

# 青藏高原北羌塘新生代高钾钙碱岩系火山岩角闪石类型及微量元素地球化学\*

赖绍聪<sup>1</sup> 伊海生<sup>2</sup> 刘池阳<sup>1</sup> Suzanne Y O'REILLY<sup>3</sup>

LAI ShaoCong<sup>1</sup>, YI HaiSheng<sup>2</sup>, LIU ChiYang<sup>1</sup> and Suzanne Y O'REILLY<sup>3</sup>

1. 西北大学大陆动力学教育部重点实验室, 西北大学地质学系, 西安 710069

2. 成都理工学院, 成都 610059

3. Macquarie 大学 GEMOC 国家重点实验室, 悉尼 2109, 澳大利亚

1. The Key Laboratory of Continental Dynamics, Ministry of Education, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China

2. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

3. National Key Centre of GEMOC, Macquarie University, Sydney 2109, Australia

2001-04-28 收稿, 2001-07-20 改回.

Lai SC, Yi HS, Liu CY and O'Reilly S Y. 2002. Trace element geochemistry and classification of amphiboles of the Cenozoic high-potassium calc-alkaline volcanic rock series from north Qiangtang, Qinghai-Tibetan plateau. *Acta Petrologica Sinica*, 18(1):17-24

**Abstract** Based on the electron microprobe and laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometer (LA-ICP-MS) analyses, the major and trace element features of amphibole from the Cenozoic high-potassium calc-alkaline dacite of north Qiangtang are discussed in this paper. The result indicates that all of the amphiboles belong to calcic series. Their major elements imply that the dacite should be of crustal origin. And the amphiboles show the Sc, Ti, V, Cr, Co, Ni enrichment and the Th, U, Pb, Rb depletion. Especially, the amphiboles exhibit high content in rare earth element but no remarkable Eu depletion. It may imply that the Cenozoic high-potassium calc-alkaline volcanic rocks from north Qiangtang might be originated from the thickened eclogitic deep crust of Tibetan plateau by dehydration partial melting.

**Key words** Amphibole, Major and trace element, Geochemistry, North Qiangtang, Qinghai-Tibetan plateau

**摘要** 利用电子探针和激光探针剥蚀系统(LA-ICP-MS)对北羌塘新第三纪高钾钙碱岩系英安岩中角闪石的主元素和微量、稀土元素进行了分析。结果表明,本区角闪石均属钙质角闪石亚类,主元素特征指示该套火山岩为陆壳局部熔融岩浆系列。角闪石强烈富集Sc、Ti、V、Cr、Co、Ni等弱不相容亲铁元素,而相对亏损Th、U、Pb、Rb等强不相容的大离子亲石元素。稀土元素丰度高,且无Eu异常,指示北羌塘这套高钾钙碱岩系火山岩可能是青藏高原加厚的相当于榴辉岩相物质组成的下部陆壳脱水熔融的产物。

**关键词** 角闪石; 主元素及微量元素; 地球化学; 新生代火山岩; 北羌塘

**中图法分类号** P591.1; P588.142; P595; P534.6

## 1 引言

青藏高原新生代火山岩中专题性和深入的矿物学工作非常薄弱(邓万明, 1998; 赖绍聪, 1999a, 1999b),特别是造岩矿物痕量元素和稀土元素的精确分析资料以及对造岩矿物

痕量及稀土元素富集规律、演化趋势和特征的专题研究还几乎是空白。本文利用电子探针和激光探针剥蚀系统(LA-ICP-MS)对北羌塘新第三纪高钾钙碱岩系英安岩中的角闪石进行了主元素和痕量、稀土元素的系统分析测定,并从中获得了一些有价值的地质地球化学信息。

\* 国家自然科学基金(批准号:40072029)、国土资源部146C002001(乌兰乌拉湖)1:25万区域地质调查项目(批准号:2001300009281)及澳大利亚GEMOC国家重点实验室资助。

第一作者简介: 赖绍聪,男,1963年生,博士后,教授,岩石学及地球化学专业。

## 2 区域地质背景

羌塘北部新第三纪火山岩较为发育,主要见于羌北地层分区的新第三纪石坪顶组。这些火山岩产状为熔岩被,不整合覆盖在新第三纪喷纳湖组(N1S)或侏罗纪雁石坪组(J2YS)之上。近年来,国内外学者已就青藏高原新生代火山岩作了大量研究(邓万明,1989,1991,1993;刘嘉麒,1999;邓万明等,1998,1999;赖绍聪等,1996;杨德明等,1999;Turner et al., 1996; Miller et al., 1999; Arnaud et al., 1992; Ugo Pognente, 1990),识别出超钾质、钾玄岩系和高钾钙碱岩系三个火山岩系列,并对超钾质和钾玄岩系的岩石地球化学、同位素特征和岩石成因进行了深入探讨。然而,对高原北部尤其是北羌塘具有特殊意义的高钾钙碱岩系火山岩的专题研究却较为滞后(邓万明,1998;王碧香等,1999;迟效国等,1999)。本区钙碱系列火山岩为一套安山岩-英安岩-流纹岩组合,主要出露于石水河-浩波湖-多格错仁以北地区。

## 3 样品及分析方法

样品取自北羌塘浩波湖、骆驼峰、合作湖一带。岩石呈肉红色、灰褐色,十分新鲜,斑状结构,块状构造。斑晶约占全岩的30%~35%。主要斑晶矿物为斜长石(无色、浅灰色,玻璃光泽,粒度2mm~5mm,镜下聚片双晶发育,环带结构清晰);碱性长石(无色透明,具卡氏双晶,部分颗粒具环带结构,粒度2mm~5mm);石英(无色透明,一轴晶);角闪石(黄绿色-棕红色,多色性强,横断面见典型的闪石式解理,柱面斜消光,消光角大多<15度);黑云母(棕色-深棕色,极强多色性,一组极完全解理)。岩石基质具玻质结构,由棕红色火山玻璃和少量雏晶组成,正交光下仅具微弱的光性反应。

