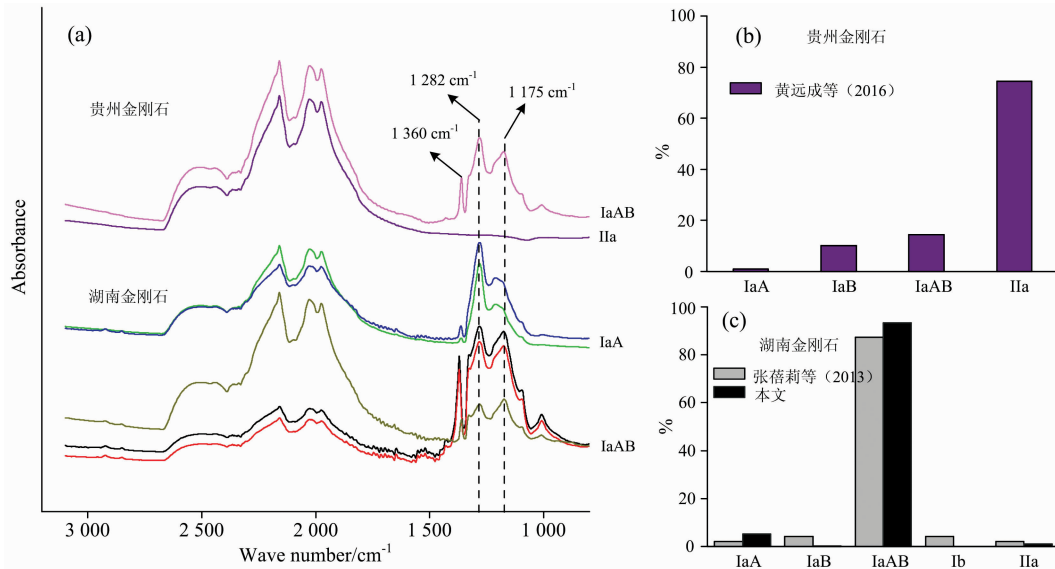


图 2 (a) 贵州和湖南代表性金刚石的红外光谱图谱; (b) 贵州金刚石类型统计; (c) 湖南金刚石类型统计
 Fig. 2 Representative FTIR spectra (a) and the percentage of different types of diamonds from Guizhou (b) and Hunan (c)

2.2 金刚石氮含量及其形成温度估算

天然金刚石红外光谱广泛应用于金刚石中 A, B 缺陷的含量计算。依据金刚石红外光谱图中有关特征吸收峰的强度, 计算出其在不同赋存状态下的氮杂质 A 心和 B 心含量及总含量^[11]

$$N_A = \mu_A/d \times r/300(1+r) (\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$$

$$N_B = \mu_B/d/85(1+r) (\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$$

$$N_T = N_A + N_B (\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$$

$$N_B\% = N_B/N_T$$

$$r = (2.72m - 1)/(1 - 0.41m) (\text{当 } m < 1.5)$$

$$\text{或 } r = (1.88m - 1)/(1 - 0.5m) (\text{当 } m > 1.5)$$

其中 μ_A 和 μ_B 分别是 1 282 与 1 175 cm^{-1} 处吸收峰强度, m

为 μ_A 和 μ_B 之比, d 为金刚石厚度(cm)。从 290 个湖南砂矿金刚石样品的分析结果中选取了 128 个质量较高的谱图进行分析, 部分计算结果见表 1。

结果显示, 湖南砂矿金刚石中氮含量变化范围很大, 大部分介于 35.0~436 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间, 少部分介于 517~2 848 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, 甚至高达 6 829 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 。氮的聚集状态以 A 心富集为主, B 心转化率(N_B/N_T)较低(3%~57%), 平均转化率为 37%, 暗示湖南砂矿金刚石中氮的聚集程度较低。贵州大多数金刚石属于 II a 型, 缺失 1 000~1 400 cm^{-1} 范围内的吸收峰因而氮杂质含量极低或缺乏。

