

DOI:10.16788/j.hddz.32-1865/P.2024.02.002

引用格式:杨献忠,肖凡,劳金秀,等. 我国原生金刚石矿找矿勘查实践与研究新进展[J]. 华东地质, 2024, 45(2): 158-172.  
(YANG X Z, XIAO F, LAO J X, et al. Progress in the exploration and research of primary diamond deposits in China[J]. East China Geology, 2024, 45(2):158-172.)

## 我国原生金刚石矿找矿勘查实践与研究新进展

杨献忠<sup>1,2</sup>, 肖凡<sup>1,2</sup>, 劳金秀<sup>1,2</sup>, 郭维民<sup>1,2</sup>, 范飞鹏<sup>1,2</sup>, 周延<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏 南京 210016;  
2. 环太平洋战略矿产资源联合研究中心, 江苏 南京 210016)

**摘要:** 2013年召开的“全国金刚石找矿勘查现场研讨会”, 标志着我国新一轮原生金刚石矿找矿勘查工作的开始。近十年以来, 原生金刚石矿找矿勘查实践与研究取得了一系列新进展: 安徽栏杆地区和辽宁瓦房店地区新增一批原生金刚石资源量, 进一步提升了我国金刚石资源保障能力; 新划分出辽宁第Ⅳ金刚石成矿带和山东平邑—费县金刚石成矿带, 在全国多个地区发现了新的找矿线索, 进一步拓展了金刚石原生矿的找矿空间; 进一步完善了构造解析-三维建模-工程验证-高分辨率遥感信息提取等综合找矿方法, 形成了深部找矿和发现隐伏岩体的新思路; 含矿岩体成因研究、金伯利岩(钾镁煌斑岩)侵位模型、金刚石原产地研究等取得了新认识; 年代学研究表明, 我国含金刚石母岩的成矿时代从古生代延伸到晚中生代, 具有显著的多期次成矿特征。此外, 文章根据近十年来金刚石找矿勘查与研究取得的新进展及存在的新问题, 提出了今后原生金刚石找矿勘查与研究的相关建议。

**关键词:** 原生金刚石矿; 金伯利岩; 辉绿岩; 找矿勘查; 原生金刚石成矿带; 新进展

**中图分类号:** P619.241; P612

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2096-1871(2024)02-158-15

天然金刚石是自然界中最坚硬的物质, 其用途非常广泛, 除了传统民用和一般工业应用等领域外, 其在信息技术、新材料、高端制造等领域具有人造金刚石无法达到的良好性能。从研究角度看, 天然金刚石来自深部地幔, 是探索地球深部及地幔演化的重要窗口<sup>[1-2]</sup>。我国具有一定规模、有计划且由正规专业队伍开展的金刚石勘查工作始于1952年, 至今已有70余年的历史。20世纪50年代初, 我国开启了第一轮金刚石找矿工作, 以寻找金刚石砂矿为主。20世纪60年代至80年代初, 金刚石找矿以砂矿与原生矿并举、以寻找原生矿为主, 山东省、辽宁省、湖南省金刚石原生矿与砂矿的发现, 基本奠定了我国金刚石矿产资源的格局。20世纪80年代末至90年代初, 我国金刚石找矿主要与国外矿业公司合资或合作, 找矿区域遍布国内大部分省区, 同

时对塔里木克拉通进行了探索, 找矿类型除了金伯利岩型外, 增加了钾镁煌斑岩型, 形成了华北克拉通以金伯利岩型金刚石矿、扬子克拉通以钾镁煌斑岩型金刚石矿为主要勘查对象的找矿思路。1990年, 原地质矿产部在苏州召开的“全国金刚石成矿预测会议”标志着我国第二轮金刚石找矿勘查的启动, 至21世纪初, 金刚石找矿取得了一批新的成果, 表明我国主要克拉通区域均具有良好的金刚石矿找矿前景, 提升了我国对于金刚石及其含矿母岩形成的地质背景和大地构造环境的研究程度。2011年, 中国地质调查局在湖南常德召开了“全国金刚石找矿工作座谈会”, 尤其是2013年7月中国地质调查局在安徽宿州召开的“全国金刚石找矿勘查现场研讨会”, 标志着我国新一轮金刚石矿找矿勘查工作的开始。之后的十年中, 我国在金刚石矿找矿

\* 收稿日期: 2023-05-11 修订日期: 2023-07-24 责任编辑: 谭桂丽

**基金项目:** 中国地质调查局“中国矿产地质志(编号: DD20221695、DD20190379)”、“华东地区江南陆块南缘等成矿带重点调查区铜锂等战略性矿产调查评价(编号: DD20230251)”和“华东地区钨锡多金属矿产资源调查(编号: DD20230029)”项目联合资助。

**第一作者简介:** 杨献忠, 1962年生, 男, 教授级高级工程师, 主要从事矿产资源调查与研究。Email: xzyang1010@sina.com。

**通信作者简介:** 肖凡, 1987年生, 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事区域成矿规律与矿产勘查研究工作。Email: xiao163fan@163.com。

勘查与基础地质研究方面至少在 6 个方面取得了显著的新进展,本文对其进行回顾与总结,提出未来金刚石找矿勘查的定位及建议。

## 1 我国原生金刚石矿的主要特征

自然界中原生金刚石矿主要产于金伯利岩、钾镁煌斑岩等超基性浅成火山岩中<sup>[3]</sup>,属于幔源型金刚石。幔源型金刚石可分为岩石圈型、下地幔型、深部榴辉岩型和深部地幔橄榄石型。岩石圈型金刚石可分为地幔橄榄岩型(或超基性岩型)、榴辉岩型和二辉辉石型;地幔橄榄岩型金刚石可再分为方辉橄榄岩型、二辉橄榄岩型和异剥橄榄岩型。不同类型母岩产出金刚石的比例不同<sup>[4-5]</sup>。

我国原生金刚石矿床多数为金伯利岩型和钾镁煌斑岩型,前者主要分布于华北克拉通,具有经济价值的矿床主要为辽宁瓦房店金伯利岩型矿田和山东蒙阴金伯利岩型矿田<sup>[6]</sup>,后者主要分布于扬子克拉通雪峰古陆及邻区,主要产地为贵州镇远、湖南宁乡和湖北大洪山,其中镇远马坪“东方 1 号”是我国最早发现的含原生金刚石矿的母岩,但规模较小,后两处产地目前均不具有工业开采价值<sup>[7]</sup>。我国次生金刚石矿(金刚石砂矿)主要分布于湖南沅水流域、辽宁瓦房店和山东郯城,在江苏苏北地区也有少量次生金刚石矿分布。

作为矿物,金刚石也产于超高压变质岩中,如在秦岭造山带东段的大别山榴辉岩<sup>[8]</sup>、北秦岭造山带榴辉岩和片麻岩中均发现了金刚石<sup>[9]</sup>。在蛇绿岩中的铬铁矿内也发现了原位金刚石,如西藏罗布莎<sup>[10-11]</sup>及当穷<sup>[12]</sup>、新疆萨尔托海<sup>[13]</sup>和内蒙古贺根山<sup>[14]</sup>等,是一种新的金刚石矿物产出类型<sup>[10,15]</sup>。在江苏张集橄榄玄武角砾岩<sup>[16-17]</sup>、广西罗城垒洞煌斑岩<sup>[18-19]</sup>等基性岩中也发现了金刚石矿物。然而,上述这些金刚石目前尚不能构成金刚石矿产,但一定程度上拓展了我国金刚石矿物的成因类型,为金刚石找矿提供了新的线索。

### 1.1 辽宁瓦房店金刚石矿田

瓦房店地区是辽宁省也是国内最大的金刚石矿田,该区金伯利岩型金刚石矿床产于华北克拉通内的辽东半岛南部、郯庐断裂带(辽宁段称为金州断裂带)西侧的次级构造单元隆起与凹陷过渡带<sup>[20]</sup>。金伯利岩的产出和分布主要受近 EW 向隐伏基底深断裂控制,EW 向基底构造是导矿构造,也

是储矿构造<sup>[21]</sup>。地表压性、压扭性 NE 向断裂控制了金伯利岩管和岩脉的延伸方向,也控制了多数岩管的边界,而 NW 向张性断裂仅控制少数金伯利岩管和岩脉的边界<sup>[6]</sup>。至 21 世纪初,该矿田已发现 24 个金伯利岩管和 88 条金伯利岩脉,共发育 112 个与金刚石成矿有关的金伯利岩体<sup>[22]</sup>。空间上,这 112 个金伯利岩体成群产出、成带分布,由北向南构成 NEE70°左右的 I、II 和 III 3 个近似平行的金伯利岩带(图 1)。

(1) I 带。位于矿田北部,长约 28 km,宽约 2 km。矿带连续性好,金伯利岩体较多且集中,分布 14 个岩管和 68 条金伯利岩脉,规模较大的有 42 号、30 号、110 号岩管和 9 号、10 号、11 号金伯利岩脉。

(2) II 带。位于矿田中部,长 15 km,宽 1~2 km。矿带内金伯利岩体集中分布于头道沟一带。带内分布 9 个金伯利岩管和 17 条金伯利岩脉,其中 50 号、51 号、68 号、74 号岩管金刚石品位较高。

(3) III 带。位于矿田南部,长约 6 km,宽约 0.5 km。矿带内发现 2 个小岩管和 4 条金伯利岩脉。

辽宁瓦房店地区金伯利岩体按产出形态可分为管状、脉状和隐伏状。金伯利岩管严格受构造控制,多数为浅成-超浅成相的侵入型和爆发型,倾角较陡。脉状金伯利岩为浅成相侵入体,产状稳定,走向 70°~80°,倾向 SE,倾角 70°~80°。金伯利岩脉多数受 NEE 向—近 EW 向密集节理带或断裂控制,走向上常呈由几条平行的脉体组成的脉带。隐伏金伯利岩的形态较复杂。金伯利岩的形成时代集中于 341~463 Ma,相当于中晚奥陶世—泥盆纪,与晚加里东期—早华力西期构造岩浆旋回的活动时期相吻合<sup>[23]</sup>。

