安徽栏杆含金刚石基性岩中石榴子石矿物学特征

蔡逸涛¹,张 洁¹,康丛轩¹,杨献忠¹,曹正琦²,董钟斗³,马玉广³,施建斌⁴ CAI Yitao¹, ZHANG Jie¹, KANG Congxuan¹, YANG Xianzhong¹, CAO Zhengqi², DONG Zhongdou³, MA Yuguang³, SHI Jianbin⁴

1. 中国地质调查局南京地质调查中心,江苏南京 210016;

2. 湖北省地质调查院,湖北 武汉 430034;

3. 安徽省地勘局第二水文地质工程勘察院,安徽 芜湖 241000;

4. 江苏省地质矿产局第五地质大队,江苏徐州 221004

1. Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China;

2. Hubei Institute of Geological Survey, Wuhan 430034, Hubei, China;

3. The Second Institute of Hydrology and Engineering Geological Prospecting, Anhui Geological Prospecting Bureau, Wuhu 241000, Anhui, China;

4. No. 5 Geological Party, Jiangsu Bureau of Geology and Mineral Resources, Xuzhou 221004, Jiangsu, China

摘要:在中国东部皖北地区分布着新元古代镁铁质岩,其中一些碱性基性岩为金刚石的赋矿岩石。为了确定安徽栏杆金刚石 矿区的石榴子石种类,对矿区内不同类型的石榴子石进行系统采样,测定了62件石榴子石微区化学成分。结果显示,安徽栏 杆石榴子石矿物化学式A₃²⁺B₂³⁺(SiO₄)₃中的A组阳离子由Mg²⁺、Fe²⁺和Ca²⁺离子占位,B主要由Al³⁺、Fe³⁺、Mn³⁺和Cr³⁺离子占位, 三价阳离子主要为Al³⁺,二价阳离子主要为Ca²⁺,表明研究区石榴子石主要为钙铝-钙铁-镁铝石榴子石系列。在62个样品中, 发现了超硅石榴子石。经过计算其形成的压力范围为12.1~12.8GPa,深度可达300km。 关键词:石榴子石;超硅石榴子石;含金刚石母岩;安徽栏杆

中图分类号:P619.24⁺1;P619.24⁺4 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2019)01-0110-11

Cai Y T, Zhang J, Kang C X, Yang X Z, Cao Z Q, Dong Z D, Ma Y G, Shi J B. Mineral chemistry characteristics of garnets in diamondiferous basite of Lan'gan area, Anhui Province. *Geological Bulletin of China*, 2019, 38(1):110–120

Abstract: The mafic rock is exposed in northern Anhui Province, and some of them are diamondiferous rocks. In order to determine the type of garnets, the authors systematically sampled the garnets in diamondiferous basite in Lan'gan area. The MgO, SiO₂, FeO, TiO₂, Al₂O₃, Cr₂O₃, CaO, MnO values of 62 single crystal garnets in this area were measured by electron microprobe spectrometer. The results show that the chemical formula of garnet group minerals is $A_3^{2+}B_2^{3+}(SiO_4)_3$. Group A cations are composed of Mg^{2+} , Fe²⁺ and Ca²⁺. Group B cations are composed of Al³⁺, Fe³⁺, Mn³⁺ and Cr³⁺. The trivalent cation is mainly Al³⁺ while divalent cation is mainly Ca²⁺. It is inferred that grossularite–andradite–almandine group is the primary class in the Lan'gan area. The high calcium silicate iron garnet (majorite) was found in 62 samples. According to the composition of these majorities in Lan'gan area, the garnet of the diamondiferous basite has formation pressure of 12.1~12.8GPa, and the depth is up to 300km.

Key words: garnet; majorite; diamondiferous rocks; Lan'gan area; Anhui Province

收稿日期:2018-05-10;修订日期:2018-06-15

资助项目:国家自然科学基金青年科学基金项目《安徽栏杆含金刚石母岩及金刚石矿床指示矿物特征研究》(批准号:41402075)和中国地质调查局项目《安徽栏杆金刚石成矿规律与苏皖地区金刚石找矿靶区优选》(编号:12120114054301)、《华北和扬子地区金刚石 矿产调查》(编号:DD20160059)

作者简介:蔡逸涛(1982-),男,博士,高级工程师,从事金刚石矿产地质调查及研究。E-mail:ivan821129@163.com

通讯作者:张洁(1980-),女,博士,高级工程师,从事矿产及遥感地质学研究。E-mail:3976618@qq.com

石榴子石,尤其是高铬的石榴子石往往作为金 伯利岩或其他含金刚石母岩的指示矿物而备受地 质学者重视。其中镁铝榴石、铁铝榴石和钙铝榴石 是含金刚石母岩中常见的矿物,而G10镁铝榴石更 是金刚石找矿的特征指示矿物。安徽栏杆地区发 现金刚石出土的层位中也发现了石榴子石,大多呈 红色-橙红色,粒度在0.3~0.5mm之间,部分晶形程 度较好,六八面体或菱形十二面体,表面光滑,玻 璃-强玻璃光泽。但矿物含量非常少,在上百多千 克的人工重砂中只能见到几粒石榴子石,经过大量 分选,得到近百粒石榴子石。其中可能包含很多石 榴子石亚种。为了确定安徽栏杆地区碱性基性岩 型金刚石矿床中石榴子石矿物的种属,本次利用电子 探针分析对栏杆地区的石榴子石进行了主量元素化 学成分的分析,希望能够解决该地区石榴子石种类划 分的问题,并探讨其对金刚石找矿的指示性。

1 地质背景

研究区位于安徽宿州市埇桥区栏杆镇,距宿州市 区约40km¹¹,区域上位于华北地台的东南缘,稳定的 古老克拉通内¹²,其东侧为郯庐断裂带(图1-a)。郯 庐断裂带是中国东部著名的深大断裂带,且与金刚 石成矿关系密切(辽宁、山东金刚石成矿区带就位 于郯庐断裂两侧)^[5−6]。研究区通过的断裂带宽约 20km,主要由3条断裂组成:五河-合肥深断裂、石 门山断裂、嘉庐深断裂,呈NNE走向,断层面倾向 东,局部倾向西,倾角为60°~80°。区内断裂构造以 EW向为主,有小望疃断层、金山寨断层等。

安徽栏杆地区出露地层以元古宇和下古生界为 主,岩性为白云岩、灰岩、页岩、砂岩、燧石砾岩等^[7]。 地层遭受了褶皱变形,以复式的逆冲板片状产出, 构成徐州-宿州弧形构造带。研究区基底为新太古 界五河群和古元古界凤阳群,同位素年龄为1878~ 2963Ma,总厚度大于6000m。五河群主要为一套低 角闪岩相的变质岩,原岩为次深海-浅海槽盆相的 火山沉积岩系,包括黑云(斜长)角闪片麻岩夹浅粒 岩、绢石英片岩、绿泥石片岩、斜长角闪岩、角闪钾 长片麻岩等。盖层发育新元古界青白口系、南华 系、震旦系(主要为史家组、望山组、沟后组)及寒武 系(猴家山组、馒头组、毛庄组、徐庄组、张夏组)石 英岩、灰岩、页岩等,总厚达7000m^[1-2]。

安徽栏杆地区岩浆岩分布较广泛,主要为辉绿



图 1 郯庐断裂带构造及栏杆地区地质简图^[3-4] Fig. 1 Geological sketch map of Tancheng-Lujiang fault zone and Lan'gan area 岩、石英正长斑岩和斜闪煌斑岩等。栏杆地区主要 的岩体为老寨山岩体,主体部分为晚震旦世辉绿 岩,位于宝光寺、猫头山一老寨山、大堂山一带,侵 入震旦系望山组、史家组中(图1-b),呈NNE向条 带状弧形展布于研究区中部,区内长度大于19km, 最宽1.6km。老寨山辉绿岩岩体受横向断层破环岩 体分支较多。岩体剥蚀深度较浅,并保留较多的捕 虏体及顶盖^四。

