

钾镁煌斑岩： 优质金刚石主要载体与幔源流体活动标志

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

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

2) 中国地质大学(北京), 北京 100083;

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

摘 要: 钾镁煌斑岩是一类较为特殊的火山成因或浅成的超基性岩, 是一种重要的深源岩石, 是深源岩浆活动的标志性产物, 可作为了解地幔信息的窗口, 也作为继金伯利岩之后的另一种金刚石寄主岩被持续关注。全球最优质的金刚石产于钾镁煌斑岩中, 主要分布于西澳阿盖尔等地。中国钾镁煌斑岩主要分布于黔湘一带、山西饮牛沟、山东大井头、湖北大洪山和西昆仑克里阳地区, 综合分析认为, 钾镁煌斑岩主要分布于深大断裂附近, 中国钾镁煌斑岩受江南台隆西缘的都匀—贵阳—铜仁—怀化深断裂、常德—安仁深断裂以及郯庐断裂带等深大断裂带控制; 贵州镇远马坪、湖南宁乡云影窝、山东平邑大井头等钾镁煌斑岩有原生金刚石产出, 钾镁煌斑岩的金刚石成矿潜力仍然有待深入研究, 尤以湘黔钾镁煌斑岩带、郯庐断裂带大井头等地可望突破。钾镁煌斑岩的标志性矿物有富钛贫铝金云母、钾碱镁闪石、镁橄榄石、镁铝榴石、铬尖晶石、铬铁矿等。其中 S1、S2 组贫铝富镁铬铁矿对钾镁煌斑岩中金刚石的形成有指示意义。中国钾镁煌斑岩活动具多期性, 其中晚侏罗世—早白垩世(147—100 Ma)时期属于中国含金刚石钾镁煌斑岩和相关的金—稀土等金属矿产的重要成矿时期。

关键词: 钾镁煌斑岩; 金刚石; 标型矿物; 黔湘钾镁煌斑岩带; 深部探测

中图分类号: P588; P624 **文献标志码:** A **doi:** 10.3975/cagsb.2021.111001

Lamproites: The Main Carrier of High-quality Diamond and the Marker of the Activity of Mantle Source Fluids

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

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

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

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

Abstract: Being a special volcanogenic or ultrabasic rock, lamproite is an important deep source rock and a symbolic product of the deep-seated magmatic activity. It can be used as a window to understand the mantle and as another kind of diamond host rock after kimberlite, which has been extensively studied. Globally, lamproites host some of the best diamonds, such as Argyle in western Australia. Lamproites in China are mainly distributed in Hunan, Guizhou, Yinniugou, Shanxi, Dajingtou, Shandong, Dahongshan, Hubei, and Keliyang in the western Kunlun Mountains. Comprehensive analysis has shown that lamproite is mainly distributed near the deep, large faults. Lamproites in China are contained in the Duyun—Guiyang—Tongren—Huaihua deep fault on the western margin of Jiangnan antecline, the Changde—Anren deep fault, and the Tanlu fault zone. Primary diamonds are

本文由中国地质科学院基本科研业务费项目(编号: JYYWF20180101)、山东省重点研发计划项目(公益性科技攻关类)(编号: 2019GSF109101)、中国地质调查局地质调查项目(编号: DD20190589; DD20160220; DD20190703)和国家自然科学基金项目(编号: 41072073)联合资助。

收稿日期: 2021-08-09; 改回日期: 2021-10-20; 网络首发日期: 2021-11-11。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 李睿哲, 男, 1997年生。硕士研究生。资源与环境专业。E-mail: 13020023362@163.com。

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

found in the lamproites in Maping, Zhenyuan, Guizhou, Yunyingwo, Ningxiang, Hunan, Dajingtou, Pingyi, and Shandong. The potential of lamproites in diamond mineralization needs to be further studied, especially the lamproite belts in Hunan-Guizhou and Tan-Lu Fault. The indicator minerals of lamproite are titanium-rich aluminum-poor phlogopite, potassic richterite, magnesite olivine, pyrope, chrome-spinel, chromite, etc. The chromite groups S_1 and S_2 which are aluminum-poor and magnesium-rich is indicative of the formation of diamond in lamproite. The activity of lamproite in China is multi-stage, among which the stage of Late Jurassic to Early Cretaceous (147–100 Ma) belongs to the important metallogenic period of diamond-bearing lamproite and related Au-rare earth element minerals in China.

Key words: lamproite; diamond; iconic minerals; Guizhou–Hunan lamproite belt; deep exploration

煌斑岩是成分和成因复杂的一组中至暗色的斑状脉岩,按其化学成分和矿物组合,可分为钙碱性煌斑岩、碱性煌斑岩和超基性煌斑岩三大类,钾镁煌斑岩是其中较为特殊的代表之一。

在矿物学方面,钾镁煌斑岩的矿物组分较为复杂,因此很难仅用岩石学来定义:其主要矿物有橄榄石、透辉石、顽辉石、金云母、钾碱镁闪石、白榴石和/或透长石,及多种副矿物,不含斜长石、伊利石和钾霞石,但并不是所有钾镁煌斑岩都含有以上所有矿物组分(Gill, 2010)。

详细分类:

钾镁煌斑岩的进一步划分应按照国际地科联火成岩分委会建议(Le Maitre, 2005)使用 Mitchell and Bergman(1991)描述的钾镁煌斑岩分类系统,并被后来的研究者所采用(Gill, 2010),根据优势矿物金云母、碱镁闪石、橄榄石、透辉石、透长石和白榴石重新定名以取代曾用名,如表 1 所示。这些曾用名在国际上已被废止,而国内的文献中还常出现,应统一为宜。

简而言之,钾镁煌斑岩是一种重要的深源岩石,是深源岩浆活动的标志性产物,可作为了解地幔信息的窗口。钾镁煌斑岩是一类较为特殊的火山成因或浅成的超基性岩,常与金伯利岩共生,但相对

而言,钾镁煌斑岩的研究不如金伯利岩的研究广泛深入,自澳大利亚西北部的阿盖尔(Argyle)地区的钾镁斑岩成为世界上最富且品质最好的金刚石矿之后,钾镁煌斑岩的勘查研究才得到了快速的发展。研究表明,每 100 t 钾镁煌斑岩的钻石含量约为 500 克拉,而金伯利岩仅为 20~80 克拉(Mitchell and Bergman, 1991),因此钾镁煌斑岩也作为继金伯利岩之后的另一种金刚石寄主岩被持续关注。

1 国内外钾镁煌斑岩简况

目前已知,全球钾镁煌斑岩主要分布于西澳的 Argyle 和 Ellendale 地区、美国 Leucite Hill 地区(Bergman, 1987)以及中国黔湘地区,除上述地区外,亦有几处钾镁煌斑岩星散分布于全球各地(图 1),但由于资料较少,本文不作详细描述。

西澳钾镁煌斑岩作为常与金伯利岩伴生的一种岩石,前人对其研究时间较长。西澳钾镁煌斑岩位于西澳大利亚的西金伯利煌斑岩省的 Argyle 地区,年龄 1940~1800 Ma,岩体上覆寒武系沉积物。不同于 Dawson(1980)中经典模型提到的“含金刚石的金伯利岩位于稳定克拉通内部,而边部只能产出不含金刚石的金伯利岩和煌斑岩”,西澳钾镁煌斑岩地处克拉通核心外围。其主要矿物有橄榄石(被滑石和碳酸盐取代)和四铁金云母斑晶以及细粒金云母、锐钛矿、榍石、钙钛矿、磷灰石、锰钛铁矿、钛镁铁钛矿和硫化物基质组成。前人提出西澳钾镁煌斑岩含有金刚石的可能性(Wade and Prider, 1940; Prider, 1959),后来的确在 Argyle 的钾镁煌斑岩(Akl)中发现了金刚石(Mitchell and Bergman, 1991)。

