

doi: 10.12029/gc20190105

刘飞, 杨经绥, 连东洋, 余晓艳, Kewame Rollyken Gwandu. 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[J]. 中国地质, 46(1): 43-76.

Liu Fei, Yang Jingsui, Lian Dongyang, Yu Xiaoyan, Kewame Rollyken Gwandu. 2019. Metallogenic features of diamondiferous kimberlites in Botswana and China: Enlightenment for exploration of the same type deposits[J]. Geology in China, 46(1): 43-76(in Chinese with English abstract).

## 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

刘飞<sup>1</sup>, 杨经绥<sup>1</sup>, 连东洋<sup>2</sup>, 余晓艳<sup>3</sup>, Kewame Rollyken Gwandu<sup>4</sup>

(1. 地幔研究中心, 自然资源部深地动力学实验室, 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏南京 210023; 3. 中国地质大学珠宝学院, 北京 100083; 4. Botswana Geoscience Institute, Lobatse 70883, Botswana)

**摘要:** 金刚石及其寄主岩石是人类认识地球深部物质组成和性质、壳幔和核幔物质循环重要研究对象。本文总结了不同金刚石类型的分布, 着重对比了博茨瓦纳和中国含金刚石金伯利岩的地质特征, 取得如下认识: (1) 博茨瓦纳含矿原生岩石仅为金伯利岩, 而中国含矿岩石成分复杂, 金伯利岩主要出露在华北克拉通, 展布于郯庐、华北中央和华北北缘金伯利岩带, 具有工业价值的蒙阴和瓦房店矿床分布于郯庐金伯利岩带中; 钾镁煌斑岩主要出露在华南克拉通, 重点分布在江南和华南北缘钾镁煌斑岩带中; (2) 钙钛矿原位 U-Pb 年龄和 Sr、Nd 同位素显示, 86~97 Ma 奥拉帕金伯利岩群和 456~470 Ma 蒙阴和瓦房店金伯利岩均具有低  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  (0.703~0.705) 和中等  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  (-0.09~+5) 特征, 指示金伯利岩浆源自弱亏损地幔或初始地幔源区; (3) 博茨瓦纳金伯利岩体绝大多数以岩筒产出, 而中国以脉状为主岩筒次之; 博茨瓦纳岩筒绝大部分为火山口相, 中国均为根部相, 岩筒地表面积普遍小于前者; (4) 奥拉帕 A/K1 和朱瓦能金伯利岩体是世界上为数不多的主要产出榴辉岩捕虏体和 E 型金刚石的岩筒之一, 而同位于奥拉帕岩群的莱特拉卡内、丹姆沙和卡罗韦岩体与我国郯庐带的金伯利岩体类似, 均主要产出地幔橄榄岩捕虏体以及 P 型和 E 型金刚石; (5) 寻找含矿金伯利岩重点注意以下几点: 克拉通内部和周缘深大断裂带是重要的控岩构造; 镁铝榴石、镁铁钛矿、铬透辉石、铬尖晶石和铬金红石等是寻找含金刚石金伯利岩重要的指示矿物; 航磁等地球物理测量需与土壤取样找矿方法相结合才能取得更好效果; (6) 郯庐金伯利岩带、江南钾镁煌斑岩带和塔里木地块是中国重要含矿岩石的找矿靶区, 冲积型金刚石成矿潜力巨大。

**关键词:** 金伯利岩; 金刚石; 找矿标志; 博茨瓦纳; 中国

中图分类号: P619.24<sup>1</sup> 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2019) 01-0043-34

### Metallogenic features of diamondiferous kimberlites in Botswana and China: Enlightenment for exploration of the same type deposits

LIU Fei<sup>1</sup>, YANG Jingsui<sup>1</sup>, LIAN Dongyang<sup>2</sup>, YU Xiaoyan<sup>3</sup>, Kewame Rollyken Gwandu<sup>4</sup>

(1. CARMR, Key Laboratory of Deep-Earth Dynamics of Land and Resources, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological

收稿日期: 2018-08-03; 改回日期: 2019-01-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(41672063, 41773029, 41373029, 41720104009), 中国地质调查局地质调查项目(DD20160023-01, DD20160022-01) 和科技部项目(2014DFR2127C)联合资助。

作者简介: 刘飞, 男, 1982年生, 博士, 主要从事蛇绿岩和金刚石的成因研究; E-mail: lfhy112@126.com; liufei@cags.ac.cn。

*Sciences, Beijing 100037, China; 2. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, Jiangsu, China; 3. School of Gemology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;*  
*4. Botswana Geoscience Institute, Lobatse 70883, Botswana)*

**Abstract:** Important implications for the interior workings, constituent, circulation between crust and mantle, convection between core and mantle of the Earth can be drawn by studying diamonds and their hosted rocks. Based on the geological comparison of metallogenic kimberlites from super-giant deposits in Botswana and Mengyin and Wafangdian deposits in China, the authors put forward some exploration suggestions and prospecting clues as follows: (1) Kimberlite is a unique diamondiferous rock in Botswana, whereas lamproite is a main hosted-rock in South China craton including two important lamproite zones along the Jiangnan orogenic belt and northern margin of South China craton. Kimberlite is dominantly distributed in the North China craton, which is composed of three kimberlitic zones along Tanlu fault, Trans-North China orogen and northern margin of North China. Two industrial value diamondiferous kimberlite deposits are distributed in the Tanlu zone. (2) In-situ U-Pb age and Sr, Nd isotopic data of perovskites show that 86–97 Ma Orapa kimberlites and 456–470Ma Mengyin and Wafangdian kimberlites have low  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratios of 0.703–0.705, medium  $\epsilon\text{Nd}(t)$  values ranging from –0.09 to 5, indicating that primary kimberlitic magmas were likely derived from primitive mantle or convective lower mantle. (3) Primary kimberlites in Botswana dominantly occur as pipes, while in China they mainly occur as irregular fissures, expressed as dykes and lesser extent sills. Crater facies are pervasively observed in Orapa and Jwaneng kimberlite pipes in comparison with hypabyssal (or root zone) facies in Mengyin and Wafangdian pipe clusters. (4) Orapa A/K1 and Jwaneng mines are a few diamondiferous kimberlitic pipes yielding predominantly eclogitic xenoliths and E type diamond. In contrast, Letlhakane, Damtshaa and Karowe mines also occur in Orapa cluster, Mengyin and Wafangdian mines from the Tanlu kimberlite belt have mainly peridotite xenoliths as well as P type and E type diamonds. (5) Some exploration suggestions and prospecting clues of diamondiferous kimberlites are presented as follows: (A) Deep faults cutting through on-craton and off-craton subcontinental lithospheric mantle play a role in the emplacement of kimberlites; (B) Soil sampling for kimberlite indicator minerals such as picroilmenite and garnet, Cr-rich rutile, Cr-spinel and Cr-diopside is a primary exploration tool; (C) Geophysical surveys such as aeromagnetic method should be combined with soil sampling for better prospecting results. (6) Work in diamondiferous prospecting target areas in the Tanlu kimberlite zone, Jiangnan lamproite zone and Tarim block should be further strengthened. Illuvial type diamond deposits in China have great potential for mineralization.

**Keywords:** kimberlite; diamond; prospecting indicator; Botswana; China

**About the first author:** LIU Fei, male, born in 1982, mainly engages in the research on genesis of ophiolites and ophiolite-type and kimberlite-type diamond; E-mail: lfhy112@126.com; liufei@cags.ac.cn

**Fund support:** Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41672063, 41773029, 41373029, 41720104009), China Geological Survey (No. DD20160023–01, DD20160022–01), and Ministry of Science and Technology of China (No. 2014DFR2127C).

## 1 引 言

依据寄主围岩的不同,天然金刚石矿化类型包括金伯利岩型、钾镁煌斑岩(又称橄榄金云火山岩)型、蛇绿岩型、碱性基性岩型、超高压变质岩型、陨石相关型和冲积型等(张培元,1998; Shirey et al., 2013; Yang et al.,2014),前四种统归为幔源型,其中金伯利岩型是产出宝石级金刚石(钻石)最重要的原生矿床。金伯利岩是一种自然界分布稀少、岩浆起源最深的浅成-喷出岩(Heaman et al.,2003),属于

由幔源物质和含挥发分熔体/流体组成、富集相容和不相容元素的钾质偏碱性超基性岩,呈蓝、绿、灰黑色等色调,具斑状和火山碎屑结构,块状、角砾状和凝灰状等构造,常以岩筒、岩脉和岩床产出(郑建平, 1989; Heaman et al.,2003; Becker et al.,2006; 路凤香, 2008; Brook,2017; 雷雪英,2017)。幔源物质包括岩石捕虏体和晶屑两部分,前者主要以石榴石或尖晶石二辉橄榄岩、尖晶石方辉橄榄岩和纯橄岩为主,还有各类辉石岩、榴辉岩和交代型岩石(Stachel et al.,2004; 路凤香,2008);后者主要有橄榄石、镁钛铁

矿、石榴石、铬尖晶石、铬透辉石、钙钛矿、金云母等(池际尚等,1996a;路凤香,2008;赵欣等,2015;de Wit et al.,2016;许康康等,2016)。非洲南部金伯利岩被分为玄武岩型和金云母型(由岩相学划分),或克拉通型(on-craton)和克拉通边缘(off-craton)型(由产出位置划分,de Wit et al.,1992;Becker et al.,2006),或 Group I (80~114 Ma)和 Group II (114~150 Ma)型(由侵位时代和地球化学特征划分,Smith,1983)等不同类型。根据金刚石包裹体的来源和成因,金刚石被分为岩石圈(lithospheric)型和超深(superdeep)型(Shirey et al.,2013)。前者约占含包裹体金刚石的99%,一般被分为地幔橄榄岩(或超基性岩,P)型、榴辉岩(E)型和二辉石岩(W)型(Stachel et al.,2008),其中P型金刚石根据石榴石包裹体中Ca和Cr含量的不同分为方辉橄榄岩、二辉橄榄岩和异剥橄榄岩型(Stachel et al.,2008;Koorneef et al.,2017);超深型可以来源于软流圈、地幔过渡带、下地幔甚至核幔边界(Stachel,2001;Kaminsky,2012;陆琦等,2012)。

全球金伯利岩的分布与克拉通(或古陆核)密切相关。世界上首粒金伯利岩型金刚石发现于卡拉哈里(Kalahari)克拉通内,于1869年南非金伯利附近的道斯方丹(Dorstfontein)和布特丰坦(Bultfontein)农场(Field et al.,2008)。1887年卡维尔刘易斯(H. Carvill Lewis)教授在给曼彻斯特英国协会的报道中首次用当时英国高级长官金伯利(Kimberley)的名字将含金金刚石的岩石命名为“金伯利岩”(Wilson et al.,2007)。中国分别于1965年和1971年在华北克拉通内发现山东蒙阴和辽宁瓦房店(旧称复县)两处含金金刚石金伯利岩矿带(郑建平,1989;路凤香,2008)。相比北美、西伯利亚、非洲南部卡拉哈里等克拉通内的原生矿床,中国金刚石矿产资源比较贫乏,已探明金刚石优质资源已近枯竭,目前可供开采的产地严重不足,金刚石找矿亟待突破(彭艳菊等,2013;刘陟娜等,2016)。蒙阴和瓦房店含矿金伯利岩的时代为中奥陶世(池际尚,1996b;张宏福等,2007;Yang et al.,2009),而此时的华北克拉通并未发生岩石圈减薄(吴福元等,1999;郑建平,2009;朱日祥等,2011),其岩石圈厚度和结构与非洲南部卡拉哈里克拉通类似。那么,中国金伯利岩型金刚石资源的“匮乏”的原因是什么,是否有

进一步找矿的可能?

笔者多次考察了蒙阴、瓦房店和应县金伯利岩带,2016年8月参加第35届国际地质大会,会前考察了南非的奥兰治-瓦尔(Orange-Vaal)河流域的金刚石砂矿,2017年9月参加了在哈博罗内举行的第11届国际金伯利岩会议,并野外考察了朱瓦能(Jwaneng)、奥拉帕(Orapa)、莱特拉卡内(Letlhakane)、丹姆沙(Damtshaa)和卡罗韦(Karowe)金伯利岩矿区。本文在前人研究的基础上,归纳了中国不同类型金刚石的分布,系统对比了博茨瓦纳和中国金伯利岩型金刚石矿床的区域地质、矿床特征及成因,总结了找矿标志,以期探寻中国类似金刚石矿产资源提供素材。

## 2 博茨瓦纳金伯利岩型金刚石矿床简介

博茨瓦纳人口约233万,面积581730 km<sup>2</sup>,2/3国土面积被卡拉哈日(Kalahari)沙漠覆盖(Brook,2017)。从英国殖民统治结束的1966年之前,博茨瓦纳是非洲第三穷的国家,而自1967年该国首次发现金刚石以来,尤其1980年至今较稳定政局的投资环境,使得金刚石产业发展为该国三大经济支柱之一(其他为畜牧业和旅游)(Brook,2017;De Wit,2018)。

博茨瓦纳目前金刚石产量居世界第二,总价值居世界第一(de Wit et al.,2016)。黛比瓦纳(Debswana)钻石有限公司是博茨瓦纳最有影响力的钻石开采和销售公司,由政府 and 黛比尔斯(De Beers)公司各占50%股份,控制了最有价值的朱瓦能和奥拉帕两大含矿金伯利岩区。博茨瓦纳金刚石勘察工作最早始于1955年,目前共发现12个金伯利岩区,根据发现的先后顺序,分别为卡特伦(Kgatlang)、奥拉帕、朱瓦能、Kikau-Khutse、科空(Kokong)、察邦(Tshabong)、莱科都(Lekgodu)、Ghaghoo(2013年之前称为Gope)、马布阿塞胡贝(Mabuasehube)、勒雷拉(Lerala,又称Martin's Drift)、奥卡瓦(Okwa)和Nxsunxau金伯利岩区(Brook,2017)(图1)。目前正在开采的金刚石矿共8个分布在4个金伯利岩区中,按照开采时间包括奥拉帕(1971年,A/K1)、莱特拉卡内(1975年,D/K1和D/K2)、朱瓦能(1982年,DK2)、丹姆沙(2003,B/

K1、B/K9、B/K12、B/K15)、勒雷拉(2008, K002~K006)、B/K11(2010)、卡罗韦(2012, A/K6)、Ghaghoo(2013),前七个为露天开采,后一个为地下开采(Brook,2017;De Wit,2018)(图1)。

## 2.1 博茨瓦纳区域地质背景

博茨瓦纳金伯利岩型金刚石矿床的分布与非洲南部克拉通密切相关,该克拉通主要由三部分组成,即卡普瓦尔(Kaapvaal, 3.7~2.7 Ga)克拉通和津巴布韦克拉通(3.5~2.6 Ga, Kusky,1998),以及古元

古代的奥卡瓦杂岩体(Okwa Inlier),前两者被2.7~2.6 Ga林波波(Limpopo)构造带(De Wit et al.,1992)连结形成卡拉哈里(Kalahari)古陆(Miensopust et al., 2011)。其周边拼贴一些古、中元古代增生带(Jacobs et al.,2008),包括迈冈迪—开斯—奥卡瓦带(Makondi-Kheis-Okawa belt, MKO)、雷霍博特区(Rehoboth Province)、纳马夸—纳塔尔带(Namaqua-Natal belt)和达马拉(Damaran)造山带等(图1)。

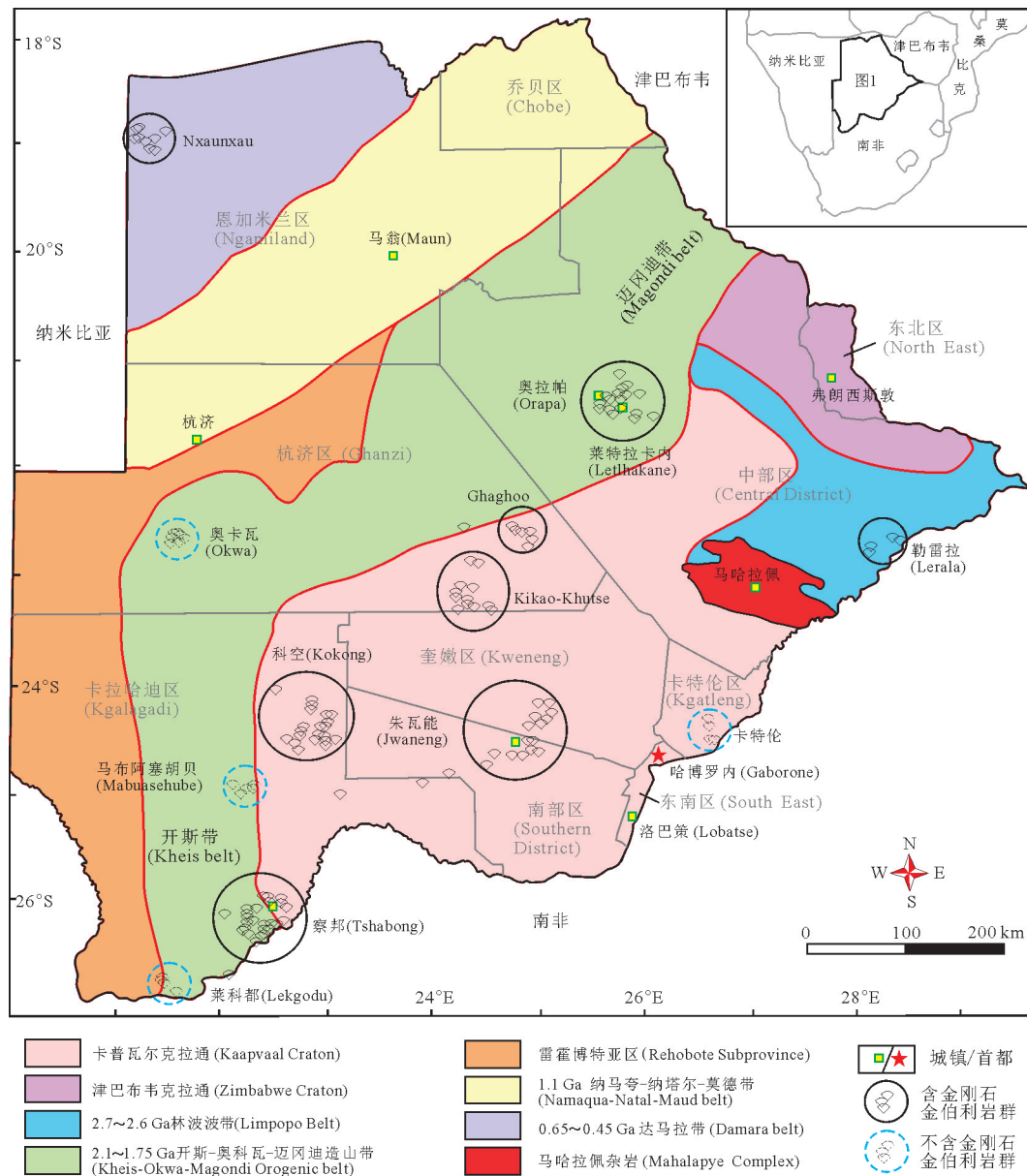


图1 博茨瓦纳12个金伯利岩群在行政区图和构造地质简图中的分布(据 Brook,2017修改)

Fig.1 Administrative and geological maps of Botswana depicting locations of 12 kimberlite clusters

MKO 位于卡拉哈里古陆西北缘,其中迈冈迪带具有津巴布韦克拉通岩石圈根(Luguet et al., 2015),分布于津巴布韦克拉通西北部,为北东走向的古元古代活动带,由一系列2.06~1.96 Ga 绿片岩相至麻粒岩相变质岩组成,其源岩包括(1)约2.26 Ga Deweras 群,为津巴布韦克拉通被动陆缘裂解相关的沉积火山岩组合;(2)2.20 Ga Lomagundi 群,为一套弧后初始盆地相浅海沉积岩;(3)2.16 Ga Pirowiri 群,为陆缘深水大陆架和大陆坡沉积岩。迈冈迪带于2.0~1.85 Ga 拼贴到津巴布韦克拉通,随后进入被动陆缘沉积阶段直到中元古代 Choma-Kalomo 地块增生,强烈伸展并伴随大量火山活动发生在1.1 Ga(Jacobs et al.,2008)。开斯带位于卡普瓦尔克拉通西南缘,时代(2.1~2.0 Ga)与迈冈迪带类似,代表被动陆缘初始裂解至大洋形成的火山沉积过程。奥卡瓦(Okwa)杂岩体位于卡普瓦尔克拉通西北缘,上部被新元古代的杭济—乔贝带(Ghanzi-Chobe)不整合覆盖。奥卡瓦杂岩体主要由变流纹岩、糜棱化眼球状花岗岩、富钾长石二长花岗岩和细晶花岗岩组成,侵位时代约为2.06 Ga (Mapeo et al.,2006),其上部被低级变质碎屑沉积岩和灰岩构造覆盖。虽然3个带的变质变形时代均主要介于2.1~1.96 Ga,但部分学者认为它们可能不属于一个带,如 Moen et al.(2008)认为迈冈迪带与津巴布韦克拉通外缘的林波波带相连,后者发育2.65 Ga 和2.0 Ga 两期高级变质事件。

雷霍博特区(Rehoboth Province)位于MKO带西部,最长边约700 km,由太古宙地核(2.98~2.70 Ga)和古元古代花岗岩类组成,与卡普瓦尔克拉通拼合时间在2.2~2.05 Ga(Van Schijndel et al.,2011)。上部发育1.93~1.85 Ga 的陆源碎屑岩盆地沉积,之后经历了长达450 Ma 的岩浆平静期,直到1.35 Ga 发生纳马夸(Namaqua)被动陆缘裂解,1.30~1.20 Ga 形成岛弧和弧后盆地岩浆事件,约1.20 Ga 西侧岛弧和地体与雷霍博特碰撞增生到雷霍博特—卡普瓦尔克拉通(Van Schijndel et al.,2011)。

纳马夸—纳塔尔带(Namaqua-Natal belt),在博茨瓦纳西北部该带又称为杭济—乔贝带(Ghanzi-Chobe belt)(Modie,2000),是陆陆碰撞或弧陆碰撞的高压变质带,时间发生在1.2~1.0 Ga 之间(Jacobs et al.,2008),出露大量花岗片麻岩和变沉积岩。纳

马夸带主要为1.29~1.24 Ga 具有岛弧性质的变火山沉积岩,内部侵入大量1.2~1.08 Ga 花岗岩类,其上部被Koras 群不整合覆盖,后者为陆内伸展环境下未变形和低级变质的双峰式火山岩和未成熟的碎屑岩夹少量碳酸盐岩等沉积岩组成,形成时代为1.17~1.10 Ga。纳塔尔带于1.14 Ga 逆冲到卡普瓦尔克拉通东北缘,它包括1.25~1.10 Ga 俯冲相关的岛弧岩浆事件(Mccourt et al.,2006),1.07~1.03 Ga 弧陆碰撞相关的奥长花岗岩和紫苏花岗岩,伴生高温麻粒岩相变质作用(Eglington,2006)。

达马拉(Damaran)造山带是刚果克拉通与卡拉哈日克拉通于550 Ma 碰撞后的界限(Kinabo et al.,2008),主要以角闪岩相的花岗片麻岩穹隆以及530~510 Ma 碰撞后高钾超铝质S型花岗岩为特征,上部被新元古代变沉积岩覆盖。

除了上述前寒武系结晶基底外,博茨瓦纳金伯利岩重要的上部围岩为石炭—侏罗系卡鲁超群(Karoo Supergroup,300~183 Ma)页岩、粉砂岩和砂岩等陆源沉积岩和侵入其中的基性岩墙群。卡鲁超群分为5个地层单元,包括Tlapana, Thlabala, Mosolotsane, Ntane, Stormberg 组,覆盖了非洲南部大部分区域,记录了潘吉亚超大陆聚合至早期裂解过程,形成石炭—二叠纪弧后前陆盆地和183~174 Ma 地幔柱岩浆事件,后者形成非洲南部著名的卡鲁大陆溢流玄武岩省(Hastie et al.,2014)。