2 金刚石及指示矿物特征

安徽栏杆地区在金山寨、吴庄、老寨山3处均有 金刚石出土。前人在金山寨处底砾岩中共选获金 刚石53颗。金刚石颜色有浅黄色、黄色、棕黄色等, 晶形以曲面菱形十二面体、立方体及二者聚形为 主,次为八面体。晶面上多有溶蚀沟、溶蚀凹坑、倒 三角形凹坑等蚀象。多数晶体表层具绿色或褐黄 色斑点,显示老金刚石特征¹⁸。

在安徽栏杆地区吴庄和老寨山处基性-超基性 岩中选获金刚石几百颗,金刚石多呈黄绿色、绿黄 色,个别为无色、黄色,以立方体与曲面菱形十二面 体聚晶为主,还有立方体与八面体聚晶、八面体与 菱形十二面体聚晶、歪晶、碎片。金刚石呈透明、金 刚光泽、高硬度,粒径为0.50~0.60mm^[3,8],与金山寨 出土的金刚石区别较大。

该区的指示矿物最早发现于1989年的栏杆小寨 孜,为1颗浅玫瑰紫色含铬镁铝榴石,粒径1.5mm^[9]。 电子探针分析结果显示为高铬镁铝榴石,在老寨山岩 体中选获1颗与金刚石密切相关的底钙-高铬镁铝榴 石、3颗高铬镁铝榴石。在金山寨附近辉绿岩中选获 2颗高铬镁铝榴石。2006年在老海寺林场水系重砂 样中选获1颗含铬镁铝榴石。在金山寨组底砾岩中 选获15颗含铬镁铝榴石,其中10颗为与金刚石有关 的低钙-高铬镁铝榴石^[9]。从前人资料看,栏杆地区 较缺乏传统意义上的金刚石找矿指示矿物,如高铬 镁铝榴石在岩体中出土太少,无法形成有效指示, 但笔者在岩体中挑选出了其他类型的石榴子石,因 此有必要对这些石榴子石进行研究。

本次工作在老寨山的玻基辉橄质角砾熔岩、火 山角砾岩、辉绿岩中,在挑选出金刚石的岩体中分 选出与金刚石伴生的石榴子石,分析其与传统指示 矿物的不同,寻找本区找矿指示矿物特征。

3 样品分析及测试条件

将挑选的样品经丙酮、酒精清洗,去除表面杂 质及污染,在双目镜下制成透明树脂靶,并将其磨 抛至矿物露出表面,然后进行透射光、反射光和阴 极发光(CL)拍照。

矿物化学成分分析在中国国家海洋局第二海 洋研究所完成。使用仪器为JEOL JXA-8100电子 微探针波谱仪。测试条件为:加速电压15kV,束流 20nA,光束直径为5μm。校准标准矿物为:硬玉 (Si,Na)、橄榄石(Mg)、铁铝榴石(Fe,Al)、透辉石 (Ca)、透长石(K)、铬铁矿(Cr)、金红石(Ti)、蔷薇辉 石(Mn)和硅铍铝钠石(Cl)。Ni,Co,Mn,Cr和Cl 的计数时间峰值为30s,背景计数时间为10s,其他元 素分析为峰值10s,背景5s。

4 结果与讨论

4.1 石榴子石化学成分特征及类型划分

栏杆地区含金刚石母岩中石榴子石的主要化 学成分(表1)显示, MgO平均含量为0.07%~3.97%, SiO2平均含量为36.79%~42.53%, FeO平均含量为 5.39%~15.96%, TiO2平均含量为0.07%~0.96%, Al2O3 平均含量为9.85%~17.54%, Cr₂O₃平均含量最高为 0.13%,部分未到检测线,CaO平均含量为32.12%~ 37.05%, MnO平均含量为0.02%~0.27%。据表2所 示,本区石榴子石以钙铝榴石(Grs)为主,变化范围 在41.64%~80.29%之间,平均为72.88%。其次是钙 铁榴石(Adr),变化范围为18.45%~48.58%,平均为 25.75%。镁铝榴石的含量较低,主要为0.29%~ 1.14%,平均为1.01%,有1件含量较高,为18.49%。 其中,铁铝榴石、锰铝榴石和钙铬榴石的含量非常 低,基本可以忽略不计。根据62件石榴子石化学成 分测试结果及端元组分的图解,研究区石榴子石主 要为钙铝-钙铁-镁铝石榴子石系列。钙铝榴石的 含量比钙铁榴石的含量高,镁铝榴石的含量最低。

62件单晶石榴子石分子式见表3,可见安徽栏 杆含金刚石母岩中石榴子石有3种类型,以钙铁镁-铝铁榴石为主,此外,还存在钙铁镁-铝铁锰铬榴石 和超硅钙铁榴石。按照Dawson Stephens¹⁰⁰对石榴子 石的划分方法,本区主要类型的石榴子石应为G8 石榴子石。