在高温高压的地幔存储环境中, 金刚石晶格内部氮杂质赋存状态可能会随着时间的迁移而改变^[6, 11]。通常, 金刚石

晶格中氮杂质最初以单原子氮(C心)存在,经历一定温度和压力变化,单原子氮(C心)会在相对较短的时间内转化为双原子氮(A心);而在长时间的高温环境存储过程中,双原子氮(A心)将不断转化为四原子氮(B心)^[6, 11]。因此,自然界中Ib型金刚石一般较少见,而多数为IaA、IaB型。上述湖南沅水砂矿金刚石中绝大多数测试样品呈现A心和B心的聚合状态IaAB型。

表 1 湖南金刚石部分 N 含量($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)和 $N_B\%$ 值
Table 1 Part of N contents ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) and $N_B\%$ values of Hunan diamonds

样品编号	金刚石类型	$N_A/(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$	$N_B/\%$	N_T/Ga	$N_B/\%$	地幔存留时间
17HN68	IaAB	356	71.3	428	17	0.96
17HN92	IaAB	141	79.5	221	36	0.07
17HN95	IaAB	85.8	2.40	88.2	3	0.61
17HN127	IaAB	111	145	256	57	0.13
17HN128	IaAB	154	127	281	45	0.08
17HN133	IaAB	61.8	49.9	112	45	0.19
17HN139	IaAB	68.3	79.0	147	54	0.2
17HN149	IaAB	1 049	662	1 710	39	0.71
17HN158	IaAB	1 521	1 327	2 848	47	0.59
17HN159	IaAB	271	246	517	48	0.05
17HN162	IaAB	773	390	1 163	34	0.84
17HN164	IaAB	804	658	1 461	45	1.08
17HN166	IaAB	470	401	872	46	0.03
17HN172	IaAB	4 005	2 824	6 829	41	0.2
17HN174	IaAB	519	450	969	46	0.02
17HN175	IaAB	1 508	1 302	2 810	46	0.59
17HN177	IaAB	343	377	720	52	0.04
17HN192	IaAB	281	47.7	329	14	1.12
17HN204	IaAB	422	145	567	26	1.06
17HN208	IaAB	24.7	26.1	50.8	51	0.54
17HN213	IaAB	154	35.1	189	19	0.03
17HN224	IaAB	221	216	436	49	0.06
17HN236	IaAB	180	218	399	55	0.08
17HN241	IaAB	45.0	22.2	67.2	33	0.19
17HN278	IaAB	16.9	18.1	35.0	52	0.79
17HN287	IaAB	61.9	33.1	94.9	35	0.14

氮的赋存状态发生“C心→A心→B心”的转变,其转变前后A中心浓度的变化与地幔存留时间、聚集温度有关。假设金刚石在形成初始状态时的氮全部为 N_A ,经地质演化后其氮含量为 $N_T = \exp(\ln(B/100 - B) + 81\,600/T - \ln A - \ln t_m)$ 。其中, N_T , B , A , t_m 和 T 分别代表金刚石中的总氮含量、 N_B 及 N_A 的百分比数、金刚石在地幔中的赋存时间和金刚石在地幔中生长保存的平均温度, $\ln A = 13.507$ ^[10]。扬子克拉通金刚石的形成年龄一直是一个悬而未决的问题,至今未有报道。目前已知扬子克拉通地区与金刚石紧密联系的钾镁煌斑岩获得的喷发年龄约为340~503 Ma^[12];另一方面,湖南沅水流域金刚石被发现位于扬子克拉通江南造山带上,因其包括较大比例的榴辉岩型金刚石(与橄辉岩型金刚石比例相近^[2, 13]),这些金刚石的形成可能与该期俯冲作用

(~850 Ma)相关。由此,我们假设湖南沅水流域砂矿金刚石的地幔存留时间为850和500 Ma,得出金刚石的地幔存储温度分别集中在1 100~1 217 °C(850 Ma)和1 110~1 230 °C(500 Ma)(图3),与前人的研究结果一致(1 109~1 327 °C^[13])。