## 2.2 博茨瓦纳含金刚石金伯利岩筒群

### 2.2.1 奥拉帕岩筒群

奥拉帕金伯利岩筒群(Orapa kimberlite cluster, OKC)位于古元古代迈冈迪活动带内,接近于迈冈迪和林波波带的交汇部位(图1),金刚石的形成受到古、中元古代增生过程的影响(Aulbach et al.,2017)。OKC 岩筒群由88个岩筒组成,整体呈北西西方向展布(Mccourt et al.,2004)(图2)。该区域航空磁测资料显示强烈的北西西向异常,结合地表分布北西向线性构造和岩墙群,推测OCK 金伯利岩的侵入可能受北西西向断裂控制(Brook,2017)。

奥拉帕镇是奥拉帕、莱特拉卡内和丹姆沙矿山的行政中心,是一个人口超过1.2万人的封闭城镇(图2)。OKC 目前有7个矿区在开采,即黛比瓦纳公司的奥拉帕A/K1、莱特拉卡内的D/K1 和D/K2、丹姆沙的B/K9 和B/K12,以及卢卡拉(Lucara)钻石

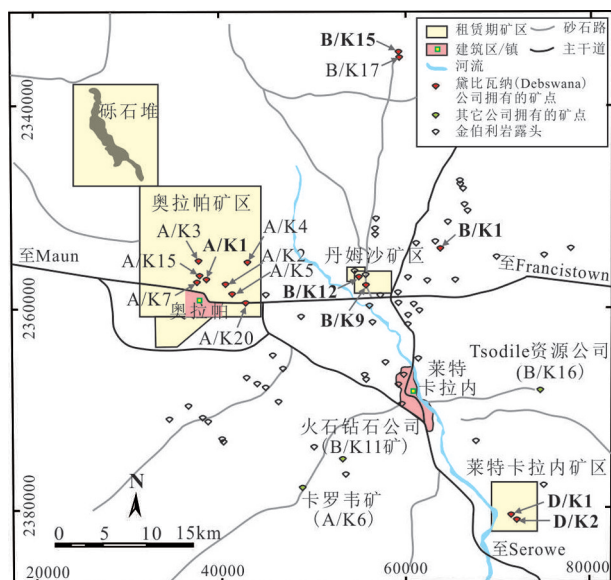


图2 奥拉帕金伯利岩群中金刚石矿的分布图 (Kruger et al., 2017)

Fig.2 Positions of the diamondiferous mines in the Orapa kimberlite cluster

公司的卡罗韦 A/K6 和火石 (Firestone) 钻石公司的 B/K11 矿区。奥拉帕 A/K1 矿区位于首都哈博罗内以北约 550 km 处, 位于弗朗西斯敦 (Francistown) 以西 240 km 处; 莱特卡拉内 D/K1 矿区距离 A/K1 东南 50 km, 距弗朗西斯敦约 190 km, D/K1 和 D/K2 相距约 800 m; 卡罗韦 A/K6 距离 D/K1 约 25 km, 距 A/K1 约 23 km, 以产大颗粒优质 II a 型钻石而闻名 (Wudrick et al., 2017)。

#### (1) 奥帕拉 A/K1

A/K1 矿区是 OKC 最有名的矿区, 于 1967 年由 Manfred Marx 领导的戴比尔斯地质团队发现, 以产量大和产出大粒优质金刚石著称, 年产量平均约 1200 万克拉, 每年贡献了约 15% 的 GDP。A/K1 由南、北 2 个岩筒组成, 两岩筒地表覆盖面积约 118 英亩 (约 477529 m<sup>2</sup>), 南北长约 2 km, 东西宽约 1 km, 采深约 250 m (图 3a, b), 2026 年预计深达 450 m, 是世界上最大的露天开采矿区<sup>①</sup>。岩筒侵入太古代英云闪长质和花岗质片麻岩结晶基底和上部的卡鲁火山沉积岩超群, 岩筒最上部为一列火山口湖泊相的表层碎屑金伯利岩, 包括含有白垩纪动植物化石的页岩、砂岩、砂砾岩和混杂碎石层, 地表大部分被卡拉哈日沙漠覆盖 (Rayner et al., 1991)。

北筒岩石组合主要包括北部玻基斑状火山碎

屑 (Northern Pyroclastic) 金伯利岩 (NPK, 绿灰色, 厚层状构造, 含粒径 < 10 mm 的花岗岩基底岩屑 (图 3c), 橄榄石晶屑普遍蛇纹石化和少量碳酸盐化, 局部可见石榴石)、黑色北部玻基斑状火山碎屑金伯利岩 (NPKD, 为 NPK 中的薄层, 富含黑绿-黑灰色橄榄石, 相比其它类型岩石, 其岩屑极少)、富含花岗质片麻岩角砾的玻基斑状火山碎屑金伯利岩 (NPK-GG, 暗绿色, 层状构造, 富含大量玄武岩和基底角砾)、块状火山碎屑金伯利岩 (MVK2, 暗灰绿色金伯利岩, 含少量蚀变基底角砾) 和角砾块状火山碎屑金伯利岩 (MVK2-BBX, 可见大量棱角明显的玄武质岩屑, 图 3d), 外缘含有垮塌成因的玄武质角砾岩透镜体。其中 NPK 类似于 MVK2, 也类似于火山通道相凝灰质金伯利质角砾岩, 指示岩筒总体剥蚀程度低。

南筒地表直径约 800 m, 岩石组合相对复杂, 包括近水平层状火山口相和近直立火山通道相的岩石单元 (图 3b), 主要有黑色异相岩屑角砾岩 (Dark Heterolithic Breccias (DHB), 是南筒中特有的一种岩石类型, 含大量砂岩和泥岩岩屑及少量玄武岩和金伯利岩角砾, 基质主要由细粒砂/泥和碳酸盐组成), 南部黑色块状火山碎屑岩金伯利岩 (SDVK, 黑绿色-灰绿色, 呈致密块状, 含有大量橄榄石斑晶, 少量岩屑为玄武岩, 图 3e), 南部火山碎屑金伯利岩 (SVK, 分为上中下部分: 上层为灰绿色层状金伯利岩, 分选差至分选显著, 含橄榄石和岩屑捕虏体, 橄榄石斑晶含量约 11%, 粒径多在 5 mm 以上, 可见金属光泽的钛铁矿 (图 3f); 中层为块状绿色金伯利岩, 中粗粒基质胶结, 岩屑呈半棱角状, 伴随碳酸盐化, 碳酸盐脉发育; 下层黑绿色块状金伯利岩, 相比中层, 花岗质片麻岩等基底岩屑含量明显减少), 玄武角砾岩 (BBR, 分选较差的棱角状玄武岩, 多由碳酸盐充填)。

南北岩筒的金伯利岩具有许多相似之处, 如普遍蛇纹石化和碳酸盐化, 局部可见新鲜的橄榄石斑晶, 围岩捕虏体主要为卡鲁超群的玄武岩、泥岩和少量基底花岗岩 (图 3c); 地表被层状岩屑碎石堆 (Bedded Talus Cone, A3T, 图 3b) 覆盖。然而根据南筒层状火山碎屑岩不整合穿切北筒块状火山碎屑金伯利岩指示北筒相比南筒喷发稍早 (Gernon et al., 2009), 北筒块状火山碎屑金伯利岩基质中含有透辉



图3 奥拉帕A/K1 金刚石矿的3D模型及其野外地质特征

a—A/K1的露头采坑;b—A/K1的3D模型显示由两个金伯利岩筒组成(缩写见正文);c—北筒NPK—普遍可见花岗岩和玄武岩岩屑,岩屑粒径多小于1cm,橄榄石晶屑普遍蛇纹石化和方解石化;d—北筒MVK2—BBX,普遍可见棱角状玄武岩角砾;e—南筒黑色块状火山碎屑金伯利岩(SDVK),比重较大,含大量新鲜橄榄石和少量玄武岩捕虏体;f—南筒南部火山碎屑金伯利岩(SVK)上层,可见大量岩屑和橄榄石斑晶,偶见单斜辉石和钛铁矿

Fig.3 Field photos and a 3D view of the A/K1 kimberlite in which the lithologic units are shown in the text in details  
 a—Orapa A/K1 open pit containing North and South pipes; b—3D model of the A/K1 kimberlitic pipes; c—Northern Proclastic Kimberlite (NPK) in North pipe showing pervasively granite and basalt debris with size less than 1 cm. Olivine is commonly altered by serpentinization and calcitization; d— Massive Volcaniclastic Kimberlite (MVK)— Basalt breccia xenolith (BBX) in North pipe; e—Southern Dark Volcaniclastic Kimberlite (SDVK) including an amount of olivines in the South Pipe; f—Basalt breccia, olivine, rare clinopyroxene and ilmenite are commonly observed in the upper unit of the Southern Volcaniclastic kimberlite (SVK)

石微晶,而南筒未见,表明南筒金伯利岩具有较高的侵位温度,玄武岩岩屑的剩磁研究指示北筒的北筒温度为500~600°C,而南筒在<380°C (Gernon et al.,2009)。南筒的稀释率(dilution,即围岩捕虏体体积含量,42%)明显高于北筒(10%)(Brook,2017)。

金伯利岩中幔源捕虏体、金刚石及其包裹体是研究上地幔最直观的样品(Stiefenhofer et al.,1997)。奥拉帕A/K1金伯利岩中捕虏体主要为榴辉岩和少量辉石岩(Aulbach et al.,2017)。两组榴辉岩的单斜辉石和石榴石成分均记录了津巴布韦克拉通边缘多次增生过程中未被改造的洋壳印记:一种为单斜辉石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值较低(0.7026~0.7046),单斜辉石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 与火成岩低压熔融参数(如Eu/Eu\*、Mg<sup>#</sup>、Sr/Y)相关,可能与海底低温蚀变导致的较大范围 $\delta^{18}\text{O}$ 值(单斜辉石:4.83‰~8.36‰;石榴石:5.05‰~8.18‰),这些证据指示了古洋壳岩石(辉长岩)经历了分离结晶和海底低压蚀变;另一种为单斜辉石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}>0.7048\sim 0.7091$ ,而单斜辉石和石榴石均具有地幔型的 $\delta^{18}\text{O}$ 值(5.1‰~5.9‰),指示受到少量来自古老的金云母富集地幔流体交代作用。该交代作用具体表现在不同类型榴辉岩中单斜辉石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值上,即含金刚石榴辉岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值(0.7039)接近于N-MORB(0.703),但明显低于受流体交代的含石墨和不含石墨的榴辉岩中单斜辉石(分别为0.7064、0.7051),指示少量流体/熔体的氧化-交代作用可能不仅导致了金刚石向石墨的转化,还催化了碳的消失。该推理与含金刚石和含石墨榴辉岩和辉石岩捕虏体已移出金刚石稳定域(150~200 km(Shirey et al.,2013))的计算结果(单斜辉石-石榴石压力计:3.2~4.9 GPa(Aulbach et al.,2017))相吻合。

奥拉帕A/K1金伯利岩主要产出E型金刚石,且至少存在两种年龄不同的IaAB型金刚石,以及两种II型金刚石(Chinn et al.,2018)。老金刚石(形成于1.7Ga, $T=1175^\circ\text{C}$ )N的含量、N的聚合方式以及生长环带样式较年轻金刚石(形成于1.1 Ga, $T=1150^\circ\text{C}$ )多变,老金刚石表现为N含量较高, $\delta^{13}\text{C}=-28.6\text{‰}\sim -2.1\text{‰}$ , $\delta^{15}\text{N}=-10.4\text{‰}\sim +23.0\text{‰}$ ,而年轻的金伯利岩 $\delta^{13}\text{C}=-9.6\text{‰}\sim -3.3\text{‰}$ , $\delta^{15}\text{N}=-10.2\text{‰}\sim -4.4\text{‰}$ ,该特征与环带明显的金刚石从核部到边部 $\delta^{13}\text{C}$ 值逐渐增加一致(Chinn et al.,2018)。具有高N和复杂N聚合

形式、低 $\delta^{13}\text{C}$ 老金刚石的形成与俯冲沉积物流体有关,而年轻金刚石的形成可能与来自软流圈的流体有关(Chinn et al.,2018)。与含金石榴辉岩相比,金刚石的榴辉质包裹体的FeO含量高,SiO<sub>2</sub>含量低,CaO和Na<sub>2</sub>O含量低,它们记录了高平衡温度和石榴石具有地幔型 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素特征,这一特征是由一种来自富含单斜辉石岩陆下岩石圈地幔熔体造成的,可能与布什维尔德2.0 Ga的岩浆事件有关(Aulbach et al.,2017)。

## (2) 莱特拉卡内(Letlhakane)

莱特拉卡内金刚石矿发现于1968年,包括D/K1和D/K2两个金伯利岩筒,分别11.6英亩和3.6英亩(分别46943 m<sup>2</sup>和14569 km<sup>2</sup>),为不同喷发期次的岩筒。2003年该矿生产了106万克拉的金刚石,可采矿石品位约为0.26克拉/t;2015年矿山年采矿石210多万t,处理矿石230多万t,分选了58.3万克拉金刚石。莱特拉卡内矿山的露天作业于2017年停止,尾矿加工厂已建成投产,投产后将使用寿命延长至2043年,年产量将达80万克拉<sup>⑨</sup>。莱特拉卡内金伯利岩的围岩与奥拉帕A/K1类似,下部为太古代花岗质片麻岩结晶基底,上部为卡鲁超群,顶部被厚4~10 m不等的卡拉哈日沙漠覆盖。

根据金伯利岩的构造和蚀变程度、岩屑大小和含量、橄榄石颗粒大小和含量,D/K1共分为6种岩相:(1)火山碎屑金伯利岩(VK1)厚度超过600 m,主要由块状和似层状火山碎屑岩及围岩角砾岩组成,围岩粒径颗粒较大分层明显,角砾磨圆稍差;(2)黑色火山碎屑金伯利岩(DVK),为含有大量蛇纹石化橄榄石斑晶(体积含量>50%)、岩屑(体积含量<25%),基质呈黑灰至黑色的坚硬火山碎屑岩;(3)灰白色火山碎屑金伯利岩(PVK),呈灰白色,富集围岩角砾岩;(4)斑点状火山碎屑金伯利岩(SVK),由含粒径为5~15 mm的角砾状花岗质岩屑和黄棕色蚀变橄榄石斑晶(体积含量约30%)和浅灰色至黑棕色基质组成;(5)玄武角砾岩(BBX),由围岩重力不稳引发崩塌和泥石流等过程产生的沉积物,呈浅棕灰色,橄榄石斑晶含量10%~20%,完全蛇纹石化,岩屑含量60%~90%以上,粒径10~20 cm,最大可达2 m;(6)相关金伯利岩(Coherent Kimberlite, CK),含量较少,呈黑灰色至黑色,块状构造,橄榄石含量高达60%以上,整体新鲜,局部颗



粒具有富钙边缘,岩屑含量较少(约7%),普遍发生流体交代作用(Kruger et al.,2017)。

D/K2 仅于 1985—1986 年期间短暂开采, D/K2 岩相主要包括巨晶金伯利岩(MK,呈黑灰色,含相当多新鲜橄榄石,岩屑主要为玄武岩和花岗片麻岩)、火山碎屑金伯利岩(VK,呈灰绿色,橄榄石普遍蛇纹石化呈黑绿色,玄武岩、泥岩等岩屑呈拉长状蚀变强烈)、围岩角砾岩(WRB,弱角砾状碎屑支撑的金伯利岩,可见大的岩块)、异相角砾岩(HB,基质至碎屑支撑的外来岩屑,由卡鲁地壳岩石和金伯利岩混合而成)(Kruger et al.,2017)。

莱特拉卡内 D/K1 岩筒金伯利岩中常见地幔橄榄岩、辉石岩、榴辉岩、云母岩、MARID(由云母、角闪石、金红石、钛铁矿、透辉石组成)地幔岩等捕虏体,其中地幔橄榄岩普遍较新鲜,粒径一般在 5~10 cm,主要由含石榴石二辉橄榄岩、不含石榴石二辉橄榄岩、尖晶石方辉橄榄岩组成,与金伯利岩有明显的反应边,指示普遍经历了交代作用。地幔橄榄岩中石榴石和斜方辉石常被金云母、单斜辉石、钛铁矿和尖晶石取代形成石榴石金云母地幔橄榄岩和金云母地幔橄榄岩(Luguet et al.,2015)。尖晶石地幔橄榄岩的 Re-Os 同位素  $T_{RD}$  年龄( $3.75 \pm 0.54$ ) Ga (Wainwright et al.,2015)和 2.5~2.8 Ga(Luguet et al.,2015),代表了迈冈迪造山带下部克拉通根的稳定时代,指示该克拉通根可能是津巴布韦克拉通的西延部分(Luguet et al.,2015; Wainwright et al.,2015)。

金刚石中硫化物包裹体的 Re-Os 同位素的  $T_{MA}$  年龄为 1.06~2.38 Ga,与相邻奥拉帕金刚石的年龄类似(1.0~2.9 Ga)。金刚石 N 含量变化较大,从很低含量( $21 \times 10^{-6} \sim 43 \times 10^{-6}$ )至较高的聚合 N(53%~90% I aB)。碳同位素  $\delta^{13}C$  值为  $-19.3\text{‰} \sim -22.7\text{‰}$ 。阴极发光图像中没有明显环带构造的两粒金刚石的硫化物等时线年龄分别为  $(0.92 \pm 0.23)$  Ga (初始  $^{187}Os/^{188}Os=1.31 \pm 0.24$ ) 和  $(0.93 \pm 0.36)$  Ga (初始  $^{187}Os/^{188}Os=0.69 \pm 0.44$ ),指示含有循环 Os 元素的金刚石结晶环境极度不均一。硫化物包裹体球粒陨石标准化的 PGE 元素图解富集 Ir(3.4~33)和 Pt(2.3~28.1),指示一种富集地幔过程。硅酸盐包裹体的 Sm-Nd 等时线年龄为  $(2.3 \pm 0.02)$  Ga、 $(1.0 \pm 0.14)$  Ga 和  $(0.25 \pm 0.04)$  Ga,以上特征指示 D/K1 金刚石经历了多阶段生长过程(Gress et al.,2017)。

### (3)丹姆沙(Damtshaa)

丹姆沙矿床距离奥拉帕 A/K1 矿点约 15 km,包括 B/K1、B/K9、B/K12、B/K15 等金伯利岩筒,发现于 1967—1972 年间,开采于 2003 年(Deines et al.,2009),其中 B/K9 和 B/K12 是两个最大矿点,也是正在开采的矿点,两者分别占地 15、8 英亩(分别为  $60703 \text{ m}^2$ 、 $32375 \text{ m}^2$ ,Field et al.,2008)。丹姆沙矿床预计能开采 31 年,总产量约 500 万克拉<sup>⑥</sup>。金伯利岩围岩与奥拉帕和莱特拉卡内相似,下部为太古宙花岗质片麻岩,上部为二叠—侏罗系卡鲁超群的泥岩、砂岩和德拉肯斯堡(Drakensberg)组的拉斑玄武岩。

B/K9 矿点在地下 250 m 处分为北、中、南岩筒(图 4),3 个岩筒在地表合并在一起,其中南、北 2 个岩筒岩相类似,主要由浅成—半深成相黑色火山碎屑金伯利岩(DVKns,ns 指南北岩筒)组成,边部夹少量玄武质角砾岩(BB)透镜体及玄武岩和火山碎屑金伯利岩巨大块体;中部岩筒由浅层火山口相火山沉积物和 BB,及深部 DVKc(c 指中部岩筒)组成。DVKns 呈特征的黑绿—灰色,岩屑和晶屑散布在黑色细粒基质中,岩筒内部分层不明显呈块状,而边部层状构造明显。晶屑主要为橄榄石和少量钛铁矿和金云母,大部分蛇纹石化、石榴石化和碳酸盐化等;岩屑包括大量地幔捕虏体和其他次要岩

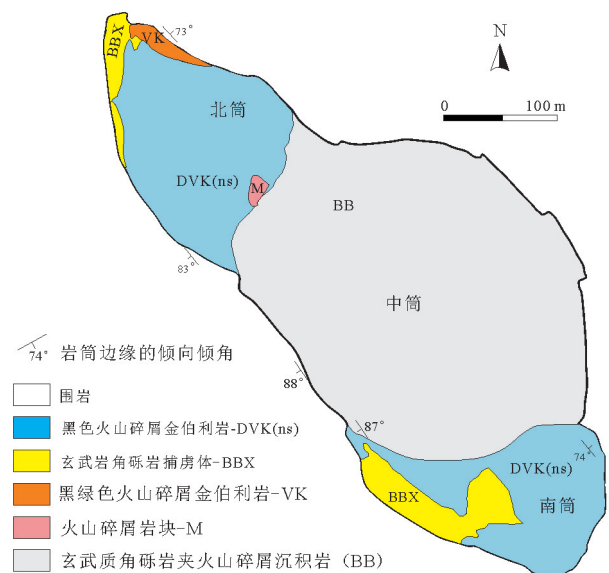


图4 丹姆沙B/K9矿点岩筒地质简图(据 Buse et al.,2011 修改)  
Fig.4 Schematic geological map illustrating the features of the Damtshaa B/K9(modified from Buse et al., 2011)

石,岩屑粒径从0.5 cm至10~26 cm,岩屑比例在1.5%~10%,最大可达18%。BBL边部最厚可达20 m,夹少量DVK,岩层倾向岩筒内部15~20°,向中心逐渐尖灭。DVKc呈棕色至蓝绿色,以含大量橄榄石为特征(40%~45%)。玄武岩岩屑和地幔捕虏体约占7%。晶屑普遍具有核边结构,核部大多为新鲜的橄榄石,少量为金云母和钛铁矿,边部为蛇纹石、钛磁铁矿、石榴石和钙钛矿等蚀变矿物。总之,B/K9南、北岩筒的两种DVK呈块状构造,零星分布的岩屑由基质支撑,岩石组成随深度几乎不发生变化,说明DVK的形成经历了充分的混合,但不完全均匀化,岩屑粒径多为几厘米,最大岩屑不超过10~20 cm(Buse et al.,2011)。

B/K12矿点包括3个火山碎屑金伯利岩单元和一个富含玄武质角砾岩的中部带,整体研究程度较低,捕虏体、金刚石特征等方面还没有报道(Field et al.,2008)。

Deines et al.(2009)报道了丹姆沙95粒含包裹体金刚石中55粒为P型、38粒为E型和2粒为W型。其中P型包裹体主要有橄榄石、斜方辉石、铬镁铝榴石,E型有镁铝榴石-铁铝榴石和绿辉石;W型有斜方辉石、单斜辉石和石榴石包裹体。55个P型 $\delta^{13}\text{C}$ 值为-1.44‰~-9.20‰,38个E型 $\delta^{13}\text{C}$ 值为-3.78‰~-17.60‰,2个W型的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为-4.91‰~-10.63‰。所有类型的金刚石具有一个-4.75‰的 $\delta^{13}\text{C}$ 峰(-5.0‰~-4.5‰,Deines et al.,2009)。

