

贵州镇远钾镁煌斑岩原生及砂矿金刚石矿物学特征及其找矿意义*

黄远成¹, 李志翔^{2,4}, 丘志力², 饶红娟¹, 陆太进³,
陈 华³, 柯 捷³, 魏 然³

1. 贵州省地矿局 101 地质大队, 贵州凯里 556000;
2. 中山大学地球科学与地质工程学院, 广东广州 510275;
3. 国土资源部珠宝玉石首饰管理中心, 北京 100013;
4. 广东省珠宝玉石交易中心, 广东广州 511483)

摘 要: 扬子克拉通原生金刚石找矿一直是极具争议性的问题。金刚石及其寄主岩石蕴含了深部岩石圈地幔丰富的地球化学信息, 可为原生矿找矿提供重要的约束和指示。通过对贵州 101 地质队过去发现的镇远钾镁煌斑岩区 199 颗原生金刚石及周围水系中 16 颗砂矿金刚石的形态学(包括表面微细生长)和熔蚀特征的对比, 并结合红外光谱测试, 进一步探讨了贵州金刚石携带的地质找矿信息。新的测试结果显示, 贵州原生金刚石具有颗粒普遍较小、破碎度大、存在(95%)强烈熔蚀、表面附着物丰富、发蓝白色荧光、所有样品均无磷光等特点, 红外无损测试确认 IIa 型金刚石的产出比例高, 但低于原先部分学者估算的比例; 通过与砂矿金刚石对比, 确认所测试样品的寄主钾镁煌斑岩不可能是贵州或湖南沅水已发现砂矿金刚石的直接源岩, 扬子克拉通应当还存在其他规模性的金刚石原生矿或者来源; 通过野外实地考察及室内样品测试, 确认所研究的钾镁煌斑岩为浅部相, 而非根部相, 暗示贵州镇远地区原生金刚石找矿仍有较大潜力。

关键词: 原生金刚石; 钾镁煌斑岩; 找矿; 扬子克拉通; 贵州

中图分类号: P619.24 文献标志码: A 文章编号: 0529-6579(2016)05-0108-11

Mineralogical characteristics of lamproite-hosted and placer diamonds from Zhenyuan, Guizhou and their significance for primary deposit prospecting

HUANG Yuancheng¹, LI Zhixiang^{2,4}, QIU Zhili², RAO Hongjuan¹,
LU Taijin³, CHEN Hua³, KE Jie³, WEI Ran³

- (1. No. 101 Geological Brigade, Guizhou Bureau of Geology and Mineral Exploration & Development, Kaili 556000, China;
2. School of Earth Science and Geological Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;
3. National Gems & Jewelry Technology Administrative Center, Beijing 100013, China;
4. Guangdong Gems & Jade Exchange, Guangzhou 511483, China)

* 收稿日期: 2016-06-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41272086; 41473030); 国土资源部公益性行业科研基金资助项目(200811012)

作者简介: 黄远成(1963年生), 男; 研究方向: 矿产资源调查研究; 通讯作者: 丘志力; E-mail: qiuzhili@mail.sysu.edu.cn

Abstract: There has not been an agreement reached for a long time on the occurrence, host rocks and genesis of primary diamond deposits beneath the Yangtze Craton, China. In this paper, the surface features and FTIR of 199 macro diamonds from lamproite rocks and 16 diamonds from the surrounding river basins in Zhenyuan collected by No. 101 Guizhou Geological Brigade were studied by non-destructive techniques including FTIR spectroscopic techniques, aiming at finding out valuable geological prospecting information/indication. The results showed that most primary diamonds are small in size and fragmented, and are characterized by strong dissolution features or attaching materials on surface. Most diamonds display blue-white fluorescence other than phosphorescence. FTIR results confirmed the majority of the diamonds are type IIa, but their proportion is less than previous estimation and observation. Compared with Hunan and Guizhou placer diamonds, it is believed that the host lamproite rocks of the primary diamonds in Zhenyuan is not the primary source of those placer diamonds discovered in Guizhou and Hunan provinces. Based on field survey and research of the geological occurrence, it is concluded that lamproite rocks in Zhenyuan may be shallow phase rather than deep root phase, implying it has the potential to discover new primary diamond deposits in Guizhou.

Key words: primary diamonds; lamproite; exploration; the Yangtze craton; Guizhou province

金刚石是来自克拉通岩石圈深部重要的经济矿物，同时也是克拉通岩石圈演化重要的矿物探针。金刚石本身及其寄主岩石（如金伯利岩、钾镁煌斑岩）的特征，蕴含了深部岩石圈地幔源区丰富的地球化学信息，为金刚石成因的研究和原生矿找寻提供重要指示和约束。

世界金刚石原生矿的勘查开发历史已近 150 年，迄今发现有经济开发价值的大金刚石原生矿床主要有 2 种，一是以 1869 年首次在南非金伯利地区发现的金伯利岩型金刚石原生矿床为代表的原生矿，产于太古宙稳定克拉通（A 型克拉通）的金伯利岩中，在世界范围内分布较广，数量较多；二是以 1979 年首次在西澳发现的大型钾镁煌斑岩型原生金刚石矿为代表的原生矿，主要出产于早中元古代克拉通（P 型克拉通）钾镁煌斑岩中^[1-3]。此外，大金刚石还有一个重要的次生来源——砂矿，包括澳大利亚新南威尔士、俄罗斯乌拉尔在内的世界多个著名金刚石砂矿的来源及其原生矿找寻一直是存在争论的热点问题^[2,4-5]。

扬子克拉通是我国最早发现金刚石的构造单元之一。1965 年，贵州 101 地质大队在黔东南的镇远马坪地区发现了我国含原生金刚石的第一个橄榄钾镁煌斑岩体，并命名为“东风一号”（D1）^[6]；1990 年，湖南 413 地质队在湖南宁乡地区也发现了含微粒金刚石的橄榄钾镁煌斑岩群^[7-10]；随后，在扬子克拉通多地陆续发现了诸多钾镁煌斑岩及金伯利岩的伴生岩区^[7-12]，但却仍没能在扬子克拉通找到与湖南沅水金刚石砂矿匹配的原生矿或其他

具有经济开发价值的规模性原生矿^[12-13]；虽然不断发现新的线索，但在贵州及湖南是否能找到具有经济价值的金刚石原生矿一直存在争议。过去虽然曾对贵州发现的金刚石进行过测试研究^[14-16]；但早期对该区钾镁煌斑岩及金刚石的研究更多集中在钾镁煌斑岩的矿物组成、岩石地球化学特征、侵位年龄等方面^[17-24]。由于测试技术条件的限制，有关金刚石特征及其对找矿信息的揭示仍然较为模糊。

