

文章编号: 1000- 6524 (2002) 03- 0251- 14

## 西秦岭礼县地区新生代钾霞橄 黄长岩系的单斜辉石

王 建, 李建平

(中国科学院 广州地球化学研究所, 广东 广州 510640)

**摘 要:** 对西秦岭礼县地区钾霞橄黄长质火山岩系中单斜辉石进行了矿物化学研究。斑晶相单斜辉石类型复杂, 成分变化范围大, 具有多源属性。基质相单斜辉石可以分为高 Ti 铝透辉石和含 Ti 透辉石两种基本类型, 它们是同源岩浆演化结晶的产物, 结晶顺序前者晚于后者。岩系中透辉石  $\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Fe})\text{Si}_2\text{O}_6$  结晶过程中广泛存在着  $\text{CaTiAl}_2\text{O}_6$  分子替代, 晚期熔体富 Ti、Al 贫 Si、Mg, 熔体有向富 Ti、Al、Fe、Na, 贫 Mg、Si 演化的趋势, 在透辉石成分上表现为  $\text{CaTiAl}_2\text{O}_6$  和  $\text{NaFe}^{3+}\text{Si}_2\text{O}_6$  端员分子对  $\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Fe})\text{Si}_2\text{O}_6$  的替代。本区基质相透辉石与世界上典型地区的钾霞橄黄长岩系的透辉石具有不同程度的可比性。

**关键词:** 西秦岭; 礼县; 新生代; 钾霞橄黄长岩系; 单斜辉石; 矿物化学

**中图分类号:** P578.954; P588.15 **文献标识码:** A

## Clinopyroxenes from Cenozoic kamafugites in Lixian County, West Qinling

WANG Jian and LI Jian\_ping

(Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** This paper has mainly studied chemical composition of clinopyroxenes from the kamafugitic series in Lixian County, West Qinling. The phenocrystal clinopyroxenes show complex types, complicated compositions, and multiple origins. The groundmass clinopyroxenes can be grouped into two pyroxene types: high Ti aluminian diopside and Ti-bearing diopside which crystallized from the comagmatic melts. The substitution of  $\text{CaTiAl}_2\text{O}_6$  for  $\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Fe})\text{Si}_2\text{O}_6$  is common during the crystallization of diopsides, with the late melt rich in Ti and Al but poor in Si and Mg. Baicaoshan volcanic pipe is the product of an evolved magma with an evolutionary trend of Ti, Al, Fe, Na enrichment and Mg, Si depletion, which can be expressed by the substitution of  $\text{CaTiAl}_2\text{O}_6$  and  $\text{NaFe}^{3+}\text{Si}_2\text{O}_6$  for  $\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Fe})\text{Si}_2\text{O}_6$  during the crystallization process of diopsides. The diopsides of this area are comparable with diopsides from kamafugitic series in typical areas of

收稿日期: 2001- 11- 27; 修订日期: 2002- 03- 25

基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(G1998040800)

作者简介: 王建(1964- ), 男, 博士, 工程师, 主要从事矿物学、岩石学和地球化学方面的研究。

**the world, showing that bulk composition of kamafugitic rocks provides constraints on mineralogical composition and crystal lattice features.**

**Key words:** West Qinling; Lixian County; Cenozoic; kamafugites; clinopyroxene; crystal chemistry

钾霞橄黄长岩系(kamafugitic series)是含钾霞石的一套成因上相互关联的火山岩系(Woolly *et al.*, 1996),主要组成矿物为单斜辉石、钾霞石、石榴石、黄长石、橄榄石和金云母,常与碳酸岩构成独特的火成岩组合,一般限于大陆环境的张性构造区,如乌干达的Toro Ankole、巴西的Mata da Corda和意大利的ULUD(Stoppa and Cundari, 1998)。通常认为:①该组合的地幔源区是与碳酸岩熔体平衡的橄榄岩(Dalton and Wood, 1993);②原始熔体形成于富CO<sub>2</sub>、贫H<sub>2</sub>O环境,源区高的 $f_{O_2}$ 和CO<sub>2</sub>含量是形成钾霞橄黄长岩系贫SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,高CaO、K<sub>2</sub>O的主要制约因素(Foley *et al.*, 1986, 1987, 1992; Edgar *et al.*, 1980, 1992; Elizabeth *et al.*, 1998; Lloyd *et al.*, 1985);③原始岩浆生成和上升至地表的过程涉及特殊的物理化学和地球动力学条件(Bailey, 1990; Cundari *et al.*, 1991; Cellai *et al.*, 1994)。

透辉石是钾霞橄黄长岩系中最常见矿物相之一,也是对熔体成分变化最敏感的矿物,其化学成分常被用来推测它所从中结晶的岩浆成分、温压条件以及矿物本身形成的一些信息。近年来对单斜辉石矿物化学的系统研究证实,矿物晶格中的阳离子替代受控于结晶物理化学条件(温度、压力、熔体成分等)和/或某种特殊岩浆环境。西秦岭礼县地区是目前国内仅见的钾霞橄黄长质火山岩系发育区,前人对其中的钛金云母进行过系统研究(喻学惠, 1994),但对斑晶和基质相中的单斜辉石进行系统的矿物学研究本文尚属首次。本文试图阐述这种特殊的岩浆环境下单斜辉石的成分特征、晶体结构以及熔体的演化趋势。

## 1 构造背景及岩相学特征

西秦岭礼县新生代钾霞橄黄长质火山岩区位于青藏高原东北缘,扬子古陆、松潘-甘孜褶皱带和祁连-秦岭褶皱带交汇处的天水-礼县新生代断陷盆地中(图1)。前人研究表明,自中生代以来,该区陆内俯冲及有关的岩浆活动发育,特别是新生代以来,印度板块向欧亚大陆俯冲碰撞作用的加强以及青藏高原的快速隆生导致了该区巨厚的磨拉石堆积、断陷盆地形成和高位夷平面的发育,同时伴随新生代火山岩的形成(李春昱, 1978; 李鸿文, 1988; 喻学惠等, 1998, 2001)。钾霞橄黄长岩区发育的地层主要是中泥盆系至下第三系的板岩、千枚岩、泥质砂岩、砂岩、砂砾岩等,可见新生代火山岩不整合盖在第三系红色砂砾岩和粉砂岩之上(图1)。火山岩筒中金云母Ar/Ar同位素年龄为22~23 Ma(喻学惠等, 2001),是中新世的产物,与野外观察结果相符。

该区钾霞橄黄长岩系由数十个火山岩筒(或岩管)组成。本次研究的样品取自上、下分水岭、苟家山、红崖山、水晶坝、上杜家、百草山、王家坪和硬坪9个岩筒(图1)。单个岩筒出露面积通常不超过1 km<sup>2</sup>,可以划分出熔岩、角砾熔岩、球状火山集块岩、火山砾岩和次火山岩等类型。火山岩普遍具斑状结构、气孔构造和致密块状构造等。部分岩筒中(分水岭、红崖山、百草山)可见尖晶石二辉橄橄榄岩、尖晶石方辉橄橄榄岩和纯橄岩包体。斑晶主要由橄榄

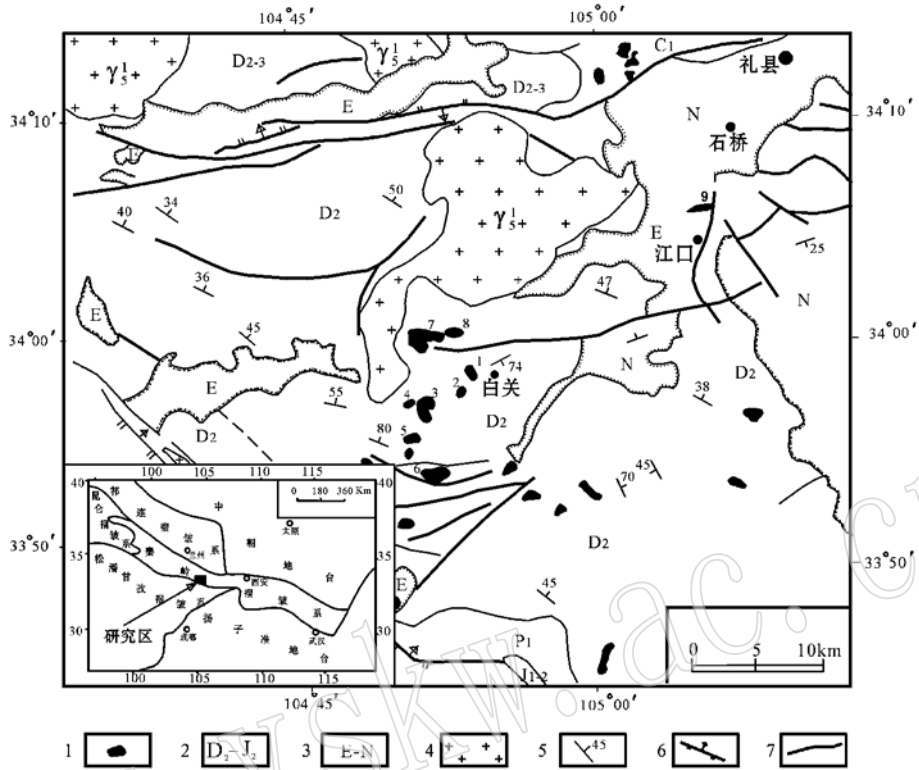


图1 西秦岭礼县地区钾霞橄黄长质火山岩系分布地质简图

Fig. 1 Simplified geological map showing the distribution of kamafugitic volcanic series in Lixian County, West Qinling

1—钾霞橄黄长岩系火山岩筒(图区内 1—苟家山; 2—红崖山; 3—分水岭; 4—下分水岭; 5—水晶坝; 6—上杜家; 7—百草山; 8—硬坪; 9—王家坪); 2—中泥盆—中侏罗系; 3—第三系; 4—中生代斑状花岗岩; 5—地层产状; 6—断裂及性质; 7—性质不明断裂

