

金刚石的撞击成因与找矿新思考

李兆丽¹⁾, 刘飞^{*1,2,3)}, 郑永春⁴⁾, 余晓艳⁵⁾, 肖丙建²⁾, 杨经绥^{1,2,3)}

- 1) 自然资源部深地动力学重点实验室, 中国地质科学院地质研究所, 北京, 100037;
2) 山东省金刚石成矿机理与探测院士工作站, 山东省第七地质矿产勘查院, 山东临沂, 276006;
3) 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广东广州, 511458;
4) 中国科学院国家天文台, 北京, 100101; 5) 中国地质大学珠宝学院, 北京, 100083

“深地、深海、深空、深蓝”是代表科技发展前沿和我国战略发展方向的重要领域。其中,“深地”和“深空”是地球和行星科学研究的重点领域,是解决地球科学重大基础理论问题、探索太阳系演化历史等科学问题,以及保障国家能源资源安全、拓展人类生存空间、保障人类社会可持续发展的重要领域(欧阳自远等, 2002; Wilson et al., 2004; 李三忠等, 2010; 郑永春等, 2011; 郑永春和欧阳自远, 2014; 杨经绥等, 2021)。目前,人类关于地球内部信息的大部分知识,主要是通过地球物理观测、高温高压实验和模拟计算等途径获得的,但这些手段都属于间接手段,受到极端假设和有限推断的影响,结论存在较多的不确定性(Alvaro et al., 2022)。源自地幔深部的金刚石是在高温高压条件下(压力 >4.5 GPa, 温度 $>1000^{\circ}\text{C}$)形成的一种特殊矿物,是获得地球深部信息的直接样品,它不仅记录来自地下 150~250 km 的上地幔信息,还能捕获来自 410~660 km 的地幔过渡带、甚至更深的下地幔的信息(Smith et al., 2018; Liu et al., 2021; Tschauner et al., 2021; Yang et al., 2021; 杨经绥等, 2021)。因此,金刚石是认识地球地幔深部的物质组成、形成环境和动力学演化过程的重要研究对象。

金刚石由碳原子组成,每个碳原子都与其他 4 个碳原子紧密连接,形成共价键,构成一个牢固的正四面体(连东洋等, 2019)。四面体中的碳-碳键能很强,所有的价电子被限制在共价键区域,没有自由电子,结构对称,这种特征导致金刚石不仅是目前已知硬度最高的天然矿物,还具有超强的化学稳定性(Breeding and Shigley, 2009),是一种非常重要的工业原料,在光学、电子、核能、高能物理、航天技术、自动化技术和医学等高精尖技术领域有广泛应用,是信息时代发展的关键材料,具有无可替代的作用。金刚石具有很高的光学透过率、极高的折射率(2.417)和色散(0.044),切割后呈现金刚光泽和绚丽的火彩(张蓓丽, 2006)。宝石级的金刚石称为钻石,它是一种十分稀有的名贵宝石,具有极高的观赏

价值和商业价值,号称“宝石之王”,常常被加工成价值连城的珠宝首饰(张蓓丽, 2006; Yu et al., 2021)。

从全球看,金刚石主要产自金伯利岩和钾镁煌斑岩以及与之相关的冲积型砂矿中,与古老而稳定的克拉通密切相关(Tappert and Tappert, 2011)。因此,人们通常在克拉通内寻找金刚石资源,但金伯利岩和钾镁煌斑岩中的金刚石含矿率非常低。据统计,全球共发现约 7000 个金伯利岩和钾镁煌斑岩岩体,其中约 1000 个岩体中含有金刚石,但有经济价值并能持续开采的只有 67 个,仅占约 1% 左右(de Wit et al., 2016)。过去 20 多年的金刚石全球找矿勘查几乎没有实质突破,如何寻找新的金刚石资源,是世界各国地质找矿面临的难题之一。我国的金刚石资源储量极低,尤其近年来,山东蒙阴、辽宁瓦房店和湖南沅水流域三大金刚石产地陆续停产,使我国金刚石资源处于更加紧缺状态,金刚石找矿亟待突破(刘飞等, 2019; 宋瑞祥等, 2019)。