瓦房店地区金伯利岩的岩石类型主要为斑状金伯利岩、斑状金云母金伯利岩、含碎屑金伯利岩及金伯利质凝灰岩(或角砾岩)。岩石结构类型有斑状结构、碎屑结构、细粒结构、鳞片结构和似斑状结构等;岩石构造类型有块状构造、角砾状构造、凝灰状构造、岩球状构造和流动构造等;主要造岩矿物有橄榄石和金云母,副矿物一般有含铬镁铝榴石、铬铁矿、碳硅石和磷灰石等;主要蚀变作用类型有金云母化、蛇纹石化、碳酸盐化、滑石化、硅化、绿泥石化及褐铁矿化。

### 1.2 山东蒙阴金刚石矿田

山东蒙阴金刚石矿田位于华北克拉通鲁中隆起蒙山凸起西北部、郯庐断裂带(山东境内为沂沭

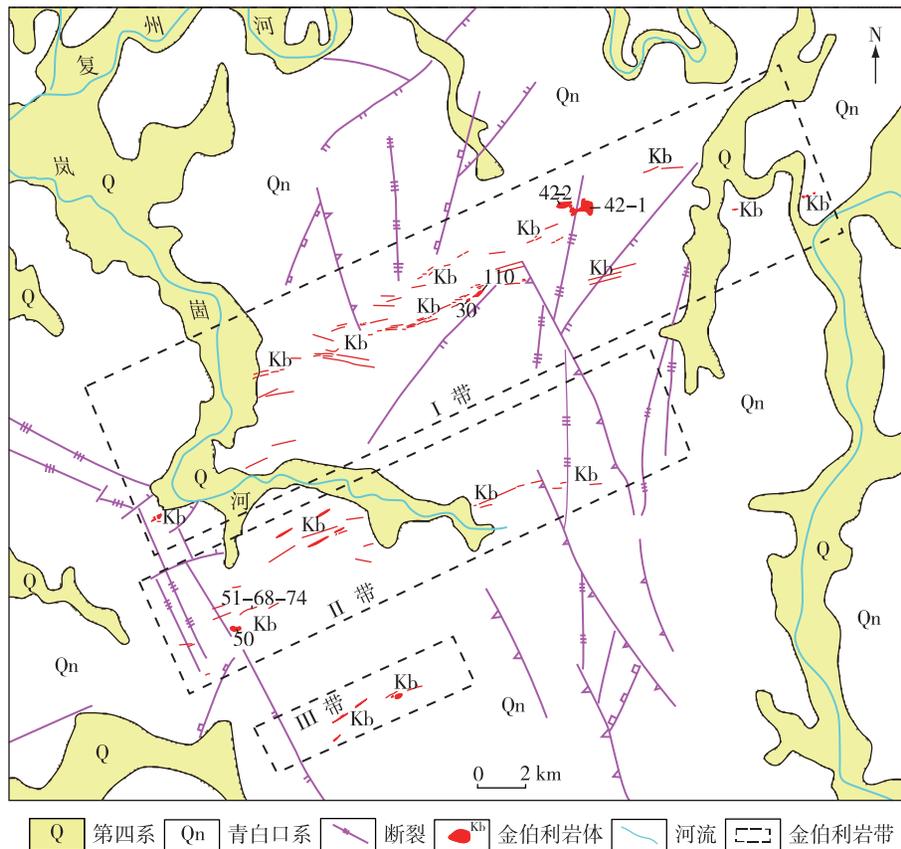


图1 辽宁瓦房店地区金伯利岩带分布图<sup>[22]</sup>

Fig. 1 Distribution of kimberlite belt in Wafangdian, Liaoning Province<sup>[22]</sup>

断裂带)西侧 60 km、上五井断裂东侧 4.5 km 处。区域地层主要有新太古代泰山岩群,寒武纪长清群、九龙群,奥陶纪马家沟群,石炭纪一二叠纪月门沟群,侏罗纪淄博群,白垩纪莱阳群、青山群,古近纪官庄群及第四系。区内主要发育 NNE 向、NE 向、NW 向和 NWW 向断裂。其中,NNE 向断裂为控制矿带南北展布的主干断裂,金伯利岩控矿构造为 NNE 向和 NW 向两组断裂的交接复合部位。

在山东郯城地区发现金刚石砂矿的基础上,先后在蒙阴地区又发现了常马庄金伯利岩带、西峪金伯利岩带和坡里金伯利岩带(图 2)<sup>[23-24]</sup>。

(1)常马庄金伯利岩带。该带位于蒙阴县城西南约 13 km 的常马庄以西,由 8 组岩脉和 2 个岩管组成,总体走向 NW345°,长约 14 km,宽约 2.5 km。各岩脉之间呈右列式排列,走向 15°~35°,与岩带总体走向呈 30°~50°的夹角。岩带中部岩体较集中,在王村有 2 个岩管产出,岩脉向北变稀,向南只有 1 条。红旗 1 号和胜利 1 号岩管位于该带内。

(2)西峪金伯利岩带。该带位于蒙阴城以北约

12 km 的西峪村附近,按岩脉展布方向可分为 NNE 向岩带和 NW 向岩带。NNE 向岩带位于新泰—垛庄断裂主断面的东北侧,长 12 km,宽 0.5~1 km,由 10 组岩脉和 8 个岩管组成。NW 向岩带位于新泰—垛庄断裂主断面的西南侧,由 5 个岩体组成,以岩脉为主。红旗 2 号、红旗 6 号、红旗 22 号和红旗 28 号岩管位于该带内。

(3)坡里金伯利岩带。该带位于蒙阴县城东北约 30 km 的岱崮镇的野店—坡里—金星头一带,由 25 组岩脉组成,未发现岩管,总体走向北东 35°~40°,长约 18 km,宽约 0.6 km。岩脉走向和岩带走向基本一致,多呈断续或侧列式排列。该带内各岩脉金刚石含量较低,均未达到工业品位。

以上 3 个含原生金刚石的金伯利岩带的总体地质特征<sup>[24]</sup>如下。

(1)如果将这 3 个含原生金刚石的金伯利岩带作为一个整体,则总走向为 55°左右,全长约 55 km,宽约 15 km,其中每一个岩带的展布方向均受东西两侧 NW 向断裂控制。

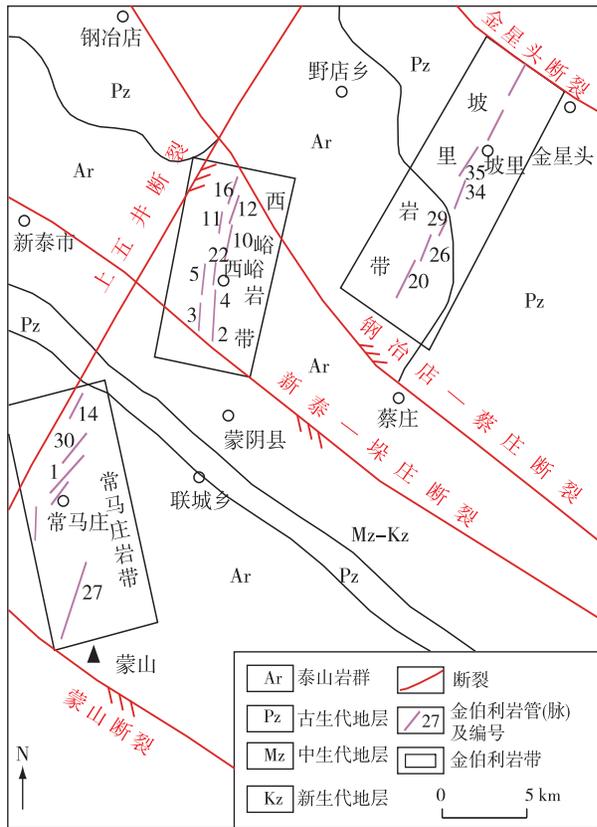


图 2 蒙阴地区常马庄金伯利岩带、西峪金伯利岩带和坡里金伯利岩带分布略图<sup>[23-24]</sup>

Fig. 2 Sketch of the Changmazhuang, Xiyu and Poli kimberlite belts in the Mengyin area<sup>[23-24]</sup>

(2)由南向北,这 3 个岩带走向逐渐向东偏转,平面上具有向北散开、向南收敛之势,其方向性、等距性及左列式展布规律比较明显,岩带之间的平均距离为 20~22 km。

(3)岩带内的岩体产出形态包括岩脉、岩管和岩床,以岩脉居多。

(4)由西向东,含矿性逐渐增高,每一个岩带的含矿性均具有南富北贫、中间富两端贫的变化规律。

蒙阴地区金伯利岩的岩石类型、岩石结构及构造、主要造岩矿物、副矿物及蚀变作用与辽宁瓦房店地区金伯利岩基本相似。

## 2 原生金刚石找矿勘查与研究主要进展

我国新一轮原生金刚石矿勘查和研究取得了较多的新进展和新成果,如与金刚石形成有关的岩石学、矿物学、地球化学、同位素年代学、指示矿物和包裹体研究等,深部探测技术及物化探成果在新

一轮找矿实践中也取得了显著成效。受篇幅所限,本文主要对近十年我国原生金刚石矿在找矿勘查方面取得的新进展、含矿母岩形成时代及成因等方面取得的新观点和新认识进行简要总结。