将岩石磨制成标准激光探针片(厚约100μm),镜下观察,拍摄1:8薄片表面结构及斑晶矿物分布图像,选定待测斑晶矿物颗粒;数码显微镜录入待测点坐标,激光探针分析(使用PE公司Elan6100-LA-ICP-MS仪器),电子探针对应点分析(使用法国SX50型仪器);利用电子探针获得的矿物主元素含量值对相应点激光探针分析结果进行校正,最终获得被测矿物常量及微量、稀土元素分析结果。全部实验工作均在Macquarie大学GEMOC国家重点实验室完成。

## 4 结果与讨论

### 4.1 主元素特征及角闪石类型划分

角闪石类造岩矿物的化学成分相当复杂,其标准的晶体化学式可表示为: $A_{0-1}B_2C_5^{VI}T_8^{IV}O_{22}(OH)_2$ 。其中A位主要是K、Na,其次是部分Ca的占位;B位是八面体配位的阳离子,本文中主要是Mg、Ca和部分Na;C位也是八面体配位

的阳离子,包括 $Al^{VI}$ 、Ti、Cr、Fe、Mn和Mg等;T位置是Si和 $Al^{IV}$ 以及部分Ti占位的八个四面体配位的阳离子,本文中角闪石T位仅有Si和 $Al^{IV}$ ,未出现Ti。我们按23个氧为基础对角闪石的晶体化学式进行了统一的计算和处理,并按T→C→B→A的顺序先后依次填充。本区高钾钙碱岩系英安岩中角闪石主元素电子探针分析结果及晶体化学计算结果列于表1中,从表中可以看到:

角闪石主要氧化物含量方面十分稳定,变化不大。矿物晶体化学特征主要表现为: $(Ca + Na)_B \geq 1.34$ ,  $Na_B < 0.67$ ,  $Ti < 0.50$ ,  $(Na + K)_A \geq 0.50$ ,  $Fe > Al^{VI}$ , Si较高,均大于6.25。全部角闪石的 $Mg/(Mg + Fe)$ (表1中标注为 $Mg^{\#}$ )在0.53~0.79之间变化,且以大于0.70为主。

根据国际矿物协会和矿物名称委员会的角闪石分类方案(Leake, 1978; Rock and Leake, 1984),本区角闪石均属于钙质角闪石亚类(图1),并可按Si和 $Mg/(Mg + Fe)$ 值的不同细分为三个不同种属:①  $6.25 \leq Si < 6.50$ ,  $Mg/(Mg + Fe) \geq 0.30$ , 为含镁绿钙闪石质角闪石(Magnesian-Hastingsitic Hornblende); ②  $6.50 \leq Si < 6.75$ ,  $Mg/(Mg + Fe) \geq 0.50$ , 为浅闪石质角闪石(Hastingsitic Hornblende); ③  $6.75 \leq Si < 7.25$ ,  $Mg/(Mg + Fe) \geq 0.50$ , 为浅闪石(Edenite)。根据 $Al^{IV} - (K + Na)_A$ 的投影关系(Deer et al., 1963),所有分析点同样都属于钙质角闪石类,投影点位于普通角闪石和浅闪石之间(图2)。

其中,浩波湖英安岩中的角闪石 $Al^{IV}$ 和 $(Na + K)_A$ 相对较低,由浩波湖角闪石→合作湖角闪石→骆驼峰角闪石, $Al^{IV}$ 和 $(Na + K)_A$ ,尤其是 $(Na + K)_A$ 有逐渐升高的趋势。

Rock(1987)研究了煌斑岩类中的角闪石化学成分,并提出了角闪石的 $CaO/Na_2O - Al_2O_3 / TiO_2$ 相关图解(图3)。从图中可以看到,本区角闪石投影点处在超镁铁质和碱性煌斑岩区与钙碱性煌斑岩区的过渡部位,说明本区角闪石与幔源成因的煌斑岩类角闪石有明显区别,并非典型的幔源岩浆成因。根据陈光远等(1987)提出的 $Mg - (Fe^{2+} + Fe^{3+}) - LiNaKCa$ 角闪石成因矿物族三角图解(图4),本区角闪石无一例外地均落入中酸性壳源岩浆成因区内,说明它们为一组壳源中酸性原始熔体结晶产物。这与全岩的成因岩石学研究结果是一致的(赖绍聪等,2001),并从矿物化学的角度进一步证实了,北羌塘新第三纪高钾钙碱性中酸性火山岩类,乃是加厚的青藏高原陆壳物质局部熔融的产物,而不是幔源碱性(钾玄岩质)岩浆结晶分异衍生的结果(赖绍聪等,2001)。

### 4.2 Rb、Sr、Ba、U、Th、Pb、Zr、Hf和Nb

激光探针(LA-ICP-MS)分析获得的浩波湖英安岩中角闪石的痕量及稀土元素结果列于表2中。Rb是典型的亲岩分散稀碱元素,Sr和Ba是碱土金属族分散元素,它们在岩浆岩中不易形成独立矿物,大多与钾和钙呈类质同像替代关系(刘英俊等,1984)。分析结果(表2)表明,本区角闪石中的Sr和Ba含量分别在 $303 \sim 945 \times 10^{-6}$ (平均 $431 \times 10^{-6}$ )和106



表 1 北羌塘新第三纪高钾钙碱岩系英安岩角闪石主元素电子探针分析结果(%)

Table 1 The electron microprobe major element analysis result for the amphibole of Neogene high potassium calc-alkaline dacite from north Qiangtang