由于小天体撞击在太阳系中十分普遍,撞击产生的高温高压具备了将碳元素转化为金刚石的物理条件。近年来,撞击成因金刚石在国外日益受到关注,未来有可能改变地球金刚石矿产资源的供需格局,需加以重视。本文针对国内金刚石资源的紧缺情况,提出了寻找地外撞击成因金刚石,以及从太空中寻找金刚石资源的新思考。

1 太阳系小天体撞击的普遍性

根据星云假说,太阳系形成于一团由气体和尘埃组成的原始星云中,其中约 99.86% 的质量集中在太阳上,产生了核聚变并释放出巨大的能量。剩余的物质中,凝固点较高的元素在离太阳较近的区域率先凝聚,形成星子并相互碰撞、吸积,成为原行星胚胎,继续成长并最终形成水星、金星、地球和火星等类地行星。凝固点较低的气体物质被驱赶到远离太阳的地方,形成了木星、土星、天王星、海王星等类木行

注:本文为山东地矿局七院科技创新项目(编号 QDKY202007)、山东省自然科学基金项目(编号 ZR2021MD052)、国家自然科学基金项目(编号 92062215, 41720104009)、中国地质调查局项目(编号 DD20221630)、自然资源部深地动力学国家重点实验室自主课题(编号 J1901-32)和南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项(编号 GML2019ZD0201)联合资助的成果。
收稿日期:2022-10-11;改回日期:2022-11-18;网络发表日期:2022-12-15;责任编辑:吴才来;责任编辑:蔡志慧。
作者简介:李兆丽,女,1976 年生。博士,副研究员,主要从事高压矿物学研究。E-mail: lizhaoli@ccsd.cn。
* 通讯作者:刘飞,男,1982 年生。博士,副研究员,硕士生导师,主要从事蛇绿岩和金刚石成因研究。E-mail: lfhy112@126.com。
Doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2023106。

星。行星形成后的残留物质,主要聚集在火星和木星之间的小行星带、海王星之外的柯伊伯带(典型代表是曾经为九大行星之一的冥王星及其卫星)、以及太阳系边缘的奥尔特云(主要证据是运行在大椭圆轨道上的长周期彗星)。小行星和彗星等小天体的运行轨道不稳定,容易受到木星等行星的引力扰动,而与其他行星及其卫星的轨道相交并撞向它们。据不完全统计,月球上直径大于 1 km 的撞击坑有 33000 个,由于同一区域受到反复撞击,导致前期形成的撞击坑被破坏、掩埋甚至消失,实际的撞击次数远大于已有的撞击坑数量。同样,在水星、火星等类地行星,木卫二、土卫九等天然卫星,谷神星、冥王星等矮行星,以及小行星上,都发现了大量的撞击坑(陈丰等, 2010; Levison and Dones, 2014)。由此可见,太阳系中的小天体撞击现象十分普遍。

撞击作用是太阳系行星及其卫星演化的重要动力。以月球为例,根据探月工程遥感探测数据的分析以及月壤样品研究的结果,月球在距今约 4.1~3.8 Ga 左右,曾经遭受过密集的大型撞击事件,被称为晚期重型轰击(Late Heavy Bombardment, LHB)(Bottke et al., 2007)。这些大型撞击作用甚至能击穿月壳,导致岩浆上涌,形成广泛分布的岩浆洋,冷却后形成了如今的月海平原。此后,虽然大型撞击事件变得越来越少,但小型撞击持续至今,导致月球表面岩石被粉碎并反复“翻耕”,形成覆盖整个月球表面厚厚的一层月壤(郑永春, 2005)。由此不难推测,小行星、彗星等小天体撞击在地球的地质史上十分普遍,陨击作用是地球早期演化的主要外动力之一。

2 太空中的金刚石资源

行星形成的星子堆积理论认为,在太阳系的早期演化中,星子间堆积形成胚胎行星,之后遭受其他小天体撞击、合并,继续增大成为类地行星。因此,不同天体之间相互撞击形成金刚石的现象可能普遍存在(Lipschutz, 1964; Nestola et al., 2020; Burkhardt et al., 2021)。

