

金伯利岩：地球深部探测的重要探针

王十安^{1, 2)}, 曾普胜^{1)*}, 刘斯文¹⁾, 温利刚³⁾, 李睿哲^{1, 2)}, 赵九江¹⁾

1) 自然资源部生态地球化学重点实验室, 国家地质实验测试中心, 北京 100037;

2) 中国地质大学(北京), 北京 100083;

3) 矿冶科技集团有限公司, 矿冶过程自动控制技术国家重点实验室, 北京 100160

摘 要: 金伯利岩是一种偏碱性的超基性岩, 来源于地幔深部, 富含挥发份和钾质, 属于火成岩类, 金伯利岩中主要含有镁铝榴石、金刚石、橄榄石、铬铁矿、铬透辉石、镁钛铁矿、锆石、碳硅石等造岩矿物。同时金伯利岩也被认为是含金刚石最主要的岩石。本文通过文献调研方法, 野外现场表明金伯利岩中含有深源包裹体; 全球金伯利岩主要分布在俄罗斯、博茨瓦纳、加拿大、安哥拉、南非、刚果民主和纳米比亚; 中国金伯利岩主要分布在华北地台, 在山东、辽宁、吉林、山西、河南和新疆等地。这些金伯利岩常常与深大断裂甚至地幔深部地质作用关系密切, 常出现标志性矿物橄榄石、石榴石、高铬磁铁矿, 伴有烃类或氢气。但含金刚石金伯利岩主要沿郯庐断裂带分布, 如辽宁瓦房店、山东蒙阴等地。从时代上看, 以往认为的早古生代的金伯利岩, 更可能都是在早期形成于华北地台之岩石圈底部, 而在中生代白垩纪时期才在大规模岩石圈拆沉的地质背景下的以快速上升的, 尤其是那些含金刚石的金伯利岩岩管更是快速上升的典型代表, 其标型矿物是镁铝榴石、高铬磁铁矿、钙钛矿等。国内辽宁瓦房店含金刚石金伯利岩产于郯庐断裂带东侧, 有着与同期金伯利岩相同的岩石矿物学特征, 其中的以 50 号岩管为代表的金刚石矿床是我国重要的战略矿产。金伯利岩及其中的金刚石带来众多直接的深部地幔信息, 中国瓦房店、蒙阴一带的金刚石来自上地幔, 而一些含硼蓝色金刚石则来自下地幔, 不同层圈的金伯利岩携带不同的标志矿物, 以橄榄石为例: 来自上地幔金伯利岩携带的橄榄石为橄榄石; 过渡带金伯利岩携带的主要为瓦兹利石和林伍德石; 下地幔的金伯利岩则为布里奇曼石, 它们是深部探测的重要探针。

关键词: 金伯利岩; 金刚石; 深部探测; 标型矿物; 岩石探针

中图分类号: P575 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2021.111002

Kimberlites: Important Probes for Deep Earth Exploration

WANG Shi-an^{1, 2)}, ZENG Pu-sheng^{1)*}, LIU Si-wen¹⁾, WEN Li-gang³⁾,
LI Rui-zhe^{1, 2)}, ZHAO Jiu-jiang¹⁾

1) Key Laboratory of Eco-geochemistry, Ministry of Natural Resources, National Research Center for Geoanalysis, Beijing 100037;

2) China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083;

3) BGRIMM Technology Group, State Key Laboratory of Process Automation in Mining and Metallurgy, Beijing 100160

Abstract: Kimberlite is a kind of alkaline ultrabasic rock, derived from the deep mantle, rich in volatile and potassium, belonging to igneous rocks. Kimberlite mainly contains magnesium aluminum garnet, diamond, olivine, chromite, chromium diopside, magnesium ilmenite, zircon, carbonsilica and other rock forming minerals. Kimberlite is also considered to be the most important diamond-bearing rock. In this study, through literature research, the field shows that kimberlite contains deep-source inclusions. Kimberlite is mainly distributed in Russia, Botswana, Canada, Angola, South Africa, Democratic Republic of Congo and Namibia. Chinese

本文由中国地质科学院基本科研业务费项目(编号: JYYWF20180101)、中国地质调查局地质调查项目(编号: DD20160220; DD20190589; DD20190703)和国家自然科学基金项目(编号: 41072073)联合资助。

收稿日期: 2021-08-12; 改回日期: 2021-10-30; 网络首发日期: 2021-11-20。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 王十安, 女, 1996 年生。硕士研究生。地质工程专业, 主要从事深部地质与金刚石研究。E-mail: 249574841@qq.com。

*通讯作者: 曾普胜, 男, 1964 年生。博士, 教授。长期从事岩石学、矿床学、勘查地球化学研究。通讯地址: 100037, 北京市西城区百万庄大街 26 号。E-mail: zengpusheng@qq.com。

kimberlites are mainly distributed in the North China Platform in Shandong, Liaoning, Jilin, Shanxi, Henan and Xinjiang. These kimberlites are often associated with deep faults and even deep mantle processes, often producing signature minerals such as olivine, garnet, magnetite, hydrocarbons, or hydrogen. However, diamond-bearing kimberlite is mainly distributed along the Tan-Lu fault zone, such as Wafangdian in Liaoning Province and Mengyin in Shandong Province. Look from age, ever think of early Paleozoic kimberlite and more were probably formed in early in the bottom of the lithosphere of north China platform, and in the Mesozoic cretaceous period under the background of large-scale lithosphere delamination geological with rapidly rising, especially those containing diamond kimberley intermediated-acidic tube is a typical representative of the rapid rise, The standard minerals are magnesium aluminum garnet, high chromium magnetite, perovskite and so on. The Wafangdian diamond-bearing kimberlite in Liaoning province is produced in the east of Tan-Lu fault zone and has the same petrological and mineralogical characteristics as the kimberlite of the same period. Among them, the diamond deposit represented by no. 50 rock pipe is an important strategic mineral in China. Diamond in kimberlite and many deep mantle information directly, brought Chinese Wafangdian diamond, darkened area from the upper mantle, while some boron blue diamond from the lower mantle, a sign of different layers of diamond with different minerals, olivine, for example: from the upper mantle diamond carry olivine olivine; The diamonds in the transition zone are mainly Wazilite and Ringwood stone. Bridgeman's diamonds in the lower mantle are important probes for deep exploration.