| 岩区<br>样号<br>点号                 | 浩波湖    |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        | 骆驼峰    |        |        |        |        |        |        |       | 合作湖   |  |  |  |
|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|--|--|--|
|                                | Lai16  | Lai16  | Lai16  | Lai16  | Lai16  | Lai16  | Lai16  | Lai16  | Lai16  | Lai16  | Lai16  | Lai16  | Lai16  | Lai16  | Lai16  | Lai29  | Lai29  | Lai29  | Lai29  | Lai29  | Lai29  | Lai37  | Lai37  | Lai37 | Lai37 |  |  |  |
| SiO <sub>2</sub>               | 43.61  | 47.03  | 45.12  | 45.84  | 43.06  | 44.08  | 45.27  | 43.40  | 45.41  | 45.71  | 45.61  | 43.97  | 44.79  | 46.48  | 45.87  | 43.44  | 45.26  | 42.64  | 42.03  | 43.82  | 43.35  | 44.79  | 41.36  |       |       |  |  |  |
| TiO <sub>2</sub>               | 1.95   | 1.38   | 1.51   | 1.61   | 2.07   | 1.83   | 1.78   | 1.85   | 1.68   | 1.63   | 1.75   | 1.85   | 1.81   | 1.59   | 1.57   | 1.83   | 1.64   | 1.97   | 1.97   | 1.85   | 1.80   | 1.88   | 1.83   |       |       |  |  |  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 10.44  | 7.92   | 9.32   | 8.72   | 10.92  | 9.88   | 9.62   | 10.43  | 9.33   | 8.98   | 9.45   | 10.01  | 9.72   | 8.94   | 9.15   | 9.89   | 9.57   | 10.51  | 10.99  | 9.91   | 10.59  | 9.94   | 11.44  |       |       |  |  |  |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.01   | 0.11   | 0.05   | 0.12   | 0.08   | 0.00   | 0.27   | 0.02   | 0.07   | 0.08   | 0.00   | 0.00   | 0.05   | 0.00   | 0.05   | 0.18   | 0.08   | 0.53   | 0.07   | 0.02   | 0.04   | 0.00   | 0.05   |       |       |  |  |  |
| FeO                            | 11.71  | 8.43   | 9.63   | 9.10   | 12.94  | 10.73  | 9.62   | 11.12  | 9.82   | 8.95   | 10.57  | 11.41  | 10.39  | 9.14   | 9.55   | 11.52  | 10.98  | 12.32  | 12.89  | 10.99  | 15.32  | 10.93  | 16.74  |       |       |  |  |  |
| MnO                            | 0.11   | 0.06   | 0.09   | 0.11   | 0.13   | 0.16   | 0.17   | 0.19   | 0.07   | 0.11   | 0.05   | 0.13   | 0.08   | 0.06   | 0.11   | 0.18   | 0.18   | 0.14   | 0.22   | 0.18   | 0.21   | 0.17   | 0.28   |       |       |  |  |  |
| MgO                            | 14.25  | 17.29  | 15.90  | 16.91  | 13.72  | 15.41  | 16.29  | 14.96  | 16.21  | 16.79  | 15.33  | 15.03  | 15.58  | 16.85  | 16.61  | 14.55  | 15.19  | 13.80  | 13.60  | 15.18  | 12.14  | 16.00  | 10.74  |       |       |  |  |  |
| CaO                            | 11.32  | 11.13  | 11.33  | 11.52  | 11.11  | 11.50  | 11.53  | 11.37  | 11.40  | 11.39  | 11.31  | 11.36  | 11.59  | 11.21  | 11.25  | 11.79  | 11.52  | 11.52  | 11.35  | 11.78  | 11.24  | 10.94  | 11.12  |       |       |  |  |  |
| Na <sub>2</sub> O              | 2.11   | 1.83   | 1.92   | 1.91   | 2.02   | 2.05   | 2.03   | 2.02   | 1.98   | 1.96   | 2.01   | 2.02   | 2.08   | 1.90   | 2.04   | 2.35   | 2.04   | 2.26   | 2.19   | 2.14   | 2.04   | 2.14   | 1.83   |       |       |  |  |  |
| K <sub>2</sub> O               | 0.71   | 0.56   | 0.65   | 0.66   | 0.73   | 0.70   | 0.65   | 0.73   | 0.64   | 0.68   | 0.65   | 0.66   | 0.70   | 0.61   | 0.67   | 1.04   | 0.83   | 0.93   | 1.00   | 1.04   | 1.08   | 0.57   | 1.06   |       |       |  |  |  |
| NiO                            | 0.01   | 0.00   | 0.00   | 0.08   | 0.08   | 0.05   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.01   | 0.00   | 0.09   | 0.02   | 0.05   | 0.08   | 0.00   | 0.04   | 0.05   | 0.00   | 0.07   | 0.06   | 0.06   | 0.05   |       |       |  |  |  |
| Total                          | 96.59  | 96.04  | 95.90  | 96.92  | 97.08  | 96.74  | 97.60  | 96.47  | 96.97  | 96.63  | 97.06  | 96.81  | 97.21  | 97.18  | 97.67  | 96.75  | 97.33  | 96.67  | 96.31  | 96.98  | 97.86  | 97.41  | 96.49  |       |       |  |  |  |
| [O]=                           | 23     | 23     | 23     | 23     | 23     | 23     | 23     | 23     | 23     | 23     | 23     | 23     | 23     | 23     | 23     | 23     | 23     | 23     | 23     | 23     | 23     | 23     | 23     |       |       |  |  |  |
| Si(T)                          | 6.497  | 6.882  | 6.683  | 6.705  | 6.414  | 6.530  | 6.600  | 6.464  | 6.657  | 6.697  | 6.692  | 6.521  | 6.586  | 6.755  | 6.668  | 6.473  | 6.635  | 6.385  | 6.331  | 6.488  | 6.474  | 6.548  | 6.325  |       |       |  |  |  |