石和单斜辉石组成(其中部分是捕掳晶),部分岩筒中含有少量的钛金云母斑晶。岩浆结晶橄榄石斑晶多为半自形晶,含量变化大(2%~20%),成分相对均一, Fo 0.85~0.92(平均0.87),为富镁的贵橄榄石;捕掳晶橄榄石与前者相比 Fo 高(平均0.90)、CaO 低,并且发育不均匀消光或扭折带。单斜辉石斑晶呈半自形—自形晶,含量5%~20%,类型复杂,成分变化大,环带结构发育。基质由半定向或杂乱排列的长条状透辉石和/或黄长石微晶以及填隙其间的霞石(或钾霞石)、白榴石、金云母、方沸石、方解石、碱镁闪石、钾长石、钙钛矿、钛磁铁矿、磷灰石以及隐晶质和玻璃质组成,具玄武岩基质常见的间粒结构、间隐结构特征。其全岩成分贫 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,富 MgO、CaO、TiO<sub>2</sub> 和 Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O(Na<sub>2</sub>O<K<sub>2</sub>O),属于一套钾质系列火山岩,在火山岩的硅—碱分类图解上,本区火山岩落入副长石质岩区。在 Foley 等(1987)的超钾质火山岩分类图解中,本区火山岩落入钾霞橄黄长岩区。

## 2 单斜辉石的化学成分

单斜辉石成分的测试是在澳大利亚堪培拉国立大学地球科学研究所 Cameca SX50 型

电子探针上完成的, 加速电压 15 kV, 束电流 10 nA, 束直径 1  $\mu\text{m}$ 。钾霞橄黄长岩系中斑晶和基质相单斜辉石的化学成分见表 1.2。所有基质相单斜辉石均落入 Wo-En-Fs 三角形的辉石四边形区的透辉石或富钙透辉石区域中; 斑晶相单斜辉石依不同类型分别落在透辉石和普通辉石区(图 2)。

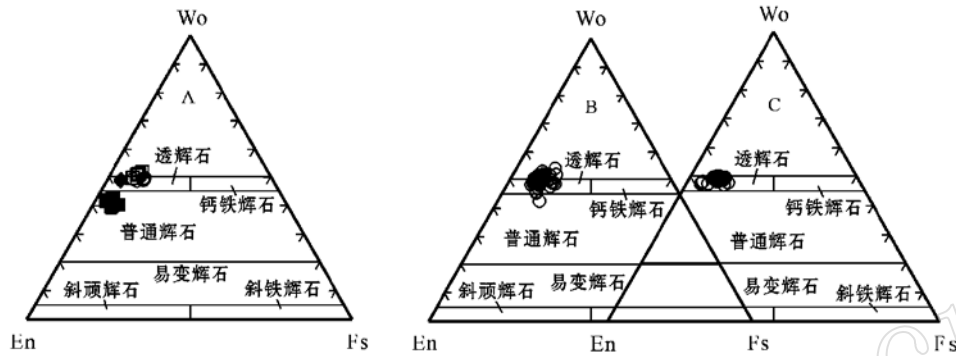


图 2 礼县地区钾霞橄黄长岩系单斜辉石的 Wo-En-Fs 图解(据 Morimoto, 1988)

Fig. 2 Quadrilateral diagram (Wo-En-Fs) of clinopyroxenes from kamafugitic series in Lixian County  
 A—斑晶相单斜辉石: ■—地幔包体中 Cr-普通辉石及主岩中 Cr-普通辉石(捕虏晶); ◆—主岩 Al-透辉石斑晶;  
 ○—主岩绿色透辉石斑晶; □—主岩含 Ti 富钙透辉石斑晶; B 和 C 为基质相透辉石, ○分别代表其中的高 Ti 铝透辉石和含 Ti 透辉石

## 2.1 斑晶相单斜辉石

对斑晶较为发育的百草山、红崖山和王家坪 3 个火山岩筒中的单斜辉石斑晶进行了电子探针分析, 并与分水岭岩筒中发现的地幔尖晶石二辉橄榄岩和方辉橄榄岩包体中的 Cr-普通辉石进行了对比(表 1), 结果发现, 不同火山岩筒之间以及相同火山岩筒之间的单斜辉石斑晶成分存在着较大的差别, 但同一类型的斑晶成分差别不大。斑晶相单斜辉石的化学成分范围及其与寄主岩透辉石成分之间的关系反映了它们的多源性成因。综合起来, 可分为下面 4 种类型:

(1) Cr-普通辉石: 见于红崖山、王家坪和分水岭岩筒中。以他型晶为主, 其成分独立于寄主岩透辉石, 在不同岩筒中的 Cr-普通辉石也不相同(表 1)。其总的化学特征是相对富  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , 低  $\text{TiO}_2$  和中等含量的  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 。  $\text{Mg}^\# [100 \text{Mg}/(\text{Mg} + \sum \text{Fe})]$  高, 达 91.2~92.3 (除个别低值 87.2 外)。四面体位子几乎完全为 Si 原子占据,  $^{\text{VI}}\text{Al}/^{\text{IV}}\text{Al}$  最高为 0.139 (通常  $< 0.1$ )。如换算为端员组分,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  主要表现为 Ca-契尔马克分子和少量的硬玉分子。所有 Cr-普通辉石的  $^{\text{VI}}\text{Al}/^{\text{IV}}\text{Al}$  值均落入 Aoki 和 Shiba (1973) 所划分的玄武岩包体区(图 3)。红崖山岩筒中的 Cr-普通辉石斑晶落在  $^{\text{VI}}\text{Al}/^{\text{IV}}\text{Al} = 1:1$  值线附近, 而且由于矿物中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量低而靠近坐标轴原点, 与分水岭岩筒中地幔尖晶石二辉橄榄岩包体中的 Cr-普通辉石成分点接近。

(2) 绿色透辉石巨晶: 仅见于王家坪岩筒, 常可见 4~5 mm 颗粒, 晶型完好, 具特征的环带结构, 核部为浅绿色透辉石, 边部为浅粉红色的高 Ti 铝透辉石。此类辉石以富  $\text{FeO}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ , 相对贫  $\text{MgO}$ 、 $\text{Cr}_2\text{O}_3$  和  $\text{TiO}_2$  中等含量为特征(表 1),  $\text{Mg}^\#$  为 78.54~81.85, 在  $\text{TiO}_2$ - $\text{Mg}^\#$  图解(图 4)上, 成分点明显偏离其他单斜辉石(斑晶和基质)。而其  $^{\text{VI}}\text{Al}/^{\text{IV}}\text{Al}$  和

表 1 西秦岭礼县地区钾霞橄黄长岩系中代表性斑晶相单斜辉石探针分析结果  
Table 1 Compositions of representative phenocryst clinopyroxenes from kamafugitic series in Lixian County, West Qinling