美国怀俄明州 Leucite Hill 地区的钾镁煌斑岩是全球典型的钾镁煌斑岩体,其 K-Ar 年龄为 97~106 Ma(Zartman, 1977; Gogineni et al., 1978),出露面积 2000~2500 km²,岩性包含金云母白榴岩(白榴石-金云母-透辉石煌斑岩 ± 橄榄石 ± 钾碱镁闪石)、金云母粗面岩(白榴石-透闪石-透辉石-金云母煌斑岩 ± 钾碱镁闪石)和透辉金云母岩(透辉石-金云母煌斑岩)。目前认为其不含金刚石条件。

表 1 钾镁煌斑岩的命名
Table 1 Nomenclature of lamproites

曾用名	现用名
金云白榴响岩(Wyomingite)	透辉白榴金云母钾镁煌斑岩
金云白榴粗面岩(Orendite)	透辉透长石金云母钾镁煌斑岩
透辉金云斑岩(Madupite)	透辉石金云斑岩质钾镁煌斑岩
透辉白榴岩(Cedricite)	透辉白榴钾镁煌斑岩
镁铁白榴金云火山岩(Mamillite)	白榴碱镁闪石钾镁煌斑岩
辉橄白榴岩(Wolgidite)	透辉白榴碱镁闪石透辉金云钾镁煌斑岩
白榴金云煌斑岩(Fitzroyite)	白榴金云钾镁煌斑岩
金橄玻基煌斑岩(Verite)	玻璃蛋白橄橄透辉金云钾镁煌斑岩
金云白榴岩(Jumillite)	橄橄透辉碱镁闪石金云钾镁煌斑岩
金云粗面岩(Fortunite)	玻璃蛋白顽辉金云钾镁煌斑岩
橄煌岩(Cancalite)	顽辉透长金云钾镁煌斑岩



1—西澳 Ellendale; 2—西澳 Argyle; 3—美国怀俄明州 Leucite Hill; 4—贵州镇远; 5—湖南宁乡; 6—湖北大洪山; 7—山西饮牛沟; 8—山东大井头; 9—新疆克里阳; 10—美国 Smoky Butte; 11—格陵兰 Sisimiut; 12—西班牙 Mercia Almeria; 13—科特迪瓦 Bobi; 14—赞比亚 Kapamba; 15—南非 Swartruggens; 16—南非 Penil; 17—南美洲 Coromandel; 18—南极洲 Kerguelen—Gaussberg; 19—俄罗斯 Murun.
1—Ellendale, western Australia; 2—Argyle, western Australia; 3—Leucite Hill, Wyoming, USA; 4—Zhenyuan, Guizhou; 5—Ningxiang, Hunan; 6—Dahongshan, Hubei; 7—Yinniugou, Shanxi; 8—Dajingtou, Shandong; 9—Keliyang, Xinjiang; 10—Smoky Butte, USA; 11—Sisimiut, Greenland; 12—Mercia Almeria, Spain; 13—Bobi, Ivory Coast; 14—Kapamba, Zambia; 15—Swartruggens, South Africa; 16—Penil, South Africa; 17—Coromandel, South America; 18—Kerguelen—Gaussberg, Antarctica; 19—Murun, Russia.

图 1 全球典型钾镁煌斑岩分布图(据 Bergman, 1987; Mitchell and Bergman, 1991; Shirey, 2013 修改)

Fig. 1 Typical global distribution of lamproite (modified after Bergman, 1987; Mitchell and Bergman, 1991; Shirey, 2013)

中国钾镁煌斑岩主要集中在贵州镇远—湖南常德—宁乡一带的“黔湘钾镁煌斑岩带”(池际尚等, 1996), 是中国含金刚石钾镁煌斑岩的代表地区(图2)。

2 中国钾镁煌斑岩简况

2.1 中国钾镁煌斑岩空间分布

中国钾镁煌斑岩主要分布于黔东南、湖南宁乡、山西饮牛沟、山东大井头、湖北大洪山和西昆仑克里阳地区(表2)。

2.2 中国典型钾镁煌斑岩带

中国钾镁煌斑岩主要分布于深大断裂附近, 大致沿两个主要的金刚石成矿带分布, 即黔湘钾镁煌斑岩带和郯庐断裂带(大井头一带), 另外山西饮牛沟、湖北大洪山和西昆仑克里阳地区几处星散分布在中国各地(图2, 表2)。其中, 已探明含金刚石的岩体主要位于贵州镇远马坪、湖南宁乡云影窝和山东大井头岩体, 湖北大洪山地区具有成矿潜力, 其他地区未发现含金刚石矿。

2.2.1 黔湘钾镁煌斑岩带

黔湘钾镁煌斑岩带位于桂北—黔东北—湘西北延至湘中地区(池际尚等, 1996; 董斌等, 2006; 杨光忠等, 2019; 黄远成等, 2015), 其中贵州镇远马坪和湖南宁乡云影窝两地有原生金刚石产出。

贵州镇远钾镁煌斑岩带

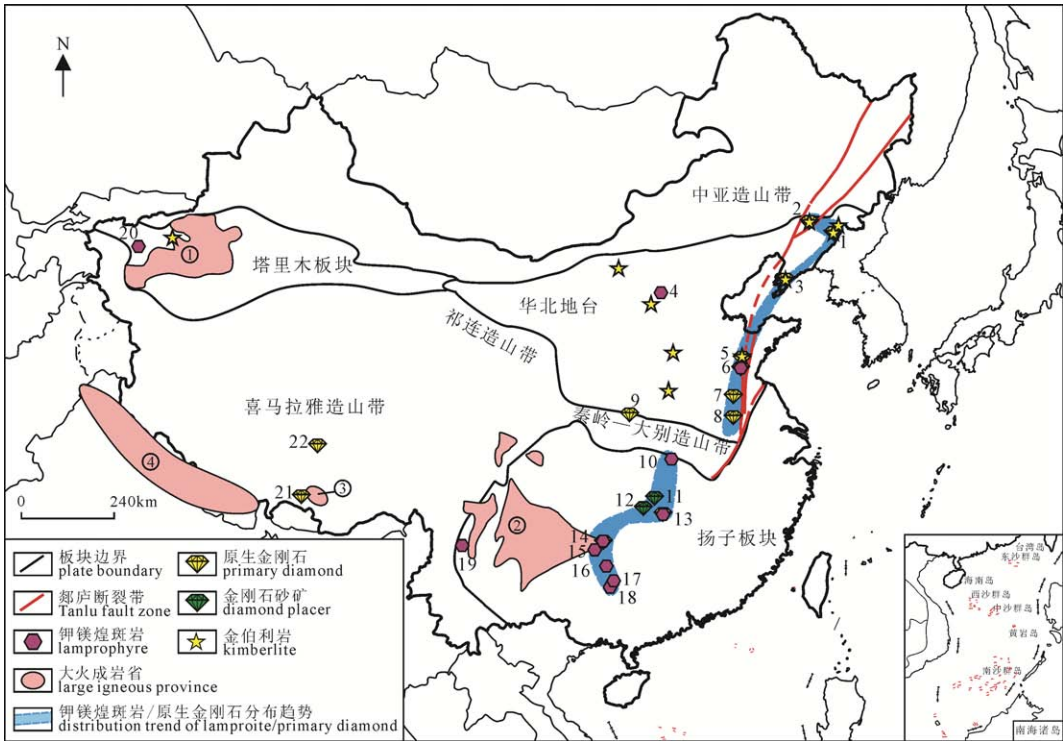
黔东南钾镁煌斑岩以镇远县白坟和思南塘两大钾镁煌斑岩体群为主, 另有施秉县等地几个较小岩体群中亦可见(图3)。区内钾镁煌斑岩大多呈岩墙或岩管状产出(罗会文和杨光树, 1989), 侵位于下寒武统明心寺组至清虚洞组和中寒武统高台组的白云岩与碳酸盐岩中(方维萱等, 2002)。自1976年在西澳发现钾镁煌斑岩之后, 前人将黔东南部分与之具有类似性质的金伯利岩改称为钾镁煌斑岩(江万, 1995)。

