

# 阿尔泰基性麻粒岩的发现:来自矿物学的证据\*

厉子龙<sup>1</sup> 陈汉林<sup>1</sup> 杨树锋<sup>1</sup> 肖文交<sup>2</sup> Yoshiaki Tainosho<sup>3</sup>

LI Zilong<sup>1</sup>, CHEN Hanlin<sup>1</sup>, YANG Shufeng<sup>1</sup>, XIAO Wenjiao<sup>2</sup> and Yoshiaki TAINOSHO<sup>3</sup>

1. 浙江大学地球科学系, 杭州 310027

2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

3. 日本神户大学发达科学部, 神户市, 657-8501

1. Department of Earth Science, College of Science, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

3. Faculty of Development Science, Kobe University, Kobe 657-8501, Japan

2004-04-29 收稿, 2004-10-17 改回.

LI ZL, Chen HL, Yang SF, Xiao WJ and Tainosho Y. 2004. Discovery of mafic granulites from the Altay orogenic belt: evidence from mineralogical study. *Acta Petrologica Sinica*, 20(6):1445-1455

**Abstract** The Altay mafic granulite (AMG), representing metamorphic product of granulite-facies in the lower crust, was first found in the Fuyun Wuqiagou, Altay orogenic belt through detailed field survey and mineral-chemical study. The AMG consists of coarse-grained and fine-grained granulites with SiO<sub>2</sub> contents of 47.83% ~ 53.57%, both of which have similar mineral assemblage of orthopyroxene, clinopyroxene, plagioclase, amphibole and brown biotite. Its mineral compositions of amphiboles and biotites are rich in Mg/(Mg + Fe<sup>2+</sup>), probably having relationship with whole-rock chemistry of the rocks. Mineral chemistry addresses that orthopyroxenes have higher Mg/(Mg + Fe<sup>2+</sup>) of 0.65 ~ 0.71, belonging to hypersthene, and having higher MgO + FeO contents, and lower Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> contents and Ca/(Ca + Fe<sup>2+</sup> + Mg) ratios. Clinopyroxenes have lower TiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. These chemical features indicate that orthopyroxenes and clinopyroxenes in the rocks have metamorphic genetics. Biotites and some amphiboles are Ti-enriched, replying products formed under high-T metamorphic conditions, and even granulite-facies conditions. Based on mineral paragenesis, mineral generation and mineral geothermobarometer, the P-T conditions of peak and retrograde metamorphism of the AMG are 750 ~ 780°C, 0.6 ~ 0.7 GPa and 590 ~ 620°C, 0.23 ~ 0.37 GPa, respectively, and the former one implies the crustal depth of ca. 20 ~ 25 km. The discovery of the AMG has an important significance on further study of formation and structure of deeper crust in the Altay area and continental geodynamic mechanism in North Xinjiang, China and even Central Asia.

**Key words** Mafic granulite, Petrography, Mineral chemistry, P-T conditions, Altay orogenic belt

**摘要** 新疆北部阿尔泰造山带富蕴乌恰沟一带首次发现代表中、下地壳深变质作用的基性麻粒岩。详细的野外和室内研究表明阿尔泰基性麻粒岩主要由粗粒和细粒的麻粒岩组成(SiO<sub>2</sub>含量为47.83~53.57%)。两者的矿物组合相近,为斜方辉石+单斜辉石+斜长石+角闪石+黑云母。角闪石和黑云母成分富镁,可能与岩石的成分富镁有关。基性麻粒岩的岩石地球化学成分显示其富Mg/(Mg+Fe<sup>2+</sup>)和亏损U,Th,K及Rb,而且其原岩为钙碱性玄武岩,是岛弧构造环境下形成的产物。矿物化学特征表明斜方辉石中Mg/(Mg+Fe<sup>2+</sup>)介于0.65~0.71之间,为紫苏辉石,具高MgO+FeO,低Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和Ca/(Ca+Mg+Fe),而单斜辉石具低TiO<sub>2</sub>和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的特点,说明它们皆为变质成因。部分角闪石和褐色黑云母富钛,指示它们为高温下形成的产物。这些特征证实了上述岩石为基性麻粒岩。角闪石和黑云母氟和氯含量较低以及水逸度较高,暗示其流体成分氟和氯在变质作用过程中不起主导作用。根据麻粒岩中矿物共生组合、期次和矿物温压计估算,麻粒岩形成的峰期和退变质温压条件分别为750~780°C,0.6~0.7GPa和590~620°C,0.23~0.37GPa,前者属高温中压条件。阿尔泰地区基性麻粒岩的发现为进一步研究阿尔泰地区深部下地壳的组成和结构以及深化阿尔泰地区、新疆北部甚至中亚地区大陆动力学过程和机制都具有重要意义。

\* 国家重点基础研究发展规划项目(2001CB409801)、国家自然科学基金(40472040)、高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划、中国博士后基金项目(2003033033)和教育部留学回国人员启动基金资助。

第一作者简介: 厉子龙,男,1965年2月生,日本神户大学理学博士,副教授,岩石矿物地球化学专业, E-mail:zilongli@hotmail.com

**关键词** 基性麻粒岩; 岩相学; 矿物化学; P-T 条件估算; 阿尔泰

**中图法分类号** P5

麻粒岩是地球中最重要的岩石类型之一,代表高温变质相和作为来自深部下地壳-上地幔的产物,与碰撞造山、大陆拉张以及大陆弧模式等大陆动力学关系密切,且与大型金属和非金属矿产资源有紧密联系。通过麻粒岩地体以及火山岩中麻粒岩捕虏体的研究,使人们对地球深部的物质组成和结构有了直接的了解,所以近年来对麻粒岩的发现和和研究得到地质学家们的高度重视和关注(翟明国,1991;翟明国等,1992;刘良等,1994;魏春景等,1998;于津海等,1998;刘勇胜等,1999;李三忠等,2000;翟明国等,2001;张建新等,2001;俞良军等,2002;于津海等,2002;于津海等,2003)。

随着新疆 305 项目研究的不断开展和 973 项目基础地质研究的不断深入,阿尔泰山区域地质、变质-岩浆作用、年代学等方面的研究已取得了一些重要的认识(何国琦等,1990;韩宝福,1991;庄育勋,1994;胡嵩琴等,1995;Federovskii *et al.*,1995;Han *et al.*,1997;Yuan,1999;Hu *et al.*,2000;李天德等,2001;Charvet *et al.*,2001;Laurent-Charvet *et al.*,2001;胡嵩琴等,2002;方同辉等,2002;Windley *et al.*,2002;Xiao *et al.*,2004),这些无疑有利于对该区进行深入的地质研究。近来,笔者在参加 973 项目的研究过程中,在阿勒泰地区富蕴县乌恰沟一带首次发现基性麻粒岩的存在,通过对其岩相学和矿物学特征进行较深入的研究,确定了阿尔泰山南缘存在基性麻粒岩,这对阿尔泰山地区中、下地壳的成分和结构以及与区域性地质对比等方面的研究具有重要意义。

