

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.05.008

豫南史庄一带金伯利岩中石榴子石矿物学特征及其形成条件的约束

李积山^{1,2}, 张军杰³, 刘伟^{1,2}, 余翠¹LI Jishan^{1,2}, ZHANG Junjie³, LIU Wei^{1,2}, YU Cui¹

1.河南省地质矿产勘查开发局第三地质矿产调查院,河南 信阳 464000;

2.河南省花岗岩与成矿作用重点实验室,河南 信阳 464000;

3.河南省核工业地质局,河南 信阳 464000

1.No.3 Institute of Geological and Mineral Resources Survey of Henan Bureau of Geology and Mineral Exploration, Xinyang 464000, Henan, China;

2.Henan key laboratory of granite and mineralization, Xinyang 464000, Henan, China;

3.Henan Nuclear Industry Geology Bureau, Xinyang 464000, Henan, China

摘要:豫南史庄一带位于华北地台南缘,分布有金伯利岩,为了确定岩石中的石榴子石矿物种类及其与金刚石的关系,通过人工重砂鉴定,对挑选出的 40 件石榴子石矿物单晶进行了电子探针微区化学成分分析。结果显示,区内石榴子石矿物族化学通式 $A_3B_2[SiO_4]_3$ 中的 A 组阳离子主要由 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 和少量 Ca^{2+} 占位, B 主组阳离子主要由 Al^{3+} 和少量 Fe^{3+} 、 Cr^{3+} 、 Mn^{3+} 占位,表明区内石榴子石主要为铁铝榴石(Alm)-镁铝榴石(Pry)-钙铝榴石(Gro)系列组合。根据矿物化学特征,区内镁铝榴石为榴辉岩型(E 型),具有含钛钙低铬富铁的特征,属 Grutter 等划分的 G4-G5 组(含钛、钙)镁铝-铁铝榴石,与金伯利岩、金刚石包体或者 A 组榴辉岩中的石榴子石特征相同。区内发现有超硅石榴子石,经计算其形成压力范围为 10.2~10.9 GPa,对应深度超过 250 km。

关键词: 镁铝榴石; 电子探针; 指示矿物; 超硅石榴子石; 河南史庄

中图分类号: P57; P578.94⁺7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2022)05-0824-12

Li J S, Zhang J J, Liu W, Yu C. Mineralogical characteristics and constraints of formation conditions of garnet in kimberlite in Shizhuang area, southern He'nan Province. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(5): 824-825

Abstract: Shizhuang area in southern He nan located in the south margin of north China platform, with kimberlite. In order to determine the types of garnet and their relationship with diamond, 40 selected garnet mineral single crystals were analyzed by electron probe micro-area. The results show that the cations of group A in the general formula $A_3B_2[SiO_4]_3$ of the garnet mineral group are mainly occupied by Mg^{2+} , Fe^{2+} and a small amount of Ca^{2+} , the cations of group B are mainly occupied by Al^{3+} and a small amount of Fe^{3+} , Cr^{3+} and Mn^{3+} . The garnet in the area is mainly composed of Alm - Pry - Gro series. According to the mineral chemical characteristics, the Mg-Al garnet in the area is eclogite type, which is characterized by titanium-calcium, low-chromium and iron-rich. It belongs to Grutter's G4-G5 group (containing titanium and calcium) Mg-Al-Fe-Al garnet, and has the same characteristics as kimberlite, diamond inclusion or garnet in group A eclogite. Supersilicon garnet is found in the area, and its formation pressure ranges from 10.2 GPa to 10.9 GPa, with a depth of more than 250 km.

Key words: pyrope; electron probe; indicative mineral; supersilic garnet; Shizhuang, Henan Province

豫南地区寻找金伯利岩经历了漫长的历史, 岩体呈岩管、岩墙、岩床和岩脉状产出, 呈北西西向
1983 年在华北地台南缘首次发现了金伯利岩露出, 或近东西方向分布^[1-2]。此后虽然对该区金伯利岩

收稿日期: 2020-05-04; 修订日期: 2020-11-15

资助项目: 河南省财政地质勘查项目《河南省信阳市史庄一带金刚石矿预查》(编号: 豫国土资发[2017]22 号)

作者简介: 李积山(1988-), 男, 工程师, 从事固体矿产勘查及地质调查工作。E-mail: 474897902@qq.com

进行了研究,发现铬铁矿、镁铝榴石、铬透辉石等金刚石的指示矿物^{[3-8]②},但当时岩石矿物的测试条件制约了对金刚石指示意义的认识。本次通过电子探针微区化学成分分析,对豫南史庄一带金伯利岩中的石榴子石进行了端元组分计算,根据其化学特征对其属性进行了判别,初步探讨了区内金伯利岩中石榴子石和金刚石的关系,确定石榴子石对金刚石的指示意义,为进一步寻找金刚石原生矿提供依据。

1 地质背景

原生金刚石(金伯利岩中)与古老克拉通(老物质老结构)有密切联系,并与金伯利岩管或岩墙通道有关^[9]。华北克拉通具有古老的结晶基底和稳定的沉积盖层双层结构,经历了多阶段的构造演化^[10],基底为新太古界—新元古界一套变质岩系,盖层为古生界—新生界,厚度大且稳定。而研究区位于栾川—明港深大断裂带北侧,华北克拉通南缘

(图 1),栾川—明港断裂规模大,切割深,可构成金伯利岩浆上升的通道,具备形成金刚石所需要的地质构造和保存条件^②。

区内出露地层主要有长城系熊耳群、蓟县系汝阳群、青白口系洛峪群和新元古界栾川群。长城系熊耳群主体为一套高绿片岩相变质的海相中基性—中酸性火山熔岩夹少量火山碎屑岩沉积建造;蓟县系汝阳群为一套滨海—浅海陆源砂泥质碎屑岩沉积建造;青白口系洛峪群为一套海陆棚—局限台地相碎屑岩—碳酸盐岩建造;新元古界栾川群为一套碱性火山岩—碳酸盐岩夹碎屑岩沉积建造。