镇远地区钾镁煌斑岩具有富钛, 贫铝的特征, 微量元素和稀土元素富集程度比国外典型钾镁煌斑岩略低(池际尚等, 1996)。

湖南宁乡钾镁煌斑岩带

湖南沅水地区是我国重要的金刚石砂矿源区, 许多学者也对湖南含金刚石的钾镁煌斑岩进行研究, 但目前仍未找到其原生矿区的位置。湖南钾镁煌斑岩主要出露点为宁乡云影窝(李子云和马文运, 1993)(图4)。湖南413地质队在1990年发现含金刚石的钾镁煌斑岩(林伟鹏等, 2009), 后由于多方面条件限制, 目前其研究进展较慢。

宁乡钾镁煌斑岩群产于扬子板块与华南板块边界的桃江—城步岩石圈碰撞断裂带和双牌—汨罗



钾镁煌斑岩及金刚石产出地：1—辽宁桓仁；2—辽宁铁岭；3—辽宁瓦房店；4—山西饮牛沟；5—山东蒙阴；6—山东平邑大井头；7—江苏徐州塔山；8—安徽栏杆；9—陕西丹凤；10—湖北大洪山；11—湖南理公港(砂矿)；12—湖南沅水(砂矿)；13—湖南宁乡；14—贵州马坪；15—贵州施秉；16—贵州榕江；17—广西融水；18—广西四堡；19—云南洱海东岸；20—新疆克里阳；21—西藏罗布莎；22—西藏东巧；大火成岩省：①—塔里木大火成岩省；②—峨眉山大火成岩省；③—措美大火成岩省；④—潘淮大火成岩省。
Lamproite and diamond production: 1—Huanren, Liaoning; 2—Tieling, Liaoning; 3—Wafangdian, Liaoning; 4—Yinniugou, Shanxi; 5—Mengyin, Shandong; 6—Dajingtou, Shandong; 7—Tashan, Jiangsu; 8—Langan, Anhui; 9—Danfeng, Shanxi; 10—Dahongshan, Hubei; 11—Ligonggang, Hunan; 12—Yuan River, Hunan; 13—Ningxiang, Hunan; 14—Maping, Guizhou; 15—Shibing, Guizhou; 16—Rongjiang, Guizhou; 17—Rongshui, Guangxi; 18—Sibao, Guangxi; 19—East Bank of Erhai, Yunnan; 20—Keliyang, Xinjiang; 21—Luobusha, Tibet; 22—Dongqiao, Tibet; Large igneous provinces: ①—Tarim; ②—Emeishan; ③—Comei; ④—Panjal.

图 2 中国钾镁煌斑岩分布图
(据王留海, 1991; 王取义, 1995; 童潜明, 1996; 柴凤梅, 2001; 张宏福和杨岳衡, 2007; 陈汉林等, 2009; 杨经绥等, 2011; 宋谢炎等, 2011; 宋瑞祥, 2013; 蔡逸涛等, 2019; 黄友波等, 2019 修改)

Fig. 2 Distribution of lamproite in China
(modified after WANG, 1991; WANG, 1995; TONG, 1996; CHAI, 2001; ZHANG and YANG, 2007; CHEN et al., 2009; YANG et al., 2011; SONG et al., 2011; SONG, 2013; CAI et al., 2019; HUANG et al., 2019)

表 2 中国钾镁煌斑岩时空分布
Table 2 Time and space distribution of lamproite in China

地区	构造位置	岩性	年龄	含矿性	参考文献
贵州镇远	扬子地台含古陆核	钾碱镁闪石透辉石	500 ~ 409 Ma	是	池际尚等, 1996
		金云母钾镁煌斑岩	296 ~ 261 Ma		
		橄榄钾镁煌斑岩	192 ~ 147 Ma		
湖南宁乡	扬子地台含古陆核	假象橄榄石透辉石 金云母钾镁煌斑岩	(101.6±5.1) Ma	是	林玮鹏等, 2011
山东大井头	华北板块东南缘 临沂凸起西北部	强风化蚀变钾镁煌斑岩	122 Ma 之后	是	王玉峰等, 2019
山西饮牛沟	汾渭裂谷北段	金云母透辉石透长钾镁煌斑岩	1.6~1.8Ga	否	李佑国等, 1991
		霓辉石金云母透长钾镁煌斑岩			
		钾碱镁闪石金云母钾镁煌斑岩			
		钾碱镁闪石透辉石透长钾镁煌斑岩 金云母透长钾镁煌斑岩			
湖北大洪山	扬子地台北缘大巴 山一大洪山台缘拗 陷活动带	金云母透辉石透长钾镁煌斑岩 碱镁闪石金云透长透辉钾镁煌斑岩	493~326 Ma, 基底年龄: 2610~2450 Ma	否	马大铨等, 1979; 刘观亮等, 1993
新疆克里阳	塔里木地台南缘铁 克里克斯隆带与昆 仑陆缘活动带	金云母透辉石钾镁煌斑岩 假白榴石透辉石钾镁煌斑岩 含球粒透辉石钾镁煌斑岩	300 Ma 左右	否	李友枝等, 2000

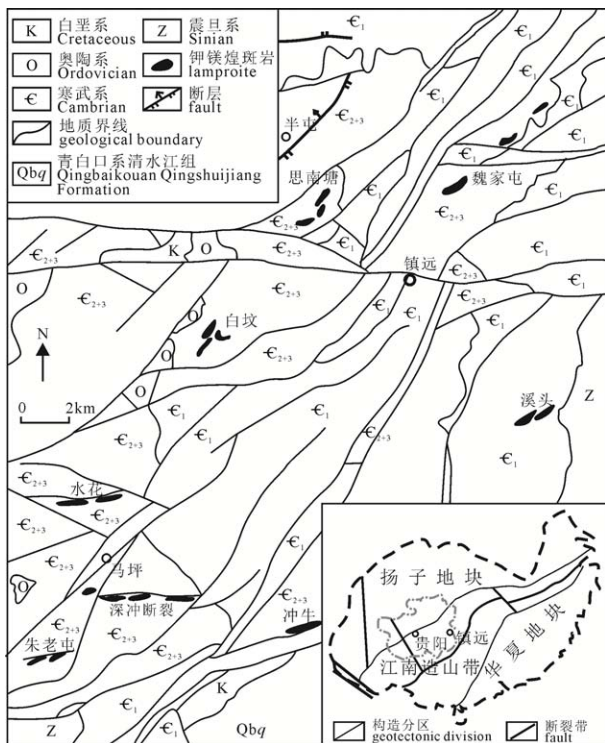
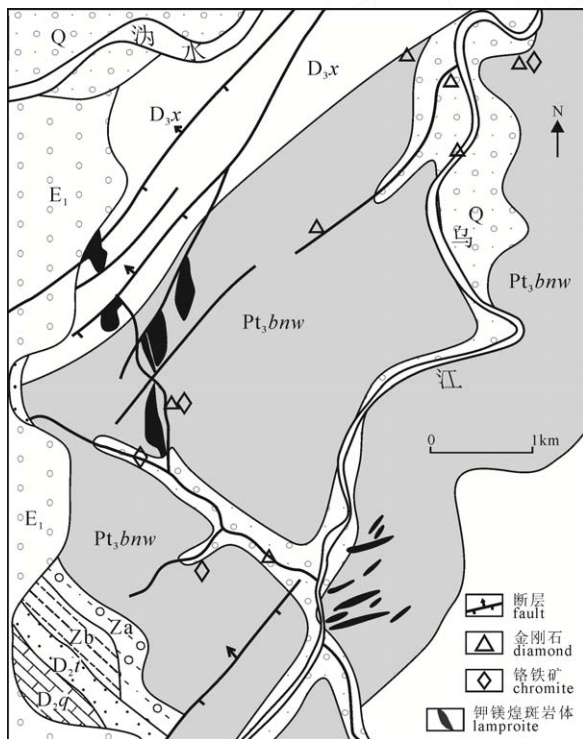