## 1 区域地质概况

新疆北部地处西伯利亚板块、哈萨克斯坦板块和塔里木板块的交汇区,包括阿尔泰山、天山和准噶尔盆地的周边地区,以发育古生代造山带为特征,是中亚巨型造山带的重要组成部分。阿尔泰山于早石炭世发生最终的板块碰撞作用,基本上形成了现在的构造格局(Coleman,1989;Sengor *et al.*,1993;何国琦等,1990;肖序常等,1992)。阿尔泰山带被看作是一个复合地体,即在大量的显生宙新生地壳内残存着一些前寒武纪大陆地壳断块,它对广泛分布的显生宙花岗岩类的形成和成矿作用均起着重要的控制作用(Coleman,1989;Hu *et al.*,2000;胡嵩琴等,2002)。阿尔泰山南缘自西向东从哈巴河、阿勒泰、富蕴、热坝河一带,发布着一条北西-南东向的泥盆纪火山岩带,在区域构造上属额尔齐斯构造带的北部,且该区作为闻名于世的中国阿尔泰山南缘泥盆纪铜、铅、锌、铁等重要多金属成矿带。额尔齐斯构造带的地层主要为一套变质岩,包括结晶片岩、片麻岩和混合岩,还有一些变质砂岩、粉砂岩、凝灰质砂岩和中基性火山岩等,厚度近

3000m(韩宝福,1991)。庄育勋(1994)曾认为阿尔泰山带中发育一系列热-构造-片麻岩穹窿,由低级变质区向穹窿中心发育绢云母-绿泥石带至夕线石-堇青石带和混合花岗岩片麻岩带,并认为递进变质带、混合岩带、混合花岗岩片麻岩的形成演化顺序与其由外部向穹窿中心在空间上的排布序列一致。方同辉等(2002)报道了富蕴一带(包括乌恰沟)基性岩和变基性岩的地球化学特征及年代学,认为变基性岩的原岩可能形成于晚元古代,属前寒武纪,而不是晚古生代。

## 2 麻粒岩的产出特征及其岩石地球化学特征

新发现的麻粒岩产出位置为阿勒泰地区富蕴县城东乌恰沟一带(图1),该带主要由片麻岩、混合岩夹斜长角闪片麻岩组成,而乌恰沟达板北,为混合岩、混合片麻岩、片麻岩和变粒岩等(李天德等,1996)。经详细的野外地质观察和剖面实测,发现该处的麻粒岩体从北东侧破碎带开始至南西侧花岗质片麻岩出现为止计有 117 米左右(图2)。该麻粒岩体呈透镜状产出,其周围出露的岩石类型主要为一套中、低变质的地层,其产状为 NW-SE 走向,变质作用局部达到角闪岩相。通过对该麻粒岩体的出露范围进行的追索发现,麻粒岩体出露范围初步推算出露面积大于 35000m<sup>2</sup>。其北东侧以断层破碎带与花岗质片麻岩和角闪斜长片麻岩呈断层接触,而与南西侧花岗质片麻岩呈突变接触关系(图2)。其北东侧的花岗质片麻岩和角闪斜长片麻岩的片麻理产状较陡。在麻粒岩体内还可见后期辉绿岩脉穿插现象。其中典型的二辉麻粒岩出现在麻粒岩体的两侧,麻粒岩可进一步分为粗粒和细粒麻粒岩,它们呈渐变过渡关系。

综合新的分析结果(未公开发表数据)表明,该区麻粒岩的岩石化学成分显示 SiO<sub>2</sub> 为 47.83 ~ 53.57%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为 13.98 ~ 18.32%, K<sub>2</sub>O + Na<sub>2</sub>O 为 2.87 ~ 4.56%, TiO<sub>2</sub> 为 0.76 ~ 4.35% 和 Mg/(Mg + Fe<sup>2+</sup>) 为 0.51 ~ 0.64,属基性麻粒岩。麻粒岩具有富 Mg/(Mg + Fe<sup>2+</sup>) 和 Al 及贫 Ca 的特征,且氟的含量相对较低,为 30 ~ 75 × 10<sup>-6</sup>。据厉子龙等(2003)和 Li *et al.* (2004)初步报道了阿尔泰山麻粒岩具有低的 K 和 Rb 含量,且 Rb/Sr 比值为 0.03 ~ 0.07, U 含量为 0.32 ~ 0.36 × 10<sup>-6</sup>, Th 含量为 1.67 ~ 1.93 × 10<sup>-6</sup> 和 Th / U 比值为 5.22 ~ 5.36,显示出具有生热元素和大半径离子造岩元素(K, Th, U)亏损,而且具不同程度的 Ba(110 ~ 203 × 10<sup>-6</sup>)和 Sr(265 ~ 596 × 10<sup>-6</sup>)富集的趋势。微量和主量元素构造判别图解显示,阿尔泰山麻粒岩其原岩具有岩浆成因,为岛弧环境下形成的钙碱性玄武岩,且成分中含有形成于俯冲作用或与俯冲作用有关的组分(Li *et al.*, 2004)。