为了解石榴子石的发育过程,选择6粒石榴子

| | | | | | | | Ta | ble 1 | Jomposi | tion of n | najor ele | ments of | f garnets | | | | | | | % |
|----------------------------|--------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|---------|-----------|-----------|----------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 样号 | G3¢-1 | G3¢-2 | G3c-3 | G3c-4 | G3c-5 | G3¢-6 | G3¢-7 | G3c-8 | G3c-9 | G3c-10 | G3c-11 | G3¢-12 | G3c-13 | G3¢-14 | G3¢-15 | G3c-16 | G3¢-17 | G3c-18 | G3c-19 | G3c-20 |
| SiO ₂ | 37.91 | 37.87 | 37.80 | 37.92 | 37.24 | 37.77 | 36.96 | 37.47 | 37.46 | 37.44 | 37.42 | 37.19 | 37.91 | 37.22 | 37.80 | 38.70 | 37.27 | 37.10 | 37.53 | 36.80 |
| TiO_2 | 0.42 | 0.41 | 0.30 | 0.20 | 0.57 | 0.66 | 0.82 | 0.52 | 0.42 | 0.39 | 0.74 | 0.27 | 0.38 | 0.36 | 0.45 | 0.36 | 0.42 | 0.07 | 0.80 | 0.54 |
| Al_2O_3 | 16.37 | 16.50 | 15.68 | 15.53 | 15.73 | 16.93 | 14.82 | 16.51 | 12.85 | 14.63 | 15.19 | 14.09 | 15.73 | 14.85 | 15.37 | 16.64 | 13.08 | 9.85 | 15.20 | 14.47 |
| FeO | 7.51 | 6.84 | 8.72 | 8.87 | 7.49 | 6.30 | 9.02 | 6.93 | 11.84 | 10.15 | 8.72 | 10.88 | 8.50 | 9.74 | 8.62 | 7.05 | 11.87 | 15.96 | 8.43 | 9.62 |
| MnO | 0.22 | 0.13 | 0.18 | 0.13 | 0.20 | 0.12 | 0.20 | 0.15 | 0.17 | 0.17 | 0.15 | 0.14 | 0.13 | 0.05 | 0.08 | 0.15 | 0.09 | 0.05 | 0.12 | 0.06 |
| MgO | 0.14 | 0.17 | 0.17 | 0.11 | 0.20 | 0.20 | 0.21 | 0.22 | 0.15 | 0.14 | 0.21 | 0.16 | 0.11 | 0.14 | 0.14 | 0.20 | 0.15 | 0.07 | 0.22 | 0.18 |
| CaO | 36.66 | 36.89 | 36.62 | 36.48 | 36.60 | 36.57 | 36.66 | 36.81 | 36.17 | 36.58 | 36.47 | 36.39 | 36.51 | 36.57 | 36.57 | 36.41 | 36.18 | 35.60 | 36.52 | 36.37 |
| Na_2O | 0.02 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.00 |
| $\mathrm{K}_{2}\mathrm{O}$ | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| ZnO | 0.04 | 0.04 | 0.05 | 0.07 | 0.05 | 0.00 | 0.11 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.05 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Cr_2O_3 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.06 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.04 | 0.00 | 0.00 | 0.04 | 0.07 |
| NiO | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.05 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.05 | 0.08 | 0.00 | 0.00 | 0.07 | 0.00 |
| 总计1 | 99.29 | 98.88 | 99.55 | 99.29 | 98.08 | 98.62 | 98.79 | 98.59 | 90.06 | 99.50 | 99.02 | 99.13 | 99.27 | 98.98 | 99.11 | 99.62 | 99.07 | 98.69 | 98.92 | 98.09 |
| Fe_2O_3 | 7.38 | 7.13 | 8.38 | 8.38 | 7.88 | 6.39 | 9.22 | 7.21 | 11.23 | 9.65 | 8.61 | 10.27 | 8.05 | 9.34 | 8.39 | 6.71 | 11.12 | 14.57 | 8.44 | 9.44 |
| FeO | 0.87 | 0.42 | 1.18 | 1.33 | 0.40 | 0.56 | 0.73 | 0.44 | 1.73 | 1.47 | 0.98 | 1.63 | 1.25 | 1.34 | 1.07 | 1.01 | 1.86 | 2.85 | 0.83 | 1.12 |
| 总计2 | 100.01 | 99.58 | 100.38 | 100.13 | 98.87 | 99.26 | 99.72 | 99.32 | 100.18 | 100.47 | 99.87 | 100.16 | 100.07 | 99.91 | 99.93 | 100.29 | 100.16 | 100.15 | 99.76 | 99.03 |
| Si | 3.00 | 3.01 | 3.01 | 3.03 | 3.00 | 2.99 | 2.98 | 2.99 | 3.05 | 3.01 | 3.00 | 3.01 | 3.02 | 3.00 | 3.02 | 3.04 | 3.04 | 3.11 | 3.01 | 3.00 |
| Al(T) | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.04 | 0.06 | 0.05 | 0.09 | 0.07 | 0.03 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.04 | 0.07 | 0.04 | 0.01 | 0.05 | 0.01 | 0.06 | 0.07 |
| Al(O) | 1.48 | 1.50 | 1.42 | 1.42 | 1.43 | 1.53 | 1.32 | 1.48 | 1.20 | 1.32 | 1.37 | 1.28 | 1.44 | 1.34 | 1.41 | 1.53 | 1.21 | 0.96 | 1.38 | 1.31 |
| Ti | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.01 | 0.03 | 0.04 | 0.05 | 0.03 | 0.03 | 0.02 | 0.04 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.02 | 0.03 | 0.00 | 0.05 | 0.03 |
| Cr | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Fe^{3+} | 0.43 | 0.42 | 0.49 | 0.49 | 0.47 | 0.38 | 0.55 | 0.42 | 0.67 | 0.57 | 0.51 | 0.61 | 0.47 | 0.55 | 0.49 | 0.39 | 0.66 | 0.88 | 0.50 | 0.56 |
| Fe^{2+} | 0.06 | 0.03 | 0.08 | 0.09 | 0.03 | 0.04 | 0.05 | 0.03 | 0.11 | 0.10 | 0.06 | 0.11 | 0.08 | 0.09 | 0.07 | 0.07 | 0.12 | 0.19 | 0.05 | 0.07 |
| Mn | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.00 |
| Mg | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.01 | 0.03 | 0.02 |
| Ni | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Zn | 0.00 | 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 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Са | 3.06 | 3.08 | 3.06 | 3.05 | 3.09 | 3.06 | 3.10 | 3.09 | 3.07 | 3.07 | 3.07 | 3.08 | 3.05 | 3.09 | 3.07 | 3.01 | 3.07 | 3.08 | 3.07 | 3.10 |
| 总计 | 8.09 | 8.08 | 8.10 | 8.09 | 8.09 | 8.07 | 8.11 | 8.09 | 8.11 | 8.11 | 8.09 | 8.12 | 8.09 | 8.11 | 8.09 | 8.06 | 8.11 | 8.13 | 8.09 | 8.11 |
| Alm | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Adr | 22.36 | 21.63 | 25.44 | 25.62 | 24.22 | 19.37 | 28.43 | 21.81 | 35.82 | 29.63 | 26.54 | 31.77 | 24.64 | 28.64 | 25.85 | 20.46 | 35.19 | 48.58 | 26.14 | 29.35 |
| Grs | 76.58 | 77.37 | 73.42 | 73.64 | 74.52 | 79.36 | 70.24 | 76.98 | 63.16 | 69.42 | 72.17 | 67.25 | 74.62 | 70.67 | 73.42 | 78.28 | 64.00 | 51.02 | 72.57 | 69.58 |
| Pyp | 0.58 | 0.70 | 0.69 | 0.44 | 0.80 | 0.80 | 0.87 | 0.88 | 0.62 | 0.56 | 0.85 | 0.66 | 0.46 | 0.58 | 0.56 | 0.81 | 0.61 | 0.29 | 0.89 | 0.73 |
| Sps | 0.49 | 0.30 | 0.42 | 0.31 | 0.46 | 0.27 | 0.47 | 0.33 | 0.40 | 0.39 | 0.36 | 0.32 | 0.29 | 0.11 | 0.17 | 0.33 | 0.20 | 0.12 | 0.28 | 0.13 |
| Uvt | 0.00 | 0.00 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.20 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.09 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.12 | 0.00 | 0.00 | 0.13 | 0.22 |