本文通过对贵州镇远钾镁煌斑岩区的 199 颗原生金刚石及周围三都、铜仁、锦屏、麻江、施洞口等地水系中的 16 颗砂矿来源金刚石进行基本特征、红外光谱的测试，结合钾镁煌斑岩的特征，并通过和湖南砂矿金刚石的对比，对这些金刚石携带的地质找矿信息作进一步探讨。

1 贵州金刚石矿床产出的地质概况

扬子克拉通为 A 型向 P 型演化的“过渡型”克拉通，其周缘部分区域为环古老克拉通活动带的 T 型克拉通^[25-26]，具有由太古宙—古元古代深变质结晶基底和中—新元古代浅变质褶皱基底构造层组成的“双基底”特殊大地构造环境^[25,27-28]。贵州镇远钾镁煌斑岩型原生金刚石及砂矿金刚石产区位于扬子克拉通的边缘活动带（图 1）。镇远地区位处黔东南，贵阳—镇远—怀化近东西向的深大断裂及都匀—镇远—铜仁北东向深大断裂在镇远地区交汇，控制了该区原生金刚石及主要钾镁煌斑岩体、水系金刚石的产出及分布^[19,21]。

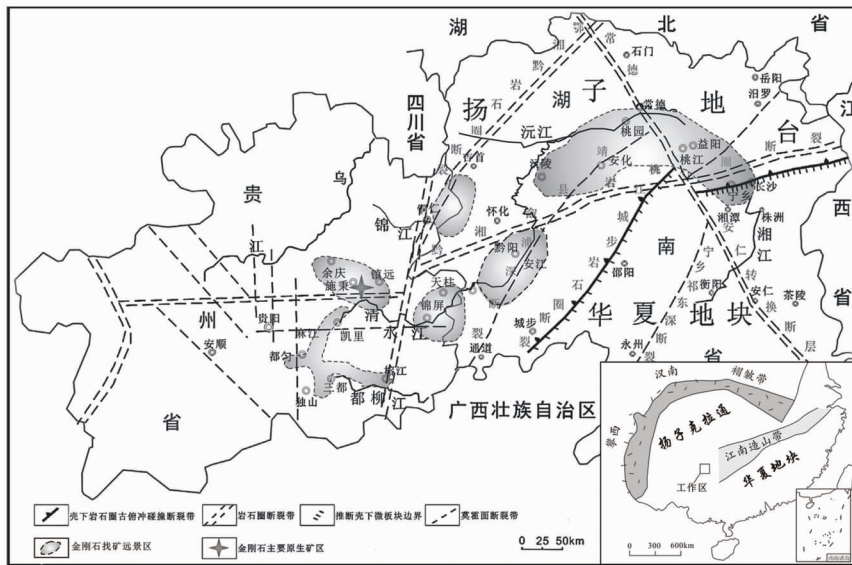


图 1 湘黔两省金刚石来源、矿(点)分布及其区域地质构造简图
(据文献 [29] 修改; 原图据 [16, 25, 30-32] 等文献资料绘制)

Fig. 1 Sketch map of the distribution of diamond deposits and their regional geological tectonics in Hunan and Guizhou provinces

从岩体特征来看, 贵州镇远地区钾镁煌斑岩主要分为金云母钾镁煌斑岩和橄榄钾镁煌斑岩两类^[21], 在两种钾镁煌斑岩中都曾发现过金刚石。镇远马坪地区 67 个岩体中 219 件样品的选矿结果显示, 有 170 件样品见金刚石, 所有样品中含矿性 $< 1 \text{ mg/m}^3$ 的占 43.5%, $1 \sim 10 \text{ mg/m}^3$ 的占 32.4%, $10 \sim 20 \text{ mg/m}^3$ 的占 9.4%, 其余 14.7% 的 $> 20 \text{ mg/m}^3$, 其中橄榄钾镁煌斑岩的含矿性相对较好 (如马坪“东风一号”岩体平均品位高达 34.42 mg/m^3), 而金云母钾镁煌斑岩的含矿性相对较差^[24]。镇远地区的清水江、都柳江、锦江等众多水系及其支流中的砂矿金刚石呈现多源多期补给的特点^[33]。其中, 清水江为沅江上游的主源, 沅江中、下游主流河段位于湖南境内的中西部地区 (图 1), 砂矿金刚石含量最高、质量优, 是国内砂矿的重要来源^[13, 28, 34]。

2 样品来源及测试方法

本文金刚石样品共 215 颗, 包含了宝石级、半宝石级及部分非宝石级金刚石原石。其中, 199 颗为原生金刚石, 分别来源于镇远地区的 D1、D1-3、D3、D8、D8-1、D11、D11-4、D15、D37、D38 等钾镁煌斑岩体, 为 101 地质大队早期从岩体中直接分选获得; 剩余 16 颗为砂矿金刚石, 分别来源于周围三都、铜仁、锦屏、麻江、施洞口等地水系, 来源可靠。

对样品仅进行无损测试, 测试仪器或方法主要包括: 宝石显微镜、微干涉显微镜、偏光镜、钻石观察仪 (DiamondView™) 和显微红外光谱等。其中, 荧光测试因样品大小、洁净度及时间限制等原因, 仅对其中具有代表性的 94 颗进行了测试。

3 基本矿物学特征

3.1 粒度、质量及完整度

贵州金刚石样品均普遍偏小, 最大直径范围为 $1 \sim 8 \text{ mm}$ 。统计数据显示 (表 1), 199 颗贵州原生金刚石样品中, 宝石级金刚石约占 19%, 粒度以 $-2+1$ 级别为主, 占比 54.27%, 其次为 $-4+2$ 级别, 占比 40.70%, $-8+4$ 级别仅占 5.03%; 16 颗砂矿来源的金刚石中, 宝石级金刚石占 37.5%, 粒度比例分布与原生金刚石相似, 以 $-2+1$ 级别为主, 占比 56.25%, 其次为 $-4+2$ 级别, 占比 37.50%, $-8+4$ 级别仅占 6.25%。

质量方面, 贵州金刚石样品质量普遍偏小。统计数据显示 (表 2), 199 颗贵州原生金刚石样品的质量范围为 $0.53 \sim 390.89 \text{ mg}$, 平均质量为 19.71 mg , 其中 92.96% 的样品质量在 50 mg 以下, 76.88% 的样品质量在 20 mg 以下, $< 5 \text{ mg}$ 的样品比例也高达 37.19%; 而 16 颗贵州砂矿金刚石样品的质量范围为 $2.69 \sim 135.31 \text{ mg}$, 平均质量为 17.25 mg , 93.75% 的样品质量在 50 mg 以下, $< 5 \text{ mg}$ 的样品比例高达 50.00%。

表 1 贵州金刚石粒度大小统计表¹⁾
Table 1 Statistics of the particle size of diamonds from Guizhou