### 2.1 新增一批金刚石资源储量

#### 2.1.1 安徽辉绿岩型金刚石矿新增资源量

安徽宿州栏杆地区金刚石矿位于华北克拉通东南缘,郯庐断裂带西侧约 80 km 处。十余年前,在安徽栏杆地区辉绿岩、橄榄玄武岩和玄武质角砾熔岩中选获了原生金刚石。辉绿岩型金刚石矿床位于安徽省宿州市栏杆—褚栏地区老寨山,该地区圈定了 2 个强风化残积型金刚石工业矿体(C-13 和 C-15-2 矿体),金刚石矿物品位分别为 3.425 mg/m<sup>3</sup> 和 2.215 mg/m<sup>3</sup>。按资源量估算,2 个矿体累计矿物量(333 类+334 类)25.92 万 ct,矿床平均品位 3.167 mg/m<sup>3</sup>。其中 333 类矿物量 0.98 万 ct,平均品位 2.925 mg/m<sup>3</sup>;334 类矿物量 24.94 万 ct,平均品位 3.177 mg/m<sup>3</sup><sup>①</sup>。这是我国首次提交辉绿岩型金刚石资源储量的矿床<sup>[25]</sup>,有望成为我国新的金刚石资源基地。该金刚石矿床的发现,不仅为安徽省提供了重要的战略性资源保障,也为我国金刚石找矿理论研究提供了新的思路和方向,将我国原生金刚石矿床类型从金伯利岩型、钾镁煌斑岩型拓展到了碱性基性岩型。

#### 2.1.2 辽宁 110 号岩管新增资源量

辽宁 110 号岩管是瓦房店地区金伯利岩型金刚石矿床,也是我国在该地区隐伏矿体中发现的首例原生金刚石矿床。该岩管位于已知 30 号岩管不到 50 km 的地下 860 m 处,直径约 100 m,高约 300 m。早期估算,该岩管的资源量(334 类)为 0.6 万 ct,平均品位为 0.01 ct/t。对大李屯 110 号、38 号和 111 号岩管进行勘查,提交金刚石资源量(334 类)29.04 万 ct<sup>②</sup>,后续对 110 号岩管东西两侧延伸部位进行钻探工程控制,发现 111-1 号隐伏矿体,提交资源量(334 类)4.67 万 ct<sup>③</sup>。经钻探再次在其东南部发现新的岩脉,且深部存在 3 层金伯利岩,新增资源量(334 类)2.29 万 ct<sup>④</sup>。

辽宁瓦房店金伯利岩矿田的资源量占我国金刚石资源量的一半以上,新增的资源量将进一步夯实瓦房店地区作为金刚石资源基地的基础。

### 2.2 划分了新的金刚石成矿带

#### 2.2.1 辽宁第Ⅳ金刚石成矿带

2016—2018 年,在距离瓦房店金刚石矿产区

第Ⅰ金刚石成矿带中心北约 30 km、具有类似基底及构造属性的瓦房店永宁凹陷地区,先后发现 9 粒金刚石及金刚石指示矿物镁铝榴石及铬铁矿等,确定永宁地区为辽宁省第Ⅳ金刚石成矿带<sup>[26-27]</sup>。

该带东西长约 10 km,宽约 0.6 km,发现的金刚石主要位于永宁西部官财沟地区,而东部潘家沟地区尚未发现金刚石。西部官财沟地区钻孔岩石显微岩相学研究表明,该地区主体岩性为中性岩石,岩石中橄榄石+金云母含量为 10%以上,且橄榄石及金云母具有多世代性,出现“橄榄石+金云母+石榴石”与“斜长石+辉石+角闪石”不平衡的矿物组合,橄榄石具有碎斑结构。岩石中见金伯利岩角砾,中性岩石在上升过程中捕获了早先已经形成且就位金伯利岩并与其发生熔融混合作用,暗示其深部可能存在含金刚石的金伯利岩体<sup>[28]</sup>。东部潘家沟地区探槽内见大量辉绿岩,岩石中发现大量铬铁矿,研究表明该地区的铬铁矿粒径、化学成分、种属类型(镁铬铁矿)及形成温度,均与辽宁典型金伯利岩中的铬铁矿十分相似,推测该地区铬铁矿与金刚石具有密切的关系<sup>[27]</sup>。辽宁永宁地区第Ⅳ金刚石成矿带的发现,为进一步开展金刚石原生矿找矿拓展了空间,也表明该带具有良好的金刚石成矿潜力和找矿前景。

### 2.2.2 山东平邑—费县金伯利岩成矿带

根据常马庄、西峪和坡里金伯利岩带的分布规律,初步认为长约 12 km、宽约 1 km 的平邑—费县一带可能成为山东省新的金刚石成矿带<sup>[24]</sup>,主要依据如下:① 平邑—费县地区具有与蒙阴地区相似的大地构造背景;② 金伯利岩和钾镁煌斑岩的分布具有集群效应<sup>[29]</sup>,费县已发现钾镁煌斑岩管和煌斑岩脉<sup>[30]</sup>;③ 平邑—费县之间的大井头地区周边存在磁异常,南部小埠岭经钻孔证实存在隐伏岩体;④ 大井头钾镁煌斑岩岩管中已发现金刚石及镁铝榴石、含铬透辉石等指示矿物信息。⑤ 平邑—费县东南部郯城地区发现了大颗粒金刚石及金刚石砂矿<sup>[23]</sup>。

最新研究<sup>[31]</sup>表明,山东郯城地区出露的一套火山岩为安山质岩石,岩石中的斜长石具有复杂环带结构,橄榄石含量 $>20\%$ ,并具有明显的 3 个世代特征以及不平衡的矿物组合,暗示该地区安山岩岩浆与金伯利岩岩浆发生了混合作用,这对在平邑—费县金刚石成矿带东南部郯城金刚石砂矿区寻找原生金刚石矿具有启示意义。

## 2.3 发现找矿新线索

除了在辽宁第Ⅳ金刚石成矿带、山东平邑—费县金刚石成矿带中发现含矿岩体以及在湖南桃源江石桥、苏北睢宁四山村、广西垒洞等地区出土金刚石外,近几年的找矿实践过程中,在其他地区也发现了新的找矿线索。

### 2.3.1 苏北铜山地区发现金伯利岩管

通过路线地质踏勘、地质剖面测量、物探测量和探矿工程揭露,在苏北铜山地区西村发现了金伯利岩管,北村发现了金伯利岩脉,周边附近发现了橄榄金云母岩、煌斑岩、橄榄玄武玢岩等暗色岩脉数十余条,构成 NE 向金伯利岩-暗色岩条带<sup>[32-33]</sup>。西村金伯利岩管平面上呈 NE 向近似椭圆状展布,长轴约 130 m,短轴约 80 m,呈上宽下窄的漏斗状,中间沿构造薄弱部位呈枝叉状侵入至岩层中。岩石类型主要为青灰色含角砾金伯利岩和紫红色褐铁矿化含角砾金伯利岩,岩石风化强烈,岩体边部至内部,岩性依次为紫红色含角砾金伯利岩和青灰色金伯利岩。北村金伯利岩脉走向多呈 NE  $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$ ,其次为  $280^{\circ}$ ,倾角近直立,宽 1~2 m,少数可达 14.4 m,均呈岩墙状侵入至围岩中。但是,西村金伯利岩管是否含矿?是否达到工业品位?还需进一步论证。

### 2.3.2 辽宁瓦房店地区发现 kb113 号岩脉

截至 21 世纪初期,辽宁已发现 24 个金伯利岩管和 88 条金伯利岩脉共 112 个与金刚石成矿有关的金伯利岩体<sup>[24]</sup>。近期,在辽宁瓦房店岚崮山地区发现了含角砾金伯利岩并进行了槽探揭露,发现这条岩脉与其他已知岩脉并非同一条岩脉,是新发现的金伯利岩脉。按照辽宁省第六地质大队对瓦房店地区金伯利岩管(脉)命名的顺序,将其命名为“kb113 号”<sup>①</sup>。该金伯利岩脉为灰色,风化面呈黄色,角砾状,角砾成分为灰岩,呈次椭圆状,直径 0.6~1 cm,角砾含量 30%。金伯利岩斑晶呈碳酸盐化橄榄石假象,岩石整体发生强烈的碳酸盐化。岩脉走向  $60^{\circ}$ ,呈直立状穿插于青白口纪南芬组第三段灰色页岩中。该金伯利岩脉也是辽宁金刚石找矿史上间隔时间较长的一次新发现。根据金伯利岩成群成带的分布特征及辽宁瓦房店 3 个金刚石成矿带中金伯利岩的分布规律, kb113 号岩脉附近是否存在其他岩脉?深部是否与已知岩管相连?含矿性如何?还需进一步评价。

### 2.3.3 湖南桃源沉凝灰岩中发现金刚石

湖南地区除沅水流域发现 4 个次生金刚石砂矿外,仅在宁乡云影窝地区发现不具备工业品位的含金刚石(钾镁)煌斑岩<sup>[34]</sup>,至今湖南地区原生金刚石矿未能取得重大的找矿新进展。

在湖南常德外围桃源县理公港地区白垩纪紫红色粉砂质泥岩、泥质粉砂岩红盆中发现透镜状火山岩夹层,经室内岩矿鉴定其为沉凝灰岩、凝灰质角砾岩,岩石中不仅发现了金伯利岩的岩屑,还发现了 G10 镁铝榴石、金云母等典型金刚石指示矿物<sup>[35]</sup>。选矿试验表明,1 m<sup>3</sup> 沉凝灰岩和 1 m<sup>3</sup> 凝灰质角砾岩样品中,分别选获 26 颗和 5 颗金刚石,前者金刚石粒径 0.3 mm 左右,后者金刚石粒径 0.25~0.32 mm,黄绿色,主要为六面体-八面体晶型<sup>⑥</sup>。这在常德地区寻找原生金伯利岩提供了重要信息,建议下一步追索红盆中的次生金刚石来源,可能要跳出红盆并在远离红盆的外围寻找超铁镁质岩体<sup>[36]</sup>。

## 2.4 找矿勘查新方法

金刚石找矿方法可分为直接找矿法和间接找矿法。直接找矿法用肉眼直接发现,间接找矿法通过金刚石矿床具有的信息、特征进行找矿。寻找金伯利岩管和发现金刚石的传统方法主要有地质路线法、重砂法、地球物理法、地球化学法和工程验证法<sup>[23]</sup>。目前,我国金刚石找矿方法趋于综合化,多兵种、多手段交叉或联合作战,尤其地球物理手段及其精细化解析,大大提高了勘查水平和工作效率。