丹姆沙E型金刚石的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和N含量与莱特拉卡内没有明显差异,而与奥拉帕具有较大差异。相比奥拉帕,丹姆沙E型金刚石非常富集 $\delta^{13}\text{C}$ ,含有较高的N含量,最高超过 $1000\times 10^{-6}$ 。 $\delta^{13}\text{C}$ 为-5‰的金刚石比更低 $\delta^{13}\text{C}$ 金刚石具有更高的N含量。相比奥拉帕和莱特拉卡内,丹姆沙含有橄榄石的P型金刚石具有更高的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,橄榄石的MgO含量也稍高于莱特拉卡内,但是总体来说3个矿区的Mg<sup>#</sup>值变化不大。丹姆沙橄榄石的CaO含量稍高于奥拉帕。金刚石的铬尖晶石成分不同,丹姆沙铬尖晶石的MgO含量稍低于奥拉帕,而后的MnO含量很高(0.77%)。相比奥拉帕,丹姆沙石榴石包裹体Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO含量和Mg<sup>#</sup>较高,而Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO含量较低(Deines et al.,2009)。

W型金刚石中的石榴石的Cr含量和Mg<sup>#</sup>值位

于P和E型之间。 $\delta^{13}\text{C}$ 值介于-21.3‰~-3.9‰。W型与P型石榴石成分存在过渡, $\delta^{13}\text{C}$ 值明显不同;W与E型石榴石成分存在差异,但两者的 $\delta^{13}\text{C}$ 值重合。如果低 $\delta^{13}\text{C}$ 值是壳源成分引起的,那么来自地壳的石榴石的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>比值大于地幔。然而低Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>比值的金刚石, $\delta^{13}\text{C}$ 值也低(<-7‰),而Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>比值高的金刚石, $\delta^{13}\text{C}$ 值约为-5‰。该推理与传统认为E型金刚石的低 $\delta^{13}\text{C}$ 值是有机碳( $\delta^{13}\text{C}$ 平均为-25‰)俯冲的结果相反,说明地幔中可能存在低Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、低 $\delta^{13}\text{C}$ 值的地幔区域。以上数据说明,相比奥拉帕,丹姆沙和莱特拉卡内P型石榴石包裹体源自非常亏损的纯橄岩-方辉橄岩区域(CaO<1.8%),较高Cr含量,指示源自更深地幔。奥拉帕金刚石来自160 km深度,丹姆沙和莱特拉卡内金刚石可能分别来自190 km和200 km(Deines et al.,2009)。

#### (4)卡罗韦(Karowe)A/K6

卡罗韦A/K6金刚石矿(25°28'13"E,21°30'35"S)是近年来世界上产出大颗粒优质钻石的重要矿区之一,尤其以出产大颗粒IIa型(N<10<sup>-6</sup>)钻石闻名(Moore,2014)。Lucara金刚石公司于2015年11月在该矿发现世界第二大钻石(1109克拉的Lesedi La Rona,或Our Light in Setswana),仅次于1905年南非发现的3106克拉“库里南”,此外813克拉的“星座”钻石成交价达到创纪录的6310万美元<sup>①</sup>。该矿最早由De Beers公司1969年发现,由于较小的地表出露面积(3.3英亩,约13355 m<sup>2</sup>,图5a~c)和较低的工业品位(3.5 ct/100 t),于1998年被放弃。A/K6矿于2010年由Lucara公司完全控股,开采于2012年,计划露天开采至2026年。2012年6月至2016年12月,该矿已产出180万克拉金刚石,售价超过10.2亿美元,2017年产出29~31万克拉,优质大颗粒金刚石估计能开采15年(Campbell et al.,2017),2018年的开采32.5~35万克拉,税收约1.9亿美元,计划开采深度324 m,矿石3620万t,储量630万克拉;如果采深达400 m,将有5100万t矿石和820万克拉的资源量,400~750 m之间的2100万t矿石含有400万克拉资源量<sup>②</sup>。

卡罗韦矿海拔1022 m,大致呈南北走向,地下120 m处的面积约7英亩(约28328 m<sup>2</sup>),地表多被卡拉哈日沙漠覆盖,其围岩与奥拉帕类似。A/K6包括

北、中、南3个金伯利筒,然而由于地表强烈蚀变,无法识别3个岩筒的界限,故将岩筒顶部区域划为一个独立单元,即钙质和硅质胶结砂砾岩(图5a),其厚度一般为10 m,局部可达20 m。岩筒上部10~50 m为强烈风化金伯利岩(WK),主要矿物组成和结构构造已难鉴别。风化程度随深度增加而减小,新鲜金伯利岩一般出露在70~90 m以下。玄武质角砾岩(BBX),混合有少量(通常<10%)的金伯利岩,呈不连续分布于三个岩筒中,粒径从几米至金伯利岩基质中的毫米级不等,普遍具有不同程度的破裂和碳酸盐脉充填(Lynn et al.,2014)。

北筒主要为破碎金伯利岩(FK),淡绿灰色,火山角砾粒径主要以4~32 mm不等,基质支撑,分选较差的块状,基质中普遍蛇纹石化和方解石化。玄武岩是主要的围岩捕虏体,另含少量卡鲁沉积岩和花岗片麻岩结晶基底。中筒与北筒大体相似,均含有非碎屑的岩浆金伯利岩和火山碎屑金伯利岩,两者结构和颜色变化较大交替出现,但彼此间为渐变过渡关系。围岩捕虏体均以卡鲁玄武岩为主。然而相比北筒,中筒金伯利岩碳酸盐含量较高(即富含碳酸盐的碎屑金伯利岩,CFK,图5a)。CFK通常比FK含有更高的橄榄岩大晶体和更低的围岩捕虏体,基质中不透明矿物的含量也略高。BBX常出现于FK而非CFK中。南筒在岩相和地球化学等方面明显不同于北中筒。南筒上部、西部以风化玄武质角砾岩(WBBX)为主,下部为未蚀变玄武质角砾岩(BBX)和大块玄武岩体(图5d)。南筒主要由中粗粒(4~32 mm)块状、基质支撑、分选差的粗晶岩浆金伯利岩或玻基斑状火山碎屑金伯利岩(M/PK)充填。M/PK宏观上呈灰色,含5%~10%热交代/蚀变的围岩捕虏体。橄榄石相对新鲜,含有丰富的不透明矿物。新鲜的钙镁橄榄石(monticellite)随着深度的增加而丰富。围岩捕虏体以玄武岩为主,基底和卡鲁沉积岩较少,但整体地壳稀释率很低(一般<10%),很少达到25%。局部可见少量厚层状PK,厚0.16~1.5 m不等,由橄榄岩等晶体和近水平定向排列的地壳捕虏体聚集而成(Lynn et al.,2014)。

南筒与北中筒具有不同的岩相(图5a)和喷发期次,北中筒的内部结构构造复杂岩相,而南部则呈均一的块状,多产出大颗粒优质钻石,10.8克拉以上的钻石在北筒的比例为1.8%,而南筒达到5%(图

5b)。南筒的地表直径相对较大(约280 m×180 m,图5, c),岩相学特征与北、中筒明显不同,主要岩相为岩浆/玻基斑状金伯利岩(M/PK)为主(图5e),橄榄石、钛铁矿等斑晶均较新鲜,且随深度越深越新鲜,围岩捕虏体含量小于10%。

A/K6出露大量地幔橄榄岩捕虏体而榴辉岩较少,该特征与奥拉帕相反。Wudrick et al.(2017)报道了卡罗韦矿区19个地幔橄榄岩捕虏体,其中14个为尖晶石二辉橄榄岩,5个为石榴石二辉橄榄岩,石榴石二辉橄榄岩中含有韭闪石指示经历地幔交代作用。橄榄石的Fo值=91~93,与卡普瓦尔克拉通的橄榄石Fo平均值(92.6)一致,放射性 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os} = 0.1260 \sim 0.1295$ , Re-Os模式年龄( $T_{\text{DR}}$ )=2.6~2.0 Ga,与南非同样产IIa型Premier矿床年龄(2.0 Ga)类似,可能指示卡普瓦尔克拉通中晚太古代岩石圈地幔为亏损型地幔,并叠加了布什维尔德侵入体式岩浆交代或约1.8 Ga迈冈迪带形成时的交代作用(Wudrick et al.,2017)。

金刚石中矿物包体在限定金刚石和地幔性质及其关系具有重要意义。Motsamai et al.(2018)从A/K6矿区107颗金刚石中发现15粒氧化物、22粒硫化物和134粒硅酸盐,其中53%为E型,44%为P型,1%为W型。P型石榴石的CaO含量较低(<1.8 wt%)而 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 含量较高(14.7 wt%),橄榄石的Fo平均值为93.1,指示金刚石形成时克拉通岩石圈非常亏损且深度大于220 km。3个E型石榴石具有镁铁榴石成分,指示这种金刚石来自330~420 km的深度,位于软流圈和过渡带边界部位(Motsamai et al.,2018)。

### 2.2.2 朱瓦能岩筒群

朱瓦能矿是目前世界上价值最高的钻石矿床,发现于1972年的纳勒迪河谷(Naledi River Valley, 又称“星星谷”)中,于1982年8月全面投产,贡献了黛比瓦纳公司的60%~70%的年收益<sup>①</sup>。朱瓦能岩筒群位于哈博罗内以西约160 km,包括约28个金伯利岩筒,海拔1192 m。黛比尔斯公司于1971年发现DK1,1972年发现DK2、DK7,目前DK2是主要的开矿区,DK7还未开采。DK2采坑地表面积约54英亩(约218530 m<sup>2</sup>,图6a),岩筒壁较陡(80°以上),包含11个岩筒(de Wit et al.,2016),主要由北、中、南3个岩管和隐伏4号筒组成(Brown et al.,2008)。

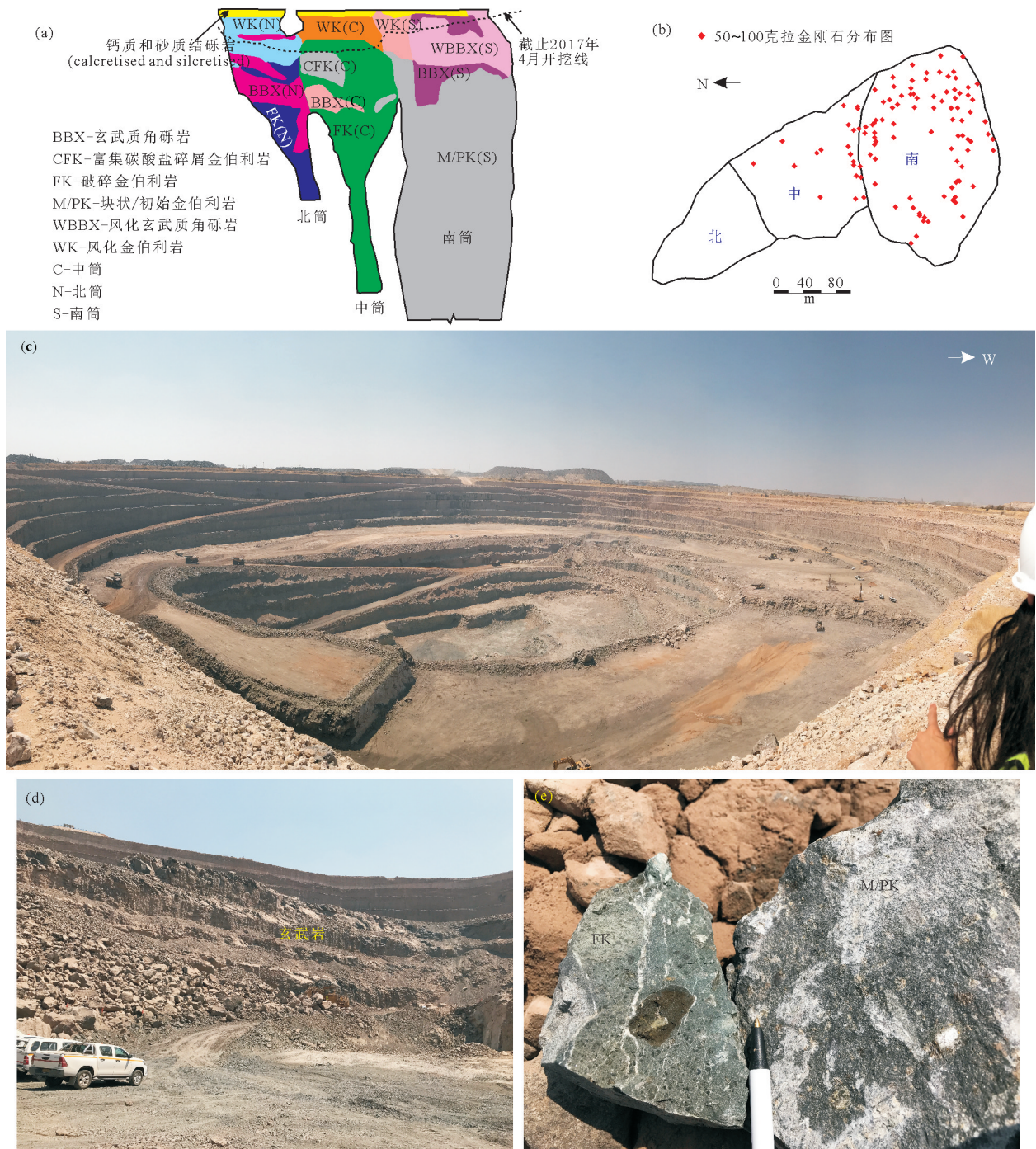


图5 卡罗韦 A/K6 金刚石矿床岩筒模型和野外地质特征

a—卡罗韦 A/K6 南、中、北岩筒模型剖面图(南筒模拟深度约 300 m(Chinn et al.,2010));b—AK6 的 3 个金伯利岩矿筒中产出 50~100 克拉金刚石的分布图;c—AK6 露头采坑;d—采坑的玄武质围岩;e—南筒的玻基斑状火山碎屑金伯利岩(VK)和块状初始岩浆金伯利岩(MPK)

Fig.5 Geological model and field photographs of diamondiferous kimberlite features in the Karowe mine

a—Geological section of A/K6 mine showing the features of north, central and south lobes; b—Distribution map of diamonds with 50 to 100 carats from north, central and south lobes; c—Open pin of the Karowe (A/K6); d—Country rock of basalt from south lobe; e—Fragmental kimberlite (FK)

sample from the central lobe and magmatic/pyroclastic kimberlite (MPK) sample from the south lobe

DK2 金伯利岩的围岩为新太古—古元古代(2.65~2.05 Ga)德兰士瓦(Transvaal)超群白云岩、炭质和石英质页岩等硅酸盐—碳酸盐岩组合,厚度>500 m(Creus et al.,2018),其不整合覆盖于太古宙坎耶(Kanye)火山岩、花岗岩及绿岩带上,与布什维尔德杂岩体同期(2.05 Ga,Creus et al.,2018),地表被卡拉哈日沙漠沉积物覆盖(de Wit et al.,2016)。火山口相火山碎屑金伯利岩厚度在600 m以上,上部被沉积层理发育的再造火山碎屑物覆盖,下部为块状火山碎屑金伯利岩组成了岩筒的主体(图6b),火山碎屑岩发育陡峭的斜层理和剪切构造,边部可见围岩角砾。

DK2 岩筒的侵位先后顺序为南、中、北筒。南、中筒主体为块状火山碎屑金伯利岩,上部被再造火山碎屑金伯利岩覆盖。边部主要为含有围岩角砾金伯利岩和剪切金伯利岩,还包括卡鲁超群下部的泥岩残余,这表明金伯利岩曾侵入卡鲁下部沉积层,但后来遭到了侵蚀。南筒主要由致密块状基本不发育层理构造的VK组成,其边部可见石英富集的火山碎屑金伯利岩(图6c)。中筒的火山碎屑金伯利岩整体蚀变强烈,橄榄石多已蚀变为蛇纹石和富Mg黏土,颜色由浅灰绿色至深绿色,岩石碎屑含量较低(<5%~15%),主要为中细粒的石英质页岩、泥岩和白云岩,石榴石和钛铁矿捕虏晶常见,地幔橄榄岩和榴辉岩捕虏体较少,在5%以下。中筒西南角含有石英质页岩和白云岩角砾,与火山碎屑金伯利岩相接触截然(Mmualefe, 2017)。中筒含有一块宽楔状的围岩角砾岩,是金伯利岩侵位时深部爆炸形成的(de Wit et al.,2016)。

北筒不同于南、中筒,其核部主要由厚层火山碎屑金伯利岩组成,夹较细火山碎屑金伯利岩薄层,上部为薄层再造火山碎屑(RVK)和氧化金伯利岩(OK),下部块状玻斑状(PK)和火山碎屑金伯利岩(VK)组成。其中PK主要黑色致密块状碎屑岩石和蛇纹石化橄榄石斑晶、不同含量细小岩屑组成,形成致密块状结构。

博茨瓦纳金刚石交易公司对朱瓦能2013—2017年间生产的近13万粒0.1~0.8克拉金刚石统计显示,大多为八面体和菱形十二面体,仅5%的金刚石含有包裹体(粒径大于10 μm),其中>88%为E型,6%为P型。包裹体颜色和结构具有以下特征:榴辉

质镁铝榴石—铁铝榴石呈橙色、绿辉石质单斜辉石为灰绿色、蓝晶石为蓝色,地幔橄榄岩型镁铝榴石呈紫色,铬尖晶石为棕色至黑色,硫化物包体周围普遍可见特征的玫瑰状破裂(Gress et al.,2018)。CL和FTIR研究显示,E型和P型金刚石至少分别经历了4次和3次生长过程。该过程分别对应了卡普瓦尔克拉通大约1.0 Ga、1.5 Ga和2.9 Ga演化过程(年龄来自硫化物包裹体Re—Os等时线和P型石榴石和单斜辉石包体的Sm—Nd等时线),后者与南非金伯利岩筒中俯冲相关的P型硫化物年龄2.89 Ga相吻合,记录了东、西卡普瓦尔克拉通在Colesberg磁异常构造带聚合过程(Richardson et al.,2004;Gress et al.,2018)。

### 3 中国不同类型金刚石简介

中国金刚石矿化类型丰富,不仅产出大量幔源型金刚石,还出露超高压变质型和冲积型矿床。其中产于铬铁矿和地幔橄榄岩中幔源型的蛇绿岩型金刚石目前已在新的特提斯雅鲁藏布江缝合带(东波、普兰、当穷、休古嘎布、日喀则、泽当、罗布莎)、中特提斯班公湖—怒江带(丁青、东巧)、古亚洲洋贺根山蛇绿岩带和萨尔托海蛇绿岩带中发现(Yang et al.,2015);幔源型的碱性基性岩型金刚石目前仅出露于安徽栏杆(蔡逸涛等,2018),超高压变质型主要分布于柴北缘、南阿尔金、北秦岭、大别—苏鲁、松多、西南天山、喜马拉雅西构造结等构造带中(杨经绥等,2009,及内部文献)。冲积型矿床主要出露于郯庐断裂区沂水河流域(产出158.786克拉的常林钻石)和复州河—岚崮河流域,以及湖南常德一带沅水流域,在大别山区、新疆喀拉喀什河及西藏安多等也有分布(涂怀奎,2001)。

中国金伯利岩型和钾镁煌斑岩型金刚石矿床(化)分布于华北克拉通、华南克拉通和塔里木陆块中。华北克拉通与金刚石相关的岩体主要为金伯利岩,后者主要为钾镁煌斑岩。华北克拉通目前共发现12个金伯利岩岩群和2个钾镁煌斑岩岩群,分属于3个金伯利岩带:(1)郯庐金伯利岩带,沿郯城—庐江深大断裂系分布,包括辽宁桓仁、铁岭、瓦房店(旧称复县)、葫芦岛(齐玉兴等,1998;宋瑞祥,2013),吉林集安(张复顺,1992),山东蒙阴(刘继太,2002)金伯利岩岩群以及吉林通化金厂(张复顺,

1992)钾镁煌斑岩岩群;(2)华北中央金伯利岩带,分布于东、西华北地块1.85 Ga聚合形成的华北中央造山带(Zhao et al.,2005)内,包括山西应县水沟门(杨建民,1995)、大同采凉山(杨建民,1995)、柳林尖家沟(魏云峰等,2015),河北涉县(河北省地质矿产局综合地质大队,1988),河南鹤壁(侯广顺等,2016)金伯利岩岩群以及山西大同饮牛沟钾镁煌斑岩岩群(杨建民,1995);(3)华北北缘金伯利岩带,主要沿华北克拉通北缘的柳河—铁岭—赤峰—白云鄂博断裂带分布,包括内蒙古四子王旗龙头山(中国地质科学院地质研究所,1970)金伯利岩岩群(图7)。其中有经济价值的金伯利岩型金刚石矿床为郯庐带中的蒙阴和瓦房店。

华南克拉通钾镁煌斑岩主要分布于四个带中:(1)江南钾镁煌斑岩带,分布于扬子陆块和华夏陆块新元古代聚合形成的江南造山带内,包括贵州镇远—麻江—施秉钾镁煌斑岩和金伯利岩区(罗会文等,1989;任怀翔等,1993;张锡贵等,2015;)、湖南宁乡钾镁煌斑岩区(林玮鹏,2007)、广西融水—都安—大化钾镁煌斑岩区(王新宇等,2013;郑翔等,2016);(2)华南北缘钾镁煌斑岩带,分布于华南克拉通北缘,出露湖北大洪山彭家垮金伯利岩和王关—徐家冲钾镁煌斑岩区(叶德隆等,1991);(3)扬子陆块西缘钾质煌斑岩区(舒小辛,1994),分布于华南克拉通西缘;(4)江绍似金伯利质煌斑岩带,出露浙江游龙—江西安远路径似金伯利质煌斑岩(秦正永等,2001;叶松等,2007),大致沿江绍断裂带分布。其中只有江南带的镇远和宁乡发现一定量的金刚石,但不具经济价值(梅厚钧等,1998)。

塔里木陆块被认为是中国金刚石原生矿最有前景的找矿靶区之一(梁日暄等,1992)。新疆和田地区喀拉喀什河流域的墨玉县已发现11粒金刚石,但自1945年发现塔里木首粒金刚石以来原位金刚石找矿工作一直未取得进展,通过金刚石指示矿物(如铬尖晶石)推测金刚石的寄主岩石可能为钾镁煌斑岩(徐向珍,2006),该推测与皮山县发现的两条钾镁煌斑岩脉吻合(赵磊等,1998)。呈岩脉和岩管产出的289 Ma巴楚角砾状超镁铁岩含有大量橄榄石、金云母斑晶及单斜辉石、钙铁榴石、钙钛矿等微晶与金伯利岩类似,但镁铝榴石、铬透辉石含量极低,全岩地球化学高CaO、TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,低MgO、LREE和(La/Yb)<sub>n</sub>比值,不同于