表1 石榴子石主量元素含量

113

| , I | i3c-40 | 37.95 | 0.44 | 16.01 | 8.06 | 0.08 | 0.16 | 36.57 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.03 | 0.00 | 99.31 | 7.71 | 1.13 | 00.07 | 3.01 | 0.04 | 1.45 | 0.03 | 0.00 | 0.45 | 0.07 | 0.01 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 3.05 | 8.08 | 0.00 | 23.50 | 75.58 | 0.66 | 0.19 | 0.08 |
|-----|---------------|--------------------|------------------|----------------------------------|---------|--------|--------|--------|-------------------|--------------------|--------|--------------------------------|--------|---------|--------------------------------|--------|-----------------|--------|---------|--------|--------|--------|------------------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|
| 续表1 | 3c-39 C | 12.53 | 0.38 | 0.93 | 0.18 | 0.09 | 3.97 | 2.12 | 0.12 | 0.02 | 0.02 | 0.08 | 0.00 | | 1.16 | 0.13 | 1 | 3.31 | 0.00 | 1.00 | 0.02 | 0.00 | 0.64 | 0.01 | 0.01 | 0.45 | 0.00 | 0.00 | 2.61 | 7.97 | 0.00 | 9.34 | 1.64 | 8.49 | 0.24 | 0.30 |
| | 3c-38 G | 7.66 4 | .53 | 5.85 1 | 3.36 1 | .20 | .22 | 6.49 3 | 00.0 | .01 | 00.0 | 00.0 | .06 | 9.38 | 3.08 1 | 60. | 00.18 | 00.9 | .06 | .43 | .03 | 00.0 | .47 | .07 | .01 | .03 | 00.0 | 00.0 | .05 | .00 | 00.0 | 4.56 3 | 4.11 4 | .88 1 | .45 | 00.0 |
| | e-37 G3 | 7.02 3 | .39 0 | 5.05 1 | .32 8 | .27 0 | .17 0 | 5.31 3 | 00.00 | 00 00. | .06 0 | 00.00 | 00.00 | 3.59 9 | .04 8 | .18 1 | .49 10 | .99 3 | .07 0 | .36 1 | .02 0 | 0 00. | .54 0 | .08 0 | .02 0 | .02 0 | 0 00. | 0 00. | .07 3 | .11 8 | 0 00. | 7.73 2. | .96 7. | .68 0 | .63 0 | 00 00. |
| | e-36 G3 | .53 37 | 48 0 | .07 15 | 78 9 | 07 0 | 22 0 | .05 36 | 02 0 | 0 00 | 05 0 | 07 0 | 0 00 | 0.34 98 | 68 9 | 76 1 | 56 <u>66</u> .(| 01 2 | 04 0 | 53 1 | 03 0 | 0 00 | 39 0 | 05 0 | 0 00 | 03 0 | 0 00 | 0 00 | 05 3 | 07 8 | 0 00 | .96 27 | .79 70 | 88 0 | 15 0 | 22 0 |
| | -35 G3 | 51 38 | 58 0. | 45 17 | 16 6. | 0. 0. | 17 0. | 18 37 | 0. 00. | 0.00 | 0. 00. | 0. 0. | 0. 00. | 13 100 | 49 6. | 72 0. | .18 100 | 04 3. | 0. 0. | 25 1. | 0.0 | 0.00 | 52 0. | 11 0. | 0. 00. | 0.0 | 0. 00 | 0. 00. | J6 3. | 10 8. | 0. 00. | 23 19 | 89 78 | 59 O. | 15 0. | 0.03 |
| | 34 G3c | 79 37. | 3 0.: | 79 13. | 4 11. | 9 0.0 | 9 0. | 40 36. | 0 0.0 | 0 0.0 | 0 0.0 | 4 0.0 | 2 0.0 | 49 99. | 1 10. | 8 1. | 33 100 | 7 3.(| 0 0.0 | 1 1.2 | 2 0.0 | 0 0.0 | 0 0.0 | 8 0. | 1 0.0 | 2 0.0 | 0 0.0 | 0 0.0 | 8 3.(| 2 8. | 0 0.0 | 79 33. | 10 65. | 8 0.6 | 0 0. | 3 0.0 |
| | G3¢- | 36.3 | 0.3 | 15.7 | 8.8 | 0.0 | 0.1 | 36.4 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 98.4 | 8.4 | 1.2 | 99.3 | 2.9 | 0.1 | 1.4 | 0.0 | 0.0 | 0.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 3.0 | 8.1 | 0.0 | 25.7 | 73.] | 0.7 | 0.2 | 0.1 |
| | G3c-33 | 38.24 | 0.44 | 16.87 | 7.13 | 0.06 | 0.15 | 37.00 | 0.00 | 0.01 | 0.06 | 0.00 | 0.00 | 99.94 | 6.97 | 0.86 | 100.63 | 3.00 | 0.05 | 1.51 | 0.03 | 0.00 | 0.40 | 0.06 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 3.06 | 8.08 | 0.00 | 20.88 | 78.41 | 0.58 | 0.13 | 0.00 |
| | G3¢-32 | 37.26 | 0.61 | 15.07 | 8.98 | 0.16 | 0.18 | 36.64 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.03 | 0.01 | 98.94 | 8.91 | 0.96 | 99.83 | 2.99 | 0.07 | 1.36 | 0.04 | 0.00 | 0.53 | 0.06 | 0.01 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 3.09 | 8.10 | 0.00 | 27.39 | 71.43 | 0.72 | 0.37 | 0.08 |
| | G3¢-31 | 37.40 | 0.71 | 15.42 | 8.20 | 0.19 | 0.18 | 36.90 | 0.03 | 0.00 | 0.09 | 0.00 | 0.06 | 99.18 | 8.53 | 0.52 | 100.00 | 2.99 | 0.07 | 1.38 | 0.04 | 0.00 | 0.50 | 0.03 | 0.01 | 0.02 | 0.00 | 0.01 | 3.10 | 8.10 | 0.00 | 26.09 | 72.75 | 0.73 | 0.43 | 0.00 |
| | 33c-30 | 37.54 | 0.64 | 14.92 | 9.16 | 0.02 | 0.18 | 36.49 | 0.04 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 99.00 | 8.87 | 1.17 | 99.85 | 3.01 | 0.05 | 1.36 | 0.04 | 0.00 | 0.52 | 0.08 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 3.07 | 8.09 | 0.00 | 27.52 | 71.72 | 0.72 | 0.05 | 0.00 |
| | i3c-29 (| 37.75 | 0.28 | 15.14 | 9.14 | 0.15 | 0.13 | 36.78 | 0.01 | 0.00 | 0.08 | 0.00 | 0.00 | 99.46 | 8.96 | 1.08 | 00.35 | 3.02 | 0.05 | 1.38 | 0.02 | 0.00 | 0.53 | 0.07 | 0.01 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 3.08 | 8.10 | 0.00 | 27.42 | 71.72 | 0.53 | 0.34 | 0.00 |
| | i3c-28 C | 37.45 | 0.27 | 12.98 | 12.14 | 0.12 | 0.09 | 36.21 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.05 | 99.34 | 11.30 | 1.97 | 00.46 1 | 3.05 | 0.04 | 1.21 | 0.02 | 0.00 | 0.67 | 0.13 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 3.07 | 8.12 | 0.00 | 35.74 | 63.59 | 0.39 | 0.28 | 0.00 |
| | 13c-27 C | 37.40 | 0.52 | 15.32 | 8.56 | 0.18 | 0.20 | 36.53 | 0.00 | 0.00 | 0.04 | 0.00 | 0.00 | 98.74 | 8.53 | 0.88 | 99.59 1 | 3.00 | 0.06 | 1.39 | 0.03 | 0.00 | 0.50 | 0.06 | 0.01 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 3.08 | 8.10 | 0.00 | 26.23 | 72.54 | 0.83 | 0.41 | 0.00 |
| | i3c-26 C | 37.78 | 0.28 | 15.09 | 9.06 | 0.14 | 0.15 | 36.60 | 0.00 | 0.00 | 0.07 | 0.01 | 0.00 | 99.17 | 8.84 | 1.10 | 00.06 | 3.03 | 0.04 | 1.38 | 0.02 | 0.00 | 0.52 | 0.07 | 0.01 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 3.07 | 8.10 | 0.00 | 27.21 | 71.84 | 0.61 | 0.31 | 0.02 |
| | i3c-25 (| 37.46 | 0.63 | 16.93 | 6.99 | 0.21 | 0.22 | 36.87 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 99.32 | 7.04 | 0.65 | 00.01 | 2.96 | 0.09 | 1.49 | 0.04 | 0.00 | 0.41 | 0.04 | 0.01 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 3.07 | 8.10 | 0.00 | 21.23 | 77.42 | 0.87 | 0.48 | 0.00 |
| | 3¢-24 C | 7.95 | 0.60 | 6.42 | 6.95 | 0.15 | 0.19 | . 06.9 | 0.02 | 0.01 | 0.07 | 0.05 | 0.07 | 9.37 | 7.23 | 0.44 | 00.06 1 | 3.00 | 0.05 | 1.48 | 0.04 | 0.00 | 0.42 | 0.03 | 0.01 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 3.07 | 8.08 | 0.00 | 1.91 | 6.85 | 0.76 | 0.34 | 0.14 |
| | 3c-23 G | 7.63 3 | .54 | 6.44 1 | 69. | 0.13 | .29 | 6.73 3 | 00.0 | 00.0 | .03 | 00.0 | 00.0 | 9.48 9 | .58 | .87 | 0.24 1 | .98 | .07 | .46 | .03 | 00.0 | .44 | .06 | .01 | .03 | 00.0 | 00.0 | 90. | .10 | 00.0 | 2.75 2 | 5.81 7 | .14 | .30 | 00.0 |
| | 3c-22 G. | 7.76 3 | .51 (| 6.38 1 | .60 | .07 (| .22 (| 6.88 3 | .03 (| 00. | .02 (| 00. | 00. | 9.48 9 | .56 7 | .80 (| 0.21 10 | 66. | .06 (| .46] | .03 (| 00. | .44 (| .05 (| 00. | .03 (| 00. | 00. | .07 | 3 60. | 00. | 2.76 2 | 6.20 7 | .89 | .15 (| .00 (|
| | 3¢-21 G. | 7.39 3 | 0.40 (| 4.54 1 | 7. 67.6 | 0.13 (| 0.13 (| 6.68 3 | 0.01 0 | 0.00 (| 0.00 (| 0.00 (| 0.00 (| 9.06 9 | 9.58 7 | 1.17 (| 00.01 10 | 3.01 2 | 0.06 (| 1.32 1 | 0.02 (| 0.00 (| 0.57 (| 0.08 (| 0.01 (| 0.02 (| 0.00 (| 0.00 (| 3.09 3 | 8.11 8 | 0.00 (| 9.60 2 | 9.54 7 |).55 (| 0.31 (| 0.00 (|
| | 样号 G | SiO ₂ 3 | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ 1 | FeO | MnO (| MgO (| CaO 3 | Na ₂ O | K ₂ O (| ZnO (| Cr ₂ O ₃ | NiO | 总计1 9 | Fe ₂ O ₃ | FeO | 总计2 1 | Si | Al(T) (| Al(O) | Ti | Cr | Fe ³⁺ | Fe^{2+} | Mn | Mg | Ni | Zn (| Са | 总计 | Alm (| Adr 2 | Grs 6 | Pyp (| Sps | Uvt |