### 2.4.1 构造解析-三维建模-工程验证取得找矿新突破

在辽宁 50 号岩管周边开展了构造形迹野外调查<sup>[21]</sup>、构造期次及其导矿构造和破矿构造的全面解析<sup>[37]</sup>及金伯利岩侵位机制分析<sup>[38]</sup>,表明构造盆地和水平断裂是开展金刚石找矿工作值得注意的部位<sup>[39]</sup>。对 50 号岩管、42 号岩管和 30 号岩管的三维建模显示<sup>[22]</sup>(图 3),50 号岩管平面呈西大东小的蝌蚪状,东西向剖面为西端翘起、东端有拖尾的靴子状,“鞋跟”在西、“鞋尖”在东,南北向剖面为略向南倾的厚板状。结合 42 号岩管和 30 号岩管标高,认为瓦房店金刚石成矿带存在逆冲推覆构造,50 号金伯利岩管位于上盘,属于外来系统,底部被推覆面切断,附近还应该存在其对应的下部,应在东南部注意寻找可能的原地岩管。50 号岩管周边推覆构

造的运动方式表现为由 SEE(110°~120°)向 NWW(290°~300°)低角度逆冲滑移<sup>[43]</sup>,预测在 50 号岩管约 120°方向、距离 1 km 左右、深度约 300 m 以下处,在下盘还应存在与 50 号相对应的金伯利岩管(即 50-1 号)<sup>[22]</sup>。

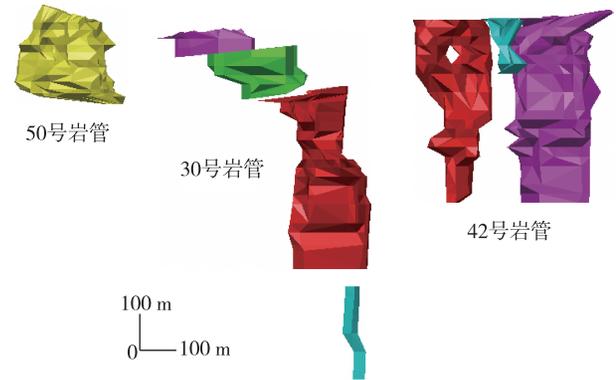


图 3 30 号、42 号、50 号岩管三维模型图<sup>[22]</sup>

Fig. 3 Three-dimensional model of No. 30, No. 42 and No. 50 kimberlite pipe<sup>[22]</sup>

结合物探成果,辽宁省第六地质大队有限责任公司在辽宁瓦房店 50 号岩管 SEE 112°方向约 1 115 m 处实施了 ZK2008 钻孔来验证 50-1 号金伯利岩目标体,在孔深 277.52~286.92 m 段成功发现 9.40 m 厚的金伯利岩,并在薄片内发现 1 粒直径近 1 mm 的纯净金刚石,取得了瓦房店地区原生金刚石找矿重大突破。从成矿带内金伯利岩管(脉)的分布位置看,50 号和 51 号、68 号和 74 号等十几个金伯利岩管(脉)均位于推覆构造上盘的外来体系中,表明深部找矿潜力巨大。根据逆冲推覆构造研究取得的认识,认为在 50 号岩管 SEE 3~5 km 的区域内,在主逆冲断层面之下应存在第二段 Kb50-2 矿体<sup>[40]</sup>。构造解析-三维建模-工程验证成功发现了 50 号金伯利岩管深部隐伏矿体,为瓦房店金刚石成矿带深部隐伏金伯利岩找矿指明了新方向。

### 2.4.2 高分辨率遥感信息成功识别金伯利岩管或火山机构

高分辨率遥感信息识别金伯利岩管或火山机构是通过高分辨率遥感影像进行处理和解译,识别出地表的金伯利岩管或火山机构特征,从而为找矿提供线索,是一种具有前景的找矿新方法。高分辨率遥感影像具有空间分辨率高、覆盖范围广、更新周期短、成本相对低等优点,可提供细致和实时

的地表信息,有利于发现金伯利岩管或火山机构并辨识其形态、结构特征。高分辨率遥感影像可以与其他类型的遥感数据(如光谱数据、雷达数据、重力数据等)融合,提高金伯利岩管或火山机构的识别精度和可信度。高分辨率遥感信息识别金伯利岩管或火山机构可作为一种快速有效的找矿方法,在大范围内筛选出潜在的岩管或火山机构,为后续地质调查和钻探工作提供参考。例如,安徽栏杆地区辉绿岩高分辨遥感影像异常提取表明,Al-OH异常与辉绿岩体吻合较好,与硅酸盐中Fe有关的铁染异常和辉绿岩脉有关,与铁氧化物有关的铁染异常主要分布于辉绿岩脉的上盘,碳酸根异常分布于辉绿岩体上部和辉绿岩脉的下盘<sup>[41-42]</sup>。

在充分辨析金伯利岩火山地貌形态的基础上,利用卫星影像识别技术,还可建立卫星影像识别标志,在金刚石矿靶区内有效缩小目标。例如,有学者以博茨瓦纳两个较著名的金刚石矿为例,对山东临沂和湖南常德地区进行预测,认为这两个地区可能存在原生金伯利岩管<sup>[43]</sup>,该预测的准确性还有待进一步验证。

## 2.5 成矿作用研究取得的新认识

### 2.5.1 贵州镇远马坪岩体岩石类型再厘定

受早期只有金伯利岩才产出金刚石的思维影响,1965年,我国将最早发现的含原生金刚石的岩体(镇远马坪“东方一号”岩体)定名为金伯利岩。1976年,在澳大利亚阿尔盖发现钾镁煌斑岩及其原生金刚石矿后,经过对比分析,将镇远地区包括马坪“东方一号”在内的类似岩石均改称为钾镁煌斑岩。最新研究表明,镇远马坪地区含金刚石母岩更接近典型金伯利岩<sup>[44-45]</sup>,镇远白坟地区的岩体类似于澳大利亚典型钾镁煌斑岩,有学者建议将镇远马坪地区“东方一号”定名为角砾凝灰质金伯利岩,将白坟地区的岩体定名为钾碱镁闪石-透辉石-金云母钾镁煌斑岩<sup>[45]</sup>。镇远地区兼有金伯利岩和钾镁煌斑岩特征,表明该地区乃至整个黔东南地区具有较好的金刚石原生矿找矿潜力。

### 2.5.2 金伯利岩(钾镁煌斑岩)侵位模式新认识

在辽宁瓦房店地区,金伯利岩是由上地幔岩浆在一定封闭条件下,受构造与岩性双重控制,多期次侵入与爆发交替而形成。基于该认识建立了金伯利岩的成因模式:软流圈具有较高的氧逸度和较高的密度,同时具有流变性,含金刚石的金伯利岩

上升至软流圈,通过渗滤熔体的侵蚀作用而进入岩石圈,最终形成金伯利岩<sup>[20]</sup>,这一模式为瓦房店地区周边及深部找矿提供了借鉴。

在山东蒙阴地区,金伯利岩中的椭圆形隐爆角砾具有定向排列特征,显示沿上升管道的岩浆流呈螺旋式上升状态<sup>[46]</sup>。因此,经典的中心式火山喷发成矿模式不适合解释山东蒙阴地区金伯利岩的成因。在对含金刚石金伯利岩不同岩石类型重新划分的基础上,提出了中心式-裂隙式复合潜火山隐爆岩浆成矿新模型<sup>[47]</sup>,将进一步拓展蒙阴地区的找矿视野。

在贵州镇远马坪地区,以往的金伯利岩矿勘查工作是依据传统的“高脚杯”型金伯利岩管形成模式展开的,认为马坪地区岩管的火山口相和火山道相大部分已被剥蚀,目前只剩下根部相。研究<sup>[48]</sup>表明,马坪地区岩体的侵位方式并不是传统的“火山口相-火山道相-根部相”直立式模型,而是受到广西运动由北东向南西推进的构造应力影响,岩浆侵位过程中具有一定的角度,沿断裂逐步上升,且晚期含金刚石较富的橄榄钾镁煌斑岩叠加在早期金云母钾镁煌斑岩形成的通道中。由此推测,在马坪岩体的东南部存在较大的隐伏岩体<sup>①</sup>。

根据我国主要的含原生金刚石母岩(金伯利岩、钾镁煌斑岩)的喷发时代及其构造背景研究,结合华北和华南大陆岩石圈结构及其演化过程,在探讨中国原生金刚石的有利形成和保存条件、分析含金刚石母岩岩浆所经历的从深部地幔作用到浅部侵位过程的基础上,有学者提出了中国金伯利岩(钾镁煌斑岩)“多期叠加的蘑菇生长方式”的岩浆侵位新模型(图4)<sup>[49]</sup>,认为金伯利岩(钾镁煌斑岩)岩浆从源区到地表要穿过岩石圈,离不开深大断裂、大断裂、较小级别的断裂等多级别断裂作为其快速向上运移的通道,从而构成多级岩浆管道系统,产生多种类型的产状(岩墙、岩席、岩脉、岩管等)和复杂的侵位关系,且同一地区后期岩浆更易顺着早期岩浆喷发形成的薄弱带上升,晚期岩浆作用可以在早期露头及其周围重复出现,产生多期岩浆活动叠加及多阶段岩浆演化,并具有多种产状类型,这一认识为深部找矿提供了新思路。

### 2.5.3 金刚石原产地研究对深部地质环境的制约及找矿启示

在对比分析我国辽宁、山东和湖南3个主要金刚石产区的金刚石矿物基本特征、表面微形貌与内

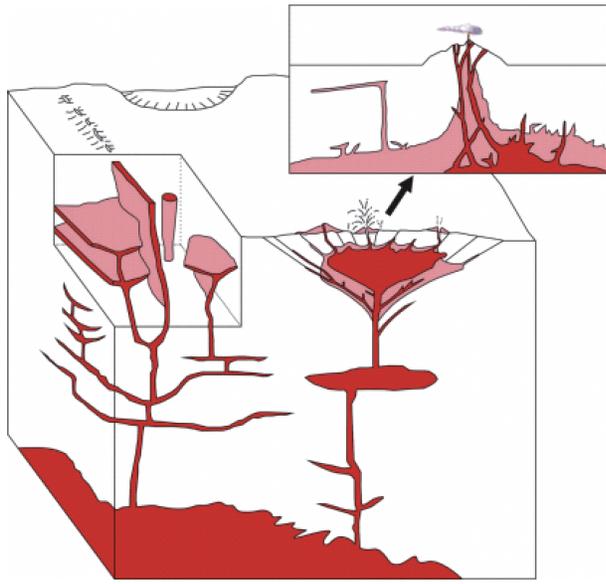


图 4 “多期叠加的蘑菇生长方式”的金刚石母岩岩浆侵位示意图<sup>[49]</sup>

Fig. 4 Schematic illustration for the diamond-bearing parental magma emplacement of “multistage mushroom growth style”<sup>[49]</sup>