区内岩浆岩从超基性—基性到中性—酸性岩均有出露,其中新元古代周庄变基性岩、早古生代黄岗杂岩、早白垩世天目山岩体、晚侏罗世金伯利岩等出露广泛。

区内构造线总体呈北西—南东向展布,栾川—明港断裂带为区域地层的分割线,控制了区域主体构造的展布,由多条叠瓦状展布的断裂组成,横切

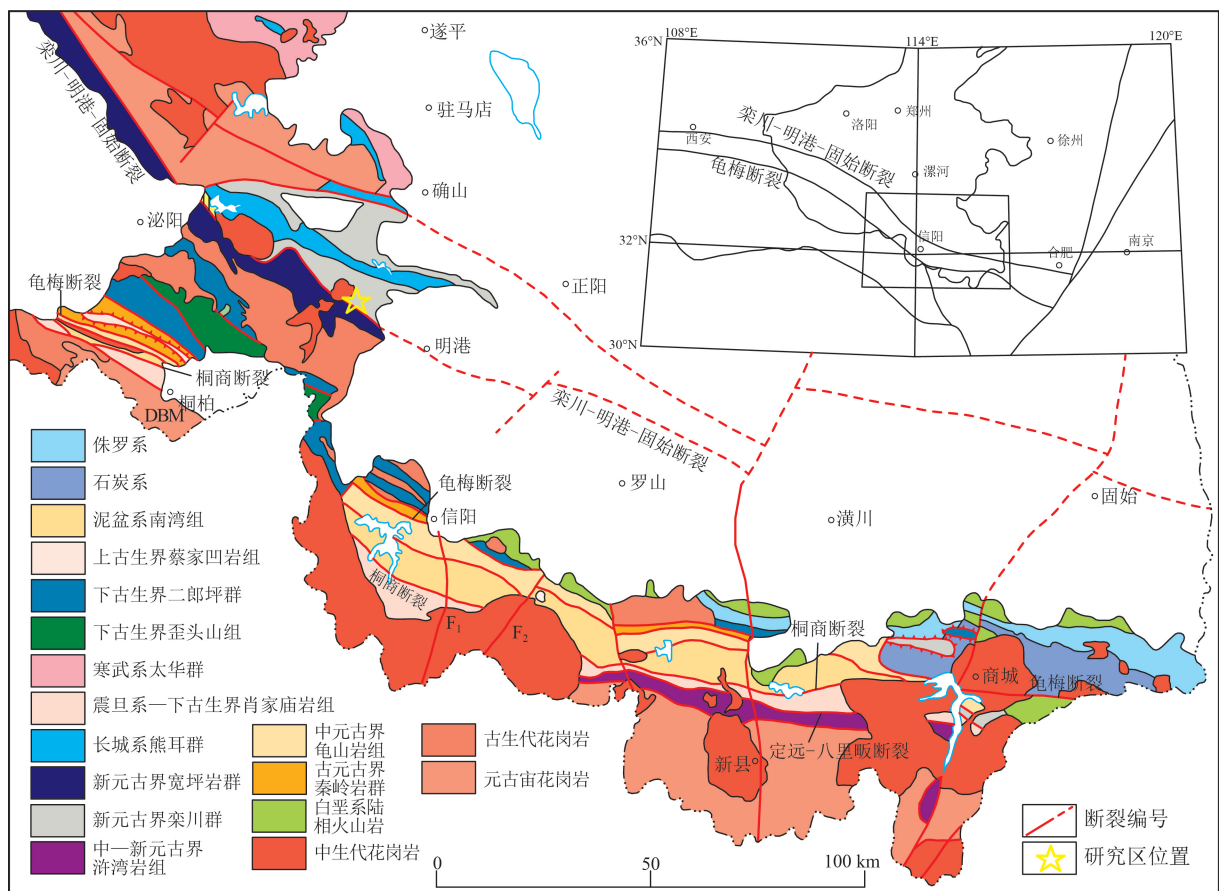


图 1 豫南史庄一带区域地质构造简图(据参考文献①修改)

Fig. 1 A sketch of regional geological structure in Shizhuang area, southern Henan Province

新元古代辉长岩、碱性火山岩,并有燕山期酸性岩侵入,该断裂带具有多期活动,早期为韧性剪切变形,晚期为脆韧性-脆性变形叠加的特点。区内褶皱主要表现为以熊耳群为核部,汝阳群和栾川群为两翼的石滚河褶皱断带及其次级褶皱,轴面近直立或略向东北倾斜,枢纽倾向北西西或南东,其北翼地层出露完整,与石滚河复向斜的南翼相连,南翼被周庄变基性岩和天目山正长花岗岩体侵吞。

2 金伯利岩岩石特征

史庄一带金伯利岩分布在早白垩世天目山岩体南东侧外围,主要集中在栾川-明港深大断裂与其次级北东向断裂的交会地段,岩体成群出现,多以岩管、岩脉等形态产出,岩石类型主要有斑状金伯利岩、含角砾金伯利岩和角砾状金伯利岩,岩石普遍遭受了强烈的蛇纹石化、绿泥石化、绿帘石化、碳酸盐化、滑石化、高岭土化、硅化、蒙脱石化等蚀变。

金伯利岩岩石常呈暗灰色、浅灰色、灰绿色,具斑状结构、卵斑结构,基质具隐晶微晶结构,块状构造、岩球状构造。斑晶含量约 20%,成分主要为假象橄榄石、橄榄石,次为假象石榴子石、金云母,以及磁铁矿、钛铁矿、铬铁矿、磷灰石、透辉石等矿物,基质以微晶鳞片状蛇纹石为主,次为微晶纤片状、鳞片状黑(金)云母、绿泥石和微细粒、针柱状金属矿物,少量自形粒状磷灰石。此外,岩石中含有 2 类角砾,一类来源于深部地壳和地幔的捕虏体、捕虏晶,主要成分为纯橄榄岩、石榴辉橄岩、榴辉岩、辉长岩、煌斑岩等;另一类为围岩角砾,与围岩成分有关,主要成分为片(麻)状二长花岗岩、斜长角闪片岩、白云斜长(二长)片麻岩、大理岩等(图 2)。

3 样品特征

区内石榴子石主要分布在金伯利岩斑晶和地幔捕虏体(晶)中,呈褐红、橙色、橙红、黄褐色,玻璃光泽,无解理,透明,不平坦断口,条痕无色,性脆,高硬度。石榴子石形状多因受熔蚀而呈圆状或次圆状,部分粗大的粒径 5~10 mm(图 3),粗晶石榴子石常呈浑圆状,常见次变边外壳,呈多层同心圆状和放射状,为褐色、暗绿色—黑色,由单斜辉石、斜方辉石、尖晶石、金云母、蛇纹石等组成,被称为次变石榴子石(kelyphite),为源于地幔的石榴子石从其稳定区迁移出来后发生分解和反应所致。

4 样品分析

本次对豫南史庄一带金伯利岩中通过人工重砂样挑选出的 40 个石榴子石族矿物单晶样品进行了电子探针波谱微区化学成分分析。样品经过处理,去除表面杂质后,制作成标准的透明树脂电子探针靶,并磨抛至矿物露出表面,然后进行微区成分分析。

本次矿物电子探针分析在中国地质调查局天津地质调查中心实验测试室完成,使用仪器为日本津岛公司生产的 EPMA-1600 型电子探针仪。测试条件为:温度 24℃,湿度 25%,加速电压 15 kV,工作电子束流 20 nA,束斑直径 5 μm,分析元素范围⁴Be~⁹²U。

5 分析结果

5.1 石榴子石端元组分计算

石榴子石矿物族通式为 $A_3B_2[SiO_4]_3$,本次石榴子石端元组分计算是在胡蓉提出的计算方法基础上进行了改进^[11-12]。首先按阳离子半径大小确定端元组分排序,考虑到铁离子活动性较强,容易从外来物质中带入,故将镁离子和铬离子放在铁离子之前,在此基础上根据区内常见石榴子石分子确定石榴子石端元组分计算顺序为:钙铬榴石(Ura)-钙铁榴石(And)-钙铝榴石(Gro)-锰铝榴石(Spe)-镁铬榴石(Kno)-镁铝榴石(Pyr)-铁铝榴石(Alm)-镁铁榴石(Rho)-铁榴石(Ski)。分析数据及计算结果见表 1、表 2。

由计算结果可知,区内石榴子石由铁铝榴石(Alm: 24.8%~61.4%)、镁铝榴石(Pyr: 28.4%~59.8%)、钙铝榴石(Gro: 2.8%~14.8%)、钙铁榴石(And: 1.8%~12.79%)和锰铝榴石(Spe: 1.1%~7.19%)五种端元分子组成。石榴子石中 B 组阳离子由 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 、 Cr^{3+} 等占位, A 组阳离子由 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 等占位,其中三价阳离子以 Al^{3+} 为主,二价阳离子以 Ca^{2+} 为主,次为 Mg^{2+} 。部分样品含有钛榴石分子,以及少量钙铬榴石分子,未见镁铬榴石分子,端元组分中镁组分较高,含少量铬组分,表明研究区石榴子石族矿物为铁铝榴石(Alm)-镁铝榴石(Pyr)-钙铝榴石(Gro)系列。