| Al <sup>IV</sup> (T)           | 1.503  | 1.118  | 1.317  | 1.295  | 1.586  | 1.470  | 1.400  | 1.536  | 1.343  | 1.303  | 1.308  | 1.479  | 1.414  | 1.245  | 1.332  | 1.527  | 1.364  | 1.315  | 1.669  | 1.512  | 1.536  | 1.452  | 1.675  |       |       |  |  |  |
| Ti(T)                          | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      |       |       |  |  |  |
| Al <sup>VI</sup> (C)           | 0.330  | 0.248  | 0.310  | 0.208  | 0.331  | 0.255  | 0.253  | 0.295  | 0.269  | 0.248  | 0.326  | 0.271  | 0.270  | 0.286  | 0.236  | 0.210  | 0.290  | 0.240  | 0.282  | 0.217  | 0.337  | 0.261  | 0.387  |       |       |  |  |  |
| Ti(C)                          | 0.219  | 0.151  | 0.168  | 0.177  | 0.232  | 0.204  | 0.196  | 0.208  | 0.186  | 0.179  | 0.193  | 0.206  | 0.200  | 0.174  | 0.205  | 0.205  | 0.181  | 0.222  | 0.223  | 0.206  | 0.202  | 0.206  | 0.210  |       |       |  |  |  |
| Cr(C)                          | 0.001  | 0.012  | 0.005  | 0.013  | 0.009  | 0.000  | 0.032  | 0.003  | 0.008  | 0.009  | 0.000  | 0.001  | 0.006  | 0.000  | 0.005  | 0.021  | 0.003  | 0.063  | 0.008  | 0.002  | 0.004  | 0.000  | 0.005  |       |       |  |  |  |
| Fe <sup>2+</sup> (C)           | 1.459  | 1.032  | 1.193  | 1.113  | 1.611  | 1.330  | 1.173  | 1.385  | 1.204  | 1.096  | 1.297  | 1.415  | 1.278  | 1.111  | 1.174  | 1.436  | 1.346  | 1.543  | 1.624  | 1.361  | 1.913  | 1.336  | 2.141  |       |       |  |  |  |
| Mn(C)                          | 0.014  | 0.008  | 0.011  | 0.014  | 0.017  | 0.020  | 0.021  | 0.024  | 0.009  | 0.014  | 0.007  | 0.016  | 0.011  | 0.007  | 0.013  | 0.023  | 0.022  | 0.013  | 0.028  | 0.023  | 0.027  | 0.022  | 0.036  |       |       |  |  |  |
| Mg(C)                          | 2.977  | 3.549  | 3.313  | 3.475  | 2.800  | 3.191  | 3.325  | 3.085  | 3.324  | 3.454  | 3.177  | 3.091  | 3.235  | 3.422  | 3.367  | 3.105  | 3.152  | 2.914  | 2.835  | 3.191  | 2.517  | 3.175  | 2.221  |       |       |  |  |  |
| Ca(C)                          | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      |       |       |  |  |  |
| Mg(B)                          | 0.187  | 0.221  | 0.197  | 0.213  | 0.247  | 0.212  | 0.215  | 0.237  | 0.218  | 0.213  | 0.175  | 0.231  | 0.178  | 0.228  | 0.232  | 0.127  | 0.168  | 0.166  | 0.218  | 0.159  | 0.186  | 0.312  | 0.228  |       |       |  |  |  |
| Ca(B)                          | 1.807  | 1.745  | 1.798  | 1.787  | 1.753  | 1.788  | 1.785  | 1.763  | 1.782  | 1.787  | 1.778  | 1.769  | 1.822  | 1.746  | 1.752  | 1.873  | 1.810  | 1.854  | 1.732  | 1.841  | 1.798  | 1.688  | 1.772  |       |       |  |  |  |
| Na(B)                          | 0.006  | 0.034  | 0.005  | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | 0.047  | —      | —      | —      | 0.026  | 0.016  | —      | 0.022  | —      | —      | —      | —      | —      |       |       |  |  |  |
| K(B)                           | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      |       |       |  |  |  |
| Na(A)                          | 0.604  | 0.485  | 0.546  | 0.542  | 0.583  | 0.589  | 0.574  | 0.583  | 0.563  | 0.557  | 0.525  | 0.581  | 0.593  | 0.509  | 0.559  | 0.673  | 0.558  | 0.656  | 0.640  | 0.614  | 0.574  | 0.607  | 0.544  |       |       |  |  |  |
| K(A)                           | 0.134  | 0.104  | 0.122  | 0.122  | 0.139  | 0.133  | 0.120  | 0.139  | 0.119  | 0.127  | 0.122  | 0.124  | 0.132  | 0.113  | 0.124  | 0.198  | 0.155  | 0.178  | 0.192  | 0.196  | 0.205  | 0.106  | 0.207  |       |       |  |  |  |
| Ca(A)                          | —      | —      | —      | —      | 0.018  | 0.020  | 0.037  | 0.017  | 0.052  | 0.009  | 0.001  | —      | 0.037  | 0.004  | —      | —      | 0.009  | —      | 0.014  | 0.050  | 0.028  | —      | 0.026  | 0.049 |       |  |  |  |
| 总计                             | 15.739 | 15.589 | 15.670 | 15.692 | 15.752 | 15.765 | 15.709 | 15.773 | 15.689 | 15.686 | 15.645 | 15.750 | 15.732 | 15.629 | 15.691 | 15.879 | 15.719 | 15.852 | 15.882 | 15.846 | 15.788 | 15.746 | 15.806 |       |       |  |  |  |
| Mg <sup>#</sup>                | 0.68   | 0.79   | 0.75   | 0.77   | 0.65   | 0.72   | 0.75   | 0.71   | 0.75   | 0.77   | 0.72   | 0.70   | 0.73   | 0.77   | 0.75   | 0.69   | 0.71   | 0.67   | 0.65   | 0.71   | 0.59   | 0.72   | 0.53   |       |       |  |  |  |

