

沅江辰溪地区河流碎屑石榴子石地球化学特征 及其对湖南原生金刚石找矿的启示

马 瑛^{1,2}, 丘志力^{1,3}, 邓小芹¹, 陆太进⁴, 杨 瀚¹, 庄郁晴¹

(1. 中山大学 地球科学与工程学院 广东省地球动力作用与地质灾害重点实验室 广东省地质过程与矿产资源探查重点实验室, 广东 广州 510275; 2. 自然资源部 珠宝玉石首饰管理中心 深圳珠宝研究所, 广东 深圳 518001; 3. 桂林理工大学 地球科学学院, 广西隐伏金属矿产勘查重点实验室, 广西 桂林 541006; 4. 自然资源部 珠宝玉石首饰管理中心 北京珠宝研究所, 北京 100013)

摘 要: 湖南沅江是我国砂矿金刚石的重要产地, 石榴子石和金刚石是砂矿中常见的重矿物, 与金刚石相关的石榴子石特征研究, 对揭示湖南砂矿金刚石的来源与形成条件有重要意义。本文随机选取湖南沅江辰溪地区金刚石砂矿中 160 粒碎屑石榴子石和 5 粒金刚石包裹体中的石榴子石, 采用矿物学、地球化学并借鉴统计学方法对它们进行了分析比较。结果显示, 碎屑石榴子石主要为铁铝-锰铝榴石系列, 其中个别石榴子石含有金刚石包裹体。聚类分析、线性判别、逻辑回归分析计算显示, 部分 G3 榴辉岩型石榴子石与金刚石可能具有成生联系。同时, 两个采集地点的石榴子石类型、主微量元素具有一定的差异, 其中一个地点的石榴子石样品 DJZ-7-1 具有与金刚石更强的亲缘性。基于本文碎屑石榴子石 Si 值大于 3.02 以及前人对湖南金刚石限定的温压条件进行分析, 认为湖南金刚石可能形成于深度小于 220 km 的橄榄岩-榴辉岩混杂区, 该区域系钾镁煌斑岩型金刚石来源的优势区域。据此, 建议可在辰溪赤岩村河段上游区域进一步寻找幔源 G3 型石榴子石以及钾镁煌斑岩, 以期发现原生金刚石矿床。

关键词: 金刚石; 碎屑石榴子石; 地球化学分析; 找矿; 湖南

中图分类号: P619. 24⁺1; P578. 94⁺7

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2021)06-1116-15

Geochemical characteristics of fluvial detrital garnet in Chenxi area of Yuanjiang River and its inspiration for diamond prospecting, Hunan Province

MA Ying^{1,2}, QIU Zhi-li^{1,3}, DENG Xiao-qin¹, LU Tai-jin⁴, YANG Han¹ and ZHUANG Yu-qing¹

(1. Guangdong Key Laboratory of Geodynamic and Geological Hazards, Guangdong Key Laboratory of Geological Process and Mineral Resources Exploration, School of Earth Science and Engineering of Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 2. NGTC Gems & Jewelry Institute of Shenzhen, Shenzhen 518001, China; 3. Guangxi Key Laboratory of Hidden Metallic Ore Deposits Exploration, College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China; 4. NGTC Gems & Jewelry Institute of Beijing, Beijing 100013, China)

Abstract: Yuanjiang River is an important source of diamond placer in Hunan Province, where the garnet and diamond are common heavy minerals in placer. It is of great significance for revealing the source and formation condi-

收稿日期: 2021-03-22; 接受日期: 2021-05-06; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 国家自然科学基金项目(42073008, 41473030)

作者简介: 马 瑛(1984-), 女, 博士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: maying23@mail2.sysu.edu.cn; 通讯作者: 丘志力(1963-), 男, 教授, 主要从事岩石学的教学与研究, E-mail: qiuzhili@mail.sysu.edu.cn。

网络首发时间: 2021-06-07; 网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1966.P.20210607.1119.002.html>

tions of diamond placer in Hunan Province to analyze and screen garnets related to diamond. In this paper, detrital garnets (160 grains, 80 grains of DJZ-7-1 sample and 80 grains of DJZ-10-1 sample) in Chenxi area of Yuanjiang River, and inclusion garnets in diamond (5 grains) in Hunan Province were selected and analyzed by mineralogical, geochemical and statistical methods. The results show that the fluvial detrital garnets are mainly Fe-Al and Mn-Al garnet series, a few of them contain diamond inclusions. Cluster analysis, linear discriminant analysis and logistic regression analysis indicate that some G3 eclogite garnets may have genetic relationship with diamonds. Major and trace elements are certain differences between the two sites; analysis result shows that the garnets of DJZ-7-1 samples are more closely related to diamond. Based on the analysis of the Si value of detrital garnets (>3.02) and the limited temperature and pressure conditions of Hunan diamond in previous study, it is considered that Hunan diamond may be formed in the mixing area of peridotite and eclogite with a depth of less than 220 km, which is the dominant source area of lamproite-type diamond. Therefore, it is suggested that G3 garnet and lamproite should be further searched in the upper part of Chenxi, Yuanjiang River, in order to prospect the primary diamond deposits in Hunan Province.

Key words: diamond; detrital garnet; geochemical characteristics analysis; prospecting; Hunan Province

Fund support: National Natural Scienced Foundation of China(42073008, 41473030)

自20世纪70年代起,前人陆续在湖南洞庭—武陵衔接地带白垩纪红层、会同一覃板新元古代冰期长安组地层、宁乡钾镁煌斑岩、沅江河流砂砾层中发现金刚石及其指示性矿物,但至今未发现原生金刚石矿床(章人骏, 1985; 李子云等, 1993; 张培元, 1998; 宋瑞祥, 2013; 肖书阅等, 2018; 康从轩等, 2019)。研究表明,扬子克拉通内部广泛分布着未出露的太古宙基底(Zheng *et al.*, 2006a; 向璐等, 2019; 杨瀚等, 2020),具备金刚石成矿的基本条件,其中沅水流域辰溪地区是贵阳—怀化深大断裂北东向延伸段,曾被认为是湖南金刚石原生矿的远景区(刘智武, 1987)。

石榴子石是寻找金刚石最重要的指示矿物(Stachel and Harris, 2008; Kueter *et al.*, 2016; Zhu *et al.*, 2019),碎屑石榴子石地球化学特征可以指示其母岩性质(黄鑫等, 2019; 洪东铭等, 2020),利用石榴子石包裹体(与橄榄石、辉石等共生矿物对)的化学组成可以估算寄主矿物(如金刚石)的形成条件(陆琦等, 2012; 丘志力等, 2014)。地幔来源的石榴子石与金刚石的形成关系密切(张宏福等, 2000; Stachel and Harris, 2008; Hardman *et al.*, 2018),寻找地幔来源的高Cr石榴子石(G10)一直是金刚石找矿的重点之一,贵州镇远马坪“东方一号”金刚石原生矿岩体就是通过追索马坪小溪重砂镁铝榴石而发现的,国际上也有许多通过高Cr石榴子石的溯源辅助寻找大型原生矿的案例(肖书阅等, 2018; 杨光忠等, 2019)。

通过碎屑石榴子石的元素含量统计对金刚石溯源的方法,大致可归纳为“无监督学习”与“监督学习”两类。“无监督学习”方法有主成分分析(PCA)、聚类分析(CA)等;“监督学习”方法有线性分析(LDA)、逻辑回归(LR)、回归树(CART)等。不同的方法各有特点,但均可为金刚石找矿提供重要线索(Sobolev *et al.*, 1973; Dawson and Stephens, 1975; Griffin *et al.*, 2002; Schulze, 2003; Grütter *et al.*, 2004; Stachel and Harris, 2008; Hastie *et al.*, 2009; Krippner *et al.*, 2014; Hardman *et al.*, 2018)。本文尝试选用湖南沅江流域辰溪地区的河流碎屑石榴子石进行矿物学、地球化学的统计分析,以期建立该区域碎屑石榴子石与湖南原生金刚石、含矿寄主岩体之间可能存在的联系,从而探讨河流碎屑石榴子石对湖南原生金刚石找矿的启示。

1 区域地质概况

研究区域位于扬子克拉通江南造山带雪峰山脉北侧,属于扬子克拉通中南边缘隆起带(刘智武, 1987; 盛学庸, 2012),目前扬子克拉通内已发现的金刚石矿主要分布在江南造山带及其附近。江南造山带由扬子地块和华夏地块经历晋宁期增生、碰撞造山形成,是稍晚于 Grenville 期造山事件的新元古代造山带,很可能是显生宙成岩—成矿作用的重要物源(王孝磊等, 2017; 黄建中等, 2020)(图1a)。

研究区地质历史上可能经历了2.1~1.8 Ga 期

间 Columbia 超大陆的聚合过程、Rodinia 超大陆的汇聚(1.0~0.82 Ga)(张国伟等, 2013)、Rodinia 超大陆的裂解以及晋宁、加里东、印支、燕山和喜山等多阶段构造改造,构造复杂,岩浆活动频繁。

研究区域内出露的地层包括前震旦系、下震旦统、寒武至奥陶系、白垩系和第四系。前震旦系主要由新元古代冷家溪群和板溪群组成,冷家溪群为一套岩屑杂砂岩、石英杂砂岩夹板岩、砂质粉砂岩;板溪群主要为粘土碎屑岩复理石建造(章人骏, 1985)。下震旦统存在两套冰碛层,上冰碛层南沱组分布较广,下冰碛层(长安组)仅分布于贵阳至怀化

一线以南。寒武至奥陶系在区内亦有较广泛分布(贺灌之, 1984),主要是奥陶系黑色页岩、板岩及上覆整合接触的一套含笔石的粉砂质板岩、炭质板岩、硅质板岩和硅质岩组合,贵州发现的金刚石寄主岩体主要赋存于寒武—奥陶系中(刘智武, 1987)。江南造山带缺失泥盆系至中下石炭统,说明加里东—华力西期存在长期隆起作用(涂建, 2016)。白垩系红色碎屑岩系广布于沅麻盆地及桃源—常德地区(贺灌之, 1984)。第四纪在沅江流域有9级阶地的粘土砂砾层的沉积(刘智武, 1987)。金刚石砂矿(点)以及主要出产地的分布见图1b。