5.2 镁铝榴石主要成分及其类型判别

中国已发现的金伯利岩中镁铝榴石的主要氧化物为 SiO_2 (39.20%~46.74%)、 Al_2O_3 (12.80%~

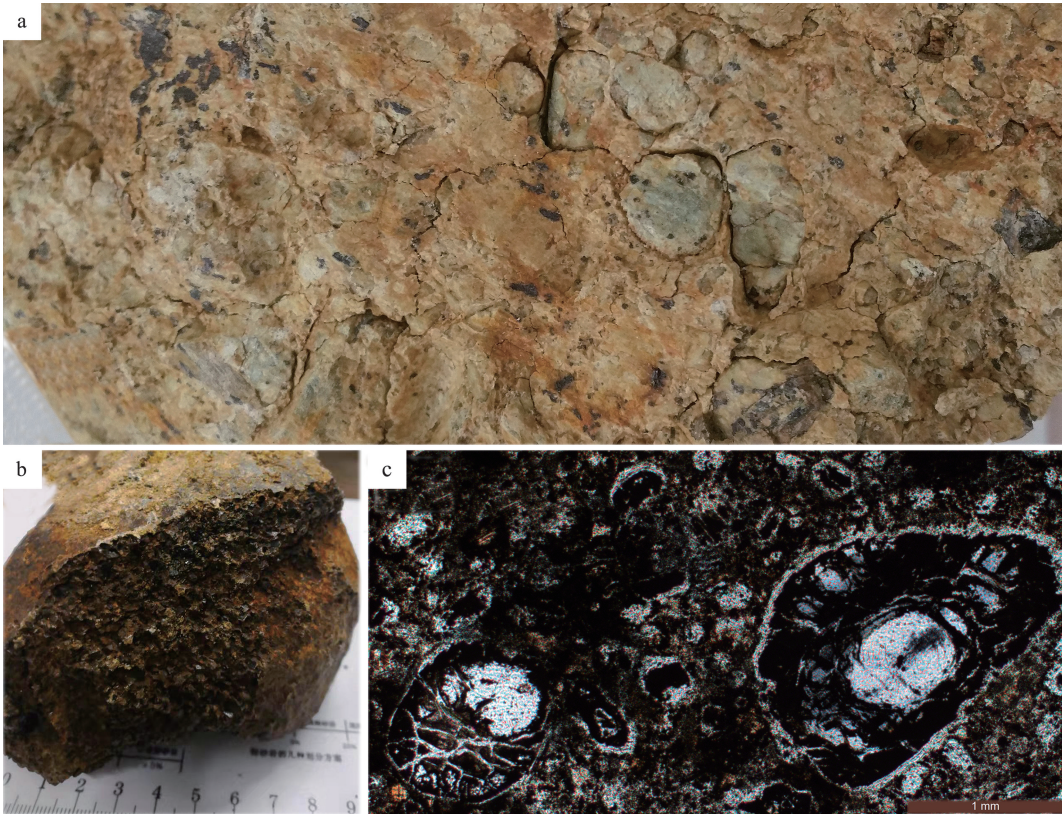


图 2 史庄一带金伯利岩岩石特征

Fig. 2 Kimberlite characteristics in Shizhuang area

a—斑状金伯利岩;b—金伯利岩中的榴辉岩角砾;c—金伯利岩薄片中的卵斑结构

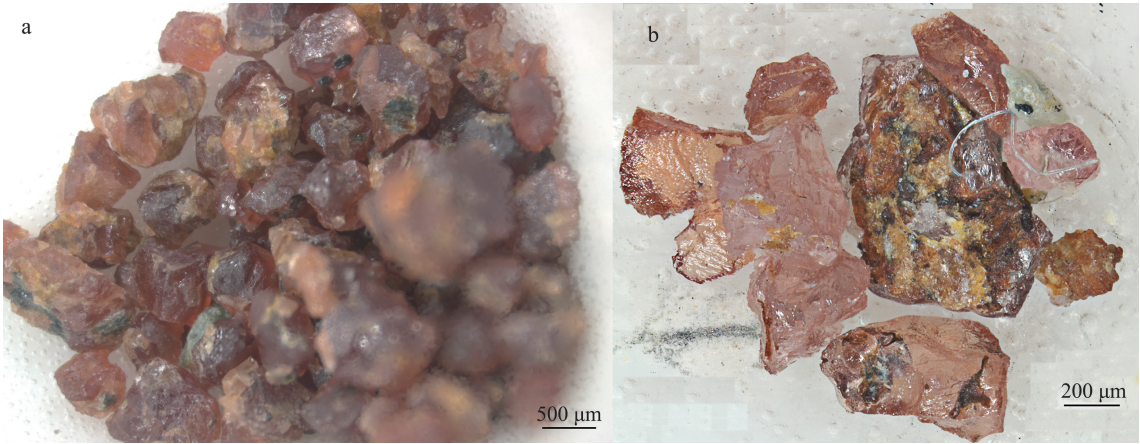


图 3 史庄一带金伯利岩中石榴子石特征

Fig. 3 Garnet characteristics of kimberlite in Shizhuang area

a—地幔捕虏体中的石榴子石;b—一次变石榴子石

23.45%)、 Cr_2O_3 (0.16% ~ 12.09%)、 FeO (3.99% ~ 13.39%)、 MgO (13.86% ~ 22.34%)、 CaO (2.80% ~ 10.87%)^[13-17]。而研究区镁铝榴石化学成分含量变

化范围: SiO_2 为 31.39% ~ 41.42%, 平均 37.44%; Al_2O_3 为 13.44% ~ 22.91%, 平均 20.70%; Cr_2O_3 为 0.01% ~ 0.25%, 平均 0.07%; FeO 为 11.21% ~ 28.93%,

表 1 史庄一带金伯利岩中石榴子石电子探针分析结果及主要阳离子系数
Table 1 Electron microprobe analysis of garnet from kimberlite in Shizhuang area and calculation results of main cation coefficients

样号	2	10	11	14	15	17	18	22	23	26	28	29	30	31	32	33	34	36	37	38
Na ₂ O	0.04	0.11	0.06	0.02	0.05	0.19	0.13	0.06	0.56	0.01	0.01	0.05	0.22	0.22	0.05	0.00	0.01	0.10	0.42	0.06
MgO	7.01	7.25	8.58	11.30	9.02	7.67	8.43	8.66	12.64	14.01	10.62	11.70	12.27	11.98	8.52	8.04	7.78	4.99	9.31	7.88
Al ₂ O ₃	20.84	21.38	22.11	20.78	13.45	19.33	19.91	21.30	22.19	21.86	21.34	20.82	22.11	21.51	22.07	21.91	17.50	17.91	21.83	21.50
SiO ₂	38.84	38.76	38.09	39.90	40.66	37.59	37.87	39.42	38.55	41.16	38.50	31.39	39.31	36.52	40.14	39.21	37.80	33.09	38.26	38.36
K ₂ O	0.00	0.04	0.03	0.00	0.01	0.09	0.04	0.03	0.29	0.00	0.00	0.00	0.07	0.01	0.00	0.00	0.00	0.80	0.17	0.03
CaO	6.20	2.18	2.83	0.98	4.52	2.68	1.82	6.17	4.28	1.02	1.03	0.96	1.01	1.04	5.85	5.54	5.20	3.74	1.50	2.38
TiO ₂	0.11	0.02	0.00	0.00	0.07	0.02	0.02	0.13	0.00	0.03	0.00	0.01	0.01	0.00	0.16	0.08	0.02	0.20	0.01	0.01
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.04	0.00	0.11	0.19	0.10	0.01	0.03	0.02	0.01	0.25	0.08	0.16	0.04	0.05	0.06	0.01	0.02	0.10
MnO	0.58	1.01	0.57	0.68	0.34	0.92	0.97	0.53	0.47	0.79	1.26	0.42	0.53	0.45	0.58	0.57	1.72	0.34	0.46	1.11
Fe ₂ O ₃	0.20	0.00	0.73	0.00	0.00	1.23	1.88	1.37	7.23	0.00	2.17	9.89	1.11	5.21	0.27	0.19	0.00	0.00	0.87	1.16
FeO	25.35	28.93	25.66	25.01	17.07	25.80	26.29	23.03	14.12	21.47	24.46	14.80	22.06	19.51	24.64	24.93	21.83	17.38	24.32	27.26
总计	99.2	99.7	98.7	98.7	85.3	95.7	97.4	100.7	100.4	100.4	99.4	90.3	98.8	96.6	102.3	100.5	91.9	78.6	97.2	99.8
以 12 个氧原子为基础的阳离子系数																				
Mg	0.82	0.84	1.00	1.30	1.20	0.93	1.00	0.98	1.41	1.55	1.22	1.47	1.39	1.40	0.95	0.92	0.97	0.93	1.09	0.91
Al	1.92	1.97	2.03	1.89	1.41	1.85	1.87	1.91	1.95	1.92	1.94	2.07	1.98	1.99	1.95	1.98	1.73	1.87	2.02	1.97
Ca	0.52	0.18	0.24	0.08	0.43	0.23	0.15	0.50	0.34	0.08	0.08	0.09	0.08	0.09	0.47	0.45	0.47	0.39	0.13	0.20
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Mn	0.04	0.07	0.04	0.04	0.03	0.06	0.07	0.03	0.03	0.05	0.08	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.12	0.03	0.03	0.07
Fe ²⁺	1.65	1.89	1.67	1.61	1.27	1.75	1.75	1.47	0.88	1.34	1.58	1.04	1.40	1.28	1.55	1.60	1.53	1.72	1.60	1.77
Fe ³⁺	0.01	0.00	0.04	0.00	0.00	0.08	0.11	0.08	0.41	0.00	0.13	0.63	0.06	0.31	0.02	0.01	0.00	0.00	0.05	0.07
Si	3.03	3.03	2.97	3.07	3.63	3.05	3.02	3.00	2.88	3.06	2.97	2.65	2.99	2.86	3.01	3.00	3.17	3.23	3.00	2.98
总计	7.99	7.98	7.99	8.00	7.99	7.96	7.98	7.98	7.89	8.00	8.00	7.99	7.96	7.97	7.98	7.99	8.00	7.87	7.92	7.99