岩体编号	总颗数	- 8 + 4		- 4 + 2		- 2 + 1	
		颗数	比例/%	颗数	比例/%	颗数	比例/%
D1	28	3	1.51	16	8.04	9	4.52
D1-3	3			2	1.01	1	0.50
D3	107	5	2.51	42	21.11	60	30.15
D11	5	1	0.50			4	2.01
D11- 4	1					1	0.50
D8	1					1	0.50
D8-1	8			1	0.50	7	3.52
D15	9			4	2.01	5	2.51
D37	35	1	0.50	14	7.04	20	10.05
D38	2			2	1.01		
合计	199	10	5.03	81	40.70	108	54.27
砂矿	16	1	6.25	6	37.50	9	56.25

1) 所有“比例值”均指占相同矿源（原生矿或砂矿）总颗粒数的比例；其中粒度 - 2 + 1 表示大小在 1 ~ 2 mm 之间，- 4 + 2 表示大小在 2 ~ 4 mm 之间，- 8 + 4 表示大小在 4 ~ 8 mm 之间

表 2 贵州金刚石质量统计表¹⁾
Table 2 Statistics of the weight of diamond samples from Guizhou

岩体编号	总颗数	金刚石质量/mg													
		<5		5 ~ 10		10 ~ 20		20 ~ 50		50 ~ 100		100 ~ 200		>200	
		颗数	比例/%	颗数	比例/%	颗数	比例/%	颗数	比例/%	颗数	比例/%	颗数	比例/%	颗数	比例/%
D1	28	6	3.02	3	1.51	7	3.52	8	4.02	1	0.50	2	1.01	1	0.50
D1-3	3			1	0.50	1	0.50	1	0.50						
D3	107	50	25.13	20	10.05	17	8.54	13	6.53	4	2.01	2	1.01	1	0.50
D11	5	1	0.50	3	1.51							1	0.50		
D11-4	1			1	0.50										
D8	1			1	0.50										
D8-1	8	2	1.01	6	3.02										
D15	9	4	2.01	1	0.50	2	1.01	2	1.01						
D37	35	11	5.53	11	5.53	4	2.01	7	3.52	1	0.50			1	0.50
D38	2					1	0.50	1	0.50						
合计	199	74	37.19	47	23.62	32	16.08	32	16.08	6	3.02	5	2.51	3	1.51
砂矿	16	8	50.00	3	18.75	2	12.50	2	12.50			1	6.25		

1) “比例值”均指占相同矿源(原生矿或砂矿)总颗粒数的比例

完整度方面，贵州原生金刚石破碎程度严重（部分可能为岩石样品破碎过程中受到破碎），完整度较差，砂矿金刚石完整度则好的多。199 颗原生金刚石样品中，晶形完整的样品仅有 4 颗，占比 2.01%，碎块（包括多晶、部分无晶形的浑圆晶体碎块）155 颗，占比高达 77.89%，其余晶体晶形不完整；16 颗砂矿来源金刚石的晶形完好的有 7 颗，占 43.75%，不完整的有 6 颗，占 37.50%，其余 18.75% 为碎块（表 3）。

3.2 颜色特征

贵州原生金刚石样品以无色或浅黄 - 黄色系列

为主，约 76% 的样品属于该色系；其次为褐色调样品，约 22% 的样品为褐色、浅褐色、褐黄色、黑褐色、棕褐色等不同色调的褐色系；少部分样品为灰色、灰黑色。此外，贵州原生金刚石表面普遍存在着绿色、褐色、红色、黄色、橘黄色、黄褐色、黑色等各种不同颜色的附着物，部分样品中同时存在几种颜色的附着物，某些附着物会沿着裂隙进入金刚石内部；个别样品表面存在着褐色、绿色色斑。

贵州砂矿金刚石样品也以无色及浅黄色色调为主，63% 的样品为无色或近无色系列，31% 的样品

表 3 贵州金刚石晶形完整性统计表¹⁾
Table 3 The statistics of intactness of Guizhou diamonds in shape

来源	项目	总颗粒数	完整	不完整	碎块
原生矿	晶体数/颗	199	4	40	155
	比例/%	100	2.01	20.10	77.89
砂矿	晶体数/颗	16	7	6	3
	比例/%	100	43.75	37.50	18.75

1) 比例值指占相同矿源(原生矿或砂矿)总颗粒数的比例

为浅黄色系列, 个别为黄色、浅褐色; 样品表面相对原生金刚石要干净, 但部分样品也存在少量的红褐色、绿色或黄色等颜色的附着物, 色斑出现的比例要比原生金刚石高, 约 31% 的样品表面存在着绿色、褐色色斑。

3.3 晶形特征

统计结果显示, 贵州原生金刚石样品中, 确定为菱形十二面体的仅占 4.02%, 确定为八面体的占 5.03%, 多晶占 6.53%, 无任何外形特征的碎块(即不包括多晶碎块及部分无确定晶形的浑圆晶体碎块)比例高达 68.84%, 其余为四六面体、连生体、聚形晶、扁平板状晶体及部分不能准确辨认晶形的其他复杂晶体(图 2a)。16 颗砂矿金刚石中, 31.25% 为菱形十二面体, 25.00% 为八面体, 其余为聚形晶、碎块及部分不能准确辨认晶形的其他复杂晶体(图 2b)。

3.4 DiamondView™ 图像特征

本研究利用 DiamondView™ 对 94 颗贵州金刚石样品进行了测试。其中, 87 颗为原生金刚石, 7 颗为砂矿金刚石。测试结果显示, 贵州金刚石普遍发蓝白色荧光, 个别样品呈蓝绿色或绿色荧光, 所有样品均无磷光。部分样品荧光图像见图 3。

具体来说, 87 颗原生金刚石中, 85 颗样品主体呈蓝白色荧光, 占 97.70%, 其中, 部分样品蓝白色荧光带有浅绿色色调(约占总数的 8.05%), 少部分样品蓝白色荧光背景下出现明显的绿色团块区域(约占总数的 3.45%); 1 颗样品(N199)呈蓝绿色荧光, 占 1.15%; 1 颗样品(N013)呈绿色荧光, 占 1.15%。此外, 部分样品出现了网格状发光模式(约占总数的 3%), 少部分样品发光不均匀, 呈斑驳状, 有相当数量的样品(约 17.24%)伴有黑色斑点、斑块分布, 其中部分样品黑点较为密集。由于本研究中的样品均为原石晶体, 因无损测试的要求而未做切片测试, 除个别透

明度较好、晶面平坦、熔蚀较弱的样品(约 5%)外, 大部分样品均没有能够观察到内部生长结构, 但即便是观察到生长环带的样品, 环带也不完整或清晰, 限制了对样品内部生长结构及生长机制的研究(图 3a)。