Key words: kimberlites; diamond; deep exploration; typomorphic minerals; petroprobe

金伯利岩属于偏碱性的镁铁质超基性岩,是自然界起源最深的岩浆,来自 150~300 km 的地幔,含有橄榄石、金云母、金刚石等特征性矿物,其中金刚石形成于更深的高温、高压的上地幔(Shirey et al., 2013)条件下,所以金伯利岩携带了宝贵的深部地质信息,是研究地球内部的重要窗口(连东洋, 2019)。

中国金伯利岩及其相关金刚石矿勘查,一直受到高度重视。1965 年在山东省蒙阴地区首次发现了有工业价值的金伯利岩型金刚石原生矿(刘继太, 2002),随后受到广泛关注,并做了大量的研究工作;1971 年在该区发现第一个金伯利岩体以来,已发现超过 100 个金伯利岩体,既有岩管也有岩脉,该区已提交 4 个大型原生金伯利岩型金刚石矿床和 3 个近源小型金刚石砂矿床(付海涛, 2020)。中国的金伯利岩带是世界金伯利岩带的一部分,特别是辽宁瓦房店—山东蒙阴含金刚石金伯利岩带,构成太平洋西岸金伯利岩带的重要组成部分。长期以来受到国内、国际同行的高度重视(Shirey et al., 2013; 宋瑞祥, 2013a),是深部探测的重要窗口(莫宣学, 2011)。本文对金伯利岩及相关金刚石等指示矿物最新研究做梳理总结,并结合辽宁瓦房店金伯利岩带及其金刚石矿产特征,探索金伯利岩与金刚石携带的深源信息,供对地球深部探测感兴趣的同行参考。

1 国内外金伯利岩研究现状

1.1 金伯利岩的概念

英国人路易斯最早提出将南非金伯利(Kimberley)地区含金刚石、呈岩管或岩墙产出的超基性角砾岩命名为金伯利岩(Kimberlite)。作为自然界中已知起源最深的岩浆岩,金伯利岩也是探究地

球深部信息的一个重要工具。携带了 150~300 km 范围甚至更深的地幔信息,包括矿物组成、岩石类型、地球化学特征、温压条件等。目前,世界上已有 30 多个国家发现了具有经济价值的金伯利岩管。我国于 1965 年在山东蒙阴发现了含金刚石的金伯利岩和贵州马坪“东风一号”含金刚石钾镁煌斑岩岩体(宋瑞祥, 2013a)。

金伯利岩是深部探测研究中最重要岩石类型之一,其分类命名等资料在国内文献中涉及甚少,而国内同行(尤其深地探测)又很需要了解这方面的信息,兹对金伯利岩做一简要介绍。金伯利岩是一种既熟悉又较为“陌生”的岩石,按照国际地科联火成岩分委会的分类命名(Le Maitre, 2002):金伯利岩分为一类和二类。一类金伯利岩对应于南非金伯利地区原型,原先被称为“玄武质金伯利岩”(Wagner, 1914);二类金伯利岩,则对应于“云母质或煌斑岩质金伯利岩”(Wagner, 1914)。为了让读者对金伯利岩有一个基本的经验判断,有必要介绍一下这两类金伯利岩。两组金伯利岩的特征矿物组合概括如下(Mitchell, 1979, 1986, 1994, 1995; Clement et al., 1984; Sparks et al., 2009):

第一类金伯利岩

这是一类富挥发分(主要是 CO_2)的钾质超基性岩,通常表现为明显的不等粒结构,结构是粗晶(指直径 0.5~10 mm 的大晶体)出现,并且有时出现巨晶(1~20 cm 的大晶体),镶嵌在细粒基质中。粗晶-巨晶组合,至少其中一些是捕虏晶,包括他形晶的橄榄石、镁钛铁矿、镁铝榴石、透辉石(有时低钙)、金云母、顽火辉石、贫钛铬铁矿。在所有金伯利岩中橄榄石是特征和优势组分,除了结晶分异的金伯

利岩外。

这类金伯利岩的基质含有第二代的原生自形-半自形橄榄石,与下述一种和多种原生矿物一起产出:钙镁橄榄石(monticellite)、金云母、钙钛矿、尖晶石(镁质钛尖晶石-镁铬铁矿-钛尖晶石-磁铁矿固溶体)、磷灰石、碳酸盐、蛇纹石。许多金伯利岩含有晚阶段嵌晶云母,属于富钡金云母-镁钡脆云母系列。含镍硫化物和金红石是常见的副矿物,较早形成的橄榄石、金云母、钙镁橄榄石、磷灰石常被岩浆期后的蛇纹石和方解石交代。

第一类金伯利岩的演化组分可能贫甚至缺粗晶,并且本质上有二代橄榄石、方解石、蛇纹石、磁铁矿和少量的金云母、磷灰石和钙钛矿组成。

很明显,金伯利岩是复杂的混杂岩石,从中不能用一个简单的定义来解决从包裹的捕虏晶中区分原生组分的问题。

粗晶包括镁橄榄石、高铬镁铝榴石、铁铝榴石-镁铝榴石、高铬透辉石、镁钛铁矿、金云母等晶体。它们现在通常被认为是源于幔源二辉橄榄岩、方辉橄榄岩、榴辉岩和交代的地幔橄榄岩捕虏体中分离而来的。大多数金刚石(不在上述“定义”中)即属于这套矿物,但很少见。

巨晶以镁钛铁矿、钛-镁铝榴石、透辉石、顽火辉石占优,它们相对贫铬(<2%Cr₂O₃)。

粗晶和巨晶都属于金伯利岩的特征组合,因为它们常出现在金伯利岩中。

第二类金伯利岩(或橙黄岩, orangite)

这是属于一类超钾质过碱性富挥发分(主要是H₂O)的岩石,以金云母粗晶和微斑岩与基质云母共生为特征,基质云母成分变化从四配铁金云母到金云母均有。磨圆的橄榄石粗晶和自形的原生橄榄石晶体均常见,但不是不变的主要成分。

基质中特征的原生矿物相包括:(1)透辉石(常具环带)-包裹覆盖的霓岩;(2)尖晶石,成分范围从含镁铬铁矿到含钛磁铁矿;(3)富铈、稀土钙钛矿;(4)富铈磷灰石;(5)富稀土磷酸盐(独居石、大青山矿);(6)属于锰钡矿族(hollandite)的钾钡钛酸盐;(7)钾质钛 13 酸盐(triskaidecatitanates, K₂Ti₁₃O₂₇);(8)含铈金红石和含锰钛铁矿。这些矿物嵌在后期的填隙物中,可含有方解石、白云石、碳酸铈钾矿及其他含稀土碳酸盐、毒重石、钡白云石(norsethite)和蛇纹石。

该类的演化成员包括基质的透长石钾质碱镁闪石(richterite)。锆硅酸盐(锆钙钾石——wadeite、锆石、锆榴石,钙、锆的硅酸盐)可能出现后期的基质矿物中,重晶石是常见的岩浆期后次生矿物。这组岩石在矿物学上更像钾镁煌斑岩,但在成分和总

体矿物组合上有重大的不同,上述细节可让它们区别于钾镁煌斑岩。

中国金伯利岩的分类命名可参考《火成岩岩石分类和命名方案》(GB/T 17412.1—1998)和矿物类型(常丽华等, 2009),并结合国际地科联最新发布的分类方案。

1.2 全球金伯利岩分布

金伯利岩主要分布在俄罗斯、博茨瓦纳、加拿大、安哥拉、南非、刚果民主和纳米比亚(图 1)(Shiery et al., 2013; 宋瑞祥, 2013a)。金伯利岩一般以岩筒、岩管、岩脉、岩床等形态产出(董振信, 1991; Field et al., 2007)。含矿金伯利岩通常分布在厚的稳定克拉通内(Clifford, 1966)。

1.3 中国金伯利岩分布

华北地台目前共发现有 12 个金伯利岩岩体群,分别是吉林集安、辽宁桓仁、铁岭、瓦房店(旧复县)、葫芦岛、内蒙古四子王旗龙头山、河北涉县、山西应县、大同采凉山、柳林尖家沟、山东蒙阴、河南鹤壁金伯利岩岩体群(图 2)(刘继太, 2002; 宋瑞祥, 2013b; 侯广顺等, 2016; 连东洋等, 2019)。其中山东蒙阴和辽宁瓦房店地区是中国目前仅有的两个金伯利岩型金刚石原生矿,也是工业价值最好的金刚石原生矿(连东洋等, 2019)。70 年代初,辽宁南部瓦房店地区发现了我国最大的金伯利岩金刚石原生矿,该矿储量大,质量好,具有较高的经济价值(贾晓丹, 2014)。