在太空中,有些小行星原本是行星内核的一部分,本身含有丰富的金刚石。当它们的运行轨道与地球相交时,会进入地球大气层,部分降落在地球表面形成陨石。例如,一颗橄榄辉无球粒陨石中发现金刚石,该金刚石的形成压力达到约 20 GPa,说明它最初形成于类似水星至火星大小的原行星中(Nabiei et al., 2018)。

撞击成因金刚石不仅能反映地球和行星遭受小天体撞击的历史,还有可能成为地球矿产资源的重要补充。当小天体撞击行星表面时,产生高温高压,有可能形成金刚石(Nabiei et al., 2018; Nestola et al., 2020)。计算机模拟结果显示,水星表面可能有超过 16×10^{15} t 的金刚石。因为经过几十亿年的小天体撞击,水星三分之一的石墨外壳可能已经成为巨大的金刚石矿,即使除掉被后期撞击毁坏的部分,剩下的金刚石资源依旧十分惊人(Cannon, 2022)。

2022 年 2 月,苏富比拍卖行在伦敦拍卖了一颗名为“谜”(The Enigma)的世界最大(111.1 g)天然切割黑钻(carbonado)。

其中除了含有微粒金刚石外,缺乏地球上其他金刚石中通常含有的典型壳、幔矿物组合包裹体,却富含星际空间含量丰富的 N 和 H 元素,以及陨石中的独特矿物陨氮钛石(osbornite),说明它很可能来自外太空(Parthasarathy et al., 2016)。

此外,天文观测结果显示,某些恒星的碳氧比很高,使围绕这些恒星的系外行星主要由碳化物组成。这类行星内部的富碳物质在高压高温条件下,可以形成大量金刚石(Allen-Sutter et al., 2020)。比如,巨蟹座 55A 是一颗类太阳的 G 型恒星,距离地球约 41 光年,它的行星巨蟹座 55e 中有三分之一体积可能是金刚石(Madhusudhan et al., 2012)。

3 地球上的撞击成因金刚石

天然金刚石的形态和主要物理特性(结构、颜色和缺陷)存在很大差异。根据 X 射线衍射结果,天然金刚石被分为 11 类,其中第 I~V 类是单晶,第 VI~X 类为聚晶(具有混沌取向的金刚石微晶聚集体),第 XI 类具有特定结构,大多与小天体撞击作用有关(Orlov, 1977),主要特征是出现朗斯代尔矿(lonsdaleite),即六方多晶系金刚石(Fron del and Marvin, 1967)。这种多晶金刚石的晶粒小且存在特定的纹理方向,被认为是撞击作用的产物。

撞击事件释放的巨大能量会对行星演化产生深远的影响,对地球环境、生物演化,甚至全球地质构造格局、大陆漂移、古地磁极性等都有可能产生决定性影响。迄今为止,地球上证据比较明确的小天体撞击事件主要有:震旦纪—寒武纪界限撞击事件、二叠纪—三叠纪界限撞击事件、白垩纪—第三纪界限撞击事件,以及始新世—渐新世界限(33.9 Ma)、中新世中期(15 Ma)、第四纪早期(2.4 Ma)、更新世(1.1 Ma、0.7 Ma)的撞击事件(欧阳自远, 1997)。

据估算,10 km 直径的小天体与地球相撞的几率平均约 1 次/Ma,形成的撞击坑直径大于 100 km,将导致生物灭绝和地球环境灾变。65 Ma 时,一个直径约 10 km 的小行星撞击地球,不仅形成了墨西哥湾尤卡坦半岛直径达 200 km 的巨大撞击坑,而且导致地球的气候环境发生灾难性剧变,大量生物灭绝,以恐龙为代表的爬行动物的统治地位被哺乳动物所替代(欧阳自远, 1997)。

较小的撞击事件发生的几率则要大得多。据估算,每天有上百吨的地外物质进入地球大气层,大部分撞击发生在人迹罕至的地区。1908 年 6 月 30 日,一个直径约 50 m 的小天体在西伯利亚的通古斯地区上空爆炸,导致数千平方千米的森林被毁,引发地震并形成微玻璃陨石。2013 年 2 月,俄罗斯的车里雅宾斯克遭受小行星撞击,这颗小行星在进入地球大气层之前的直径约为 18 m,来自火星和木星之间的小行星带(Borovička et al., 2013)。