典型的金伯利岩,被中国学者命名为金伯利质隐爆角砾岩(鲍佩声等,2009;李弦,2012)。

### 3.1 中国含金刚石金伯利岩群

#### 3.1.1 山东蒙阴岩群

中国目前具工业价值的含矿金伯利岩产地仅有山东蒙阴和辽宁瓦房店,两者分布在郯庐断裂带的两侧(图7),南北距离约550 km(乔秀夫等,2002;田洪水等,2017)。郯庐断裂带是中国东部一条规模巨大的断裂构造带,向南至少延至苏鲁造山带,向北延至俄罗斯境内,虽然其发育时代、是否发生平移及平移距离、南北段的延伸及演化机制等还存在争议(乔秀夫等,2002;罗志立等,2005;吴根耀等,2007;林宗满,2011),然而其产状陡倾,切割深达上地幔,为地幔上涌和岩浆贯入的通道,控制(含矿)金伯利岩的侵位等基本达成共识。其活动时代普遍认为包括新元古代—古生代古郯庐断裂带活动阶段和中—新生代活动阶段(乔秀夫等,2002;吴根耀等,2007;田洪水等,2017)。郯庐断裂带在山东境内又称沂沭断裂带(罗志立等,2005),长约330 km,宽20~80 km(平均约50 km),主要由郯郟—葛沟、沂水—汤头、安丘—莒县、昌邑—大店等4条断裂组成,将山东分为鲁西、鲁东次级陆块。鲁西东部(聊城—兰考断裂以东至安丘—莒县以西)发育一系列北西向相间分布的断块隆起和凹陷盆地。蒙阴金伯利岩带位于该区隆断带的中部,走向北北东,长55 km,宽15~20 km,由常马庄、西峪、坡里岩带组成,仅前两个含有原生金刚石(池际尚,1996b),三带分别受蒙山、新泰—垛庄、铜冶店—蔡庄等北西向断裂限制(罗声宣等,1999;乔秀夫等,2002)(图8)。在已有的58个岩体中,含矿岩体45个,20个达到工业品位(宋瑞祥,2013)。常马庄带位于蒙山地幔凸起区,断续长约14 km,宽约8 km,由8组岩脉和一对岩管(胜利I号)组成。该带不仅分布中国最早发现的金伯利岩体(红旗I号岩脉),而且金刚石品位高(最高可达6.35 ct/m<sup>3</sup>),盛产大颗粒金刚石(王久华,2012)。两个岩管地表相距20 m,地下约250 m合并为一个岩管,其中小管是蒙阴岩带中含矿最富的岩体。大小管岩性主要由粗晶斑状金伯利岩和金伯利角砾岩组成,含少量蛇纹石化碎裂岩(宋瑞祥,2013)。西峪带位于新甫山地幔凸起和地幔凹陷区的过渡带,分布在高都镇山头、西峪和薛家峪一带,



图6 朱瓦能DK2矿区的4个金伯利岩管分布图及野外特征

a—DK2露头采坑;b—DK2采坑平面地质简图(de Wit et al,2016);c—南筒火山碎屑金伯利岩和玄武岩围岩露头

Fig.6 Jwaneng D/K2 pit composed of north, central, south and forth lobes (a); Schematic geological map showing the DK2 features (b); Photographs of the volcanoclastic kimberlite and wall rock basalt from the south lobe (c)

与常马庄带相距 14 km,沿 5~20°方向展布,长约 15 km,宽 0.5~1.0 km,由 15 条岩脉和 12 个岩管组成,其中红旗 5 号岩脉具工业意义,主要岩性为斑状金伯利岩、凝灰质金伯利岩。坡里带位于金星山地幔凹陷内(罗声宣等,1999),分布于岱固镇至野店镇一带,岩带长约 18 km,宽约 0.5 km,由 25 条岩脉组成,未达到工业品位,主要岩性为斑状富金云母金伯利岩(池际尚,1996b)。

蒙阴金伯利岩岩石类型主要有斑状金伯利岩、细粒金伯利岩、金伯利角砾岩、凝灰质金伯利岩、蚀变金伯利岩等。其中金伯利角砾岩主要出露于岩管和局部宽脉的部位,分为灰岩质和花岗质金伯利角砾岩;斑状金伯利岩是构成岩脉和岩管的主要岩石类型,包括斑状金伯利岩、斑状金云母金伯利岩、斑状含镁铝榴石金伯利岩、斑状含岩球金伯利岩、

含花岗质围岩金伯利岩等,呈灰绿、墨绿、灰蓝色及暗棕色,圆斑或卵斑结构,块状构造、球状构造,局部为流动构造,斑晶主为橄榄石、次为金云母、镁铝榴石、铬透辉石等。基质为显微斑状结构,斑晶为蛇纹石、金云母、磁铁矿、钙钛矿、磷灰石等。蚀变类型主要有蛇纹石化、碳酸盐化和硅化等。金云母含量从常马庄、西峪、坡里岩带含量逐渐增加(分别为<10%、20%、30%~40%)。3 个岩带的金刚石品位和成矿条件不同,含矿性和岩石组合亦有较大差异,从南向北岩带含矿性依次变贫。最南端的常马庄含矿性较好,其中最富的为“胜利 I 号”小管,以产大颗粒的金刚石著称,产出至今最大的原生矿金刚石是“蒙山 I 号”(119.01 克拉);岩性以斑状镁铝榴石金伯利岩为主,次为斑状金云母金伯利岩;西峪岩带以斑状金云母金伯利岩为主,次为斑状金伯

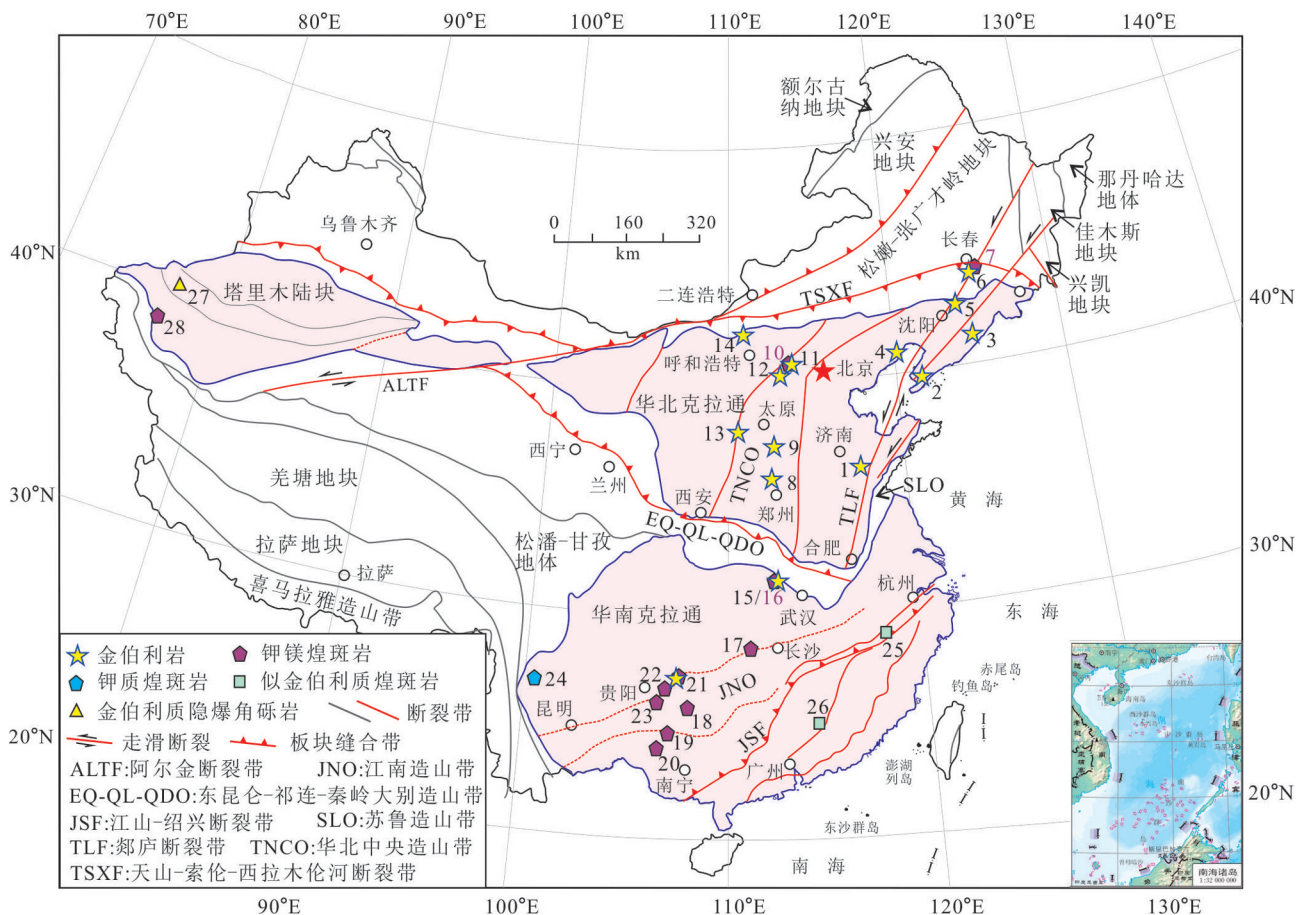


图7 中国金伯利岩和钾镁煌斑岩分布简图(板块边界和主断裂带据 Zheng et al.,2013;许文良等,2013)

1—山东蒙阴;2—辽宁瓦房店(旧称复县);3—辽宁桓仁;4—辽宁葫芦岛;5—辽宁铁岭;6—吉林集安;7—吉林通化钾镁煌斑岩;8—河南鹤壁;9—河北涉县;10—山西大同牛沟钾镁煌斑岩;11—山西大同采凉山;12—山西应县;13—山西柳林;14—内蒙古四子王旗;15—湖北大洪山彭家垮金伯利岩;16—湖北大洪山王关—徐家冲钾镁煌斑岩;17—湖南宁乡;18—广西融水;19—广西都安;20—广西大化;21—贵州镇远;22—贵州施秉;23—贵州麻江;24—扬子陆块西缘钾质煌斑岩;25—浙江龙游;26—江西安远;27—新疆巴楚;28—新疆皮山

Fig.7 Schematic map of kimberlites and lamproites distribution in China

1— Mengyin , Shandong; 2— Wafangdian (formerly known as Fuxian) , Liaoning; 3— Huanren, Liaoning; 4— Huludao, Liaoning; 5— Tieling , Liaoning; 6— Ji'an, Jilin; 7— Potassium-magnesium lamprophyre in Tonghua, Jilin; 8— Hebi, Henan; 9— Shexian, Hebei; 10— Yinniugou potassium-magnesium lamprophyre in Datong, Shanxi; 11—Cailiangshan, in Datong, Shanxi; 12— Yingxian, Shanxi; 13— Liulin, Shanxi; 14—Siziwang Banner, Inner Mongolia 15—Pengjia collapse kimberlite in Dahongshan, Hubei; 16—Wanguan—Xujiachong K—Mg lamprophyre in Dahongshan, Hubei; 17— Ningxiang, Hunan; 18—Guangxi meltwater; 19—Du'an, Guangxi; 20—Dahua, Guangxi; 21—Zhenyuan, Guizhou; 22—Shibing, Guizhou; 23—Majiang, Guizhou; 24—K—lamprophyre on the western margin of Yangtze block; 25—Longyou, Zhejiang; 26—Anyuan, Jiangxi; 27—Bachu, Xinjiang 28— Pishan, Xinjiang

利岩和斑状含岩球金伯利岩;坡里以斑状富金云母金伯利岩为主。常马庄和西峪岩带中可见少量石榴石纯橄岩、尖晶石方辉橄橄榄岩、尖晶石二辉橄橄榄岩、榴辉岩等捕虏体,大多见于岩管中,粒径一般5~10 cm(宋瑞祥,2013)。

蒙阴金刚石颜色整体以无色、淡黄、浅棕色为主,次有不同浓度的绿、灰黄、橙等色;形态有单晶、双晶、聚合晶等,以阶梯状八面体和曲面菱形十二面体最常见;包裹体矿物以石墨为主,达到80%~

90%,少量可见镁铝榴石、铬尖晶石、橄榄石、铬透辉石、金刚石等。3个岩带中金刚石的颜色、形态和包裹体含量和种类上均有明显差异。常马庄金刚石有色金刚石较多,无色者占36.43%,以菱形十二面体为主,八面体次之,含包裹体金刚石较少(约占32.6%),I型金刚石多,II型少。相比之下,西峪无色金刚石达75%,坡里金刚石形态以八面体为主,菱形十二面体次之,西峪金刚石介于两者之间(宋瑞祥,2013)。



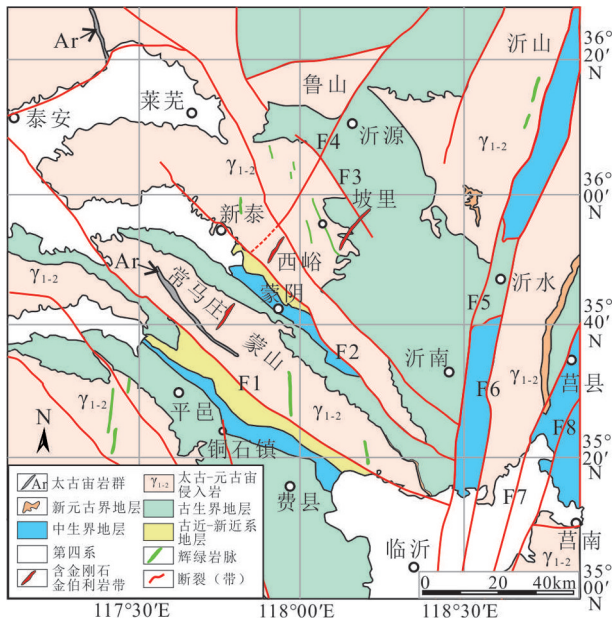


图8 山东蒙阴金伯利岩地质简图 (据宋瑞祥,2013 修改)  
F1—蒙山断裂;F2—新泰—垛庄断裂;F3—铜冶店—蔡庄断裂;  
F4—上五井断裂;F5—郯郚—葛沟断裂;F6—沂水—汤头断裂;  
F7—安丘—莒县断裂;F8—昌邑—大店断裂

Fig.8 Geological map of Mengyin kimberlites showing the locations of three mines of Changmazhuang, Xiyu and Poli and main faults (modified from Song, 2013)  
F1—Mengshan fault; F2—Xintai—Duozhuang fault; F3—Tongyedian—Caizhuang fault; F4—Shangwujing fault; F5—Zanzenggou fault; F6—Yishui—Tangtou fault; F7—Anqiu—Juxian fault; F8—Changyi—Dadian fault

### 3.1.2 辽宁瓦房店岩群

辽宁省金刚石储量全国第一(占52%), 目前已 在瓦房店、铁岭、桓仁、葫芦岛等4个地区发现了含 金刚石金伯利岩和3个冲积型砂矿(宋瑞祥,2013)。 含矿金伯利岩区分属瓦房店—铁岭、庄河—桓仁、 绥中—北镇3条金刚石成矿带(赵春强等,2018), 均 位于凌源—北票—沙河断裂以北的华北克拉通东 北部(赵光慧等,2011)(图9)。辽宁金伯利岩型金 刚石矿带分布受郯庐深大断裂和金州等数条次级断 裂带控制。郯庐断裂带在辽宁境内涉及沈阳—渤 海段, 又称营淮断裂带(张鹏等,2010), 走向NE 20~ 30°, 南起大连湾, 由金州西经瓦房店至沈阳以东和 铁岭, 分割东侧长期处于隆起区的胶辽地盾和西侧 复州凹陷区(池际尚等,1996a; 赵建军等,2011)。

瓦房店金伯利岩型金刚石矿是辽宁省目前唯 一达到工业开采要求的原生矿, 位于华北克拉通冀

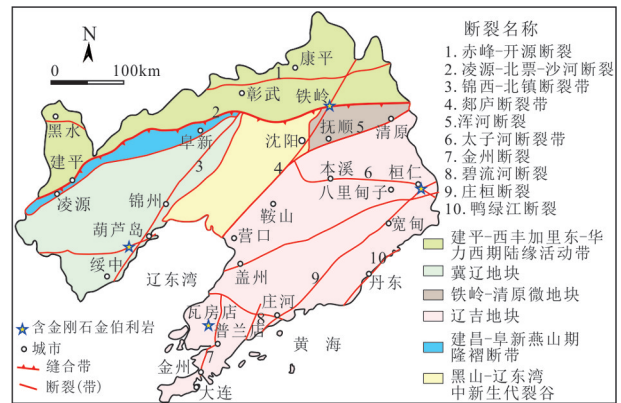


图9 辽宁省含金刚石金伯利岩和主要断裂构造分布图 (据 赵光慧等,2011; 宋瑞祥,2013 修改)

Fig.9 Distribution map of diamondiferous kimberlites and major faults in Liaoning Province (modified from Zhao et al., 2011; Song, 2013)

辽陆核南部辽东台隆—普兰店地幔隆起区, 距郯庐 断裂带东30~40 km处。NNE向复州河断裂、松木 岛—松树镇断裂和金州断裂系与近EW向岚嵴山弧 形断裂联合控制了金伯利岩侵入(赵建军等,2011; 宋瑞祥,2013)。瓦房店金伯利岩群分为脉状、管 状和隐伏体3种产出类型, 近EW向断裂控制着区 内大部分金伯利岩管和岩脉的长轴方向, 脉状金 伯利岩体均赋存于NEE向至近EW向构造带内; 而 管状金伯利岩体主要出现在NNE断裂与NEE向断 裂的交接部位(赵建军等,2011)。基底由太古宙 深变质鞍山群与浅变质辽河群组成, 元古宙辉绿 岩脉使地块刚性增强, 盖层主要为新元古代青白 口纪至震旦纪地层。金伯利岩体主要侵入于盖层 复式背斜轴部, 即新元古代钓鱼台、南芬、桥头 组的石英岩、粉砂岩、泥灰岩、页岩和寒武纪毛 庄组和徐庄组灰岩、页岩等(徐俊,2013)。

瓦房店金伯利岩群南北长32 km, 东西宽约 30 km, 主要分布于头道沟、老虎屯、李店、二道 沟一带, 由24个岩管和88条岩脉组成, 其中达到 工业品位的有6个岩体(30、42、50、51、68、74)。 岩群划分为5个金伯利岩带, 包括:(1)大马圈子— 太阳沟带, 长约28 km, 宽2 km, 包括14个岩管 和67个岩脉, 中国目前最大的42号岩管和瓦房 店第二大岩管(30号)及9、10、11岩脉分布于该 矿带中;(2)头道沟—岚嵴店带, 长约15 km, 宽 1~2 km; 包括8个岩管和17条

岩脉,整体品位好价值高,含矿最好的50号岩管分布其中;(3)邓屯—大高家屯带,长约6 km,宽0.25~1 km,含2个岩管和4条岩脉;(4)石灰窑子—李家店带;(5)大王沟—西洼带(图10),以前3个带为主(宋瑞祥,2013;赵春强等,2018)。瓦房店金伯利岩岩性复杂,主要包括斑状金伯利岩、斑状金云母金伯利岩(金云母含量5%~15%)、斑状富金云母金伯利岩(金云母含量>15%)、细粒金伯利岩、含岩球斑状金伯利岩、含围岩角砾状金伯利岩、金伯利(凝灰)角砾岩、金伯利凝灰岩和含金伯利物质角砾岩等。热液蚀变主要包括金云母化、蛇纹石化、碳酸盐化、滑石化、硅化、绿泥石化和褐铁矿化,反映了岩浆期后含挥发分热液活动强烈。50号岩管深远捕虏体主要为地幔橄榄岩(尖晶石方辉橄榄岩、石榴石方辉橄榄岩)和金云母岩及少量云母橄长岩。

除瓦房店含矿金伯利岩外,辽宁其他3个金伯利岩群金刚石含量低颗粒小,目前不具有工业价值(宋瑞祥,2013)。桓仁金伯利岩群共含60多个金伯利岩体,以岩脉为主,含金刚石极少,分布于太子河—浑河断裂和庄恒断裂带交汇的桓仁凸起内(宋瑞祥,2013)(图9)。金伯利岩脉集中产出在桓仁四平街的湾沟、马圈子、苇塘沟一带,走向30~40°,脉长30~300 m,宽0.5~2.5 m不等,脉岩以斑状金云母金伯利岩为主,有不同程度的蛇纹石化和碳酸盐化,围岩为古元古代混合片麻岩(宋瑞祥,2013)。铁岭金伯利岩群共含28个金伯利岩体,呈岩脉和岩管产出,走向NE和NNE,分布在铁岭八宝岭—帽园子一带,位于郯庐断裂带东侧30 km,辽东台隆的铁岭—靖宇隆起的边部。铁矿金伯利岩脉一般长100~150 m,最长1260 m,宽约30 m;岩管长30~150 m,宽20~40 m,岩性以斑状金云母金伯利岩为主,围岩为古元古代混合片麻岩、斜长角闪岩等。葫芦岛金伯利岩位于山海关台隆缓中凸起内,基底为太古宙建平岩群大营子组混合花岗岩,位于向要路沟断裂带、北大山—锦西断裂带和药王庙—班吉塔断裂交汇处。金伯利岩主要分布在苇子沟东平台和石灰窑荀家沟,两者相距约25 km,以NEE向岩脉产出。其中苇子沟岩脉侵入寒武系馒头组页岩和灰岩中,脉长40~80 m,宽0.2~2.4 m,岩性以斑状富金云母金伯利岩为主(宋瑞祥,2013)。

## 4 中国和博茨瓦纳金伯利岩型金刚石矿床对比

### 4.1 金伯利岩形成时间

限定金伯利岩的侵位时代是合理解释地球深部动力学和建立金伯利岩成因的时空模型的关键和难点之一。金伯利岩定年早期方法有金云母和全岩Rb-Sr等时线年龄、金云母K-Ar、 $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$ 定年等,然而这些结果常由于样品后期蚀变、低封闭温度、潜在过剩Ar含量等影响而出现不确定性(Wu et al.,2010; Stanley et al.,2016)。由于锆石普遍以捕虏晶产出且常与钛铁矿连生,锆石U-Pb测年结果普遍被认为稍早于金伯利岩实际喷发年龄(Moore et al.,2005),而部分高温环境可使锆石U-Pb系统处于开放状态,其年龄也可能代表金伯利岩喷发的时间(Griffin et al.,2014)。然而中温条件(150~400℃)锆石裂变径迹年龄、金红石和钙钛矿U-Pb年龄可以准确限定金伯利岩的喷发时代,尤其钙钛矿测年方法应用最广,因为钙钛矿是金伯利岩浆结晶的产物,它含有高的U、Th且不受蚀变影响(Griffin et al.,2014; Stanley et al.,2016)。

辽宁瓦房店金伯利岩还没有钙钛矿U-Pb年龄的报道,山东蒙阴胜利1号金伯利岩中钙钛矿U-Pb年龄为(456±8)Ma(Dobbs et al.,1994)、457 Ma(池际尚,1996b)、(470±4)Ma(Yang et al.,2009),低于金云母Rb-Sr等时线年龄(493±10)Ma(Lu et al.,1998)、(475±3)Ma(Dobbs et al.,1994),分别与蒙阴和辽宁瓦房店金伯利岩中金云母巨晶的 $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$ 等时线年龄(464.9±2.7)Ma和(463.9±6.3)Ma相吻合(张宏福等,2007),也与瓦房店金伯利岩中金云母的Rb-Sr模式等时线年龄(461.7±4.8)Ma接近,说明两地金伯利岩群的侵位时间可能均为中奥陶世(456~470 Ma)。

Griffin et al.(2014)对非洲南部135个金伯利岩筒开展了钙钛矿U-Pb定年,其中朱瓦能金伯利岩的钙钛矿U-Pb年龄为238 Ma,与锆石U-Pb年龄(235±7)Ma(Kinny et al.,1989)一致,稍低于金刚石中单斜辉石的 $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$ 年龄(244 Ma, Burgess et al.,1992)。奥拉帕岩群中AK1金伯利岩中钙钛矿的U-Pb年龄为95~92 Ma;丹姆沙矿区的BK9为94 Ma, BK12为90 Ma,外围BK1为97 Ma;莱特拉卡内

DK1 金伯利岩中钙钛矿的 U-Pb 年龄为 95~94 Ma (Griffin et al.,2014), 以上年龄与奥拉帕金伯利岩锆石裂变径迹年龄( $92.4 \pm 6.1$  Ma, $87.4 \pm 5.7$  Ma, Haggerty et al.,1983)一致。Gope 岩群中有经济价值的 Gope 25 矿区的钙钛矿 U-Pb 为 86 Ma, Gope 04 为 94.3 Ma, Gope136 为 89 Ma, Gope137 为 93 Ma。