续表 1

样号	39	40	44	46	47	48	50	55	56	60	69	72	78	82	83	84	85	86	87	89
Na ₂ O	0.18	0.44	0.07	0.05	0.00	0.16	0.15	0.04	0.03	0.06	0.05	0.14	0.06	0.13	0.13	0.09	0.10	0.15	0.01	0.00
MgO	10.16	7.32	7.80	10.85	7.05	8.34	7.22	9.27	9.09	5.95	15.17	7.07	13.83	6.78	10.19	11.61	9.76	10.56	7.69	7.23
Al ₂ O ₃	19.53	20.32	21.18	21.00	20.69	19.33	20.84	19.89	21.62	18.22	21.64	19.85	22.68	19.69	22.91	22.09	21.64	21.94	21.65	21.18
SiO ₂	34.64	35.30	37.14	36.04	36.69	36.67	37.34	33.62	38.12	31.44	38.23	34.85	38.56	35.64	39.98	38.35	37.19	37.31	38.24	38.75
K ₂ O	0.05	0.29	0.05	0.04	0.00	0.12	0.07	0.03	0.02	0.03	0.09	0.07	0.03	0.08	0.03	0.06	0.09	0.08	0.01	0.01
CaO	1.32	3.52	2.00	1.91	2.82	4.70	6.33	1.45	1.21	6.16	5.18	6.39	0.67	5.58	2.58	1.23	1.76	1.08	6.29	4.28
TiO ₂	0.03	0.04	0.02	0.03	0.01	0.05	0.11	0.01	0.00	0.05	0.01	0.08	0.01	0.05	0.00	0.01	0.09	0.00	0.13	0.02
Cr ₂ O ₃	0.02	0.12	0.06	0.04	0.13	0.05	0.01	0.00	0.04	0.04	0.09	0.00	0.02	0.04	0.06	0.01	0.05	0.00	0.02	0.08
MnO	0.68	0.99	0.47	0.78	0.78	3.04	0.59	0.61	0.83	1.02	0.32	0.48	0.58	0.51	1.17	1.20	1.13	0.16	0.53	0.58
Fe ₂ O ₃	4.55	6.09	1.88	4.08	1.63	2.17	2.83	4.43	0.00	7.13	0.66	3.14	1.79	1.64	0.00	1.60	2.71	3.28	0.92	0.00
FeO	19.96	20.74	27.02	20.21	26.89	18.82	22.25	20.96	26.41	17.75	11.21	19.59	19.64	22.09	24.43	21.79	23.04	23.33	23.46	27.16
总计	91.1	95.1	97.7	95.0	96.7	93.4	97.7	90.3	97.4	87.8	92.6	91.7	97.9	92.2	101.5	98.0	97.6	97.9	99.0	99.3
以 12 个氧原子为基础的阳离子系数																				
Mg	1.27	0.89	0.93	1.30	0.85	1.02	0.85	1.18	1.07	0.79	1.77	0.89	1.57	0.85	1.14	1.34	1.14	1.23	0.89	0.84
Al	1.93	1.95	1.99	1.98	1.97	1.87	1.94	2.00	2.01	1.92	1.99	1.97	2.04	1.94	2.02	2.01	2.00	2.02	1.98	1.95
Ca	0.12	0.31	0.17	0.16	0.24	0.41	0.54	0.13	0.10	0.59	0.43	0.58	0.05	0.50	0.21	0.10	0.15	0.09	0.52	0.36
Cr	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Mn	0.05	0.07	0.03	0.05	0.05	0.21	0.04	0.04	0.06	0.08	0.02	0.03	0.04	0.04	0.07	0.08	0.08	0.01	0.04	0.04
Fe ₂₊	1.40	1.42	1.80	1.35	1.82	1.29	1.47	1.49	1.74	1.32	0.73	1.38	1.25	1.55	1.53	1.41	1.51	1.52	1.53	1.77
Fe ₃₊	0.29	0.37	0.11	0.25	0.10	0.13	0.17	0.28	0.00	0.48	0.04	0.20	0.10	0.10	0.00	0.09	0.16	0.19	0.05	0.00
Si	2.91	2.88	2.96	2.89	2.96	3.01	2.95	2.86	3.01	2.80	2.99	2.93	2.94	2.99	3.00	2.96	2.92	2.91	2.97	3.03
总计	7.96	7.90	7.98	7.99	8.00	7.96	7.96	7.99	7.99	7.98	7.98	7.96	7.99	7.99	7.98	7.98	7.97	7.97	7.99	8.00

注:表中 FeO、Fe₂O₃ 含量为铁离子电价调整后的含量

表 2 史庄一带金伯利岩中石榴子石矿物端元组分特征
Table 2 End-member components of garnet from kimberlite in Shizhuang area