7 颗砂矿金刚石样品中, 4 颗呈蓝白色荧光, 占 57.14%, 其中 1 颗(N208)带浅绿色色调; 1 颗(N215)呈蓝绿色荧光, 占 14.29%; 2 颗(N210、N212)发绿色荧光, 占 28.57%。与原生金刚石一样, 相当数量的样品伴有黑色斑点、斑块分布, 少部分样品可观察到三角形生长纹、生长环带(图 3b)。

3.5 表面微形貌特征

统计结果显示, 近 95% 的贵州原生金刚石样品表面普遍都有熔蚀现象, 并且大部分为强烈熔蚀, 熔蚀坑、熔蚀孔洞、熔蚀沟槽等蚀像极为发育(图 4), 这是贵州原生金刚石区别于其他产地原生金刚石的一个重要产地来源指示特征。常见的晶面蚀像主要有: 不规则外形的穴状熔蚀坑、熔蚀沟、倒三角凹坑、四边形凹坑、六边形凹坑、叠瓦状蚀像、晕线、盘状蚀像、毛玻璃化外观等(图 4); 应力导致的塑性变形滑移线也常出现; 与生长相关的表面微形貌有阶梯状生长纹、生长丘等。此外, 还有一些特殊的表面微形貌, 如“似陨石坑”的规整圆盘状微形貌群、似平行长条状蚀像等。

砂矿来源的贵州金刚石样品表面普遍也或多或少的出现了熔蚀特征, 部分样品熔蚀强烈, 常见不同形状的熔蚀坑/沟等蚀像, 此外, 生长台阶、生长丘等与生长相关的常见微形貌也常出现, 还可见到晕线、缝合线、滑移线、毛玻璃化外观等特征。

3.6 贵州金刚石原位红外光谱测试结果

本研究使用尼高力 iN10 显微红外光谱仪对贵州的 215 颗金刚石进行了测试, 测试采用透射法, 分辨率为 8 cm^{-1} , 扫描次数为 16 次, 光阑为 $150 \mu\text{m}$ 。但测试过程中, 相当数量的样品表面有较多油脂等有机物附着, 但因样品质量较差, 为避免破碎, 没有使用超声波进行清洗, 影响了测试的图谱效果, 制约了对部分样品类型的精准判断和分析。

测试结果显示, 61 颗金刚石样品可准确判定其类型, 其中, I 型 41 颗, II a 型 20 颗; 7 颗金刚石样品完全不能判断类型; 另外的 147 颗样品也无法完全准确的判断类型, 但根据测试经验推断, 其中 12 颗应为 I 型金刚石, 135 颗为 II 型金刚石, 具体统计结果见表 4。