尽管地质历史上的撞击事件非常频繁,但小天体撞击的证据常常被地球上活跃的地质运动所掩盖,甚至被磨灭殆尽,使撞击事件难以确认(Mazrouei et al., 2019)。撞击事件留下的痕迹,包括生物的大量灭绝、非地球或非地质因素的微量元素异常、大规模火山集中喷发、黏土岩预示的大量尘

埃沉降等证据,地球上已陆续发现了很多小天体撞击形成的撞击坑,目前,全球已确定的撞击坑有 192 个 (James et al., 2022)(图 1)。撞击成因金刚石最先发现于俄罗斯 Novo-Urei 撞击坑。之后,在美国亚利桑那州的巴林杰撞击坑和 Canyon Diablo 撞击坑、德国的 Ries、俄罗斯北极地区尤戈尔半岛的卡拉和极地乌拉尔均有发现(Racki et al., 2018)。其中,西伯利亚北部直径约 100 km 的珀匹盖撞击坑是世界最大的撞击成因金刚石产地。这次撞击事件发生在 35 Ma,当时该地区的片麻岩含有 10% 的石墨,冲击压力可能超过 60 GPa,形成了大量微晶金刚石(Yelisseyev et al., 2016)。

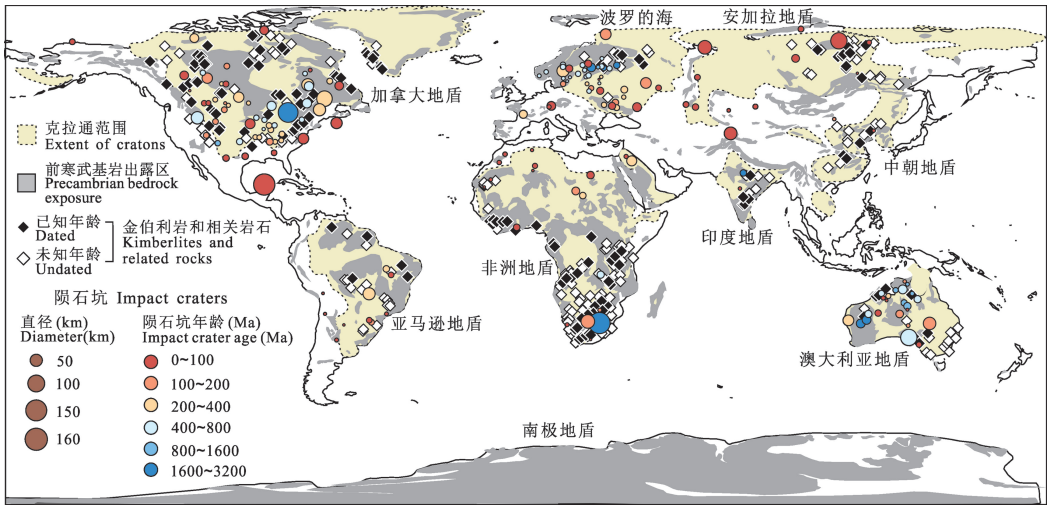


图 1 全球已确认的 192 个撞击坑分布图(据 Mazrouei et al., 2019 修改)

4 金刚石地质找矿思考与太空采矿前景展望

来自太空的陨石中发现金刚石,证明其他星球上也有金刚石资源。近年来,随着深空探测的快速发展,小行星探测成为航天的重要目标之一。国际上已开始重视这些具有潜在资源价值的天体并正在研发太空采矿相关技术(Zacny et al., 2013; Andrews et al., 2015),例如,从 C 型小行星龙宫(162173 Ryugu)和 S 型小行星丝川(25143 Itokawa)两次采样返回(Tsuda et al., 2019);探测水星的信使号探测器、探测小行星的黎明号探测器也为太空采矿提供相关技术支持,奥西里斯-REx 探测器已经从小行星贝努表面成功采样,预计将于 2023 年 9 月回到地球。中国嫦娥二号于 2012 年近距离探测图塔蒂斯 4179 号小行星,小天体探测计划预计 2025 年探测 2016 HO3 近地小行星并采样返回,之后前往主带彗星 311P 开展伴飞探测。我国正在加速推进深空探测,积极开展深地与深空相结合的研究计划,并从太阳系的整体视角看待地球矿床的成因,这些举措将为我国金刚石矿床成因和找矿提供新的线索。