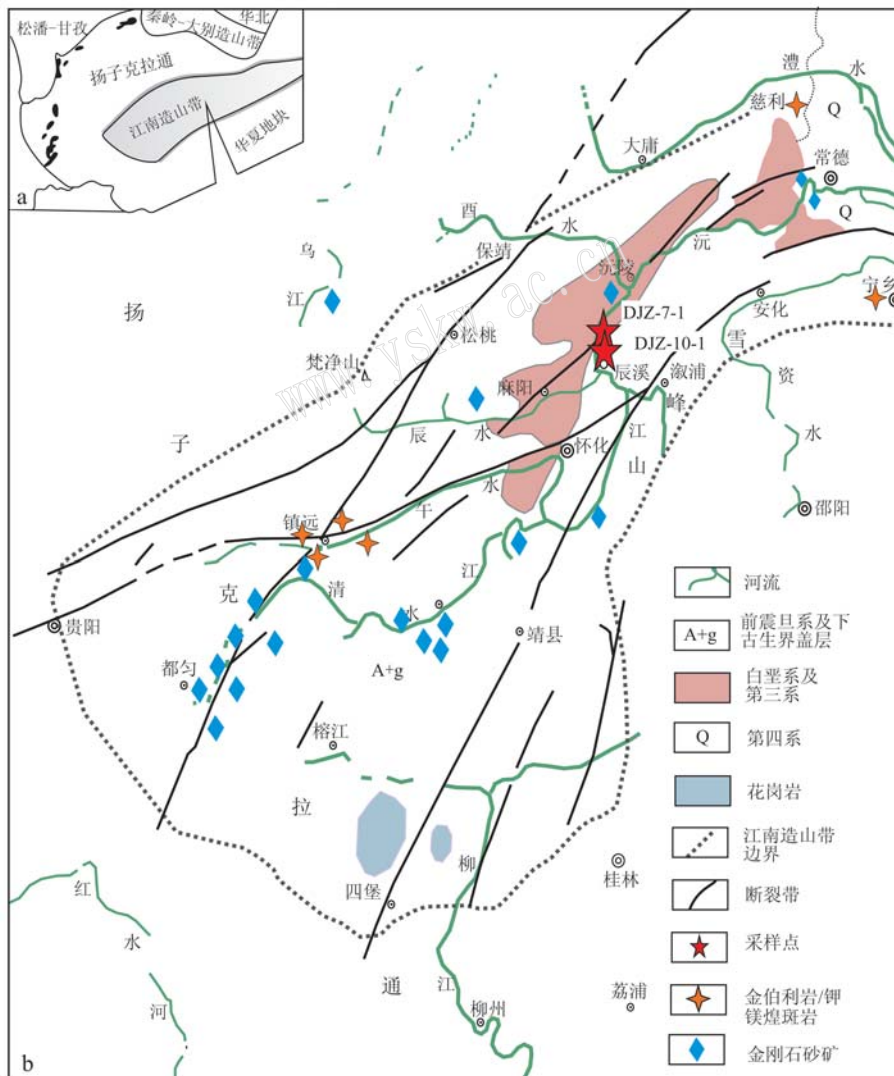


图1 江南造山带位置简图[a, 据王孝磊等(2017)修改]和沅江流域地质构造略图[b, 据刘智武(1987)修改]
Fig. 1 Location of the Jiangnan orogenic belt(a, modified from Wang Xiaolei *et al.*, 2017) and geological sketch of Yuanjiang River area (b, modified from Liu Zhiwu, 1987)

金刚石砂矿位置分布根据刘智武(1987)、孙士军等(1998)、饶家荣(1999)、张令明等(2007)、饶家荣等(2012)、宋瑞祥(2013)、张蓓莉等(2013)圈定

the distribution of diamond placer modified after Liu Zhiwu, 1987; Sun Shijun *et al.*, 1998; Rao Jiarong, 1999; Zhang Lingming *et al.*, 2007; Rao Jiarong *et al.*, 2012; Song Ruixiang *et al.*, 2013; Zhang Beili *et al.*, 2013

2 采样及测试方法

本文在湖南沅江辰溪地区用采砂船从河床中采集砂样,并通过重砂分离获得石榴子石、钛铁矿、尖晶石等矿物。矿物种类与前人在湖南桃江地区水系中发现的重砂矿物种类(康丛轩等, 2019)相似。本次砂样共分选出大于 30 mg 的碎屑石榴子石,根据采样地点不同其编号分别为 DJZ-7-1(湖南怀化市芦溪赤岩村砂场采点)和 DJZ-10-1(沅江流域主流砂矿混合样)。

采用中山大学地球科学与工程学院的基恩士 VHX-5000(日本)的反射、透射与环形光照明系统对样品进行放大观察与拍照。

样品重砂筛选在广州市拓岩测试有限公司进行,经过淘洗、称重、筛分、缩分、磁选及重液分离等程序,从河砂中利用重选和磁选的方法逐步分选出石榴子石等重矿物。随机选择石榴子石用环氧树脂和固化剂混合胶结,之后抛光,对含有包裹体的石榴子石,抛光过程中尽力保存包裹体。

将粒径为 50~200 μm 的石榴子石制靶,然后将其特征包裹体磨至表面,包裹体大小为 1~60 μm 。采用国家珠宝玉石质量监督检验中心深圳实验室的 Renishaw-inVia(英国)、中山大学地球科学与工程学院的 Thermo Scientific DXR 2xi(美国)对样品进行显

微激光拉曼原位分析,最佳光谱分辨率为 1 cm^{-1} ,束斑直径为 1 μm ,扫描范围为 50~2 000 cm^{-1} ,曝光时间为 1~10 s,扫描次数为 1~3 次,激光器波长: 532 nm、633 nm、785 nm。

样品的原位主量元素分析采用中国冶金地质总局山东局测试中心的日本电子 JXA-8230 电子探针(EMPA)进行,电压为 15 kV,电流为 20 nA,束斑直径为 10 μm 。

样品微量元素分析采用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)法,在中国冶金地质总局山东局测试中心的 X Series2 四极杆 ICP-MS(美国)和 Compex Pro 102F 深紫外(DUV)193 nm ArF 准分子(excimer)激光剥蚀系统(德国)上完成,光斑 30 μm ,激光频率为 10 Hz,每 5~10 个样品点测试一次标样(李凤春等, 2016),采用软件 ICPMSDataCal 对数据进行离线处理,采用 ^{29}Si 做为内标、国际标准样品 NIST SRM610 与 NIST SRM612 为外标进行矿物中元素的测定。

3 测试结果

3.1 石榴子石的形貌特征

碎屑石榴子石样品 95% 以上为红色、橙色、粉色,少数为浅粉、浅黄色,未发现紫色,粒径约为 0.07~0.22 mm(图 2)。约大于 20% 的样品具有菱形十二

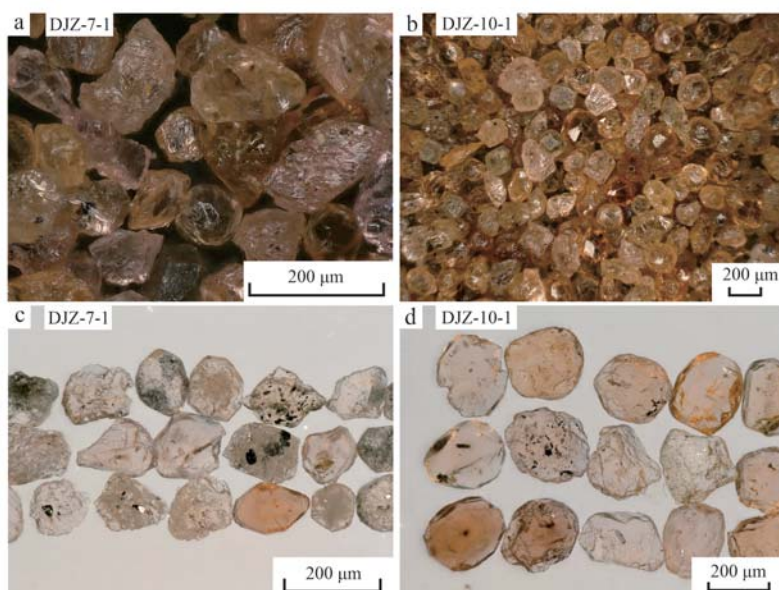


图 2 湖南沅江辰溪地区碎屑石榴子石特征

Fig. 2 Characteristics of detrital garnet in Chenxi area of Yuanjiang River, Hunan Province

a, b—制靶前图片; c, d—制靶后图片

a, b—detrital garnets; c, d—detrital garnets on the target

面体-六八面体晶形,表面较光滑,少数可见晶面条纹。部分石榴子石内含大量包裹体,个别石榴子石表面具毛玻璃状、坑洞状、皱纹状、鲕状等熔蚀现象。大部分石榴子石具有平整残余晶面并且表面未见溶蚀现象,具有地壳来源的形态和表面微形貌特征(邓小芹, 2018),据此推测它们可能来源于地壳。

放大观察与显微拉曼测试表明,这些碎屑石榴子石中含有多种矿物(原生/同生、次生)包裹体。原生/同生包裹体通常具有一定的晶形,次生包裹体通常呈脉状。本文确认的原生/同生包裹体有金刚石、锆石、云母、磷灰石、金红石、红柱石等;次生包裹体有石英、绿帘石等,反射光下可见石英在石榴子石中呈细脉状分布,绿帘石分布在石榴子石表面裂隙处呈填隙状(图3)。这些石榴子石与金刚石同时出现在含金刚石河砂中,在其中1粒碎屑石榴子石

(DJZ-7-1-D)内部发现了金刚石包裹体(图3),该石榴子石为橙色,具有碎裂状、毛玻璃状、坑洞状特征,具有地幔来源石榴子石特征(邓小芹, 2018),证实了这批碎屑石榴子石与金刚石有一定的成因联系。

3.2 石榴子石地球化学特征

3.2.1 主量元素特征

本文对湖南沅江辰溪地区160粒河流碎屑石榴子石进行了主量元素分析,部分结果见表1。同时,借鉴前人“无监督学习”聚类分析(CA)与“监督学习”线性分析(LDA)(Hardman *et al.*, 2018)、逻辑回归(LR)方法进行分析。