注:由 Macquarie 大学 GEMOC 国家重点实验室电子探针法分析。表中:“—”表示根据晶体化学计算结果及角闪石晶体结构占位规律,该结晶位无原子占位。

表 2 北羌塘浩波湖新第三纪高钾钙碱岩系英安岩角闪石微量元素激光探针分析结果( $\times 10^{-6}$ )

Table 2 The LA-ICP-MS trace element analysis result for the amphibole of Neogene high potassium calc-alkaline dacite from Haobohu area, north Qiangtang

| 分析点号        | 角闪石   |       |       |        |       |       |       |        |       |       |       | 英安岩*   |
|-------------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|
|             | 1     | 2     | 3     | 4      | 5     | 6     | 7     | 8      | 9     | 10    | 11    |        |
| Sc          | 51.78 | 46.25 | 48.58 | 39.42  | 47.16 | 47.92 | 44.08 | 42.65  | 48.82 | 44.93 | 49.87 | 5.87   |
| Ti          | 8951  | 9386  | 8651  | 8827   | 9184  | 9641  | 8100  | 9148   | 8509  | 10800 | 9286  | 2818   |
| V           | 392   | 398   | 431   | 342    | 448   | 481   | 367   | 379    | 359   | 515   | 349   | 61.66  |
| Cr          | 641   | 223   | 224   | 155    | 442   | 114   | 254   | 286    | 327   | 334   | 312   | 41.07  |
| Co          | 42.82 | 39.48 | 40.66 | 32.86  | 36.38 | 39.69 | 41.52 | 43.09  | 41.80 | 48.86 | 46.15 | 6.31   |
| Ni          | 236   | 135   | 159   | 84     | 148   | 123   | 120   | 149    | 159   | 211   | 202   | 25.20  |
| Ga          | 14.03 | 16.35 | 15.65 | 29.09  | 18.97 | 16.73 | 14.09 | 21.77  | 16.52 | 17.71 | 16.06 | 20.50  |
| Rb          | 3.83  | 3.33  | 2.93  | 25.72  | 4.74  | 2.96  | 2.56  | 5.69   | 3.24  | 3.49  | 3.66  | 99.24  |
| Sr          | 331   | 342   | 369   | 945    | 303   | 438   | 358   | 609    | 339   | 317   | 385   | 1117   |
| Y           | 19.93 | 20.43 | 22.57 | 20.17  | 18.93 | 22.38 | 21.65 | 19.01  | 21.53 | 16.60 | 18.26 | 9.23   |
| Zr          | 53.58 | 62.31 | 69.96 | 178.36 | 51.65 | 58.96 | 57.41 | 121.02 | 56.99 | 44.62 | 48.86 | 170.73 |
| Nb          | 1.81  | 2.43  | 3.57  | 5.24   | 2.17  | 3.06  | 2.75  | 4.18   | 2.13  | 2.74  | 2.23  | 5.03   |
| Ba          | 112   | 129   | 131   | 1140   | 106   | 315   | 113   | 445    | 116   | 139   | 556   | 1219   |
| Hf          | 2.19  | 2.98  | 2.72  | 5.64   | 2.42  | 2.51  | 2.53  | 4.31   | 2.33  | 1.91  | 2.03  | 4.25   |
| Pb          | 2.64  | 2.41  | 10.63 | 33.95  | 2.99  | 3.16  | 5.95  | 11.99  | 3.63  | 3.97  | 1.87  | 43.28  |
| Th          | 5.51  | 0.22  | 4.40  | 9.62   | 0.52  | 3.81  | 7.89  | 5.65   | 2.87  | 0.28  | 1.14  | 16.53  |
| U           | 0.36  | 0.10  | 0.35  | 4.14   | 0.13  | 0.48  | 0.37  | 1.82   | 0.72  | 0.23  | 0.12  | 4.63   |
| La          | 24.18 | 13.50 | 29.79 | 35.52  | 8.95  | 35.64 | 31.53 | 27.04  | 27.48 | 8.27  | 13.25 | 37.97  |
| Ce          | 62.42 | 50.08 | 78.78 | 87.66  | 32.19 | 92.17 | 84.77 | 69.14  | 79.45 | 29.97 | 43.36 | 69.42  |
| Pr          | 9.41  | 8.49  | 12.06 | 10.89  | 5.95  | 13.33 | 12.36 | 10.08  | 11.61 | 5.22  | 7.14  | 7.89   |
| Nd          | 47.20 | 46.04 | 55.75 | 55.15  | 35.49 | 62.11 | 59.19 | 50.14  | 54.99 | 29.59 | 37.07 | 28.29  |
| Sm          | 11.54 | 10.80 | 12.62 | 8.51   | 8.49  | 14.03 | 13.91 | 11.47  | 12.81 | 9.15  | 10.00 | 4.74   |
| Eu          | 2.86  | 3.15  | 3.68  | 3.35   | 2.26  | 3.35  | 3.12  | 3.27   | 3.35  | 1.99  | 2.66  | 1.37   |
| Gd          | 7.37  | 7.56  | 9.66  | 6.35   | 5.79  | 8.91  | 6.74  | 6.68   | 8.47  | 5.49  | 7.37  | 3.53   |
| Dy          | 4.85  | 4.94  | 5.48  | 4.44   | 4.33  | 5.33  | 5.42  | 4.90   | 5.98  | 4.43  | 4.63  | 1.73   |
| Ho          | 0.83  | 0.98  | 0.94  | 0.69   | 0.81  | 1.07  | 0.85  | 0.72   | 0.85  | 0.71  | 0.75  | 0.31   |
| Er          | 2.14  | 2.27  | 1.96  | 2.07   | 1.96  | 2.35  | 2.06  | 2.10   | 1.96  | 2.00  | 1.63  | 0.82   |
| Yb          | 1.90  | 1.89  | 1.39  | 1.72   | 1.84  | 1.79  | 1.40  | 1.34   | 1.83  | 1.31  | 1.03  | 0.67   |
| Lu          | 0.14  | 0.22  | 0.18  | 0.17   | 0.13  | 0.21  | 0.17  | 0.14   | 0.23  | 0.13  | 0.09  | 0.10   |
| $\delta$ Eu | 0.89  | 1.01  | 0.98  | 1.34   | 0.93  | 0.86  | 0.87  | 1.05   | 0.92  | 0.79  | 0.91  | 0.98   |

注：表中，“英安岩\*”为角闪石赋存母岩全岩 ICP-MS 分析结果；其余均为角闪石激光探针分析结果。

由 Macquarie 大学 GEMOC 国家重点实验室分析测定。

Zr、Hf 和 Nb 在岩浆岩中均易形成独立矿物相，如锆石、铌钽矿物等，也可进入造岩矿物中，如辉石、角闪石、黑云母等(刘英俊等,1984)。本区角闪石中 Zr( $44.62 \sim 178.36 \times 10^{-6}$ ，平均  $73.11 \times 10^{-6}$ )、Hf( $1.91 \sim 5.64 \times 10^{-6}$ ，平均  $2.87 \times 10^{-6}$ )和 Nb ( $1.81 \sim 5.24 \times 10^{-6}$ ，平均  $2.94 \times 10^{-6}$ )均低于

英安岩全岩的 Zr( $170.73 \times 10^{-6}$ )、Hf( $4.25 \times 10^{-6}$ )和 Nb ( $5.03 \times 10^{-6}$ )含量，但相差不大。