图3 贵州镇远地区钾镁煌斑岩出露地质概况图
(据饶红娟等, 2019 修改)

Fig. 3 Geological profile of lamproite outburst in Zhenyuan, Guizhou (modified after RAO et al., 2019)



Pt₃bnw—板溪群五强溪组; Za—下震旦统; Zb—上震旦统;
D₂t—中泥盆统跳马涧组; D₂q—中泥盆统棋桥组;
D₃x—上泥盆统锡矿山组; E₁—下第三系; Q—第四系。
Pt₃bnw—Banxi Group Wuqiangxi Fm.; Za—Lower Sinian;
Zb—Upper Sinian, D₂t—Middle Devonian Tiaomajian Fm.;
D₂q—Middle Devonian Qiziqiao Fm.; D₃x—Upper Devonian
Xikuangshan Fm.; E₁—Lower Paleogene; Q—Quaternary.

图4 宁乡云影窝地质略图(据李子云和马文运, 1993)

Fig. 4 Geological sketch of Yunyingwo, Ningxiang
(modified from LI and MA, 1993)

地壳断裂带的交汇区附近(饶家荣, 1999), 主要为火山管道相, 部分为脉状浅成侵入相, 岩体多呈狭长带状北西向展布, 岩带大约长 5 km。

2.2.2 其他地区

除上述几个钾镁煌斑岩区以外, 在山东大井头(王玉峰等, 2019)、湖北大洪山(刘观亮等, 1993)、山西饮牛沟(李佑国等, 1991)及新疆克里阳(李友枝等, 2000; 柴凤梅, 2001)等地亦有钾镁煌斑岩出露。

3 讨论

3.1 钾镁煌斑岩的典型矿物及其金刚石含矿性

3.1.1 地球化学特征

原生金刚石的主要来源为大陆板块内部的碱性岩浆作用的产物, 含金刚石的钾镁煌斑岩一般位于 P 型克拉通的边缘带, 岩浆来源深度在 150 km 以上, 形成压力大于 5 GPa, 形成温度大于 1100°C (Bergman, 1987; Haggerty, 1986; 刘观亮等, 1993)。结合世界典型钾镁煌斑岩的主量和微量元素丰度特征, 相比于不含金刚石的钾镁煌斑岩, 含金刚石的会呈现出 FeO、MgO、CaO、CO₂ 含量高, M 值高, Gd、Cr、Ni、Co、LREE、Ta、Rb、Ba 丰度高, Ba/Sr、La/Yb 比值高, K/Rb 比值低的特点(表 3)(李昌年, 1991; 柴凤梅, 2001)。

3.1.2 钾镁煌斑岩深源的典型矿物

钾镁煌斑岩的深源典型矿物主要包括金云母、钾碱镁闪石、以及镁铝榴石、铬尖晶石、钙钛矿等捕虏晶矿物(张安棣, 1991; 刘观亮等, 1993)。其中富钛贫铝金云母和钾碱镁闪石是钾镁煌斑岩的标志性矿物。

金云母: 钾镁煌斑岩中中金云母分为斑晶金云母和基质金云母, 最特征的是金云母富钛 (TiO₂: 2%~10%), 贫铝 (Al₂O₃: 5%~10%), 另有富钛 (TiO₂: 5%~10%) 的嵌晶状基质四配铁金云母出现(池际尚等, 1996)。

钾碱镁闪石: 含钛的钾碱镁闪石是钾镁煌斑岩最特征的矿物之一, 具有贫铝高钛的特征, 一般存在于基质之中, 分子式可写为 (Na,K)NaCa(Mg,Fe)₅Si₈O₂₂(OH)₂, A 位存在大量 K(池际尚等, 1996)。

镁铝榴石: 钾镁煌斑岩中的石榴子石多自人工重砂中获得, 以橄榄岩型铬-镁铝榴石和钙铝榴石-镁铝榴石为主, 特点为表面具有熔蚀结构以及浑圆状外形(池际尚等, 1996)。

刘观亮等(1993)提出, 在埃伦代尔(Ellendale)地区仅发现了 3 颗 G10 组镁铝榴石, 而富含金刚石矿的阿盖尔(Argyle)矿区却并未发现 G10 组镁铝榴石, 且贵州马坪岩体的石榴子石的分析结果均呈现不贫 Ca 的特征, 可被归类为 G9 组。可见 G10 组的镁铝榴石作为钾镁煌斑岩中金刚石的特征指示矿物的

表 3 中国典型钾镁煌斑岩与世界典型钾镁煌斑岩主量元素特征对比表

Table 3 Comparison of main element characteristics of typical lamproite in China and the rest of the world

含量/%	全球含金刚石的 钾镁煌斑岩	全球不含金刚石的 钾镁煌斑岩	西澳	贵州镇远	湖南宁乡	山东大井头	山西饮牛沟	新疆克里阳
SiO ₂	47±7	53±6	42.60	37.34	44.39	45.34	47.06	41.76
TiO ₂	2.9±1	3.1±2	3.43	3.15	2.25	0.74	1.18	0.80
Al ₂ O ₃	4.8±1	10±2	3.96	6.49	8.34	16.82	10.72	13.57
FeO*	8±2	6±2	8.11	7.95	9.34	11.23		8.45
MnO	0.12±0.04	0.1±0.05	0.14	0.18	0.16	0.20	0.17	0.30
MgO	23±6	10±4	25.00	11.78	16.71	1.68	16.71	8.59
CaO	8±8	6±3	5.05	12.10	5.24	7.57	8.80	11.11
Na ₂ O	0.4±0.3	1.6±1	0.52	0.16	0.31	7.70	1.35	1.27
K ₂ O	3.5±1	7.5±3	4.45	1.43	1.41	0.15	6.66	4.82
P ₂ O ₅	1.3±0.7	1.3±0.7	1.27	1.23	0.81	0.49	1.64	0.16
CO ₂	4±4	1.7±2	0.18	11.10	2.57		1.01	5.50
H ₂ O ⁺	3.3±2	3±2	4.65	3.54	6.34		1.21	2.94
M	82±5	72±8	84.10	71.20	76.10	44.00	71.60	67.49