主量元素测试结果表明,湖南沅江辰溪地区河流碎屑石榴子石主要是Fe-Al与Mn-Al系列,缺少贵州马坪地区金刚石寄主岩体中的富铬镁铝榴石(池际尚等, 1996; 宋瑞祥, 2013; 邓小芹, 2018)。不同类型的石榴石对识别其寄主岩体类型具有重要的指示意义,根据不同的母岩类型,该区域河流碎屑石榴子石可进一步细分为G0、G4、G3等类型,它们分别具有不同的 Cr_2O_3 和CaO含量(Sobolev *et al.*, 1973; Grütter *et al.*, 2004)。在 Cr_2O_3 -CaO图(图4a)中,本文样品总体表现为 Cr_2O_3 含量低,CaO含量低到高,全部分布在 $\text{Cr}_2\text{O}_3 < 2\%$ 的榴辉岩型(E型)石榴子石区域内。DJZ-7-1主要为G0、G4、G3型石榴子石,DJZ-10-1主要为G0、G4型石榴子石。湖南砂矿金刚石中包裹体石榴子石(共5粒,部分单粒石榴子石测试了两个点)主要是G10、G0、G3型。石榴子石包裹体G0区域与碎屑石榴子石G0区域重叠。不同地区与金刚石相关的石榴子石样品投点结果显示,金伯利岩中捕虏晶石榴子石多分布在方辉橄榄岩-二辉橄榄岩-榴辉岩型($\text{CaO} = 3\% \sim 13\%$)的区域,而钾镁煌斑岩中捕虏晶石榴子石一般集中在二辉橄榄岩-榴辉岩型的区域(图4a),CaO含量分布(CaO 多处于 $0\% \sim 20\%$ 的区间)较金伯利岩型宽。辰溪地区河流碎屑石榴子石和我国其它地区与金刚石相关的石榴子石相比,显示出与榴辉岩的关系更为密切。

$\text{Ca}/(\text{Ca} + \text{Mg}) - \text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{\text{T}})$ 图解(Schulze, 2003)投点结果显示,湖南沅江辰溪地区砂矿中的碎屑石榴子石大部分来源于地壳,与其它地区金伯利岩捕虏晶石榴子石的地幔来源具有明显差异(图4b)。该方法未对金刚石中石榴子石包裹体进行分类,同时也没有考虑 $\text{Cr}_2\text{O}_3 < 1\%$ 的榴辉岩型石榴子石地壳/地幔来源。为进一步对其壳/幔来源判别,本文对碎屑石榴子石及湖南金刚石中包裹体石榴子石

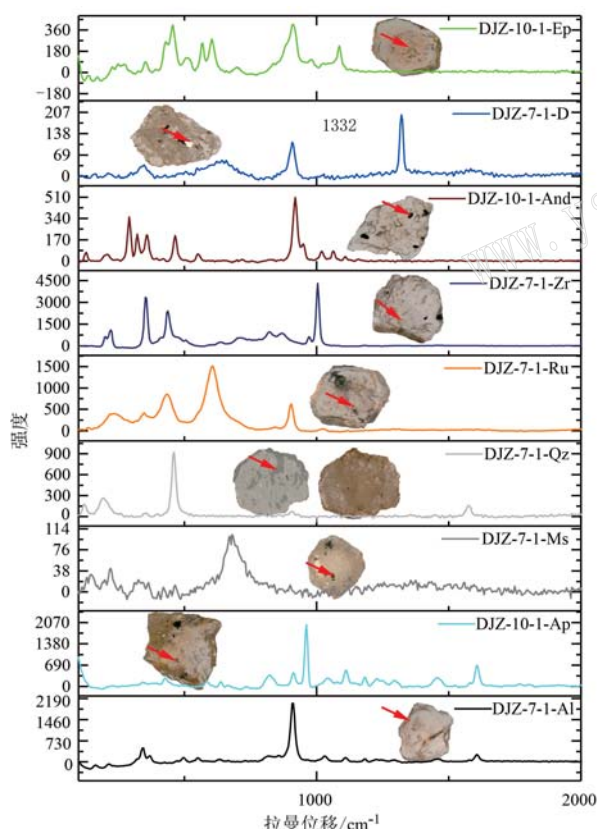


图3 沅江流域金刚石砂矿中碎屑石榴子石包裹体拉曼光谱特征

Fig. 3 Raman characteristics of detrital garnet inclusions of Yuanjiang area, Hunan Province

Ep—绿帘石; D—金刚石; And—红柱石; Zr—锆石; Ru—金红石; Qz—石英; Ms—白云母; Ap—磷灰石; Al—钠长石
Ep—epidote; D—diamond; And—andalusite; Zr—zircon; Ru—rutile; Qz—quartz; Ms—muscovite; Ap—apatite; Al—albite

表 1 湖南金刚石砂矿中部分碎屑石榴子石主量元素含量
Table 1 Compositions of major elements of garnets in Hunan diamond placer

序号	分析点位	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO _T	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	NiO	Total	序号	分析点位	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO _T	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	NiO	Total
1	DJZ-7-1-01	36.76	0.01	20.47	25.05	15.83	1.15	0.94	0.04	<0.01	<0.01	0.01	100.25	27	DJZ-7-1-55	36.48	0.05	20.40	28.82	12.85	0.76	0.22	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	99.60
2	DJZ-7-1-02	36.56	0.09	20.40	23.29	18.88	0.62	0.45	0.02	0.01	<0.01	<0.01	100.31	28	DJZ-7-1-56	36.64	0.12	20.35	24.60	17.95	0.37	0.19	0.02	<0.01	<0.01	<0.01	100.23
3	DJZ-7-1-03	36.26	0.03	20.50	28.58	12.93	0.56	0.38	0.02	0.02	<0.01	<0.01	99.28	29	DJZ-7-1-57	39.11	<0.01	21.75	29.10	0.44	9.49	0.86	0.01	0.01	0.02	<0.01	100.78
4	DJZ-7-1-04	36.86	<0.01	20.66	34.42	5.45	1.55	2.01	<0.01	0.02	0.02	<0.01	100.99	30	DJZ-7-1-58	36.52	0.06	20.46	25.65	17.14	0.36	0.18	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	100.37
5	DJZ-7-1-05	36.42	<0.01	20.34	17.60	25.25	0.12	0.33	<0.01	<0.01	0.01	0.01	100.08	31	DJZ-7-1-59	36.33	0.05	20.52	26.23	16.21	0.35	0.19	0.02	0.00	<0.01	0.02	99.93
6	DJZ-7-1-06	36.61	<0.01	20.48	29.46	11.69	0.68	1.35	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	100.29	32	DJZ-7-1-60	36.37	0.01	20.33	25.04	16.90	0.25	0.51	0.02	0.01	<0.01	0.01	99.45
7	DJZ-7-1-07	37.59	0.02	20.80	18.52	11.12	0.51	11.43	0.02	0.02	0.02	<0.01	100.03	33	DJZ-7-1-61	37.13	0.02	20.50	15.22	22.61	1.50	1.94	0.01	0.01	<0.01	0.02	98.95
8	DJZ-7-1-08	36.97	0.05	20.51	28.57	12.02	1.42	1.03	0.02	0.01	<0.01	<0.01	100.59	34	DJZ-7-1-62	37.11	0.01	19.44	14.71	22.94	0.68	3.89	0.04	<0.01	<0.01	<0.01	98.82
9	DJZ-7-1-09	36.22	0.06	20.38	28.23	14.11	0.64	0.38	0.02	<0.01	<0.01	<0.01	100.03	35	DJZ-7-1-63	36.68	0.08	20.16	28.80	13.02	0.79	0.57	0.03	0.02	0.01	<0.01	100.17
10	DJZ-7-1-10	36.47	0.06	19.87	20.80	21.56	0.59	0.30	0.04	0.01	0.01	<0.01	99.72	36	DJZ-7-1-64	36.42	<0.01	20.66	26.14	15.28	0.28	0.44	0.05	<0.01	0.00	<0.01	99.28
11	DJZ-7-1-11	37.31	0.11	20.28	12.63	26.07	0.44	2.92	0.04	<0.01	0.03	0.04	99.87	37	DJZ-7-1-65	36.68	0.12	20.43	21.05	20.69	0.42	0.61	0.02	0.03	0.03	0.01	100.07
12	DJZ-7-1-12	36.06	0.04	20.08	22.88	19.48	0.24	0.34	0.01	0.01	<0.01	<0.01	99.12	38	DJZ-7-1-66	36.76	0.04	20.43	25.36	15.94	1.07	0.79	<0.01	<0.01	0.02	<0.01	100.41
13	DJZ-7-1-13	36.75	0.01	20.48	31.76	10.76	0.78	0.21	0.02	<0.01	<0.01	<0.01	100.77	39	DJZ-7-1-67	36.08	0.04	20.43	21.24	21.19	0.28	0.08	0.03	0.01	0.01	<0.01	99.36
14	DJZ-7-1-14	36.24	0.12	20.12	25.02	17.65	0.32	0.22	0.02	<0.01	<0.01	<0.01	99.71	40	DJZ-7-1-68	36.83	<0.01	20.51	32.14	10.96	0.38	0.24	0.02	<0.01	<0.01	<0.01	101.08
15	DJZ-7-1-15	36.96	0.05	20.33	17.26	18.28	0.52	5.89	0.02	<0.01	<0.01	0.01	99.31	41	DJZ-7-1-69	37.73	0.09	20.96	19.93	17.43	1.91	2.44	0.01	<0.01	0.04	<0.01	100.54
16	DJZ-7-1-16	38.06	<0.01	20.79	31.00	2.05	4.72	4.19	0.01	<0.01	0.02	<0.01	100.83	42	DJZ-7-1-70	37.26	0.05	20.88	31.44	8.35	1.37	1.55	0.01	0.02	0.02	<0.01	100.95
17	DJZ-7-1-17	36.32	0.21	20.28	18.92	22.96	0.14	0.32	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	99.16	43	DJZ-7-1-71	37.59	0.10	20.55	14.47	23.41	1.45	2.89	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	100.46
18	DJZ-7-1-18	36.40	0.04	20.33	28.03	13.29	1.19	0.63	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	99.9	44	DJZ-7-1-72	36.45	0.02	20.65	24.57	16.21	0.32	0.42	0.07	<0.01	<0.01	<0.01	98.69
19	DJZ-7-1-19	36.34	0.03	20.36	27.98	14.09	0.78	0.37	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	99.95	45	DJZ-7-1-73	38.98	0.03	21.71	30.28	0.57	8.21	1.24	0.01	<0.01	0.04	<0.01	101.07
20	DJZ-7-1-20	36.17	<0.01	20.34	20.32	21.81	0.20	0.05	0.02	<0.01	<0.01	<0.01	98.92	46	DJZ-7-1-74	38.53	<0.01	21.38	25.89	0.47	3.39	11.27	<0.01	<0.01	0.02	<0.01	100.94
21	DJZ-7-1-21	36.61	0.01	20.38	23.09	18.98	0.28	0.36	<0.01	0.02	<0.01	<0.01	99.73	47	DJZ-7-1-75	37.42	0.04	20.42	19.40	19.54	0.85	2.34	0.02	<0.01	0.01	<0.01	100.03
22	DJZ-7-1-22	36.55	0.04	20.38	25.02	16.74	0.51	0.66	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	99.90	48	DJZ-7-1-76	37.46	0.02	20.74	30.03	8.89	1.30	2.57	<0.01	0.01	0.01	<0.01	101.03
23	DJZ-7-1-23	36.27	0.13	20.27	26.10	16.42	0.31	0.40	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	99.92	49	DJZ-7-1-77	36.46	0.03	20.54	33.39	9.67	0.58	0.13	<0.01	0.01	<0.01	0.01	100.81
24	DJZ-7-1-24	36.37	0.04	19.99	23.74	17.56	0.44	1.12	0.02	<0.01	<0.01	<0.01	99.28	50	DJZ-7-1-78	37.57	0.30	20.59	1.50	30.14	0.90	7.89	<0.01	0.01	0.03	<0.01	98.91
25	DJZ-7-1-25	36.86	<0.01	20.70	30.73	10.50	1.36	0.40	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	100.55	51	DJZ-7-1-79	36.60	<0.01	20.70	17.43	24.52	0.44	0.28	0.03	<0.01	<0.01	<0.01	100.00
26	DJZ-7-1-26	36.42	0.03	19.59	21.56	18.83	0.43	2.23	0.06	<0.01	<0.01	<0.01	99.15	52	DJZ-7-1-80	37.18	0.18	20.46	9.50	29.48	0.48	2.35	0.01	<0.01	0.01	0.01	99.65