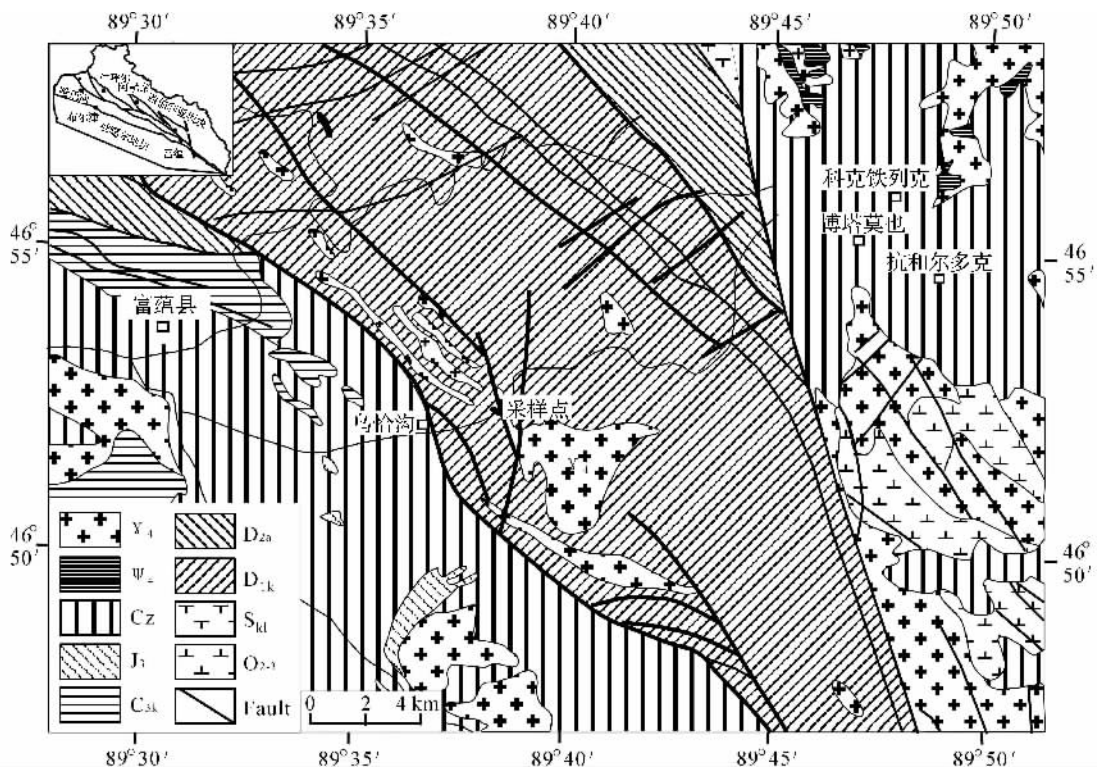


图1 阿尔泰富蕴一带地质略图及采样点的位置(左侧小黑点示麻粒岩的分布区)

O<sub>2,3</sub>: 中-晚奥陶世哈巴河群; S<sub>1k</sub>: 志留纪库鲁姆提群; D<sub>1k</sub>: 早泥盆世康布铁堡组; D<sub>2</sub>: 中泥盆世蕴都喀拉组; D<sub>2a</sub>: 中泥盆世阿勒泰组; C<sub>3k</sub>: 晚石炭世喀喇额尔齐斯组; J<sub>3</sub>: 晚侏罗世石树沟群; C<sub>z</sub>: 新生界; Ψ<sub>4</sub>: 华力西期基性、超基性岩; γ<sub>4</sub>: 华力西期花岗质岩石

Fig.1 Geological sketch map of the Fuyun area and sampling location of the Altay granulite, Altay orogenic belt

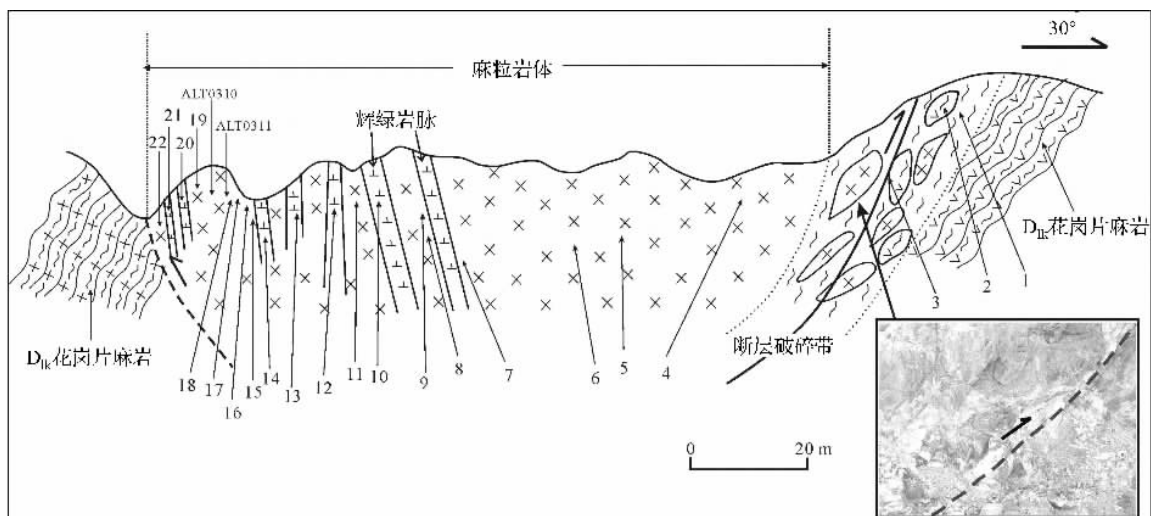


图2 富蕴乌恰沟一带基性麻粒岩实测剖面图

注: 1-3 为花岗片麻岩; 4-6, 16-18, 19, 20 为基性麻粒岩; 8, 9, 11, 15 为斜长角闪岩; 7, 10, 12, 14, 20, 21 为辉绿岩。1-18 对应于样号 FY082410-1 至 FY082410-18, 代号 19-22 对应于 FY082604-1 至 FY082604-4; D<sub>1k</sub> 为早泥盆世康布铁堡组