注：为了便于比较表中数据是在扣除 H₂O、CO₂ 后按 100% 计算得到的，M=Mg/(Mg+TFe)；其中世界平均含金刚石与不含金刚石的钾镁煌斑岩数据来自李昌年(1991)，西澳数据来自 Jaques et al.(1984)，镇远数据来自杨毓红等(2021)，宁乡数据来自林玮鹏等(2009)，大井头数据来自王玉峰等(2019)，饮牛沟数据来自张连昌等(1998)，克里阳数据来自柴凤梅(2001)。

可靠性较低，可能不适用于钾镁煌斑岩型金刚石矿床，反而含有 G9 组铬-镁铝榴石的钾镁煌斑岩存在含矿的可能性，但具体关系还有待确认。

铬尖晶石：张安棣(1991)根据铬尖晶石捕虏晶中 TiO₂、Al₂O₃、Cr₂O₃ 和 MgO 进行聚类分析，将铬尖晶石分为 S1-S12 十二组。其中 S1 组无钛贫铝富镁铬铁矿中铬尖晶石的 MgO 与 Cr₂O₃ 含量很高，Al₂O₃ 含量在 5% 左右，而 TiO₂ 的含量小于 0.2%，是金刚石最早期的铬尖晶石化学成分特征，这反映了金刚石形成早期的高亏损环境。并且经过统计，贵州马坪、湖南宁乡、西澳的钾镁煌斑岩以及许多含金刚石的金伯利岩均含有这一组的铬尖晶石，含金刚石性的好坏与这一组的铬尖晶石含量有一定的正相关关系。S2 组的含钛贫铝富镁铬铁矿与 S1 组主要在于 TiO₂ 的含量变化，代表了金刚石中较晚期的铬尖晶石包体及与金刚石连生的成分特征，与 S1 组具有同样的金刚石指示意义。

金刚石：国外钾镁煌斑岩中最具代表性的金刚石矿床有西澳阿盖尔和埃伦代尔，全球对钾镁煌斑岩中的金刚石的研究多以上述两矿床为主，在阿盖尔和埃伦代尔中的钻石多是 I 类，主色大多为棕色，大小平均为 0.1~0.2 克拉，最大可达 16 克拉 (Mitchell and Bergman, 1991)。国内仅有马坪、宁乡和大井头三个岩体有原生金刚石产出，以 I 类为主。但相比于阿盖尔中的金刚石，颗粒细、数量小 (池际尚等, 1996)。

金刚石包裹体的深源信息特征：钾镁煌斑岩是了解地幔信息的窗口之一，因为钾镁煌斑岩中所含

的金刚石一般会含有其形成时捕获的来自深部地幔的包裹体，而通过对这些包裹体的研究可以获得金刚石形成环境所处的地幔部位的很多信息。

金刚石中矿物包裹体一般存在两大类——橄榄质或超镁铁质 (紫色铬镁铝榴石、铬透辉石和镁橄榄石等) 和榴辉岩质 (橙色镁铝榴石-铁铝榴石、绿辉石和蓝晶石等)。相比于金伯利岩，钾镁煌斑岩中金刚石一般含有较多的榴辉岩质包裹体，部分较富含 K、Al 和 Fe (Mitchell and Bergman, 1991)。近些年的工作发现，某些地区的高镁含量的碳酸岩流体够与碳酸橄榄岩处于平衡状态，因此代表了可能存在于岩石圈较深处的一种更原始的端元，并与原始金伯利岩浆岩中的流体有关 (Shirey, 2013)。

3.2 中国钾镁煌斑岩与金刚石成矿的时期

前人测得黔湘钾镁煌斑岩带年龄范围范围较大，镇远地区早期钾镁煌斑岩形成时代为 400~500 Ma (马大铨等, 1983; 罗会文和杨光树, 1989; 梅厚钧等, 1998; 方维萱等, 2002)，与华北地台蒙阴、瓦房店一带金伯利岩带早期获得的年龄一致 (池际尚等, 1996)。其中产出原生金刚石的马坪岩体中马坪 1 号和 2 号的全岩 K-Ar 年龄为 402 Ma 和 467 Ma (马大铨等, 1983)。晚期钾镁煌斑岩形成时代为 192~147 Ma (马大铨等, 1983)。

林玮鹏等(2011)测得宁乡钾镁煌斑岩中岩浆锆石的 U-Pb 年龄为 (101.6±5.1) Ma，形成于燕山期，呈现出较为年轻的特点。

前人对大井头岩体的形成时期没有精确的测定。毛景文等(2005)总结在中国北方中生代大规模

成矿作用期次中, 位于郯庐断裂周边的仓上金矿、焦家金矿、望儿山金矿、新城金矿等多个深源金属矿床的成矿年龄均在 120 Ma 左右, 这些矿床的形成与大井头钾镁煌斑岩的形成在时间与空间上存在一定联系。褚志远等(2019)研究得到, 山东蒙阴坡里地区中, 岩管相的金伯利岩穿切了辉绿岩脉, 而辉绿岩脉的年龄为 122 Ma 左右, 根据以上穿切关系, 可推断蒙阴坡里金伯利岩的年龄最大为 122 Ma。大井头钾镁煌斑岩在空间上与坡里金伯利岩带相近, 且钾镁煌斑岩与金伯利岩常存在伴生关系, 故可得出大井头钾镁煌斑岩的年龄可能与坡里金伯利岩年龄相近, 均为 122 Ma 左右, 为晚燕山期构造运动的产物。

马大铨等(1980)测定大洪山徐家冲岩体的 K-Ar 法年龄为 326 Ma, 刘观亮等(1993)测得该岩体的全岩 K-Ar 年龄为 326 Ma 和 327 Ma, 以及一组 Rb-Sr 法矿物等时线同位素年龄为 352 Ma。

综上, 中国含金刚石的钾镁煌斑岩的主要成岩时期为 147~100 Ma 的燕山期, 也是和金刚石相关的金-稀土等金属矿产的重要成矿时期。

3.3 关于中国钾镁煌斑岩与金刚石的找矿前景讨论

目前世界上金刚石主要赋存于金伯利岩以及钾镁煌斑岩中, 其中阿盖尔地区钾镁煌斑岩中产出了大量优质的金刚石(Mitchell and Bergman, 1991), 所以钾镁煌斑岩具有极高的金刚石成矿潜力。而随着工作的展开, 在中国的钾镁煌斑岩带中将会发现更多优质金刚石原生矿床。

中国最早发现的含有原生金刚石矿的钾镁煌斑岩体位于贵州马坪(池际尚等, 1996), 目前发现的大部分钾镁煌斑岩都位于扬子地台, 且在湖南沅水等地产出了大量优质的砂矿金刚石, 但源头未知, 其原因与黔湘钾镁煌斑岩带的构造活动、地表抬升与剥蚀有密切联系, 所以黔湘钾镁煌斑岩带仍有较大的金刚石成矿潜力。而位于扬子北缘的湖北大洪山地区的钾镁煌斑岩中不发育金刚石, 但其周边地区存在金刚石的产出(刘观亮等, 1993), 因此扬子北缘大洪山地区及其邻区值得进一步调查与关注。

在郯庐断裂带两侧, 除大井头地区的钾镁煌斑岩管外, 辽宁瓦房店和鲁西地区的金伯利岩管群中亦发现大量优质金刚石(冯爱平等, 2021; 付海涛等, 2021), 因此在郯庐断裂带周边仍有发现钾镁煌斑岩体以及原生金刚石的潜力。