#### 4.3 Sc、Ti、V、Cr、Co 和 Ni

该组元素是典型的铁族元素，在岩浆岩中通常富集于超

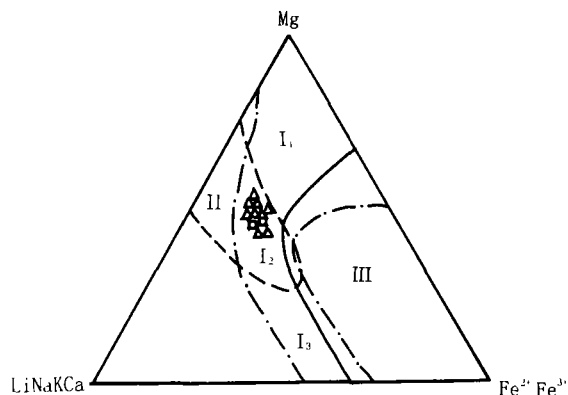


图4 角闪石成因矿物族三角图解(据陈光远等,1987)

I, 岩浆成因区、区域正变质成因区、超变质成因区; I<sub>1</sub>, 超基性成因区; I<sub>2</sub>, 中-酸性成因区; I<sub>3</sub>, 碱性成因区; II, 接触交代成因区; III, 区域负变质成因区; △, 沿波源地区角闪石; □, 骆驼峰地区角闪石; ×, 合作湖地区角闪石

Fig. 4 Diagram for the amphibole genesis discrimination (after Cheng Guangyuan *et al.*, 1987)

基性和基性岩中,中酸性岩和碱性岩中丰度值低,在岩浆演化过程中向晚期分异体逐渐降低。在角闪石的晶体结构中,Ti是C位和T位的重要占位离子之一,Sc、V、Cr、Co和Ni又可以类质同像的型式取代Ti、Fe和Mg,从而在角闪石中形成富集(刘英俊等,1984)。从表2中可以看到,本区角闪石中,Sc、Ti、V、Cr、Co和Ni的含量值均明显高于母岩(英安岩)中同一元素的含量值。从而说明,在中酸性岩石中,角闪石类铁镁矿物乃是铁族元素的最重要富集矿物相。

为了便于对比,我们以英安岩全岩痕量元素含量为标准值,将角闪石中痕量元素进行标准化。结果表明(图5),配分曲线呈左倾正斜率型。自左向右,随着不相容性的降低,元素的相对亏损程度逐渐减弱,而相对富集程度逐渐增加。由Th、U、Pb等强不相容元素的显著亏损状态,到La、Sr、Hf、Zr等中等不相容元素的弱亏损状态,变化为Sc、V、Cr、Co、Ni等弱不相容元素的较强富集状态,显示了明显的规律性变化。另外,配分曲线中以Rb、Th、U和Pb的亏损程度最强,形成低“谷”,且变化较大。而Sm、Ti、Y的富集程度要明显低于Sc、V、Cr、Co和Ni。这表明角闪石类链状硅酸盐铁镁矿物乃是中酸性岩中弱不相容元素的主要富集矿物相,同时也从另一个角度说明了角闪石是中酸性岩石中较早结晶的矿物相之一。

#### 4.4 稀土元素

分析结果(表2)表明,本区角闪石中稀土元素较为富集,稀土总量平均为 $197.17 \times 10^{-6}$ 。轻重稀土比变化在2.69~5.36之间,平均为4.15;角闪石相应的(La/Yb)<sub>N</sub>变化在3.49~16.15之间(平均为10.67), (Ce/Yb)<sub>N</sub>变化在4.86~

16.82之间(平均为11.53),说明角闪石具有轻稀土强烈富集的元素地球化学特征。值得注意的是,本区角闪石 $\delta\text{Eu}$ 变化不大,在0.79~1.34之间,平均为0.96,基本上不显示Eu异常。

岩石中稀土元素Eu的富集与亏损主要取决于含钙造岩矿物的聚集和迁移,而这又受造岩作用的条件制约。含钙的造岩矿物主要有偏基性的斜长石、磷灰石和含钙辉石。这类矿物中 $\text{Ca}^{2+}$ 离子半径与 $\text{Eu}^{2+}$ 、 $\text{Eu}^{3+}$ 相近,且与 $\text{Eu}^{2+}$ 电价相同,故晶体化学性质决定了Eu主要以类质同像的形式进入斜长石、磷灰石、单斜辉石等造岩矿物(王中刚等,1989)。已有的一些研究结果表明(李昌年,1991),角闪石、黑云母等铁镁硅酸盐矿物中常见Eu的亏损状态。然而,本区角闪石中Eu并不亏损,部分颗粒中还显示了Eu的弱富集状态。这可能取决于两方面的因素:(1)正常情况下,Eu主要在基性岩石中富集,而在大多数的英安-流纹岩类岩石中,均显示Eu的亏损状态。然而,本区新第三纪高钾钙碱系列中酸性岩石均不显示Eu亏损特征,赖绍聪等(2001)认为,这一现象指示了这套岩石的源区特征,它们应为青藏高原加厚的陆壳底部脱水熔融的产物,源区物质组成相当于榴辉岩相(缺失斜长石矿物相),从而造成这套壳源中酸性岩石原始熔体中Eu的较高丰度值,进而对岩浆结晶过程中造岩矿物的痕量元素地球化学特征造成重要影响,使得角闪石中富集稀土元素,并且不显示Eu亏损。(2)由于角闪石晶体结构中A位、B位和C位均可出现Ca的占位(本区角闪石Ca主要出现在B位和A位),因而存在产生Eu类质同像置换 $\text{Ca}^{2+}$ 的条件,尤其是在原始熔体中 $\text{Eu}^{2+}$ 丰度值较高的情况下, $\text{Eu}^{2+}$ 除了在斜长石中产生富集外,还可能在角闪石等低含钙矿物中造成 $\text{Eu}^{2+}$ 的明显类质同像替代,从而使得本区角闪石矿物呈现Eu不亏损甚至弱富集状态。

从稀土元素球粒陨石标准化配分型式(图6)图中可以看到,本区角闪石总体呈平滑的右倾负斜率轻稀土富集型配分型式,Eu处基本无异常。但部分颗粒的轻稀土La、Ce和Pr有轻微的相对亏损现象,其原因有待进一步的研究。