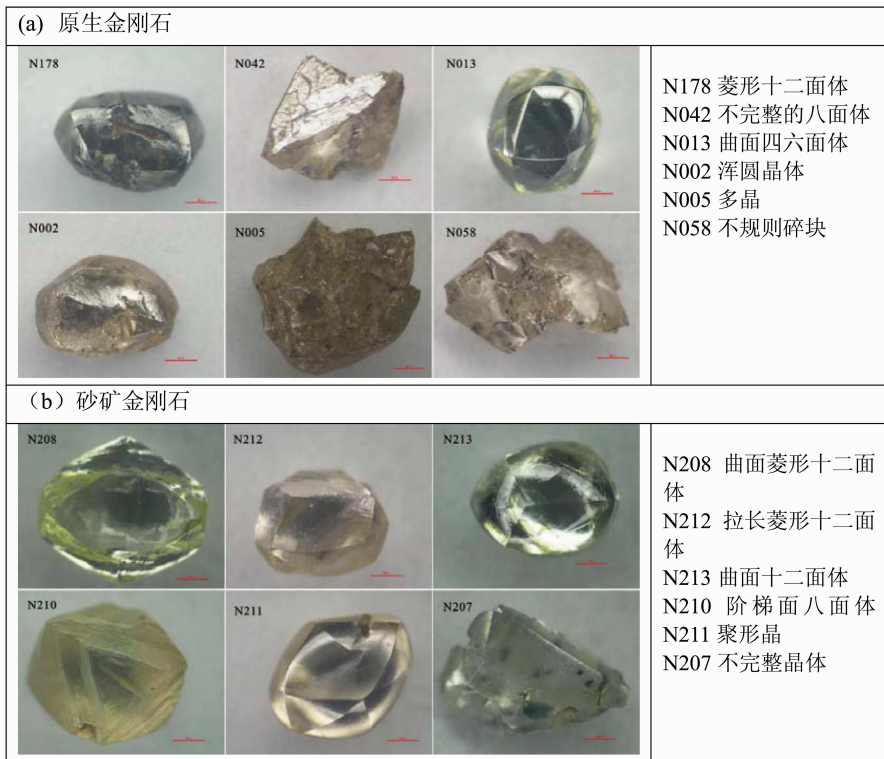


图 2 贵州原生金刚石和砂矿金刚石晶体形态

Fig. 2 Crystal habits of primary and placer diamonds from Guizhou

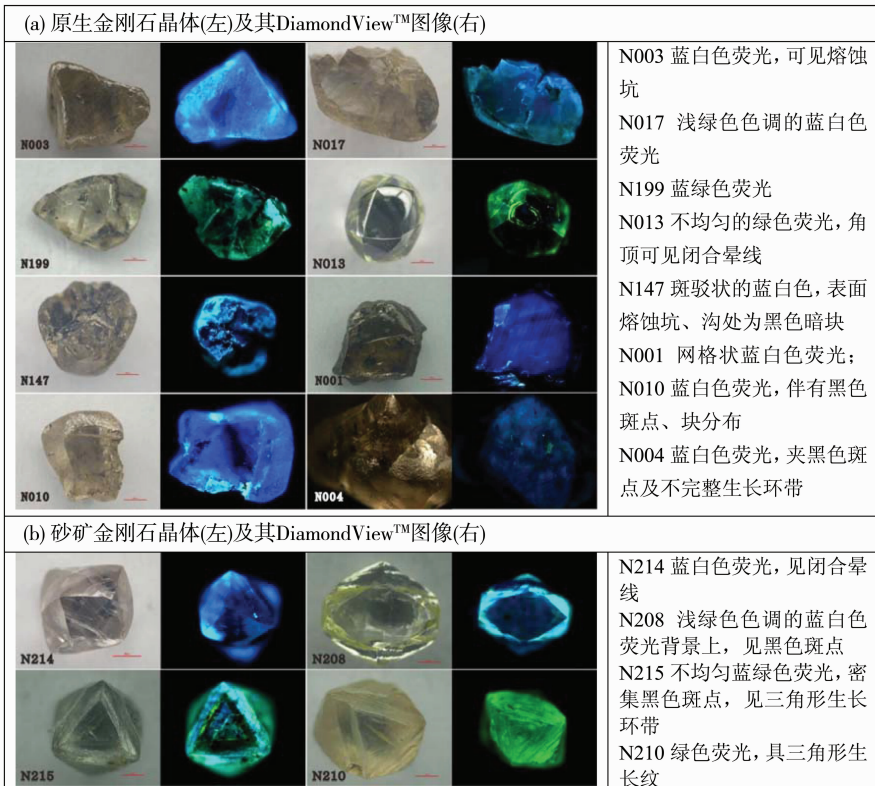


图 3 贵州原生和砂矿金刚石部分晶体及其 DiamondView™ 图像

Fig. 3 DiamondView™ images of primary & placer diamonds from Guizhou

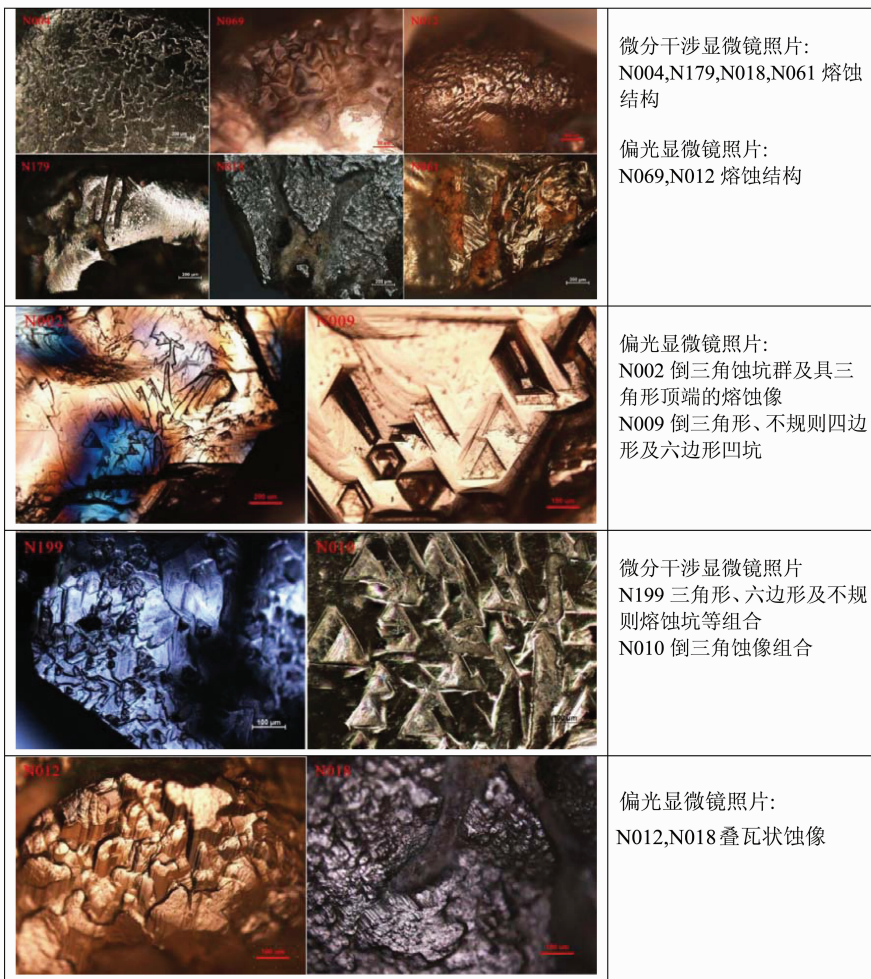


图 4 贵州原生金刚石表面不同形态的熔蚀结构和微形貌特征

Fig. 4 Dissolution structures and surface etching features on the surfaces of primary diamonds from Guizhou

如果按确定类型的 61 颗金刚石样品来计算, 贵州金刚石中, II 型金刚石约占 32.79%, 并且全部为 II a 型。I 型金刚石占 67.21%, 其中, 45.90% 为 I aAB 型, 18.03% 为 I aB 型, 1.64% 为 I aA 型, 还有 1.64% 为不能细分的 I a 型 (图

5)。如果加入推测判断类型的金刚石部分 (图 5), 那么贵州金刚石中, II a 型金刚石出现比例将达到 74.52%, I 型金刚石仅占 25.48%。上述 II 型金刚石的比例虽然低于前人估算的 87%^[14], 但在国际金刚石产地中也是非常高的^[35-36]。

表 4 贵州金刚石类型统计表

Table 4 The statistics on FTIR features and types of diamonds from Guizhou

项目	类型	数量/颗	备注
准确判断类型 (61 颗)	II a	20	1 000 ~ 1 430 cm^{-1} 无吸收峰, 且无明显 2 800 cm^{-1} 硼吸收
	I aA	1	1 282 cm^{-1} 特征峰
	I aAB	28	1 282, 1 175 cm^{-1} 特征峰
	I aB	11	1 175 cm^{-1} 强峰和 1 325 cm^{-1} 小尖峰
	I a	1	强度溢出
推测类型 (147 颗)	I aB 或 II a	10	倾向于 I aB
	I aAB 或 II a	2	倾向于 I aAB
	疑似 II a	135	倾向于 II a
无法判断 (7 颗)	7	其中 1 颗因样品过小未测试, 其余样品表面有机物过多	

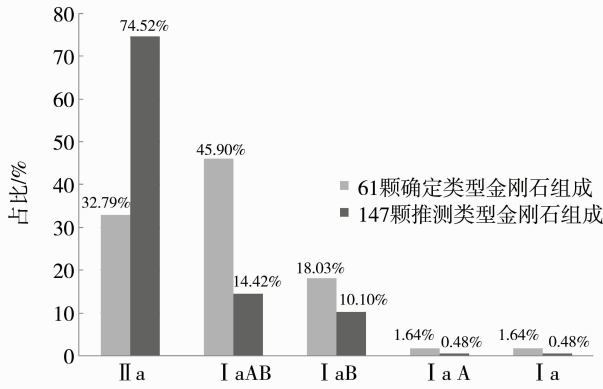


图 5 贵州金刚石类型比例图

Fig. 5 Distribution of FTIR determined types for diamonds from Guizhou

4 贵州原生金刚石对扬子克拉通原生矿找矿的意义

4.1 扬子克拉通砂矿金刚石应该有其它原生矿的来源

不同矿区金刚石基本统计特征的关联性与差异性建立金刚石产地溯源及来源判别的基础。扬子克拉通湖南沅水砂矿金刚石的来源问题一直未得到合理解释，位于沅水上游的贵州高原曾一度被认为是其最有可能的原生矿来源。本文根据现有的贵州原生金刚石的分析结果，与前人^[13,29,37]得到的湖南沅水砂矿金刚石的统计结果进行了归纳对比，结果如表 5 所示。