部生长特征、光谱学特征、包裹体、碳同位素特征的基础上,基本建立了我国金刚石产地来源的要素组合判别指标体系<sup>[50]</sup>,取得的主要认识如下:

(1)金刚石晶体形态、表面微形态统计及内部生长结构的拉曼光谱特征和电子顺磁共振研究表明,在金刚石形成过程中,辽宁金刚石形成的地质环境最稳定,山东金刚石形成的地质环境变化最大,而湖南金刚石形成的地质环境介于两者之间。

(2)金刚石颜色统计及紫外线-可见吸收光谱和红外光谱分析表明,辽宁、山东和湖南金刚石均以无色-白色系为主,其次为褐色系。湖南金刚石表面有褐色和绿色色斑,而辽宁和山东金刚石色斑较少见。山东金刚石的类型较丰富,IaA型、IaB型和IIa型金刚石的比例高于辽宁和湖南。辽宁金刚石的形成温度低于山东和湖南金刚石,但湖南金刚石形成过程中环境氮浓度的变化大于山东和辽宁金刚石。

(3)金刚石包裹体研究表明,辽宁和山东金刚石包裹体以P型(橄榄岩型组合)为主,湖南金刚石包裹体以P型和E型(榴辉岩型组合)为主。湖南金刚石内针管状溶蚀孔包裹体发育,显示扬子克拉通部分金刚石经历的应力和熔融作用比华北克拉通更强烈。

山东金刚石形成时的地幔温度为1 050~1 500 °C、压力为4.50~9.20 GPa,辽宁金刚石形成时的地幔温度为1 082~1 367 °C、压力为5.00~7.47 GPa,湖南金刚石形成时的地幔温度为1 109~1 327 °C、压力为4.05~5.83 GPa,表明金刚石形成时扬子克拉通岩石圈温度略高于华北克拉通,但形成的深度稍浅于华北克拉通。

(4)碳同位素研究表明,辽宁金刚石 $\delta^{13}\text{C}$ 值为-6.02‰~-2.57‰,平均值为-3.90‰;山东金刚石 $\delta^{13}\text{C}$ 值为-5.60‰~-2.01‰,平均值为-3.64‰;湖南金刚石 $\delta^{13}\text{C}$ 值为-8.55‰~-2.99‰,平均值为-6.11‰。这表明华北克拉通碳同位素组成与P型金刚石一致,而扬子克拉通碳同位素组成与E型金刚石近似。

上述成果为我国开展扬子克拉通金刚石找矿勘查提供了新依据,为认识华北克拉通和华南陆块的形成与演化等重大地质问题提供了新信息。

## 2.6 成岩成矿年代学研究新进展

### 2.6.1 蒙阴地区金伯利岩形成期次

山东蒙阴地区常马庄岩带中红旗1号岩体附近的金伯利岩脉切穿了辉绿岩脉(图5(a)),坡里岩带K24号金伯利岩脉赋存于辉绿岩脉中(图5(b))(常马庄岩带与坡里岩带位置见图2)。通过对金伯利岩侵入的最晚地层和辉绿岩锆石U-Pb法测年、新鲜金云母K-Ar法测年,认为蒙阴地区金伯利岩形成时代除前人认为的古生代<sup>[50-51]</sup>外,还可能存在晚三叠世之后、中侏罗世之前(205~175 Ma)和早白垩世莱阳群之后、晚白垩世固城组之前(121~79.1 Ma)<sup>[51-52]</sup>两期成岩事件。

### 2.6.2 苏北地区含金刚石橄榄玄武质角砾岩的形成时代

苏北睢宁县四山村橄榄玄武角砾岩因选获原生金刚石而受到广泛关注。南部较大岩管具有中心式喷发特征,北部3个小岩管在平面上具有裂隙式喷发特征,其主体岩性为橄榄玄武质角砾岩,角砾成分包括橄榄玄武岩、灰岩、凝灰岩、闪斜煌岩和片麻岩等。锆石U-Pb法测定的年龄为146~125 Ma<sup>[53]</sup>,属早白垩世早期。

### 2.6.3 广西罗城地区含金刚石煌斑岩管的形成时代

查明广西罗城垌洞地区存在两期煌斑岩:早期侵入时间为255.5 Ma<sup>[18]</sup>,晚期侵入时间为

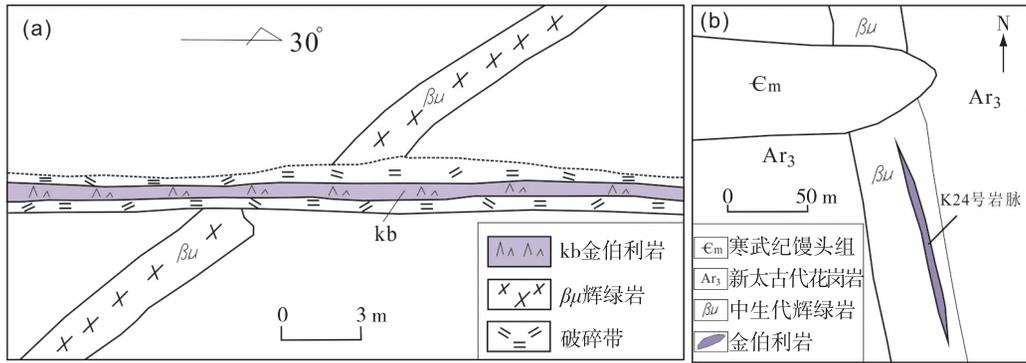


图5 蒙阴红旗1号(a)、K24号(b)金伯利岩脉与辉绿岩脉相互关系素描图<sup>[51-52]</sup>

Fig. 5 Sketch of relation between kimberlite vein and diabase vein at Hongqi No.1(a) and No.K24(b) in Mengyin area<sup>[51-52]</sup>

100 Ma<sup>[19]</sup>,晚期煌斑岩中选获原生金刚石。研究表明,白垩纪煌斑岩具有高钾、富碱特征,含金刚石煌斑岩的形成与白垩纪(100 Ma)华南板块处于陆内伸展拉张环境,软流圈物质上涌过程中携带含金刚石的熔融地幔组分有关。

### 3 讨论

#### 3.1 关于含金刚石“非金伯利岩(非钾镁煌斑岩)”母岩问题

##### 3.1.1 含金刚石基性岩类

金伯利岩(钾镁煌斑岩)的幔源母岩浆具有多阶段演化、多级分段运移以及多种产状类型的特点。因此,晚期的基性-超基性岩浆活动也有可能捕获隐伏的含金刚石的早期金伯利岩(钾镁煌斑岩)或赋存金刚石的沉积地层。这样的偶然事件导致了一种非常规的现象,即“非金伯利岩(非钾镁煌斑岩)”岩体也偶见金刚石<sup>[49]</sup>,当捕获的金刚石含量较多并达到工业品位时也能成矿,如安徽栏杆辉绿岩。

化学气相沉积法(CVD)合成金刚石的实验研究表明,在衬底温度 900~1 200 °C、压力 10~40 KPa和一定的原子氢浓度及含碳基团浓度条件下,可以合成人造金刚石。目前,已经合成出单晶最大尺寸 12.5 mm×12.5 mm、最大重量超过 10 ct 的金刚石,且品质与 IIa 型金刚石单晶相近<sup>[54]</sup>。与金伯利岩(钾镁煌斑岩)中天然金刚石形成时的地幔温度>1 000 °C、压力为数个 GPa 以上相比,CVD 合成金刚石所需的温度虽然略低,但压力却低得多。这对于理解来源于低压环境、形成深度较浅的(偏碱性)基性岩(如辽宁永宁地区辉绿岩、湖南桃

源江石桥辉绿岩、安徽栏杆辉绿岩、苏北睢宁四山村橄榄玄武角砾岩等)含有金刚石可能具有一定的启示,但也不排除这些岩石中的金刚石属于二次捕获的可能性。

##### 3.1.2 变质岩和蛇绿岩中的原生金刚石

目前,我国原生金刚石矿床产出类型仅有金伯利岩型和辉绿岩型达到工业品位,前者主要分布于辽宁瓦房店地区和山东蒙阴地区,后者主要分布于安徽栏杆地区,其他岩体(如钾镁煌斑岩、煌斑岩、玄武质角砾岩等)中也有少量原生金刚石产出,但暂不具有工业开采价值。我国也有少量原生金刚石产于超高压变质岩(榴辉岩、片麻岩)和蛇绿岩内的铬铁矿中,虽然还不具有工业价值,但开展矿物学特征研究,对揭示其形成过程中的元素分馏、温压条件、熔体/流体的组成及性质等具有重要意义<sup>[15]</sup>。

#### 3.2 关于原生金刚石矿床成因研究与找矿勘查方向的建议

自从公元前 8 世纪在印度河流冲积层中发现金刚石以来,金刚石的发现史已有 2 000 余年。19 世纪 60 年代在南非发现第一个含金刚石的金伯利岩管以来,原生金刚石的找矿勘查至今已有 150 余年。我国开展金刚石找矿工作始于 20 世纪 50 年代,至今只有 70 余年。20 世纪 60 年代,我国在贵州镇远马坪地区发现了第一个含金刚石岩管,此后陆续在山东蒙阴地区和辽宁瓦房店地区发现原生金刚石矿床。前人在总结我国原生金刚石成矿规律的基础上,对我国原生金刚石找矿勘查与研究方向提出了很多建议<sup>[15,45,55]</sup>。本文基于近十年来金刚石找矿勘查与研究取得的新进展及存在的新问题,进一步