另外,撞击成因金刚石资源的探测和研究也需进一步加强。我国虽然已发现了辽宁岫岩和黑龙江依兰撞击坑(陈鸣等, 2009, 2020),但至今尚未找到撞击成因的金刚石矿床。

金伯利岩是克拉通内部岩浆岩,常产于太古宙克拉通及其伴生台地的表壳岩中,它们与大陆裂解无关(Mitchell, 2021),那么是否与天体撞击地球有关还不清楚。Mazrouei et al. (2019)通过对全球克拉通中的撞击坑大小、年龄和金伯利岩管分布的统计,展示了撞击坑与全球重要金刚石矿床的分布密切重合(图 1),暗示天体撞击地球对金伯利岩的分布可能产生重要作用。我国金伯利岩广泛分布(刘飞等, 2019),然而金伯利岩和撞击坑的研究相对薄弱,撞击成因金刚石在国内尚未发现,缺少金伯利岩与撞击坑关系的研究,因此需加以重视。

从全球看,撞击坑与全球重要金刚石矿床的分布密切重合,我国蒙阴和瓦房店金刚石矿床成因是否与小天体撞击作用有关目前还不清楚。因此,我国急需开展撞击成因金刚石的研究,开阔思路瞄准与太空相关的金刚石资源,开展太空资源开发等前瞻性探索。寻找撞击成因金刚石资源,不仅能开拓新的金刚石找矿方向,而且对追溯地球和行星的演化历史具有重要的启示意义。或许,向地外寻资源将为我国地质找矿开拓新的思路,地球上天然金刚石资源短缺的问题,要从深空探测中寻找答案。在可见的未来,太空资源利用将局限在太阳系内,以小行星资源利用为主,在月球和火星上则以原位利用为主。

致谢:山东省第七地质矿产勘查院的余西顺院长、王伟德副院长、吕青高工、褚志远高工、王玉峰高工和张勇主任,以及南京大学连东洋副教授给予指导和帮助,郑建平教授给予非常好的修改意见,在此一并表示衷心感谢。

主要参考文献

Allen-Sutter H, Garhart E, Leinenweber K, Prakapenka V, Greenberg E, Shim S H. 2020. Oxidation of the interiors of carbide exoplanets. *The Planetary Science Journal*, 1(39): 1~7.
Alvaro M, Angel R J, Nestola F. 2022. Inclusions in diamonds probe Earth's chemistry through deep time. *Communications Chemistry*, 5(1):10.
Andrews D G, Bonner K D, Butterworth A W, Calvert H R, Dagang B R H, Dimond K J, Eckenroth L G, Erickson J M,