表 5 贵州镇远原生金刚石与湖南沅水砂矿金刚石基本特征归纳对比¹⁾

Table 5 Comparison of diamonds from Zhenyuan in Guizhou and Ruan river basin in Hunan

产区	贵州镇远原生矿	湖南沅水流域砂矿
品质特征	粒径普遍较小，多在 2 mm 以下，以小于 0.1ct 为主 (77%)，完整度较差，仅 2%，宝石级别不到 20%	粒径普遍偏小，以小于 0.1ct 为主 (76%)，完整度较高，75%~90%，宝石级别达 60%~90%
颜色	无色或浅黄-黄色系列为主 (约 76%)，其次为不同色调的褐色 (约 22%)，少部分样品为灰色、灰黑色等	无色-黄色系为主，其次为褐色、绿色以及少量灰色、蓝色、桃红色等，加工后色级明显提高
色斑	个别样品表面存在褐色、绿色色斑，表面附着物颜色丰富；(注：约 31% 的贵州砂矿金刚石存在着绿色、褐色色斑)	普遍 (30% 以上) 存在褐色、绿色、紫红色等各种颜色的色斑，绿色和褐色可以同在一个颗粒中出现。
晶形	无任何外形特征的块体居多 (69%)，其余为完整程度不一的菱形十二面体、八面体、四六面体、聚形及多晶等晶体	高比例的圆化曲面完整晶体 (近 90%)，形态以曲面菱形十二面体、八面体及聚形为主
微形貌特征	普遍存在蚀像 (近 95%)，且大部分为强烈熔蚀；个别具有“圆盘/环状”、似平行长条状蚀像等特殊微形貌	部分晶体上出现独特的“弯月状”、“圆环状”蚀像；其余多为常见的金刚石晶面蚀像；
荧光特征	以蓝白色荧光为主 (98%)，少部分为蓝绿色、绿色荧光，所有样品均无磷光；相当数量 (17%) 伴有黑色斑点、斑块	颜色丰富，包括蓝色调 (47%)、绿色调 (14%)、绿色及蓝绿色调共存 (31%)、以及蓝、绿和黑色共有的斑驳状发光 (8%)，此外还存在特殊的艳绿色闪光现象 (18%)
类型	IIa 型比例出现极高 (本研究已确定类型中约 33%，前人 ^[14] 报道 87% 以上)，此外，包括了 IaAB 型、IaB 型、IaA 型等类型	以 IaAB 型为主 (约 87%)，其次为 IaA 型 (2.1%)、IaB 型 (4.3%)、Ib 型 (4.3%)、IIa 型 (2.1%) 以及混合过渡类型 (4.3%)
包裹体	半数以上 (约 51%) 含有黑色、褐色、红色等不同颜色的片状、点状、球状包裹体，初步能确定的矿物种类为石墨、黄铁矿	整体净度相对较好，含包裹体的约占 15~30%；P 型和 E 型比例接近，存在 P+E 混合类型；包裹体矿物种类丰富

1) 湖南沅水流域砂矿金刚石资料主要来源于文献 [13, 29, 37]

从表 5 的对比结果可以看出, 现有的贵州镇远原生金刚石与湖南沅水砂矿金刚石在品质及晶形特征、微形貌、荧光特征、类型、净度等重要特征上都存在明显差异。

其中, 最为重要的区别之一是两个产地金刚石的类型。本研究结果显示, 贵州金刚石中, II 型金刚石出现比例极高, 至少占比 33%, 最高可能达 75%, 并且基本为 II a 型。而前人对贵州金刚石的研究资料显示, 贵州原生金刚石中, II 型金刚石极为发育, 其中 II a 型占据了大多数 (高达 87%), 少量为 II b 型、I a 型及混合型, 几乎没有发现 I b 型金刚石, 而砂矿金刚石的类型相似, 约有 2/3 为 II a 型, 其余少量为 II b 型、I a 型及混合型^[14,16]。而湖南砂矿金刚石中约 87% 为 IaAB 型, IIa 型占比仅约 2.1%, 其余为 IaA 型、IaB 型、Ib 型以及混合过渡类型^[13,29]。全球统计数据显示, I 型金刚石是全球各地的金刚石矿床中最普遍存在的类型^[38-39], 但 II a 型金刚石出现比例则普遍较低, 一般 <2%^[36], 其中, 印度 Golconda 地区是历史上较为出名的产地之一, 此外主要来源于巴西和非洲^[38]; II b 型金刚石分布则更为有限, 产量更低, 大多数来源于印度和南非的 Cullinan 矿区^[35-36], 博茨瓦纳的 Karowe 矿为近年新发现的 II b 型蓝色金刚石的重要产地^[40]。显然, 贵州高比例 II a 型金刚石的产出, 是其区别于湖南砂矿金刚石甚至全球众多其他金刚石矿床较为独特和重要的产地特征之一。

同时, 前人研究结果显示, 金刚石内部的杂质元素会对其晶体形态产生一定影响, 主要体现为相对 I 型, 多数 II 型金刚石中很少存在平坦的晶面, 其 {111} 面往往呈不规则状或扁平状^[41]。本研究显示, 贵州原生金刚石大多为无明显外形特征的碎块, 少有平坦晶面, 仅 2% 左右为完整晶体, 宝石级别的金刚石占比不到 20%, 可能与其大比例的 II 型类型有直接关联; 而以 I 型为主的湖南砂矿金刚石近 90% 为圆化曲面完整晶体, 宝石级别的金刚石高达 60% 以上。当然, 金刚石最终的晶体形态受到包括形成时温度、压力、氧逸度、生长速率、生长机制、流体作用、挥发分的影响; 同时, 携带金刚石母岩的喷出环境、构造应力大小、运移时间、碳的过饱和度及后期搬运条件等多种因素也是重要的影响因素^[42-43]。无论成因如何, 金刚石的品质及外形特征已明显成为贵州原生金刚石与湖南砂矿金刚石的又一重要区别。

此外, 贵州原生金刚石表面普遍存在的强烈熔

蚀 (占 95%)、荧光特征以及净度等与湖南砂矿金刚石均存在明显区别。综上, 高比例 II a 型、破碎度大、完整度差、品质低、表面强烈熔蚀、蓝白色荧光为主、包裹体多等与金刚石原生成矿过程直接相关, 而非后期砂矿搬运和深埋过程中产生或造成明显可逆影响的基本统计特征的差异, 指示当前发现的贵州镇远原生金刚石矿并非湖南沅水砂矿金刚石的直接来源, 扬子克拉通湖南沅水砂矿应当还存在其他规模性的原生矿来源, 为扬子克拉通金刚石原生矿的找矿提供了重要的依据。