#### 4.2 含矿金伯利岩的产状

金伯利岩一般以岩筒(或岩管)、岩脉、岩席(或岩床)等形态产出(董振信,1991;Field et al.,2008; Brook,2017)。博茨瓦纳 8 个在采的含矿金伯利岩区均以岩筒产出。中国蒙阴和瓦房店含矿金伯利岩以岩脉为主,岩筒次之。根据岩筒垂向产状,金伯利岩岩相分为火山口相、火山通道相和根部相(Field et al.,2008;路凤香,2008),三者横截面逐渐变小,金刚石品位一般随深度增加而下降(王雪木等,2015)。火山口相大致呈圆形盆地相,倾角一般在 25~70°,直径一般 50~1500 m 不等,深度在 150~300 m,岩石一般分为熔岩、火山碎屑金伯利岩和表层金伯利质碎屑岩,火山口相以发育明显的层状构造、弱固结、混乱岩屑流和火山碎屑物组成的沉积物为特征,这些沉积物常被湖盆沉积物覆盖。火山通道相呈圆柱状或圆锥状,筒壁垂直陡立,倾角一般在 75~85°,岩壁常呈光滑状、条纹状或穿插接触。火山通道相岩石包括凝灰质金伯利岩和凝灰质金伯利角砾岩(>4 mm 岩屑超过 15%),常含球状火山砾、棱角状围岩和浑圆状地幔橄榄岩和榴辉岩等地幔岩捕虏体及地幔深部矿物分布于细粒基质中。根部相一般位于火山口相 2~3 km 以下,厚约 0.5 km,沿垂向和走向上呈不规则脉状、席状或穹隆状产出,所有的岩管根部均由不同岩脉或岩脉交叉构成(Venter,1998)。根部相岩石最接近初始金伯利岩,它由挥发分富集岩浆直接结晶而成,一般由透辉石、钙镁橄榄石、金云母、方解石和蛇纹石等 5 种主要矿物组成,具有斑状构造和岩浆分异和多期次侵入特征(Venter,1998)。

火山口相和通道相在非洲南部金伯利矿区被称为“黄土带(yellow ground)”,较容易开采,根部相又称为“蓝土带(blue ground)”,包括岩浆质或半深成矿物,常见橄榄石、金云母巨晶,以及石榴石、钛铁矿、尖晶石和铬透辉石捕虏晶,开采相对困难(路凤香,2008)。博茨瓦纳奥拉帕和朱瓦能金伯利岩群

普遍保留火山口相,而南非的金伯利、亚格斯方丹(Jagersfontein)、咖啡方丹(Koffiefontein)为火山通道相(Field et al.,2008;Brook,2017),而整个华北克拉通如辽宁瓦房店、山东蒙阴和河北涉县等金伯利岩群呈“脉多筒少”的根部相特点(池际尚,1996b;路凤香,2008)。

中国含矿金伯利岩筒地表出露面积普遍小于博茨瓦纳。虽然中国最大的岩筒(瓦房店 42 号岩筒,由 3 个岩管组成)地表出露面积(412500 m<sup>2</sup>,约 102 英亩,宋瑞祥,2013)与博茨瓦纳最大的奥拉帕 A/K1 岩筒地表面积(118 英亩,约 477529 m<sup>2</sup>)类似,但中国金伯利岩筒地表出露面积普遍较小,如瓦房店第二大岩筒(33 号)的地表出露面积约为 14000 m<sup>2</sup>(3.46 英亩),由两管组成的蒙阴胜利 I 号岩筒地表出露面积为 3988 m<sup>2</sup>(约 0.99 英亩)。这种较小的地表产出形态普遍与岩筒剥蚀至根部相有关,相对富集金刚石的火山口相和火山通道相剥蚀殆尽,指示中国具有寻找金刚石砂矿的巨大潜力。

#### 4.3 捕虏体示踪克拉通地幔性质

太古代克拉通陆下岩石圈地幔(SCLM)是上地幔顶部坚硬(非对流)相对较冷的亏损的岩层,具有足够低的氧化态,具有导热性,厚度一般在 150~250 km,密度相对年轻地幔较小(Jacob,2004;O'Reilly et al.,2010),其下部为岩石圈-软流圈边界(LAB),与对流的温度较高相对富集的软流圈相隔。大部分 SCLM 在 3 Ga 之前就已克拉通化,高度亏损玄武质成分(如高 Mg 和低 Ca、Al),随后多期次熔体和流体淋滤导致地球化学成分富集(O'Reilly et al.,2010)。由于太古宙克拉通 SCLM 底部是目前人类获得工业价值金刚石最重要的部位,前人对其进行了较为深入的研究,然而对于地幔岩石圈的成因、年龄、组成和厚度还知之甚少。金伯利岩中捕虏体能够用于示踪 SCLM 性质,计算周围对流地幔热、氧化还原条件、温度压力和化学状态(O'Reilly et al.,2010;Aulbach et al.,2017),是研究克拉通地幔的组成、形成演化及地球深部动力学过程难得的直接研究样品之一(郑建平,2009;O'Reilly et al.,2010;Shirey et al.,2013)。

SCLM 主要由地幔橄榄岩和少量榴辉岩和辉石岩等组成(Agashev et al.,2013),对应的金伯利岩中捕虏体也以地幔橄榄岩为主。其中榴辉岩捕虏体

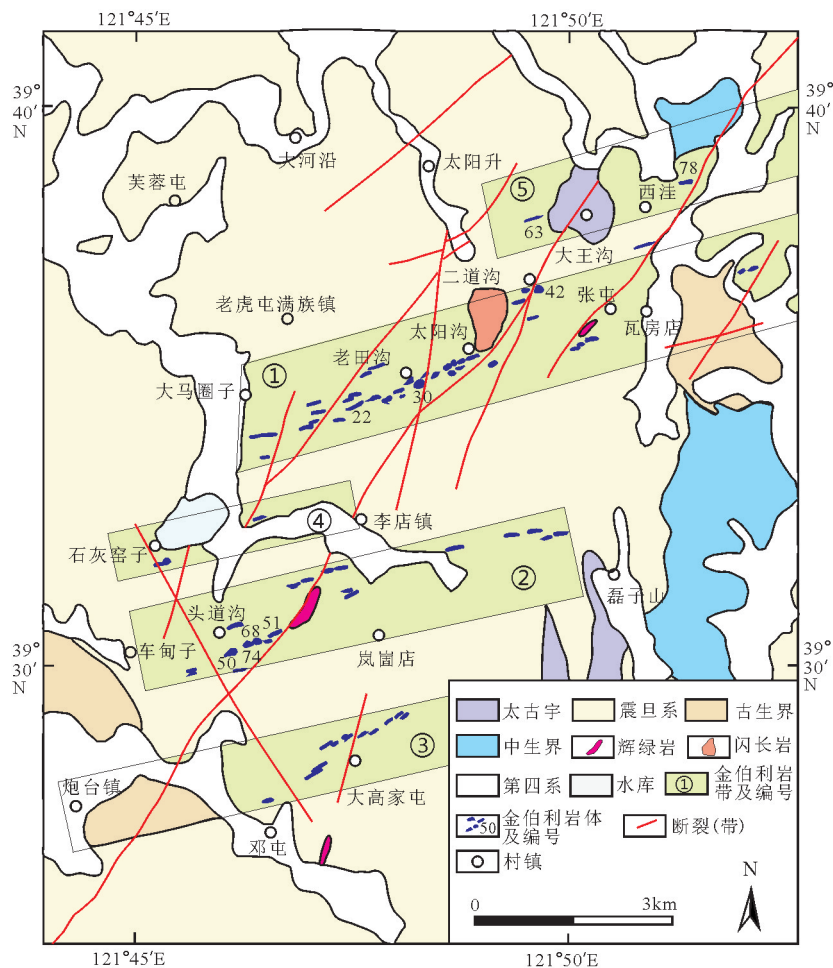


图10 辽宁瓦房店金伯利岩群构造地质简图(据宋瑞祥,2013;赵春强等,2018)修改)

Fig.10 Sketch geological map of Wafangdian kimberlite cluster in Liaoning Province including five kimberlite zones (modified from Zhao et al., 2011; Song, 2013; Zhao et al., 2018)

被普遍解释为俯冲洋壳的变质产物,是大洋板片俯冲至深部地幔过程的重要证据(Jacob,2004; Aulbach et al.,2017)。博茨瓦纳含金刚石金伯利岩中捕虏体类型复杂,即便同一个岩筒群,金伯利岩中捕虏体成分差异显著,如奥拉帕 A/K1 和朱瓦能 DK2 金伯利岩的捕虏体主要为榴辉岩和少量辉石岩(Aulbach et al.,2017),而距奥拉帕 A/K1 仅 23 km 的卡罗韦 A/K6 金伯利岩出露大量地幔橄榄岩捕虏体而榴辉岩较少,距 A/K1 约 50 km 的莱特拉卡内 D/K1 捕虏体类型也不同,常见地幔橄榄岩、辉石岩、榴辉岩、云母岩、MARID 地幔岩等捕虏体(Luguet et al.,2015; Stanley et al.,2016; Aulbach et al.,2017)。位于同一个郯庐金伯利岩带的中国蒙阴和瓦房店金伯利岩捕虏体成分亦存在差异,蒙阴常马庄和西峪

金伯利岩带中常见石榴石纯橄岩、石榴石方辉橄橄榄岩、石榴石/尖晶石二辉橄橄榄岩、榴辉岩等捕虏体(宋瑞祥,2013);辽宁瓦房店榴辉岩捕虏体极少,主要为二辉橄橄榄岩、纯橄岩、尖晶石方辉橄橄榄岩、石榴石方辉橄橄榄岩、金云母岩和少量麻粒岩、云母橄长岩(路凤香等,1991;郑建平,2009;宋瑞祥,2013)。

捕虏体中橄榄石  $Mg^{\#}$  值( $Mg/(Mg+Fe)$ )大于 92 代表难熔地幔,小于 90 代表富集地幔,在 92~90 之间为过渡型地幔(Zheng et al.,2001;郑建平,2009)。蒙阴和瓦房店地幔橄橄榄岩捕虏体/捕虏晶的橄榄石  $Mg^{\#}$  值大部分 >92,仅极个别在 92~90 之间(郑建平等,1999;Zheng et al.,2006),类似于莱特拉卡内低 Ca 方辉橄橄榄岩和二辉橄橄榄岩中橄榄石的值(分别为 92.9、91.5),均代表了古老的亏损难熔地幔。奥拉

帕榴辉岩中单斜辉石  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值较低(0.7026~0.7046),单斜辉石  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  与  $\text{Eu}/\text{Eu}^*$ 、 $\text{Mg}^\#$ 、 $\text{Sr}/\text{Y}$  等比值相关,可能与海底低温蚀变导致的较大范围  $\delta^{18}\text{O}$  值(单斜辉石:4.83‰~8.36‰;石榴石:5.05‰~8.18‰),这些证据指示了原岩为古洋壳岩石的榴辉岩来源于亏损地幔,并经历了分离结晶和海底低压蚀变(Aulbach et al.,2017)。郑建平等(1999)报道了蒙阴和瓦房店地幔橄榄岩全岩的  $^{86}\text{Sr}/^{87}\text{Sr}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  值,其中蒙阴  $^{86}\text{Sr}/^{87}\text{Sr}$  比值变化较大(0.70393~0.71109),但整体低于瓦房店橄榄岩的比值(0.71216~0.71398);蒙阴地幔橄榄岩的  $\delta^{18}\text{O}$  值(4.21‰~4.45‰),明显低于瓦房店橄榄岩的值(6.68‰~7.26‰)(郑建平,2009),也比地幔型  $\delta^{18}\text{O}$  值(5.1‰~5.9‰)稍低,这些数据反映了古生代华北克拉通 SCLM 可能经历了从亏损部分熔融向熔体/流体交代富集的过程。

#### 4.4 金伯利岩原始岩浆和源区

金伯利岩原始岩浆及其地幔源区一直存在较大争议。由于金伯利岩岩浆从产生到升至地表过程中,受到多期次的混染交代作用,使得金伯利岩中混有多源的地幔和地壳捕虏体、多源的斑晶和捕虏晶等,以至于很难确定金伯利岩原始岩浆的组成。雷雪英总结了鉴别金伯利岩是否受到混染的参数,认为未受混染的金伯利岩  $\text{Al}_2\text{O}_3 < 5\%$ ,  $\text{SiO}_2 = 25\% \sim 35\%$ ,  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} < 0.5$ , 混染指数  $(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Na}_2\text{O})/(\text{MgO} + 2\text{K}_2\text{O}) > 1.5$ ; 而受混染的金伯利岩  $\text{Al}_2\text{O}_3 > 5\%$ ,  $\text{SiO}_2 > 35\%$ , 混染指数则为 1~1.5。并推测金伯利岩原始岩浆主量成分为  $\text{SiO}_2 = 25\% \sim 32\%$ ,  $\text{MgO} = 22\% \sim 41\%$ ,  $\text{CaO} = 8\% \sim 20\%$ ,  $\text{FeO}^\text{T}$ (全铁) = 5.6%~13%,  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 1.2 \sim 3.3\%$ ,  $\text{K}_2\text{O} = 0.4\% \sim 1.9\%$ ,  $\text{TiO}_2 = 0.5\% \sim 3.4\%$ ,  $\text{CO}_2 = 4\% \sim 4\%$ ,  $\text{H}_2\text{O} = 6\% \sim 12.3\%$ 。微量元素中相容元素丰度与超基性岩相似,不相容元素丰度与碱性岩相似。

金伯利岩的源区争议涉及上地幔(SCLM、软流圈地幔)(Becker et al.,2006;张宏福等,2007;Tappe et al.,2012)、下地幔或核幔边界(Wu et al.,2010)、地幔柱(Chalapathi Rao et al.,2016)等观点。普遍认为放射性同位素是示踪金伯利岩地幔源区的重要方法(Wu et al.,2010)。传统研究大多基于全岩同位素成分,例如 Smith(1983)根据全岩 Pb-Sr-Nd 同位素和矿物地球化学特征,结合金伯利岩的侵位年龄,

将非洲南部金伯利岩分为 I 型(大部分 114~80 Ma,低 Sr、高 Nd)和 II 型(150~114 Ma,高 Sr、低 Nd)金伯利岩,分别对应于玄武岩型和云母型。然而由于金伯利岩包含不同类型的壳源和幔源捕虏体以及受到后期蚀变影响,该分类中全岩同位素值可能代表非真实的金伯利岩浆同位素值(Yang et al.,2009),但部分作者认为 Nd 同位素可用于追溯地幔源区(Tappe et al.,2012),而钙钛矿作为初始岩浆结晶矿物,其 Sr-Nd-Hf 放射性同位素是示踪金伯利岩源区另一个有效方法(Wu et al.,2010;Tappe et al.,2012;Griffin et al.,2014)。

Griffin et al.(2014)对非洲南部 110 个地区的 135 个金伯利岩筒开展了钙钛矿的原位 U-Pb 定年和 Sr、Nd 同位素分析,获得了 1800~1600 Ma、1200~1000 Ma、800~500 Ma、180~170 Ma 和 130~50 Ma 五个阶段年龄峰,指示岩石圈交代岩富集事件早在 1.8 Ga 已经开始,而 100~80 Ma 是最重要的岩浆事件。非洲南部包括奥拉帕岩群在内的(90±10) Ma 的 I 型金伯利岩喷发之前至少经历了大约 180 Ma 和 130~120 Ma 的 II 型金伯利岩的局部缓慢的岩浆活动,高度富集的 SCLM 是 II 型金伯利岩的地幔源区(高  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ,低  $\epsilon_{\text{Nd}}$  值,高 Rb 和 LREE/HREE,源自 MARID 和金云母-钾-锰闪石交代的地幔橄榄岩),这种富集 SCLM 在 1.8 Ga 既已存在于岩石圈深部,在热的软流圈物质或地幔柱上升过程中岩石圈发生减薄,导致富集部分在 110 Ma 之前被完全消融,以至于年轻的 I 型金伯利岩具有低  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  和高  $\epsilon_{\text{Nd}}$  (0~+5) 值,源区来自更浅的亏损 SCLM,且几乎未与老的富集 SCLM 发生交代反应(Griffin et al.,2014)。Wu et al.(2010)也报道了非洲南部 I 型金伯利岩中的钙钛矿类似的  $\epsilon_{\text{Nd}}$  值(+1.2~+3.1),其远远低于亏损软流圈地幔值(+10, Salters et al.,2004),结合中等的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值(0.704~0.705),指示未分异或弱亏损的地幔源区,暗示 I 型金伯利岩浆可能源自下地幔(Wu et al.,2010)。

山东蒙阴金伯利岩全岩  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值普遍较高(0.70548~0.70668,池际尚,1996b),0.704489~0.709783,张宏福等,2007),被解释为源自富集地幔,可能为华北 SCLM 受到大洋板片俯冲流体交代的产物(张宏福等,2007),然而上述全岩  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  明显高于钙钛矿值(0.70371±12, Yang et al.,2009)说明受到蚀变混染

的影响。蒙阴金伯利岩中钙钛矿的初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值( $0.70371\pm 12$ )较低,并具有较窄范围的 $\varepsilon_{\text{Nd}}$ 值( $0.13\pm 0.22$ )(Yang et al.,2009),21个全岩 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 比值为 $0.512072\sim 0.512408$ (池际尚,1996b),小于球粒陨石平均值( $0.512638$ ),以上特征类似于非洲南部I型金伯利岩。结合早古生代华北陆块东部从辽宁至山东无大洋俯冲记录,金伯利岩中发现碳化钨、自然铁等还原矿物(池际尚等,1996b),指示蒙阴金伯利岩浆源自弱亏损地幔或初始地幔源区,可能与深部地幔物质上涌或地幔柱上侵至华北岩石圈底部有关(Yang et al.,2009)。复县金伯利岩类似于I型,目前还没有钙钛矿同位素数据的报道,然而根据其于蒙阴金伯利岩分布于郯庐带,具有类似的根部相、岩石组合及侵位时代,笔者认为两者具有一致的地幔源区特征。

#### 4.5 金伯利岩侵位的构造背景

华北克拉通面积约 $200\text{万 km}^2$ ,保存 $3.8\text{ Ga}$ 古老残余陆壳,其基底主要由太古宙—古元古代TTG片麻岩、麻粒岩和斜长角闪岩等高级变质组成,中元古代(约 $1.8\text{ Ga}$ )东、西陆块碰撞拼合,完成终极克拉通化并进入稳定地台发展阶段(Zhao et al.,2005),上部覆盖巨厚中、新元古代至早古生代沉积盖层。然而自 $465\sim 470\text{ Ma}$ 至中石炭世,发生明显的沉积间断,该间断不仅与金伯利岩的侵位构造事件一致,也与蒙古洋向南俯冲到华北克拉通之下,形成一系列俯冲增生和碰撞造山作用,形成华北克拉通北部巨大的中亚造山带等构造事件相吻合。中生代早期,华北克拉通岩石圈地幔被俯冲流体/熔体交代,导致克拉通北部岩石圈地幔减薄破坏,并在T3发生广泛伸展活动(Niu et al.,2016)。

华北克拉通岩石圈破坏的时间为中生代,峰期为 $125\text{ Ma}$ 左右(朱日祥等,2011),而中国东部含金伯利岩的喷发时间在 $456\sim 470\text{ Ma}$ ,说明在中生代华北岩石圈破坏之前喷发的“蒙阴—瓦房店”型且源自初始地幔的金伯利岩均可能含矿。考虑到华北克拉通自古生代以来受到古亚洲洋(或古蒙古—鄂霍次洋)、古/现代太平洋的俯冲作用,并经历了 $470\sim 320\text{ Ma}$ 长期剥蚀及随后晚石炭至早三叠世的海陆交互稳定沉积(朱日祥等,2011),暗示中生代之前喷发的“蒙阴—瓦房店”型含矿金伯利岩可能被晚石炭至早三叠世沉积岩覆盖或者部分被剥蚀。由此推测,中国

金伯利岩型和冲积型金刚石矿床均有找矿潜力。

非洲南部白垩纪金伯利岩侵位的主构造背景为大西洋打开,其中( $90\pm 10$ ) Ma金伯利岩的喷发与非洲和南美陆块的板块的裂离有关,地幔柱活动和古大洋岩石圈俯冲是大陆裂解可能的驱动力。金伯利岩一般沿线性弧形破碎带和深大断裂分布,卡拉哈日克拉通内基底断裂和破碎带走向南西—北东,长约 $1600\text{ km}$ ,宽 $50\sim 90\text{ km}$ ,成因与大西洋洋中脊右旋转换有关。Griffin et al.(2014)统计了非洲南部金伯利岩中钙钛矿的 $\varepsilon_{\text{Sr}}$ 值和 $\varepsilon_{\text{Nd}}$ 值与Vs波在 $150\text{ km}$ 深度的关系发现金伯利岩的地球化学富集特征与低Vs波带密切重合,指示延伸到岩石圈底部的长期构造活动带,如主要区域断裂、克拉通边界剪切带和破碎带,控制金伯利岩的交代作用和侵位。该认识与中国学者认为金伯利岩的产出与深切地幔的断裂系密切相关一致,它是金伯利岩型金刚石重要的控岩要素(黄蕴慧等,1992;池际尚等,1996b)。例如南非金伯利岩群沿北东向岩石圈尺度的芬特斯多普(Ventersdorp)深大断裂排列,中国蒙阴和瓦房店含矿金伯利岩群均沿郯庐深大断裂分布。

#### 4.6 金刚石包裹体指示构造动力学过程

金刚石能够抵御蚀变和再结晶对包裹体的干扰,能够保存壳源、幔源甚至核幔边界的物质组分,记录了金刚石的形成环境、形成时代和形成机制等重要信息,是人类认识地球深部过程,探讨壳—幔之间碳等物质循环最直接的样品(连东洋等,2018)。金伯利岩型金刚石中包裹体丰富,不仅有源自岩石圈地幔的包裹体,还有少量可能来自于软流圈、地幔过渡带、下地幔矿物和流体(Harte,2010; Stachel et al.,2015; Nestola et al.,2018)。因为克拉通结构控制石墨—金刚石形成的压力温度条件,金刚石一般形成在克拉通 $150\text{ km}$ 以下相对冷却、还原和低密度岩石圈根域,只有在太古宙—早元古代克拉通相对低的温度( $< 1200^\circ\text{C}$ )下,才能保存较大范围的金伯利岩稳定“生存”区。统计显示,含包裹体的金伯利岩型金刚石中约99%金刚石形成于岩石圈地幔,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(Shirey et al.,2013;连东洋等,2018)。约1%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,如博茨瓦纳卡罗韦金伯利岩型金刚石中发现超硅石榴石(majorite)(Motsamai et

al.,2018),它是鉴别来自软流圈和地幔过渡带金刚石的主要指示矿物(Stachel,2001; Tappert et al., 2005);南非、巴西、加拿大金伯利岩型金刚石中有来源于下地幔标志性矿物组合:瓦硅钙钡石(walstromite)和斜硅钙石(larnite)(Smith et al., 2018)、铁方镁石+镁硅钙钛矿,以及似榴辉岩型矿物组合、斯石英、碳酸岩型矿物组合等(Stachel,2001; Bulanova et al.,2010; Kaminsky,2012);南非 Monastery 和委内瑞拉 Guaniamo 金伯利岩型金刚石发现了可能来自核幔边界D”层的矿物组合:(1)方铁矿(wüstite)+方镁石(periclase)和(2)铁的碳化物(ironcarbide)+自然铁矿物组合(Kaminsky,2012; 连东洋等,2018)。中国山东蒙阴和辽宁复县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、铬尖晶石、透辉石、石榴石、石盐、自然铁、硫化物等矿物,主体为P型,仅有少数矿物显示E型包裹体的化学特征(Wang et al.,1998; 殷莉,2008)。除P、E型包裹体外,陆琦等(2011,2012)在瓦房店金刚石中发现有碳化钛(TiC)、超硅石榴石和钙钛矿等高压-超高压矿物,指示一部分金刚石可能来源于华北克拉通的软流圈甚至地幔过渡带。