样号	2	10	11	14	15	17	18	22	23	26	28	29	30	31	32	33	34	36	37	38
Ura	\	\	0.11	\	0.55	0.63	0.32	0.04	0.09	0.07	0.03	0.95	0.24	0.36	0.13	0.14	0.22	0.04	0.07	0.30
And	0.61	\	2.19	\	0.00	3.88	4.90	3.93	12.79	0.00	2.83	2.33	2.59	2.59	0.77	0.56	0.00	0.00	2.70	3.44
Gro	17.32	6.17	5.73	2.86	19.72	3.51	0.00	12.88	0.00	2.76	0.00	0.00	0.00	0.00	15.01	14.52	17.74	15.24	1.66	2.98
Spe	1.32	2.27	1.28	1.56	1.19	2.19	2.20	1.15	1.12	1.72	2.78	1.15	1.18	1.06	1.24	1.24	4.71	1.10	1.08	2.47
Pyr	28.17	28.59	33.88	45.86	56.26	31.95	33.67	32.91	52.87	54.01	41.17	55.88	47.77	50.17	32.24	30.72	37.43	28.39	38.32	30.87
Alm	52.57	62.97	56.82	49.72	22.27	57.86	58.50	49.10	33.14	41.45	53.18	39.68	48.21	45.83	50.58	52.82	39.90	55.52	56.17	59.96
钙组分	17.9	6.2	8.0	2.9	20.3	8.0	5.2	16.8	12.9	2.8	2.9	3.3	2.8	3.0	15.9	15.2	18.0	15.3	4.4	6.7
镁组分	28.17	28.59	33.88	45.86	56.26	31.95	33.67	32.91	52.87	54.01	41.17	55.88	47.77	50.17	32.24	30.72	37.43	28.39	38.32	30.87
铬组分	\	\	0.11	\	0.55	0.63	0.32	0.04	0.09	0.07	0.03	0.95	0.24	0.36	0.13	0.14	0.22	0.04	0.07	0.30
样号	39	40	44	46	47	48	50	55	56	60	69	72	78	82	83	84	85	86	87	89
Ura	0.06	0.42	0.18	0.13	0.41	0.15	\	\	0.13	0.14	0.18	\	0.05	0.15	0.18	0.04	0.17	\	0.07	0.26
And	4.12	11.05	5.64	5.58	5.03	6.83	8.73	4.65	0.00	21.02	1.96	10.36	1.83	5.28	0.00	3.45	4.99	3.15	2.72	0.00
Gro	0.00	0.00	0.00	0.00	2.79	7.09	9.79	0.00	3.33	0.00	12.46	9.67	0.00	11.68	6.84	0.00	0.00	0.00	14.82	11.95
Spe	1.70	2.54	1.08	1.84	1.79	7.19	1.37	1.54	1.88	2.77	0.73	1.19	1.28	1.23	2.52	2.69	2.61	0.38	1.18	1.31
Pyr	44.77	33.21	31.63	45.19	28.66	34.74	29.35	41.35	35.99	28.43	59.86	30.84	53.90	28.87	38.57	45.71	39.70	43.07	29.95	28.73
Alm	49.35	52.79	61.46	47.25	61.33	43.98	50.76	52.46	58.67	47.64	24.81	47.93	42.94	52.82	51.88	48.12	52.56	53.38	51.27	57.75
钙组分	4.18	11.47	5.82	5.71	8.23	14.08	18.52	4.65	3.45	21.17	14.60	20.03	1.87	17.10	7.02	3.49	5.16	3.15	17.61	12.21
镁组分	44.77	33.21	31.63	45.19	28.66	34.74	29.35	41.35	35.99	28.43	59.86	30.84	53.90	28.87	38.57	45.71	39.70	43.07	29.95	28.73
铬组分	0.06	0.42	0.18	0.13	0.41	0.15	\	\	0.13	0.14	0.18	\	0.05	0.15	0.18	0.04	0.17	\	0.07	0.26

平均 22.27% ;MgO 为 4.99%~15.17% ,平均 9.26% ;CaO 为 0.67%~6.39% ,平均 3.18% ;TiO₂为0.03%~0.20% ,平均 0.04% 。

与国内一般金伯利岩相比,研究区镁铝榴石中 MgO、Cr₂O₃ 含量较低,FeO 和 TiO₂ 含量略高,具有含钛低铬富铁的特征。Dawson 等^[18] 根据石榴子石中主要化学成分 FeO、MgO、CaO、TiO₂、Cr₂O₃ 等的含量和来源将其分为 12 个组(表 3)。根据该分类方案,研究区石榴子石主要类型对应 G4、G5 型(含钛、钙)镁铝-铁铝榴石(表 3),其特征与金伯利岩、A 组榴辉岩及金刚石包体中的石榴子石特征相似。

金伯利岩中的镁铝榴石主要有 2 个颜色类型,即紫色系列和橙色系列,紫色类型的 Cr₂O₃ 和 MgO 含量随颜色的加深而升高,Al₂O₃ 和 FeO 含量随颜色的加深而下降;橙色类型的 Cr₂O₃ 和 MgO 含量低于紫色类型,Al₂O₃、FeO、CaO 含量明显高于紫色类型,在橙色系列中,Cr₂O₃ >1% ,Al₂O₃ <21% ,Cr/(Cr+AL) >1% ,且钙铬榴石组分大于 4% 的为富铬镁铝榴石^[19-27]。与山东、辽宁镁铝榴石相比,研究区镁铝榴石缺乏紫色系列,SiO₂、MgO、FeO、Al₂O₃、CaO 含量相近,TiO₂、Cr₂O₃ 含量较低,为含铬的橙色系列镁铝榴石(图 4)。

6 讨 论

6.1 镁铝榴石化学成分特征及其地质意义

在金伯利岩中,镁铝榴石的 Cr₂O₃ 含量是最重要的标型成分,含镁铬榴石分子和钙铬榴石分子高的(即铬组分高的)富铬镁铝榴石,与金刚石形成所需要的热动力条件(高温高压)相近^[28]。与金刚石密切伴生的镁铝榴石中 Al₂O₃ 与 Cr₂O₃ 的反消长关系,也有重要标型意义。所以,镁铝榴石中的 Cr₂O₃、Al₂O₃ 和 CaO 含量、镁铬榴石分子、钙铬榴石分子、铬组分是区分金伯利岩与其他岩类及判断金伯利岩含矿性的重要依据和指示剂^[27]。

金伯利岩中镁铝榴石 Cr₂O₃ 的含量变化范围很大(0.01%~12.78%),在橙色系列中绝大部分镁铝榴石的 Cr₂O₃ <0.3% ,橙红色比橙黄色富 Cr₂O₃ ,Cr₂O₃ 主要分布在含钙铬镁榴石、镁铝榴石和镁铬榴石中,根据金伯利岩含矿性,镁铝榴石的 Cr₂O₃ 含量由富矿—贫矿—极贫矿—不含矿出现有规律地降低,在橙色系列中依次为 2.8%~2.39%~0.55%~0.1%~0.14%^[28]。研究区镁铝榴石为橙红色,Cr₂O₃ 含量为 0.01%~0.25% ,处于贫矿到极贫矿的区间。

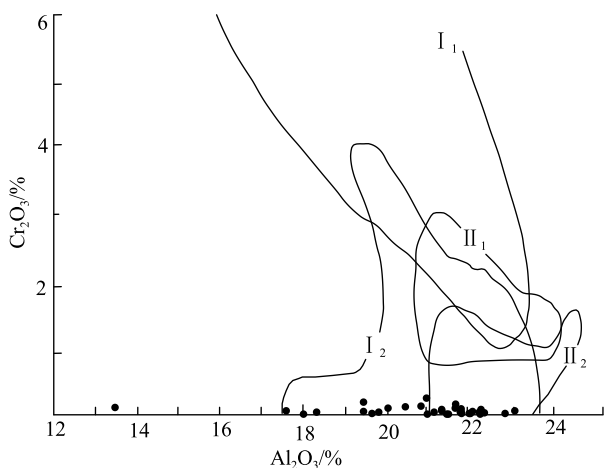
金伯利岩镁铝榴石中 Cr₂O₃ 和 Al₂O₃ 含量呈明显的反消长关系,尤其在紫色系列中负相关关系更

表 3 Dawson-Stephens 分类石榴子石产状及特征氧化物平均值^[18]

Table 3 Dawson-Stephens classification garnet production and average value of characteristic oxides

%							
分组	矿物名称	Cr ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	CaO	FeO	产状
G1	钛-镁铝榴石	1.34	20	0.58	4.82	9.32	K, GL, GOW, D
G2	高钛-镁铝榴石	0.91	20.3	1.09	4.52	9.84	K
G3	钙-镁铝榴石、镁铝榴石	0.3	13.35	0.31	6.51	16.49	K, GL, GOW, EC, D
G4	钛、钙、镁-铁铝榴石	0.08	9.87	0.9	9.41	17.88	K, EC, D
G5	镁-铁铝榴石	0.03	7.83	0.05	2.44	28.33	K, EC, D
G6	镁铝榴石-钙铝榴石-铁铝榴石	0.27	10.38	0.24	14.87	10.77	GP, EC, GR
G7	铁-镁-钙铬榴石-钙铝榴石	11.52	8.61	0.29	21.6	5.25	K, GS
G8	铁-镁-钙铝榴石	0.04	4.69	0.25	24.77	6.91	GR
G9	铬-镁铝榴石	3.47	20.01	0.17	5.17	8.01	K, GL, GOW, GH, EC, D
G10	低钙-高铬镁铝榴石	7.73	23.16	0.04	2.13	6.11	K, GS, D
G11	钙铬榴石-镁铝榴石	9.55	15.89	0.51	10.27	7.54	K, GL, GWH, D
G12	镁铬榴石-钙铬榴石-镁铝榴石	15.94	15.4	0.18	9.51	7.47	K, GS