总之, 中国对钾镁煌斑岩的研究程度较低, 对钾镁煌斑岩成矿潜力的研究对于今后中国东部大火成岩省以及地幔柱的深入工作具有重大意义。

4 结论

根据上述对中国钾镁煌斑岩的研究, 可得出以下结论:

(1)钾镁煌斑岩主要分布于深大断裂附近, 中国钾镁煌斑岩受江南台隆西缘的都匀—贵阳—铜仁—怀化深断裂、常德—安仁深断裂以及郯庐断裂带等深大断裂带控制, 其中贵州镇远马坪、湖南宁乡云影窝、山东平邑大井头等钾镁煌斑岩有原生金刚石产出。

(2)钾镁煌斑岩的标志性矿物有富钛贫铝金云母、钾碱镁闪石、镁橄榄石、镁铝榴石、铬尖晶石、铬铁矿等, 其中 S1、S2 组贫铝富镁铬铁矿对钾镁煌斑岩中金刚石的形成有指示意义。

(3)中国钾镁煌斑岩活动具多期性, 其中晚侏罗世—早白垩世(147~100 Ma)时期属于中国含金刚石钾镁煌斑岩和相关的金-稀土等金属矿产的重要成矿时期。

致谢: 感谢贵州 101 地质队杨光忠研究员、吴世光高级工程师、湖南 413 地质队李帅总工程师在野外勘查工作中给予的帮助, 以及国家地质实验测试中心各位老师的指导。

Acknowledgements:

This study was supported by Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund (No. JYYWF20180101), Key Research & Development Project of Shandong Province (No. 2019GSF109101), China Geological Survey (Nos. DD20190589; DD20160220; DD20190703), and National Natural Science Foundation of China (No. 41072073).

参考文献:

- 蔡逸涛, 徐敏成, 施建斌, 杨献忠, 张洁, 康丛轩, 曹正琦, 董钟斗, 马玉广. 2019. 安徽栏杆含金刚石基性岩中辉石及钛铁矿矿物化学特征[J]. 地质通报, 38(1): 1-13.
- 柴凤梅. 2001. 塔里木地台西南缘钾镁煌斑岩岩石学特征及含矿性研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学.
- 陈汉林, 杨树锋, 厉子龙, 余星, 罗俊成, 何光玉, 林秀斌, 王清华. 2009. 塔里木盆地二叠纪大火成岩省发育的时空特点[J]. 新疆石油地质, 30(2): 179-182.
- 池际尚, 路凤香, 刘永顺, 胡士杰, 赵崇贺, 叶德隆, 郑建平, 赵磊, 张宏福, 江万. 1996. 中国原生金刚石—成矿地质条件研究[M]. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 褚志远, 王伟德, 吕青, 刘卫东, 康丛轩, 王树星. 2019. 山东蒙阴坡里地区金伯利岩带形成时代——来自辉绿岩锆石 U-Pb 定年数据的证据[J]. 地质通报, 38(1): 44-50.
- 董斌, 陈明珊, 肖湘辉. 2006. 湖南原生金刚石成矿地质背景及找矿方向[J]. 矿床地质, 25(S1): 337-340.
- 方维萱, 胡瑞忠, 苏文超, 肖加飞, 漆亮, 蒋国豪. 2002. 贵州镇

- 远地区钾镁煌斑岩类的侵位时代[J]. 科学通报, 47(4): 307-312.
- 冯爱平, 刘传朋, 褚志远, 夏立献, 肖丙建, 李新. 2021. 鲁西金刚石原生矿近十年深部成矿预测[J]. 地球学报, 42(6): 待刊.
- 冯爱平, 刘传朋, 褚志远, 夏立献, 肖丙建, 李新风, 徐磊磊, 赵秀芳. 2021. 鲁西金刚石原生矿近十年深部成矿预测[J]. 地球学报, 42(6): 881-894.
- 付海涛, 万方来, 蒋丽丽, 徐华, 李祎昕, 杨磊. 2021. 辽宁瓦房店金刚石矿田金伯利岩地质特征[J]. 地球学报, 859-867.
- 付海涛, 万方来, 蒋丽丽, 徐华, 李祎昕, 杨磊. 2021. 辽宁瓦房店金刚石矿田金伯利岩地质特征[J]. 地球学报, 待刊.
- 黄友波, 周琦忠, 张琪, 冯学知, 王国强, 张凤鸣, 蔡逸涛. 2019. 江苏徐州塔山橄榄玄武玢岩地球化学特征及其与金刚石成因关系[J]. 地质通报, 38(1): 132-142.
- 黄远成, 石睿, 林泽渊, 李永刚. 2015. 贵州镇远苍蒲塘钾镁煌斑岩管发现及找矿意义[J]. 贵州地质, 32(1): 32-36+46.
- 江万. 1995. 贵州东部镇远地区钾镁煌斑岩的矿物学和岩石学研究[J]. 现代地质, 9(3): 351-358.
- 李昌年. 1991. 几种含金刚石岩系及相关岩石的地球化学性质[J]. 地质科技情报, 10(S1): 85-96.
- 李友枝, 赵磊, 何明跃, 帕拉提·阿布都卡迪尔, 李建哲. 2000. 西昆仑克里阳地区钾镁煌斑岩岩石学特征及其意义[J]. 现代地质, 14(4): 385-391.
- 李佑国, 莫宣学, 赵崇贺. 1991. 山西大同采凉山钾镁煌斑岩的地质与岩石学特征[J]. 地质科技情报, 10(S1): 29-36.
- 李子云, 马文运. 1993. 宁乡县云影窝含金刚石钾镁煌斑岩地质特征[J]. 湖南地质, 12(4): 221-225.
- 林玮鹏, 丘志力, 董斌, 梁伟章, 陈华, 李子云, 陈炳辉, 李榴芬. 2011. 湖南宁乡钾镁煌斑岩及相关岩石重砂锆石地球化学特征、U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 中山大学学报(自然科学版), 50(3): 105-111.
- 林玮鹏, 丘志力, 李子云, 陈炳辉, 李榴芬, 龚盛玮. 2009. 湖南宁乡V号岩管煌斑岩的岩石地球化学特征[J]. 资源调查与环境, 30(3): 180-187.
- 刘观亮, 汪雄武, 吕学森. 1993. 大洪山钾镁煌斑岩[M]. 北京: 地质出版社: 186.
- 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, 8(2): 97-109.
- 马大铨, 赵子杰, 徐涛, 卢登蓉. 1983. 贵州马坪云母金伯利岩及伴生偏碱性超基性岩的岩石特征[C]//中国地质科学院宜昌地质矿产研究所文集(7). 北京: 地质出版社.
- 马大铨. 1980. 中国东部金伯利岩体中镁铝榴石的对比研究及其形成条件的讨论[C]//中国地质科学院宜昌地质矿产研究所文集(1). 北京: 地质出版社.
- 毛景文, 谢桂青, 张作衡, 李晓峰, 王义天, 张长青, 李永峰. 2005. 中国北方中生代大规模成矿作用的期次及其地球动力学背景[J]. 岩石学报, 21(1): 169-188.
- 梅厚钧, 唐春景, 李荪蓉, 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(D 辑), 28(S2): 71-77.
- 饶红娟, 蔡逸涛, 杨献忠, 康丛轩, 石睿, 林泽渊. 2019. 贵州镇远马坪地区钾镁煌斑岩侵位模式及找矿前景[J]. 地质通报, 38(01): 76-92.
- 饶家荣. 1999. 湖南原生金刚石矿深部构造地质背景及成矿预测[J]. 湖南地质, 18(1): 21-28.
- 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.
- 宋谢炎, 侯增谦, 曹志敏, 卢纪仁, 汪云亮, 张成江, 李佑国. 2001. 峨眉大火成岩省的岩石地球化学特征及时限[J]. 地质学报, 75(4): 498-506.
- 童潜明. 1996. 沅水流域找原生金刚石工业矿床的意见[J]. 湖南地质, 15(1): 5-11.
- 王留海. 1991. 大洪山区钾镁煌斑岩的矿物特征及含矿性探讨[J]. 矿物岩石, 11(4): 51-56.
- 王取义. 1995. 江西安远莲花塘白榴黄长煌斑岩特征[J]. 江西地质, 9(4): 286-291.
- 王玉峰, 周军, 王建平, 朱成河, 杨献忠. 2019. 山东省平邑县大井头钾镁煌斑岩地质特征及金刚石含矿性[J]. 地质通报, 38(1): 93-102.
- 杨光忠, 李永刚, 张与伦, 罗邦良, 黄应均. 2019. 黔东钾镁煌斑岩分布控制因素及其侵位模式[J]. 地质通报, 38(1): 27-35.
- 杨经绥, 徐向珍, 李源, 李金阳, 巴登珠, 戎合, 张仲明. 2011. 西藏雅鲁藏布江缝合带的普兰地幔橄榄岩中发现金刚石: 蛇绿岩型金刚石分类的提出[J]. 岩石学报, 27(11): 3171-3178.
- 杨毓红, 黄艺, 刘燊, 张锡贵, 杨朝贵, 颜军, 叶春, 龚兴祥. 2021. 黔东南钾镁煌斑岩地球化学特征及指示意义[J]. 矿物学报, 41(3): 258-270.
- 张安棣. 1991. 金刚石找矿指示矿物研究及数据库[M]. 北京: 北京科技出版社: 1-162.
- 张宏福, 杨岳衡. 2007. 华北克拉通东部含金刚石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.
- 张连昌, 卢登蓉, 王淑荣, 梅厚钧. 1998. 山西大同钾镁煌斑岩地质地球化学特征[J]. 矿物岩石, 18(4): 32-38.