| 样品                                 | Cr-普通辉石 |           |        | 含 Ti 富钙透辉石斑晶 |         |         | Cr-普通辉石(辅助晶) |        |        |        |        |        | w <sub>B</sub> /% |        |
|------------------------------------|---------|-----------|--------|--------------|---------|---------|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------------------|--------|
|                                    | 包体-I(6) | 包体-II(10) | h-cpx1 | h-cpx2       | h-cpx3核 | h-cpx3中 | h-cpx3边      | h-Cpx1 | h-Cpx2 | h-Cpx3 | h-Cpx4 | h-Cpx5 |                   | h-Cpx6 |
| SiO <sub>2</sub>                   | 53.53   | 53.45     | 46.89  | 49.15        | 46.77   | 46.44   | 45.35        | 53.09  | 53.17  | 53.42  | 52.55  | 52.95  | 53.23             | 50.39  |
| TiO <sub>2</sub>                   | 0.07    | 0.27      | 2.72   | 2.03         | 2.33    | 2.67    | 3.38         | 0.17   | 0.14   | 0.07   | 0.17   | 0.16   | 0.20              | 0.66   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>     | 3.30    | 4.75      | 6.04   | 3.61         | 5.73    | 6.10    | 7.54         | 3.44   | 3.27   | 3.40   | 3.30   | 3.35   | 3.35              | 5.77   |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>     | 0.99    | 1.04      | 0.62   | 0.16         | 0.54    | 0.43    | 0.54         | 1.17   | 1.15   | 1.19   | 1.16   | 1.23   | 1.19              | 0.84   |
| FeO                                | 3.04    | 3.42      | 5.04   | 4.65         | 5.15    | 5.16    | 5.62         | 2.82   | 2.77   | 2.89   | 2.94   | 2.89   | 2.70              | 4.40   |
| MnO                                | 0.08    | 0.08      | 0.08   | 0.08         | 0.08    | 0.08    | 0.08         | 0.09   | 0.09   | 0.08   | 0.12   | 0.08   | 0.09              | 0.08   |
| MgO                                | 18.44   | 17.26     | 13.75  | 14.80        | 13.50   | 13.19   | 12.81        | 17.85  | 18.27  | 18.20  | 17.85  | 18.09  | 18.19             | 16.84  |
| CaO                                | 19.76   | 18.07     | 24.11  | 24.10        | 23.82   | 23.67   | 24.08        | 20.86  | 20.78  | 20.90  | 20.72  | 20.95  | 20.87             | 18.61  |
| Na <sub>2</sub> O                  | 0.46    | 1.35      | 0.25   | 0.14         | 0.14    | 0.26    | 0.34         | 0.17   | 0.25   | 0.21   | 0.23   | 0.33   | 0.20              | 0.59   |
| K <sub>2</sub> O                   | 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   |
| Total                              | 99.67   | 99.69     | 99.50  | 98.72        | 98.06   | 98.00   | 99.74        | 99.66  | 99.89  | 100.36 | 99.04  | 100.03 | 100.02            | 98.18  |
| <sup>wt</sup> Al/ <sup>wt</sup> Al | 1.31    | 1.93      | 0.03   | 0.00         | 0.09    | 0.11    | 0.05         | 1.16   | 0.89   | 1.00   | 0.84   | 0.70   | 0.96              | 0.81   |
| Mg#                                | 91.54   | 90.03     | 83.01  | 85.04        | 82.43   | 82.10   | 80.23        | 91.84  | 92.16  | 91.84  | 91.54  | 91.82  | 92.29             | 87.21  |
| 阳离子数按以 6 个氧原子为基础                   |         |           |        |              |         |         |              |        |        |        |        |        |                   |        |
| T <sub>Si</sub>                    | 1.939   | 1.743     | 1.835  | 1.765        | 1.754   | 1.687   | 1.932        | 1.926  | 1.926  | 1.928  | 1.923  | 1.916  | 1.927             | 1.861  |
| T <sub>Al</sub>                    | 0.061   | 0.069     | 0.159  | 0.235        | 0.246   | 0.313   | 0.068        | 0.074  | 0.074  | 0.072  | 0.077  | 0.084  | 0.073             | 0.139  |
| T <sub>Fe<sup>3+</sup></sub>       | 0.000   | 0.000     | 0.000  | 0.007        | 0.000   | 0.000   | 0.000        | 0.000  | 0.000  | 0.000  | 0.000  | 0.000  | 0.000             | 0.000  |
| T <sub>site</sub>                  | 2.000   | 2.000     | 2.000  | 2.001        | 2.000   | 2.000   | 2.000        | 2.000  | 2.000  | 2.000  | 2.000  | 2.000  | 2.000             | 2.000  |
| M1Al                               | 0.080   | 0.133     | 0.007  | 0.000        | 0.020   | 0.026   | 0.017        | 0.079  | 0.066  | 0.072  | 0.065  | 0.059  | 0.070             | 0.112  |
| M1Ti                               | 0.002   | 0.007     | 0.076  | 0.057        | 0.066   | 0.076   | 0.095        | 0.005  | 0.004  | 0.002  | 0.005  | 0.004  | 0.005             | 0.018  |
| M1Fe <sup>3+</sup>                 | 0.000   | 0.000     | 0.097  | 0.056        | 0.076   | 0.073   | 0.114        | 0.000  | 0.000  | 0.000  | 0.000  | 0.003  | 0.000             | 0.006  |
| M1Fe <sup>2+</sup>                 | 0.000   | 0.000     | 0.040  | 0.058        | 0.062   | 0.069   | 0.048        | 0.000  | 0.000  | 0.000  | 0.000  | 0.000  | 0.000             | 0.000  |
| M1Cr                               | 0.028   | 0.030     | 0.018  | 0.005        | 0.016   | 0.013   | 0.016        | 0.034  | 0.033  | 0.034  | 0.034  | 0.035  | 0.034             | 0.025  |
| M1Mg                               | 0.890   | 0.830     | 0.762  | 0.824        | 0.760   | 0.743   | 0.710        | 0.882  | 0.898  | 0.892  | 0.896  | 0.898  | 0.890             | 0.838  |
| M1site                             | 1.000   | 1.000     | 1.000  | 1.000        | 1.000   | 1.000   | 1.000        | 1.000  | 1.001  | 1.000  | 1.000  | 1.000  | 0.999             | 0.999  |
| M2Mg                               | 0.106   | 0.100     | 0.000  | 0.000        | 0.000   | 0.000   | 0.000        | 0.086  | 0.089  | 0.087  | 0.078  | 0.078  | 0.092             | 0.089  |
| M2Fe <sup>2+</sup>                 | 0.092   | 0.103     | 0.019  | 0.024        | 0.024   | 0.020   | 0.013        | 0.086  | 0.084  | 0.087  | 0.090  | 0.084  | 0.082             | 0.130  |
| M2Mn                               | 0.002   | 0.002     | 0.003  | 0.003        | 0.003   | 0.003   | 0.003        | 0.003  | 0.003  | 0.002  | 0.004  | 0.002  | 0.003             | 0.003  |
| M2Ca                               | 0.767   | 0.700     | 0.960  | 0.964        | 0.963   | 0.958   | 0.960        | 0.813  | 0.807  | 0.808  | 0.812  | 0.812  | 0.810             | 0.737  |
| M2Na                               | 0.032   | 0.095     | 0.018  | 0.010        | 0.010   | 0.019   | 0.025        | 0.012  | 0.018  | 0.015  | 0.016  | 0.023  | 0.014             | 0.042  |
| M2K                                | 0.000   | 0.000     | 0.000  | 0.000        | 0.000   | 0.000   | 0.000        | 0.000  | 0.000  | 0.000  | 0.000  | 0.000  | 0.000             | 0.000  |
| M2site                             | 0.999   | 1.000     | 1.000  | 1.001        | 1.000   | 1.000   | 1.001        | 1.000  | 1.001  | 0.999  | 1.000  | 0.999  | 1.001             | 1.001  |
| Sum-cat                            | 4.000   | 4.000     | 4.000  | 4.000        | 4.000   | 4.000   | 4.000        | 4.000  | 4.000  | 4.000  | 4.000  | 4.000  | 4.000             | 4.000  |
| Wo                                 | 41.29   | 40.32     | 51.04  | 49.81        | 51.02   | 51.33   | 51.95        | 43.49  | 42.90  | 43.06  | 43.22  | 43.25  | 43.16             | 40.87  |
| En                                 | 53.62   | 53.58     | 40.50  | 42.56        | 40.23   | 39.80   | 38.45        | 51.78  | 52.49  | 52.17  | 51.80  | 51.96  | 52.34             | 51.45  |
| Fs                                 | 5.09    | 6.10      | 8.46   | 7.63         | 8.75    | 8.87    | 9.60         | 4.74   | 4.61   | 4.78   | 4.98   | 4.79   | 4.51              | 7.68   |