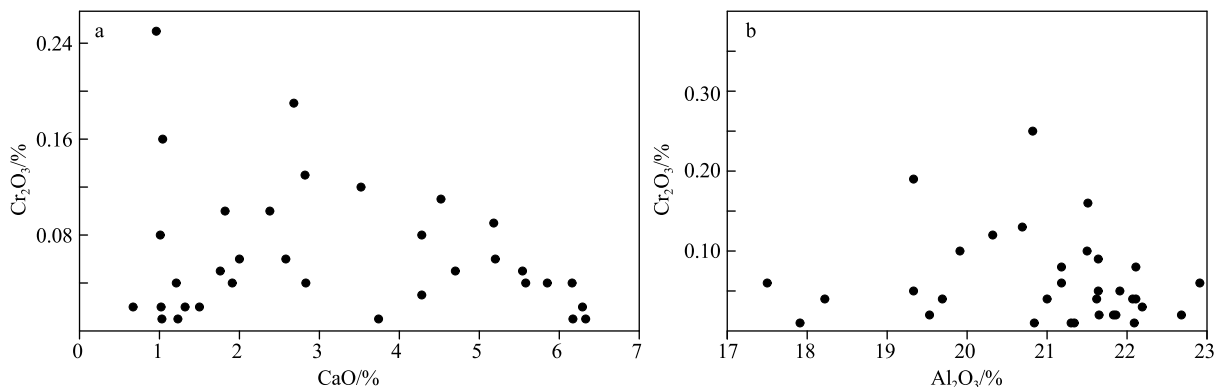
注:K—金伯利岩;GL—石榴二辉橄榄岩;GH—石榴方辉橄榄岩;GD—石榴纯橄岩;GS—石榴蛇纹岩;GOW—石榴橄榄二辉岩;GP—石榴辉石岩;GWH—石榴易剥橄榄岩;GR—辉榴蓝晶岩;EC—榴辉岩;D—金刚石包体

图4 史庄一带镁铝榴石 Al_2O_3 - Cr_2O_3 图解

(据参考文献[26]修改)

Fig. 4 Al_2O_3 - Cr_2O_3 diagram of pyrope in Shizhuang areaI₁—金伯利岩中的紫色系列; I₂—金伯利岩中的橙色系列;II₁—其他岩类中的紫色系列; II₂—其他岩类中的橙色系列

明显,这与 Cr^{3+} 、 Al^{3+} 具有相同的地球化学形状而呈类质同象替代有关,其他岩类中镁铝榴石 Al_2O_3 含量大于 21%,而在金伯利岩中大多 Al_2O_3 含量小于 21%,金伯利岩中 Al_2O_3 含量与岩石中金刚石含量呈明显的反消长关系;金伯利岩中镁铝榴石的 CaO 为 2.80%~10.87%,比其他岩类中的变化范围略大,金伯利岩中橙色系列镁铝榴石的 Cr_2O_3 与 CaO 则有反消长的趋势^[29]。研究区镁铝榴石中 CaO 偏低, Cr_2O_3 与 CaO 负相关关系明显,部分镁铝榴石 Al_2O_3 含量大于 21%,为少量围岩中的石榴子石混入所致;镁铝榴石中 Cr_2O_3 和 Al_2O_3 的负相关关系表现较弱(图 5),表明 Cr^{3+} 和 Al^{3+} 的类质同象替代有限。

图5 史庄一带镁铝榴石中 CaO - Cr_2O_3 (a)和 Al_2O_3 - Cr_2O_3 (b)关系图Fig. 5 Diagrams of CaO - Cr_2O_3 (a) and Al_2O_3 - Cr_2O_3 (b) for pyrope in Shizhuang area

Jamtveit 等^[30-31]指出,流体温度和盐度的降低、pH 值和氧逸度的升高能促进钙铁榴石的形成。富钙石榴子石的出现意味着不利于金刚石生长的环境,这是因为 CaO 增高、 MgO 降低和 Fe^{3+} 增高,说明岩浆的氧化程度增强,导致金刚石生长减慢甚至停止^[32]。研究区石榴子石系列中出现较多的铁铝榴石和钙铝榴石,钙铁榴石组分较少,暗示流体温度的 pH 值和氧逸度相对稳定,反映研究区金伯利岩是在相对封闭的平衡条件下形成的,指示其温度、pH 值、氧逸度和盐度未出现大的扰动。

在 Dawson 等^[18]对石榴子石化学成分的 12 个组分类的基础上,Gurney 等^[33]进一步简化了一些变量,对 CaO 、 Cr_2O_3 含量界线作了调整,提高了具“指示”矿物意义的石榴子石比例,总结出了 CaO - Cr_2O_3 图解。根据金刚石中镁铝榴石包体的 Cr_2O_3 和 CaO 成分散点图,与金刚石共生的石榴子石可分为橄榄岩型(P 型)和榴辉岩型(E 型)2 种,所有榴辉岩型分布于 $\text{Cr}_2\text{O}_3 < 2\%$ 的区域,橄榄岩型石榴子石分布于 $\text{Cr}_2\text{O}_3 > 2\%$ 的区域^[34]。研究区石榴子石中 $\text{Cr}_2\text{O}_3 < 2\%$, CaO 含量一般为 1%~6%, CaO - Cr_2O_3 成分均落在榴辉岩型(E 型)区域,因此研究区石榴子石与榴辉岩型金刚石包体中的石榴子石成分相似,显示出镁铝榴石与榴辉岩型金刚石密切共生的关系(图 6)。

根据图 7,研究区镁铝榴石分布在 A 区和 B 区,未出现在 C 区,A 区为来自地幔,B 区为来自地幔捕虏体中的榴辉岩,表明研究区镁铝榴石部分来自地幔,金伯利岩在侵位过程中可能受到围岩同化混染作用,有少量围岩中的石榴子石混入。

6.2 超硅石榴子石特征

人工条件下的实验证明,在超高压条件下各种

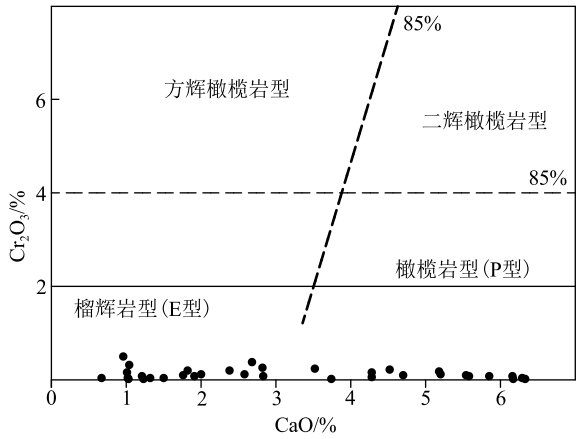


图 6 史庄一带镁铝榴石 Gurney 图解(据参考文献[34]修改)
Fig. 6 Gurney diagram of pyrope in Shizhuang area

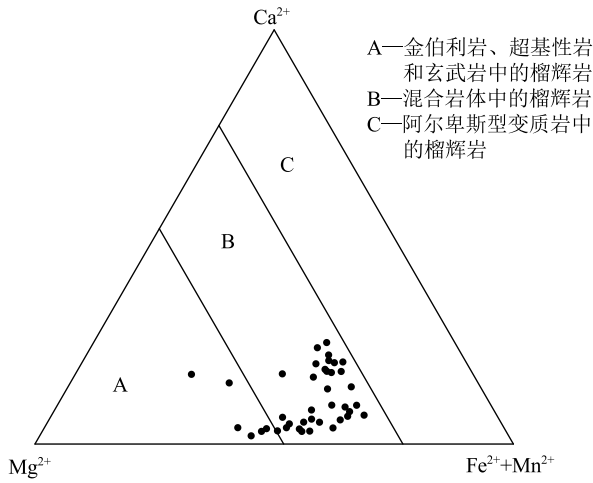


图 7 榴辉岩型石榴子石 $\text{Ca}^{2+}-\text{Mg}^{2+}-(\text{Fe}^{2+}+\text{Mn}^{2+})$ 离子三角图(据参考文献[35]修改)
Fig. 7 $\text{Ca}^{2+}-\text{Mg}^{2+}-(\text{Fe}^{2+}+\text{Mn}^{2+})$ ion triangle diagram of eclogite garnet