提出三点建议。

### 3.2.1 加强塔里木克拉通金刚石勘查

塔里木克拉通是我国三大克拉通之一,克拉通面积 70 余万 km<sup>2</sup>。塔里木克拉通是新元古代末期塔里木旋回形成的古老克拉通,最老岩石年龄 > 3 200 Ma。克拉通基底硬化程度较均一,沉积盖层发育并具有三重结构,由前震旦纪结晶基底、震旦系和古生界盖层及中生界后地台盖层组成,产状较平缓,基底厚 5~15 km,深大断裂发育并具有多条次级断裂,构成一系列断隆和拗陷,火山喷发和岩浆侵入活动较强烈,已发现金伯利岩及与金伯利岩具有紧密联系的暗色岩。与国内外其他克拉通相比,塔里木克拉通具备形成金伯利岩型金刚石原生矿的地质前提<sup>[56-57]</sup>。

1945 年及 20 世纪 80 年代,先后在和田地区喀拉喀什河下游阶地中发现 7 颗金刚石(最大 1.5 ct,最小 0.1 ct)并选获铬透辉石、镁铝榴石、镁铬铁矿、镁橄榄石、碳硅石等指示矿物。在巴楚瓦吉里塔格地区发现 6 个角砾云母橄榄岩管、金伯利岩管及 32 条岩脉,并选获 7 颗原生金刚石及大量指示矿物。在库鲁克塔格地区、阿尔金山地区发现了与金伯利岩具有成因联系的暗色岩,并选获金刚石及指示矿物。

相比于华北克拉通和扬子克拉通,塔里木克拉通具有规模的金刚石矿找矿勘查几乎从未开展过,以往及近十年的金刚石找矿勘查范围也未覆盖该地区。因此,建议加强塔里木克拉通岩石圈地幔的演化及深部地质过程研究,开展成矿规律研究与预测,调查金伯利岩及其他暗色岩系的分布情况,并开展含矿性研究。

### 3.2.2 开展湖南原生金刚石的溯源

湖南四大水系尤其是沅水流域,金刚石的发现历史至少可追溯到 100 多年前。新中国成立后的 50 年代后期—60 年代初,在沅水中下游发现并探明 4 个具有经济价值的金刚石砂矿,此后针对湖南地区乃至整个扬子克拉通地区的原生金刚石找矿工作几乎从未间断。期间曾在湖南宁乡地区发现了含金刚石的钾镁煌斑岩,但目前尚不具备工业价值。学者们提出过众多原生金刚石成矿观点和找矿勘查建议,但仍然不能很好地解释湖南 4 大砂矿的成因。湖南金刚石砂矿的来源至今仍是一个待解的“谜”<sup>[36]</sup>。

除已经探明的 4 个金刚石砂矿外,湖南金刚石

出地点众多且范围较广,发现原生金刚石矿床一直是金刚石人的追求和梦想。因此,建议加强成矿新理论探索和找矿新技术运用,对以往地质资料进行二次开发并重新厘定,深层次分析金刚石及指示矿物精细结构从而探索其来源。将印支期—燕山期金刚石原生矿作为主攻方向,分析第四纪冰川运动对湖南地区地形地貌的影响和改造,尽早实现湖南原生金刚石的找矿突破。

### 3.2.3 提升金刚石矿种的战略地位

目前,仅有个别金刚石找矿队伍在有限的经费支持下开展少量探索性的找矿勘查,与金刚石有关的研究也缺乏经费资助,因此规模性的金刚石找矿勘查与研究基本处于停滞状态。

金刚石资源在全球仅集中分布在澳大利亚、加拿大、俄罗斯、南非、博茨瓦纳、刚果(金)和巴西等少数国家,而这些国家的金刚石总资源量占据了全球金刚石资源量的 90%<sup>[58]</sup>。中国金刚石资源较匮乏,产量仅占全球金刚石产量的 0.1%,资源濒临枯竭,金刚石主要采矿区大部分停产。目前,我国查明的金刚石资源量仅 3 000 余 kg,其中基础储量仅 2 000 余 kg。与 2010 年相比,目前我国金刚石查明的资源量下降了 15%左右。我国金刚石资源远不能满足民用和一般工业尤其是空间技术和尖端工业的消费需求。鉴于天然金刚石在国民经济发展和国家安全中的重要性<sup>[59]</sup>,建议相关部门将金刚石提升为我国战略性非金属矿种,加大公益性风险投入力度,力争早日实现金刚石找矿突破。

## 4 结论

(1)近十年来,我国原生金刚石矿在找矿勘查实践方面取得了新进展:新增安徽栏杆地区辉绿岩型和辽宁瓦房店地区 kb110 岩管金伯利岩型原生金刚石资源,新划分了辽宁第Ⅳ金刚石成矿带和山东平邑—费县金刚石成矿带,在苏北铜山、辽宁瓦房店和湖南桃源地区发现新的找矿线索,为我国提供资源保障的同时,拓展了金刚石原生矿找矿空间。

(2)我国原生金刚石矿研究也取得了新进展:在成矿作用和矿床成因方面,重新厘定了贵州镇远马坪岩体的岩石类型,建立了金伯利岩(钾镁煌斑岩)侵位综合模型,为隐伏岩体的发现提供了新思路;在金刚石原产地研究方面,建立了金刚石产地来源的要素组合判别指标体系;在含金刚石岩体成

矿时代研究方面,我国含金刚石岩体的成矿时代从古生代延伸到晚中生代多期次并存;在新技术新方法方面,构造解析-三维建模-工程验证为深部找矿提供范例。此外,利用高分辨率遥感信息识别金伯利岩管或火山机构取得了较显著的找矿效果。

(3)根据近十年来原生金刚石矿找矿勘查与研究取得的新进展及存在的新问题,建议加强塔里木克拉通地区原生金刚石找矿勘查,进一步开展湖南金刚石溯源研究,提升金刚石矿种在我国战略地位。

**致谢:**新一轮金刚石找矿勘查实践及研究进展是在中国地质调查局组织与领导下,在我国相关金刚石专业队伍、高校和科研院所以及企业积极参与下取得的。原地质矿产部部长宋瑞祥先生给予了极大的关心与支持,成文过程中得到中国地质调查局南京地质调查中心杨杰工程师的大力帮助,匿名评审专家提出了宝贵的修改建议和意见,特此致谢!

## 注释

- ① 安徽省地勘局第二水文工程地质勘察院.安徽省宿州市栏杆—褚栏地区金刚石普查报告[R].芜湖:安徽省地勘局第二水文工程地质勘察院,2017.
- ② 辽宁省第六地质大队.辽宁省瓦房店地区金刚石隐伏矿体普查[R].大连:辽宁省第六地质大队,2009.
- ③ 辽宁省第六地质大队.辽宁省瓦房店市大李屯地区金刚石隐伏矿体普查[R].大连:辽宁省第六地质大队,2010.
- ④ 中国地质调查局南京地质调查中心.华北和扬子地区金刚石矿产调查成果报告[R].南京:中国地质调查局南京地质调查中心,2019.
- ⑤ 常德市天悦矿产投资管理有限公司.湖南省桃源县茨树垭金刚石原生矿勘查(阶段性)地质报告[R].常德:常德市天悦矿产投资管理有限公司,2016.

## 参考文献

- [1] 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):125-131.  
LU F X, ZHENG J P, CHEN M H. Discussion on the formation conditions of diamond [J]. Earth Science Frontiers, 1998, 5(3): 125-131.
- [2] 杨经绥.大洋地幔橄榄岩-铬铁矿中的金刚石和深地幔再循环[J].地质力学学报,2020,26(5):731-741.  
YANG J S. Diamond in oceanic peridotites-chromitites and recycled in deep mantle [J]. Journal of Geomechanics, 2020, 26(5): 731-741.

- [3] STACHEL T, LUTH R W. Diamond formation—where, when and how? [J]. Lithos, 2015, 220/223: 200-220.
- [4] STACHEL T, HARRIS J W. The origin of cratonic diamonds—constraints from mineral inclusions [J]. Ore Geology Reviews, 2008, 34(1/2): 5-32.
- [5] STACHEL T, HARRIS J W. Formation of diamond in the earth's mantle [J]. Journal of Physics: Condensed Matter, 2009, 21(36): 364206.
- [6] 池际尚,路凤香,刘永顺,等.中国原生金刚石成矿地质条件研究[M].武汉:中国地质大学出版社,1996.  
CHI J S, LU F X, LIU Y S, et al. The study of formation conditions of primary Diamond deposits in China [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1996.
- [7] 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(S1):71-77.  
MEI H J, TANG C J, LI S R, et al. Lamproites and kimberlites in China and the genesis of diamond deposit [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 1998, 41(S1): 54-92.
- [8] 徐树桐,苏文,刘贻灿,等.大别山东段高压变质岩中的金刚石[J].科学通报,1991,36(17):1318-1321.  
XU S T, SU W, LIU Y C, et al. Diamonds from high-pressure metamorphic rocks in eastern Dabie Mountains [J]. Chinese Science Bulletin, 1992, 37(2): 140-145.
- [9] 杨经绥,许志琴,裴先治,等.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[J].地质学报,2002,76(4):484-495.  
YANG J S, XU Z Q, PEI X Z, et al. 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 [J]. Acta Geologica Sinica, 2002, 76(4): 484-495.
- [10] 杨经绥,徐向珍,李源,等.西藏雅鲁藏布江缝合带的普兰地幔橄榄岩中发现金刚石:蛇绿岩型金刚石分类的提出[J].岩石学报,2011,27(11):3171-3178.  
YANG J S, XU X Z, LI Y, et al. Diamonds recovered from peridotite of the Purang ophiolite in the Yarlung-Zangbo suture of Tibet: a proposal for a new type of diamond occurrence [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(11): 3171-3178.
- [11] 杨经绥,徐向珍,张仲明,等.蛇绿岩型金刚石和铬铁矿深部成因[J].地球学报,2013,34(6):643-653.  
YANG J S, XU X Z, ZHANG Z M, et al. Ophiolite-