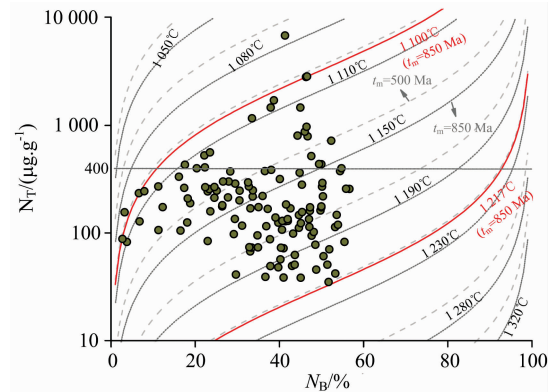


图 3 湖南金刚石 N_B - N_T 等温线图

Fig. 3 N_B vs N_T isotherm plot of the diamonds from Hunan

2.3 金刚石源区特征及其对找矿的指示

从金刚石的红外光谱统计学角度分析,天然金刚石中的氮含量和聚集度可以反映其形成时的环境条件,有助于区分原生矿和砂矿来源,也可以作为寻找砂矿金刚石原产地的示踪指标^[11]。Kaminsky等^[4]利用大量的红外光谱数据分析了世界各地金刚石的杂质元素特征,并根据氮含量及转化度差异将其划分为三个系列:(1)低氮高聚集度;(2)中氮中聚集度;(3)高氮低聚集度。它们具有不同的特征,分别对应金刚石形成的三种源区环境:(1)初期高温-高压环境,出现在超深区域(如下地幔或过渡带),通常为IIa型金刚石,该类金刚石一般含有特征性的超深矿物包裹体;(2)主要形成环境,成矿作用发生在上地幔,生成的金刚石通常与超基性岩或榴辉岩有关;(3)岩浆演化晚期,金刚石在高过饱和度和高温梯度条件下、在金伯利岩岩浆上升侵位之前快速结晶,多与榴辉岩成因有关,具有较高的氮含量($>1\,000\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)和低聚集氮($<35\% N_B$)的特点。

测试结果显示,湖南砂矿金刚石大部分表现为中-低氮含量($<400\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)和中-低氮聚集度(3%~57%,平均值37%),只有少数显示高氮($>400\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,甚至高达6 829 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)的特征,暗示该类金刚石可能主要形成于超基性岩或榴辉岩源区。

已知金刚石氮杂质的富集状态和转化温度,利用公式 $t = (1/c - 1/c_0) / (Ae^{-E/RT})$ 可以粗略估算金刚石在地幔中的存储时间 t ,也就是金刚石晶格内A心向B心转化所需要的时间。其中 c_0 及 c 分别为转化前后A心的浓度, $\ln A = 13.507\ \mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{s})^{-1}$, $E/R = (81\,626 \pm 1\,290)\ \text{K}$ ^[12], T 为转化温度。结合前人从湖南金刚石包裹体获得的形成温度(平均值1 218 °C^[13]),反演得出湖南金刚石样品在地幔中的存留时间介于0.02~1.12 Ga(前面假设的850和500 Ma均在该区间内,由此相互印证),其中大部分集中在0.2 Ga范围内

(68%)，说明它们在地幔中的存储时间普遍较短。同时，湖南金刚石中有 93% 金刚石样品属于 I aAB 型，进一步表明其形成后不长时间就被金伯利岩/钾镁煌斑岩岩浆捕获并携带至浅部地壳。此外，湖南沅水金刚石含有石榴石(非超硅石榴石)、黄铁矿、柯石英、蓝晶石等矿物包裹体^[13]，与 I aAB 型金刚石可能来自上地幔源区观点一致。