辉石开始溶入石榴子石,形成辉石-石榴子石固溶体,同时,辉石在石榴子石中的溶解度也随压力的增加而增大^[36]。由于石榴子石的 Si : O 值为 1 : 4,而辉石的 Si : O 值为 1 : 3,所以当辉石溶入石榴子石时,部分 Si^{4+} 替代 Al^{3+} 、 Cr^{3+} 、 Fe^{3+} 等三价阳离子进入八面体位置,从而形成 $\text{Si}(\text{pfu}) > 3.0$ 的超硅石榴子石,其稳定存在的压力一般大于 5 GPa,是典型的超高压成因矿物^[37]。

根据表 1 计算结果,研究区 14 号、15 号、17 号、26 号、34 号和 36 号 6 个样品中,在矿物化学特征以 12 个氧为单位的结构式中, $\text{Si}(\text{pfu}) > 3.5$,为超硅石

榴子石,其中有 2 粒为镁铝榴石,4 粒为铁铝榴石。超硅石榴子石分子式见表 4。

与上述超高压变质岩和金刚石中包裹体的超硅石榴子石一样,研究区高硅石榴子石具有高镁、低钙的特点,指示该石榴子石可能来源于幔源物质。超硅石榴子石八面体位置中 Si 的含量随着压力的增大而增加,Song 等^[38-40]认为,硅在石榴子石中的含量是一个很有潜力的地质压力计。根据 Collerson 等^[38]利用实验岩石学数据总结出计算压力的经验公式:

$$p(\text{ GPa}) = -50.7 + 18.97N(\text{ Si}) \quad (1)$$

$$p(\text{ GPa}) = 23.7 - 9.06 N(\text{ Al} + \text{ Cr}) \quad (2)$$

式中, p 为石榴子石形成时的压力, N 为进入石榴子石矿物八面体中的原子数。研究区超硅石榴子石矿物中 Si 进入八面体的原子数为 0.05~0.63,平均为 0.21,Al 进入八面体的原子数为 1.41~1.92,平均为 1.78。在八面体中, Al^{3+} 占位 70%~94%,平均 89%, Mg^{2+} 占位 31%~51%,平均 38%, Ca^{2+} 占位 3%~15%,平均 9%, Fe^{3+} 占位 42%~58%,平均 51%,Cr 几乎为零,带入公式,可以得到本区压力范围为 10.2~10.9 GPa,其对应深度可超过 250km,考虑到温度效应,该深度可能会降低,但其深度和压力已经达到金刚石稳定区范围(大于 4 GPa)^[41-42]。

7 结 论

(1)研究区石榴子石矿物族化学式中 A 组阳离子主要为 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} 等占位,B 组阳离子主要由 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 和少量 Cr^{3+} 等占位,其中三价阳离子以 Al^{3+} 为主,二价阳离子以 Ca^{2+} 为主,其次为 Mg^{2+} 。石榴子石矿物族由铁铝榴石(24.8%~61.4%)、镁铝榴石(28.4%~59.8%)、钙铁榴石(1.8%~21.0%)、钙铝榴石(2.8%~14.8%)、锰铝榴石(1.1%~7.19%)5 种端元分子组成,含少量钛榴

表 4 史庄一带金伯利岩中超硅石榴子石
Table 4 Supersilic garnet of kimberleyite in Shizhuang area

样号	超硅石榴子石分子式 $[\text{SiO}_4]_3$
14	$(\text{Mg}_{1.30}\text{Fe}_{1.61}\text{Ca}_{0.08})_{2.99}(\text{Al}_{1.89}\text{Si}_{0.07})_{1.96}[\text{SiO}_4]_3$
15	$(\text{Mg}_{1.20}\text{Fe}_{1.27}\text{Ca}_{0.43})_{2.90}(\text{Al}_{1.41}\text{Si}_{0.63})_{2.04}[\text{SiO}_4]_3$
17	$(\text{Mg}_{0.93}\text{Fe}_{1.75}\text{Ca}_{0.23})_{2.91}(\text{Al}_{1.85}\text{Si}_{0.05})_{1.90}[\text{SiO}_4]_3$
26	$(\text{Mg}_{1.55}\text{Fe}_{1.34}\text{Ca}_{0.08})_{2.97}(\text{Al}_{1.92}\text{Si}_{0.06})_{1.98}[\text{SiO}_4]_3$
34	$(\text{Mg}_{0.97}\text{Fe}_{1.53}\text{Ca}_{0.47})_{2.97}(\text{Al}_{1.73}\text{Si}_{0.17})_{1.90}[\text{SiO}_4]_3$
36	$(\text{Mg}_{0.93}\text{Fe}_{1.72}\text{Ca}_{0.39})_{3.04}(\text{Al}_{1.87}\text{Si}_{0.23})_{2.10}[\text{SiO}_4]_3$

石分子和钙铬榴石分子,为铁铝榴石(Alm)-镁铝榴石(Pyr)-钙铝榴石(Gro)系列。

(2)研究区石榴子石中 MgO 、 Cr_2O_3 含量较低, FeO 含量较高,具有含钛低铬富铁的特征,属 G4、G5(含钛、钙)镁铝-铁铝榴石,其特征和金伯利岩榴辉岩及金刚石包体中的石榴子石特征相似。

(3)研究区镁铝榴石为橙色系列,属于榴辉岩型(E型)石榴子石,与榴辉岩型金刚石包体中的石榴子石成分相似,显示出与榴辉岩型金刚石密切共生的关系。

(4)研究区见超硅石榴子石矿物,具有高镁、低钙的特点,指示该石榴子石可能来源于幔源物质;通过超硅石榴子石进行计算,压力范围为10.2~10.9 GPa,其对应深度可超过 250 km,深度和压力已经达到金刚石稳定区范围(大于 4 GPa)。