Fig.2 Measured section of the Altay granulite in Fuyun area

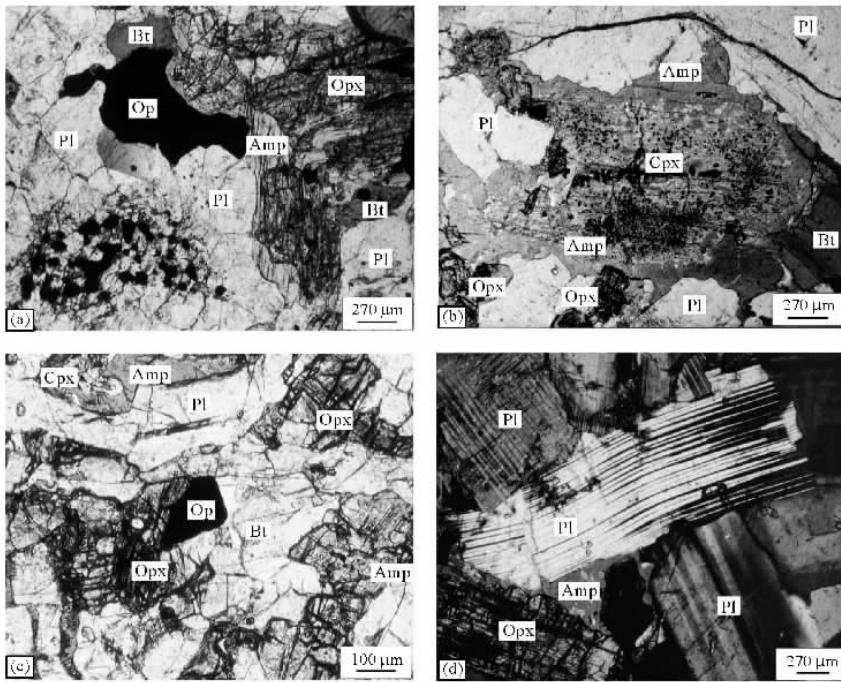


图3 基性麻粒岩的显微照片

(a)斜方辉石、斜长石、角闪石和黑云母的接触关系; FY0824-10-4, 粗粒麻粒岩, 单偏光; (b) 矿物组合斜方辉石、单斜辉石、斜长石、角闪石和黑云母, 还可见角闪石与石英的后合成晶; ALT0311, 粗粒麻粒岩, 单偏光; (c) 斜方辉石、斜长石、角闪石和黑云母的接触关系, FY0826-5-4, 细粒麻粒岩, 单偏光; (d) 斜长石具膝折和双晶弯曲现象。ALT0310, 粗粒麻粒岩, 正交镜下。Cpx: 单斜辉石, Opx: 斜方辉石, Amp: 角闪石, Bt: 黑云母, Pl: 斜长石, Op: 不透明矿物

Fig. 3 Photomicrography of the Altay mafic granulite

### 3 麻粒岩的岩相学特征

根据沈其韩的分类方案(1991)和国际地科联变质岩分委员会(IUGS-SCMR, 1989)提出的三角分类图, 阿尔泰麻粒岩分别属角闪斜长二辉麻粒岩和辉石麻粒岩。麻粒岩可分为粗粒麻粒岩和细粒麻粒岩, 它们有相同或相近的矿物组合, 即以斜长石 + 斜方辉石 + 单斜辉石 + 角闪石 + 黑云母 + 石英为代表(图3), 副矿物锆石、磷灰石、磁铁矿及铁钛矿等。该区麻粒岩不但存在无水矿物斜方辉石和单斜辉石, 还普遍存在含水矿物角闪石和黑云母, 且斜方辉石 + 单斜辉石的含量(30~40%)大于角闪石 + 黑云母的含量(10~15%), 即该麻粒岩中无水矿物的含量大于含水矿物。斜方辉石的出现是确定麻粒岩的主要特征矿物之一, 也是麻粒岩相变质作用的主要标志。斜方辉石 + 单斜辉石在高温条件下稳定共生。随着温度降低, 斜方辉石消失, 普通角闪石 + 单斜辉石 ± 黑云母稳定共生。部分斜长石有双晶弯曲或膝折现象。以粒状变晶结构为主, 块状构造。从以上特征表明该区麻粒岩具有典型麻粒岩的特征。

麻粒岩的矿物特征描述如下:

斜方辉石(20~25% ±): 呈短柱状, (微)淡红, 略带多

色性, 有被后期角闪石交代现象。可见角闪石和石英、黑云母和石英组成的后合成晶包围斜方辉石。角闪石替代辉石及在辉石边部生长, 说明麻粒岩相退变质作用过程中水流体成分的增加。

单斜辉石(10~15%): 浅绿色, 有被角闪石交代现象。部分单斜辉石具有定向排列的角闪石出溶片晶, 推测部分角闪石与之共生, 而穿插和包围辉石的蓝绿色角闪石, 则指示了辉石的退变质反应。

角闪石(10~15%): 浅黄-浅绿的多色性, 有些呈褐绿色。常见角闪石环绕并交代二辉石, 且有角闪石与石英在紫苏辉石和斜长石之间出现, 一部分角闪石可能是斜方辉石 + 斜长石 → 角闪石 + 石英退变质反应的产物。可见角闪石与部分斜长石具有共生现象。

斜长石(45~55%): 板状晶体, 自形-半自形, 表面较干净, 蚀变不明显。长柱1mm 常见, 双晶发育, 具膝折和双晶弯曲现象(图3), 指示深层次韧性变形。但细粒麻粒岩中斜长石的双晶变形程度不如粗粒麻粒岩的强。有少量斜长石呈环带出现, 为正环带。

黑云母(<5%): 板状晶, 晶体呈半自形-它形, 多呈棕红色或浅褐色, 具高温变质黑云母特征, 部分交代斜方辉石和角闪石。

石英(<5%): 晶体多呈填隙状, 少数具波状消光。

### 4 麻粒岩的矿物化学和变质温压条件

实验条件: 麻粒岩的矿物成分在日本神户大学 VBL 重点实验室 EPMA 室( JXA8900 )分析测得。测试条件为加速电压 15kV, 电流 10mA 以及电子束直径 < 5μm。F 和 Cl 元

素的分析精度由测定纯萤石( CaF<sub>2</sub> )和石盐晶体的粒状集合体( NaCl )标样得出分析值近 1wt% ( 2sigma ), 在标准误差内; F 和 Cl 元素的探测限多数为 0.01wt% ( 3sigma )。