金刚石内部的杂质元素对其晶体形态也会产生一定的影响，主要表现为多数 II 型金刚石相对 I 型一般少见平坦晶面，往往呈不规则状或扁平状^[3]。此外，II 型金刚石相对纯净易发生塑性变形，通常裂成碎块，且在搬运过程中其表面普遍遭受熔蚀^[14]。已有的研究表明，形成于岩石圈地幔以下的金刚石含有高比例的低氮含量(<20 ppm; 多为 II 型)。贵州原生金刚石样品表面普遍都有熔蚀现象，熔蚀坑、熔蚀孔洞、熔蚀沟槽等蚀像极为发育^[3]，说明经历了复杂的、较强烈的流体-熔体反应。综合来看，贵州金刚石具有高比例 II a 型(75%)、破碎度大、完整度差、表面强烈熔蚀、且大多未见明显的生长韵律(生长条件相对稳定)等特点^[3]，说明它们的源区较深，钾镁煌斑岩岩浆在上升过程中携带了金刚石并与之发生了较长时间的反应，暗示贵州金刚石的形成与超深成矿环境有关。

湖南和贵州分别产出不同类型不同比例的金刚石，指示扬子克拉通内不同地区金刚石形成时深部环境的差异。湖南高比例 I aAB 型和贵州高比例 II a 型金刚石的产出，分别是它们重要且独特的产地特征之一，可以用来区分它们的来源。与贵州金刚石形成于深部成矿环境相比，湖南金刚石形成于相对浅部的上地幔。由此看来，贵州原生金刚石和湖南砂矿金刚石可能构成了扬子克拉通内一个完整的金刚石形成

序列。结合扬子克拉通内钾镁煌斑岩均具有较年轻的喷发年龄 $[(451 \pm 7) \text{ Ma}^{[12]}]$ ，同时在湘西地区的中、新生界红层中发现多处含金刚石及其指示矿物，多数金刚石晶型较为完整(图 1)，由此推测湖南金刚石搬运距离较短，可能主要来自近源补给区。

3 结 论

(1) 新测定 290 颗湖南沅水现代河流砂矿金刚石以 I aAB 型为主(93%)，含有少量 I aA 型(5%)、I aB 型(<1%)和 II a 型(2%)，大部分表现为中-低氮含量和中-低氮聚集度，少数具有高氮($>400 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ，甚至高达 $6\,829 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)，地幔存储温度集中在 $1\,100 \sim 1\,230 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间，在地幔中的存储时间普遍较短(大部分 $<0.2 \text{ Ga}$)，暗示湖南砂矿金刚石可能主要形成于上地幔，其母岩与超基性岩或榴辉岩有关，而少数高氮含量、低聚集氮特征的金刚石则显示与榴辉岩关系更密切。

(2) 通过对比贵州原生金刚石高比例 II a 型(极其低氮)(75%)、以及破碎度大、表面强烈熔蚀等特点，暗示贵州金刚石的形成环境相对湖南金刚石深。

(3) 湖南砂矿和贵州原生矿来源的金刚石的形成深度及其地球化学环境存在明显的差异，可能是扬子克拉通地幔不同深度范围或者不同阶段性的产物。它们可能构成了扬子克拉通内一个相对完整的金刚石形成序列，分别对应于岩石圈地幔深部过程不同的地球化学环境。