硫化物包裹体常用于示踪金刚石生长、地幔熔融、俯冲物质加入和地球内部物质循环等过程(Kemppinen et al., 2018)。金刚石中贱金属硫化物(Base metal sulphide, BMS)包裹体是认识地幔中亲铜和亲铁元素组成的独特样品,它比地幔捕虏体、造山带和蛇绿岩地幔橄榄岩能更好的认识地幔的微量元素、Re-Os 和 S 同位素组成。P型和E型金刚石的BMS包裹体成分明显不同(如前者Ni含量明显高于后者),P型金刚石具有较高的PGE含量(尤其Os, Ir, Ru)和Te、As元素含量(Mcdonald et al., 2017)。金刚石包裹体如硫化物Re-Os同位素年龄和硅酸盐(如石榴石和单斜辉石)Sm-Nd等时线年龄可以确定金刚石形成的时代,结果显示同一个矿区普遍存在多期年龄的金刚石(Gress et al.,2018),例如朱瓦能E型金刚石硅酸盐Sm-Nd等时线上下交代年龄分别为(1540±20) Ma和1 Ga,硫化物的Re-Os等时线上下交点年龄为2.9 Ga和1.5 Ga(Thomassot et al.,2009)。此外,石榴石和单斜辉石包裹体的Rb-Sr、Sm-Nd、氧同位素组成也能够鉴别俯冲沉积物和亏损或富集地幔源区(Timmerman

et al.,2017),比如博茨瓦纳奥拉帕和莱特拉卡内具有多期生长环带的单晶金刚石( $\delta^{13}\text{C}$ 值为-5.0‰~-33.6‰)与地幔中多源含碳流体有关,其辉石和石榴石包裹体的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值(0.7033~0.7097)亦反映了俯冲的生物沉积物、俯冲的富集碳沉积物和亏损地幔三个源区端元(Timmerman et al.,2017)。

SCLM内的钻石生长与大陆裂解和聚合及地幔柱活动等大规模岩浆活动之间存在潜在耦合关系(Richardson et al.,2004),这些构造热事件过程中结晶的金刚石常含有C-H-O-S富集的超临界流体和硅酸盐熔体以及少量记录构造环境变化的矿物(Koornneef et al.,2017)。如南非威尼西亚(Venetia)2.95 Ga方辉橄榄岩型金刚石具有低CaO、低HREE和“正弦型”REE配分模式的石榴石包裹体,其成因与低温很低Ca、Fe、Ti和Al流体为主的交代作用有关,指示一种异常亏损的地幔残留特征。此外该类金刚石的 $\delta^{13}\text{C}$ 值(-7.1±2.7‰)与石榴石CaO含量正相关,而含钙石榴石的金刚石一般具有较低的碳同位素含量,反之亦然。这种石榴石没有典型俯冲特征(Nb/La>1),因此该金刚石不可能与再循环有机碳有关,而形成于相对少量的超临界还原流体( $\text{CH}_4$ )发生Raleigh型分离结晶导致同位素分离至更低的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,这种P型金刚石记录了津巴布韦克拉通南缘裂解过程中以温度相对较低的流体促使太古宙金刚石结晶。(1.15±0.11) Ga金刚石的石榴石包裹体的CaO、FeO和REE含量较高,指示中等富集C-H-O-LREE的流体交代了亏损的SCLM。这种类型的交代作用通常与源自软流圈高温( $T>1190^\circ\text{C}$ )硅酸盐熔体交代作用形成二辉橄榄岩型石榴石有关(Koornneef et al.,2017)。结合金刚石的 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值为(-4.6‰)类似于软流圈值,该类金刚石生长记录了约1.1 Ga乌肯多(Umkondo)大火成岩省有关的流体交代津巴布韦克拉通的亏损地幔(Koornneef et al.,2017)。类似的实例还有朱瓦能3.2 Ga(硫化物的Re-Os等时线年龄,下同)方辉橄榄岩型金刚石的形成与西部卡普瓦尔陆核的形成有关,2.9 Ga和1.5 Ga E型金刚石生长分别与东、西卡普瓦尔克拉通聚合以及克拉通的后期改造相一致(Richardson et al.,2004)。

#### 4.7 金刚石碳、氮同位素和氮含量

金刚石的碳、氮同位素和氮含量可以为金刚石

物质来源、生长过程和成因提供重要的信息(Shirey et al.,2013;Cartigny et al.,2014;连东洋等,2018)。如奥拉帕 A/K1 矿区的黄色具有环带构造的 E 型金刚石,核部为黄色,边部为无色。单斜辉石-石榴石矿物对包裹体获得金刚石形成的压力和温度分别为 5 Gpa 和 1080~1160℃(Deines et al.,2004;Timmerman et al.,2018)。氮含量较低(普遍  $< 50 \times 10^{-6}$ ),为未聚合的单原子氮;核部  $\delta^{13}\text{C}$  值介于  $-2.9\text{‰} \sim -10.6\text{‰}$  之间,边部  $\delta^{13}\text{C}$  值位于  $-6.6\text{‰} \sim -10.5\text{‰}$  之间(Timmerman et al.,2018),核边不同的碳同位素值指示金刚石经历了多阶段生长,边部较窄的  $\delta^{13}\text{C}$  值可能是亏损地幔和俯冲沉积物混合的结果(Timmerman et al.,2018)。

Shirey et al.(2013)、Cartigny et al.(2014)和连东洋等(2018)等国内外学者系统综述了不同类型金刚石的碳、氮同位素及氮含量,发现全球金刚石的  $\delta^{13}\text{C}$  值范围极广( $-41\text{‰}$ 和 $+5\text{‰}$ ),接近于沉积岩的范围,其中超过 72%的金刚石的  $\delta^{13}\text{C}$  值介于  $-8\text{‰} \sim -2\text{‰}$ ,与源自下地幔金刚石( $-8.5\text{‰} \sim -0.5\text{‰}$ )、纤维型/复合型(fibrous/coated,  $-8.1\text{‰}$ 和 $-4.9\text{‰}$ )的  $\delta^{13}\text{C}$  值基本重合,并在  $(-5 \pm 1)\text{‰}$  的位置出现峰值,与洋中脊玄武岩、洋岛、碳酸岩、金伯利岩等幔源岩石  $\delta^{13}\text{C}$  值类似(Cartigny et al.,2014)。他们还发现不同生长环境下金刚石的  $\delta^{13}\text{C}$  值差异显著:P 型金刚石的  $\delta^{13}\text{C}$  值介于  $-26.4\text{‰} \sim +0.2\text{‰}$ ,而 E 型金刚石的  $\delta^{13}\text{C}$  值介于  $-41.3\text{‰} \sim +2.7\text{‰}$ ,过渡带和下地幔的 E 型金刚石的  $\delta^{13}\text{C}$  值  $< -10\text{‰}$ ,形成于超高压俯冲变质岩中金刚石的  $\delta^{13}\text{C}$  值介于  $-30\text{‰} \sim -3\text{‰}$ ,发现于中非和巴西沉积物中的黑金刚石(carbonado,由金刚石、石墨和无定形碳组成的多晶金刚石)的  $\delta^{13}\text{C}$  值介于  $-32\text{‰}$ 和 $-5\text{‰}$ (Shirey et al.,2013),不同类型陨石中的金刚石  $\delta^{13}\text{C}$  值介于  $-38.8\text{‰} \sim -32.5\text{‰}$ (Russell et al.,1996),蛇绿岩型金刚石的  $\delta^{13}\text{C}$  值介于  $-28.4\text{‰} \sim -18.0\text{‰}$ (Lian et al.,2018;连东洋等,2018)。俯冲带沉积物和地表碳酸盐矿物的  $\delta^{13}\text{C}$  值平均值分别为  $-25\text{‰}$ 和 $0$ (Cartigny et al.,2014)。此外相同矿体中相同成因的金刚石,含硫化物包裹体的与含硅酸盐的金刚石碳同位素亦不同(Cartigny et al.,2014)。一般认为 P 型、地幔过渡带和下地幔金刚石的碳来自地幔,而 E 型、超高压变质型和蛇绿岩型金刚石的碳源自俯冲沉积物。但不同类型金刚石的碳源鉴别还存在着争

论,比如 Cartigny et al.(2001)认为在开放系统瑞利(Rayleigh)条件下或铁碳化物还原条件下,碳同位素在地幔中会发生显著分馏,那么仅根据金刚石的碳同位素不一定能确定其碳的来源(Cartigny et al.,2001)。此外,碳作为太阳系中含量第四高的元素,碳同位素的分布,特别是在地核中的分布,在很大程度上仍是未知的(Satish-Kumar et al.,2011)。除铁、镍元素外,地核还含有地球上大部分的铬和钒、硫、磷和碳元素(McDonough,2013),那么在地幔柱活动异常活跃的地球早期,地核可能是形成金刚石的重要碳源之一。

俯冲带是壳幔碳循环的关键部位,地表有机碳的俯冲不仅影响了地球深部金刚石的生长,还与古元古代地球大气中氧含量升高密切相关(Duncan et al.,2017)。许多古老金刚石及其榴辉质包裹体的碳同位素组分显示板片俯冲作用最早开始于 3.0~3.5 Ga,有机碳俯冲至深部地幔是导致 2.2~2.5 Ga 大气氧含量上升的主要原因(Duncan et al.,2017)。Duncan et al.(2017)以碳酸盐、地幔橄榄岩、有机碳( $\delta^{13}\text{C}$  平均值分别为  $0$ 、 $-5\text{‰}$ 和 $-25\text{‰}$ )作为碳源的三个端元,并假设初始源区只有少量  $\delta^{13}\text{C}$  分离结晶,模拟得出  $\delta^{13}\text{C}$  值小于  $-11\text{‰}$  的金刚石可能来自循环的有机物,认为碳能够在含水流体、碎屑沉积物的部分熔体中,或在板片的玄武岩/榴辉岩中从俯冲板片中释放出来。 $\text{CO}_2$  含量随着压力的增加而增加,而与温度没有明显相关性。即使在非常高的温度下,由有机碳或海底碳酸盐还原而产生的石墨碳大部分仍保留在俯冲板块中,进而有效的赋存于地幔中,从而提供了一种从地表储集层长期去除和储存还原轻质碳的机制,即通过  $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{CH}_2\text{O} + \text{O}_2$  途径,有效地从大气中吸收碳的机制,建立全球系统的俯冲循环和地幔中还原性碳的长期封存。地球早期( $> 2.5$  Ga)的俯冲一定导致了石墨化碳优先于碳酸盐的俯冲,太古宙的热俯冲过程可能没有氧化能力,甚至可能在局部降低了地幔氧含量(Duncan et al.,2017)。这些过程不仅为金刚石结晶提供了碳源,还改变了金刚石生长的氧化还原条件,进而影响金刚石中氮元素的聚集。

氮是天然金刚石中最常见的杂质元素,不同类型金刚石的氮含量差异明显(连东洋等,2018);超高压变质型金刚石氮含量范围最大,介于  $0 \sim 9600 \times 10^{-6}$  (连东



洋等,2018);纤维型/复合型金刚石具有较高的氮含量( $600\times 10^{-6}\sim 1800\times 10^{-6}$ )峰值在 $900\times 10^{-6}\sim 1200\times 10^{-6}$ ;蛇绿岩型金刚石的氮含量数据较少,介于 $7\times 10^{-6}\sim 541\times 10^{-6}$  (Lian et al.,2018);P型和E型金刚石的氮含量类似,介于 $0\sim 2100\times 10^{-6}$ ,峰值在 $0\sim 300\times 10^{-6}$ 。不同类型金刚石的氮同位素也存在差异:纤维型/复合型金刚石的 $\delta^{15}\text{N}$ 值在 $-12\text{‰}\sim 0$ ;而P型和E型金刚石分别在 $-24\text{‰}\sim +12\text{‰}$ 和 $-12\text{‰}\sim +18\text{‰}$ ;超高压变质型金刚石 $\delta^{15}\text{N}$ 值均为正值,与变质沉积物具有相似的同位素组成;蛇绿岩型金刚石 $\delta^{15}\text{N}$ 值为 $-5.6\text{‰}\sim +28.6\text{‰}$ 。总的来说,幔源型金刚石具有类似的氮同位素组成,明显区别于超高压变质型。

Mikhail et al.(2016)认为虽然地幔是氮的最大储库,但人类对氮在地幔的地球化学性质的认识是有偏差的,因为 $>90\%$ 氮的数据来自金刚石,而金刚石能在多大程度上记录流体/熔体氮的特征还不清楚。氮在金刚石中的相容性一直存在着争论,最初作为单原子氮进入金刚石晶格中的氮是高度不稳定的,以分子形式出现的氮(如 $\text{N}_2$ 或 $\text{NH}_4^+$ )在金刚石晶格中也是不相容的。那么不同种类氮在钻石形成过程中如何分解产生瞬时单原子氮的,是决定金刚石中氮丰度的因素,即氮在金刚石中的丰度主要受介质中氮参与金刚石生长的程度决定,意味着介质中氮的浓度对金刚石的氮含量不是主要影响因素,例如当富氮介质并没有发生释放单原子氮的反应时,无氮(II型)金刚石可以从富氮的介质中生长,相反含氮(I型)金刚石可以从含氮量较低的流体中生长(Mikhail et al.,2016)。总的来说,促使介质发生释放氮的反应条件主要包括氮的摩尔丰度、压力、温度、生长速率和氧化还原、酸碱度等。金刚石的平均氮丰度普遍随深度的增加而降低,这可能反映了随着深度(温度、压力)的增加,氮在其他矿物相中随着深度的增加而更加相容。快速不平衡生长过程中常形成富氮金刚石,其N/C比接近于流体或熔体;相比之下,在接近平衡缓慢生长条件下,无论生长介质中氮的含量如何,只可能形成II型金刚石。金刚石中氮含量最大的影响因素是氧逸度和酸碱度。在还原条件下硫化物普遍存在可能会抑制氮化物的形成。当氧化/还原和酸/碱条件发生变化时,地幔中 $\text{N}_2$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{CO}_2$ 或 $\text{CH}_4$ 可能分解成单原子氮进入金刚石晶格中。

#### 4.8 寻找金伯利岩的标型特征

寻找金伯利岩的指示矿物一般为抗物理化学风化强、比重大的矿物,主要包括锆石、铬尖晶石、钛铁矿、镁铝榴石、铬透辉石以及少量橄榄石、金云母、顽火辉石/古铜辉石、钾锰闪石/镁红闪石等,其中石榴石、钛铁矿和铬尖晶石的二次物理磨损或化学风化形态特征能够进一步评估距离初始源区的距离,是最有效的指示矿物(Venter,1998)。董振信(1991)和包淑华(2013)等学者系统总结了金伯利岩产状、结构构造和矿物组成与含矿性的关系,认为岩管状金伯利岩金刚石含矿性较好,而岩脉状岩体很少含金刚石;具斑状结构、块状构造的金伯利岩含金刚石较富,而微斑状及碎屑结构的金伯利岩含金刚石较贫;粗斑或多斑状结构的金伯利岩和富含高温、高压矿物的岩体,一般金刚石含矿性强,否则含矿性较差;在碎屑结构的金伯利岩中,含同源碎屑多的金伯利岩金刚石较富,含异源碎屑较多的含金刚石较贫;斑晶中橄榄石(或假象)颗粒越粗、总含量越高,金刚石就较富,反之就较贫;含铬尖晶石、铬镁铝榴石、硅灰石越多,金刚石就越富;金云母不是影响金刚石含量的重要因素;锐钛矿的含量则与金刚石含量呈负相关,这与金刚石中元素钛和金刚石含量关系呈反比的规律是一致的(包淑华,2013)。

金红石能够直接确定金伯利岩的侵位年龄和物源研究,揭示幔源碱性岩浆岩的存在和含矿性(Malkovets et al.,2016)。金红石是金伯利岩中常见的重矿物,其寄主岩石和赋存矿物包括广泛的地壳岩石、地幔捕虏晶、捕虏体(榴辉岩、辉石岩、MARID组合、交代地幔橄榄岩、金红石巨晶、金刚石包裹体、金刚石共生)等。金红石中Pb封闭温度 $600\sim 640^\circ\text{C}$ ,其U-Pb年龄可以指示金伯利岩的侵位时代。克拉通地幔交代岩石中金红石的 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 含量变化较大( $0.64\%\sim 9.75\%$ ),地壳岩石中金红石的 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 含量最低( $<0.4\%$ ),克拉通边缘(off-craton)碱性玄武岩中交代尖晶石地幔橄榄岩捕虏体中金红石的 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 含量位于两者之间。幔源碱性岩浆岩(金伯利岩、碳酸岩、钾镁煌斑岩、煌斑岩等)中富铬金红石通常与交代的幔源原生岩有关。通常,Cr含量 $<1000\times 10^{-6}$ 指示源自变泥质源区,而Cr含量 $>1000\times 10^{-6}$ 指示源自基性源区,而源自交代地幔捕虏体和

捕虏晶的金红石的 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 可达9.75%。高Cr含量的金红石被解释为继承自原本亏损的克拉通地幔,而Ti、Fe、Nb等不相容元素则被交代流体/熔体带入。金红石中 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 含量高于1.7%被归为地幔克拉通,而小于1.7%可能源自克拉通边缘和克拉通地壳和地幔源区。因此,富Cr金红石可作为寻找含金刚石金伯利岩一种潜在的指示矿物(Malkovets et al., 2016)。

地球物理异常是覆盖区寻找金伯利岩的重要标志,由于金伯利岩体所处地质环境的特殊性,各物化探方法的效果是不一致的,重力、磁法、常规电法、大地电磁法等综合地球物理方法对寻找金刚石原生矿有互补作用(张建太,2017)。博茨瓦纳早期金伯利岩型金刚石矿的发现绝大多数是通过土壤取样分析石榴石、镁钛铁矿、单斜辉石等指示矿物获得的(De Wit,2018)。最近60年该国使用航空磁测等地球物理方法寻找新的金伯利岩体显著增加,然而在过去的15年里,博茨瓦纳发现金伯利岩的几率亦显著下降,这是由于对土壤取样的勘探工作显著减少的结果。因此,地球物理方法应与传统找矿方法结合,尤其在弱磁性和无磁性地区寻找金伯利岩体时,传统的土壤取样分析指示矿物仍是重要方法。

## 5 结 论

(1)非洲南部和中国有经济价值的金刚石原生岩石均分布在克拉通及其周缘古元古代构造带中。博茨瓦纳含矿原生岩石仅为金伯利岩,与卡普瓦尔和津巴布韦克拉通密切相关。该国目前共发现12个金伯利岩区,其中4个岩区的8个矿在开采,分别是奥拉帕(A/K1)、莱特拉卡内(D/K1)、朱瓦能(DK2)、丹姆沙(B/K9、B/K12)、勒雷拉(K002~K006)、B/K11、卡罗韦(A/K6)和Ghaghoo。中国含矿原生岩石分布复杂,金伯利岩主要分布在华北克拉通的郯庐、华北中央和华北北缘金伯利岩带,仅蒙阴和瓦房店具有工业价值,分布于郯庐金伯利岩带中;钾镁煌斑岩主要出露在华南克拉通,重点分布于江南和华南北缘钾镁煌斑岩带中;塔里木陆块研究程度较低,仅皮山县发现少量钾镁煌斑岩脉。郯庐金伯利岩带、江南钾镁煌斑岩带和塔里木陆块是中国含金刚石原生岩石重要的找矿区。

(2)根据来源深度,金伯利岩型金刚石被分为

岩石圈型和超深型,其中99%的含包裹体金刚石为岩石圈型,分布于克拉通下150~250 km范围内。超深型可以来自于软流圈、地幔过渡带、下地幔甚至核幔边界。奥拉帕A/K1和朱瓦能DK2金伯利岩体是世界上为数不多的主要产出榴辉岩捕虏体和E型金刚石的岩筒之一,而同位于奥拉帕岩群的莱特拉卡内、丹姆沙和卡罗韦岩体与中国郯庐带的金伯利岩体类似,均主要产出地幔橄榄岩捕虏体以及P型和E型金刚石。

(3)钙钛矿是金伯利岩浆结晶的产物,其U-Pb定年和Sr、Nd和Hf同位素可以有效限定金伯利岩的时代和成因。238 Ma朱瓦能、86~97 Ma奥拉帕岩筒群的金伯利岩与456~470 Ma蒙阴和瓦房店金伯利岩均属于I型金伯利岩,具有低 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0.703~0.705)和中等 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(-0.09~+5),指示金伯利岩浆源自弱亏损深部地幔或初始地幔源区。博茨瓦纳金伯利岩形成于三叠-白垩纪,相比之下,中国含矿金伯利岩形成较早,被中奥陶世以来地层覆盖,因此隐伏矿床是中国重要的找矿方向。

(4)金伯利岩侵位受克拉通相关的深大断裂控制,因此克拉通内部和周缘深大断裂带是寻找含金伯利岩重要的控岩构造要素。石榴石、镁钛铁矿、铬透辉石、铬尖晶石和铬金红石等是寻找含金刚石金伯利岩重要的指示矿物。航磁等地球物理找矿方法需与土壤取样分析指示矿物方法相结合才能取得更好的找矿效果。

(5)一般来说从金伯利岩筒的火山口相、火山通道相至根部相金刚石的品位逐渐降低。博茨瓦纳金伯利岩筒绝大部分为火山口相,而中国蒙阴和瓦房店等金伯利岩筒均为根部相,表明后者经历了强烈的剥蚀,这可能是中国金伯利岩型金刚石资源“匮乏”的重要原因之一。金伯利岩筒的强烈剥蚀作用对冲积型矿床的形成有利,暗示中国具有冲积型金刚石矿床的巨大找矿潜力。

(6)金伯利岩和金刚石是人类认识地球深部(地幔和地核)性质和组成、壳幔和核幔物质循环以及古环境变化等科学问题的重要研究对象。博茨瓦纳和中国金刚石均记录了至少3~4次生长过程,然而金伯利岩初始岩浆的组成、来源和演化等,金刚石碳源和成因(流体结晶还是固态相变),氮硼等元素进入金刚石的机制,多源包裹体对金刚石生长

的影响,超深型金刚石中核幔物质的来源和演化等问题存在争议或没有解决。中国在上述方面的研究起步较晚,目前还处于学步和跟跑阶段,亟需开展进一步研究。

**致谢:**论文撰写过程中许志琴院士予以指导,牛晓露副研究员和冯光英副研究员给予华北克拉通和东北陆块构造演化方面的建议,中国地质大学(武汉)吴魏伟博士在金刚石成因方面给予帮助,李观龙和卢雨潇帮助查找材料,两位评审专家提出了宝贵的建议,在此一并表示诚挚地感谢。

## 注释

- ① <http://www.debswana.com/>
- ② [https://en.wikipedia.org/wiki/Letlhakane\\_diamond\\_mine](https://en.wikipedia.org/wiki/Letlhakane_diamond_mine); [www.debswana.com/Operations/Pages/Letlhakane-Mine.aspx](http://www.debswana.com/Operations/Pages/Letlhakane-Mine.aspx)
- ③ <http://www.debswana.com/Operations/Pages/Damtshaa-Mine.aspx>
- ④ <https://www.lucaradiamond.com/>
- ⑤ <https://www.lucaradiamond.com/mine-operations-and-exploration/karowe-mine-summary>
- ⑥ <http://www.debswana.com/operations/pages/jwaneng-mine.aspx>