4.2 镇远地区发现的钾镁煌斑岩应该属于岩体的浅部相, 寻找含矿钾镁煌斑岩仍存在希望

贵州自中元古代以来, 经历了 Rodinia 超大陆聚合及裂解、加里东造山作用、印支运动、燕山运动、喜马拉雅运动和新构造运动等多次壳幔作用及板块活动, 地壳隆升明显, 使得区内部分地层遭受了强烈剥蚀^[44-45]。有部分研究认为, 镇远地区大部分含原生金刚石的钾镁煌斑岩体几乎已经剥蚀殆尽, 属于火山道的“根部相”, 因而不具备金刚石原生矿找矿价值^[19,20]。但也有研究指出, 在如向斜轴部或断裂的下降盘等某些低点位置, 加里东期的古地面剥蚀程度可能远低于隆起的核心地段, 使得这些区域极有可能存在富含原生金刚石的一定规模的岩体, 并成为相应下流砂矿的补给源^[26]。

研究团队野外对“东风一号”钾镁煌斑岩 (D1) 野外实地考察发现, 其主脉岩体与周围碳酸盐地层接触带未见明显高中温交代蚀变, 只存在烘烤现象, 说明岩体 (脉) 侵入碳酸盐地层时的温度相对较低, 应该属于岩脉的上部相, 可能还存在隐伏岩体。同时, 对近年在马坪菖蒲塘地表新发现的钾镁煌斑岩管的实地考察表明, 岩体具有明显隐爆特征, 其岩脉“火焰状”的产出形态、规模和岩体特征, 也证实了该区岩管应该属于上部相, 而非“根部相”, 为该区寻找大规模隐伏钾镁煌斑岩管或岩墙提供了新的依据^[24]。上述发现及认识, 说明镇远地区寻找含矿钾镁煌斑岩仍存在潜力。

4.3 高品质金刚石原生矿有待发现

本研究结果显示, 贵州原生金刚石粒度普遍较小, 破碎度大, 近 95% 的样品表面都有熔蚀现象, 并且大部分为强烈熔蚀, 熔蚀坑、熔蚀孔洞、熔蚀沟槽等蚀像极为发育。前人研究认为贵州马坪原生金刚石粒度小、多包体、晶面强烈熔蚀的现象指示了金刚石形成及马坪岩体上升侵位时, 贵州岩石圈 (扬子陆块) 存在的高热流值环境^[16]。

同时, 不同类型金刚石产出比例在不同地区的

差异性,也可能指示了不同地区金刚石深部形成环境的差异。研究提出, I型和II型金刚石形成于不同的地幔环境,普遍认为I型金刚石主要形成于岩石圈地幔中150~250 km处的橄榄岩或榴辉岩中^[46-47],而II型金刚石的成因解释有形成于地幔超深处或熔融的碳酸盐岩与上地幔的相互反应等模式^[40,48-50]。贵州产出高比例的IIa型金刚石,对其成因环境有重要的指示意义。结合贵州金刚石普遍存在的强烈熔蚀特征、以及破碎度大、颗粒小等特征,笔者推测目前发现的贵州原生金刚石形成源区深度较深或者携带其上升的钾镁煌斑岩浆喷发速度相对较慢,上升过程中金刚石与钾镁煌斑岩浆存在相对较长时间的反应等原因,可能是影响金刚石品质较重要的原因;同时,赋含扬子克拉通砂矿高品质金刚石的原生岩体仍然有待发现。以上结果暗示,扬子克拉通高品质金刚石的找矿仍然任重道远。

5 结 论

1) 贵州镇远地区目前发现的钾镁煌斑岩型原生金刚石具有颗粒普遍较小,破碎度大,普遍(95%)存在的强烈熔蚀特征,表面附着物丰富,大多发蓝白色荧光、所有样品均无磷光,IIa型产出比例较高等特征。

2) 通过贵州原生金刚石与湖南沅水金刚石基本特征的对比,确认当前发现的贵州原生金刚石并非湖南沅水砂矿金刚石原生矿的直接来源,扬子克拉通湖南沅水砂矿应当还存在其他规模性的原生矿来源。

3) 贵州钾镁煌斑岩的产状及和围岩接触变质特点显示贵州镇远钾镁煌斑岩体可能属于浅部相,而非根部相,暗示贵州镇远地区金刚石原生矿找矿仍有潜力。

4) 现有贵州原生金刚石的特征暗示,金刚石形成源区的深度较深、钾镁煌斑岩浆喷发速度相对较慢、上升通道的局部地幔热流值环境相对较高等原因,对金刚石的品质造成较大影响,扬子克拉通高品质金刚石的找矿可能需要有新的思路。

参考文献:

- [1] 张培元. 有关金刚石成因等若干重大问题的新认识[J]. 湖南地质, 1998, 17(3): 204-210
- [2] SHIREY S B, SHIGLEY J E. Recent advances in understanding the geology of diamonds[J]. *Gems & Gemology*, 2013, 49(4): 188-222.
- [3] STACHEL T, LUTH R W. Diamond formation-Where, when and how? [J]. *Lithos*, 2015, 220/221/222/223: 200-220.
- [4] DAVIES R M, GRIFFIN W L, O'REILLY S Y, et al. Unusual mineral inclusions and carbon isotopes of alluvial diamonds from Bingara, eastern Australia [J]. *Lithos*, 2003, 69(1/2): 51-66.
- [5] LAIGINHAS F, PEARSON D G, PHILLIPS D, et al. Re-Os and ⁴⁰Ar/³⁹Ar isotope measurements of inclusions in alluvial diamonds from the Ural Mountains; Constraints on diamond genesis and eruption ages [J]. *Lithos*, 2009, 112S: 714-723.
- [6] 章人骏. 论沅水流域及其邻区金刚石原生矿的前景[J]. 湖南地质, 1985, 4(1): 1-14.
- [7] 李子云, 马文运. 宁乡县云影窝含金金刚石钾镁煌斑岩地质特征[J]. 国土资源导刊, 1993(4): 221-225.
- [8] 李荣清. 湖南金刚石原生矿找矿研究的现状与展望[J]. 矿床地质, 1996, 15: 17-18.
- [9] 梅厚钧, 唐春景, 李荪蓉, 等. 中国的钾镁煌斑岩和金伯利岩与金刚石矿床生成[J]. 中国科学: D辑, 1998, 28: 71-77.
- [10] 董斌. 湖南金刚石原生矿找矿工作与方向的再思考[J]. 国土资源情报, 2009(7): 49-52.
- [11] 张培元. 论中国金刚石原生矿的找矿前景(下)[J]. 国土资源科技管理, 2001, 18(2): 32-36.
- [12] 王久华, 魏然. 中国金刚石(钻石)资源分布及产出特征[C]// 珠宝与科技——中国珠宝首饰学术交流会论文集, 2013: 38-43.
- [13] 张蓓莉, 陈华, 丘志力, 等. 联合国金伯利进程框架下的钻石原产地研究[M]. 北京: 地质出版社, 2013.
- [14] 任怀翔. 贵州金刚石特征[J]. 贵州地质, 1988, 5(4): 297-307.
- [15] 任怀翔. 亮江水域金刚石的新发现及其找矿意义[J]. 贵州地质, 1994, 11(1): 27-28.
- [16] 孙士军, 杨松平. 贵州金刚石成矿条件初探[J]. 贵州地质, 1998, 15(1): 1-8.
- [17] 马大铨, 赵子杰, 徐涛, 等. 贵州马坪云母金伯利岩及伴生偏碱性超基性岩的岩石特征[J]. 中国地质科学院宜昌地质矿产研究所所刊, 1983(7): 65-75.
- [18] 卢登蓉, 任怀翔. 贵州省施秉地区金伯利岩与偏碱性超镁铁煌斑岩岩石特征[J]. 贵州地质, 1987(1): 73-81.
- [19] 罗会文, 杨光树. 贵州省镇远地区钾镁煌斑岩岩石特征[J]. 岩石矿物学杂志, 1989, 8(2): 97-109.
- [20] 罗会文, 杨光树, 盛学庸. 我国的第一批含金金刚石云火山岩——为贵州已知的含金金刚石正名[J]. 贵州地质, 1994, 11(1): 8-26.
- [21] 江万. 贵州东部镇远地区钾镁煌斑岩的矿物学和岩石学研究[J]. 现代地质, 1995, 9(3): 351-358.