- Gilbertson B A, Gompertz N R, Igbinosun O J, Ip T J, Khan B H, Marquez S L, Neilson N M, Parker C O, Ransom E H, Reeve B W, Robinson T L, Rogers M, Schuh P M, Tom C J, Wall S E, Watanabe N, Yoo C J. 2015. Defining a successful commercial asteroid mining program. *Acta Astronautica*, 108: 106~118.
- Borovička J, Spurný P, Brown P, Wiegert P, Kalenda P, Clark D, Shrbený L. 2013. The trajectory, structure and origin of the Chelyabinsk asteroidal impactor. *Nature*, 503 (7475): 235~237.
- Breeding C M, Shigley J E. 2009. The “type” classification system of diamonds and its importance in gemology. *Gems & Gemology*, 45(2): 96~111.
- Burkhardt C, Spitzer F, Morbidelli A, Budde G, Render J H, Kruijer T S, Kleine T. 2021. Terrestrial planet formation from lost inner solar system material. *Science Advances*, 7 (52): j7601.
- Cannon K M. 2022. Mercury and other diamond encrusted planets. 53rd Lunar and Planetary Science Conference Abstract:1557.
- de Wit M, Zi B, Davidson J, Haggerty S E, Hundt P, Jacob J, Lynn M, Marshall T R, Skinner C, Smithson K. 2016. Overview of diamond resources in Africa. *Episodes*, 39(2): 198~237.
- Fronzel C, Marvin U B. 1967. Lonsdaleite, a hexagonal polymorph of diamond. *Nature*, 214(5088): 587~589.
- James S, Chandran S R, Aswathi J, Padmakumar D, Aneeshkumar V, Indu G K, Sajinkumar K S. 2022. Meteorite impact crater positions based on paleo-positions and its unrestrained latitudinal distribution. *Planetary and Space Science*, 222: 105575.
- Levison H F, Dones L. 2014. *Encyclopedia of the Solar System (Third Edition)*. Amsterdam: Elsevier, 705~719.
- Lipschutz M E. 1964. Origin of diamonds in the Ureilites. *Science*, 143(3613): 1431~1434.
- Liu F, Lian D, Wu W, Yang J. 2021. Diamonds and other exotic minerals-bearing ophiolites on the globe: A key to understand the discovery of new minerals and formation of ophiolitic podiform chromitite. *Crystals*, 11: 1362.
- Madhusudhan N, Lee K K M, Mousis O. 2012. A possible carbon-rich interior in super-earth 55 Cancri e. *The Astrophysical Journal*, 759(2): L40.
- Mazrouei S, Ghent R R, Bottke W F, Parker A H, Gernon T M. 2019. Earth and Moon impact flux increased at the end of the Paleozoic. *Science*, 363(6424): 253~257.
- Mitchell R H. 2021. Potassic alkaline rocks: Leucitites, lamproites, and kimberlites. *Encyclopedia of Geology (Second Edition)*, 215~239.
- Nabiei F, Badro J, Dennenwaldt T, Oveisi E, Cantoni M, Hébert C, El Goresy A, Barrat J, Gillet P. 2018. A large planetary body inferred from diamond inclusions in an ureilite meteorite. *Nature Communications*, 9(1): 1327.
- Nestola F, Goodrich C A, Morana M, Barbaro A, Jakubek R S, Christ O, Brenker F E, Domeneghetti M C, Dalconi M C, Alvaro M, Fioretti A M, Litasov K D, Fries M D, Leoni M, Casati N P M, Jenniskens P, Shaddad M H. 2020. Impact shock origin of diamonds in ureilite meteorites. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(41): 25310~25318.
- Orlov Y L. 1977. *The Mineralogy of the Diamond*. New York: John Wiley & Sons.