致谢: 感谢国家珠宝玉石质量监督检验中心深圳实验室对本实验提供的帮助。

References

- [1] Gaillou E, Post J E, Rost D, et al. *American Mineralogist*, 2012, 97(1): 1.
- [2] ZHANG Bei-li, CHEN Hua, QIU Zhi-li, et al(张蓓莉, 陈 华, 丘志力, 等). Geographic Origin of Diamonds under the Kimberley Process Certification Scheme of the United Nations(联合国金伯利进程框架下的钻石原产地研究). Beijing: Geological Publishing Press(北京: 地质出版社), 2013. 141.
- [3] HUANG Yuan-cheng, LI Zhi-xiang, QIU Zhi-li, et al(黄远成, 李志翔, 丘志力, 等). *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*(中山大学学报·自然科学版), 2016, (5): 108.
- [4] Kaminsky F V, Khachatryan G K. *Canadian Mineralogist*, 2001, 39(6): 1733.
- [5] Moore A E. *South African Journal of Geology*, 2014, 117(2): 219.
- [6] Zhang Z, Fedortchouk Y. *European Journal of Mineralogy*, 2012, 24(4): 619.
- [7] Davies R M, O'Reilly S Y, Griffin W L. *Mineralogical Magazine*, 1999, 63(4): 447.
- [8] Shatsky V S, Zedgenizov D A, Ragozin A L, et al. *European Journal of Mineralogy*, 2014, 26(1): 41.
- [9] Smith E M, Shirey S B, Nestola F, et al. *Science*, 2016, 354(6318): 1403.
- [10] King J M, Shigley J E, Gelb T H, et al. *Gems & Gemology*, 2005, 41(2): 88.
- [11] Taylor W R, Jaques A L, Ridd M. *American Mineralogist*, 1990, 75(11): 1290.
- [12] DENG Xiao-qin, HUANG Yuan-cheng, QIU Zhi-li, et al(邓小芹, 黄远成, 丘志力, 等). *Geotectonica et Metallogenia*(大地构造与成矿学), 2019, 43(5): 1023.
- [13] QIU Zhi-li, WANG Qi, QIN She-cai, et al(丘志力, 王 琦, 秦社彩, 等). *Geotectonica et Metallogenia*(大地构造与成矿学), 2014, 38(3): 590.
- [14] Bulanova G P, Walter M J, Smith C B, et al. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2010, 160(4): 489.

FTIR Spectrometry Characteristics of Diamonds from the Modern River Placer in Hunan and Their Origin Implication

DENG Xiao-qin¹, QIU Zhi-li^{1*}, MA Ying^{1,2}, BO Hao-nan¹

1. School of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangdong Provincial Key Laboratory of Geological Process and Mineral Resource Exploration, Guangdong Provincial Key Laboratory of Geodynamic and Geological Hazards, Guangzhou 510275, China
2. National Gemstone Testing Center, Shenzhen 518000, China

Abstract FTIR spectrometry provides a crucial means to explore the types of diamonds and their impurities, which would to some extent reflect the physical-chemical conditions of the diamonds and also their origin characteristics, revealing the source information and genesis of the diamonds. In this paper, a set of samples of diamonds from the modern river placer in Hunan are analysed by in-situ measurement of FTIR spectrometry. The results show that the diamonds are mainly IaAB type (93%), with minor IaA type (5%), IaB type (<1%) and IIa type (2%). Most diamonds have medium to low nitrogen contents ($35.0 \sim 436 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) and medium to low nitrogen aggregation (3%~57%, ave. 37%), while the others are relatively high ($517 \sim 2\,848 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, even up to $6\,829 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$). The probable range of storage temperatures of the diamonds are between 1 100 and 1 230 °C, similar to the formation temperature of mineral inclusion in diamonds reported by previous literature. In addition, their residence time in the mantle are generally short (most <0.2 Ga), indicating that the diamonds from the modern river placer in Hunan are probably mainly generated in the upper mantle, and their source rocks are related to both ultramafic and eclogitic parageneses. Few diamonds with high nitrogen contents and low nitrogen aggregation features may be more closely related to eclogitic parageneses. By further comparing with another place where we have found primary diamonds, Guizhou, Yangtze Craton, it shows that Guizhou diamonds have characteristics of high proportion of IIa type (75%), high degree of fragmentation, poor integrity, low quality and strong corrosion, indicating that the diamonds from Guizhou are derived from the deeper mantle than Hunan's. The different types and features of the diamonds from Hunan and Guizhou may show the diversity of their sources. Furthermore, the placer diamonds from Hunan and primary diamonds from Guizhou may constitute a complete mineralization sequence in Yangtze Craton, which may correspond to different environment stages of diamond mineralization, respectively. The haul distance of the diamonds from Hunan placer is relatively short, indicating a near-field source. Therefore, FTIR spectrometry provides an approach to explore the origin features and formation condition of the diamonds in Yangtze Craton.

Keywords Diamonds; FTIR spectrometry; Nitrogen impurities; Source; Modern river placer

(Received Oct. 29, 2018; accepted Mar. 14, 2019)

* Corresponding author