2 金伯利岩中的典型矿物及其深部信息

金伯利岩常见的典型矿物包括镁铝榴石、橄榄石、高铬磁铁矿等,部分还含有金刚石。

2.1 含金金刚石金伯利岩的矿物成分特点

含包裹体的金伯利岩型金刚石中大多数形成于岩石圈地幔,该类包裹体主要为橄榄石、辉石、石榴石、尖晶石以及硫化物等矿物(Shiery et al., 2013; 连东洋等, 2019)。少部分含包裹体的金刚石来自于软流圈、地幔过渡带、下地幔甚至核幔边界,如中国辽宁瓦房店和山东蒙阴的金刚石具有相似的岩石圈矿物包裹体组合,主要包含橄榄石、高铬尖晶石、透辉石、高铬磁铁矿、钙钛矿、石榴石、自然铁、硫化物等矿物(殷莉, 2008; 冯爱平等, 2021)(图 3, 图 4)。从表 1 可以看出,由富金刚石金伯利岩—贫(中)金刚石金伯利岩—无(极贫)金刚石金伯利岩,其化学成分的变化具有明显的方向性:超基性组 MgO 和 Cr₂O₃ 等的含量逐渐减少, TiO₂ 的含量由富金刚石到贫(中)金刚石金伯利岩显著增高,在无(极贫)金刚石金伯利岩中各地区相差较大。Fe₂O₃ 和 FeO 的含量总的趋势也是增加的,而且一般 Fe₂O₃>FeO(种瑞元, 1981)。



- 1—Diavik, Ekati, Snap Lake, Jericho, Gahcho Kue, DO-27; 2—Fort a la Corne; 3—Buffalo Hills; 4—State Line; 5—Prairie Creek; 6—Wawa; 7—Victor; 8—Renard; 9—Guaniamo; 10—Juina/Sao Luis; 11—Arenapolis; 12—Coromandel, Abaete, Canasta; 13—Chapad Daimantina; 14—Boa Vista; 15—Koidu; 16—Kankan; 17—Akwatia; 18—Tortiya; 19—Aredor; 20—Bangui; 21—Mbuji-Mayi; 22—Camafuca, Cuango, Catoca; 23—Mavinga; 24—Mwadi; 25—Luderitz, Oranjemund, Namaqualand; 26—Orapa/Damtshe, Lhetlakane, Jwaneng, Finsch; 27—Murowa, Venetia, The Oaks, Marsfontein, Premier, Dokolwayo, Roberts Victor, Letseng-la-Terae, Jagersfontein, Koffiefontein, Monastery, Kimberley (Bultfontein, Kimberley, DeBeers, Dutoitspan, Kamfersdam, Wessleton); 28—Kollur; 29—Majhgawan/Panna; 30—Momeik; 31—Theindaw; 32—Phuket; 33—West Kalimantan; 34—South Kalimantan; 35—Springfield Basin, Eurelia/Orroro, Echunga; 36—Argyle, Ellendale, Bow River; 37—Merlin; 38—Copetown/Bingara; 39—山东蒙阴 Mengyin, Shandong; 40—瓦房店 Wafangdian; 41—Mir, 23rd Party Congress, Dachnaya, Internationalskaya, Nyurbinskaya; 42—Aykhel, Yubileynaya, Udachnaya, Zarnitsa, Sytykanskaya, Komsomolskaya; 43—Ural Mts.; 44—Arkhangelsk; 45—Kaavi-Kuopio; 46—W Alps; 47—Moldanubian; 48—Norway; 49—Rhodope; 50—Urals; 51—Kokchetav; 52—秦岭 Qinling; 53—大别山 Dabieshan; 54—苏鲁 Sulu; 55—罗布莎 Luobusha; 56—Kontum; 57—New England Fold Belt; 58—Canadian Cordillera; 59—Lappajarvi; 60—Reis; 61—Zapadnaya; 62—Popigai; 63—Sudbury; 64—Chixculub.

图 1 全球金伯利岩分布图(据 Shirey et al., 2013 修改)

Fig. 1 Distribution map of kimberlite in the world(modified after Shirey et al., 2013)

2.2 金刚石中矿物包裹体特征

绝大多数金刚石属于两大类：橄榄岩型(Peridotitic 型或 P 型)和榴辉岩型(Eclogitic 型或 E 型)(Stachel and Harris, 2008)。P 型金刚石包裹体的主要矿物为橄榄石、单斜辉石、斜方辉石和石榴石；E 型金刚石包裹体主要矿物为单斜辉石和石榴石。P 型和 E 型金刚石包裹体的石榴石和单斜辉石成分存在差异：P 型的石榴石 $\omega(\text{Cr}_2\text{O}_3) > 1\%$ ；E 型的单斜辉石 $\text{Cr}^\#(100\text{Cr}/[\text{Cr}+\text{Al}]) < 7$ (Stachel and Harris, 2008)。金刚石包裹体在形成后与外界“隔离”，较好地保存了地球深部信息。包裹体的成分多种多样，有富含挥发份的流体或熔体、固态 CO_2 、碳化硅、碳酸盐、石墨、硫化物和硅酸盐等，及还原环境中还有自然硅等(曾普胜等, 2020)。

含硼蓝色(IIb 型)金刚石中含有系统的深部地幔矿物信息和流体信息(图 4, Smith et al., 2018)。其中，主要造岩矿物橄榄石、石榴石、辉石等随深度

变化而有规律地变化：对橄榄岩型(petidotite-type)地幔而言，橄榄石从上地幔向深部依次变为瓦兹利石(wadsleyite, 420—560 km 深度)→林伍德石(lingwoodite, ~560—670 km)→布里奇曼石(bridgmanite, 670—1000 km)；石榴石向深部依次变为镁铁榴石(majorite)→钙钛矿(Ca-perovskite)→布里奇曼石；而二辉橄榄岩仅能在地幔存在。对于玄武岩型(basalt-type)地幔，石榴石同橄榄岩型，单斜辉石(clinopyroxene)在上地幔占据优势，且在下地幔成分中出现斯石英(stishovite)-钙铁氧化物(CF)等标志性矿物(图 4)。