2019 年

| 長1-2 | 33h-22 | 37.97 | 0.39 | 16.31 | 7.79 | 0.18 | 0.17 | 36.72 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 99.55 | 7.56 | 0.99 | 100.28 | 3.01 | 0.05 | 1.47 | 0.02 | 0.00 | 0.44 | 0.06 | 0.01 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 3.06 | 8.09 | 0.00 | 22.83 | 76.09 | 0.68 | 0.40 | 0.00 |
|------|----------|---------------------|--------------------|----------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|--------|--------------------|-------|----------|-------------------|--------|---------|--------|--------|---------|---------|-------|------------------|------------------|-------|--------|-------|-------|--------|--------|-------|---------|---------|---------|-------|--------|
| 续 | 33h-21 | 37.77 | 0.38 | 16.24 | 7.92 | 0.21 | 0.16 | 36.65 | 0.00 | 0.00 | 0.03 | 0.03 | 0.00 | 99.38 | 7.67 | 1.02 | 100.15 | 2.99 | 0.06 | 1.46 | 0.02 | 0.00 | 0.45 | 0.07 | 0.01 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 3.06 | 8.09 | 0.00 | 23.16 | 75.66 | 0.62 | 0.47 | 0.10 |
| | 33h-20 | 38.30 | 0.55 | 17.54 | 6.22 | 0.18 | 0.22 | 36.92 | 0.02 | 0.00 | 0.05 | 0.00 | 0.05 | 100.04 | 6.22 | 0.62 | 100.64 | 3.01 | 0.06 | 1.56 | 0.03 | 0.00 | 0.36 | 0.04 | 0.01 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 3.04 | 8.07 | 0.00 | 18.45 | 80.29 | 0.86 | 0.40 | 0.00 |
| | 33h-19 (| 37.70 | 0.65 | 16.87 | 6.99 | 0.13 | 0.21 | 36.71 | 0.01 | 0.00 | 0.05 | 0.00 | 0.04 | 99.34 | 6.91 | 0.77 | 100.02 | 3.02 | 0.07 | 1.50 | 0.04 | 0.00 | 0.40 | 0.05 | 0.01 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 3.06 | 8.09 | 0.00 | 20.74 | 78.15 | 0.84 | 0.28 | 0.00 |
| | G3h-18 (| 38.36 | 0.76 | 16.70 | 6.93 | 0.13 | 0.22 | 36.77 | 0.00 | 0.00 | 0.07 | 0.04 | 0.05 | 100.02 | 6.86 | 0.76 | 100.71 | 3.00 | 0.04 | 1.50 | 0.04 | 0.00 | 0.40 | 0.05 | 0.01 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 3.04 | 8.07 | 0.00 | 20.76 | 77.96 | 0.87 | 0.28 | 0.12 |
| | G3h-17 | 37.59 | 0.31 | 15.46 | 9.11 | 0.06 | 0.15 | 36.48 | 0.01 | 0.01 | 0.03 | 0.04 | 0.02 | 99.25 | 8.56 | 1.41 | 100.10 | 3.01 | 0.06 | 1.40 | 0.02 | 0.00 | 0.50 | 0.09 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 3.06 | 8.10 | 0.00 | 26.10 | 73.04 | 0.60 | 0.15 | 0.12 |
| | G3h-16 (| 37.55 | 0.53 | 16.27 | 7.43 | 0.24 | 0.24 | 36.70 | 0.03 | 0.00 | 0.04 | 0.00 | 0.00 | 99.02 | 7.57 | 0.62 | 99.75 | 3.03 | 0.07 | 1.46 | 0.03 | 0.00 | 0.45 | 0.04 | 0.02 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 3.07 | 8.09 | 0.00 | 22.91 | 75.59 | 0.96 | 0.54 | 0.00 |
| | G3h-15 (| 38.44 | 0.64 | 16.99 | 6.60 | 0.06 | 0.21 | 36.88 | 0.02 | 0.00 | 0.06 | 0.05 | 0.01 | 99.94 | 6.55 | 0.71 | 100.57 | 2.96 | 0.04 | 1.53 | 0.04 | 0.00 | 0.38 | 0.05 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 3.04 | 8.07 | 0.00 | 19.72 | 79.19 | 0.82 | 0.13 | 0.14 |
| | G3h-14 (| 38.10 | 0.88 | 15.72 | 7.63 | 0.12 | 0.21 | 36.78 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 99.45 | 7.77 | 0.64 | 100.21 | 2.99 | 0.04 | 1.43 | 0.05 | 0.00 | 0.45 | 0.04 | 0.01 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 3.06 | 8.07 | 0.00 | 23.99 | 74.86 | 0.87 | 0.27 | 0.00 |
| | G3h-13 (| 37.70 | 0.52 | 15.92 | 8.01 | 0.06 | 0.20 | 36.75 | 0.00 | 0.00 | 0.05 | 0.00 | 0.00 | 99.23 | 7.94 | 0.86 | 100.02 | 3.03 | 0.06 | 1.44 | 0.03 | 0.00 | 0.47 | 0.06 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 3.07 | 8.09 | 0.00 | 24.15 | 74.90 | 0.82 | 0.14 | 0.00 |
| | G3h-12 (| 37.50 | 0.41 | 15.35 | 8.49 | 0.17 | 0.16 | 36.48 | 0.01 | 0.00 | 0.07 | 0.01 | 0.03 | 98.68 | 8.43 | 0.91 | 99.51 | 2.99 | 0.05 | 1.40 | 0.02 | 0.00 | 0.50 | 0.06 | 0.01 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 3.07 | 8.10 | 0.00 | 25.95 | 72.99 | 0.64 | 0.38 | 0.04 |
| | G3h-11 | 37.74 | 0.38 | 14.65 | 9.95 | 0.21 | 0.14 | 36.27 | 0.01 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 99.37 | 9.32 | 1.56 | 100.29 | 3.03 | 0.04 | 1.34 | 0.02 | 0.00 | 0.55 | 0.10 | 0.01 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 3.05 | 8.10 | 0.00 | 28.89 | 70.06 | 0.56 | 0.48 | 0.01 |
| | G3h-10 | 37.31 | 0.69 | 16.71 | 7.20 | 0.12 | 0.25 | 36.93 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 99.23 | 7.30 | 0.62 | 99.93 | 3.01 | 0.09 | 1.47 | 0.04 | 0.00 | 0.43 | 0.04 | 0.01 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 3.08 | 8.10 | 0.00 | 22.10 | 76.60 | 0.98 | 0.27 | 0.05 |
| | G3h-9 | 37.39 | 0.56 | 15.80 | 8.29 | 0.10 | 0.16 | 36.77 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.03 | 99.14 | 8.19 | 0.92 | 99.93 | 3.01 | 0.07 | 1.41 | 0.03 | 0.00 | 0.48 | 0.06 | 0.01 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 3.08 | 8.10 | 0.00 | 24.85 | 74.24 | 0.65 | 0.23 | 0.03 |
| | G3h-8 | 37.98 | 0.18 | 15.35 | 9.28 | 0.17 | 0.14 | 36.47 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 99.58 | 8.66 | 1.48 | 100.45 | 2.98 | 0.04 | 1.40 | 0.01 | 0.00 | 0.51 | 0.10 | 0.01 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 3.05 | 8.10 | 0.00 | 26.48 | 72.51 | 0.57 | 0.38 | 0.06 |
| | G3h-7 | 37.98 | 0.56 | 16.78 | 7.24 | 0.17 | 0.25 | 36.84 | 0.02 | 0.00 | 0.05 | 0.00 | 0.02 | 99.91 | 7.16 | 0.80 | 100.61 | 2.98 | 0.06 | 1.49 | 0.03 | 0.00 | 0.42 | 0.05 | 0.01 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 3.05 | 8.09 | 0.00 | 21.40 | 77.26 | 0.97 | 0.37 | 0.00 |
| | G3h-6 | 38.08 | 0.43 | 15.26 | 8.95 | 0.13 | 0.14 | 36.38 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 00.00 | 0.00 | 99.36 | 8.44 | 1.35 | 100.21 | 2.99 | 0.03 | 1.41 | 0.03 | 0.00 | 0.50 | 0.09 | 0.01 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 3.04 | 8.08 | 0.00 | 26.10 | 73.02 | 0.58 | 0.31 | 0.00 |
| | G3h-5 | 37.93 | 0.51 | 16.21 | 7.63 | 0.12 | 0.16 | 36.34 | 0.00 | 0.00 | 0.08 | 0.01 | 0.00 | 98.99 | 7.30 | 1.06 | 99.71 | 3.02 | 0.04 | 1.48 | 0.03 | 0.00 | 0.43 | 0.07 | 0.01 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 3.04 | 8.08 | 0.00 | 22.34 | 76.70 | 0.64 | 0.28 | 0.04 |
| | G3h4 | 9 37.37 | 0.36 | 5 15.04 | 9.72 | 0.24 | 0.16 | 35.96 | 0.00 | 0.00 | 0.03 | 0.13 | 0.03 | 5 99.04 | 8.88 | 1.73 | 5 99.93 | 3.02 | 0.06 | 1.37 | 0.02 | 0.01 | 0.53 | 0.11 | 0.02 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 3.03 | 8.11 | 0.00 | 1 27.25 | 3 71.15 | 0.64 | 0.54 | 0.42 |
| | 2 G3h-3 | 0 37.59 | 9 0.88 | 1 16.45 | 9 7.03 | 9 0.11 | 4 0.24 | 5 36.79 | 00.00 | 0.01 | 3 0.02 | 0.03 | 00.00 | 0 99.15 | 5 7.20 | 3 0.56 | 5 99.80 | 7 2.99 | 7 0.07 | 2 1.46 | 5 0.05 | 00.00 | 3 0.42 | 3 0.04 | 0.01 | 3 0.03 | 00.00 | 00.00 | 5 3.07 | 7 8.08 | 00.00 | 1 21.8 | 2 76.88 | 6 0.96 | 0.26 | 0.00 |
| | ь1 G3h | 51 37.8 | 7 0.85 | 80 17.1 | 18 6.25 | 0.0 0.0 | 5 0.24 | 72 36.8 | 0.00 | 0.00 | 0.0 | 0.0(| 0.00 | 17 99.3 | 1 6.40 | 9 0.4 | 9.99.99 | 1 2.9 | 7 0.0 | 12 1.5. | 12 0.0; | 0.00 | 18 0.3 | 7 0.0 | 1 0.0 | 12 0.0 | 0.0(| 0.0(| 3.00 | 0.8.0 | 0.0(| 88 19.4 | 15 79.4 | δ1 0.9t | 2 0.2 | 3 0.0(|
| | ₫ G3h |) ₂ 37.: | b ₂ 0.3 | 03 15.8 | 9.4 | 0 0.1 | 0 0.1 | О 36.′ | 0.0 0.0 | 0.0 0.0 | 0.0 C | O ₃ 0.0 | 0.0 C | +1 99. | 03 8.2 | 0.1.0 | +2 99.9 | 3.0 | T) 0.0 | 0) 1.4 | 0.0 | 0.0 | + 0.4 | + 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 3.0 | + 8.1 | n 0.0 | r 24.8 | ; 74. | 0.6 | , 0.2 | t 0.1 |
| | 样長 | SiC | TiC | Al_{2} | FeC | Mn | Mg | Ca(| Na_2 | K_2C | Zn(| Cr_{2} | NiC | цц. Ц | Fe ₂ (| FeC | 近 近 | Si | Al | Al(I | Τi | Cr | Fe ^{3.} | Fe ^{2.} | Mn | Mg | Ż | Zn | Са | ц Ю | Aln | Чdı | Grs | PyF | Sps | Uvi |