- type diamond and deep genesis of chromitite[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2013, 34(6): 643-653.
- [12] XIONG F H, YANG J S, ROBINSON P T, et al. Diamonds and other exotic minerals recovered from peridotites of the Dangqiong ophiolite, western Yarlung-Zangbo suture zone, Tibet[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2016, 90(2): 425-439.
- [13] TIAN Y Z, YANG J S, ROBINSON P T, et al. Diamond discovered in high-Al chromitites of the Sartohay ophiolite, Xinjiang Province, China[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2015, 89(2): 332-340.
- [14] HUANG Z, YANG J S, ROBINSON P T, et al. The discovery of diamonds in chromitites of the Hegenshan ophiolite, Inner Mongolia, China[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2015, 89(2): 341-350.
- [15] 连东洋, 杨经绥, 刘飞, 等. 金刚石分类、组成特征以及我国金刚石研究展望[J]. *地球科学*, 2019, 44(10): 3409-3453.
- LIAN D Y, YANG J S, LIU F, et al. Diamond classification, compositional characteristics, and research progress: a review[J]. *Earth Science*, 2019, 44(10): 3409-3453.
- [16] 杜伟, 蔡逸涛, 褚志远, 等. 江苏张集地区四山岩体稀土元素特征[J]. *华东地质*, 2017, 38(S): 40-43.
- DU W, CAI Y T, CHU Z Y, et al. Rare earth element characteristics of the Sishan rock mass in the Zhangji Area, Jiangsu Province [J]. *East China Geology*, 2017, 38(S): 40-43.
- [17] 吴学林, 张作宏, 王善明. 睢宁白露山岩体地磁异常特征及其与金伯利岩关系[J]. *华东地质*, 2017, 38(S): 49-52.
- WU X L, ZHANG Z H, WANG S M. Characteristics of geomagnetic anomaly of Bailushan rock mass in Suining and its relationship with kimberlite[J]. *East China Geology*, 2017, 38(S): 49-52.
- [18] 梁国科, 吴祥珂, 王新宇, 等. 桂北罗城地区钾镁煌斑岩形成时代及成因[J]. *华东地质*, 2017, 38(S): 26-27.
- LIANG G K, WU X K, WANG X Y, et al. Formation age and origin of lamprophyre in Luocheng area, northern Guangxi[J]. *East China Geology*, 2017, 38(S): 26-27.
- [19] 王磊, 金鑫鏢, 王新宇, 等. 桂北罗城垌洞煌斑岩形成过程: 地球化学、年代学和 Sr-Nd-Pb 同位素约束[J]. *地质科技情报*, 2015, 34(1): 10-19.
- WANG L, JIN X B, WANG X Y, et al. Forming process of lamprophyre from Leidong in Luocheng, northern Guangxi: constrains from geochemistry, geochronology and Sr-Nd-Pb isotopes [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2015, 34(1): 10-19.
- [20] 刘礼广, 吴大天, 韩双, 等. 金伯利岩型金刚石矿床研究及其成矿模式探讨——以辽宁瓦房店地区金刚石原生矿床为例[J]. *地质学报*, 2020, 94(9): 2650-2665.
- LIU L G, WU D T, HAN S, et al. Study of kimberlite type diamond deposit and its metallogenic model ——an example of the primary diamond deposit in the Wafangdian area of Liaoning Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(9): 2650-2665.
- [21] 杨献忠, 宋世明, 徐华, 等. 辽宁瓦房店地区 50 号金伯利岩管及其周边构造特征[J]. *地质找矿论丛*, 2022, 37(2): 191-198.
- YANG X Z, SONG S M, XU H, et al. Structural feature of No. 50 kimberlite tube and its surroundings in Wafangdian area, Liaoning Province[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 2022, 37(2): 191-198.
- [22] 付海涛. 三维建模技术在金刚石勘查中的应用——以辽宁省瓦房店地区为例[J]. *地质通报*, 2019, 38(1): 51-55.
- FU H T. The application of 3D modeling technology to the kimberlite rock tube exploration: a case study of Wafangdian in Liaoning Province [J]. *Geological Bulletin of China*, 2019, 38(1): 51-55.
- [23] 宋瑞祥. 中国金刚石矿床专论——中国金刚石矿找矿与开发[M]. 北京: 地质出版社, 2013.
- SONG R X. Monograph on diamond deposits in China: exploration and development of diamond deposits in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2013.
- [24] 杨献忠, 吕青, 周军, 等. 山东蒙阴地区三岩带南部第四成矿带存在的可能性分析[J]. *华东地质*, 2017, 38(S): 55-57.
- YANG X Z, LÜ Q, ZHOU J, et al. Possibility of the existence of the fourth metallogenic belt in the southern part of the three rock belts in the Mengyin area, Shandong [J]. *East China Geology*, 2017, 38(S): 55-57.
- [25] 马玉广, 周世文. 安徽宿州栏杆—褚栏地区金刚石成矿地质特征及成因[J]. *华东地质*, 2017, 38(S): 4-6.
- MA Y G, ZHOU S W. Geological characteristics and genesis of diamond mineralization in Langan-Chulan area of Suzhou, Anhui Province[J]. *East China Geology*, 2017, 38(S): 4-6.
- [26] 曹中夫, 曹桂凤. 辽宁瓦房店新发现一条金刚石成矿带[N/OL]. *中国国土资源报*, 2017-04-18(4)[2023-05-11]. <https://www.iziran.net/index.html>.

- CAO Z F, CAO G F. A new diamond metallgenic belt discovered in Wafangdian of Liaoning Province [N/OL]. Land and Resources of China, 2017-04-18 (4) [2023-05-11]. <https://www.iziran.net/index.html>.
- [27] 杨献忠, 周延, 肖凡, 等. 辽宁第 IV 金刚石成矿带东部潘家沟辉绿岩中铬铁矿的矿物化学特征及其意义[J]. 中国地质调查, 2024, 待刊.  
YANG X Z, ZHOU Y, XIAO F, et al. Mineralogical chemical characteristics and significance of chromite from diabase in Panjiagou area, east of the fourth diamond metallogenic belt, Liaoning Province[J]. Geological Survey of China, 2024, to be published.
- [28] 杨献忠, 王爱国, 周延, 等. 辽宁永宁地区含金刚石闪长质岩石显微特征及金刚石来源探讨[J]. 地质找矿论丛, 2023, 38(2): 185-196.  
YANG X Z, WANG A G, ZHOU Y, et al. Microscopic characteristics of diamond-bearing dioritic rock in Yongning area, Liaoning Province and discussion on source of the diamond[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2023, 38 (2): 185-196.
- [29] 仲卫国, 周登诗, 刘继太, 等. 山东费县大井头地区金刚石原生矿找矿前景探讨[J]. 山东地质, 2003, 19(1): 43-49.  
ZHONG W G, ZHOU D S, LIU J T, et al. Study on ore-probing future of diamond primary ore in Dajingtou area of Feixian county in Shandong Province[J]. Geology of Shandong, 2003, 19(1): 43-49.
- [30] 高存山, 褚志远, 张勇, 等. 山东临沂东小山地区煌斑岩地球化学特征及其对成矿的启示[J]. 华东地质, 2020, 41(3): 271-278.  
GAO C S, CHU Z Y, ZHANG Y, et al. Geochemical characteristics and indication for mineralization of Dongxiaoshan lamprophyre in Linyi City, Shandong Province [J]. East China Geology, 2020, 41 (3): 271-278.
- [31] 杨献忠, 周延, 孙建东, 等. 斑晶斜长石环带结构及成因研究进展[J]. 华东地质, 2022, 43(4): 415-427.  
YANG X Z, ZHOU Y, SUN J D, et al. Advances on the texture and genesis of phenocryst plagioclase zoning[J]. East China Geology, 2022, 43(4): 415-427.
- [32] 周琦忠, 张琪, 宗德林, 等. 徐州贾汪地区暗色岩锆石 U-Pb 年龄及金刚石成因探讨[J]. 华东地质, 2018, 39(3): 202-211.  
ZHOU Q Z, ZHANG Q, ZONG D L, et al. Zircon U-Pb dating of dark rocks in the Jiawang area, Xuzhou, and diamond genesis analysis[J]. East China Geology, 2018, 39(3): 202-211.
- [33] 施建斌, 蔡逸涛, 张琪, 等. 徐州北部西村苦橄玢岩地球化学特征及其与金伯利岩的对比[J]. 地质学刊, 2017, 41(4): 535-541.  
SHI J B, CAI Y T, ZHANG Q, et al. Geochemical characteristics of picrite-porphyrte and its comparison with kimberlite in Xicun Village, Xuzhou City [J]. Journal of Geology, 2017, 41(4): 535-541.
- [34] 李子云, 马文运. 宁乡县云影窝含金刚石钾镁煌斑岩地质特征[J]. 湖南地质, 1993, 12(4): 221-225.  
LI Z Y, MA W Y. Geological feature of Yunyingwo lamproite in Ningxiang [J]. Hunan Geology, 1993, 12 (4): 221-225.
- [35] 杨献忠, 蔡逸涛, 康丛轩, 等. 湖南桃源理公港地区含金刚石沉凝灰岩的发现及其找矿意义[J]. 中国地质调查, 2019, 6(6): 56-62.  
YANG X Z, CAI Y T, KANG C X, et al. Discovery of diamond-bearing sedimentary tuff and its prospecting significance in Ligonggang area of Taoyuan county, Hunan Province [J]. Geological Survey of China, 2019, 6(6): 56-62.
- [36] 杨献忠, 蔡逸涛, 康丛轩. 再议湖南地区原生金刚石的找矿方向[J]. 华东地质, 2017, 38(S): 87-89.  
YANG X Z, CAI Y T, KANG C X. Discussion on the prospecting direction of primary diamond in Hunan Province [J]. East China Geology, 2017, 38 (S): 87-89.
- [37] 万方来, 蒋金晶, 王煊, 等. 辽宁省瓦房店金伯利岩矿区构造特征及其控矿作用[J]. 地质通报, 2019, 38(1): 62-67.  
WAN F L, JIANG J J, WANG X, et al. Geological characteristics and structural ore-control role in Wafangdian kimberlite orefield of Liaoning Province [J]. Geological Bulletin of China, 2019, 38(1): 62-67.
- [38] 付海涛. 辽宁瓦房店金刚石矿田金伯利岩侵位机制分析[J]. 地质学报, 2020, 94(9): 2640-2649.  
FU H T. Analysis of kimberlite emplacement mechanism in the Wafangdian diamond ore field [J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(9): 2640-2649.
- [39] 付海涛. 瓦房店地区金刚石找矿值得注意的两个问题[J]. 地球科学前沿, 2019, 9(5): 328-333.  
FU H T. Two issues worthy of attention in diamond prospecting in Wafangdian area [J]. Frontiers of Earth Science, 2019, 9(5): 328-333.
- [40] 仲米山, 张国仁, 付海涛, 等. 辽宁瓦房店首次发现 50 号金伯利岩管深部隐伏矿体[J]. 地质学报, 2021, 95(12): 3979-3981.  
ZHONG M S, ZHANG G R, FU H T, et al. Discovery of concealed orebody of No. 50 kimberlite pipe in Wafangdian, Liaoning [J]. Acta Geologica Sinica, 2021, 95(12): 3 979-3 981.