麻粒岩中斜方辉石、单斜辉石、角闪石、黑云母和斜长石的矿物化学成分见表 1, 2, 3 和 4。

表 1 阿尔泰麻粒岩的辉石电子探针分析

Table 1 Representative pyroxene compositions of Altay mafic granulites

| 矿物名称                           | 单斜辉石    |          |            |            |            |            | 斜方辉石     |         |            |            |            |
|--------------------------------|---------|----------|------------|------------|------------|------------|----------|---------|------------|------------|------------|
|                                | 粗粒麻粒岩   |          |            | 细粒麻粒岩      |            |            | 粗粒麻粒岩    |         | 细粒麻粒岩      |            |            |
| 岩石名称                           | ALT0311 | ALT-0310 | FY0826-5-4 | FY0826-5-4 | FY0826-5-9 | FY0826-5-9 | ALT-0310 | ALT0311 | FY082410-4 | FY082410-4 | FY0826-5-4 |
| 样号                             | ALT0311 | ALT-0310 | FY0826-5-4 | FY0826-5-4 | FY0826-5-9 | FY0826-5-9 | ALT-0310 | ALT0311 | FY082410-4 | FY082410-4 | FY0826-5-4 |
| 分析点                            | 38      | 2        | 81         | 78         | 2          | 17         | 3        | 55      | 25         | 35         | 90         |
| SiO <sub>2</sub>               | 53.44   | 51.90    | 53.63      | 53.42      | 53.58      | 53.28      | 51.64    | 53.24   | 53.39      | 54.10      | 53.82      |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.24    | 0.05     | 0.28       | 0.28       | 0.25       | 0.17       | 0.16     | 0.08    | 0.13       | 0.13       | 0.11       |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1.77    | 0.91     | 2.05       | 1.56       | 0.94       | 1.09       | 1.04     | 1.02    | 1.24       | 1.22       | 0.82       |
| FeO                            | 8.46    | 8.75     | 7.30       | 7.73       | 11.35      | 11.30      | 22.84    | 22.06   | 20.61      | 20.38      | 20.91      |
| MnO                            | 0.29    | 0.17     | 0.20       | 0.22       | 0.49       | 0.52       | 0.57     | 0.71    | 0.55       | 0.63       | 0.60       |
| MgO                            | 14.94   | 14.20    | 15.42      | 14.99      | 13.48      | 13.14      | 22.48    | 22.95   | 23.64      | 23.09      | 23.67      |
| CaO                            | 21.06   | 22.64    | 21.69      | 22.07      | 20.10      | 20.89      | 0.52     | 0.45    | 0.46       | 0.42       | 0.61       |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.39    | 0.36     | 0.43       | 0.32       | 0.47       | 0.43       | 0.08     | 0.02    | 0.00       | 0.02       | 0.00       |
| K <sub>2</sub> O               | 0.11    | 0.00     | 0.06       | 0.01       | 0.00       | 0.01       | 0.02     | 0.00    | 0.00       | 0.00       | 0.01       |
| Total wt%                      | 100.71  | 99.06    | 101.06     | 100.60     | 100.66     | 100.86     | 99.38    | 100.55  | 100.02     | 100.00     | 100.57     |

| cation is on the basis of O = 6 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Si                              | 1.980 | 1.961 | 1.959 | 1.959 | 1.988 | 1.975 | 1.947 | 1.970 | 1.970 | 1.991 | 1.979 |
| Al                              | 0.076 | 0.04  | 0.088 | 0.067 | 0.04  | 0.048 | 0.051 | 0.045 | 0.054 | 0.053 | 0.036 |
| Ti                              | 0.007 | 0.001 | 0.008 | 0.008 | 0.007 | 0.005 | 0.056 | 0.002 | 0.004 | 0.004 | 0.003 |
| Fe <sup>3+</sup>                | 0.000 | 0.059 | 0.011 | 0.023 | 0.004 | 0.024 | 0.664 | 0.012 | 0.000 | 0.000 | 0.001 |
| Fe <sup>2+</sup>                | 0.257 | 0.218 | 0.212 | 0.213 | 0.345 | 0.326 | 0.018 | 0.670 | 0.636 | 0.627 | 0.642 |
| Mn                              | 0.009 | 0.005 | 0.006 | 0.007 | 0.015 | 0.016 | 1.264 | 0.022 | 0.017 | 0.020 | 0.019 |
| Mg                              | 0.810 | 0.800 | 0.840 | 0.813 | 0.739 | 0.726 | 0.021 | 1.266 | 1.301 | 1.267 | 1.298 |
| Ca                              | 0.821 | 0.916 | 0.849 | 0.900 | 0.831 | 0.861 | 0.006 | 0.018 | 0.018 | 0.017 | 0.024 |
| Na                              | 0.028 | 0.026 | 0.030 | 0.023 | 0.033 | 0.031 | 0.001 | 0.001 | 0.000 | 0.001 | 0.000 |
| K                               | 0.005 | 0.000 | 0.003 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Total                           | 3.992 | 4.030 | 4.006 | 4.012 | 4.002 | 4.013 | 4.029 | 4.007 | 4.000 | 3.980 | 4.001 |
| Wo                              | 43    | 46    | 44    | 46    | 43    | 44    | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     |
| En                              | 43    | 40    | 44    | 42    | 38    | 37    | 62    | 64    | 66    | 66    | 65    |
| Fs                              | 14    | 14    | 12    | 12    | 19    | 19    | 36    | 35    | 33    | 34    | 33    |
| XMg                             | 0.76  | 0.79  | 0.80  | 0.79  | 0.68  | 0.69  | 0.66  | 0.65  | 0.67  | 0.67  | 0.67  |

注: 表中数据由日本神户大学 VBL 重点实验室电子探针室测试, 测试者: 厉子龙, 以下同。Fe<sup>3+</sup> 计算据 Droop( 1985 )。

斜方辉石: SiO<sub>2</sub> 为 51.64 ~ 54.83%; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 较低, 为 0.75 ~ 1.42%; CaO 为 0.52 ~ 1.42。其 Mg/( MgO + FeO<sup>2+</sup> ) 介于 0.65 ~ 0.71 之间( 图 4 ), 且 Mg/( MgO + FeO<sup>2+</sup> ) 值与寄主岩石中

成分具较好的正相关关系。本区麻粒岩中斜方辉石的 FeO 值和相应的 Mg/( Mg + Fe<sup>2+</sup> ) 比值显示为典型的紫苏辉石。以( 镁 ) 紫苏辉石为主, En<sub>61-66</sub> Fs<sub>31-38</sub> Wo<sub>1-3</sub>。斜方辉石是中基性麻粒岩的标志性矿物, 可以利用斜方辉石成分进行火成或变质

紫苏辉石的成因判别。在( MgO + FeO<sup>2+</sup> )对 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Fe<sup>2+</sup> / ( Mg + Fe<sup>2+</sup> )对 Ca/( Ca + Fe<sup>2+</sup> + Mg )图上( Riemeijir, 1983 ), 本区麻粒岩中紫苏辉石样品点落入了变质成因区, 部分落入过渡区( 图 5 )。所以该区麻粒岩中紫苏辉石应为变质成因。