References:

- BERGMAN S C. 1987. Lamproites and other potassium-rich igneous rocks: a review of their occurrence, mineralogy and geochemistry[J]. Geological Society, 30(1): 103-190.
- CAI Yi-tao, XU Min-cheng, SHI Jian-bin, YANG Xian-zhong, ZHANG Jie, KANG Cong-xuan, CAO Zheng-qí, DONG Zhong-dou, MA Yu-guang. 2019. Mineral chemistry characteristics of clinopyroxene and ilmenite in basite of Lan'gan area, Anhui Province[J]. Geological Bulletin of China, 38(1): 1-13(in Chinese with English abstract).
- CHAI Feng-mei. 2001. Study on petology characteristics and ore bearing of lamporite in the southwest margin of Tarim Platfrom[D]. Urumqi: Xinjiang University(in Chinese with English abstract).
- CHEN Han-lin, YANG Shu-feng, LI Zi-long, YU Xing, LUO Jun-cheng, HE Guang-yu, LIN Xiu-bin, WANG Qing-hua.

2009. Spatial and temporal characteristics of Permian large igneous province in Tarim Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 30(2): 179-182 (in Chinese with English abstract).
- CHI Ji-shang, LU Feng-xiang, LIU Yong-shun, HU Shi-jie, ZHAO Chong-he, YE De-long, ZHENG Jian-ping, ZHAO Lei, ZHANG Hong-fu, JIANG Wan. 1996. Study on metallogenic geological conditions of primary diamond in China[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press(in Chinese).
- CHU Zhi-yuan, WANG Wei-de, LÜ Qing, LIU Wei-dong, KANG Cong-xuan, WANG Shu-xing. 2019. The formation age of the kimberlite zone in Poli area of Mengyin, Shandong Province: Zircon U-Pb dating data of diabase[J]. *Geological Bulletin of China*, 38(1): 44-50(in Chinese with English abstract).
- DAWSON J B, STEPHENS W E. 1976. Statistical classification of garnets from kimberlite and associated xenoliths: Addendum[J]. *The Journal of Geology*, 84(4): 495-496.
- DAWSON J B. 1980. Kimberlites and their xenoliths[M]. New York: Springer-Verlag: 1-252.
- DONG Bin, CHEN Ming-shan, XIAO Xiang-hui. 2006. Metallogenic geological setting and prospecting targets of primary diamond deposits in Hunan Province[J]. *Mineral Deposits*, 25(S1): 337-340(in Chinese).
- FANG Wei-xuan, HU Rui-zhong, SU Wen-chao, XIAO Jia-fei, QI Liang, JIANG Guo-hao. 2002. The emplacement age of lamproites in Zhenyuan area, Guizhou[J]. *Chinese Science Bulletin*, 47(4): 307-312(in Chinese).
- FENG Ai-ping, LIU Chuan-peng, CHU Zhi-yuan, XIA Li-xian, XIAO Bing-jian, LI Xin-feng, XU Lei-lei, ZHAO Xiu-fang. Deep Metallogenic Prediction of a Primary Diamond Deposit in Recent Ten Years in Western Shandong Province[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 42(6): 881-894(in Chinese with English abstract).
- FU Hai-tao, Wan Fang-lai, Jiang Li-li, Xu Hua, Li Yixin, Yang Lei. 2021. Geological characteristics of kimberlite in Wafangdian Diamond ore field, Liaoning province[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 42(6): 859-867(in Chinese with English abstract).
- GILL R. 2010. *Igneous Rocks and Processes*[M]. Chichester: Wiley- Blackwell.
- GOGINENI S V, MELTON C E, GIARDINI A A. 1978. Some petrological aspects of the Prairie Creek diamond-bearing kimberlite diatreme, Arkansas[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 66(3): 251-261.
- HAGGERTY S E. 1986. Diamond genesis in a multiply-constrained model[J]. *Nature*, 320(6057): 34-38.
- HUANG You-bo, ZHOU Qi-zhong, ZHANG Qi, FENG Xue-zhi, WANG Guo-qiang, ZHANG Feng-ming, CAI Yi-tao. 2019. Geochemical feature of olivine basaltic porphyrite in Tashan area of Xuzhou, Jiangsu Province, and its relation to diamond origin[J]. *Geological Bulletin of China*, 38(1): 132-142(in Chinese with English abstract).
- HUANG Yuan-cheng, SHI Rui, LIN Ze-yuan, LI Yong-gang. 2015. Discovery of lamproite tube and its prospecting significance in Cangputang of Zhenyuan, Guizhou[J]. *Guizhou Geology*, 32(1): 32-36+46(in Chinese with English abstract).
- JAQUES A L, LEWIS J D, SMITH C B, GREGORY G P, MCCULLOCH M T. 1984. The diamond-bearing ultrapotassic (lamproitic) rocks of the west kimberley region, western australia. *Developments in Petrology*, 11: 225-254.
- JIANG Wan. 1995. Mineralogical and petrological study on lamproites in Zhenyuan area, Guizhou[J]. *Geoscience*, 9(3): 351-358(in Chinese with English abstract).
- LE Maitre R W. 2005. *Igneous rocks: A classification and glossary of terms*(2nd edition)[M]. Cambridge: Cambridge University Press: 16-17.
- LI Chang-nian. 1991. Geochemical properties of several diamond-bearing rock series and related rocks[J]. *Geological Science and Technology Information*, 10(S1): 85-96(in Chinese).
- LI You-guo, MO Xuan-xue, ZHAO Chong-he. 1991. Geology and petrology of lamproite in Cailiangshan aera, Datong Shanxi Province[J]. *Geological Science and Technology Information*, 10(S1): 29-36(in Chinese with English abstract).
- LI You-zhi, ZHAO Lei, HE Ming-yue, PARAT Abdulkadir, LI Jian-zhe. 2000. Petrology features and significance of lamproite in Keliyang, West Kunlun aera[J]. *Geoscience*, 14(4): 385-391(in Chinese with English abstract).
- LI Zi-yun, MA Wen-yun. 1993. Geological feature of Yunyingwo lamproite in Ningxiang[J]. *Hunan Geology*, 12(4): 221-225(in Chinese with English abstract).
- LIN Wei-peng, QIU Zhi-li, DONG Bin, LIANG Wei-zhang, CHEN Hua, LI Zi-yun, CHEN Bing-hui, LI Liu-fen. 2011. Geochemistry and U-Pb dating of heavy mineral zircons and their significance in lamproites and associated rocks from Ningxiang, Hunan Province[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 50(3): 105-111(in Chinese with English abstract).
- LIN Wei-peng, QIU Zhi-li, LI Zi-yun, CHEN Bing-hui, LI Liu-fen, GONG Sheng-wei. 2009. Lithogeochemical characteristics of No. 5 pipe-like lamprophyre in Ningxiang, Hunan province[J]. *Resources Survey & Environment*, 30(3): 180-187(in Chinese with English abstract).
- LIU Guan-liang, WANG Xiong-wu, LV Xue-miao. 1993. Lamproite in Dahongshan area[M]. Beijing: Geological Publishing House: 186(in Chinese).
- LUO Hui-wen, YANG Guang-shu. 1989. The characteristics of lamproite in Zhenyuan area, Guizhou[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 8(2): 97-109(in Chinese with English abstract).
- MA Da-quan, ZHAO Zi-jie, XU Tao, LU Deng-rong. 1983. Petrographic characteristics of mica kimberlite and associated alkalalic ultrabasic rocks in Maping, Guizhou[C]// *Proceedings of Yichang Institute of Geology and Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences*. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- MA Da-quan. 1980. Comparative study on the magulogaratite from