- [41] 张洁, 吕凤军, 蔡逸涛, 等. 安徽栏杆碱性基性岩型金刚石矿遥感影像特征[J]. 宝石和宝石学杂志, 2016, 18(4): 1-9.  
ZHANG J, LÜ F J, CAI Y T, et al. Characteristic of alkali-basic rock type diamond ore's remote sensing in the Langan Area, Anhui Province[J]. Journal of Gems and Gemmology, 2016, 18(4): 1-9.
- [42] 张洁, 蔡逸涛, 吕凤军, 等. 宿州地区含金刚石辉绿岩遥感影像特征[J]. 华东地质, 2017, 38(S): 9-10.  
ZHANG J, CAI Y T, LÜ F J, et al. Remote sensing image characteristics of diamond-bearing diabase in Suzhou area[J]. East China Geology, 2017, 38(S): 9-10.
- [43] 丁毅. 金伯利岩的卫星影像识别标志及应用实例[J]. 地质与勘探, 2020, 56(5): 1050-1056.  
DING Y. Satellite image index of kimberlite and its application[J]. Geology and Exploration, 2020, 56(5): 1050-1056.
- [44] 李永刚, 向璐, 黄远成, 等. 贵州镇远地区含金刚石母岩再认识[J]. 地质通报, 2019, 38(1): 103-109.  
LI Y G, XIANG L, HUANG Y C, et al. Re-understanding of diamond-bearing parent rocks in Zhenyuan area, Guizhou Province[J]. Geological Bulletin of China, 2019, 38(1): 103-109.
- [45] 向璐, 郑建平, 黄远成, 等. 贵州镇远马坪金伯利岩及其捕虏晶对金刚石成矿条件的指示意义[J]. 地质通报, 2019, 38(1): 177-188.  
XIANG L, ZHENG J P, HUANG Y C, et al. The mapping kimberlites and its xenocrysts as indicators of diamond minerogenetic condition in Zhenyuan area, Guizhou Province [J]. Geological Bulletin of China, 2019, 38(1): 177-188.
- [46] 张培强. 山东金伯利岩岩管成因[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2006.  
ZHANG P Q. Origin of kimberlite pipes in Shandong Province[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2006.
- [47] 张成基, 田京祥, 陈文韬, 等. 鲁西蒙阴地区含金刚石金伯利岩的岩浆侵入序列及成矿模式[J]. 地质学报, 2020, 94(9): 2666-2675.  
ZHANG C J, TIAN J X, CHEN W T, et al. The magmatic intrusive sequence and the metallogenic model of diamondiferous kimberlite in the Mengyin area, western Shandong [J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(9): 2666-2675.
- [48] 饶红娟, 蔡逸涛, 杨献忠, 等. 贵州镇远马坪地区钾镁煌斑岩侵位模式及找矿前景[J]. 地质通报, 2019, 38(1): 76-92.  
RAO H J, CAI Y T, YANG X Z, et al. An analysis of the emplacement mode and ore-search prospect of lamproite in the Maping area, Zhenyuan County, Guizhou Province [J]. Geological Bulletin of China, 2019, 38(1): 76-92.
- [49] 向璐, 郑建平. 中国原生金刚石形成条件及找矿思考[J]. 地质学报, 2020, 94(9): 2574-2587.  
XIANG L, ZHENG J P. Formation conditions of primary diamonds and thoughts on their prospecting in China [J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(9): 2574-2587.
- [50] 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.  
ZHANG B L, CHEN H, QIU Z L, et al. A study on the origin of diamonds under the framework of the United Nations Kimberley Process[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2013.
- [51] 杨斌, 马祥县, 唐璐璐, 等. 山东省蒙阴地区金刚石原生矿形成时代的讨论[J]. 山东国土资源, 2015, 31(4): 19-21, 27.  
YANG B, MA X X, TANG L L, et al. Discussion on forming age of primary diamond ore in Mengyin area of Shandong Province[J]. Shandong Land and Resources, 2015, 31(4): 19-21, 27.
- [52] 杨斌, 孙秀珠, 罗文强, 等. 三论蒙阴地区金刚石原生矿的形成时代[J]. 山东国土资源, 2016, 32(9): 14-16.  
YANG B, SUN X Z, LUO W Q, et al. Third discussion on the ore forming age of primary diamond in Mengyin area of Shandong Province [J]. Shandong Land and Resources, 2016, 32(9): 14-16.
- [53] 周琦忠, 张琪, 冯学知, 等. 江苏徐州白露山岩管地质特征及与金刚石成因关系探讨[J]. 地质学报, 2020, 94(9): 2748-2762.  
ZHOU Q Z, ZHANG Q, FENG X Z, et al. Geological characteristics of the Bailushan rock mass and its relationship with diamond genesis in Xuzhou, Jiangsu Province [J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(9): 2748-2762.
- [54] 吕反修, 李成明. 我国化学气相沉积(CVD)金刚石膜研究三十年[J]. 人工晶体学报, 2022, 51(5): 753-758.  
LÜ F X, LI C M. Thirty years of chemical vapor deposition (CVD) diamond films research in China [J]. Journal of Synthetic Crystals, 2022, 51(5): 753-758.
- [55] 宋明春. 我国金刚石矿勘查研究进展和找矿思考[J]. 地质学报, 2020, 94(9): 2553-2556.  
SONG M C. Research progress and exploration considerations of diamond deposits in China [J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(9): 2553-2556.

- [56] 梁日暄, 方青松. 塔里木地台金刚石成矿地质条件和找矿方向[J]. 中国区域地质, 1992, 11(2): 161-166.  
LIANG R X, FANG Q S. Geological conditions for the formation of diamond deposits and direction in diamond prospecting in the Tarim Platform [J]. Regional Geology of China, 1992, 11(2): 161-166.
- [57] 王福同, 冯京. 新疆金刚石原生矿成矿地质条件及其找矿方向[J]. 新疆地质, 2000, 18(1): 32-41.  
WANG F T, FENG J. Metallogenic condition of primary diamond deposit of Xinjiang and its prospecting target[J]. Xinjiang Geology, 2000, 18(1): 32-41.
- [58] 彭艳菊, 吕林素, 周振华. 中国金刚石资源分布及开发利用现状[J]. 宝石和宝石学杂志, 2013, 15(4): 1-7.  
PENG Y J, LÜ L S, ZHOU Z H. Distribution and utilization of diamond resources in China[J]. Journal of Gems and Gemmology, 2013, 15(4): 1-7.
- [59] 王春连, 王九一, 游超, 等. 战略性非金属矿产厘定、关键应用和供需形势研究[J]. 地球学报, 2022, 43(3): 267-278.  
WANG C L, WANG J Y, YOU C, et al. A study on strategic non-metallic mineral definition, key applications, and supply and demand situation[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2022, 43(3): 267-278.

## Progress in the exploration and research of primary diamond deposits in China

YANG Xianzhong<sup>1,2</sup>, XIAO Fan<sup>1,2</sup>, LAO Jinxiu<sup>1,2</sup>, GUO Weimin<sup>1,2</sup>, FAN Feipeng<sup>1,2</sup>, ZHOU Yan<sup>1,2</sup>

(1. Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China;

2. Joint Research Centre for Circum-Pacific Strategic Mineral Resources, Nanjing 210016, Jiangsu, China)

**Abstract:** The “National Diamond Exploration Field Seminar” held by China Geological Survey in Suzhou, Anhui in 2013 kicked off a new round of primary diamond deposits exploration in China. In the past decade, a series of new progress in the exploration and research of primary diamond deposits have been made: the new batch of primary diamond resources identified in Langan, Anhui and Wafangdian, Liaoning further enhanced domestic supply ability of diamond resources. The VI diamond mineralization belt in Liaoning, the Pingyi-Feixian diamond mineralization belt in Shandong and new prospecting clues in other regions will expand the exploration spaces of primary diamond deposits. The comprehensive exploration methods such as tectonic analysis-3D modeling-engineering verification, and high-resolution remote sensing information extraction are new exploring ideas for deep exploration and the discovery of hidden rock bodies. New insights in the genesis of diamond-bearing rock bodies, the emplacement model of kimberlite (potassium magnesium lamprophyre), and the study of diamond source area have been acquired. The chronological studies have shown that the mineralization of diamond-bearing parent rock in China extends from the Paleozoic to the late Mesozoic, which embodies the feature of multi-stage metallogenesis. Based on the progress and new problems in diamond exploration and research in the past decade, the suggestions for future exploration and research of primary diamond deposits is also proposed in the paper.

**Key words:** primary diamond deposits; kimberlite; diabase; prospecting and exploration; primary diamond mineralization belt; new progress