表 2 阿尔泰基性麻粒岩的角闪石电子探针分析

Table 2 Representative amphibole compositions of Altay mafic granulites

| 岩石名称                           | 细粒麻粒岩粗粒麻粒岩 |         |            |
|--------------------------------|------------|---------|------------|
| 样号                             | ALT0310    | ALT0311 | FY0826-5-9 |
| 分析点                            | 1          | 48      | 8          |
| SiO <sub>2</sub>               | 43.33      | 47.70   | 43.22      |
| TiO <sub>2</sub>               | 2.36       | 1.92    | 2.72       |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 9.31       | 8.34    | 10.80      |
| FeO                            | 15.33      | 12.39   | 16.69      |
| MnO                            | 0.11       | 0.18    | 0.31       |
| MgO                            | 12.90      | 14.23   | 10.67      |
| CaO                            | 11.42      | 11.42   | 11.13      |
| Na <sub>2</sub> O              | 1.52       | 1.06    | 2.08       |
| K <sub>2</sub> O               | 0.89       | 0.85    | 1.09       |
| F                              | 0.02       | 0.02    | 0.05       |
| Cl                             | 0.10       | 0.10    | 0.10       |
| Total wt%                      | 97.27      | 98.21   | 98.86      |
| O = 23                         |            |         |            |
| Si                             | 6.505      | 6.919   | 6.439      |
| Al-4                           | 1.495      | 1.081   | 1.561      |
| Al-6                           | 0.152      | 0.345   | 0.335      |
| Ti                             | 0.266      | 0.209   | 0.305      |
| Fe <sup>3+</sup>               | 0.888      | 0.546   | 0.448      |
| Fe <sup>2+</sup>               | 1.037      | 0.957   | 1.631      |
| Mn                             | 0.014      | 0.022   | 0.039      |
| Mg                             | 2.887      | 3.077   | 2.370      |
| Ca                             | 1.837      | 1.775   | 1.777      |
| Na( B )                        | 0.163      | 0.225   | 0.223      |
| Na( A )                        | 0.279      | 0.073   | 0.377      |
| K                              | 0.170      | 0.157   | 0.207      |
| F                              | 0.009      | 0.009   | 0.024      |
| Cl                             | 0.013      | 0.012   | 0.013      |
| F/( F + Cl + OH )              | 0.005      | 0.005   | 0.012      |
| Cl/( F + Cl + OH )             | 0.006      | 0.006   | 0.006      |
| Total                          | 15.706     | 15.419  | 15.767     |
| Mg/( Mg + Fe <sup>2+</sup> )   | 0.736      | 0.763   | 0.592      |

注: Fe<sup>3+</sup> 计算据 Droop( 1985 )。

单斜辉石: 在 En-Fs-Wo 分类图解上, 粗粒麻粒岩和细粒麻粒岩中的单斜辉石皆为镁质普通辉石和透辉石( 图 4 ), 其端元组分为 Wo<sub>26-46</sub> En<sub>37-53</sub> Fs<sub>13-23</sub>, 富镁, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为 0.91 ~ 2.92%。据单斜辉石的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> 图解判别( 据 Vejnax, 1975, 转引自沈其韩等, 2000 ), 这些单斜辉石具低 TiO<sub>2</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 说明为变质成因。

角闪石: 据 Leake 的分类( 1997 ), 角闪石为钙质角闪石, 以镁质角闪石为主。Mg/( Mg + Fe<sup>2+</sup> )为 0.65 ~ 0.88, Ti 含量较高, 为 0.12 ~ 0.20, Al<sup>IV</sup> 为 0.42 ~ 1.24。角闪石中氟和氯含量较低, 分别为 <0.02 和 0.10 ~ 0.12%, 说明在角闪石形成的麻粒岩相-角闪岩相变质作用过程中氟和氯流体不起主要作用。在 Ti-Al<sup>IV</sup> 图解和( Na + K )-Ti 图解中( 据萨克路特金, 1968, 转引自靳是琴和李鸿超, 1986, 图 6 ), 角闪石成分点多数落入麻粒岩相和高角闪岩相范围, 表明其形成温度较高, 还有少量落入绿帘角闪岩相范围。

黑云母: 黑云母为镁质黑云母( 图 7 ); TiO<sub>2</sub> 含量富集, 为 3.20 ~ 4.59%; Mg/( Fe + Mg )为 0.57 ~ 0.72。黑云母中氟和氯含量较低, 分别为 <0.25 和 <0.07%, 氟含量要比氯含量稍高一些( 图 8 ), 表明氟和氯流体作用对高温矿物黑云母的形成不明显, 暗示其它成分的流体起主要作用。在 TiO<sub>2</sub> 对 Fe/( Fe + Mg )图上( 索书田等, 1993 ), 本区麻粒岩的黑云母成分位于麻粒岩相区, 表明其形成温度较高( 图 9 )。

斜长石中 An 成分较集中, 一般 29 ~ 62 mol% 之间( 表 4 ), 环带成分中核部成分偏基性, 边部成分偏中酸性。

从麻粒岩的矿物成分、矿物变质反应及变质 P-T 条件估计, 阿尔泰麻粒岩至少经历了二期变质作用过程。

第一期峰期麻粒岩相变质作用: 阿尔泰麻粒岩的峰期温压条件为高温中压, 紫苏辉石、普通辉石、斜长石, 还有部分角闪石和黑云母也出现。通过 Wood 等( 1973 ), Wells ( 1977 )和 Brey 等( 1990 )二辉石温压计计算方法, 除 Wells 法计算值偏高外, 其它方法估计得出其变质顶峰的温度为 750 ~ 780°C ( Li *et al.*, 2004 )。用角闪石-斜方辉石对和角闪石-单斜辉石对温度估算方法( Perchuk, 1969 )分别得出 780 ~ 800°C 和 760 ~ 780°C。翟明国等( 2001 )报道麻粒岩相的温度范围一般为 700 ~ 900°C, 压力约为 0.3 ~ 1.2 GPa; 且最新的大量数据显示, 麻粒岩的峰期变质的 P-T 条件为 800 ± 50°C 和 0.7 ± 0.1 GPa 附近( 翟明国等, 2001 )。以翟明国等( 2001 )报道中麻粒岩的峰期压力值作为参考值, 阿尔泰麻粒岩其峰期的压力值可能达到 0.6 ~ 0.7 GPa。

第二期退变质过程角闪岩相变质作用: 矿物组合为角闪石和斜长石为主。据角闪石-斜长石温度计( 张儒媛等, 1983 )估算结果显示该期形成的温度条件为 700 ~ 720°C, 温度值明显偏高, 而根据 Holland 和 Blundy( 1994 )的计算方法, 在 0.4 GPa 压力条件下估算温度条件大致为 590 ~ 620°C。用 Hollister ( 1987 )提出的经验角闪石地质压力计估算的压力为 0.23 ~ 0.37 GPa。