## References

- Agashev A M, Ionov D A, Pokhilenko N P, Golovin A V, Cherepanova Y, Sharygin I S. 2013. Metasomatism in lithospheric mantle roots: Constraints from whole-rock and mineral chemical composition of deformed peridotite xenoliths from kimberlite pipe Udachnaya[J]. *Lithos*, 160-161(1):201-215.
- Aulbach S, Jacob D E, Cartigny P, Stern R A, Simonetti S S, Wörner G, Viljoen K S. 2017. Eclogite xenoliths from Orapa: Ocean crust recycling, mantle metasomatism and carbon cycling at the western Zimbabwe craton margin[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 213:574-592.
- Bao Peisheng, Su Li, Zhai Qingguo, Xiao Xuchang. 2009. Compositions of the kimberlitic brecciated peridotite in the Bachu area, Xijiang and its ore-bearing potentialities[J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(9):1276-1301(in Chinese with English abstract).
- Bao Shuhua. 2013. Study on the relationship between kimberlite and diamond in Wafangdian area[J]. *Science and Technology Communication*, 10:166-168(in Chinese).
- Brook M C. 2017. Botswana's Diamonds Prospecting to Jewellery[M]. Longpack Co., Ltd.
- Brown R J, Gernon T, Stiefenhofer J, Field M. 2008. Geological constraints on the eruption of the Jwaneng Centre kimberlite pipe, Botswana[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 174(1/3):195-208.
- Bulanova G P, Walter M J, Smith C B, Kohn S C, Armstrong L S, Blundy J, Gobbo L. 2010. Mineral inclusions in sublithospheric diamonds from Collier 4 kimberlite pipe, Juina, Brazil: Subducted protoliths, carbonated melts and primary kimberlite magmatism[J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 160(4):489-510.
- Burgess R, Turner G, Harris J W. 1992. <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar laser probe studies of clinopyroxene inclusions in eclogitic diamonds[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56(1):389-402.
- Buse B, Sparks R S J, Field M, Schumacher J C, Chisi K, Tlhaodi T. 2011. Geology of the BK9 kimberlite (Damtshaa, Botswana): implications for the formation of dark volcanoclastic kimberlite[J]. *Bulletin of Volcanology*, 73(8):1029-1045.
- Cai Yitao, Zhang Jie, Dong Zhongdou, Cao Zhengqi, Xiao Shuyue, Li Shuai, Li Chenkai, Chen Lezhu, Fan Feipeng. 2018. Neoproterozoic basic magmatism in the north of Anhui Province: Evidence from whole-rock geochemistry and U-Pb geochronology of Diabase in Langan area[J]. *Geology in China*, 45(2):351-366 (in Chinese with English abstract).
- Campbell J A, Jooste V. 2017. The AK6 kimberlite Discovery through to production-learning the lessons of history[C]. 11th International Kimberlite Conference:1-16.
- Cartigny P, Harris J W, Javoy M. 2001. Diamond genesis, mantle fractionations and mantle nitrogen content: a study of  $\delta^{13}\text{C}$ -N concentrations in diamonds[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 185:85-98.
- Cartigny P, Palot M, Thomassot E, Harris J W. 2014. Diamond formation: A stable isotope perspective[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 42(1):699-732.
- Chi Jishang, Lu Fengxiang. 1996a. The kimberlite in the North China Craton and Characteristics of the Paleozoic Lithosphere Mantle[M]. Beijing: Science Press, 1-292 (in Chinese).
- Chi Jishang, Lu Fengxiang, Liu Yongshun, Hu Shijie, Zhao Zonghe, Ye Delong, Zheng Jianping, Zhao Lei, Zhang Hongfu, Jiang Wan. 1996b. Study on the Metallogenic Geological Conditions of Primary Diamond in China[M]. China University of Geosciences Press, 1-138 (in Chinese with English abstract).
- Chinn I L, Krug M A, Minnie W P, Rikhotso C T. 2010. Decoding the diamonds from AK6 kimberlite[J]. *The Southern African Institute of Mining and Metallurgy Diamonds - Source to Use*.
- Chinn I L, Perritt S H, Stiefenhofer J, Stern R A. 2018. Diamonds from Orapa Mine show a clear subduction signature in SIMS stable isotope data[J]. *Mineralogy and Petrology*, 112(Supp.):197-207.
- Comprehensive Geological Team of Hebei Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources. 1988. Evaluation of Kimberlite Complex and Survey Report of Diamond of Zhanghe-Shahe River System in Shexian, Hebei Province[R]. (in Chinese).
- Creus P K, Basson I J, Stoch B, Mogorosi O, Gabanakgosi K, Ramsden F, Gaegopolwe P. 2018. Structural analysis and implicit

- 3D modelling of Jwaneng Mine: Insights into deformation of the Transvaal Supergroup in SE Botswana[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 137:9–21.
- Davis G L. 1977. The ages and uranium contents of zircons from kimberlites and associated rocks[J]. Second International Conference.
- De Wit M C J. 2018. Prospecting history leading to the discovery of Botswana's diamond mines: from artefacts to Lesedi La Rona[J]. *Mineralogy & Petrology*:1–16.
- De Wit M J, de Ronde C E J, Tredoux M, Roering C, Hart R J, Armstrong R A, Green R W E, Peberdy E, Hart R A. 1992. Formation of an Archaean continent[J]. *Nature*, 357(6379):553–562.
- De Wit M J, Ronde C E J D, Tredoux M, Roering C, Hart R J, Armstrong R A, Green R W E, Peberdy E, Hart R A. 1992. Formation of an Archaean continent[J]. *Nature*, 357(6379):553–562.
- 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[J]. *Episodes*, 39(2):198.
- Deines P, Stachel T, Harris J W. 2009. Systematic regional variations in diamond carbon isotopic composition and inclusion chemistry beneath the Orapa kimberlite cluster, in Botswana[J]. *Lithos*, 112: 776–784.
- Deines P, Harris J W. 2004. New insights into the occurrence of  $^{13}\text{C}$ -depleted carbon in the mantle from two closely associated kimberlites: Letlhakane and Orapa, Botswana[J]. *Lithos*, 77(1): 125–142.
- Dobbs P N, Duncan D J, Hu S, Shee S R, Colgan E A, Brown M A, Smith C B, Allsopp H L. 1994. The geology of the Mengyin kimberlites, Shandong, China[C]//Meyer H O A, Leonardos O H (eds.). Fifth International Kimberlite Conference, Vol. 1. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, Araxa:40–61.
- Dong Zhenxin. 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).
- Duncan M S, Dasgupta R. 2017. Rise of Earth's atmospheric oxygen controlled by efficient subduction of organic carbon[J]. *Nature Geoscience*, 10(5):387–392.
- Eglinton B M. 2006. Evolution of the Namaqua–Natal Belt, southern Africa – A geochronological and isotope geochemical review[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 46(1):93–111.
- Field M, Stiefenhofer J, Robey J, Kurszlaukis S. 2008. Kimberlite-hosted diamond deposits of southern Africa: A review[J]. *Ore Geology Reviews*, 34(1/2):33–75.
- Gernon T M, Field M, Sparks R. 2009. Depositional processes in a kimberlite crater: the Upper Cretaceous Orapa South Pipe (Botswana)[J]. *Sedimentology*, 56:623–643.
- Gress M U, Howell D, Chinn I L, Speich L, Kohn S C, van den Heuvel Q, Schulten E, Pals A S M, Davies G R. 2018. Episodic diamond growth beneath the Kaapvaal Craton at Jwaneng Mine, Botswana[J]. *Mineralogy and Petrology*, 112(Supp.1):219–229. DOI: 10.1007/s00710-018-0582-y.
- Gress M U, Pearson D G, Timmerman S, Chinn I L, Koornneef J M, Davies G R. 2017. Diamond growth beneath Letlhakane established by Re–Os and Sm–Nd systematics of individual eclogitic sulphide, garnet and clinopyroxene inclusions[C]. EGU General Assembly Conference, 19:5540.
- Griffin W L, Batumike J M, Greau Y, Pearson N J, Shee S R, O'Reilly S Y. 2014. Emplacement ages and sources of kimberlites and related rocks in southern Africa: U–Pb ages and Sr–Nd isotopes of groundmass perovskite[J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 168(1):1032.
- Griffin W L, O'Reilly S Y, Natapov L M, Ryan C G. 2003. The evolution of lithospheric mantle beneath the Kalahari Craton and its margins[J]. *Lithos*, 71(2/4):215–241.
- Haggerty S E, Raber E, Naeser C W. 1983. Fission track dating of kimberlitic zircons[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 63(1): 41–50.
- Harte B. 2010. Diamond formation in the deep mantle: The record of mineral inclusions and their distribution in relation to mantle dehydration zones[J]. *Mineralogical Magazine*, 74(2):189–215.
- Hastie W W, Watkeys M K, Aubourg C. 2014. Magma flow in dyke swarms of the Karoo LIP: Implications for the mantle plume hypothesis[J]. *Gondwana Research*, 25(2):736–755.
- Heaman L M, Kjarsgaard B A, Creaser R A. 2003. The timing of kimberlite magmatism in North America: Implications for global kimberlite genesis and diamond exploration[J]. *Lithos*, 71(2):153–184.
- Hou Guangshun, Xiang Shihong, Qi Yong'an, Zhi Fengqi, Wang Mingguo, Zhou Xue, Lin Liu, Li Ming, Wu Chengbin. 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).
- Huang Yunhui, Qin Shuying, Zhou Xiuzhong, Deng Chujun, Zhao Donggao, Yang Jianmin, Guo Yuemin, Li Gejing, Gao Yan. 1992. North China Craton Kimberlite and Diamond[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–198 (in Chinese with English abstract).
- Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences. 1970. Geological Survey Report of No.1, Longtoushan Kimberlite Complex, Siziwangqi, Inner Mongolia[R] (in Chinese).
- Jacob D E. 2004. Nature and origin of eclogite xenoliths from kimberlites[J]. *Lithos*, 77(1/4):295–316.
- Jacobs J, Pisarevsky S, Thomas R J, Becker T. 2008. The Kalahari Craton during the assembly and dispersal of Rodinia[J]. *Precambrian Research*, 160(1):142–158.
- Kaminsky F. 2012. Mineralogy of the lower mantle: A review of 'super-deep' mineral inclusions in diamond[J]. *Earth–Science*

- Reviews, 110(1):127–147.
- Kemppinen L I, Kohn S C, Parkinson I J, Bulanova G P, Howell D, Smith C B. 2018. Identification of molybdenite in diamond-hosted sulphide inclusions: Implications for Re–Os radiometric dating[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 495:101–111.
- Kinabo B D, Hogan J P, Atekwana E A, Abdelsalam M G, Modisi M P. 2008. Fault growth and propagation during incipient continental rifting: Insights from a combined aeromagnetic and Shuttle Radar Topography Mission digital elevation model investigation of the Okavango Rift Zone, northwest Botswana[J]. *Tectonics*, 27(3):DOI: 10.1029/2007tc002154.
- Kinny P D, Compston W, Bristow J W, Williams I S. 1989. Archaean mantle xenocrysts in a Permian kimberlite: Two generations of kimberlitic zircon in Jwaneng DK2, southern Botswana[C]// *Kimberlites and Related Rocks*, vol. 14. Geological Society of Australia, 2:833–842.
- Koornneef J M, Gress M U, Chinn I L, Jelsma H A, Harris J W, Davies G R. 2017. Archaean and Proterozoic diamond growth from contrasting styles of large-scale magmatism[J]. *Nature Communications*, 8(1):648.
- Kruger K, Maphane K. 2017. Orapa, Letlhakane and Damshaa Mines Field Guide[C]//11th International Kimberlite Conference Field Trip Guide.
- Kusky T M. 1998. Tectonic setting and terrane accretion of the Archean Zimbabwe craton[J]. *Geology*, 26(26):163–166.
- Lei Xueying. 2017. The Review of Kimberlite[J]. *Journal of the Graduates Sun Yat–Sen University (Natural Science, Medicine)*, 38(1):41–51(in Chinese with English abstract).
- Li Xuan. 2012. Age of the Kimberlitic Explosive Breccia in the Bachu Area, Xinjiang and Its Diagenetic Mechanism Research[D]. China University of Geosciences (Beijing):1–55 (in Chinese with English abstract).
- Lian Dongyang, Yang Jingsui, Wiedenbeck M, Dilek Y, Rocholl A, Wu Weiwei. 2018. Carbon and nitrogen isotope, and mineral inclusion studies on the diamonds from the Pozanti–Karsanti chromitite, Turkey[J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 173(9):72.
- Lian Dongyang, Yang Jingsui, Liu Fei, Wu Weiwei. 2018. Diamond classification, compositional characteristics, and research progress: A review [J]. *Earth Science*, 1–72 (in Chinese with English abstract).
- Liang Rixuan, Fang Qingsong. 1992. Geological conditions for the formation of diamond deposits and direction in diamond prospecting in the Tarim platform[J]. *Regional Geology of China*, (2):161–166(in Chinese with English abstract).
- Lin Weipeng. 2007. Studies on the Zircon Mineralogy and Geochronology in the Lamproites and Heavy-sand of Related Rocks from Ningxiang, Hunan[D]. Sun Yat–Sen University: 1–59 (in Chinese with English abstract).
- Lin Zongman. 2011. Characteristics of Tancheng–Lujiang fault and its role on basin controlling[J]. *Journal of Geomechanics*, 17(4) :322–337(in Chinese with English abstract).
- Liu Jitai. 2002. Study on Primary diamond ore-forming future in Shandong Province[J]. *Shandong Geology*, 18(3):100–104(in Chinese with English abstract).
- Liu Zhina, Xu Hong, Wang Qiushu, Chen Mei. 2016. Global diamond resources distribution and suggestions of exploitation for China's mining corporation[J]. *China Mining Magazine*, (7):5–10(in Chinese with English abstract).
- Lu Fengxiang, Han Zhuguo, Zheng Jianping, Ren Yingxin. 1991. Characteristics of Paleozoic lithospheric mantle in Fuxian County Liaoning Province[J]. *Geological Science and Technology Information*, 10(2):20(in Chinese with English abstract).
- Lu Fengxiang, Wang Ying, Chen Meihua, Zheng Jianping. 1998. Geochemical characteristics and emplacement ages of the Mengyin kimberlites, Shandong Province, China[J]. *International Geology Review*, 40(11):998–1006.
- Lu Fengxiang. 2008. Kimberlite and Diamond[J]. *Chinese Journal of Nature*, (2):63–66 (in Chinese with English abstract).
- Lu Qi, Shi Nicheng, Liu Huifang, Li Guowu, Tang Zhongdao, Xiao Ping. 2011. TiC inclusion first found in diamond from Fuxian, Liaoning of China[J]. *Geological Science and Technology Information*, 30(2): 1–5 (in Chinese with English abstract).
- Lu Qi, Liu Huifang, Xiao Ping, Shi Nicheng, Li Guowu, Tang Zhongdao. 2012. Discovery and geological significance of majorite inclusion in diamond from Liaoning Province, China[J]. *Geological Science and Technology Information*, 31(5): 5–11 (in Chinese with English abstract).
- Luguet A, Behrens M, Pearson D G, König S, Herwartz D. 2015. Significance of the whole rock Re–Os ages in cryptically and modally metasomatised cratonic peridotites: Constraints from HSE–Se–Te systematics[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 164:441–463.
- Luo Huiwen, Yang Guangshu. 1989. Petrologic features of lamproite in Zhenyuan, Guizhou province[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, (2):97–109 (in Chinese with English abstract).
- Luo Shengxuan, Ren Xirong, Zhu Yuan, Chen Jichang, Guo Yaping, Wei Tonglin. 1999. *Geology of Shandong diamond*[M]. Jinan: Shandong Science and Technology Press (in Chinese with English abstract).
- Luo Zhili, Li Jingming, Li Xiaojun, Liu Shugen, Zhao Xikui, Sun Wei. 2005. Discussion on the Formation, Evolution and Problems of the Tancheng–Lujiang Fault Zone[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 35(6):699–706(in Chinese with English abstract).
- Lynn M, Nowicki D T, Valenta M, Robinson B, Gallagher M, Bolton R, Sexton J. 2014. Karowe Diamond Mine Botswana NI 43–101 Independent Technical Report (Amended)[R]. :1–155.
- Malkovets V G, Rezvukhin D I, Belousova E A, Griffin W L, Sharygin I S, Tretiakova I G, Gibsher A A, O'Reilly S Y, Kuzmin D V,

- Litasov K D. 2016. Cr-rich rutile: A powerful tool for diamond exploration[J]. *Lithos*, 265:304–311.
- Mapeo R B M, Ramokate L V, Corfu F, Davis D W, Kampunzu A B. 2006. The Okwa basement complex, western Botswana: U–Pb zircon geochronology and implications for Eburnean processes in southern Africa[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 46(3):253–262.
- Mccourt S, Armstrong R A, Grantham G H, Thomas R J. 2006. Geology and evolution of the Natal belt, South Africa[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 46(1/2):71–92.
- Mccourt S, Kampunzu A B, Bagai Z, Armstrong R A. 2004. The crustal architecture of Archaean terranes in Northeastern Botswana[J]. *South African Journal of Geology*, 107:147–158.
- Mcdonald I, Hughes H S R, Butler I B, Harris J W, Muir D. 2017. Homogenisation of sulphide inclusions within diamonds: A new approach to diamond inclusion geochemistry[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 216, 335–357.
- Mcdonough W F. 2013. Compositional Model for the Earth's Core[J]. *Treatise on Geochemistry*, 2:559–577.
- Mei Houjun, Tang Chunjing, Li Sunrong, Li Yongming, Zhang Xingchun, Lu Dengrong, Zhang Lianchang. 1998. Genesis of diamond deposits of Lamproite and kimberlite in China [J] *Science in China (Series D)*, 28(s2): 72–78 (in Chinese).
- Miensopust M P, Jones A G, Muller M R, Garcia X, Evans R L. 2011. Lithospheric structures and Precambrian terrane boundaries in northeastern Botswana revealed through magnetotelluric profiling as part of the Southern African Magnetotelluric Experiment[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 116(B2):1–21.
- Mikhail S, Howell D. 2016. Outlooks in Earth and Planetary Materials: Chemistry and Mineralogy of Earth's Mantle: A petrological assessment of diamond as a recorder of the mantle nitrogen cycle[J]. *American Mineralogist*, 101(4):780–787.
- Mmualefe M K. 2017. Jwaneng Diamond Mine, Botswana: History, geology and mining[J]. 11th international Kimberlite Conference Field Trip Guide:1–31.
- Modie B N. 2000. Geology and mineralisation in the Meso- to Neoproterozoic Ghanzi–Chobe belt of northwest Botswana[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 30(3):467–474.
- Moen H F G, Armstrong R A. 2008. New age constraints on the tectogenesis of the Kheis Subprovince and the evolution of the eastern Namaqua Province[J]. *South African Journal of Geology*, 111(1):79–88.
- Moore A E. 2014. The origin of large irregular gem-quality type II diamonds and the rarity of blue type IIb varieties[J]. *South African Journal of Geology*, 117(2):219–236.
- Moore A, Belousova E. 2005. Crystallization of Cr-poor and Cr-rich megacryst suites from the host kimberlite magma: implications for mantle structure and the generation of kimberlite magmas[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 149(4):462–481.
- Motsamai T, Harris J W, Stachel T, Pearson D G, Armstrong J. 2018. Mineral inclusions in diamonds from Karowe Mine, Botswana: super-deep sources for super-sized diamonds?[J]. *Mineralogy and Petrology*, 112:169–180.
- Nestola F, Korolev N, Kopylova M, Rotiroti N, Pearson D G, Pamato M G, Alvaro M, Peruzzo L, Gurney J J, Moore A E. 2018. CaSiO<sub>3</sub> perovskite in diamond indicates the recycling of oceanic crust into the lower mantle[J]. *Nature*, 555(7695):237–241.
- Niu X, Yang J, Liu F, Zhang H, Yang M. 2016. Origin of Baotoudong syenites in North China Craton: Petrological, mineralogical and geochemical evidence[J]. *Science China Earth Sciences*, 59(1):95–110.
- O'Reilly S Y, Griffin W L. 2010. The continental lithosphere–asthenosphere boundary: Can we sample it?[J]. *Lithos*, 120(1):1–13.
- Peng Yanju, Lu Linsu, Zhou Zhenhua. Distribution and Utilization of Diamond Resources in China[J]. *Journal of Gems and Gemmology*, 2013, 15(4): 1–7 (in Chinese with English abstract).
- Peng Yanju, Lu Linsu, Zhou Zhenhua. 2013. Distribution and Utilization of Diamond Resources in China[J]. *Journal of Gems and Gemmology*, 15(4): 1–7 (in Chinese with English abstract).
- Qi Yuxing, Han Zhuguo. 1998. The prospecting and exploration of diamond deposits in Liaoning[J]. *Land Resources*, (2): 111–125 (in Chinese with English abstract).
- Qiao Xiufu, Zhang Andi. 2002. North China block, Jiao–Liao–Korea block and Tanlu fault[J]. *Geology in China*, 29(4): 337–345 (in Chinese with English abstract).
- Qin Zhengyong, Lin Xiaohui. 2001. Discussion about possibility of discovered kimberlite in Hutoushan, Longyou county, Zhejiang[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, (2): 57–62 (in Chinese with English abstract).
- Rayner R J, Waters S B, McKay I J, Dobbs P N, Shaw A L. 1991. The mid-Cretaceous palaeoenvironment of central Southern Africa (Orapa, Botswana) [J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 88(1–2):147–156.
- Ren Huaixiang, Zhang Guangwen. 1993. Geological characteristics of phlogopite volcanic rocks (lamproite) in Majiang, Guizhou Province[J]. *Guizhou Geology*, (3): 189–191 (in Chinese with English abstract).
- Richardson S H, Shirey S B, Harris J W. 2004. Episodic diamond genesis at Jwaneng, Botswana, and implications for Kaapvaal craton evolution[J]. *Lithos*, 77(1):143–154.
- Russell S S, Arden J W, Pillinger C T. 1996. A carbon and nitrogen isotope study of diamond from primitive chondrites[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 31(3):343–355.
- Salters V J, Stracke A. 2004. Composition of the depleted mantle[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 5(5):1–27.
- Satish-Kumar M, So H, Yoshino T, Kato M, Hiroi Y. 2011. Experimental determination of carbon isotope fractionation