## 5 结论

北羌塘新第三纪高钾钙碱岩系英安岩中所含角闪石均属钙质角闪石亚类,并可细分为含镁绿钙闪石质角闪石、浅闪石质角闪石和浅闪石三种不同种属。其主元素特征明显不同于煌斑岩等幔源岩石系列中的角闪石,而显示为壳源中酸性岩浆成因系列,说明它们为壳源中酸性原始熔体结晶产物,并从矿物学的角度论证了北羌塘新第三纪高钾钙碱岩系火山岩乃是青藏高原加厚陆壳局部熔融的产物。本区角闪石中较强烈地富集了不相容性弱的Sc、Ti、V、Cr、Co、Ni等铁镁元素,而较明显地亏损了Th、U、Pb、Rb等不相容性较强的大离子亲石元素。本区角闪石稀土元素富集,且不显示Eu的亏损,这可能暗示了本区高钾钙碱岩系中酸性火山岩起源

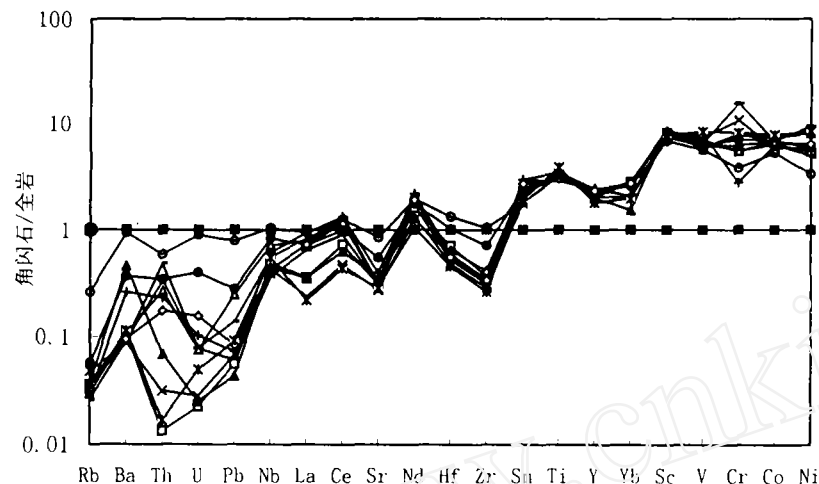


图5 角闪石痕量元素全岩标准化配分型式

Fig. 5 Rock-normalized trace element distribution pattern for the amphibole

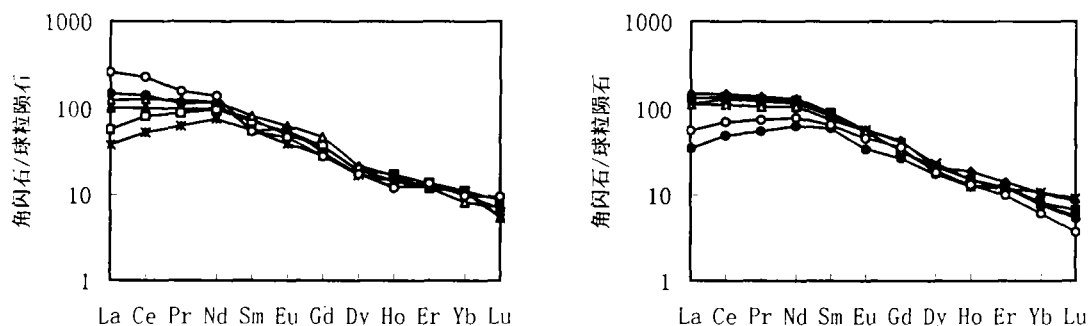


图6 角闪石稀土元素球粒陨石标准化配分型式

Fig. 6 Chondrite-normalized rare earth element distribution pattern

于一个加厚的榴辉岩质下地壳的脱水局部熔融。

## References

- Arnaud N O, Vidal P, Tapponnier P, Matte P, Deng W M. 1992. The high  $K_2O$  volcanism of northwestern Tibet: geochemistry and tectonic implications. *Earth and Planetary Science Letters*, 111: 351–367
- Chen Guangyuan, Sun Daisheng, Yin Huian. 1987. Genetic mineralogy and prospecting mineralogy. Chongqing: Chongqing Press, 555–649 (in Chinese)
- Chi Xiaoguo, Li Cai, Jin Wei, Liu Sen, Yang Rihong. 1999. The Cenozoic volcanism evolutionary and uplifting mechanism of the Qinghai-Tibet plateau. *Geological Review*, 45(Supp.): 978–986 (in Chinese with English abstract)
- Deer W A, Howie R A, Zussman J. 1963. *Rock-forming minerals*. New York: John Wiley and Sons Press, 1–210
- Deng Wanming. 1998. Cenozoic intraplate volcanic rocks in the northern Qinghai-Xizang plateau. Beijing: Geological Publishing House, 1–168 (in Chinese)
- Deng Wanming. 1989. Features of the Cenozoic volcanic rocks from north Ali, Tibet plateau. *Acta Petrologica Sinica*, 5(3): 1–11 (in Chinese with English abstract)
- Deng Wanming. 1991. The geology, geochemistry and forming age of the shoshonites from middle Kunlun mountain. *Scientia Geologica Sinica*, 26(3): 201–213 (in Chinese with English abstract)
- Deng Wanming. 1993. Trace element and Sr, Nd isotopic features of the Cenozoic potassium-volcanic rocks from northern Qinghai-Tibet plateau. *Acta Petrologica Sinica*, 9(4): 379–387 (in Chinese with English abstract)
- Deng Wanming, Sun Hongjuan. 1998. Features of isotopic geochemistry and source region for the intraplate volcanic rocks from northern Qinghai-Tibet plateau. *Earth Science Frontiers*, 5(4): 307–317 (in Chinese with English abstract)
- Deng Wanming, Sun Hongjuan. 1999. The Cenozoic volcanism and