续表 1

| 样品                             | 绿色透辉石巨晶 |         |         |         |         |         |         | Al-透辉石捕虏晶 |         |         |         |         |         |         | 距边 200 $\mu$ m |         | 100 $\mu$ m |         | 50 $\mu$ m |         | 边缘 |  |
|--------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------------|---------|-------------|---------|------------|---------|----|--|
|                                | w-cpx-1 | w-cpx-2 | w-cpx-3 | w-cpx-4 | w-cpx-5 | w-cpx-6 | w-cpx-7 | b-cpx-1   | b-cpx-2 | b-cpx-3 | b-cpx-4 | b-cpx-5 | b-cpx-4 | b-cpx-5 | b-cpx-5        | b-cpx-5 | b-cpx-5     | b-cpx-5 | b-cpx-5    | b-cpx-5 |    |  |
| SiO <sub>2</sub>               | 51.50   | 51.52   | 51.20   | 51.63   | 51.66   | 49.42   | 50.32   | 52.49     | 51.54   | 52.75   | 52.49   | 51.88   | 52.64   | 52.89   | 52.55          |         |             |         |            |         |    |  |
| TiO <sub>2</sub>               | 20.58   | 0.63    | 0.60    | 0.64    | 0.63    | 1.78    | 1.34    | 0.55      | 0.50    | 0.50    | 0.59    | 0.53    | 0.53    | 0.58    | 0.52           |         |             |         |            |         |    |  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 4.79    | 4.81    | 4.84    | 4.90    | 5.10    | 6.19    | 5.72    | 7.02      | 6.46    | 5.95    | 6.84    | 6.98    | 7.02    | 6.72    | 6.64           |         |             |         |            |         |    |  |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.08    | 0.08    | 0.08    | 0.10    | 0.08    | 0.08    | 0.07    | 0.81      | 0.70    | 0.52    | 0.74    | 0.67    | 0.71    | 0.64    | 0.61           |         |             |         |            |         |    |  |
| FeO                            | 6.10    | 6.28    | 6.22    | 6.40    | 6.28    | 5.52    | 4.22    | 2.43      | 2.31    | 2.40    | 2.41    | 2.17    | 2.42    | 2.40    | 2.32           |         |             |         |            |         |    |  |
| MnO                            | 0.24    | 0.18    | 0.27    | 0.24    | 0.21    | 0.08    | 0.08    | 0.08      | 0.08    | 0.08    | 0.08    | 0.08    | 0.08    | 0.08    | 0.08           |         |             |         |            |         |    |  |
| MgO                            | 12.91   | 13.05   | 12.75   | 12.83   | 12.95   | 13.96   | 13.25   | 14.17     | 14.09   | 14.62   | 14.28   | 13.98   | 14.52   | 14.43   | 14.30          |         |             |         |            |         |    |  |
| CaO                            | 22.47   | 22.61   | 22.27   | 22.56   | 22.48   | 22.73   | 21.43   | 20.90     | 20.71   | 21.30   | 21.26   | 20.85   | 20.79   | 20.96   | 21.11          |         |             |         |            |         |    |  |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.80    | 0.76    | 0.74    | 0.98    | 0.84    | 0.63    | 2.19    | 1.77      | 1.81    | 1.65    | 1.79    | 2.19    | 2.01    | 1.82    | 1.74           |         |             |         |            |         |    |  |
| K <sub>2</sub> O               | 0.00    | 0.00    | 0.00    | 0.00    | 0.00    | 0.00    | 0.00    | 0.04      | 0.04    | 0.04    | 0.04    | 0.05    | 0.04    | 0.04    | 0.04           |         |             |         |            |         |    |  |
| Total                          | 99.47   | 99.92   | 98.97   | 100.28  | 100.23  | 100.39  | 98.62   | 100.26    | 98.24   | 99.81   | 100.52  | 99.38   | 100.76  | 100.56  | 99.91          |         |             |         |            |         |    |  |
| w Al <sup>IV</sup> /Al         | 1.35    | 1.15    | 1.39    | 1.12    | 1.26    | 0.41    | 0.68    | 1.79      | 1.64    | 1.81    | 1.57    | 1.48    | 1.53    | 1.84    | 1.83           |         |             |         |            |         |    |  |
| Mg#                            | 78.98   | 78.75   | 78.54   | 78.22   | 78.56   | 81.85   | 84.83   | 91.26     | 91.58   | 91.53   | 91.40   | 91.96   | 91.49   | 91.48   | 91.68          |         |             |         |            |         |    |  |
| 阳离子数以 6 个氧原子为基础                |         |         |         |         |         |         |         |           |         |         |         |         |         |         |                |         |             |         |            |         |    |  |
| TiSi                           | 1.911   | 1.903   | 1.911   | 1.900   | 1.902   | 1.811   | 1.852   | 1.893     | 1.894   | 1.910   | 1.887   | 1.880   | 1.883   | 1.900   | 1.900          |         |             |         |            |         |    |  |
| TAl                            | 0.089   | 0.097   | 0.089   | 0.100   | 0.098   | 0.189   | 0.148   | 0.107     | 0.106   | 0.090   | 0.113   | 0.120   | 0.117   | 0.100   | 0.100          |         |             |         |            |         |    |  |
| TFe <sup>3+</sup>              | 0.000   | 0.000   | 0.000   | 0.000   | 0.000   | 0.000   | 0.000   | 0.000     | 0.000   | 0.000   | 0.000   | 0.000   | 0.000   | 0.000   | 0.000          |         |             |         |            |         |    |  |
| Tsite                          | 2.000   | 2.000   | 2.000   | 2.000   | 2.000   | 2.000   | 2.000   | 2.000     | 2.000   | 2.000   | 2.000   | 2.000   | 2.000   | 2.000   | 2.000          |         |             |         |            |         |    |  |
| M1Al                           | 0.120   | 0.112   | 0.124   | 0.112   | 0.123   | 0.078   | 0.100   | 0.191     | 0.174   | 0.163   | 0.177   | 0.178   | 0.179   | 0.184   | 0.183          |         |             |         |            |         |    |  |
| M1Ti                           | 0.016   | 0.018   | 0.017   | 0.018   | 0.017   | 0.049   | 0.037   | 0.015     | 0.014   | 0.014   | 0.016   | 0.014   | 0.014   | 0.016   | 0.014          |         |             |         |            |         |    |  |
| M1Fe <sup>3+</sup>             | 0.000   | 0.001   | 0.000   | 0.019   | 0.000   | 0.055   | 0.127   | 0.000     | 0.014   | 0.002   | 0.008   | 0.050   | 0.030   | 0.000   | 0.000          |         |             |         |            |         |    |  |
| M1Fe <sup>2+</sup>             | 0.148   | 0.148   | 0.147   | 0.144   | 0.147   | 0.053   | 0.003   | 0.009     | 0.006   | 0.017   | 0.012   | 0.000   | 0.000   | 0.010   | 0.014          |         |             |         |            |         |    |  |
| M1Cr                           | 0.002   | 0.002   | 0.002   | 0.003   | 0.002   | 0.002   | 0.002   | 0.023     | 0.020   | 0.015   | 0.021   | 0.019   | 0.020   | 0.018   | 0.017          |         |             |         |            |         |    |  |
| M1Mg                           | 0.714   | 0.719   | 0.710   | 0.704   | 0.711   | 0.762   | 0.727   | 0.762     | 0.772   | 0.789   | 0.765   | 0.739   | 0.757   | 0.773   | 0.771          |         |             |         |            |         |    |  |
| M1site                         | 1.000   | 1.000   | 1.000   | 1.000   | 1.000   | 0.999   | 0.996   | 1.000     | 1.000   | 1.000   | 0.999   | 1.000   | 1.000   | 1.001   | 0.999          |         |             |         |            |         |    |  |
| M2Mg                           | 0.000   | 0.000   | 0.000   | 0.000   | 0.000   | 0.000   | 0.000   | 0.000     | 0.000   | 0.000   | 0.000   | 0.016   | 0.017   | 0.000   | 0.000          |         |             |         |            |         |    |  |
| M2Fe <sup>2+</sup>             | 0.042   | 0.045   | 0.047   | 0.033   | 0.047   | 0.061   | 0.000   | 0.064     | 0.051   | 0.054   | 0.052   | 0.016   | 0.042   | 0.062   | 0.056          |         |             |         |            |         |    |  |
| M2Mn                           | 0.008   | 0.006   | 0.009   | 0.007   | 0.007   | 0.002   | 0.002   | 0.002     | 0.012   | 0.002   | 0.002   | 0.002   | 0.002   | 0.002   | 0.002          |         |             |         |            |         |    |  |
| M2Ca                           | 0.893   | 0.895   | 0.891   | 0.889   | 0.887   | 0.892   | 0.845   | 0.808     | 0.816   | 0.826   | 0.819   | 0.809   | 0.797   | 0.807   | 0.818          |         |             |         |            |         |    |  |
| M2Na                           | 0.058   | 0.054   | 0.054   | 0.070   | 0.060   | 0.045   | 0.156   | 0.124     | 0.129   | 0.116   | 0.125   | 0.154   | 0.139   | 0.127   | 0.122          |         |             |         |            |         |    |  |
| M2K                            | 0.000   | 0.000   | 0.000   | 0.000   | 0.000   | 0.000   | 0.000   | 0.002     | 0.002   | 0.002   | 0.002   | 0.002   | 0.002   | 0.002   | 0.002          |         |             |         |            |         |    |  |
| M2site                         | 1.001   | 1.000   | 1.001   | 0.999   | 1.001   | 1.000   | 1.003   | 1.000     | 1.000   | 1.000   | 1.000   | 0.999   | 0.999   | 1.000   | 1.000          |         |             |         |            |         |    |  |
| Sum-cat                        | 4.000   | 4.000   | 4.000   | 4.000   | 4.000   | 4.000   | 4.000   | 3.998     | 3.998   | 3.998   | 3.998   | 3.998   | 3.998   | 3.998   | 3.998          |         |             |         |            |         |    |  |
| Wo                             | 49.51   | 49.35   | 49.40   | 49.48   | 49.34   | 48.86   | 49.58   | 49.09     | 49.10   | 48.88   | 49.36   | 49.57   | 48.41   | 48.77   | 49.23          |         |             |         |            |         |    |  |
| En                             | 39.58   | 39.64   | 39.35   | 39.15   | 39.54   | 41.75   | 42.65   | 46.31     | 46.48   | 46.68   | 46.13   | 46.25   | 47.04   | 46.72   | 46.40          |         |             |         |            |         |    |  |
| Fs                             | 10.91   | 11.01   | 11.24   | 11.37   | 11.12   | 9.40    | 7.77    | 4.60      | 4.43    | 4.44    | 4.51    | 4.18    | 4.55    | 4.51    | 4.37           |         |             |         |            |         |    |  |

注：包体 - I 和包体 - II 分别为分水岭岩筒中的尖晶石二辉橄榄岩和方辉橄榄岩包体；括号内数字为样品数；样品号中，h—红崖山，w—王家坪，b—百草山。

( $\text{Ti} + \text{IVAl}$ )/Si值与幔源 Cr- 普通辉石相当(表 1), 代表了一种高压结晶环境(Wass, 1979)。由于此类辉石普遍具有较高的  $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{FeO}$  含量, 推测其中有少量锥辉石分子的存在。

(3) 含 Ti 富钙透辉石: 见于红崖山岩筒, 无色、浅褐色至褐色, 既可以是环带的外环和边缘, 也可以是正常的无核斑晶。此类辉石贫  $\text{SiO}_2$ , 富  $\text{CaO}$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Cr}_2\text{O}_3$  含量中等, 与基质高 Ti- 铝透辉石成分相当(表 1, 2)。其  $\text{VIAl}/\text{IVAl}$  和 ( $\text{Ti} + \text{IVAl}$ )/Si 值均落在低压火成岩单斜辉石区(图 3)。 $\text{Mg}^\#$  较低(82.4~85), 从斑晶的中心到边缘表现为  $\text{FeO}$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$  增高、 $\text{MgO}$  降低的正环带特征。这种辉石斑晶与基质相透辉石成分呈渐变趋势。

(4) Al- 透辉石: 仅见于百草山岩筒中, 半自形- 他形晶。以富  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{CaO}$ , 贫  $\text{FeO}$ 、 $\text{MgO}$  和  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Cr}_2\text{O}_3$  含量中等为特征。以核部成分统计,  $\text{Mg}^\#$  值为 91.26~91.96,  $\text{VIAl}/\text{IVAl}$  1.57~1.81, 显示高压辉石特征。从中心到边缘, 矿物成分变化不大(表 1)。

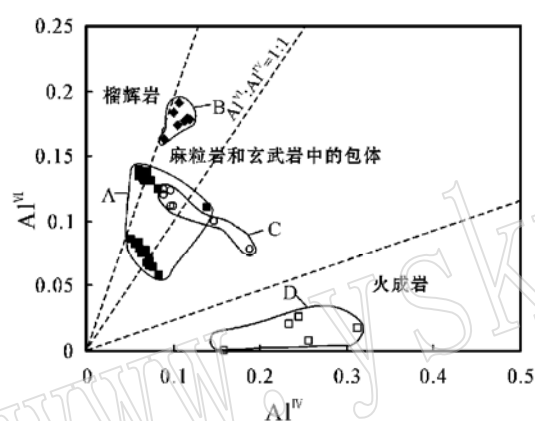


图 3 单斜辉石的  $\text{VIAl}$ - $\text{IVAl}$  图解(据 Aoki & Shiba, 1973)

Fig. 3  $\text{VIAl}$  vs.  $\text{IVAl}$  diagram of clinopyroxenes

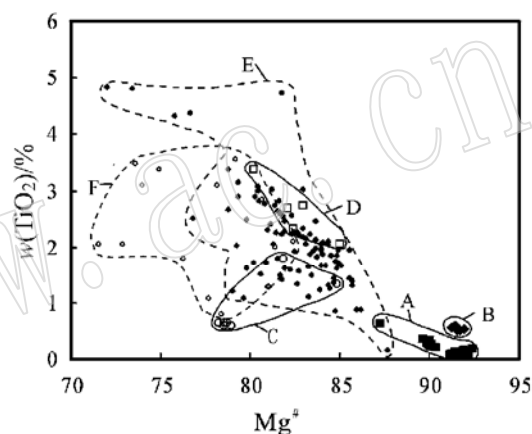


图 4 单斜辉石的  $\text{TiO}_2$ - $\text{Mg}^\#$  图解(Wass, 1979)