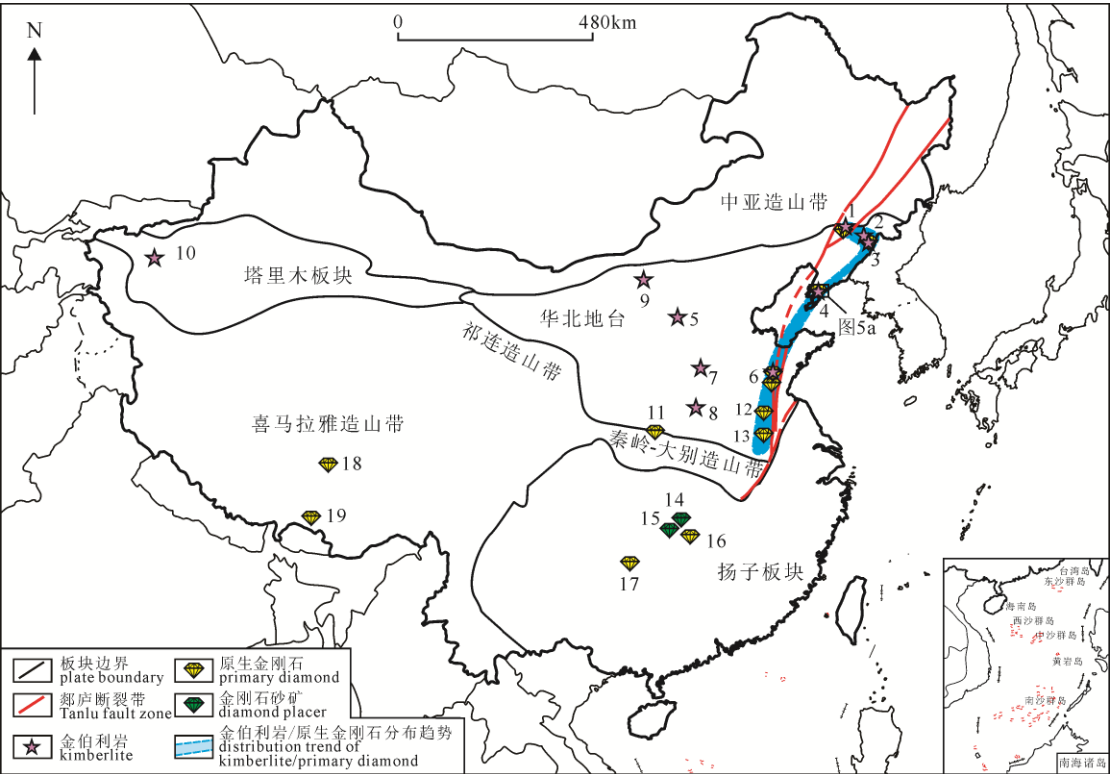
含硼蓝色金刚石中广泛地含有烃类(CH_4)和氢气(H_2)等原生的还原性气体组分(表 2)，表明金刚石及其金伯利岩所含的各种 CH_4 、 H_2 可直接来自于地球深部(Smith et al., 2018)，而无需浅部的生物活动参与合成，这对于理解沿深部断裂带展布的油气田的形成有重要意义。

由图 1、图 3、图 4 可见, 含金刚石地质体深度不仅是岩石圈(Lithospheric)尺度, 还包括整个地幔直达核幔边界(CMB), 进一步可从含金刚石岩石的相标志矿物(如橄榄石等)的出现与否来判别, 石墨相/金刚石相转变在稳定克拉通岩石圈内就可产出金刚石; 瓦兹利石-林伍德石的出现则表明金刚石源区位于地幔过渡带; 而布里奇曼石(bridgmanite)出现则表明源区已处于下地幔(Smith et al., 2018)。

整理前人(Smith et al., 2018)对 II 型(含硼)蓝色金刚石的 analysis 数据(表 2)可以发现, 不管是橄榄岩质成分地幔还是玄武质成分地幔, 在上地幔尺度,

柯石英、斜方辉石较常见, 在总样品数(46 件)中分别占 13%和 26%; 在地幔过渡带则广泛地出现瓦兹利石(Wadsleyite)和斜硅钙石(Larnite), 出现比例分别高达 70%和 50%; 在下地幔深度, 则主要为布里奇曼石(bridgmanite), 也可有广泛的铁、镁氧化物(如方铁矿、铁方镁石等), 并可出现甲烷(CH₄)等烃类物质和氢气(H₂), 这表明地幔既是还原的, 也可能是氧化的(Mao et al., 2017)。

金伯利岩中富含 H₂O、CO₂ 的矿物(金云母、蛇纹石、方解石)。金伯利岩浆在侵入的浅成阶段, 高度浓缩的爆破气体起着重要作用, 单位重量的



金伯利岩及金刚石产地: 1—辽宁铁岭; 2—吉林集安; 3—辽宁桓仁; 4—辽宁瓦房店; 5—山西采凉山; 6—山东蒙阴; 7—河北涉县; 8—河南鹤壁; 9—内蒙古四子王旗; 10—新疆巴楚瓦吉里塔格; 11—陕西丹凤; 12—江苏徐州塔山; 13—安徽栏杆; 14—湖南理公港(砂矿); 15—湖南沅水(砂矿); 16—湖南宁乡; 17—贵州马坪; 18—西藏东巧; 19—西藏罗布莎。

Kimberlite and diamond production place: 1—Tieling, Liaoning; 2—Ji'an, Jilin; 3—Huanren, Liaoning; 4—Wafangdian, Liaoning; 5—Cailiangshan, Shanxi; 6—Mengyin, Shandong; 7—Shexian county, Hebei; 8—Hebi, Henan; 9—Siziwang Banner, Inner Mongolia; 10—Jilitag, Bachu Wa, Xinjiang; 11—Danfeng, Shaanxi; 12—Tashan, Xuzhou, Jiangsu province; 13—Anhui railings; 14—Hunan Ligong Gang (placer mine); 15—Yuanshui, Hunan (placer); 16—Ningxiang, Hunan; 17—Maping, Guizhou; 18—East Qiao, Tibet; 19—Lobusa, Tibet.

图 2 中国金伯利岩和金刚石产地(据宋瑞祥, 2013b 修改)

Fig. 2 Kimberlite and diamond producing areas in China (modified after SONG, 2013b)

表 1 典型金伯利岩的平均化学成分(据种瑞元, 1981)

Table 1 Average chemical composition of representative kimberlites (after ZHONG, 1981)

产地岩石	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO
辽宁富金刚石金伯利岩	34.03	1.34	3.18	0.243	4.61	3.83	0.16	26.86
山东富金刚石金伯利岩	34.20	1.46	1.45	0.268	5.75	2.39	0.15	26.48
辽宁贫(中)金刚石金伯利岩	34.84	1.96	4.14	0.222	6.20	3.43	0.15	27.38
山东贫(中)金刚石金伯利岩	33.84	2.34	3.30	0.235	6.78	1.83	0.13	26.14
南非含金刚石金伯利岩	33.65	1.64	2.71	0.160	5.59	3.76	0.18	30.53
苏联含金刚石金伯利岩	28.87	1.37	2.71	0.134	5.07	2.26	0.11	25.63
辽宁无(极贫)金刚石金伯利岩	28.65	1.38	4.50	0.188	6.31	2.64	0.14	24.52
山东无(极贫)金刚石金伯利岩	21.65	0.85	4.19	0.190	4.66	2.21	0.15	11.67

负地形中, 岩管最高出露标高 190 m。岩管于 1974 年根据追索水系重砂异常发现, 被第四系残坡积物所覆盖。中国含金刚石的金伯利岩主要有辽宁瓦房店(复县)金伯利岩群和山东蒙阴金伯利岩群(郑建平, 1994)。辽宁瓦房店金伯利岩群和山东蒙阴金伯利岩岩群都处于古老的克拉通, 有着发育的深断裂, 辽宁瓦房店金伯利岩群位于中朝准地台上的辽东台隆南端, 西有开源营口断裂, 东有鸭绿江断裂, 金州断裂纵贯本区中部。其东西两部分在地层、岩浆活动方面均有明显差异, 在东部广泛出露前震旦纪的古老变质岩和燕山期花岗岩; 西部为震旦纪以来的一套沉积岩层, 仅在局部地区有结晶基底出露(丁俊英等, 2016)。