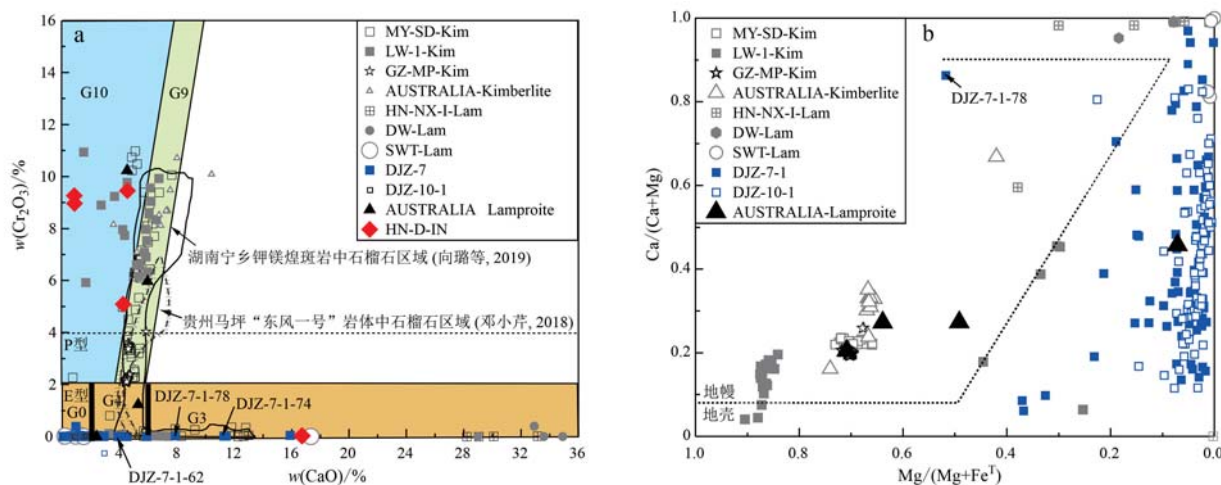


图4 与金刚石相关的石榴子石 Cr_2O_3 - CaO (a) 与 $\text{Ca}/(\text{Ca}+\text{Mg})$ - $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}^{\text{T}})$ (b) 投影图(参照 Sobolev *et al.*, 1973; Schulze, 2003; Grütter *et al.*, 2004)

Fig. 4 Cr_2O_3 - CaO (a) and $\text{Ca}/(\text{Ca}+\text{Mg})$ - $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}^{\text{T}})$ (b) plots for garnet related to diamond(after Sobolev *et al.*, 1973; Schulze, 2003; Grütter *et al.*, 2004)

MY-SD-Kim—山东蒙阴金伯利岩中石榴子石(Wang *et al.*, 2000; Zheng *et al.*, 2006b); LW-1-Kim—辽宁瓦房店金伯利岩中石榴子石(Zhu *et al.*, 2019); GZ-MP-Kim—贵州马坪金伯利岩中石榴子石(向璐等, 2019); HN-NX-1-Lam—湖南宁乡钾镁煌斑岩中石榴子石; DW-Lam—湖南常德洞湾钾镁煌斑岩中石榴子石; SWT-Lam—上五通白垩纪红层中石榴子石(林伟鹏, 2007); HN-D-IN—湖南砂矿金刚石中包裹体石榴子石(郭九皋, 1989; 张蓓莉等, 2013; 邓小芹, 2018); AUSTRALIA-Kimberlite—澳大利亚西部金伯利岩中的石榴子石; AUSTRALIA-Lamproite—澳大利亚西部钾镁煌斑岩中的石榴子石(Lucas *et al.*, 1989; Jaques *et al.*, 1989, 1990; Ramsay *et al.*, 1992)

MY-SD-Kim—xenocryst garnet in kimberlite from Mengyin, Shandong Province (Wang *et al.*, 2000; Zheng *et al.*, 2006b); LW-1-Kim—xenocryst garnet in kimberlite from Wafangdian, Liaoning Province (Zhu *et al.*, 2019); GZ-MP-Kim—xenocryst garnet in kimberlite from Maping, Guizhou Province (Xiang Lu *et al.*, 2019); HN-NX-1-Lam—garnet in lamproite from Ningxiang, Hunan Province; DW-Lam—garnet in lamproite from Changde, Hunan Province; SWT-Lam—garnet in Cretaceous red layer from Shangwutong, Changde of Hunan Province(Lin Weipeng, 2007); HN-D-IN—garnet inclusions in diamond placer from Hunan Province (Guo Jiugao, 1989; Zhang Beili *et al.*, 2013; Deng Xiaoqin, 2018); AUSTRALIA-Kimberlite—xenocryst garnet in kimberlite from West Australia; AUSTRALIA-Lamproite—xenocryst garnet in lamproite from West Australia(Lucas *et al.*, 1989; Jaques *et al.*, 1989, 1990; Ramsay *et al.*, 1992)

部分元素(Fe、Mg、Si、Ti)大于检出限的样品进行了 $\ln(\text{Mg}/\text{Fe}) - \ln(\text{Ti}/\text{Si})$ 图解投影(Hardman *et al.*, 2018),结果发现其中6粒湖南沅江辰溪地区河流碎屑石榴子石分布在前人划分的地壳区域,9粒分布在未划分的区域,1粒DJZ-7-1-78(G3)靠近地壳与地幔划分的边界线,金刚石中1粒包裹体G3型石榴子石落在地幔的区域,1粒G0型包裹体石榴子石落在地壳区域下方未划分的区域(图5a)。参照前人“监督学习”(Hardman *et al.*, 2018)线性判别、逻辑回归计算($d_{\text{CM-LDA}}$ 与 $d_{\text{CM-LR}}$ 值)筛选出靠近地壳与地幔边界线的石榴子石DJZ-7-1-78(G3)属地幔来源($d_{\text{CM-LDA}} > -0.264$, $d_{\text{CM-LR}} > 0.000$),其余碎屑石榴子石均属地壳来源,计算的最大误差7.88%。金刚石中G0型包裹体石榴子石落在地壳来源的范围($d_{\text{CM-LDA}} < -0.264$, $d_{\text{CM-LR}} < 0.000$),计算的最大误差为21%,暗示了金刚石可能包裹了地壳来源的物质,该物质或由俯冲携带至地幔被金刚石捕获,后由寄主岩浆带

出地表。

为进一步分析湖南沅江辰溪地区河流碎屑石榴子石的母岩,采用了目前认可度较高(洪东铭等, 2020)的石榴子石 $\text{Mg}-(\text{Fe}^{\text{T}}+\text{Mn})-\text{Ca}$ 成分三角分布图(Mange and Morton, 2007),对样品可能的母岩类型进行了判别(图5b)。结果显示,湖南砂矿金刚石中橄榄岩型(G10)包裹体石榴子石分布在C2超基性岩区域,靠近贵州、山东、辽宁、西澳金伯利岩中捕虏石榴子石的区域;而榴辉岩型(G3、G0)包裹体石榴子石分布在C1变基性岩以及B1中酸性火成岩区域,没有落在榴辉岩、橄榄岩或者金伯利岩型石榴子石的任何区域。湖南沅江辰溪河流碎屑石榴子石大部分数据点分布在B1中酸性火成岩区域,与湖南常德上五通地区白垩纪红层中石榴子石、金刚石中包裹体石榴子石(G0)重叠落在了B1的位置,与C2内金伯利岩型石榴子石存在差异。上述结果充分说明湖南砂矿金刚石的多来源性。