致谢:野外调查、采样工作由项目组人员共同完成,样品测试在中国地质调查局天津中心实验测试室完成,评审老师对本文提出了宝贵的修改意见,谨此一并表示衷心的感谢。

参考文献

- [1] 中华邦. 豫南金伯利岩体群若干特征[J]. 中国地质, 1984, (7): 22-23.
- [2] 中华邦. 豫南首次发现金伯利集块岩[J]. 矿物岩石, 1985, 10: 98-110.
- [3] 段润木, 高宗和. 河南省深部构造与金刚石成矿[J]. 河南地质, 1990, 8(2): 1-9.
- [4] 郑建平, 路风香. 华北地台北古生代与新生代岩石圈地幔特征及其演化[J]. 地质学报, 1999, 73(1): 47-56.
- [5] 张宏福, 路风香. 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(D 辑), 2000, 30(2): 128-134.
- [6] 池际尚, 路风香. 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, 1996.
- [7] 侯广顺, 李明, 吴成斌, 等. 河南省原生金刚石矿找矿潜力分析[J]. 宝石和宝石学杂志, 2014, 16(6): 1-5.
- [8] 李积山, 唐相伟, 郭跃闪, 等. 豫南史庄一带金伯利岩中央晶石矿物化学特征及其对金刚石找矿的启示[J]. 地质通报, 2020, 39(10): 1639-1649.
- [9] 邱瑞照, 赵春国, 邱磊, 等. 非洲大陆岩石圈演化与成矿关系[J]. 地质通报, 2020, 41(1): 19-33.
- [10] 单莉, 牛耀龄, 马绍龙, 等. 鲁西泰山地区新太古代闪长岩及角闪岩岩石成因及其对地壳演化的制约[J]. 地质通报, 2021, 40(7): 1149-1177.
- [11] 胡蓉. 金伯利岩中镁铝榴石端元分子计算方法的探讨[J]. 矿物学报, 1982, 2: 188-192.
- [12] 刘慧芳, 雷新荣. 电子探针定量分析 FeO 与 Fe_2O_3 的新方法: 峰形拟合直接测定法[J]. 地质科技情报, 2011, 30(3): 137-142.
- [13] 池际尚, 路风香. 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, 1996: 59-64.
- [14] 董振信. 中国金伯利岩[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 255-256.
- [15] 赵秀芳. 山东蒙阴县西峪矿区深部与外围金刚石指示矿物——利用金刚石指示矿物预测金伯利岩的含矿性[J]. 地质通报, 2019, 38(1): 121-131.
- [16] 侯广顺, 向世英, 齐永安, 等. 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, 2016, 36(3): 318-328.
- [17] 董振信. 含矿不同的金伯利岩中若干副矿物的特征[J]. 非金属矿, 1984, 4: 8-16.
- [18] Dawaon J B, Stephens W E. Statistical classification of garnets from kimberlite and associated xenoliths[J]. The Journal of Geology, 1975, 83(5): 589-607.
- [19] 马大铨. 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[J]. 中国地质科学院院报-宜昌地质矿产研究所分刊, 1980, 1(1): 26-38.
- [20] 黄进初. 镁铝榴石的化学成分分类及其在金刚石找矿中的指示意义[J]. 矿物岩石, 1990, 10(1): 12-18.
- [21] 赵秀英. 辽宁金伯利岩中的镁铝榴石与金刚石的关系[J]. 矿物学报, 1988, 8(1): 30-38.
- [22] 周秀中, 黄蕴慧, 秦淑英, 等. 山东、辽宁金伯利岩中石榴石的类型、标型特征及其与金刚石的关系[J]. 岩石矿物学杂志, 1991, 10(3): 252-264.
- [23] 蔡逸涛, 陈国光, 张洁, 等. 安徽栏杆地区橄榄辉长岩地球化学特征及其与金刚石成矿的关系[J]. 资源调查与环境, 2014, 35(4): 245-253.
- [24] 李荣锡, 衣德学. 金刚石原生矿成矿预测的地质依据[J]. 非金属矿, 1994, 6: 10-12.
- [25] 张安棣. 金刚石找矿指示矿物研究及数据库[M]. 北京: 科学技术出版社, 1991: 1-162.
- [26] 张广城. 我国金伯利岩中镁铝榴石的化学成分特征及找矿意义[J]. 矿物岩石, 1981, (Z1): 118-126.
- [27] 隋延辉, 戚长谋. 金伯利岩中铬的相态及找矿地球化学信息——以华北地台为例[J]. 世界地质, 2003, 22(4): 373-375.
- [28] 钟风竹. 含矿金伯利岩的标型矿物及其特征[J]. 矿物岩石, 1983, 1: 23-34.
- [29] 董振信. 我国金伯利岩及其他岩石类中的镁铝榴石[J]. 矿物学报, 1981, 4: 219-229.
- [30] Jamtvert B, Ragnarsdottir K, Wood B. On the origin of zoned grossular-andradite garnets in hydrothermal systems[J]. European Journal of Mineralogy, 1995, 7(6): 1399-1410.
- [31] Jamtvert B, Wogelius R, Fraser D. Zonation patterns of skarn garnets - records of hydrothermal system evolution[J]. Geology, 1993, 21(2): 113-116.
- [32] 刘观亮, 汪雄武. II型金刚石形成的地质条件探讨[J]. 中国地质科学院宜昌地质矿产研究所所刊, 1989, 14: 41-81.
- [33] Gurney J J, Glover J E, Harris P G. A correlation between garnets and diamonds, kimberlite occurrence and origin: a basis for conceptual models in exploration[J]. Geology Department, University Extension, University of Western Australia, Publ., 1984, 8: 143-166.
- [34] 郑建平, 路风香. 金刚石中的流体包裹体研究[J]. 科学通报, 1994,

- 39(3): 253–256.
- [35] 周琦忠, 施建斌, 黄友波, 等. 江苏徐州西村金伯利岩管地质特征及其找矿意义[J]. 地质通报, 2019, 38(1): 152–162.
- [36] Akaogi M, Akimoto S. Pyroxene–garnet solid–solution equilibria in the systems $\text{Mg}_4\text{Si}_4\text{O}_{12}$ – $\text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ and $\text{Fe}_4\text{Si}_4\text{O}_{12}$ – $\text{Fe}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ at high pressures and temperatures[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 1977, 15(1): 90–106.
- [37] 蔡逸涛, 张洁, 康丛轩, 等. 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, 2019, 38(1): 110–120.
- [38] Van Roermund H L M, Drury M R, Barnhoorn A, et al. Super-silicic garnet microstructures from an orogenic garnet peridotite, evidence for an ultra-deep (>6 GPa) origin[J]. Journal of Metamorphic Geology, 2000, 18(2): 135–147.
- [39] Roermund V, Herman L, Drury M R. Ultra-high pressure ($P > 6\text{ GPa}$) garnet peridotites in Western Norway: exhumation of mantle rocks from > 185 km depth [J]. Terra Nova, 1998, 10: 295–301.
- [40] Collerson K D, Hapugoda S, Kamber B S, et al. Rocks from the Mantle Transition Zone: Majorite–Bearing Xenoliths from Malaita, Southwest Pacific[J]. Science, 2000, 288(5469): 1215–1223.
- [41] 陆风香, 郑建平, 陈美华. 有关金刚石形成条件的讨论[J]. 地学前缘, 1998, 5(3): 125–131.
- [42] 胡思颐. 蒙阴金伯利岩的形成温度与压力[J]. 山东地质, 1985, 1(1): 79–84.
- ①李积山, 刘浩, 陈春阳, 等. 河南省信阳市史庄一带金刚石矿预查报告. 河南省地矿局第三地质矿产调查院, 2019: 1–108.
- ②李荣锡, 刘继太, 张列生, 等. 中国金刚石原生矿成矿预测研究报告. 山东省地矿局第七地质队, 1991: 1–135.

《地质通报》第 41 卷第 6 期要目预告

找矿突破战略行动十年胶东深部金矿理论与勘查进展	宋明春等
基于综合地球物理约束的胶东焦家–三山岛断裂带三维地质建模: 成矿特征与找矿启示	贺春艳等
胶西北水旺庄金矿床 3000 m 深度找矿预测及验证	刘向东等
胶东焦家超巨型金矿床三维空间特征及赋矿规律	杨真亮等
胶东三山岛超巨型金矿床三维地质模型及深部矿体与断裂的耦合关系	李瑞翔等
胶东玲南–水旺庄巨型金矿床三维地质特征及断裂控矿规律	王永庆等
胶东大尹格庄–曹家洼金矿床三维空间特征及矿化富集规律新认识	解天赐等
胶东金矿硫同位素组成特征及其来源	李杰等
胶东东部金青顶金矿床成因研究: 硫化物矿石与围岩微量元素的制约	李健等
胶东蓬莱黑岚沟金矿床黄铁矿微区地球化学特征及其地质意义	李秀章等
胶状黄铁矿成因类型与鉴别特征	张宏睿等
胶东辽上金矿床的流体包裹体、H–O–C–S–Pb 同位素特征及矿床成因探讨	梁辉等
胶西北焦家断裂带深部成矿流体包裹体	舒磊等
胶东主要金矿类型流体包裹体特征对比及对其成矿环境差异指示——以纱岭、旧店和辽上金矿床为例	王珊珊等
胶东半壁店隐伏金矿床的综合地球物理探测	孟银生等
胶东北部大柳行地区成矿构造的广域电磁法勘查和找矿	黄鑫等