蒙阴金伯利岩群位于华北板块鲁西隆起区鲁中隆起内, 属于华北板块东部的冀鲁辽古陆核, 为太古代—古元古代克拉通。金伯利岩型金刚石原生矿需基底固结年龄大于 25 亿年~28 亿年太古代

地台(A 型克拉通)。目前已发现的金刚石原生矿带均分布在鲁西隆起区内的鲁中隆起之上(褚志远等, 2019)。本文重点阐述辽宁瓦房店地区金伯利岩矿床。

3.1 辽宁瓦房店金伯利岩带区域地质背景

辽宁瓦房店金伯利岩带是中国含金刚石最富最典型的金伯利岩, 其中赋存的金刚石资源量占中国的金刚石资源量 50%以上(付海涛, 2020), 其中, 50 号岩管含金刚石品质最好, 携带有丰富的深源信息, 与全球金刚石所含深源信息(Cartigny et al., 1997; Smith et al., 2018)可以对比。

根据钻探资料, 50 号金伯利岩管赋存于新元古界青白口系南芬组粉砂岩、页岩及南华系桥头组石英砂岩中(矿区地表仅出露桥头组)。矿区地层产状平缓, 倾角一般为 $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 。矿区内断裂构造比较发育, 破坏了金伯岩体的完整性, 但断距不大。矿区内见有辉绿岩脉产出(付海涛等, 2021)。勘探资料显示,

表 2 含硼蓝色金刚石的包裹体和流体组分统计表(根据 Smith et al., 2018 整理)
Table 2 Inclusion and fluid composition statistics of boron-bearing blue diamonds (compiled from Smith et al., 2018)

产出位置	包裹体中矿物名称(代号)	包裹体中矿物英文名称	玄武质总成分		玄武质和/或橄榄质总成分		橄榄岩质总成分		合计		备注
			出现件数	占比(总数为 9 件)	出现件数	占比(总数为 13 件)	出现件数	占比(总数为 24 件)	出现件数	占比(总数为 46 件)	
上地幔	橄榄石	Olivine	2	22.22%	2	15.38%	2	8.33%	6	13.04%	
	石墨		0	0.00%	2	15.38%	0	0.00%	2	4.35%	
	蓝晶石	Kyanite	2	22.22%	0	0.00%	0	0.00%	2	4.35%	
	刚玉	Corundum	1	11.11%	0	0.00%	0	0.00%	1	2.17%	
	微量辉石	trace Px	1	11.11%	0	0.00%	0	0.00%	1	2.17%	
	钛铁矿	Ilmenite	1	11.11%	0	0.00%	1	4.17%	2	4.35%	
	霞石	Nepheline	1	11.11%	0	0.00%	1	4.17%	2	4.35%	
	辉石(Px)	Pyroxene	2	22.22%	0	0.00%	1	4.17%	3	6.52%	
	斜方辉石(Opx)	Orthopyroxene	3	33.33%	4	30.77%	5	20.83%	12	26.09%	
	单斜辉石(Cpx)	Clinopyroxene	2	22.22%	0	0.00%	1	4.17%	3	6.52%	
	硫化物	sulfide	1	11.11%	0	0.00%	0	0.00%	1	2.17%	
	柯石英	Coesite	6	66.67%	0	0.00%	0	0.00%	6	13.04%	
	硅灰石	Wollastonite	1	11.11%	0	0.00%	1	4.17%	2	4.35%	
	假硅灰石	Pseudowollastonite	0	0.00%	1	7.69%	2	8.33%	3	6.52%	
过渡带	尖晶石	Spinel	2	22.22%	0	0.00%	2	8.33%	4	8.70%	
	瓦兹利石(wal)	Wadsleyite	6	66.67%	6	46.15%	20	83.33%	32	69.57%	
	纤铁矿	lepidocrocite	0	0.00%	0	0.00%	1	4.17%	1	2.17%	
	斜硅钙石	Larnite	4	44.44%	5	38.46%	14	58.33%	23	50.00%	
	杰本石	Jeffbenite	7	77.78%	0	0.00%	3	12.50%	10	21.74%	
	硫化铁	FeS	1	11.11%	0	0.00%	0	0.00%	1	2.17%	
下地幔	碳化铁	Fe-carbide	1	11.11%	0	0.00%	0	0.00%	1	2.17%	
	方铁矿	wustite	1	11.11%	0	0.00%	0	0.00%	1	2.17%	
	钙钛矿(Pv)	Perovskite	1	11.11%	0	0.00%	0	0.00%	1	2.17%	
	铁方镁石	ferropericase	0	0.00%	7	53.85%	0	0.00%	7	15.22%	
	甲烷(CH ₄)	Methane	2	22.22%	4	30.77%	4	16.67%	10	21.74%	也可出现于上地幔和过渡带
	氢(H ₂)	Hydrogen	0	0.00%	3	23.08%	1	4.17%	4	8.70%	