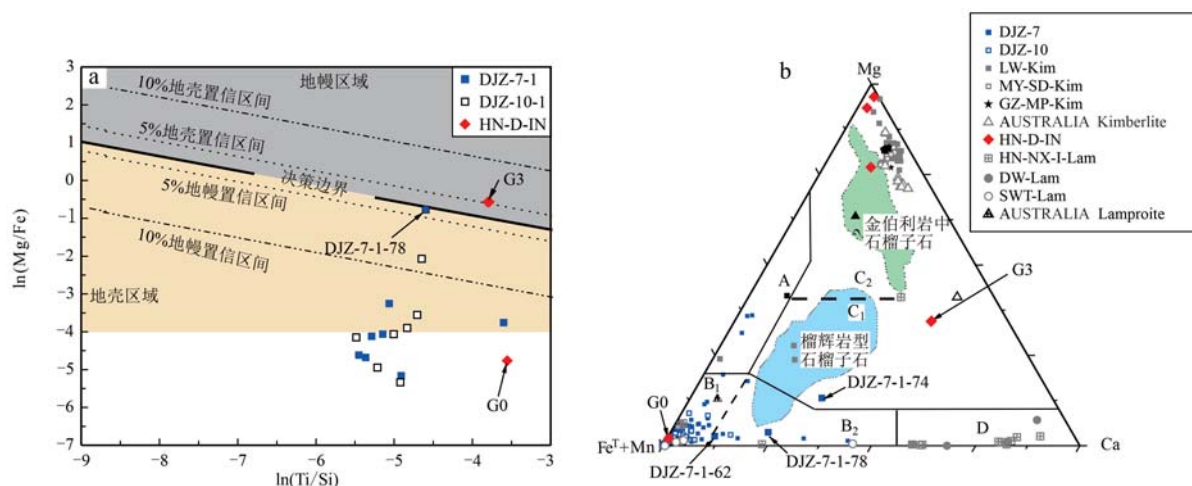


图5 石榴子石 $\ln(\text{Mg}/\text{Fe})-\ln(\text{Ti}/\text{Si})$ (a, 参照 Hardman *et al.*, 2018) 与 $\text{Mg}-(\text{Fe}^{\text{T}}+\text{Mn})-\text{Ca}$ 投影图(b, 参照 Mange and Morton, 2007; Kueter *et al.*, 2016; 洪东铭等, 2020)

Fig. 5 $\ln(\text{Mg}/\text{Fe})-\ln(\text{Ti}/\text{Si})$ (a, Hardman *et al.*, 2018) and $\text{Mg}-(\text{Fe}^{\text{T}}+\text{Mn})-\text{Ca}$ plots (b, after Mange and Morton, 2007; Kueter *et al.*, 2016; Hong *et al.*, 2020) for garnets

图中编号与数据来源同图4; A—高级麻粒岩相变沉积岩、紫苏花岗岩和中酸性火成岩(来源于地壳深部,高Mg低Ca); B₁—中酸性火成岩(高Fe高Mn); B₂—中低级变沉积岩,最高至角闪岩相(低Mg, Ca含量不一); C₁—变基性岩; C₂—超基性岩(高Mg, C₁与C₂以Mg含量50%为界); D—低级变基性岩或接触交代变质岩(高Ca)

data sources and numbers are same as Fig. 4; A—high-grade granulite-facies metasediments, charnockites, intermediate-acidic igneous rocks (derived from deep crust with high Mg and low Ca); B₁—intermediate-acidic igneous rocks (high Fe and Mn); B₂—amphibolite-facies metasediments (low Mg, Ca content varied widely); C₁—high-grade metabasic rocks; C₂—ultrabasic rocks (high Mg, the zone between C₁ and C₂ is bounded by 50% Mg content); D—low-grade metabasic rocks or contact metasomatic rock (high Ca)

3.2.2 稀土元素特征

对湖南沅江辰溪地区金刚石砂矿中160粒石榴子石矿物进行了稀土元素分析,并与洪东铭等(2020)的榴辉岩、橄榄岩以及辉石岩中石榴子石微量元素中轻重稀土元素总量、 δEu 、 δCe 及个别稀土元素值进行了对比(这几种石榴子石稀土元素多有重叠,很难将其准确区分),将砂矿中碎屑石榴子石与金刚石的相关性进行了大致的限定。

DJZ-7-1与DJZ-10-1这两个样品的稀土元素特征存在明显的差异。样品DJZ-7-1中有9粒、DJZ-10-1有1粒碎屑石榴子石的稀土元素落入榴辉岩、橄榄岩以及辉石岩三者的大致范围内,橄榄岩以及辉石岩显示幔源特征。DJZ-7-1除了6粒矿物颗粒具有相对较低的Y含量外,均具有较高的Y和稀土含量,稀土元素总量范围相对固定,仅有Y元素含量的变化(图6a), δCe 值大于1, δEu 与 δCe 具有相对稳定的分布区域(图6b),暗示它们具有相近的补给源区。而样品DJZ-10-1中,Y与稀土元素总量呈现出明显的正相关关系,相关性 $r=0.98$,拟合优度 $R^2=0.96$,显示出Y含量随稀土元素总量升高而升高的

变化趋势(图6a),90%以上 δCe 值小于1, δEu 与 δCe 具有相对宽泛的分布趋势(图6b)。上述两个不同采样点样品结果存在的明显差异和规律性,显示沅江流域不同区段河沙的来源与金刚石有关石榴子在区域内的分布具有不同的联系。

为寻找砂矿中与金刚石相关的石榴子石,结合图4与图5的分布情况以及 $d_{\text{CM-LDA}}$ 与 $d_{\text{CM-LR}}$ 值的判别,发现2粒稀土元素含量落在世界上含金刚石榴辉岩型榴石包裹体范围内的碎屑石榴子石样本,分别是DJZ-7-1-74和DJZ-7-1-78(图7)。其中DJZ-7-1-74在 $\text{Mg}-(\text{Fe}^{\text{T}}+\text{Mn})-\text{Ca}$ 主量元素判别分布图中的位置在C₁变基性岩区域,靠近榴辉岩型石榴子石区域(图5b),DJZ-7-1-78则位于G₃榴辉岩型与金刚石相关的石榴子石范围之内,图5a和数据回归计算值($d_{\text{CM-LDA}} > 0.264$, $d_{\text{CM-LR}} > 0.000$)显示其可能来源于地幔,DJZ-7-1-78(G₃)较贵州马坪地区钾镁煌斑岩中的捕虏晶石榴子石含有更高的稀土元素总量,具有较低的轻稀土元素含量,可能系与湖南金刚石相关的石榴子石。DJZ-10-1中并未发现此类幔源石榴子石,暗示了DJZ-7-1与金刚石的相关性更为密切。

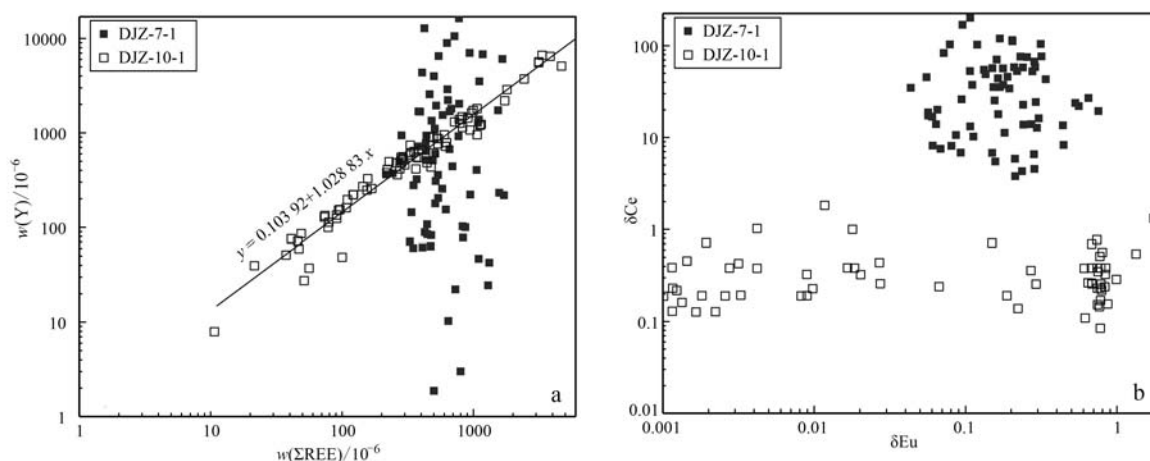


图6 碎屑石榴子石 REE 特征参数投影图

Fig. 6 Projection of REE parameters of detrital garnets

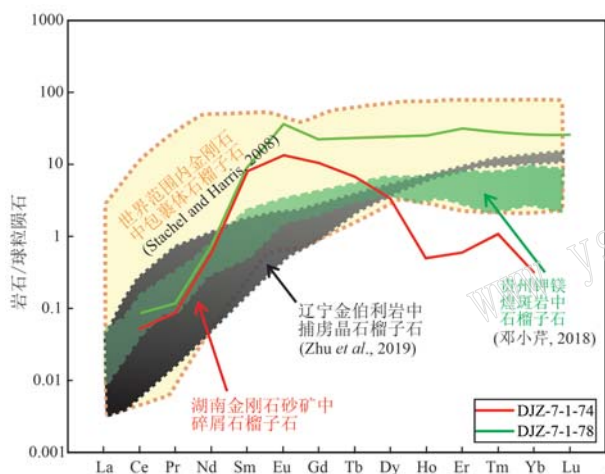


图7 与金刚石相关的榴辉岩型石榴子石稀土元素配分模式

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns of the E-type garnet related to diamond

4 讨论

4.1 碎屑石榴子石对金刚石找矿的启示

根据黄鑫等(2019)对碎屑石榴子石粒径与水动力影响的研究,本文碎屑石榴子石的粒径大小未考虑水动力分选作用的影响。归类为 G0、G3、G4 型的铁铝榴石与锰铝榴石样品,与主要为 G0、G3、G10 型的金刚石包裹体的石榴子石,二者均有 G0、G3 两种类型的榴辉岩型石榴子石,与澳大利亚西部阿盖尔地区的钾镁煌斑岩中捕虏晶石榴子石(Ramsay, 1992)存在相似性,暗示湖南金刚石可能与钾镁煌斑岩有成因联系。但与华北地区山东、辽宁金刚石中包裹体石榴子石以及寄主金伯利岩中捕虏晶石榴子

石(G10、G9 为主)(池际尚等, 1996; 郑建平等, 1999; Wang *et al.*, 2000; Zheng *et al.*, 2006b)又具有一定的差异(图 4),似乎可以排除二者的成因联系。