Fig. 4  $\text{TiO}_2$  vs.  $\text{Mg}^\#$  diagram of clinopyroxenes  
图 3、4 中 A、B、C、D 区代表 4 种斑晶相单斜辉石: Cr-普通辉石、Al-透辉石、绿色透辉石和含 Ti 富钙透辉石, 图例与图 2A 同; 图 4 中的 ●、○ 分别代表钾霞橄黄长岩系(E 区)和百草山岩筒(F 区)基质相透辉石

## 2.2 基质相单斜辉石

### 2.2.1 单斜辉石分类

为了解钾霞橄黄长岩系中单斜辉石的成分特征、结晶过程以及与主岩的内在联系, 对礼县地区 9 个火山岩岩筒基质中近 200 个单斜辉石颗粒进行了探针测试。结果表明, 所有岩筒基质相的单斜辉石都是透辉石或富钙透辉石; 各岩筒中透辉石颗粒的成分可以有较大的变化范围, 但岩筒之间透辉石的平均成分却非常接近(表 2)。根据透辉石单位分子式中阳离子 Al(以 6 个氧原子为基础)的含量, 每个岩筒的透辉石均可明显地分为高 Ti 铝透辉石( $\text{Al} > 0.1$ )和含 Ti 透辉石( $\text{Al} < 0.1$ )两种类型, 其中高 Ti 铝透辉石含量远高于含 Ti 透辉石。除 Al 外, 两种透辉石的成分差别还体现在  $\text{SiO}_2$  和  $\text{TiO}_2$  的含量上, 其中高 Ti 铝透辉石的  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  平均含量( $w_B/\%$ )分别为 48.37~49.22、1.91~2.85 和 3.78~5.25, 而含 Ti 透辉石的相应氧化物含量( $w_B/\%$ )分别为 51.86~53.7、0.6~1.77 和 0.65~1.30

表 2 西秦岭礼县地区钾霞黧黄长岩系中基质相代表性单斜辉石平均成分  
Table 2 Average compositions of representative groundmass clinopyroxenes from kamafugitic series in Lixian County, West Qinling

| Sample                         | BCS1(13) | BCS2(2) | FSL1(6) | FSL2(3) | FSLx1(1) | FSLx2(7) | HYS1(22) | HYS2(10) | WJP1(5) | WJP1(5) | WJP1(9) | YP1(17) | YP2(4) | SJB1(5) | SJB2(2) | GJS1(11) | w <sub>B</sub> /% |
|--------------------------------|----------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|---------|----------|-------------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 49.22    | 52.82   | 48.70   | 52.09   | 47.81    | 52.07    | 49.07    | 52.45    | 49.09   | 53.70   | 49.06   | 53.00   | 53.00  | 48.50   | 51.86   | 48.37    |                   |
| TiO <sub>2</sub>               | 2.40     | 1.30    | 2.63    | 1.77    | 2.46     | 1.71     | 2.46     | 1.62     | 1.91    | 0.60    | 2.32    | 1.20    | 1.20   | 2.85    | 1.61    | 2.52     |                   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3.78     | 1.01    | 4.20    | 1.26    | 5.24     | 1.29     | 3.89     | 0.93     | 5.25    | 1.08    | 4.39    | 0.65    | 0.65   | 4.26    | 1.30    | 4.66     |                   |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.21     | 0.08    | 0.12    | 0.08    | 0.63     | 0.27     | 0.18     | 0.08     | 0.34    | 0.23    | 0.08    | 0.25    | 0.25   | 0.38    | 0.17    |          |                   |
| FeO                            | 6.98     | 7.21    | 5.25    | 5.65    | 4.84     | 5.07     | 5.57     | 6.16     | 5.71    | 3.77    | 5.33    | 5.01    | 5.72   | 5.72    | 5.77    | 5.68     |                   |
| MnO                            | 0.09     | 0.09    | 0.08    | 0.08    | 0.08     | 0.08     | 0.08     | 0.09     | 0.08    | 0.08    | 0.08    | 0.08    | 0.09   | 0.08    | 0.08    | 0.08     |                   |
| MgO                            | 13.66    | 13.83   | 13.78   | 14.72   | 13.99    | 15.35    | 14.15    | 14.49    | 13.97   | 16.12   | 14.09   | 15.26   | 14.15  | 14.15   | 14.83   | 14.09    |                   |
| CaO                            | 22.92    | 22.71   | 24.06   | 24.82   | 24.83    | 25.08    | 24.48    | 24.35    | 22.86   | 24.09   | 24.66   | 24.90   | 24.68  | 24.68   | 24.83   | 24.09    |                   |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.66     | 1.24    | 0.25    | 0.21    | 0.16     | 0.22     | 0.21     | 0.31     | 0.61    | 0.31    | 0.22    | 0.21    | 0.21   | 0.22    | 0.21    | 0.25     |                   |
| K <sub>2</sub> O               | 0.15     | 0.14    | 0.14    | 0.00    | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00    | 0.00    | 0.00    | 0.04    | 0.04   | 0.00    | 0.00    | 0.00     |                   |
| Total                          | 100.07   | 100.43  | 99.21   | 100.68  | 100.04   | 100.94   | 100.09   | 100.48   | 99.56   | 100.09  | 100.38  | 100.44  | 100.71 | 100.87  | 99.91   | 99.91    |                   |
| Mg <sup>#</sup>                | 0.78     | 0.77    | 0.82    | 0.82    | 0.84     | 0.84     | 0.82     | 0.81     | 0.81    | 0.88    | 0.83    | 0.84    | 0.84   | 0.81    | 0.82    | 0.82     |                   |
| 阳离子数以 6 个氧原子为基础                |          |         |         |         |          |          |          |          |         |         |         |         |        |         |         |          |                   |
| TSi                            | 1.824    | 1.944   | 1.818   | 1.917   | 1.767    | 1.903    | 1.816    | 1.936    | 1.816   | 1.964   | 1.808   | 1.947   | 1.947  | 1.785   | 1.905   | 1.791    |                   |
| TAI                            | 0.165    | 0.044   | 0.182   | 0.055   | 0.228    | 0.056    | 0.170    | 0.040    | 0.184   | 0.036   | 0.191   | 0.028   | 0.028  | 0.185   | 0.056   | 0.203    |                   |
| TFe <sup>3+</sup>              | 0.011    | 0.012   | 0.000   | 0.026   | 0.005    | 0.041    | 0.015    | 0.017    | 0.000   | 0.000   | 0.001   | 0.025   | 0.025  | 0.030   | 0.039   | 0.005    |                   |
| Tsite                          | 2.000    | 2.000   | 2.000   | 1.998   | 2.000    | 2.000    | 2.001    | 1.993    | 2.000   | 2.000   | 2.000   | 2.000   | 2.000  | 2.000   | 2.000   | 1.999    |                   |
| M1Al                           | 0.000    | 0.000   | 0.002   | 0.000   | 0.000    | 0.000    | 0.000    | 0.000    | 0.045   | 0.011   | 0.000   | 0.000   | 0.000  | 0.000   | 0.000   | 0.000    |                   |
| M1Ti                           | 0.067    | 0.036   | 0.074   | 0.049   | 0.068    | 0.047    | 0.068    | 0.045    | 0.053   | 0.017   | 0.064   | 0.033   | 0.033  | 0.079   | 0.044   | 0.070    |                   |
| M1Fe <sup>3+</sup>             | 0.090    | 0.077   | 0.053   | 0.000   | 0.088    | 0.016    | 0.057    | 0.000    | 0.073   | 0.004   | 0.072   | 0.001   | 0.072  | 0.065   | 0.010   | 0.081    |                   |
| M1Fe <sup>2+</sup>             | 0.082    | 0.126   | 0.101   | 0.141   | 0.054    | 0.098    | 0.089    | 0.155    | 0.056   | 0.080   | 0.083   | 0.128   | 0.128  | 0.073   | 0.122   | 0.066    |                   |
| M1Cr                           | 0.006    | 0.002   | 0.004   | 0.002   | 0.018    | 0.002    | 0.005    | 0.002    | 0.002   | 0.010   | 0.007   | 0.002   | 0.002  | 0.007   | 0.011   | 0.005    |                   |
| M1Mg                           | 0.755    | 0.759   | 0.767   | 0.807   | 0.771    | 0.837    | 0.781    | 0.797    | 0.770   | 0.879   | 0.774   | 0.836   | 0.836  | 0.776   | 0.812   | 0.778    |                   |
| M1site                         | 1.000    | 1.000   | 1.001   | 0.999   | 0.999    | 1.000    | 1.000    | 0.999    | 0.999   | 1.001   | 1.000   | 1.000   | 1.000  | 1.000   | 0.999   | 1.000    |                   |
| M2Fe <sup>2+</sup>             | 0.033    | 0.007   | 0.010   | 0.006   | 0.003    | 0.000    | 0.012    | 0.018    | 0.048   | 0.031   | 0.008   | 0.000   | 0.000  | 0.009   | 0.006   | 0.024    |                   |
| M2Mn                           | 0.003    | 0.003   | 0.003   | 0.002   | 0.003    | 0.002    | 0.003    | 0.003    | 0.003   | 0.002   | 0.002   | 0.002   | 0.003  | 0.002   | 0.002   | 0.003    |                   |
| M2Ca                           | 0.910    | 0.895   | 0.962   | 0.979   | 0.983    | 0.982    | 0.971    | 0.963    | 0.906   | 0.944   | 0.974   | 0.980   | 0.974  | 0.980   | 0.973   | 0.956    |                   |
| M2Na                           | 0.047    | 0.088   | 0.018   | 0.015   | 0.011    | 0.016    | 0.015    | 0.022    | 0.044   | 0.022   | 0.016   | 0.016   | 0.015  | 0.016   | 0.015   | 0.018    |                   |
| M2K                            | 0.007    | 0.007   | 0.007   | 0.000   | 0.000    | 0.000    | 0.000    | 0.000    | 0.000   | 0.000   | 0.000   | 0.002   | 0.002  | 0.000   | 0.000   | 0.000    |                   |
| M2site                         | 1.000    | 1.000   | 1.000   | 1.002   | 1.000    | 1.000    | 1.001    | 1.006    | 1.001   | 0.999   | 1.000   | 1.000   | 1.000  | 1.000   | 1.000   | 1.001    |                   |
| Sum-cat                        | 3.993    | 3.993   | 3.993   | 4.000   | 4.000    | 4.000    | 4.000    | 4.000    | 4.000   | 4.000   | 4.000   | 4.000   | 3.998  | 4.000   | 4.000   | 4.000    |                   |
| W <sub>0</sub>                 | 48.308   | 47.658  | 50.765  | 49.865  | 51.582   | 49.704   | 50.392   | 49.301   | 48.827  | 48.642  | 50.858  | 49.686  | 50.474 | 49.629  | 49.988  | 49.988   |                   |
| En                             | 40.059   | 40.382  | 40.455  | 41.148  | 40.438   | 42.328   | 40.528   | 40.820   | 41.518  | 45.289  | 40.432  | 42.368  | 40.265 | 41.243  | 40.681  | 40.681   |                   |
| Fs                             | 11.633   | 11.959  | 8.780   | 8.987   | 7.980    | 7.968    | 9.080    | 9.879    | 9.655   | 6.069   | 8.710   | 7.945   | 9.260  | 9.128   | 9.331   | 9.331    |                   |