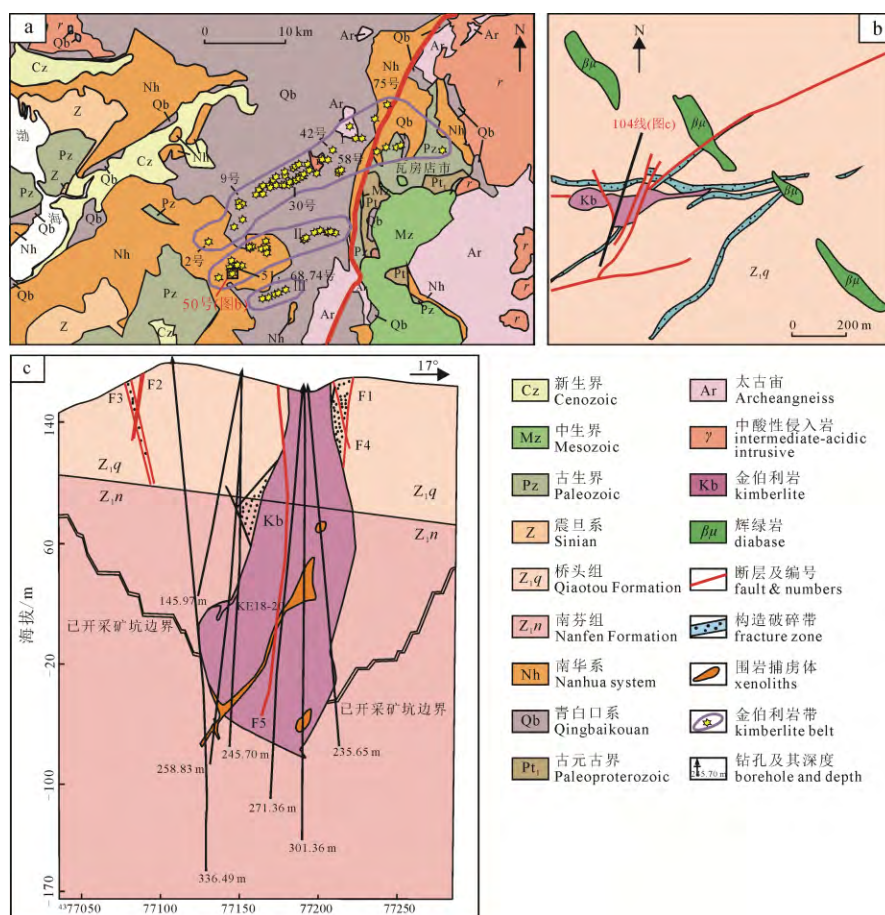
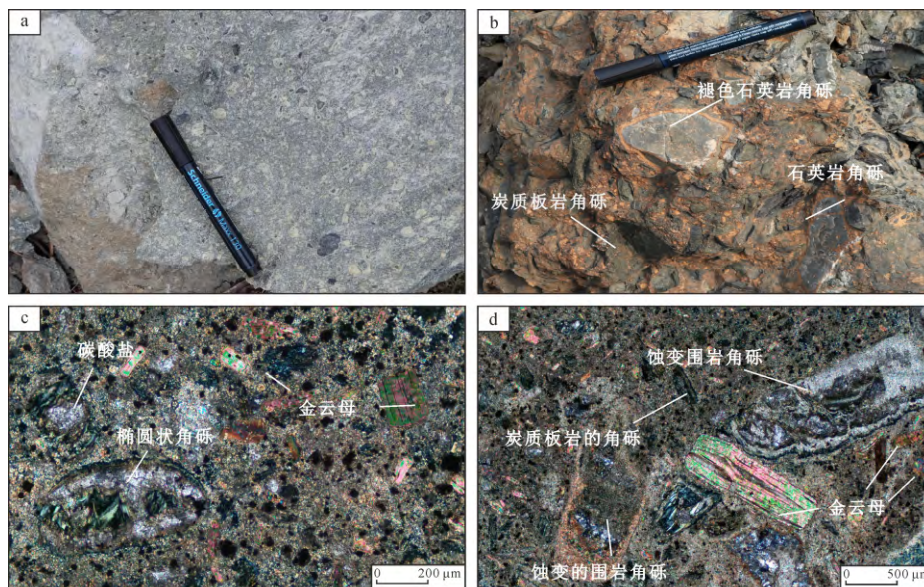


图5 辽宁瓦房店金伯利岩带区域地质图(a, 据付海涛, 2020 修改)及 50 号岩管地质图(b)、104 线勘探剖面图(c) (b, c 据丁俊英等, 2016 改编)

Fig. 5 Regional geological map of the Wafangdian kimberlite belt (a, modified after FU, 2020), plan geological map of No. 50 pipe (b) and exploration profile of line 104 (c) (b and c, compiled after DING et al., 2016)



a—含磨圆角砾的蚀变金伯利岩(含金刚石); b—含次棱角状围岩复成分(石英岩, 碳质板岩)角砾的金伯利岩(不含金刚石); c—显微镜下的含磨圆角砾的蚀变金伯利岩(含金刚石), 正交偏光;

d—显微镜下含次棱角状围岩复成分(石英岩, 碳质板岩)角砾的金伯利岩(不含金刚石), 正交偏光。

a—altered kimberlite (diamond-bearing) with ground breccia; b—kimberlite (without diamond) with subangular surrounding rock complex composition (quartzite, carbonaceous slate) breccia; c—Modified kimberlite (with diamond) with grinding breccia under microscope, orthogonal polarizing; d—kimberlite (without diamond) with subangular surrounding rock complex composition (quartzite, carbonaceous slate) breccia under microscope, orthogonal polarization.

图6 辽宁瓦房店金伯利岩带 50 号岩管含角砾状碳酸岩的金伯利岩

Fig. 6 Kimberlite with rounded breccias from No. 50 pipe of the Wafangdian, Liaoning

50 号金伯利岩管的地表形态大致呈蝌蚪状, 呈近东西走向, 长约 275 m, 宽约 55 m, 岩管总体产状倾向南西, 倾角 $70^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 。岩管可分为东西两段, 西段主矿体平面上呈近椭圆状, 东部为脉状矿体。岩管从地表向下呈逐渐膨大的趋势。-20 m 标高时, 岩管面积是地表面积的 2.3 倍(宋瑞祥, 2013b)。在-70 m 标高附近岩管急剧缩小并尖灭(图 5b, c)。

在笔者的野外观察中, 可见 50 号岩管中的金伯利岩主要成分有橄榄石, 金云母、蛇纹石、金刚石。50 号岩管中含金刚石的金伯利岩, 野外金伯利岩呈灰白色, 块状构造, 斑状结构, 斑晶为橄榄石和金云母, 含蚀变灰色金伯利岩角砾, 角砾呈圆状-浑圆状角砾, 角砾 1 mm(图 6a), 镜下可见自形金云母和橄榄石斑晶(图 6c)。

不含金刚石的金伯利岩, 含有两种角砾, 一部分来自于围岩的复成分角砾, 围岩角砾主要为石英(砂)岩、炭质板岩, 呈次棱角状-浑圆状, 粒径 2~4 cm, 另一部分为岩浆角砾, 成分为少量橄榄石和金云母, 角砾多为浑圆状-次圆状, 粒径 1 mm, 角砾间有蚀变的隐晶质-显微晶质金伯利岩填充(图 6b), 镜下可见蚀变的围岩角、炭质板岩的角砾, 金云母等(图 6d)。

3.2 成矿时代

瓦房店地层由太古代—古元古代基底(鞍山群和辽河群混合花岗岩、斜长角闪岩、片麻岩等)和前震旦系—古生代(青白口系、南华系和寒武系灰岩、页岩等)组成(池际尚等, 1996; 池际尚和路凤香, 1996; Zhang et al., 2010)。锆石 SHRIMP U-Pb 年龄显示鞍山群形成年代为 3.8 Ga(Liu et al., 1992), 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄显示辽河群最大沉积年龄为 2.1 Ga (Luo et al., 2004)。最新研究发现 50 号岩管金伯利岩岩管与后期的年龄为 166~138 Ma(丁俊英等, 2016)的石英闪长玢岩等岩脉相互穿切, 表明金伯利岩可能存在燕山期活动的时期。

辽宁瓦房店金伯利岩带中, 金刚石和地幔包体和含量差异较大, 但都含有丰富的橄榄岩包体, 属于 II 型(云母型)金伯利岩(郑建平等, 1994; 宋瑞祥, 2013b; 付海涛, 2020), 其中的金刚石的包裹体中含有丰富的甲烷(CH_4)和氢气(H_2)(郑建平等, 1994), 与全球含金刚石金伯利岩可以类比(Shirey et al., 2013), 是中国深部探测郯庐断裂带的最佳窗口之一。

4 结论

通过综合对比国内外金伯利岩, 可以得出如下结论:

(1)中国金伯利岩也产于稳定克拉通, 主要分布于郯庐断裂带两侧, 属于 II (云母)型金伯利岩。

(2)辽宁瓦房店—山东蒙阴的金伯利岩带的活动时期存在 138~121 Ma 时期的金伯利岩活动。

(3)金伯利岩源区, 除了岩石圈地幔外, 还可以存在地幔过渡带, 乃至下地幔, 各个层圈的源区的矿物组合随温压条件产生相变, 橄榄石在包括岩石圈在内的上地幔为橄榄石; 在地幔过渡带则变为瓦兹利石(β 相橄榄石)和林伍德石(γ 相橄榄石), 在下地幔则变为布里奇曼石(δ 相橄榄石)。中国金伯利岩中源区包体主要产出橄榄石, 属于相对较浅的岩石圈(lithospheric)型金伯利岩。

(4)金刚石及其寄主岩石之一的金伯利岩中, 常常含有丰富的深部源区信息, 包括反映深度的橄榄石-石榴石-辉石类矿物和铁-镁的氧化物、碳化物, 向深部有规律相变, 并且常常伴有甲烷(CH_4)、氢气(H_2)等烃类或天然气信息, 是深部探测的重要探针。

致谢: 在辽宁瓦房店的野外实地调查中得到了辽宁省第六地质大队高级工程师冯闯、康宁和国家地质实验测试中心研究生张捷的指导和帮助, 在此表示深深地感谢!