前人认为 G10、G9、G4、G3 型石榴子石与金刚石的形成具有重要的关系(Sobolev *et al.*, 1973; Schulze, 2003; Grütter *et al.*, 2004; Stachel and Harris, 2008)。其中 G10、G9 分别为方辉橄榄岩与二辉橄榄岩型石榴子石,主要来源于地幔(Schulze, 2003)。G3 为榴辉岩型石榴子石, G4 则与辉石岩、榴辉岩、二辉橄榄岩相关, G0 未作划分; G3、G4 均有壳/幔来源(Grütter *et al.*, 2004; Hardman *et al.*, 2018)。根据其主量元素的统计分析可以大致区分石榴石的地壳或地幔来源(Schulze, 2003; Hardman *et al.*, 2018)。微量元素 TiO_2 ($>0.5\%$)、含有较高的高场强元素(Ti、Zr、Y、Hf)与正常的稀土元素配分模式,通常被认为是地幔来源(Hardman *et al.*, 2018; 洪东铭等, 2020)。本文样品的主量元素含量与统计分析指示了地幔来源碎屑石榴子石的存在。样品 DJZ-7-1 与 DJZ-10-1 的稀土元素配分结果具有明显的差异,其中,样品 DJZ-7-1 中较多的碎屑石榴子石的稀土元素落入榴辉岩、橄榄岩以及辉石岩三者的大致范围内, DJZ-10-1 缺少 G3 型石榴子石,且在 DJZ-7-1 的石榴子石中发现了金刚石包裹体,因此推测在该河段 DJZ-7-1 的上游可能存在较好的补给区,可以有针对性地进一步开展重砂矿物找矿工作。

4.2 湖南原生金刚石的来源

湖南砂矿金刚石主要分布在江南造山带附近,其来源仍然存在诸多争议。前人认为江南造山带的

金刚石成因仍然与扬子稳定的克拉通环境相关(盛学庸, 2012)。目前就湖南砂矿金刚石的来源主要有西来说、外来说和内部说这3种。西来说认为湖南砂矿金刚石的来源与现今沅江流域的源头贵州东南部 and 贵州镇远地区金刚石原生矿具有联系, 认为砂矿金刚石(或部分)经沅江贵州区域搬运至湖南境内(谈逸梅等, 1983)。但是, 由于贵州金刚石和湖南金刚石的类型和品质等特征存在明显差异, 此假说一直无法得到证实(董斌, 2009; 黄远成等, 2016; 邓小芹, 2018)。外来说将湖南金刚石的来源归为古冰碛物次生源, 认为湖南地区水系砂矿金刚石及其指示伴生矿物, 均由南华纪海上浮冰从外地(例如澳大利亚西部等地)带入并扩散于长安组, 使长安组成为金刚石的次级生源, 然后在地史中多次转嫁而构成早中泥盆世砂砾层、白垩纪—古近纪红层等多个含金刚石地层(章人骏, 1985)或通过河流从华北克拉通带入湖南。内部说则是在对区域内与金刚石相关的石榴子石、尖晶石、锆石进行了研究的情况下提出的, 认为湖南的下岩石圈地幔具有金刚石形成的有利条件, 金刚石可能来自于其区域内部(刘智武, 1987; 饶家荣, 1999; 张令明等, 2007; 董斌, 2009; 饶家荣等, 2012; 宋瑞祥, 2013; 邓小芹, 2018; 杨瀚等, 2020)。

Mg-(Fe^T+Mn)-Ca图(图5b)显示了部分湖南砂矿金刚石可能与湖南常德上五通地区存在某种联系。与金刚石相关的碎屑石榴子石的稀土元素配分与地理位置较近的贵州镇远马坪地区捕虏晶石榴子石具有较大的差异, 加上东西部地貌曾发生过转换(汪品先, 2005; Wang *et al.*, 2020), 推测贵州马坪地区的原生金刚石不会是湖南砂矿金刚石的重要来源。沅江辰溪地区河流碎屑石榴子石中G10的缺失, 也进一步说明含G10型石榴子石母岩(金伯利岩为主)和本区域碎屑石榴子石的来源关联不大, 指示该区域金刚石不太可能来自于金伯利源区。通过对图4a中不同地区不同类型石榴子石的对比, 发现碎屑石榴子石与榴辉岩型金刚石包裹体石榴子石CaO的范围为0%~20%, 与澳大利亚西部阿盖尔地区的钾镁煌斑岩中捕虏晶榴辉岩型石榴子石范围类似, 暗示湖南该类金刚石的寄主岩石是钾镁煌斑岩的可能性较大。但是将其来源整体归为古冰碛物次生源(澳大利亚等地)仍然缺乏有力的证据。湖南金刚石的分布、内部结构、包裹体特征(丘志力等, 2014; 邓小芹, 2018)以及沅江辰溪地区河流碎屑以及包裹

体G0、G3型石榴子石的来源等显示了金刚石形成具有多期特点, 与克拉通边缘环境相关(饶家荣, 1999; 饶家荣等, 2012)。杨瀚等(2020)通过对湖南沅江流域周边(上五通、新庄陇)白垩纪红层锆石的统计分析, 发现湖南岩石圈地幔在新元古代中期存在过钾镁煌斑岩岩浆的喷发。另外, 在湖南宁乡钾镁煌斑岩中已有微粒金刚石的发现(李子云等, 1993)。据此, 本文认为湖南金刚石原生矿至少有相当部分可能与区内的钾镁煌斑岩有关。

通过对Si(apfu)>3.0的石榴子石的分析, 可对其相关的岩体形成深度进行大致判断(牛贺才等, 2007; 陆琦等, 2012; 蔡逸涛等, 2019)。本文仅发现1粒编号DJZ-7-1-62的石榴子石的Si(apfu)大于3.05, 可以视为超硅石榴子石。在图8a中, 金刚石砂矿中Si(apfu)大于3.02的石榴子石和湖南砂矿中金刚石包体中2粒Si(apfu)>3.05的石榴子石的深度小于220 m。这与前人利用橄榄石-镁铝榴石包裹体共生矿物对、氮的含量和B型氮的转化率与原生石墨拉曼位移估算出的湖南金刚石形成深度范围(133~219 km)基本一致(袁殊, 2013; 丘志力等, 2014; 马瑛等, 2018)。结合世界上金刚石内部包裹体不同类型石榴子石对金刚石形成温度-压力条件、前人对湖南金刚石形成条件的限定(图8b), 发现湖南砂矿金刚石的形成环境较为复杂, 但总体落在榴辉岩-辉橄榄岩-方辉橄榄岩的混杂区域, 更倾向于榴辉岩-二辉橄榄岩稳定区, 这也暗示湖南大部分金刚石与钾镁煌斑岩相关。

5 结论

(1) 通过对研究区石榴子石矿物学特征、地球化学特征的综合对比研究, 认为湖南辰溪地区河流中碎屑石榴子石大部分来源于地壳, 与其他金伯利岩地区与金刚石有关的石榴子石较多来源于地幔具有明显的差异。DJZ-7-1与DJZ-10-1这两个不同采样点的样品特征具有明显的差异和规律性, 说明DJZ-7-1部分碎屑石榴子石与湖南原生金刚石之间具有一定成生联系, G3型石榴子石也有可能和金刚石有较强的联系。

(2) 部分碎屑石榴子石及金刚石中包裹体石榴子石的成分特点显示其与榴辉岩、钾镁煌斑岩具有更为密切的联系。支持部分湖南砂矿金刚石具有原生本地来源的认识, 并且认为其可能具有多源补

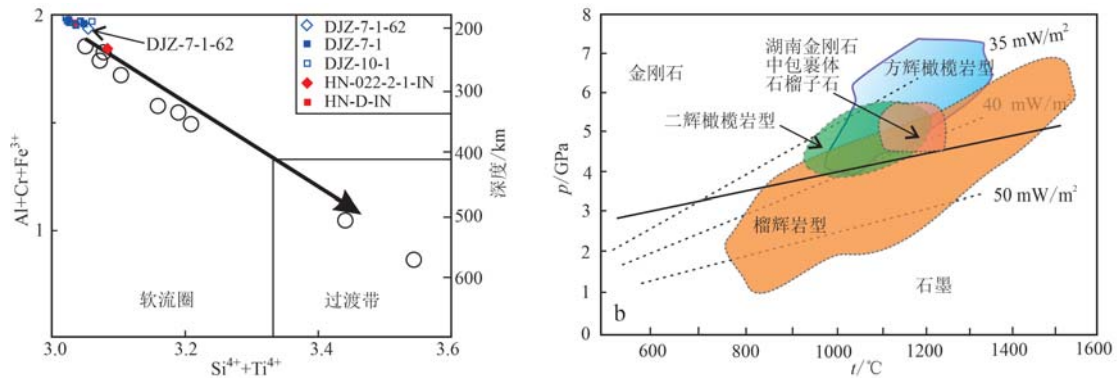


图8 湖南金刚石形成条件分析图

Fig. 8 Analysis diagram of diamond forming conditions in Hunan Province

a—砂矿与金刚石包裹体中高硅石榴子石 $(Al+Cr+Fe^{3+})-(Si^{4+}+Ti^{4+})$ 图解, 空心圈为金刚石内高硅石榴子石包裹体(牛贺才等, 2007), 湖南金刚石包裹体石榴子石数据来源郭九皋等(1989)、丘志力等(2014); b—世界范围内金刚石中石榴子石包裹体限定的金刚石形成温压条件[根据 Stachel 和 Harris(2008)、Beyer 等(2015)修改]

a— $(Al+Cr+Fe^{3+})-(Si^{4+}+Ti^{4+})$ diagram of high-Si garnet inclusions in diamond and placer, the circles are the combinations of the high-Si garnet inclusions in diamond(Niu Hecai *et al.*, 2007), the data of inclusion garnet in diamond of Hunan from Guo Jiugao, 1989; Qiu Zhili *et al.*, 2014; b—pressure and temperature conditions for diamond formation limited by garnet inclusions in diamonds worldwide(modified after Stachel *et al.*, 2008; Beyer *et al.*, 2015)

给的特点,但仍然无法排除存在外来来源的可能性。湖南金刚石可能形成于深度小于 220 km 的橄榄岩—榴辉岩混杂区域,暗示了湖南金刚石寄主岩体与钾镁煌斑岩有更密切的关联性。

(3) 湖南砂矿金刚石来源复杂,但至少有一部分属于近源补给,可以通过在沅江流域辰溪赤岩村(DJZ-7-1 采集点)河段上游区域寻找 G3 榴辉岩型碎屑石榴子石以及古老的钾镁煌斑岩,进一步寻找原生金刚石矿。

致谢 野外工作曾得到湖南常德 413 地质队马文运、李子云和董斌等几任总工的大力支持与帮助,国家珠宝玉石质量监督检验中心(深圳实验室)丁汀主任、张天阳、黎辉煌、张勇副主任,中国冶金地质总局山东局测试中心栾日坚、林培军室主任和工程师李凤春,以及广州智柏钻石有限公司黄颖诗总经理,在样品测试过程中提供了帮助,两位匿名评审专家提出宝贵的修改建议和意见,对论文完善提供了重要帮助,在此一并表示感谢!