- the Kimberley pluton in eastern China and discussion on its formation conditions[C]//Proceedings of Yichang Institute of Geology and Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- MAO Jing-wen, XIE Gui-qing, ZHANG Zuo-heng, LI Xiao-feng, WANG Yi-tian, ZHANG Chang-qing, LI Yong-feng. 2005. Mesozoic large-scale metallogenic pulses in North China and corresponding geodynamic settings[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 169-188(in Chinese with English abstract).
- MEI Hou-jun, TANG Chun-jing, LI Sun-rong, LI Yong-ming, ZHANG Xing-chun, LU Deng-rong, ZHANG Lian-chang. 1998. Formation of lamproite, kimberlite and diamond deposits in China[J]. *Science in China (Series D)*, 28(S2): 71-77(in Chinese).
- MITCHELL R H, BERGMAN S C. 1991. *Petrology of lamproites*[M]. New York: Plenum press.
- PRIDER R T. 1959. The leucite lamproites of the Fitzroy Basin, Western Australia[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 6(2): 71-118.
- RAO Hong-juan, CAI Yi-tao, YANG Xian-zhong, KANG Cong-xuan, SHI Rui, LIN Ze-yuan. 2019. Emplacement model and ore-search prospect of lamproite in Maping, Zhenyuan, Guizhou[J]. *Geological Bulletin of China*, 38(01): 76-92(in Chinese with English abstract).
- RAO Jia-rong. 1999. Deep structural geology setting and metallogenic forecasting of primary diamond in Hunan[J]. *Hunan Geology*, 18(1): 21-28(in Chinese with English abstract).
- 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: 355-421.
- SONG Rui-xiang. 2013. *Diamond deposits in China: Prospecting and development of diamond deposits in China*[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- SONG Xie-yan, HOU Zeng-qian, CAO Zhi-min, LU Ji-ren, WANG Yun-liang, ZHANG Cheng-jiang, LI You-guo. 2001. Geochemical characteristics and period of the Emei igneous province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 75(4): 498-506(in Chinese with English abstract).
- The 7th Institute of Geology and Mineral Exploration of Shandong Province. 2011. Research report on the potential evaluation and prospecting direction of diamond resources in Pingyi-Feixian area, Shandong Province[R]. Linyi: The 7th Institute of Geology and Mineral Exploration of Shandong Province(in Chinese).
- TONG Qian-ming. 1996. Suggestions of searching primary diamond deposit with industrial value along Yuanjinag River[J]. *Hunan Geology*, 15(1): 5-11(in Chinese with English abstract).
- WADE A, PRIDER R T. 1940. The leucite-bearing rocks of the West Kimberley area, Western Australia[J]. *Quarterly Journal of the Geological Society*, 96(1-4): 39-NP.
- WANG Liu-hai. 1991. Characteristics of minerals and ore-bearing ability in lamproites of mountain Dahongshan district[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 11(4): 51-56(in Chinese).
- WANG Qu-yi. 1995. The features of Lianhuatang leucititic alnoite in Anyuan Country, Jiangxi[J]. *Jiangxi Geology*, 9(4): 286-291(in Chinese with English abstract).
- WANG Yu-feng, ZHOU Jun, WANG Jian-ping, ZHU Cheng-he, YANG Xian-zhong. 2019. A discussion on geological characteristics and diamond ore-bearing potentiality of the Dajingtou lamporphite, Pingyi County, Shandong Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 38(1): 93-102(in Chinese with English abstract).
- YANG Guang-zhong, LI Yong-gang, ZHANG Yu-lun, LUO Bang-liang, HUANG Ying-jun. 2019. Distribution-controlling factors and emplacement mode of lamproite in southeastern Guizhou Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 38(1): 27-35(in Chinese with English abstract).
- YANG Jing-sui, XU Xiang-zhen, LI Yuan, LI Jin-yang, BA Deng-zhu, RONG He, ZHANG Zhong-ming. 2011. Diamonds recovered from peridotite of the Purang ophiolite in the Yarlung-Zangbo suture of Tibet: A proposal for a new type of diamond occurrence[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(11): 3171-3178(in Chinese with English abstract).
- YANG Yu-hong, HUANG Yi, LIU Shen, ZHANG Xi-gui, YANG Chao-gui, YAN Jun, YE Chun, GONG Xing-xiang. 2021. Geochemical characteristics of lamproites in Southeastern Guizhou and their indicative significances[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 41(3): 258-270(in Chinese with English abstract).
- ZARTMAN R E. 1977. Geochronology of some alkalic rock provinces in eastern and central United-States[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 5(1): 257-286.
- ZHANG An-di. 1986. *Research and database of diamond prospecting indicator minerals*[M]. Beijing: Beijing Science and Technology Press: 1-162(in Chinese).
- ZHANG Hong-fu, YANG Yue-heng. 2007. Emplacement age and Sr-Nd-Hf isotopic characteristics of the diamondiferous kimberlites from the eastern North China Craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 285-294(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Lian-chang, LU Deng-rong, WANG Shu-rong, MEI Hou-jun. 1998. Geological and geochemical characteristics of lamprophyre in Datong, Shanxi[J]. *Mineralogy and Petrology*, 18(4): 32-38 (in Chinese with English abstract).