| | | | | | | | 7 |
|----|----------------|---------------|-----------|-------|-------|-------|------------------|
| 类别 | 矿物名称 | ${\rm TiO}_2$ | Cr_2O_3 | FeO | MgO | CaO | 产状 |
| 1 | 钛-镁榴石 | 0.58 | 1.34 | 9.32 | 20.0 | 4.82 | K,GL,GOW,D |
| 2 | 高钛-镁铝榴石 | 1.09 | 0.91 | 9.84 | 20.3 | 4.52 | Κ |
| 3 | 钙-镁铝榴石-铁铝榴石 | 0.31 | 0.30 | 16.49 | 13.35 | 6.51 | K,GL,GOW,EC,D |
| 4 | 钛、钙、镁-铁铝榴石 | 0.90 | 0.08 | 17.88 | 9.87 | 9.41 | K,EC,D |
| 5 | 镁-铁铝榴石 | 0.05 | 0.03 | 28.23 | 7.83 | 2.44 | K,EC,D |
| 6 | 镁铝榴石-钙铝榴石-铁铝榴石 | 0.24 | 0.27 | 10.77 | 10.38 | 14.87 | GP,EC,GR |
| 7 | 铁-镁-钙铬榴石-钙铝榴石 | 0.29 | 11.52 | 5.25 | 8.61 | 21.60 | K,GS |
| 8 | 铁-镁-钙铝榴石 | 0.25 | 0.04 | 6.91 | 4.69 | 24.77 | GR |
| 9 | 铬镁铝榴石 | 0.27 | 3.47 | 8.01 | 20.01 | 5.17 | K,GL,GOW,GH,EC,D |
| 10 | 低钙-铬-镁铝榴石 | 0.04 | 7.73 | 6.11 | 23.16 | 2.13 | K,GS,D |
| 11 | 钙铬榴石-镁铝榴石 | 0.51 | 9.55 | 7.54 | 15.89 | 10.27 | K,GL,GWH,D |
| 12 | 镁铬榴石-钙铬榴石-镁铝榴石 | 0.18 | 15.94 | 7.47 | 15.40 | 9.51 | K,GS |

表 2 Dawson-Stephens 分类石榴子石产状及特征氧化物平均值¹⁰⁹ Table 2 Oxide averages of garnets of different modes of occurrence in Dawson-Stephens classification

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

石从核部向边缘依次进行了电子探针分析(图2)。 从数据上看,Si和Ca变化不明显,而TFeO的含量 从边部到核部呈上升趋势,钙铁榴石组分由边部到 核部逐渐降低。可以看出,在石榴子石生长过程中 具有由钙铁榴石到钙铝榴石过渡的趋势。

Jamtveit等指出,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^[11-12]。因此,本区石榴子石从钙铁榴石向钙铝榴石过渡,暗示流体温度的升高和pH值、氧逸度的降低。此外,从图3也可以看出,钙铝榴石含量变化的非线性关系,即在G3c-43处出现的锯齿状现象,也反映了该

区辉绿岩不是在完全封闭的平衡条件下形成的,指 示其温度、pH值、氧逸度和盐度可能出现扰动。

4.2 石榴子石端元组分特征及类型划分

石榴子石的一般化学式为A₃²⁺B₂³⁺(SiO₄)₃,其中A大多为Ca、Mg、Fe、Mn,B则为Al、Fe、Cr、Ti等。 端元组分常见铁铝榴石、钙铝榴石、镁铝榴石、铬铝 榴石、钙铬榴石等。