- between iron carbide melt and carbon: 12C-enriched carbon in the Earth's core?[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 310(3-4): 340-348.
- 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 C B. 1983. Pb, Sr and Nd isotopic evidence for sources of southern African Cretaceous kimberlites[J]. *Nature*, 304:51-54.
- 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.
- Song Ruixiang. 2013. Blinking diamonds—World history of diamond prospecting[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1-284 (in Chinese).
- Stachel T. 2001. Diamonds from the asthenosphere and the transition zone[J]. *European Journal of Mineralogy*, 13(5):883-892.
- Stachel T, Viljoen K S, Mcdade P, Harris J W. 2004. Diamondiferous lithospheric roots along the western margin of the Kalahari Craton—the peridotitic inclusion suite in diamonds from Orapa and Jwaneng[J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 147(1):32-47.
- Stachel T, Harris J W. 2008. The origin of cratonic diamonds — Constraints from mineral inclusions[J]. *Ore Geology Reviews*, 34 (1-2):5-32.
- Stachel T, Luth R W. 2015. Diamond formation — Where, when and how?[J]. *Lithos*, 220-223:200-220.
- Stanley J R, Flowers R M. 2016. Dating kimberlite emplacement with zircon and perovskite (U-Th)/He geochronology[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 17(11): 4517-4533.
- Shu Xiaoxin. The research of petrology of the potassic lamproites along the western border of Yangzi platform[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1994, 10(3):248-260(in Chinese with English abstract).
- Tappe S, Steenfelt A, Nielsen T. 2012. Asthenospheric source of Neoproterozoic and Mesozoic kimberlites from the North Atlantic craton, West Greenland: New high-precision U-Pb and Sr-Nd isotope data on perovskite[J]. *Chemical Geology*, 320-321(5):113-127.
- Tappert R, Stachel T, Harris J W, Muehlenbachs K, Ludwig T, Brey G P. 2005. Diamonds from Jagersfontein (South Africa): messengers from the sublithospheric mantle[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 150(5):505-522.
- Thomassot E, Cartigny P, Harris J W, Lorand J P, Rollion-Bard C, Chaussidon M. 2009. Metasomatic diamond growth: A multi-isotope study (13 C, 15 N, 33 S, 34 S) of sulphide inclusions and their host diamonds from Jwaneng (Botswana) [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 282(1):79-90.
- Tian Hongshui, Zhu Jiewang, Wang Hualin, Zhang Zengqi, Zhang Banghua, Zhang Shenhe. 2017. Spatio-temporal distribution and significance of seismic event horizon in the Yishu Fault Zone and its adjacent area[J]. *Journal of Palaeogeography*, (03): 393-417(in Chinese with English abstract).
- Timmerman S, Chinn I L, Fisher D, Davies G R. 2018. Formation of unusual yellow Orapa diamonds[J]. *Mineralogy and Petrology*, 112: 209-218.
- Timmerman S, Koornneef J M, Chinn I L, Davies G R. 2017. Dated eclogitic diamond growth zones reveal variable recycling of crustal carbon through time[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 463: 178-188.
- Tu Huaikui. 2001. Discussion of Alluvial Tyoe Placer of Diamono and It's Metallogenic model[J]. *Chemical Mineral Geology*, 23(4):239-244(in Chinese with English abstract).
- Van Schijndel V, Cornell D H, Hoffmann K H, Frei D. 2011. Three episodes of crustal development in the Rehoboth Province, Namibia[J]. *Measurement Techniques*, 33(2):164-167.
- Venter L J. 1998. A Review of Southern African Kimberlites and Exploration Techniques[D]. Department of Geology, Rhodes University.
- Wainwright A N, Luguët A, Fonseca R O C, Pearson D G. 2015. Investigating metasomatic effects on the 187Os isotopic signature: A case study on micrometric base metal sulphides in metasomatised peridotite from the Letlhakane kimberlite (Botswana)[J]. *Lithos*, 232:35-48.
- Wang Jiu-hua. 2012. Distribution Pattern and Crystallography Feature of Diamond Resource in Shandong Province[J]. *Shanghai Land and Resources*, 32(4):43-48(in Chinese with English abstract).
- Wang W, Takahashi E, Sueno S. 1998. Geochemical properties of lithospheric mantle beneath the Sino-Korea craton; evidence from garnet xenocrysts and diamond inclusions[J]. *Physics of the Earth & Planetary Interiors*, 107(1-3):249-260.
- Wang Xinyu, Peng Songbo, Wu Xiangke, Lu Gang. 2013. Discovery lamproite and its prospecting significance in Northern part of Guizhou[J]. *Geological Science and Tecnology Information*, (3) :93 (in Chinese with English abstract).
- Wei Yunfeng, Wang Junhu. 2015. Geochemical characteristics and geological significance of kimberlite in Jianjiagou, Liulin county[J]. *Huabei Land and Resources*, (2) :116-118(in Chinese).
- Wang Xuemu, Wang Ping, Hu Ke. 2015. The erosion depth of kimberlite and the denudation thickness of diamond in the wafangdian region of Liaoning Province[J]. *China Mining Magazine*, (S1):300-303(in Chinese with English abstract).
- Wei Yunfeng, Wang Junhu. 2015. Geochemical characteristics and geological significance of kimberlite in Jianjiagou, Liulin county[J]. *Huabei Land and Resources*, (2):116-118(in Chinese).
- Wilson M G C, McKenna N, Lynn M D. 2007. The occurrence of diamonds in South Africa[M]. Silverton, Pretoria: Council for Geoscience, 1-105.
- Wu Fuyuan, Sun Deyou. 1999. The Mesozoic magmatism and

- lithospheric thinning in Eastern China[J]. *Science China Earth Science, Journal of Changchun University of Science and Tecnology*, (4):313–318(in Chinese with English abstract).
- Wu F, Yang Y, Mitchell R H, Li Q, Yang J, Zhang Y. 2010. In situ U–Pb age determination and Nd isotopic analysis of perovskites from kimberlites in southern Africa and Somerset Island, Canada[J]. *Lithos*, 115(1/4):205–222.
- Wu Genyao, Liang Xing, Chen Huanjiang. 2007. An approach to the Tancheng–Lujiang fault zone: its creation, evolution and character[J]. *Chinese Journal of Geology*, 42(1):160–175(in Chinese with English abstract).
- Wudrick M, Pearson D G, Stachel T, Armstrong J, Woodland S J, Motosamai T. 2017. Age of the Lithospheric Mantle Beneath the Karowe Diamond Mine[C]. *11 IKC*, 4489:1–3.
- Xu Kangkang, Wang Jie, Ren Junping, Zuo Libo, Liu Xiaoyang, He Shengfei, Gong Penghui, Sun Kai, Liu Yu, He Fuqing. 2016. Metallogenic Geological Setting, Types and Characters of the Diamond Deposits in Central and Southern Africa [J]. *Geological Review*, (2):362–374(in Chinese with English abstract).
- Xu Jun. 2013. Deep structure of Shanxi massif and kimberlite formation: A discussion on the deep process of the stable massif in relation to diamond deposits[J]. *Geology in China*, 40(3):790–799 (in Chinese with English abstract).
- Xu Wenliang, Wang Feng, Pei Fuping, Meng En, Tang Jie, Xu Meijun, Wang Wei. 2013. Constraints from spatial and temporal variations of Mesozoic volcanic rock associations[J]. *Acta Petrologica Sinica*, (2):339–353 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xiangzhen. 2006. Assessment of Diamond Minearlization Geological Condition in Souhtwest of Hetian Aera, Xinjiang[D]. *China University of Geosciences (Beijing)*: 1–60(in Chinese with English abstract).
- Yang, Jianmin. 1995. Study on the Mineralogy and Petrology of Kimberlite and Lamprolite from the North Part of Shanxi Province, China[D]. *Chinese Academy of Geological Sciences*:1–135(in Chinese with English abstract).
- Yang Jingsui, Xu Zhiqin, Zhang Jianxin, Zhang Zeming, Liu Fulai, Wu Cailai. 2009. Tectonic setting of main high and ultrahigh pressure metamorphic belts in China and adjacent region and discussion on their subduction and exhumation mechanism[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(7):1529–1560(in Chinese with English abstract).
- Yang J, Robinson P T, Dilek Y. 2014. Diamonds in ophiolites[J]. *Elements*, 10(2):127–130.
- Yang J, Robinson P T, Dilek Y. 2015. Diamond–bearing ophiolites and their geological occurrence[J]. *Episodes*, 38(4):344–364.
- Yang Y H, Wu F Y, Wilde S A, Liu X M, Zhang Y B, Xie L W, Yang J H. 2009. In situ perovskite Sr–Nd isotopic constraints on the petrogenesis of the Ordovician Mengyin kimberlites in the North China Craton[J]. *Chemical Geology*, 264(1):24–42.
- Ye Delong, Wang Qun, Yang Jinxiang, Ren Yingxin. 1991. Kimberlite and lamproite in the Southern section of mountain Dahong in Hubei province[J]. *Geological Science and Tecnology Information*, (s1):37–44(in Chinese with English abstract).
- Ye Song, Yang Mei, Ye Delong, Tai Daoqian, Ren Yingxin. 2007. Research on kimberl itic lamprophyre pipe at Luj ing in Anyuan area, Jiangxi Province——A new type of mantle–derived alkal ine ultrabasic rock[J]. *Mineral Resources and Geology*, (04):383–394 (in Chinese with English abstract).
- Yin Li. 2008. The Characteristics and Significance of Diamond Inclusions in the North China Craton, Taking Mengyin Mine in Shandong as An Example[D]. *Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan)*:1–68.
- Zhai Mingguo. 2010. Tectonic evolution and metallogenesis of North China Craton[J]. *Mineral Deposits*, (1) : 24–36(in Chinese with English abstract).
- Zhang Fushun. 1992. Direction of diamond prospecting in Jilin Province[J]. *Jilin Geological Science and Tecnology Information*, (2):2–7(in Chinese with English abstract).
- Zhang Hongfu, Yang Yueheng. 2007. Emplacement age and Sr–Nd–Hf isotopic characteristics of the diamondiferous kimberlites from the eastern North China Craton [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(2) : 285–294 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jiantai. 2017. Discussion on the geophysical characteristics of Kimberley rocks in Mengyin area[J]. *Progress in Geophysics*, 6: 2589–2595(in Chinese with English abstract).
- Zhang Peiyuan. 1998. New knowledge of some important questions about diamond deposit genesis[J]. *Hunan Geology*, (3):67–73 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Peng, Wang Liangshu, Shi Huosheng, Li Limei, Tan Huiming. 2010. The Mesozoic–Cenozoic tectonic evolution of the Shandong Segment of the Tan–Lu fault zone[J]. *Acta Geologica Sinica*, 84(9): 1316–1323(in Chinese with English abstract).
- Zhang Xigui, Shi Rui, Wu Shouning, Li Yonggang, Lin Zeyuan. 2015. New discovery of Wengshao lamproite and its significance of diamond prospecting in Shibing, Guizhou province[J]. *Guizhou Geology*, 32(1):37–40 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Chunqiang, Zhang Zhibin, Shi Yi, Shi Shaoshan, You Hongxi, Li Jing, Zhao Jingyang. 2018. Research progress and discussion on the metallogenic background of diamond in southern Liaoning[J]. *Geology and Resources*, (2):149–159(in Chinese with English abstract).
- Zhao G, Sun M, Wilde S A, Sanzhong L. 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: key issues revisited[J]. *Precambrian Research*, 136(2):177–202.
- Zhao Guanghui, Guan Yubo, Zhao Jianjun. 2011. Characteristics of plate tectonics and division of geotectonic units in Liaoning region[J] *Geology and Resources*, 20(2):101–106(in Chinese with English abstract).
- Zhao Jianjun, Li Jing, Wang Shu, Dai Jun. 2011. The regional ore–



- controlling conditions and prediction of resources potential of the diamond concentrated district in Wafangdian, Liaoning province[J]. *Geology and Resources*, 20(1):40–44(in Chinese with English abstract).
- Zhao Lei, He Mingyue, Li Youzhi, Li Jian Zhe, Yang Wanzhi, Yuan Yingxia, Fang Xilian, Palati. 1998. Discovery of lamproite in southern margin of Tarim platform, China[J]. *Geoscience*, 1998, (4):555–558(in Chinese with English abstract).
- Zhao Xin, Shi Guanghai, Zhang Ji. 2015. Review of Lithospheric Diamonds and Their Mineral Inclusions[J]. *Advances in Earth Science*, 30(3): 310–322 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Jianping. 1989. Advances in the studies of petrogenesis of kimberlite, East Liaoning[J]. *Geological Science and Tecnology Information*, (2):8–14(in Chinese with English abstract).
- Zheng Jianping. 2009. Comparison of mantle-derived materials from different spatiotemporal settings: Implications for destructive and accretional processes of the North China Craton[J]. *Chinese Science Bulliten*, 54(14):1990–2007 (in Chinese).
- Zheng Jianping, Lu Fengxiang. 1999. Mantle xenoliths from kimberlites, Shandong and Liaoning: Paleozoic mantle character and its heterogeneity[J]. *Acta Petrologica Sinica*, (1):65–74(in Chinese with English abstract).
- Zheng J P, Griffin W L, O'Reilly S Y, Yang J S, Li T, Zhang M, Zhang R Y, Liou J G. 2006. Mineral Chemistry of Peridotites from Paleozoic, Mesozoic and Cenozoic Lithosphere: Constraints on Mantle Evolution beneath Eastern China[J]. *Journal of Petrology*, 47(11):2233–2256.
- Zheng J, O'Reilly S Y, Griffin W L, Lu F, Zhang M, Pearson N J. 2001. Relict refractory mantle beneath the eastern North China block: significance for lithosphere evolution[J]. *Lithos*, 57(1):43–66.
- Zheng Xiang, Peng Maoyuan, Hu Gui'ang, Lu Gang, Huang Xianglein. 2016. Volcano-tectonic characteristics of diamond ore prospects in Southeast Guizhou [J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 36(3):418–425(in Chinese with English abstract).
- Zheng Y, Xiao W, Zhao G. 2013. Introduction to tectonics of China[J]. *Gondwana Research*, 23(4):1189–1206.
- Zhu Rixiang, Chen Ling, Wu Fuyuan, Liu Junlai. 2011. Timing, scale and mechanism of the destruction of the North China Craton[J]. *Science China Earth Science*, (5):583–592 (in Chinese with English abstract).
- 池际尚, 路凤香. 1996a. 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, 1–292.
- 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. 1996b. 中国原生金刚石成矿地质条件研究[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 1–138.
- 董振信. 1991. 中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.
- 河北省地质矿产局综合地质大队. 1988. 河北省涉县金伯利岩体评价及漳河—沙河水系金刚石普查报告[R].
- 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.
- 黄蕴慧, 秦淑英, 周秀仲, 邓楚均, 赵东高, 杨建民, 郭月敏, 李戈晶, 高岩. 1992. 华北地台金伯利岩与金刚石[M]. 北京: 地质出版社, 1–198.
- 雷雪英. 2017. 金伯利岩研究进展综述[J]. *中山大学研究生学刊(自然科学·医学版)*, 38(1), 41–51.
- 李弦. 2012. 新疆巴楚地区金伯利质隐爆角砾岩成岩年龄及成岩机制研究[D]. 中国地质大学(北京), 1–55.
- 连东洋, 杨经绥, 刘飞, 吴魏伟. 2018. 金刚石分类、组成特征以及中国金刚石研究展望[J]. *地球科学*, 1–72.
- 梁日暄, 方青松. 1992. 塔里木地台金刚石成矿地质条件和找矿方向[J]. *地质通报*, (2):161–166.
- 林玮鹏. 2007. 湖南宁乡钾镁煌斑岩及相关岩石重砂的锆石成因矿物学研究[D]. 广州: 中山大学, 1–59.
- 林宗满. 2011. 郟城—庐江断裂基本特征及其控盆作用[J]. *地质力学学报*, 17(4):322–337.
- 刘继太. 2002. 山东金刚石原生矿找矿前景探讨[J]. *山东国土资源*, 18(3):100–104.
- 刘陟娜, 许虹, 王秋舒, 陈梅. 2016. 全球金刚石资源分布现状及中国勘查开发建议[J]. *中国矿业*, (7):5–10.
- 陆琦, 刘惠芳, 肖平, 施倪承, 李国武, 汤中道. 2012. 中国辽宁金刚石中高硅钙铁榴石(Majorite)等超高压矿物包裹体的发现及地质意义[J]. *地质科技情报*, (5):5–11.
- 陆琦, 施倪承, 刘惠芳, 李国武, 汤中道, 肖平. 2011. 中国辽宁复县金伯利岩中新发现的碳化钛矿物[J]. *地质科技情报*, 30(2):1–5.
- 路凤香. 2008. 金伯利岩与金刚石[J]. *自然杂志*, (2):63–66.
- 路凤香, 韩柱国, 郑建平, 任迎新. 1991. 辽宁复县地区古生代岩石圈地幔特征[J]. *地质科技情报*, 10(2):20.
- 罗会文, 杨光树. 1989. 贵州省镇远地区钾镁煌斑岩岩石特征[J]. *岩石矿物学杂志*, (2):97–109.
- 罗声宜, 任喜荣, 朱源, 陈积银, 郭亚平, 魏同林. 1999. 山东金刚石地质[M]. 山东科学技术出版社.
- 罗志立, 李景明, 李小军, 刘树根, 赵锡奎, 孙玮. 2005. 试论郟城—庐江断裂带形成、演化及问题[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 35(6):699–706.
- 梅厚钧, 唐春景, 李菽蓉, 李永明, 张兴春, 卢登蓉, 张连昌. 1998. 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: 地球科学*, (s2):72–78.

## 附中文参考文献

- 包淑华. 2013. 瓦房店市金伯利岩与金刚石的关系研究[J]. *科技传播*, (10):166–168.
- 鲍佩声, 苏犁, 翟庆国, 肖序常. 2009. 新疆巴楚地区金伯利质角砾橄辉岩物质组成及含矿性研究[J]. *地质学报*, 83(9):1276–1301.
- 蔡逸涛, 张洁, 董钟斗, 曹正琦, 肖书阅, 李帅, 李成凯, 陈乐柱, 范飞鹏. 2018. 皖北栏杆地区新元古代岩浆活动: 含金金刚石母岩 U–Pb 年代学及地球化学制约[J]. *中国地质*, 45(2): 351–366.

- 彭艳菊, 吕林素, 周振华. 2013. 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, 15(4):1-7.
- 齐玉兴, 韩柱国. 1998. 辽宁金刚石矿找矿与勘查[J]. 国土资源, (2): 111-125.
- 乔秀夫, 张安棣. 2002. 华北块体, 胶辽朝块体与郯庐断裂[J]. 中国地质, 29(4):337-345.
- 秦正永, 林晓辉. 2001. 浙江龙游县虎头山是否存在"金伯利岩"[J]. 华南地质与矿产, (2):57-62.
- 任怀翔, 张光文. 1993. 贵州麻江金云火山岩(钾镁煌斑岩)的地质特征[J]. 贵州地质, (3):189-191.
- 舒小辛. 1994. 扬子地台西缘钾质煌斑岩类的岩石学研究[J]. 岩石学报, 10(3):248-260.
- 宋瑞祥. 2013. 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, 1-284.
- 田洪水, 祝介旺, 王华林, 张增奇, 张邦花, 张慎河. 2017. 沂沭断裂带及其近区地震事件地层的时空分布及意义[J]. 古地理学报, (3): 393-417.
- 涂怀奎. 2001. 冲积型金刚石砂矿与其成矿模式的讨论[J]. 化工矿产地质, 23(4):239-244.
- 王久华. 2012. 山东金刚石资源分布规律与结晶学特性[J]. 上海国土资源, 32(4):43-48.
- 王新宇, 彭松柏, 吴祥珂, 陆刚. 2013. 桂北地区钾镁煌斑岩的发现及找矿意义[J]. 地质科技情报, (3):93.
- 王雪木, 王萍, 胡克. 2015. 辽宁瓦房店金伯利岩剥蚀深度与金刚石剥蚀量计算[J]. 中国矿业, (S1):300-303.
- 魏云峰, 王俊虎. 2015. 柳林县尖家沟金伯利岩地球化学特征及地质意义[J]. 华北国土资源, (2):116-118.
- 吴福元, 孙德有. 1999. 中国东部中生代岩浆作用与岩石圈减薄[J]. 长春科技大学学报, (4):313-318.
- 吴根耀, 梁兴, 陈焕疆. 2007. 试论郯城—庐江断裂带的形成、演化及其性质[J]. 地质科学, 42(1):160-175.
- 许康康, 王杰, 任军平, 左立波, 刘晓阳, 何胜飞, 龚鹏辉, 孙凯, 刘宇, 贺福清. 2016. 中南部非洲金刚石矿床的成矿地质背景、成矿类型及矿床特征[J]. 地质论评, (2):362-374.
- 徐俊. 2013. 山西地块的深部构造和金伯利建造: 兼论金刚石矿与稳定地块的深部过程[J]. 中国地质, 40(3):790-799.
- 徐向珍. 2006. 新疆和田西北部金刚石成矿地质条件分析[D]. 中国地质大学(北京):1-60.
- 许文良, 王枫, 裴福萍, 孟恩, 唐杰, 徐美君, 王伟. 2013. 中国东北中生代构造体制与区域成矿背景: 来自中生代火山岩组合时空变化的制约[J]. 岩石学报, (2):339-353.
- 杨建民. 1995. 山西北部金伯利岩钾镁煌斑岩岩石学矿物学研究[D]. 中国地质科学院: 1-135.
- 杨经绥, 许志琴, 张建新, 张泽明, 刘福来, 吴才来. 2009. 中国主要高压-超高压变质带的大地构造背景及俯冲/折返机制的探讨[J]. 岩石学报, 25(7):1529-1560.
- 叶德隆, 王群, 杨金香, 任迎新. 1991. 湖北大洪山南段的金伯利岩和钾镁煌斑岩[J]. 地质科技情报, (s1):37-44.
- 叶松, 杨眉, 叶德隆, 邵道乾, 任迎新. 2007. 江西安远路逢金伯利岩煌斑岩筒研究——一种新型的幔源碱性超基性岩[J]. 矿产与地质, (4):383-394.
- 殷莉. 2008. 华北地台金伯利岩包裹体特征及意义——以山东蒙阴为例[D]. 中国地质大学(武汉): 1-68.
- 张复顺. 1992. 吉林省金刚石找矿方向[J]. 吉林地质科技情报, (2):2-7.
- 张宏福, 杨岳衡. 2007. 华北克拉通东部含金伯利岩的金伯利岩的侵位年龄和 Sr-Nd-Hf 同位素地球化学特征[J]. 岩石学报, 23(2):285-294.
- 张建太. 2017. 山东蒙阴地区金伯利岩的地球物理特征探讨[J]. 地球物理学进展, (6):2589-2595.
- 张培元. 1998. 有关金刚石成因等若干重大问题的新认识[J]. 湖南地质, (03):67-73.
- 张鹏, 王良书, 石火生, 李丽梅, 谭慧明. 2010. 郯庐断裂带山东段的中新生代构造演化特征[J]. 地质学报, 84(9):1316-1323
- 张锡贵, 石睿, 吴寿宁, 李永刚, 林泽渊. 2015. 贵州施秉翁哨地区钾镁煌斑岩的新发现及其金刚石找矿意义[J]. 贵州地质, 32(1):37-40.
- 赵春强, 张志斌, 时溢, 石绍山, 尤洪喜, 李靖, 赵敬阳. 2018. 辽南金刚石成矿背景研究进展及讨论[J]. 地质与资源, (2):149-159.
- 赵光慧, 关玉波, 赵建军. 2011. 辽宁板块构造特征及大地构造单元划分[J]. 地质与资源, 20(2):101-106.
- 赵建军, 李靖, 王书, 戴军. 2011. 辽宁瓦房店金刚石矿集区区域成矿控制条件及资源潜力预测[J]. 地质与资源, 20(1):40-44
- 赵磊, 何明跃, 李友枝, 李建哲, 杨万志, 袁英霞, 方锡廉, 帕拉提·阿布都卡迪尔. 1998. 塔里木地台南缘发现钾镁煌斑岩[J]. 现代地质, (4):555-558.
- 赵欣, 施光海, 张骥. 2015. 岩石圈地幔中的金刚石及其矿物包裹体的研究进展[J]. 地球科学进展, 30(3):310-322.
- 郑建平. 1989. 辽东金伯利岩成因研究的某些进展[J]. 地质科技情报, (2):8-14.
- 郑建平. 2009. 不同时空背景幔源物质对比与华北深部岩石圈破坏和增生置换过程[J]. 科学通报, 54(14):1990-2007.
- 郑建平, 路凤香. 1999. 胶辽半岛金伯利岩中地幔捕虏体岩石学特征: 古生代岩石圈地幔及其不均一性[J]. 岩石学报, (1):65-74.
- 郑翔, 彭懋媛, 胡贵昂, 陆刚, 黄祥林. 2016. 广西大化金伯利岩类岩石的岩石学特征[J]. 桂林理工大学学报, 36(3):418-425
- 中国地质科学院地质研究所. 1970. 内蒙古四子王旗龙头山一号金伯利岩体地质普查报告[R].
- 朱日祥, 陈凌, 吴福元, 刘俊来. 2011. 华北克拉通破坏的时间、范围与机制[J]. 中国科学:地球科学, (5):583-592.