表 3 阿尔泰基性麻粒岩的黑云母电子探针分析

Table 3 Representative biotite compositions of Altay mafic granulites

| 岩石名称                           | 粗粒麻粒岩   |         |         |         | 细粒麻粒岩      |            |            |            |
|--------------------------------|---------|---------|---------|---------|------------|------------|------------|------------|
|                                | ALT0311 | ALT0311 | ALT0310 | ALT0310 | FY082410-4 | FY0826-5-4 | FY0826-5-9 | FY0826-5-9 |
| 样号                             | 41      | 42      | 9       | 20      | 32         | 85         | 10         | 18         |
| 分析点                            | 41      | 42      | 9       | 20      | 32         | 85         | 10         | 18         |
| SiO <sub>2</sub>               | 38.80   | 38.67   | 38.43   | 37.06   | 37.58      | 38.09      | 37.68      | 37.89      |
| TiO <sub>2</sub>               | 3.42    | 3.96    | 4.52    | 3.95    | 3.65       | 4.81       | 4.11       | 3.66       |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 14.83   | 14.78   | 14.25   | 14.24   | 15.09      | 14.21      | 14.26      | 14.17      |
| FeO                            | 15.83   | 15.67   | 15.69   | 15.14   | 13.96      | 12.93      | 17.33      | 18.52      |
| MnO                            | 0.06    | 0.00    | 0.01    | 0.00    | 0.04       | 0.01       | 0.06       | 0.03       |
| MgO                            | 15.34   | 14.77   | 14.33   | 13.84   | 16.43      | 15.95      | 12.68      | 12.97      |
| CaO                            | 0.07    | 0.03    | 0.03    | 0.33    | 0.03       | 0.04       | 0.07       | 0.03       |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.07    | 0.09    | 0.04    | 0.11    | 0.05       | 0.00       | 0.11       | 0.05       |
| K <sub>2</sub> O               | 10.40   | 10.74   | 10.92   | 9.59    | 10.88      | 10.99      | 10.72      | 9.94       |
| F                              | 0.04    | 0.13    | 0.24    | 0.06    | 0.28       | 0.30       | 0.10       | 0.22       |
| Cl                             | 0.05    | 0.05    | 0.05    | 0.05    | 0.02       | 0.01       | 0.05       | 0.04       |
| Total wt%                      | 98.91   | 98.89   | 98.51   | 94.37   | 98.01      | 97.34      | 97.17      | 97.52      |
| O = 22                         |         |         |         |         |            |            |            |            |
| Si                             | 5.620   | 5.615   | 5.623   | 5.619   | 5.635      | 5.580      | 5.631      | 5.648      |
| Al                             | 2.532   | 2.529   | 2.457   | 2.545   | 2.532      | 2.453      | 2.512      | 2.489      |
| Ti                             | 0.373   | 0.433   | 0.497   | 0.450   | 0.391      | 0.530      | 0.462      | 0.410      |
| Fe                             | 1.725   | 1.711   | 1.727   | 1.727   | 1.495      | 1.425      | 1.948      | 2.076      |
| Mn                             | 0.007   | 0.000   | 0.001   | 0.000   | 0.005      | 0.001      | 0.008      | 0.004      |
| Mg                             | 3.313   | 3.197   | 3.126   | 3.129   | 3.487      | 3.483      | 2.825      | 2.882      |
| Ca                             | 0.011   | 0.005   | 0.005   | 0.054   | 0.005      | 0.006      | 0.011      | 0.005      |
| Na                             | 0.020   | 0.025   | 0.011   | 0.032   | 0.014      | 0.000      | 0.032      | 0.014      |
| K                              | 1.922   | 1.989   | 2.038   | 1.855   | 1.976      | 2.054      | 2.044      | 1.890      |
| Total                          | 15.521  | 15.505  | 15.485  | 15.410  | 15.538     | 15.533     | 15.472     | 15.419     |
| F                              | 0.018   | 0.060   | 0.111   | 0.029   | 0.126      | 0.139      | 0.047      | 0.104      |
| Cl                             | 0.012   | 0.012   | 0.012   | 0.013   | 0.005      | 0.002      | 0.013      | 0.010      |
| Mg/(Mg + Fe)                   | 0.658   | 0.651   | 0.644   | 0.644   | 0.700      | 0.710      | 0.592      | 0.581      |
| F/(F + Cl + OH)                | 0.005   | 0.015   | 0.028   | 0.007   | 0.032      | 0.035      | 0.012      | 0.026      |
| Cl/(F + Cl + OH)               | 0.003   | 0.003   | 0.003   | 0.003   | 0.001      | 0.001      | 0.003      | 0.003      |
| Log(fH <sub>2</sub> O)/(fHF)   | 7.503   | 6.975   | 6.688   | 7.283   | 6.726      | 6.698      | 6.977      | 6.612      |
| Log(fH <sub>2</sub> O)/(fHCl)  | 5.255   | 5.244   | 5.229   | 5.222   | 5.685      | 5.980      | 5.183      | 5.266      |
| Log(fHF)/(fHCl)                | -3.106  | -2.578  | -2.294  | -2.896  | -1.970     | -1.664     | -2.542     | -2.076     |

注: Log(fH<sub>2</sub>O/fHF)等按温度 380°C 时计算的结果, 方法见 Munoz (1992)。FeO 和 Fe 分别为全部氧化亚铁和二价铁。