BCS—百草山; FSL—分水岭; FSLx—下水岭; HYS—红崖山; WJP—王家坪; YP—硬坪; SJB—水晶坝; GJS—莒家山; 每个火山岩筒 1、2 类型分别代表高 Ti 铝透辉石和含 Ti 透辉石, 如 BCS1、BCS2 等; 括号内数字为样品数; 所有探针测试由李建平在澳大利亚堪培拉国立大学地质科学研究所电子探针实验室完成。



(表2)。与其他岩筒的透辉石相比,百草山岩筒的透辉石相对富 FeO<sub>t</sub>、Na<sub>2</sub>O、SiO<sub>2</sub> 而贫 MgO、CaO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,与百草山岩筒全岩成分富 FeO<sub>t</sub>、Na<sub>2</sub>O、SiO<sub>2</sub> 贫 MgO、CaO 的特征吻合。

### 2.2.2 单斜辉石的阳离子占位特征

图5展示了火山岩系中透辉石的阳离子之间的相关性。除王家坪岩筒的透辉石外(Al在四面体和八面体中均有占位),其他岩筒透辉石的<sup>IV</sup>Al和Si都不足以充填四面体位子,需要有Fe<sup>3+</sup>的补充占位。其中Ti和<sup>IV</sup>Al呈明显的正相关(图5a),而与Mg呈明显的负相关(图5b),暗示钾霞橄黄长岩系熔体中透辉石[Ca(Mg,Fe)Si<sub>2</sub>O<sub>6</sub>]的结晶过程存在着CaTiAl<sub>2</sub>O<sub>6</sub>(钛辉石)分子的替代,替代的方程可简单地表示为:



图5a中的相关趋势线代表了理想的Ti-<sup>IV</sup>Al成对组合替代,图中数据点均分布在<sup>IV</sup>Al一侧,表明Al优于Ti进入四面体位子替代组合阳离子。百草山岩筒透辉石的Ti和<sup>IV</sup>Al呈明

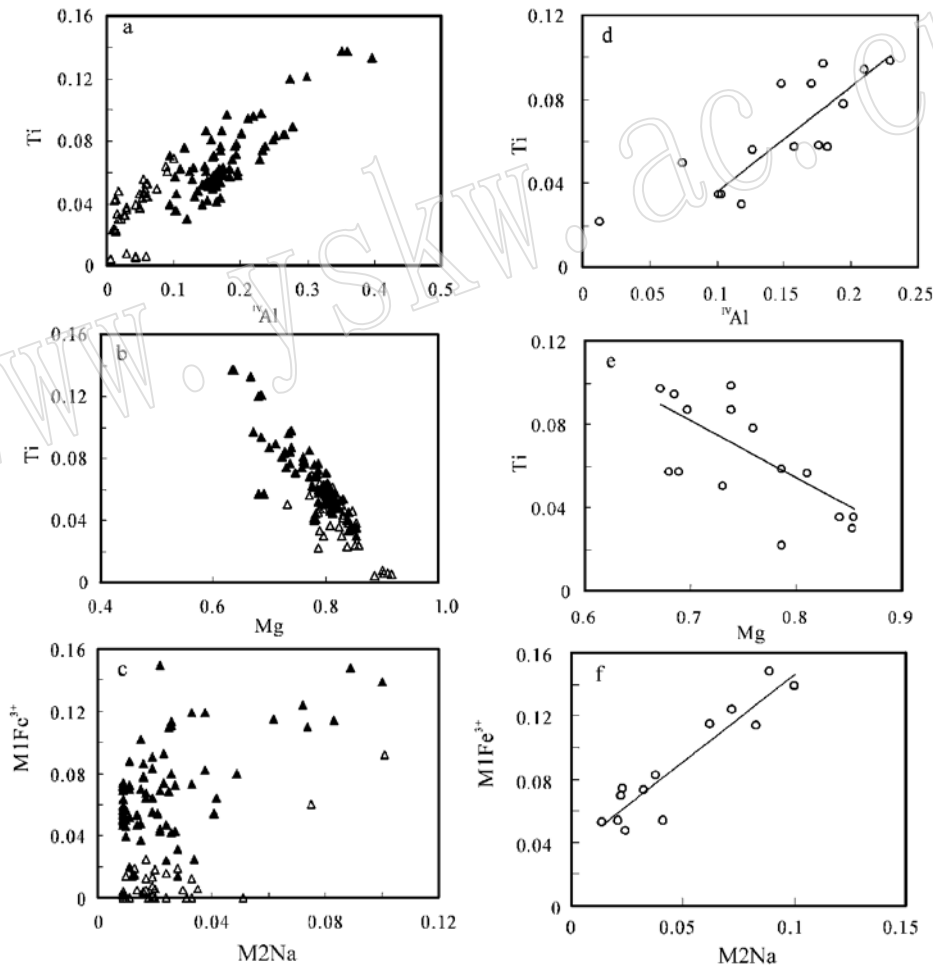


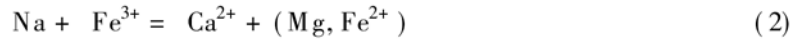
图5 礼县钾霞橄黄长岩系及百草山岩筒基质透辉石 Ti- Mg、Ti- <sup>IV</sup>Al、M1Fe<sup>3+</sup> - M2Na 图解

Fig. 5 Ti vs. Mg, Ti vs. <sup>IV</sup>Al and M1Fe<sup>3+</sup> vs. M2Na diagrams for the groundmass diopsides

from kamafugitic series and Baicaooshan volcanic pipe in Lixian County

▲—基质相高 Ti 铝透辉石; △—基质相含 Ti 透辉石; ○—百草山岩筒的铝透辉石

显的正相关(图 5d), 与 Mg 呈明显的负相关(图 5e), 此外 Na 与  $M1Fe^{3+}$  显示了明显的相关性(图 5f), 这与其他岩筒明显不同(图 5c)。因此可以推断百草山岩筒的岩浆结晶过程中除了有  $CaTiAl_2O_6$  分子替代透辉石  $Ca(Mg, Fe)Si_2O_6$  分子外, 还存在着  $NaFe^{3+}Si_2O_6$ (锥辉石)分子对  $Ca(Mg, Fe)Si_2O_6$  的替代, 替代方程如下:



也就是说, 百草山岩筒岩浆结晶过程有  $CaTiAl_2O_6$  分子和  $NaFe^{3+}Si_2O_6$  分子对透辉石  $Ca(Mg, Fe)Si_2O_6$  分子的复合替代。在镜下也观察到褐色尖锥形锥辉石在基质中存在。

### 2.2.3 与世界上典型地区钾霞橄黄长岩系基质相单斜辉石成分对比

东非裂谷西南乌干达的 Toro-Ankole、意大利的 San Venanzo/Cupaello、巴西的 Santo Antonio da Barra 和 Mata da Corda 是世界上最典型的钾霞橄黄长岩系发育区(Stoppa *et al.*, 1998)。意大利的 San Venanzo/Cupaello 钾霞橄黄长岩系的单斜辉石均为透辉石, San Venanzo 透辉石中四面体位点仅有少量  $IVAl$  (0.1~0.05) 充填, 而 Cupaello 透辉石四面体位点完全为 Si 占据, 是纯粹意义上的透辉石(Cundari *et al.*, 1991)。Mata da Corda 透辉石的成分特征与 San Venanzo 透辉石相似, 四面体中均有少量  $IVAl$  (0.06~0.01) 充填, 不同的是 Si 和  $IVAl$  通常还不足以充填四面体位点, 还需要有少量的  $Fe^{3+}$  (0.00~0.05) 充填(Sgarbi *et al.*, 2000)。Santo Antonio da Barra 透辉石的成分与前者相比, 相对富 Al 和 Ti,  $IVAl$  含量达 0.03~0.32, 同样有些透辉石四面体需要 0.00~0.05 的  $Fe^{3+}$  充填(Sgarbi *et al.*, 2000)。与上述典型地区相比, 礼县地区的透辉石成分变化大, 既有 Al、Ti 含量相对低的含 Ti 透辉石, 也有 Al、Ti 富集的高 Ti 铝透辉石, 总的成分变化范围与东非裂谷西南乌干达和 Santo Antonio da Barra 的钾霞橄黄长岩系单斜辉石成分接近(表 2、图 6), 尤其是后者也同样是 Ti 铝透辉石和含 Ti 透辉石两种单斜辉石相共存。Mata da Corda 地区的单斜辉石, 连同 San Venanzo/Cupaello 的透辉石以其较低含量的  $Al_2O_3$  和高  $SiO_2$  与礼县地区的含 Ti 透辉石相似(图 6)。