References

- Beyer C, Frost D J and Miyajima N. 2015. Experimental calibration of a garnet-clinopyroxene geobarometer for mantle eclogites[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 169(18): 1~21.
- Cai Yitao, Zhang Jie, Kang Congxuan, *et al.* 2019. Mineral chemistry characteristics of garnets in diamondiferous basite of Langan area, Anhui Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 38(1): 110~120 (in Chinese with English abstract).
- Chi Jishang, Lu Fengxiang, Liu Yongshun, *et al.* 1996. Geological Conditions of Primary Diamond in China[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press(in Chinese).
- Dawson J B and Stephens W E. 1975. Statistical classification of garnets from kimberlite and associated xenoliths[J]. *The Journal of Geology*, 83: 589~607.
- Deng Xiaoqin. 2018. The Formation of Macrodiamonds in Yangtze Craton and Its Deep Geological Process—Constraints from Mineralogy and Geochemistry[D]. Sun Yat-Sen University Postdoctoral Work Report (in Chinese with English abstract).
- Dong Bin. 2009. Reconsideration on the prospecting work and primary diamond deposits in Hunan Province[J]. *Land and Resources Information*, (7): 49~52(in Chinese).
- Griffin W L, Fisher N I, Friedman J H, *et al.* 2002. Cr-pyrope garnets in the lithospheric mantle 2, Compositional populations and their distribution in time and space[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 3: 1 073~1 107.
- Grütter H S, Gurney J J, Menzies A H, *et al.* 2004. An updated classification scheme for mantle-derived garnet, for use by diamond explorers

- [J]. *Lithos*, 77 (1~4): 841~857.
- Guo Jiugao, Chen Feng, Deng Huaxing, *et al.* 1989. Preliminary Study on inclusions in diamond from Hunan[J]. *Science Bulletin*, (2): 130~133(in Chinese).
- Hardman M F, Pearson D G, Stachel T, *et al.* 2018. Statistical approaches to the discrimination of crust- and mantle-derived low-Cr garnet-major-element-based methods and their application in diamond exploration[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 186: 24~35.
- Hastie T, Tibshirani R and Friedman J. 2009. *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction (Second Edition)* [M]. New York: Springer-Verlag.
- He Guanzhi. 1984. Perspective of prospecting for kimberlites in Yuan-Shui river basin[J]. *Hunan Geology*, 3(3): 1~11(in Chinese).
- Hong Dongming, Jian Xing, Huang Xin, *et al.* 2020. Garnet trace elemental geochemistry and its application in sedimentary provenance analysis[J]. *Earth Science Frontiers*, 27(3): 191~201(in Chinese with English abstract).
- Huang Jianzhong, Sun Ji, Zhou Chao, *et al.* 2020. Metallogenic regularity and resource potential of gold deposits of Hunan area in the Jiangnan Orogenic Belt, South China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 41 (2): 230~252(in Chinese with English abstract).
- Huang Xin, Jian Xing, Zhang Wei, *et al.* 2019. Detrital garnet geochemistry-based provenance analysis and interpretation: The effect of grain size[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 41 (2): 230~252(in Chinese with English abstract).
- Huang Yuancheng, Li Zhixiang, Qiu Zhili, *et al.* 2016. Mineralogical characteristics of lamproite-hosted and placer diamonds from Zhenyuan, Guizhou and their significance for primary deposit prospecting [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 55(5): 108~118(in Chinese with English abstract).
- Jaques A L, Hall A E, Sheraton J W, *et al.* 1989. Composition of crystalline inclusions and C-isotopic composition of Argyle and Ellendale diamonds[A]. *Ross J. Kimberlites and Related Rocks [C]*. GSA Spec., Blackwell, Carlton, 14: 966~989.
- Jaques A L, O'Neill H St C, Smith C B, *et al.* 1990. Diamondiferous peridotite xenoliths from the Argyle (AK1) lamproite pipe [J]. *Western Australia, Contributions to Mineralogy and Petrology*, 104: 255~276.
- Kang Congxuan, Yang Xianzhong, Cai Yitao, *et al.* 2019. Distribution regularity and abnormal characteristics of indicative minerals of diamond in Taojiang area, Hunan Province: Exemplified by diamond, chromium spinel and ilmenite[J]. *Geological Bulletin of China*, 38 (1): 68~75(in Chinese with English abstract).
- Krippner A, Meinhold G, Morton A C, *et al.* 2014. Evaluation of garnet discrimination diagrams using geochemical data of garnets derived from various host rocks[J]. *Sedimentary Geology*, 306: 36~52.
- Kueter K, Soesilo J, Fedortchouk Y, *et al.* 2016. Tracing the depositional history of Kalimantan diamonds by zircon provenance and diamond morphology studies[J]. *Lithos*, 265: 159~176.
- Li Fengchun, Hou Minglan, Luan Rijian, *et al.* 2016. Optimization of analytical conditions for LA-ICP-MS and its application to zircon U-Pb dating[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 35 (1): 17~23(in Chinese with English abstract).
- Li Ziyun and Ma Wenyun. 1993. Geological feature of Yunyingwo lamproite in Ningxiang[J]. *Hunan Geology*, 12(4): 221~225(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 Master Thesis(in Chinese with English abstract).
- Liu Zhiwu. 1987. Ore-forming conditions of the primary diamond deposit and the source of modern diamond placer deposit in Yuanshui river valley, Hunan Province[J]. *Hunan Geology*, 6: 72~77(in Chinese).
- Lu Qi, Liu Huifang, Xiao Ping, *et al.* 2012. Discovery and geological significance of majorite inclusion in diamond from Liaoning province, China[J]. *Geological Science and Technology Information*, 31(5): 1~7(in Chinese with English abstract).
- Lucas H, Ramsay R R, Hall A E, *et al.* 1989. Garnets from West Australian kimberlites and related rocks[A]. *Ross J. Kimberlites and Related Rocks[C]*. GSA Spec, Blackwell, Carlton, 14: 809~819.
- Ma Ying, Wang Qi, Qiu Zhili, *et al.* 2018. In-situ Raman spectroscopy testing and genesis of graphite inclusions in alluvial diamond from Hunan[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 38(6): 1753~1757(in Chinese with English abstract).
- Mange M A and Morton A C. 2007. *Geochemistry of heavy minerals*[A]. Mange M A and Wright D T. *Heavy Minerals in Use, Development in Sedimentology*[C]. Amsterdam: Elsevier.
- Niu Hecai, Zhang Haixiang, Shan Qiang, *et al.* 2007. Discovery and geological significance of super-silicon and titanium garnet from garnet pyroxenite in Zhaheba [J]. *Chinese Science Bulletin*, 52 (18): 2169~2174(in Chinese).
- Qiu Zhili, Wang Qi, Qin Shecai, *et al.* 2014. In-situ analysis of mineral