- the uplifting mechanism of the Qinghai-Tibet plateau. Geological Review, 45 (Supp.): 952—958 (in Chinese with English abstract)
- Lai Shaocong. 1999a. Mineral chemistry of Cenozoic volcanic rocks in Yumen, Hoh Xil and Mangkang lithodistricts, Qinghai-Tibet plateau and its petrologic significance. Acta Mineralogica Sinica, 19(2): 236—244 (in Chinese with English abstract)
- Lai Shaocong. 1999b. Petrogenesis of the Cenozoic volcanic rocks from the northern part of the Qinghai-Tibet plateau. Acta Petrologica Sinica, 15(1): 98—104 (in Chinese with English abstract)
- Lai Shaocong, Deng Jinfu, Zhao Hailing. 1996. Volcanism and tectonic evolution in the northern margin of Qinghai-Tibet plateau. Xi'an: Science and Technology Press of Shaanxi Province, 95—133 (in Chinese)
- Lai shaocong, Liu Chiyang. 2001. Enriched upper mantle and eclogitic lower crust in north Qiangtang, Qinghai-Tibet plateau. Acta Petrologica Sinica, 17(3): 459—468 (in Chinese with English abstract)
- Leake B E. 1978. Nomenclature of amphiboles. Canada Mineral., 16(4): 501—520
- Li Changnian. 1991. Igneous trace element petrology. Wuhan: China University of Geosciences Publishing House, 30—50 (in Chinese with English abstract)
- Liu Jiaqi. 1999. Volcanoes in China. Beijing: Science Press, 53—135 (in Chinese)
- Liu Yingjun, Cao Liming, Li Zhaolin, Wang Henian, Chu Tangqing, Zhang Jingrong. 1984. Element geochemistry. Beijing: Science Press, 50—372 (in Chinese)
- Miller C, Schuster R, Klotzli U, Frank W, Purtscheller F. 1999. Post-collisional potassic and ultrapotassic magmatism in SW Tibet: geochemical and Sr-Nd-Pb-O isotopic constraints for mantle source characteristics and petrogenesis. Journal of Petrology, 40(9): 1399—1424
- Rock N M S. 1987. A FORTRAN program for tabulating and naming amphibole analyses according to the International Mineralogical Association Scheme. Mineral Petrology, 37(1): 79—88
- Rock N M S and Leake B E. 1984. The International Mineralogical Association amphibole nomenclature scheme computerization and its consequences. Mineral Magazine, 48(347): 211—227
- Tuener S, Arnaud N, Liu J, Rogers N, Hawkesworth C, Harris N, Kelley S, Calsteren P V, Deng W M. 1996. Post collision shoshonitic volcanism on the Tibetan plateau: implications for convective thinning of the lithosphere and the source of ocean island basalts. Journal of Petrology, 37: 45—71
- Ugo Pognante. 1990. Shoshonitic and ultrapotassic post-collisional dykes from northern Karakorum (Sinkiang, China). Lithos, 26: 305—316
- Wang Bixiang, Ye Hefei, Peng Yongmin. 1999. Isotopic geochemistry features and its significance of the Mesozoic-Cenozoic volcanic rocks from Qiangtang basin, Qinghai-Tibet plateau. Geological Review, 45(Supp.): 946—951 (in Chinese with English abstract)
- Wang Zhonggang, Yu Xueyuan, Zhao Zhenhua, Zhang Jing, Lei Jianquan. 1989. Rare earth element geochemistry. Beijing: Science Press, 133—246 (in Chinese)
- Yang Deming, Li Cai, He Zhonghua, Zheng Changqing. 1999. Petrochemistry and tectonic settings of the volcanic rocks of Songwori in Nima county, Tibet. Geological Review, 45 (Supp.): 972—977 (in Chinese with English abstract)

#### 附中文参考文献

- 陈光远, 孙岱生, 殷辉安. 1987. 成因矿物学与找矿矿物学. 重庆: 重庆出版社, 555—649
- 迟效国, 李才, 金巍, 刘森, 杨日红. 1999. 藏北新生代火山作用的时空演化与高原隆升. 地质论评, 45(增刊): 978—986
- 邓万明. 1998. 青藏高原北部新生代板内火山岩. 北京: 地质出版社, 1—168
- 邓万明. 1989. 西藏阿里北部的新生代火山岩—兼论陆内俯冲作用. 岩石学报, 5(3): 1—11
- 邓万明. 1991. 中昆仑造山带钾玄岩质火山岩的地质、地球化学和时代. 地质科学, 26(3): 201—213
- 邓万明. 1993. 青藏北部新生代钾质火山岩微量元素和 Sr, Nd 同位素地球化学研究. 岩石学报, 9(4): 379—387
- 邓万明, 孙宏娟. 1998. 青藏北部板内火山岩的同位素地球化学与源区特征. 地学前缘, 5(4): 307—317
- 邓万明, 孙宏娟. 1999. 青藏高原新生代火山活动与高原隆升关系. 地质论评, 45(增刊): 952—958
- 赖绍聪. 1999a. 青藏高原新生代火山岩矿物化学及其岩石学意义. 矿物学报, 19(2): 236—244
- 赖绍聪. 1999b. 青藏高原北部新生代火山岩成因机制. 岩石学报, 15(1): 98—104
- 赖绍聪, 邓晋福, 赵海玲. 1996. 青藏高原北缘火山作用与构造演化. 西安: 陕西科学技术出版社, 1—120
- 赖绍聪, 刘池阳. 2001. 青藏高原北羌塘榴辉岩质下地壳及富集型地幔源区. 岩石学报, 17(3): 459—468
- 李昌年. 1991. 火成岩微量元素岩石学. 武汉: 中国地质大学出版社, 30—50
- 刘嘉麒. 1999. 中国火山. 北京: 科学出版社, 53—135
- 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 王鹤年, 储同庆, 张景荣. 1984. 元素地球化学. 北京: 科学出版社, 50—372
- 王碧香, 叶和飞, 彭勇民. 1999. 青藏羌塘盆地中生代火山岩同位素地球化学特征及其意义. 地质论评, 45(增刊): 946—951
- 王中刚, 于学元, 赵振华, 张静, 雷剑泉. 1989. 稀土元素地球化学. 北京: 科学出版社, 133—246
- 杨德明, 李才, 和钟华, 郑常青. 1999. 西藏尼玛宋我日火山岩岩石化学特征与构造环境. 地质论评, 45(增刊): 972—977