为了详细划分工作区石榴子石的类型,根据栏 杆地区含金刚石母岩中石榴子石电子探针微区化 学成分分析结果,计算出石榴子石分子式。计算结 果见表3。石榴子石成分为探针微区分析项目,氧

| | 表 3 | 栏杆含金刚石母岩中石榴子石分子式 | |
|---------|---------------|--|---------|
| Table 3 | Formula chara | acteristics and types of garnet in kimberlite from | Lan´gan |

| 石榴子石名称 | 代表样品分子式 | 件数 |
|--------------------|--|----|
| 钙铁镁-铝铁榴石 | $(Ca_{3.06}Fe_{0.06}Mg_{0.02})_{3.14}(Al_{1.48}Fe_{0.43}Ti_{0.02})_{1.93}Si_{2.95}O_{12}$ | 57 |
| | $(Ca_{3.07}Fe_{0.11}Mg_{0.02})_{3.2}(Al_{1.2}Fe_{0.67}Ti_{0.03}Si_{0.05})_{1.95}Si_{3}O_{12}$ | 1 |
| +71 T+ KT K+ +61 T | $(Ca_{3.07}Fe_{0.13}Mg_{0.01})_{3.21}(Al_{1.21}Fe_{0.67}Ti_{0.02}Si_{0.05})_{1.95}Si_{3}O_{12}$ | 1 |
| 超硅钙铁榴石 | $(Ca_{3.08}Fe_{0.19}Mg_{0.01})_{3.28}(Al_{0.96}Fe_{0.88}Si_{0.11})_{1.95}Si_{3}O_{12}$ | 1 |
| | $(Ca_{2.616}Mg_{0.45}Fe_{0.01})_{3.07}(Al_1Fe_{0.64}Ti_{0.02}Mn_{0.01}Si_{0.31})_{1.98}Si_3O_{12}$ | 1 |
| 钙铁镁-铝铁锰铬榴石 | $(Ca_{3,03}Fe0_{11}Mg_{0,02})_{3,17}(Al_{1,48}Fe_{0,53}Ti_{0,02}Mn_{0,02}Cr_{0,01})_{2,06}Si_{2,94}O_{12}$ | 1 |



图 2 石榴子石从边部到核部成分变化图示 Fig. 2 The composition of garnet changes from the edge to the core



图 3 石榴子石从边部到核部成分非线性变化 Fig. 3 The components of garnet nonlinear change from edge to core Grs—钙铁榴石

化物为石榴子石中各氧化物的质量分数,分子质量 为氧化物原子质量之和,摩尔数为氧化物的质量分 数与分子质量之比,氧原子数和阳离子数为氧化物 中原子数与摩尔数之积,再以石榴子石中12个氧原子数除以各氧化物氧原子数之和2.75得4.36,以4.36乘氧化物中阳离子数得到分子中该元素阳离子

数;按二价阳离子首先占据十二面体空腔,三价阳 离子首选八面体占位的规律计算出石榴子石分子 式。栏杆含金刚石母岩中石榴子石族矿物化学式 中的A主要由Mg²⁺、Fe²⁺和Ca²⁺离子占位,B主要由 Al³⁺、Fe³⁺、Mn³⁺和Cr³⁺离子占位,三价阳离子主要为 Al³⁺,二价阳离子主要为Ca²⁺。虽然Ca²⁺的离子半径 较大,难以和其他二价阳离子置换,但在本区同 Mg²⁺、Fe²⁺置换较普遍(图4)。

4.3 超硅石榴子石特征

值得重视的是,在本次研究中发现了4颗超硅 石榴子石。超硅石榴子石的矿物化学特征是以12 个氧为单位的结构式中Si(pfu)>3.0[14-15],而在实际 研究中将Si(pfu)>3.05作为超硅石榴子石与一般石 榴子石的界限^[16]。Ringwood等^[17-18]首先通过实验人 工合成了超硅石榴子石的端元组分(Majorite): Mg4Si4O12,随后 Smith 等15百在陨石中也发现了该矿 物。在人工条件下的实验证明,在超高压条件下各 种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¹¹⁴。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Si4+替代Al3+,Cr3+,Fe3+等三价阳离子进入八 面体位置,从而形成Si(pfu)>3.0的超硅石榴子石, 其稳定存在的压力一般大于5GPa,是典型的超高压 成因矿物。

高硅钙铁榴石属超高压成因矿物,除产出于陨 石外,还见于金刚石包裹体、超深地幔岩中[14-15],以 及超高压变质岩中。金刚石包裹体高硅榴石见报 道的有巴西 Juina 省 Sao Luiz 河金刚石包裹体¹⁹、澳 大利亚南部 Eurelia 产出的侏罗纪金伯利岩^[20]、南非 Jagersfontein金伯利岩金刚石中的镁铁质石榴子石 包裹体^[16]、加拿大 Slave Province 地区 Panda 金伯利 岩金刚石中的矿物包裹体[21]、上地幔深部或转换带 的金刚石包裹体(Wadsleyite)^[2]。超深地幔岩高硅 榴石见报道的有挪威西部超深地幔岩镁铁质石榴 子石^[23-24]和太平洋西南(北爪哇)Malaita 捕虏体地幔 过渡带岩石[25-26]。Ye等[27]在中国东部苏-鲁超高压 变质岩带中也发现了超硅石榴子石,并据此认为陆 壳物质可能会俯冲到大于 200km 的地幔深度。 Song 等[28]和刘良等[29]也分别在柴达木北缘超高压变 质带的石榴子石橄榄岩和阿尔金超高压片麻状 (含)钾长石榴辉石岩中发现了超硅石榴子石,其形 成压力分别大于5GPa和7GPa。

牛贺才等¹⁰⁰报道了新疆北部扎河坝-阿尔曼泰 早古生代造山带扎河坝蛇绿岩岩块石榴辉石岩中 的超硅-超钛石榴子石,这种超硅-超钛石榴子石成 分显示出高钙缺镁的特点,以氧离子为12计,钙的 原子数几乎接近3,有的超过3。石榴辉石岩的岩石 化学、稀土元素及同位素地球化学特征显示,扎河 坝超高压石榴辉石岩是钙交代其上覆盖有钙质沉



A一金伯利岩、玄武岩中的包体及超镁铁岩中的层状榴辉岩体;B一角闪岩相或麻粒岩相地体的副片麻岩或混合岩带状榴辉岩体; C一阿尔卑斯型变质岩或蓝闪片岩中的带状透镜状榴辉岩。Prp—镁铝榴石;Grs—钙铝榴石;Adr—钙铁榴石; Sps—锰铝榴石;Alm—铁铝榴石

积物的洋壳俯冲到地幔深部,经超高压变质后再折 返至地表的产物。它们的寄主岩石——石榴辉石 岩是与洋壳超深俯冲有关的超高压变质岩。研究 同时显示,扎河坝-阿尔曼泰早古生代造山带的形 成与古亚洲洋洋壳超深俯冲有关。

陆琦等鬥报道了辽宁金刚石中含有超硅钙铁榴 石。在中国辽宁金刚石中获得的高硅钙铁榴石 (Majorite)为一单晶碎片包裹体,与其共存的金刚石 包裹体还有刚玉、碳化钛、红色金刚石碎片、钙钛 矿、二氧化硅等。通过电子探针成分分析,确定该 高硅钙铁榴石成分超硅高钙缺镁,8个分析点平均 值计算的矿物分子式为(Ca235Fe0.49Mn0.15Mg0.02)3.01 (Al_{1.08}Fe_{0.48}Si_{0.44})_{2.00}(SiO₄)₃。根据前人^[25]提出的计算压 力的公式,得到该包裹体高硅钙铁榴石形成的压力 为14GPa,估算形成深度达400km。在该高硅钙铁 榴石包裹体中还存在微米级二氧化硅(呈四边形断 面)和氧化铁(含钠)的包裹体(析离体),它们可能 是斯石英和方铁矿(或似沂蒙矿)。从高硅钙铁榴 石的成分判断,其物质来源具壳源性质。由此推 断,大陆壳俯冲深度超过400km,这与地球物理探测 郯庐断裂已切穿了上地幔、进入软流圈的观点一致。

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,本区高硅石榴子石具有高钙、镁 的特点,指示该石榴子石可能来源于壳源物质。

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^[29]和Van Roermund等^[32]据此认为,硅在石榴子石中的含量是一个很有潜力的地质压力计。Collerson等^[25]利用实验岩石学数据,总结出计算压力的经验公式:

p(GPa) = -50.7 + 18.97 N(Si) (1)