- Parthasarathy G, Haggerty S E, Sreedhar B, Dilawar N, Anonymous. 2016. Osbornite (TiN): Implications for an extraterrestrial origin of carbonado-diamonds. *Conference paper*: 1486.
- Racki G, Jagt J W M, Jagt-Yazykova E A, Koeberl C. 2018. A Dutch contribution to early interpretations of Meteor Crater, Arizona, USA-Marten Edsge Mulder's ignored 1911 paper. *Proceedings of the Geologists' Association*, 129(4): 542~560.
- Smith E M, Shirey S B, Richardson S H, Nestola F, Bullock E S, Wang J, Wang W. 2018. Blue boron-bearing diamonds from Earth's lower mantle. *Nature*, 560(7716): 84~87.
- Tappert R, Tappert M C. 2011. *Diamonds in Nature: A Guide to Rough Diamonds*. Berlin: Springer.
- Tschauner O, Huang S, Yang S, Humayun M, Liu W, Stephanie N, Corder G, Bechtel H A, Tischler J, Rossman G R. 2021. Discovery of davemaoite, CaSiO_3 -perovskite, as a mineral from the lower mantle. *Science*, 374: 891~894.
- Tsuda Y, Yoshikawa M, Saiki T, Nakazawa S, Watanabe S. 2019. Hayabusa2-Sample return and kinetic impact mission to near-earth asteroid Ryugu. *Acta Astronautica*, 156: 387~393.
- Wilson J W, Cloudsley M S, Cucinotta F A, Tripathi R K, Nealy J E, Angelis G D. 2004. Deep space environments for human exploration. *Advances in Space Research*, 34(6): 1281~1287.
- Yang J, Wu W, Lian D, Rui H. 2021. Peridotites, chromitites and diamonds in ophiolites. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2(3): 198~212.
- Yelisseyev A P, Afanasiev V P, Panchenko A V, Gromilov S A, Kaichev V V. 2016. Yakutites: Are they impact diamonds from the Popigai crater? *Lithos*, 265: 278~291.
- Yu X, Long Z, Zhang Y, Qin L, Zhang C, Xie Z, Wu Y, Yan Y, Wu M, Wan J. 2021. Overview of gemstone resources in China. *Crystals*, 11(10): 1189.
- Zacny K, Chu P, Craft J, Cohen M M, James W, Hilscher B. 2013. Asteroid Mining-AIAA SPACE 2013 Conference and Exposition (AIAA).
- 陈丰, 李雄耀, 王世杰. 2010. 太阳系行星系统的形成和演化. *矿物岩石地球化学通报*, 29(1): 67~73.
- 陈鸣, 肖万生, 谢先德, 谭大勇, 曹裕波. 2009. 岫岩陨石撞击坑的证实. *科学通报*, 54(22): 3507~3511.
- 陈鸣, 谢先德, 肖万生, 谭大勇. 2020. 依兰陨石坑: 我国东北部一个新发现的撞击构造. *科学通报*, 65(10): 948~954.
- 何明跃, 王春利. 钻石. 北京: 中国科学技术出版社, 2016.
- 李建华, 胡军恒, 苏攀哲, 路继红, 臧金浩, 王裕昌. 2021. 培育钻石合成与分析进展. *宝石和宝石学杂志(中英文)*, 23(6): 12~24.
- 李三忠, 张国伟, 刘保华, 郝天珧, 戴黎明, 刘鑫, 刘丽萍. 2010. 新世纪构造地质学的纵深发展: 深海、深部、深空、深时四领域成就及关键技术. *地学前缘*, 17(3): 27~43.
- 连东洋, 杨经绥, 刘飞, 吴魏伟. 2019. 金刚石分类、组成特征以及我国金刚石研究展望. *地球科学*, 44(10): 3409~3453.
- 刘飞, 杨经绥, 连东洋, 余晓艳, Gwandu Kewame Rollyken. 2019. 博茨瓦纳和中国含金刚石金伯利岩的地质特征及对寻找类似岩体的启示. *中国地质*, 46(1): 43~76.
- 欧阳自远. 1997. 小天体撞击与古环境灾变: 新生代六次撞击事件的研究. 武汉: 湖北科学技术出版社.
- 欧阳自远, 邹永廖, 李春来, 刘建忠. 2002. 月球某些资源的开发利用前景. *地球科学*, 27(5): 498~503.
- 宋瑞祥, 丁毅. 2019. 金伯利岩的发现与研究. *河北地质大学学报*, 42(3): 1~6.
- 杨经绥, 连东洋, 吴魏伟, 芮会超. 2021. 俯冲物质深地幔循环: 地球动力学研究的一个新方向. *地质学报*, 95(1): 42~63.
- 苑执中, 开利剑. 2021. HPHT 和 CVD 培育钻石的鉴别简述及最新市场分析. *宝石和宝石学杂志*, 23(6): 40~50.
- 张蓓丽. 2006. *系统宝石学(第二版)*. 北京: 地质出版社.
- 郑永春. 2005. 模拟月壤研制与月壤的微波辐射特性研究. 中国科学院地球化学研究所. 博士学位论文.
- 郑永春, 欧阳自远. 2014. 太阳系探测的发展趋势与科学问题分析. *深空探测学报*, 1(2): 83~92.
- 郑永春, 张锋, 付晓辉, 邹永廖, 欧阳自远. 2011. 月球上的水: 探测历程与新的证据. *地质学报*, 85(7): 1069~1078.

LI Zhaoli, LIU Fei, ZHENG Yongchun, YU Xiaoyan, XIAO Bingjian, YANG Jingsui: Impact origin of diamond and prospecting for future mineral exploration.