- inclusions in alluvial diamonds from Hunan: Insights into the provenance and origin of the diamonds[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 38(3): 590~597(in Chinese with English abstract).
- Ramsay R R. 1992. *Geochemistry of Diamond Indicator Minerals*[D]. Australia: Department of Geology and Geophysics, University of Western Australia PhD Thesis.
- Rao Jiarong. 1999. Deep structural geology setting and metallogenic forecasting of primary diamond in Hunan[J]. *Hunan Geology*, 18(1): 21~30(in Chinese with English abstract).
- Rao Jiarong, Xiao Haiyun, Liu Yaorong, *et al.* 2012. Location of the Yangtze-Cathaysia plate convergence zone in Hunan [J]. *Hunan Geology*, 55(2): 484~502 (in Chinese with English abstract).
- Schulze D J. 2003. A classification scheme for mantle-derived garnets in kimberlite: A tool for investigating the mantle and exploring for diamonds[J]. *Lithos*, 71: 195~213.
- Sheng Xueyong. 2012. My view on geotectonics of Xuefeng uplift in southeastern Guizhou doubt about the decision of South China orogenic belt property[J]. *Guizhou Geology*, 29(3): 235~239(in Chinese with English abstract).
- Sobolev N V, Lavrent'ev Y G, Pokhilenko N P, *et al.* 1973. Chrome-rich garnets from the kimberlites of Yakutia and their parageneses[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 40: 39~52.
- Song Ruixiang. 2013. *A Monograph on Diamond Deposits in China*[M]. Beijing: Geology Publishing House(in Chinese).
- Stachel T and Harris J W. 2008. The origin of cratonic diamonds-Constraints from mineral inclusions[J]. *Ore Geology Reviews*, 34(1~2): 5~32.
- Sun Shijun and Yang Songping. 1998. A discussion on prerequisites to search for primary diamonds in Guizhou[J]. *Guizhou Geology*, 15(1): 1~8(in Chinese with English abstract).
- Tan Yimei and Rong Zhenqiu. 1983. Hunan diamond and gem-quality diamond[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2(1): 4~6(in Chinese).
- Tu Jian. 2016. *Geochemistry, Geochronology and Implications of the Sandstones in Upper Ordovician in Central Hunan*[D]. Beijing: China University of Geosciences Master Thesis(in Chinese with English abstract).
- Wang Pinxian. 2005. Cenozoic deformation and the history of sea-land interactions in Asia[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30(1): 1~18(in Chinese with English abstract).
- Wang W Y, Sueno S, Takahashi E, *et al.* 2000. Enrichment processes at the base of the Archean lithospheric mantle: Observations from trace element characteristics of pyrope garnet inclusions in diamonds [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 139: 720~733.
- Wang Xiaolei, Zhou Jincheng, Chen Xin, *et al.* 2017. Formation and evolution of the Jiangnan orogen[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 36(5): 714~735(in Chinese with English abstract).
- Wang Y, Wang Y j, Lai S B, *et al.* 2020. Exhumation and landscape evolution in eastern South China since the Cretaceous: New insights from fission-track thermochronology[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 191: 1~14.
- Xiao Shuyue, Xiang Hua, Zeng Wenhui, *et al.* 2018. Discussion on metallogenic geological conditions and prospecting ideas of primary diamond deposits in the Yuanshui drainage basin of Hunan[J]. *Land & Resources Herald*, 15(1): 22~26(in Chinese with English abstract).
- Xiang Lu, Zheng Jianping, Huang Yuancheng, *et al.* 2019. The Mapping kimberlites and its xenocrysts as indicators of diamond minerogenetic condition in Zhenyuan area, Guizhou Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 38(1): 177~188(in Chinese with English abstract).
- Yang Han, Qiu Zhili, Deng Xiaoqin, *et al.* 2020. Detrital zircon of the Cretaceous redbed in the Yuanjiang Basin of Hunan and its implication for placer diamond exploration[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 44(6): 1160~1171(in Chinese with English abstract).
- Yuan Shu. 2013. *Changes of Nitrogen and Hydrogen Impurities and Inclusions in Placer Diamonds during Their Growth in Yuanjiang, Hunan Province*[D]. Sun Yat-Sen University Master Thesis(in Chinese).
- Zhang Beili, Chen Hua and Qiu Zhili. 2013. *The Origin of Diamonds under the Framework of the United Nations Kimberley Process*[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Zhang Guowei, Guo Anlin, Wang Yuejun, *et al.* 2013. Tectonics of South China continent and its implications[J]. *Science in China (Series D)*, 43(10): 1553~1582(in Chinese with English abstract).
- Zhang Hongfu, Menzies M A, Lu Fengxiang, *et al.* 2000. The major and trace element in garnet and megacryst garnet from Paleozoic mantle rocks in North China[J]. *Science in China (Series D)*, 30(2): 128~134(in Chinese).
- Zhang Lingming, Wang Sanding, Xiao Xianghui, *et al.* 2007. Discussion on the formation conditions of primary diamond in Hunan[J]. *Land & Resources Herald*, 4(3): 27~30(in Chinese).
- Zhang Peiyuan. 1998. Suggestions on finding primary diamond in hunan

- [J]. *Geology in China*, 256 (9): 17~19(in Chinese).
- Zhang Renjun. 1985. Prospects of lode diamond deposits in Yuanshui valley and its adjacent areas [J]. *Hunan Geology*, 4 (1): 3~16 (in Chinese).
- Zheng J P, Griffin W L, O'Reilly S Y, *et al.* 2006a. Widespread Archean basement beneath the Yangtze [J]. *Geology*, 34 (6): 417~420.
- Zheng J P, Griffin W L, O'Reilly S Y, *et al.* 2006b. Mineral chemistry of peridotites from Paleozoic, Mesozoic and Cenozoic lithosphere: Constraints on mantle evolution beneath Eastern China [J]. *Journal of Petrology*, 47 (11): 2 233~2 256.
- Zheng Jianping and Lu Fengxiang. 1999. Mantle xenoliths from kimberlites, Shandong and Liaoning: Paleozoic mantle character and its heterogeneity [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 15 (1): 65~74 (in Chinese with English abstract).
- Zhu R Z, Ni P, Ding J Y, *et al.* 2019. Metasomatic processes in the lithospheric mantle beneath the No. 30 kimberlite (Wafangdian Region, North China Craton) [J]. *The Canadian Mineralogist*, 57: 499~517.
- 学版), 55(5): 108~118.
- 康丛轩, 杨献忠, 蔡逸涛, 等. 2019. 湖南桃江地区金刚石指示矿物分布规律及异常特征——以金刚石、铬尖晶石及钛铁矿为例 [J]. *地质通报*, 38(1): 68~75.
- 李凤春, 侯明兰, 栾日坚, 等. 2016. 电感耦合等离子体质谱仪与激光器联用测量条件优化及其在锆石 U-Pb 定年中的应用 [J]. *岩矿测试*, 35(1): 17~23.
- 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. 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: 中山大学硕士毕业论文.
- 刘智武. 1987. 沅水流域金刚石原生矿成矿条件与现代砂矿来源问题 [J]. *湖南地质*, 6: 72~77.
- 陆 琦, 刘惠芳, 肖 平, 等. 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*, 31(5): 1~7.
- 马 瑛, 王 琦, 丘志力, 等. 2018. 湖南砂矿金刚石中石墨包裹体拉曼光谱原位测定: 形成条件及成因指示 [J]. *光谱学与光谱分析*, 38(6): 1 753~1 757.
- 牛贺才, 张海祥, 单 强, 等. 2007. 扎河坝石榴辉石岩中超硅-超钛石榴子石的发现及其地质意义 [J]. *科学通报*, 52(18): 2 169~2 174.
- 丘志力, 王 琦, 秦社彩, 等. 2014. 湖南砂矿金刚石包裹体原位测试: 对金刚石成因来源的启示 [J]. *大地构造与成矿学*, 38(3): 590~597.
- 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): 21~30.
- 饶家荣, 肖海云, 刘耀荣, 等. 2012. 扬子、华夏古板块会聚带在湖南的位置 [J]. *地球物理学报*, 55(2): 484~502.
- 盛学庸. 2012. 黔东南雪峰隆起区大地构造属性之我见 [J]. *贵州地质*, 29(3): 235~239.
- 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.
- 孙士军, 杨松平. 1998. 贵州金刚石成矿条件初探 [J]. *贵州地质*, 15(1): 1~8.
- 谈逸梅, 容振球. 1983. 湖南金刚石和宝石金刚石 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2(1): 4~6.
- 涂 建. 2016. 湘中奥陶系上统砂岩锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学及其意义 (硕士论文) [D]. 北京: 中国地质大学.
- 王孝磊, 周金城, 陈 昕, 等. 2017. 江南造山带的形成与演化 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 36(5): 714~735.
- 汪品先. 2005. 新生代亚洲形变与海陆相互作用 [J]. *地球科学——*
- 附中文参考文献
- 蔡逸涛, 张 洁, 康丛轩, 等. 2019. 安徽栏杆含金刚石基性岩中石榴子石矿物学特征 [J]. *地质通报*, 38(1): 110~120.
- 池际尚, 路凤香, 刘永顺, 等. 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.
- 邓小芹. 2018. 扬子克拉通大金刚石的形成与深部地质过程——来自矿物学和地球化学的制约 [D]. 广州: 中山大学博士后研究工作报告.
- 董 斌. 2009. 湖南金刚石原生矿找矿工作与方向的再思考 [J]. *国土资源情报*, (7): 49~52.
- 郭九皋, 陈 丰, 邓华兴, 等. 1989. 湖南金刚石矿物包体的初步研究 [J]. *科学通报*, 34(2): 130~133.
- 贺灌之. 1984. 沅水流域寻找金伯利岩的前景 [J]. *湖南地质*, 3(3): 1~11.
- 洪东铭, 简 星, 黄 鑫, 等. 2020. 石榴石微量元素地球化学及其在沉积物源分析中的应用 [J]. *地学前缘*, 27(3): 191~201.
- 黄建中, 孙 骥, 周 超, 等. 2020. 江南造山带 (湖南段) 金矿成矿规律与资源潜力 [J]. *地球学报*, 41(2): 230~252.
- 黄 鑫, 简 星, 张 巍, 等. 2019. 碎屑石榴石地球化学物源分析与解释: 粒度的影响 [J]. *沉积学报*, 37(3): 511~518.
- 黄远成, 李志翔, 丘志力, 等. 2016. 贵州镇远钾镁煌斑岩原生及砂矿金刚石矿物学特征及其找矿意义 [J]. *中山大学学报 (自然科学版)*, 55(5): 108~118.

- 中国地质大学学报, 30(1): 1~18.
- 肖书阅, 向 华, 曾文辉, 等. 2018. 湖南省沅水流域金刚石原生矿成矿地质条件及找矿思路探讨[J]. 国土资源导刊, 15(1): 22~26.
- 向 璐, 郑建平, 黄远成, 等. 2019. 贵州镇远马坪金伯利岩及其捕虏晶对金刚石成矿条件的指示意义[J]. 地质通报, 38(1): 177~178.
- 杨 瀚, 丘志力, 邓小芹, 等. 2020. 湖南沅水流域白垩红层碎屑锆石及其对金刚石找矿的指示[J]. 大地构造与成矿学, 44(6): 1 160~1 171.
- 杨光忠, 李永刚, 罗邦良, 等. 2019. 贵州施秉下翁哨地区镁铝榴石和铬尖晶石自然重砂罕见特高异常查证[J]. 地质通报, 38(1): 36~43.
- 袁 姝. 2013. 湖南沅水流域砂矿钻石生长过程中氮、氢杂质变化及包裹体特征研究[D]. 广州: 中山大学.
- 张蓓莉, 陈 华, 丘志力. 2013. 联合国金伯利进程框架下的钻石原产地研究[M]. 北京: 地质出版社.
- 张国伟, 郭安林, 王岳军, 等. 2013. 中国华南大陆构造与问题[J]. 中国科学: 地球科学, 43(10): 1 553~1 582.
- 张宏福, Menzies M A, 路凤香, 等. 2000. 华北古生代地幔岩捕虏体中石榴石和巨晶石榴石的主、微量元素[J]. 中国科学: 地球科学, 30(2): 128~134.
- 张令明, 王三丁, 肖湘辉, 等. 2007. 湖南原生金刚石矿形成条件探讨[J]. 国土资源导刊, 4(3): 27~30.
- 张培元. 1998. 对湖南寻找金刚石原生矿的建议[J]. 中国地质, 256(9): 17~19.
- 章人骏. 1985. 论沅水流域及其邻区金刚石原生矿的前景[J]. 湖南地质, 4(1): 3~16.
- 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, 15(1): 65~74.