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

本区 SiO₂ 最低质量分数:(Ca_{3.07}Fe_{0.11}Mg_{0.02})_{3.2} (Al_{1.2}Fe_{0.67}Ti_{0.03}Si_{0.05})_{1.95}Si₃O₁₂,最高质量分数: (Ca_{2.616}Mg_{0.45}Fe_{0.01})_{3.07}(Al₁Fe_{0.64}Ti_{0.02}Mn₀, 0.31)₁₉₈Si₃O₁₂₀

Si进入八面体的原子数为0.05~0.31,平均为0.13,在八面体中,Al占50%,Cr几乎为零,Fe占30%左右。

带入公式,可以得到本区压力范围为12.1~ 12.8GPa,其深度可达300km。如果考虑到温度效 应,该深度可能会降低。

本区的辉绿岩化学组成具有富钙,贫硅、铝和 镁的特征。在化学组成特征上,本区碱性基性岩与 地幔岩有明显的差别,很难将其与深部来源的超高 压地幔岩相联系。Joswig等^[33]根据在金刚石中发现 的由 perovskite(CaSiO₃),β-larnite(Ca₂SiO₄)和 CaSi₂O₅-titanite组成的富钙硅酸盐包体,认为下地 幔是不均匀的,存在富钙源区。Brenker等^[34]研究确 认,在大于 300km 深的地幔确实存在富钙源区,它 是由于钙交代的大洋岩石圈或其上沉积的钙质碳 酸俯冲到深部并保存所致。

5 结 论

(2)栏杆含金刚石母岩中石榴子石族矿物化学 式中的A主要由Mg²⁺、Fe²⁺和Ca²⁺离子占位,B主要 由Al³⁺、Fe³⁺、Mn³⁺和Cr³⁺离子占位,三价阳离子主要 为Al³⁺,二价阳离子主要为Ca²⁺。其中,少部分的石 榴子石部分Si⁴⁺替代Al³⁺,Cr³⁺,Fe³⁺等三价阳离子进 入八面体位置,从而形成Si(pfu)>3.0的超硅石榴子 石。本区高硅石榴子石具有高钙、缺镁的特点,指 示该石榴子石可能来源于壳源物质。根据计算本 区压力范围为12.1~12.8GPa,其深度可达300km。 结合前人研究成果,笔者认为,其富钙流体是由于 钙交代的大洋岩石圈或其上沉积的钙质碳酸俯冲 到深部并保存所致。

参考文献

- [1]庄继翔. 宿州市栏杆—褚栏地区金刚石勘查中磁异常特征研究与 找矿[J]. 安徽地质, 2013, 23(2): 123-125.
- [2]黄先觉. 金刚石原生矿床类型及安徽省金刚石找矿前景分析[J]. 安徽地质, 2012, 22(2): 103-105.
- [3]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[]].资源调查与环境,2014,35(4):

245-253.

- [4]蔡逸涛, 张洁. 安徽栏杆含金刚石母岩岩石学研究[J]. 矿床地质, 2014, 33(supp.): 363-365.
- [5]张岳桥, 董树文. 郯庐断裂带中生代构造演化史:进展与新认识[]]. 地质通报, 2008, 27(9): 1371-1390.
- [6]侯明金, 王永敏, Mercier J, 等. 郑庐断裂带(安徽部分)动力学演化 及其构造意义[]]. 地质通报, 2003, 22(2): 36-43.
- [7]姚仲伯. 安徽省区域地质概要[J]. 中国区域地质, 1986, (4): 309-312.
- [8]张洁, 蔡逸涛, 董钟斗, 等. 安徽栏杆金刚石矿物特征及其寄主母 岩地球化学特征研究[J]. 宝石和宝石学杂志, 2015, 17(5): 1-11.
- [9]蔡逸涛, 杨献忠, 康丛轩. 国内外金刚石成因认识现状[J]. 华东地质, 2017, 38(Supp.): 95-102.
- [10]Dawson J B, Stephens W E. Statistical Classification of Garnets from Kimberlite and Associated Xenoliths[J]. The Journal of Geology, 1975, 83(5): 589–607.
- [11]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.
- [12]Jamtvert B, Wogelius R, Fraser D. Zonation patterns of skarn garnets- records of hydrothermal system evolution[J]. Geology, 1993, 21(2): 113–116.
- [13]张安棣,谢锡林,郭立鹤.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.
- [14]Akaogi M, Akimoto S. Pyroxene-garnet solid-solution equilibria in the systems Mg₃Si₄O₁₂-Mg₃Al₂Si₃O₁₂ and Fe₄Si₄O₁₂-Fe₃Al₂Si₃O₁₂ at high pressures and temperatures[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 1977, 15(1): 90–106.
- [15]Smith J V, Mason B. Pyroxene-Garnet Transformation in Coorara Meteorite[J]. Science, 1970, 168(3933): 832–833.
- [16]Tappert R, Stachel T, Harris J W, et al. Subducting oceanic crust: The source of deep diamonds[J]. Geology, 2005, 33(7): 565–568.
- [17]Ringwood A E, Major A, Ringwood A E, et al. High pressure transformations in pyroxenes[J]. Earth Planet Science Letters, 1966, 1: 351.
- [18]Ringwood A E, Major A. Synthesis of majorite and other high pressure garnet and perovskites[J]. Earth Planet Science Letters, 1971, 12: 411-418.
- [19]Ben H, Cayzer N. Decompression and unmixing of crystals included in diamonds from the mantle transition zone[J]. Physics and Chemistry of Minerals, 2007, 34(9): 647–656.
- [20]Tappert R, Foden J, Stachel T, et al. Deep mantle diamonds from South Australia: A record of Pacific subduction at the Gondwanan margin[J]. Geology, 2009, 37(1): 43–46.

- [21]Tappert R, Stachel T, Harris J W, et al. Mineral inclusions in diamonds from the Panda kimberlite, Slave Province, Canada[J]. European Journal of Mineralogy, 2005, 17(3): 423–440.
- [22]Stachel T, Brey G P, Harris J W. Inclusions in sublithospheric diamonds: glimpses of deep Earth[J]. Elements, 2005, 1(2): 73–78.
- [23]Roermund V, Herman L, Drury M R. Ultra-high pressure (P > 6 GPa) garnet peridotites in Western Norway: exhumation of mantle rocks from > 185 km depth[J]. Terra Nova, 1998, 10: 295–301.
- [24]Scambelluri M, Pettke T, Van Roermund H L M. Majoritic garnets monitor deep subduction fluid flow and mantle dynamics[J]. Geology, 2008, 36(01): 59–62.
- [25]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.
- [26]Neal C R, Haggerty S E, Sautter V. " Majorite" and "silicate perovskite" mineral compositions in xenoliths from Malaita[J]. Science, 2001, 292(5519): 1015.
- [27]Ye K, Cong B, Ye D. The possible subduction of continental material to depths greater than 200km[J]. Nature, 2000, 407: 734– 736.
- [28]Song S, Zhang L, Niu Y. Ultra-deep origin of garnet peridotite from the North Qaidam ultrahigh-pressure belt, Northern Tibetan Plateau, NW China[J]. American Mineralogist, 2015, 89(8/9): 1330–1336.
- [29]刘良,陈丹玲,张安达.阿尔金超高压(>7GPa)片麻状(含)钾长石 榴辉石岩——石榴子石出溶单斜辉石的证据[J].中国科学(D 辑),2005,35(02):105-114.
- [30]牛贺才, 张海祥, 单强, 等. 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, 2007, (18): 2169-2174.
- [31]陆琦,刘惠芳,肖平,等.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,2012,31(5):1-7.
- [32]Van Roermund H L M, Drury M R, Barnhoorn A, et al. Supersilicic garnet microstructures from an orogenic garnet peridotite, evidence for an ultra- deep (>6GPa) origin[J]. Journal of Metamorphic Geology, 2000, 18(2): 135–147.
- [33]Joswig W, Stachel T, Harris J W, et al. New Ca-silicate inclusions in diamonds-tracers from the lower mantle[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1999, 173: 1–6.
- [34]Brenker F E, Vincze L, Vekemans B, et al. Detection of a Ca-rich lithology in the Earth's deep (>300km) convecting mantle[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2005, 236: 579–587.