## 3 讨 论

就单斜辉石斑晶而言, 在图 4 和表 1 中, Cr-普通辉石成分点分别趋向于高  $Mg^{\#}$  和 Si, 独立于寄主岩单斜辉石成分, 同时与实验测定的幔源尖晶石二辉橄榄岩稳定区吻合(O'Hara *et al.*, 1971)。Cr-普通辉石呈他型, 且常见其与橄榄石、尖晶石、钛铁矿和斜方辉石平衡共生, 加之其成分与尖晶石二辉橄榄岩、方辉橄榄岩中的 Cr-普通辉石极其相似, 所以是源区上地幔包体碎块被主岩捕获后经改造的捕虏晶无疑。

绿色透辉石巨晶和 Al 透辉石斑晶的化学成分与高压条件下近液相线结晶实验获得的单斜辉石相似(Green *et al.*, 1970; Irving, 1974), 矿物结构显示火成岩结晶特征。Bultitude 和 Green(1971)以橄榄霞石岩(与本区的钾霞橄黄长岩系成分接近)作为实验初始物质的单斜辉石高压实验结果证明, 高压下(2.0~2.5 GPa)从橄榄霞石岩熔体晶出的液相线或近液相线的单斜辉石是富铝的[ $w(Al_2O_3) > 10\%$ ], 而且全  $Al_2O_3$  含量和  $IVAl$  随压力的增加而增加。该研究指出, 橄榄霞石岩熔体在 2.0~2.5 GPa 下(橄榄霞石岩熔体产生的合适深度)所形成的单斜辉石的  $VIAl/IVAl$  值在 1.0~1.5 之间(Simonetti *et al.*, 1996)。对比之下, 王家坪岩筒中的绿色透辉石巨晶和百草山岩筒中 Al 透辉石的  $VIAl/IVAl$  值分别为 0.41~1.39 和

1.48~ 1.81, 代表或接近上地幔的压力条件, 但其中的  $Al_2O_3$  含量低于或接近于 10%。绿色透辉石巨晶富铁属性以及复杂的环带特征, 使其与世界其他地区的绿色单斜辉石巨晶具有一定的可比性, 代表了一种高压结晶环境。绿色透辉石巨晶本身以颗粒巨大的单晶(常见 4~ 5 mm)存在, 其成分与王家坪主岩透辉石差别不大, 反映在  $Mg^{\#}$  上寄主岩与斑晶呈互补关系, 因此有理由推测这种绿色透辉石巨晶可能代表寄主岩熔体在上地幔条件下的早期结晶相。王家坪岩筒中寄主岩低压相(基质)单斜辉石较高的  $Mg^{\#}$  (81~ 88) 可能源于低  $Mg^{\#}$  (78.22~ 84.83) 的绿色透辉石的早期大量晶出, 此外大量钛磁铁矿在低压环境下相对早结晶以及尖晶石钛磁铁矿高压下结晶也能导致熔体中  $Mg$  的增加。与 Bultitude and Green(1971) 的实验相比, 王家坪岩筒绿色透辉石巨晶的相对低  $Al_2O_3$  可能与该岩筒原始熔体成分有关。而百草山岩筒中的  $Al$  透辉石斑晶情况比较特殊, 在成分上有别于上述两种单斜辉石斑晶, 与寄主岩透辉石成分差别较大, 常见其与橄榄石、尖晶石、钛铁矿共生, 推测这种斑晶可能代表地幔早期不同期次熔体的结晶相, 后被新生成的熔体捕获携带上来(Wass, 1979), 该类型的斑晶还有待于进一步研究。

含 Ti 富钙透辉石斑晶的成分与基质高 Ti 铝透辉石成分相当(表 1, 2)以及  $^{VI}Al/^{IV}Al$ (图 3)和  $(Ti + ^{IV}Al)/Si$ (图略)值均落在低压火成岩单斜辉石区表明, 其与寄主岩均结晶于地表或近地表的低压环境。斑晶中正环带的发育以及斑晶核部与环带在光性上的一致进一步证实其与寄主岩是同源岩浆结晶的产物。

就基质相单斜辉石而言, 由于两种透辉石(含 Ti 透辉石和高 Ti 铝透辉石)共存于同一岩筒(甚至同一薄片), 反映了岩浆结晶过程中熔体成分对透辉石的影响。在透辉石的  $SiO_2 - TiO_2$  和  $SiO_2 - Al_2O_3$  图解(图 7)中, 两种透辉石明显分成两组, 但演化趋势完全一致, 即  $TiO_2 - Al_2O_3$  都与  $SiO_2$  负相关并呈逐渐过渡态势, 表明它们为同一批次岩浆熔体的产物,  $TiO_2 - Al_2O_3$  与  $SiO_2$  的互为反消长关系暗示着岩浆熔体演化过程中结晶透辉石阳离子的替代趋势。同源岩浆演化过程中越是接近晚期熔体的氧化态( $f_{O_2}$ ) 越高, 温度降低, 反映在结晶的矿物相中  $Fe^{3+}$  含量有增高趋势; 而 Ti 作为不相容元素, 其自身习性趋向于滞留在熔体中, 而且越是晚期的低温条件下 Ti(与共存的磁铁矿相比) 优先分配进入透辉石, 使得其中的 Ti 含量越高(Cundari *et al.*, 1989)。两种基质相透辉石中的  $Fe^{3+}$  和 Ti 的明显正相关性

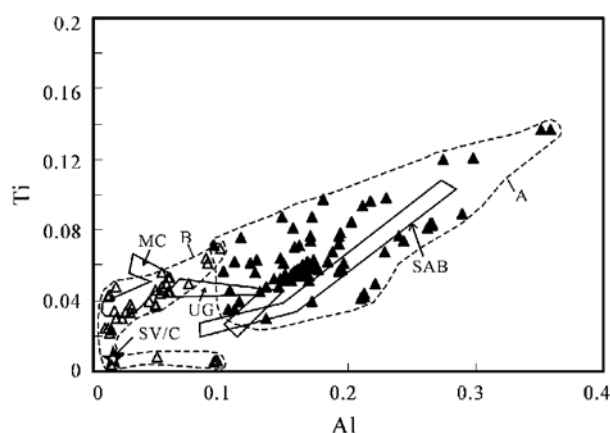


图 6 世界典型地区钾霞橄黄长岩系中单斜辉石成分的 Ti-Al 图解(据 Sgarbi *et al.*, 2000)

Fig. 6 Ti vs. Al diagram for Kamafugitic clinopyroxenes from typical areas of the world

SAB—Santo Antonio da Barra(巴西); MC—Mata da Corda(巴西); UG—Uganda; SV/C—San Venanzo—Cupaello; 虚线标定的 A(▲)和 B(△)区—礼县钾霞橄黄长岩系基质相高 Ti 铝透辉石和含 Ti 透辉石

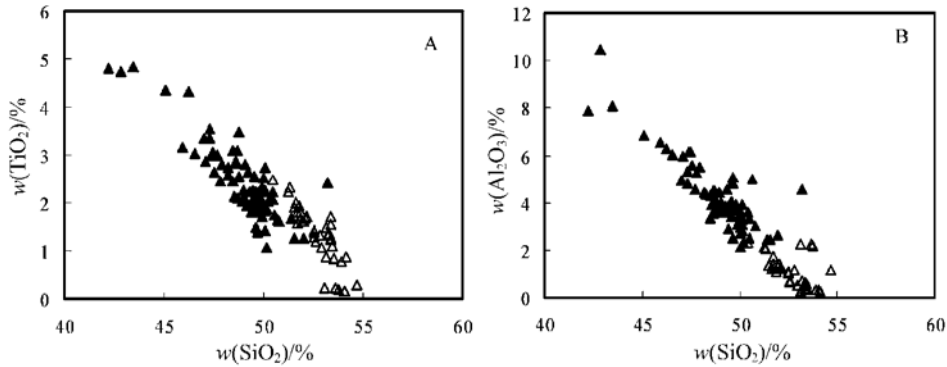


图 7 礼县地区钾霞橄黄长岩系基质透辉石的  $\text{SiO}_2$ - $\text{TiO}_2$  和  $\text{SiO}_2$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  图解

Fig. 7  $\text{SiO}_2$  vs.  $\text{TiO}_2$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  diagrams for the groundmass diopsides from kamafugitic series in Lixian County

▲ 一基质相高 Ti 铝透辉石; △ 一基质相含 Ti 透辉石

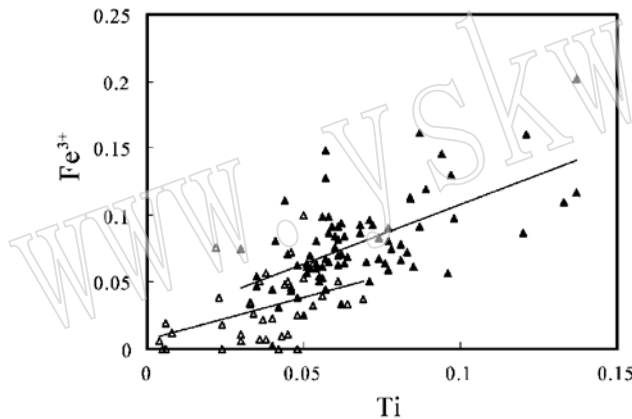


图 8 礼县地区钾霞橄黄长岩系基质透辉石的  $\text{Fe}^{3+}$  - Ti 相关图解

Fig. 8  $\text{Fe}^{3+}$  vs. Ti diagram for the groundmass diopsides from kamafugitic series in Lixian County

▲ 一基质相高 Ti 铝透辉石; △ 一基质相含 Ti 透辉石

证实了这一点(图 8), 高 Ti 铝透辉石的  $\text{Fe}^{3+}$  和 Ti 同步高于低 Ti 透辉石。此外, 高 Ti 铝透辉石在数量上远超过低 Ti 透辉石以及在结构上高 Ti 铝透辉石多以细粒充填状存在, 也表明其结晶晚于低 Ti 透辉石。因而, 图 6 所展示的两种透辉石的 Ti 和 Al 的正相关性意味着熔体演化的晚期 Al 含量同步增加。两种透辉石的成分特征、阳离子在矿物晶格中的占位特征及其从熔体中的结晶顺序决定了相对早期的原始熔体中富 Si、Mg, 而晚期的熔体随着上述组分的消耗  $\text{VI Ti}$  和  $\text{IV Al}$  组合替代 M1 位子的  $\text{VI Mg}$  和四面体位子的  $\text{IV Si}$ , 并且在大多数情况下(王家坪岩筒除外) 要求由电荷平衡计算出的  $\text{Fe}^{3+}$  来补足由 Si、Al 在四面体填充