Acknowledgements:

This study was supported by Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund (No. JYYWF20180101), China Geological Survey (Nos. DD20160220; DD20190589; DD20190703), and National Natural Science Foundation of China (No. 41072073).

参考文献:

- 常丽华, 曹林, 高福红. 2009. 火成岩鉴定手册[M]. 北京: 地质出版社.
- 池际尚, 路凤香, 刘永顺, 胡世杰, 赵宗贺, 叶德隆, 郑建平, 赵磊, 张宏福, 江万. 1996. 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.
- 池际尚, 路凤香. 1996. 华北地台金伯利岩及古生代岩石圈地幔特征[M]. 北京: 科学出版社.
- 褚志远, 王伟德, 吕青, 刘卫东, 康丛轩, 王树星. 2019. 山东蒙阴坡里地区金伯利岩带形成时代——来自辉绿岩锆石 U-Pb 定年数据的证据[J]. 地质通报, 38(1): 44-50.
- 丁俊英, 倪培, 朱仁智, 居易. 2016. 30 号、42 号、50 号、1 号金伯利岩管典型矿床研究报告[R]. 北京: 中国地质调查局: 166.
- 董振信. 1991. 我国金伯利岩型金刚石矿床的若干地质特征及其找矿标志[J]. 矿床地质, 10(3): 255-264.
- 冯爱平, 刘传朋, 褚志远, 夏立献, 肖丙建, 李新风, 徐磊磊, 赵秀芳. 2021. 鲁西金刚石原生矿近十年深部成矿预测[J].

地球学报, 42(6): 881-894.

付海涛, 万方来, 蒋丽丽, 徐华, 李伟昕, 杨磊. 2021. 辽宁瓦房店金刚石矿田金伯利岩地质特征[J]. 地球学报, 859-867.

付海涛. 2020. 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, 94(9): 2640-2649.

国家质量技术监督局. 1998. GB/T 17412.1-1998 岩石分类和命名方案-火成岩岩石分类和命名方案[S].

侯广顺, 向世红, 齐永安, 支凤岐, 王明国, 周雪, 林刘军, 李明, 吴成斌. 2016. 河南鹤壁地区金伯利岩中地幔包体矿物化学特征[J]. 矿物学报, 36(3): 318-328.

贾晓丹. 2014. 辽宁瓦房店金伯利岩中铬尖晶石的矿物学特征及其指示意义[D]. 北京: 中国地质大学.

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[J]. 地球科学, 44(10): 3409-3453.

刘继太. 2002. 山东金刚石原生矿找矿前景探讨[J]. 山东地质, 18(3-4): 100-104.

莫宣学. 2011. 岩浆与岩浆岩: 地球深部“探针”与演化记录[J]. 自然杂志, 33(5): 255-259, 313.

宋瑞祥. 2013a. 闪光钻石——世界金刚石找矿史[M]. 北京: 地质出版社.

宋瑞祥. 2013b. 中国金刚石矿床专论: 中国金刚石找矿与开发[M]. 北京: 地质出版社.

殷莉. 2008. 华北地台金刚石包裹体特征及意义——以山东蒙阴为例[D]. 武汉: 中国地质大学: 1-68.

曾普胜, 赵九江, 温利刚, 汪双清, 张小涛, 王十安. 2020. 郯庐断裂带山东段金伯利岩和碱性岩浆岩的深源特征矿物信息及其资源能源意义[J]. 地质学报, 94(9): 2626-2639.

郑建平, 路凤香, 郭晖, 任迎新. 1994. 金刚石中流体包裹体的研究[J]. 科学通报, 39(3): 253-256.

种瑞元. 1981. 金伯利岩的岩石化学特征与含金金刚石程度的判别[J]. 地球化学, 10(4): 356-364.

References:

CARTIGNY P, BOYD S, HARRIS J, JAVOY M. 1997. Nitrogen isotopes in peridotitic diamonds from Fuxian, China: the mantle signature[J]. Terra Nova, 9(4): 175-179.

CHANG Li-hua, CAO Lin, GAO Fu-hong. 2009. Handbook of Igneous Rock Identification[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).

CHI Ji-shang, LU Feng-xiang, LIU Yong-shun, HU Shi-jie, ZHAO Zong-he, YE De-long, ZHENG Jian-ping, ZHAO Lei, ZHANG Hong-fu, JIANG Wan. 1996. Study on metallogenic Regularity and Metallogenic Regularity of Primary Diamond in China[M]. Beijing: China University of Geosciences Press(in Chinese).

CHI Ji-shang, LU Feng-xiang. 1996. Kimberlites and Paleozoic lithosphere porphy in North China Platform[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).

CHU Zhi-yuan, WANG Wei-de, LÜ Qing, LIU Wei-dong, KANG Cong-xuan, WANG Shu-xing. 2019. The formation age of the Kimberlite zone in Poli area of Mengyin, Shandong Province:

Zircon U-Pb dating data of diabase[J]. Geological Bulletin of China, 38(1): 44-50(in Chinese with English abstract).

CLEMENT C R, SKINNER E M W, SMITH B H S. 1984. Kimberlite redefined[J]. The Journal of Geology, 92(2): 223-228.

CLIFFORD T N. 1966. Tectono-metallogenic units and metallogenic provinces of Africa[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1(6): 421-434.

DING Jun-ying, NI Pei, ZHU Ren-zhi, JU Yi. 2016. Research report on the No.30, no.42, No.50 and No.1 typical kimberlitic pipe deposits[R]. Beijing: China Geological Survey: 166(in Chinese).

DONG Zhen-xin. 1991. Some geological characteristics of kimberlite type diamond deposits in China and their ore-prospecting indicators[J]. Mineral Deposits, 10(3): 255-264(in Chinese with English abstract).

FENG Ai-ping, LIU Chuan-peng, CHU Zhi-yuan, XIA Li-xian, XIAO Bing-jian, LI Xin-feng, XU Lei-lei, ZHAO Xiu-fang. Deep Metallogenic Prediction of a Primary Diamond Deposit in Recent Ten Years in Western Shandong Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 42(6): 881-894(in Chinese with English abstract).

FIELD M, STIEFENHOFER J, ROBEY J, KURSZAUKIS S. 2007. Kimberlite-hosted diamond deposits of southern Africa: A review[J]. Ore Geology Reviews, 34(1): 33-75.