- [22] 方维萱,胡瑞忠,苏文超,等. 贵州镇远地区钾镁煌斑岩类的侵位时代[J]. 科学通报,2002, 47(4): 306-312.
- [23] 唐杰梅,顾尚义. 关于黔东南地区煌斑岩类形成年龄的述要[C]//贵州省地质学会青年工作委员会首届学术年会论文集,2013: 106-108.
- [24] 黄远成,石睿,林泽渊,等. 贵州镇远苍蒲塘钾镁煌斑岩管发现及找矿意义[J]. 贵州地质,2015,32(1): 32-36.
- [25] 饶家荣. 湖南原生金刚石矿深部构造地质背景及成矿预测[J]. 湖南地质,1999, 18(1): 21-28.
- [26] 盛学庸. 试谈贵州金刚石找矿的前景[J]. 中国地质,2000(2): 29-32.
- [27] CHEN J F, JAHN B M. Crustal evolution of southeastern China: Nd and Sr isotopic evidence[J]. *Tectonophysics*, 1998, 284(1/2): 101-133.
- [28] 马文运. 沅江流域宝石级金刚石砂矿特征[J]. 湖南地质,1989, 8(1): 51-53.
- [29] 孙媛. 湖南沅水流域砂矿钻石的产地来源特征及其与扬子克拉通岩石圈地幔演化关系[D]. 广州:中山大学,2012.
- [30] 盛学庸. 古地面研究在金刚石原生矿找矿中的意义——兼谈贵州金刚石的找矿前景[J]. 贵州地质,1997(3): 228-234.
- [31] 张令明,王三丁,肖湘辉,等. 湖南原生金刚石矿形成条件探讨[J]. 国土资源导刊,2007, 4(3): 27-30.
- [32] 林玮鹏,丘志力,李子云,等. 湖南宁乡V号岩管煌斑岩的岩石地球化学特征[J]. 资源调查与环境,2009(3): 180-187.
- [33] 王亮,陶平. 贵州东南部含金金刚石钾镁煌斑岩找矿远景预测[J]. 地质与勘探,2012, 48(4): 775-783.
- [34] 谈逸梅,容振球. 湖南金刚石和宝石金刚石[J]. 矿物岩石地球化学通讯,1983(1): 4-6.
- [35] KING J M, MOSES T M, SHIGLEY J E, et al. Characterizing natural-color type IIb blue diamonds[J]. *Gems & Gemology*, 1998, 34(4): 246-268.
- [36] GAILLOU E, POST J E, ROST D, et al. Boron in natural type IIb diamonds: Chemical and spectroscopic measurements[J]. *Mineralogical Magazine*, 2012, 97: 1-18.
- [37] 丘志力,王琦,秦社彩,等. 湖南砂矿金刚石包裹体原位测试:对金刚石成因来源的启示[J]. 大地构造与成矿学,2014(3): 590-597.
- [38] KING J M, SHIGLEY J E, GUHIN S S, et al. Characterization and grading of natural-color pink diamonds[J]. *Gems & Gemology*, 2002, 38(2): 128-147.
- [39] KING J M, SHIGLEY J E, GELB T H, et al. Characterization and grading of natural-color yellow diamonds[J]. *Gems & Gemology*, 2005, 41(2): 88-115.
- [40] MOORE A E. The origin of large irregular gem-quality type II diamonds and the rarity of blue type IIb varieties[J]. *South African Journal of Geology*, 2014, 117(2): 219-236.
- [41] ISUNAGAWA C. 天然 II 型钻石不规则形状的成因[J]. 宝石和宝石学杂志,2001, 3(4): 4.
- [42] HAGGERTY S E. Diamond genesis in a multiply-constrained model[J]. *Nature*, 1986, 320: 34-48.
- [43] BESKROVANOV V V. 天然金刚石的生长过程[J]. 地质地球化学,1989(1): 73-74,66.
- [44] 李宗发,王砚耕. 贵州地壳发展及其演化特征[J]. 贵州科学,2011, 29(4): 52-56.
- [45] 戴传固,王敏,陈建书,等. 贵州构造运动特征及其地质意义[J]. 贵州地质,2013, 30(2): 119-124.
- [46] CLIFFORD T. Tectono-metallogenic units and metallogenic provinces of Africa[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1966, 1(6): 421-434.
- [47] STACHEL T, BREY G P, HARRIS J W. Inclusions in sublithospheric diamonds: Glimpses of deep Earth[J]. *Elements*, 2005(1): 73-78.
- [48] HAYMAN P C, KOPYLOVA M G, KAMINSKY F V. Lower mantle diamonds from Rio Soriso (Juina area, Mato Grosso, Brazil) [J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 2005, 149(4): 430-445.
- [49] TAPPERT R, STACHEL T, HARRIS J W, et al. Diamonds from Jagersfontein (South Africa): messengers from the sublithospheric mantle [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2005, 150: 505-522.
- [50] BULANOVA G P, WALTER M J, SMITH C B, et al. Mineral inclusions in sublithospheric diamonds from Collier 4 kimberlite pipe, Juina, Brazil: subducted protoliths, carbonated melts and primary kimberlite magmatism[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2010, 160: 489-510.