后( $\text{Si} + \text{IV Al} < 2$ ) 的空缺, 因而使得晚期熔体向着富 Ti、Al, 贫 Si、Mg 的趋势演化, Ca 和 Fe 因不参与上述替代关系所以变化不大。

与其他岩筒透辉石相比, 百草山岩筒全岩相对富  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{Na}_2\text{O}$ , 贫  $\text{MgO}$ 、 $\text{CaO}$ , 表明它是一种演化岩浆的产物, 其基质相透辉石主要是高 Ti 铝透辉石(少量低 Ti 透辉石), 但同样存在着  $\text{VI Ti}$  和  $\text{IV Al}$  组合替代 M1 位子的  $\text{VI Mg}$  和四面体位子的  $\text{IV Si}$  的关系。此外, 透辉石的  $\text{M2Na}$  与  $\text{M1Fe}^{3+}$  呈明显的正相关(比值近 1:1), 暗示  $\text{NaFe}^{3+}\text{Si}_2\text{O}_6$  端员分子对  $\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Fe})\text{Si}_2\text{O}_6$  的替代, 表明百草山岩筒的晚期熔体向富 Ti、Al、 $\text{Fe}^{3+}$  和 Na 的趋势演化。

本区钾霞橄黄长岩系中单斜辉石斑晶类型复杂,数量多且具多源性,再加之基质透辉石的高  $Mg^{\#}$  (77~88),暗示该岩系的原始熔体源于上地幔低度部分熔融,且未经长时间演化就快速上升喷发于地表,期间裹挟了大量的上地幔包体碎块和捕虏晶。

## 4 结 论

(1) 本区钾霞橄黄长岩系中的单斜辉石斑晶类型复杂,成分变化范围大,具有多源属性。Cr-普通辉石捕虏晶源于上地幔尖晶石二辉橄榄岩崩解的碎块;绿色透辉石巨晶是在上地幔条件下熔体的早期结晶相;Al透辉石可能结晶于上地幔不同期次的早期熔体;含Ti富钙透辉石斑晶是与寄主岩同源近地表条件的结晶相。

(2) 根据基质中单斜辉石Al的含量,岩系基质中的透辉石可以分成高Ti铝透辉石和含Ti透辉石两种基本类型,它们是同源岩浆演化结晶的产物,在结晶顺序上前者晚于后者。

(3) 两种透辉石的成分特征、阳离子在矿物晶格中的占位特征及其从熔体中的结晶顺序表明,本区钾霞橄黄长岩系中透辉石结晶过程中广泛存在着  $CaTiAl_2O_6$  分子替代,随着含Ti透辉石从原始岩浆中结晶,晚期熔体贫Si、Mg,富Ti和Al。与其他岩筒相比,百草山岩筒的原始熔体经历了一定的演化过程,有向富Ti、Al、Fe、Na,贫Si、Mg演化趋势,在透辉石成分上表现为  $CaTiAl_2O_6$  和  $NaFe^{3+}Si_2O_6$  端员分子对  $Ca(Mg, Fe)Si_2O_6$  的替代。

(4) 与世界典型地区的钾霞橄黄长岩系的透辉石成分具有不同程度的可比性,反映了透辉石从中结晶的熔体成分(尤其是  $SiO_2$ 、 $Al_2O_3$ 、 $TiO_2$ )在一定程度上控制着单斜辉石的矿物成分、晶格特征和结晶过程。

## References

- Aoki K and Shiba I. 1973. Pyroxenes from lherzolite inclusions of Itinomegata, Japan [J]. *Lithos*, 6: 41~51.
- Bailey D K. 1990. Mantle carbonatite eruptions: crustal context and implications[J]. *Lithos*, 26: 37~2.
- Bultitude R J and Green D H. 1971. Experimental study of crustal-liquid relationships at high pressures in olivine nephelinite and basanite compositions[J]. *Journal of Petrology*, 12: 121~147.
- Cellai D, Conticelli S, and Menchetti S. 1994. Crystal chemistry of clinopyroxenes from potassic and ultrapotassic rocks in central Italy: implications on their genesis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 116: 301~315.
- Cundari A and Ferguson A K. 1991. Petrogenetic relationships between melilitite and lamproite [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 107: 343~357.
- Cundari A and Salviulo G. Ti solubility in diopsidic pyroxene from a suite of New South Wales leucites (Australia)[J]. *Lithos*, 1989, 22: 191~198.
- Dalton J A and Wood B J. 1993. The compositions of primary carbonate melts and their evolution through wallrock reaction in the mantle[J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 119: 511~525.
- Edgar A D, Condliffe E, and Barnett R L, *et al.* 1980. An experimental study of an olivine ugandite magma and mechanisms for the formation of its K-enriched derivatives[J]. *J. Petrol.*, 21: 475~497.
- Edgar A D, and Vukadinovic D. 1992. Implications of experimental petrology to the evolution of ultrapotassic rocks[J]. *Lithos*, 28: 205~220.
- Elizabeth A N N, Dunworth and Wilson M. 1998. Olivine melilitites of the SW German Tertiary volcanic province: mineralogy and petrogenesis[J]. *J. Petrol.*, 39: 1805~1836.
- Foley S F. 1992. Petrological characteristics of the source components of potassic magmas: Geochemical and experimental

- constraints[J]. *Lithos*, 28: 178~ 204.
- Foley S F, Taylor W R and Green D H. 1986. The role fluorine and oxygen fugacity in the petrogenesis of ultrapotassic rocks [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 94: 183~ 192.
- Foley S F, Venturelli G, and Green D H, *et al.* 1987. The ultrapotassic rocks: characteristics, classification, and constraints for petrogenetic models[J]. *Earth- Science Reviews*, 24: 81~ 134.
- Green D H and Hibberson W. 1970. Experimental duplication of conditions of precipitation of high pressure phenocrysts in a basaltic magma[J]. *Phys. Earth Planet. Interiors.*, 3: 24~ 254.
- Irving A J. 1974. Megacryst from the Newer Basalts and other basaltic rocks of southeastern Australia[J]. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 85: 1503~ 1514.
- Li Chunyu. 1978. Tectonic history of Qinling and Qilian mountains[J]. *Geology of Northwestern China*, (4): 1~ 8 (in Chinese).
- Li Hongwen. 1988. Dynamic model for tectonic movement of western Qinling area[J]. *Geology of Northwest China*, (1): 20~ 25 (in Chinese).
- Lloyd F E, Arima M and Edgar A D. 1985. Partial melting of a phlogopite clinopyroxenes from South- West Uganda: an experimental study bearing on the origin of highly potassic continental rift volcanics[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 91: 321~ 329.
- Morimoto N. 1988. Nomenclature of pyroxenes[J]. *Mineralogical Magazine*, 52: 535~ 550.
- O'Hara M J, Richardson S W and Wilson G. 1971. Garnet peridotite stability and occurrence in crust and mantle[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 32: 48~ 68.
- Sgarbi P B A, Gaspar J C and Valença J G. 2000. Clinopyroxene from Brazilian Kamafugites[J]. *Lithos*, 53: 101~ 116.
- Stoppa F, Cundari A. 1998. Origin and multiple crystallization of the Kamafugite- carbonatite association: the San Venanzo- Pian di Celle occurrence (Umbria, Italy)[J]. *Mineralogical Magazine*, 62 (2): 273~ 289.
- Simonetti A, Shore M, and Bell K. 1996. Diopside phenocrysts from nephelinite lavas, Napak volcano, eastern Uganda: evidence for magma mixing[J]. *The Canadian Mineralogist*, 34: 411~ 421.
- Wass S Y. 1979. Multiple origins of clinopyroxenes in alkali basaltic rocks[J]. *Lithos*, 12: 115~ 132.
- Woolley A R, Bergman S C, and Edgar A D, *et al.* 1996. Classification of lamprophyres, lamproites, kimberlites, and the kalsilitic, melilitic, and leucitic rocks[J]. *The Canadian Mineralogist*, 34: 175~ 186.
- Yu Xuehui. 1994. Titanphlogopites from the Cenozoic alkaline volcanic rock in western Qinling, Gansu province[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 13(4): 319~ 327 (in Chinese with English abstract).
- Yu Xuehui, Mo Xuanxue, and Flower M, *et al.* 2001. Cenozoic kamafugite volcanism and tectonic meaning in west Qinling area, Gansu province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17(3): 366~ 377 (in Chinese with English abstract).
- Yu Xuehui and Zhang Chunfu. 1998. Sr, Nd isotope and trace elements geochemical features of the Cenozoic volcanic rocks from west Qinling, Gansu province[J]. *Earth Science Frontiers*, 5(4): 319~ 327 (in Chinese with English abstract).

### 附中文参考文献

- 李春昱. 1978. 秦岭及祁连山构造发展史[J]. *西北地质*, (4): 1~ 8.
- 李鸿文. 1988. 西秦岭构造运动的动力学模型[J]. *西北地质*, (1): 20~ 25.
- 喻学惠. 1994. 甘肃西秦岭区新生代碱性火山岩中的钛金云母[J]. *岩石矿物学杂志*, 13(4): 319~ 327.
- 喻学惠, 莫宣学, Flower M 等. 2001. 甘肃西秦岭新生代钾霞橄黄长岩火山作用及其构造含义[J]. *岩石学报*, 17(3): 366~ 377.
- 喻学惠, 张春福. 1998. 甘肃西秦岭新生代碱性火山岩的 Sr, Nd, 同位素及微量元素地球化学特征[J]. *地学前缘*, 5(4): 319~ 327.