FU Hai-tao. 2020. Analysis of kimberlite emplacement mechanism in the Wafangdian diamond ore field[J]. Acta Geologica Sinica, 94(9): 2640-2649(in Chinese with English abstract).

FU Hai-tao, Wan Fang-lai, Jiang Li-li, Xu Hua, Li Yixin, Yang Lei. 2021. Geological characteristics of kimberlite in Wafangdian Diamond ore field, Liaoning province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 42(6): 859-867(in Chinese with English abstract).

HOU Guang-shun, XIANG Shi-hong, QI Yong-an, ZHI Feng-qi, WANG Ming-guo, ZHOU Xue, LIN Liu-jun, LI Ming, WU Cheng-bin. 2016. Mineral chemical study on mantle xenoliths from kimberlites in Hebi region, North China Craton[J]. Acta Mineralogica Sinica, 36(3): 318-328(in Chinese with English abstract).

JIA Xiao-dan. 2014. Mineralogical characteristics and indicative significance of chromium spinel in kimberlite, Wafangdian, Liaoning Province[D]. Beijing: China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).

JU Yi, ZHU Ren-zhi, NI Pei, WANG Guo-guang, DING Jun-ying, KANG Ning, ZHU An-dong, HUANG Bao, ZHOU Hua. 2016. Composition characteristics and significance of spinel in the kimberlite from No. 30 pipe in the Wafangdian area, China[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 35(6): 1217-1225(in Chinese with English abstract).

LE MAITRE R W. 2002. Igneous rocks: a classification and glossary of terms(2nd edition). Recommendation of the International Union of Geological Sciences Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks[M]. New York, Cambridge, Cambridge University Press: 13-15.

- LIAN Dong-yang, YANG Jing-sui, LIU Fei, WU Wei-wei. 2019. Diamond classification, compositional characteristics, and research progress: A review[J]. *Earth Science*, 44(10): 3409-3453(in Chinese with English abstract).
- LIU D Y, NUTMAN A P, COMPSTON W, WU J S, SHEN Q H. 1992. Remnants of ≥ 3800 Ma crust in the Chinese part of the Sino-Korean craton[J]. *Geology*, 20(4): 339-342.
- LIU Ji-tai. 2002. Study on primary diamond ore-forming future in Shandong Province[J]. *Geology of Shandong*, 18(3-4): 100-104(in Chinese with English abstract).
- LUO Yan, SUN Min, ZHAO Guo-chun, LI San-zhong, XU Ping, YE Kai, XIA Xiao-ping. 2004. LA-ICP-MS U-Pb zircon ages of the Liaohe Group in the Eastern Block of the North China Craton: constraints on the evolution of the Jiao-Liao-Ji Belt[J]. *Precambrian Research*, 134(3): 349-371.
- MAO Ho-kwang, HU Qing-yang, YANG Liu-xiang, LIU Jin, KIM D Y, MENG Yue, ZHANG Li, PRAKAPENKA V B, YANG Wen-ge, MAO W L. 2017. When water meets iron at Earth's core-mantle boundary[J]. *National Science Review*, 4(6): 870-878.
- MITCHELL R H. 1979. The alleged kimberlite-carbonatite relationship: Additional contrary mineralogical evidence[J]. *American Journal of Science*, 279(5): 570-589.
- MITCHELL R H. 1986. Kimberlites: Mineralogy, Geochemistry, and Petrology[M]. New York: Plenum Press: 442.
- MITCHELL R H. 1994. The lamprophyre facies[J]. *Mineralogy and Petrology*, 51: 137-146.
- MITCHELL R H. 1995. Kimberlites, Orangeites, and Related Rocks[C]//Geochemistry of Orangeites. New York: Springer: 249-302.
- MO Xuan-xue. 2011. Magma and magmatic/Igneous rocks: a lithoprobe into the deep earth and records of the earth's evolution[J]. *Chinese Journal of Nature*, 33(5): 255-259, 313(in Chinese with English abstract).
- SCOTT SMITH B H, DANCHIN R V, HARRIS J W, STRACKE K J. 1984. Kimberlites near orroroo, South Australia[J]. *Developments in Petrology*, 11: 121-142.
- SHIREY S B, CARTIGNY P, FROST D J, KESHAV S, NESTOLA F, NIMIS P, PEARSON D G, SOBOLEV N V, WALTER M J. 2013. Diamonds and the geology of mantle carbon[J]. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 75(1): 355-421.
- SMITH E M, SHIREY S B, NESTOLA F, BULLOCK E S, WANG Jian-hua, RICHARDSON S H, WANG Wu-yi. 2016. Large gem diamonds from metallic liquid in Earth's deep mantle[J]. *Science*, 354(6318): 1403-1405.
- 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[J]. *Nature*, 560(7716): 84-87. doi:10.1038/s41586-018-0334-5.
- SONG Rui-xiang. 2013a. Flash diamond: the history of diamond prospecting in the world[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- SONG Rui-xiang. 2013b. Diamond deposits in China: Prospecting and development of diamond deposits in China[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- SPARKS R S J, BROOKER R A, FIELD M, KAVANAGH J, SCHUMACHER J C, WALTER M J, WHITE J. 2009. The nature of erupting kimberlite melts[J]. *Lithos*, 112: 429-438.
- STACHEL T, HARRIS J W. 2008. The origin of cratonic diamonds — Constraints from mineral inclusions[J]. *Ore Geology Reviews*, 34(1-2): 5-32.
- The State Bureau of Quality And Technical Supervision. 1998. Classification and nomenclature schemes of the rocks-Classification and nomenclature schemes of igneous rock[S].
- WAGNER P A. 1914. The diamond fields of Southern Africa[M]. Johannesburg: The Transvaal Leader.
- WANG Yan-hong. 1988. Classification, nomenclature and rock characteristics of kimberlite[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 8(1): 106-116(in Chinese).
- YANG Jing-sui. 2020. Diamond in oceanic peridotites-chromitites and recycled in deep mantle[J]. *Journal of Geomechanics*, 26(5): 731-741(in Chinese with English abstract).
- YIN Li. 2008. The characters and significance of diamond inclusions in the North China Craton—Taking Shandong Mengyin as an example[D]. Wuhan: China University of Geosciences: 1-68(in Chinese with English abstract).
- ZENG Pu-sheng, ZHAO Jiu-jiang, WEN Li-gang, WANG Shuang-qing, ZHANG Xiao-tao, WANG Shi-an. 2020. Deep source characteristics of the kimberlite and alkaline intrusives in the Shandong segment of the Tan- Lu fault belt and their resource and energy significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(9): 2626-2639.
- ZHANG Hong-Fu, ZHOU Mei-Fu, SUN Min, ZHOU Xin-Hua. 2010. The origin of Mengyin and Fuxian diamondiferous kimberlites from the North China Craton: Implication for Palaeozoic subducted oceanic slab-mantle interaction[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 37(5): 425-437.
- ZHENG Jian-ping, LU Feng-xiang, GUO Hui, REN Ying-xin. 1994. Research on fluid inclusion in diamond[J]. *Chinese Science Bulletin*, 39(3): 253-256(in Chinese).
- ZHONG Rui-yuan. 1981. Petrochemical characteristics of kimberlites and their diamond-bearing degree[J]. *Geochimica*, 10(4): 356-364(in Chinese with English abstract).