表 4 阿尔泰基性麻粒岩的斜长石电子探针分析

Table 4 Representative plagioclase compositions of Altay mafic granulites

| 岩石名称                           | 粗粒麻粒岩    |         |         |         | 细粒麻粒岩      |            |            |            |
|--------------------------------|----------|---------|---------|---------|------------|------------|------------|------------|
|                                | ALT-0310 | ALT0310 | ALT0311 | ALT0311 | FY0826-5-4 | FY0826-5-4 | FY0826-5-9 | FY0826-5-9 |
| 样号                             |          |         |         |         |            |            |            |            |
| 分析点                            | 11       | 16      | 37      | 46      | 75         | 92         | 4          | 14         |
| SiO <sub>2</sub>               | 52.01    | 59.21   | 55.56   | 58.50   | 53.55      | 56.46      | 59.26      | 62.03      |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 30.25    | 26.10   | 28.61   | 25.74   | 29.76      | 28.03      | 26.25      | 23.76      |
| CaO                            | 11.43    | 8.44    | 11.26   | 8.23    | 12.25      | 10.96      | 8.60       | 5.79       |
| Na <sub>2</sub> O              | 5.02     | 6.43    | 4.82    | 6.60    | 4.21       | 4.99       | 6.41       | 7.57       |
| K <sub>2</sub> O               | 0.17     | 0.24    | 0.27    | 0.07    | 0.24       | 0.32       | 0.25       | 0.43       |
| Total wt%                      | 99.26    | 100.63  | 100.73  | 99.32   | 100.18     | 100.97     | 100.96     | 99.73      |
| O = 8                          |          |         |         |         |            |            |            |            |
| Si                             | 2.377    | 2.629   | 2.486   | 2.630   | 2.417      | 2.507      | 2.624      | 2.757      |
| Al                             | 1.629    | 1.366   | 1.509   | 1.364   | 1.583      | 1.488      | 1.37       | 1.245      |
| Ca                             | 0.560    | 0.402   | 0.540   | 0.396   | 0.593      | 0.522      | 0.408      | 0.276      |
| Na                             | 0.445    | 0.554   | 0.418   | 0.575   | 0.369      | 0.430      | 0.550      | 0.652      |
| K                              | 0.010    | 0.014   | 0.015   | 0.004   | 0.014      | 0.018      | 0.014      | 0.024      |
| Total                          | 5.035    | 4.971   | 4.976   | 4.977   | 4.982      | 4.973      | 4.973      | 4.959      |
| An                             | 55%      | 41%     | 55%     | 41%     | 61%        | 54%        | 42%        | 29%        |
| Ab                             | 44%      | 57%     | 43%     | 59%     | 38%        | 44%        | 57%        | 68%        |
| Or                             | 1%       | 1%      | 2%      | 0%      | 1%         | 2%         | 1%         | 3%         |

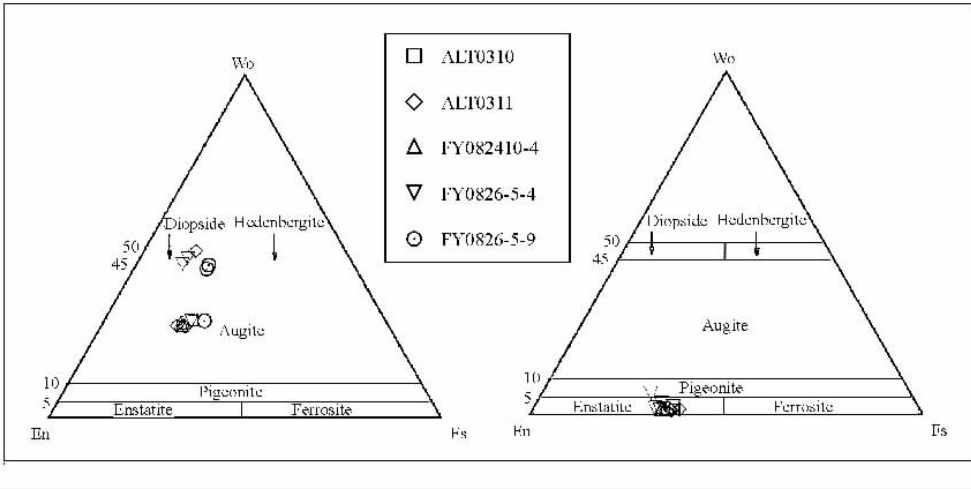


图4 单斜辉石(左)和斜方辉石(右)的Wo-En-Fs三角分类图

注:样品中前三个为粗粒麻粒岩,后两个为细粒麻粒岩,以下图中样品的符号同此图

Fig. 4 Wo-En-Fs triangle diagram for clinopyroxenes and orthopyroxenes from the Altay mafic granulites

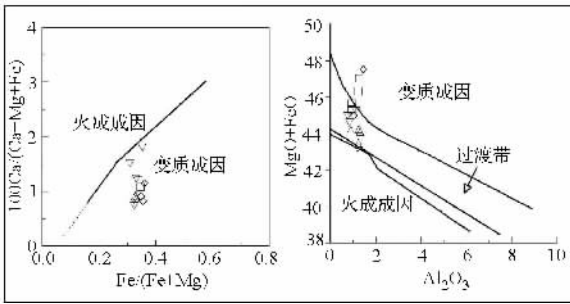


图5 阿尔泰麻粒岩的紫苏辉石 Fe/(Fe + Mg) 对 100Ca/(Ca + Mg + Fe) 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 对 (MgO + FeO) 成因判别图(据 Riemer, 1983)

Fig. 5 Fe/(Fe + Mg) vs. 100Ca/(Ca + Mg + Fe) and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> vs. (MgO + FeO) genetic discriminative diagrams for orthopyroxenes from the Altay mafic granulites

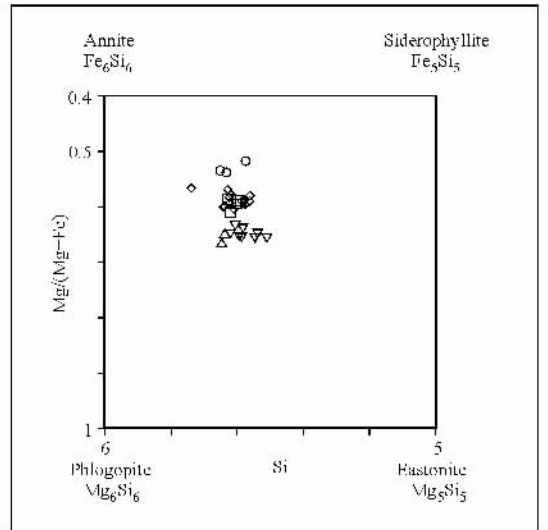


图7 麻粒岩中黑云母的Si对Mg/(Mg + Fe)分类图

Fig. 7 Si vs. Mg/(Mg + Fe) diagram for biotites from the Altay mafic granulites

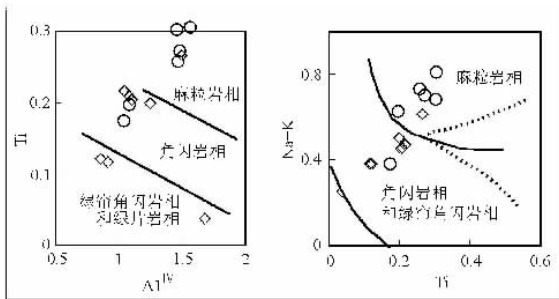


图6 阿尔泰麻粒岩中角闪石的Ti-Al<sup>IV</sup>和(Na + K)-Ti变质相判别图解(据萨克路特金,1968,转引自靳是琴和李鸿超,1986)其中菱形和虚圈符号分别代表粗粒麻粒岩和细粒麻粒岩

Fig. 6 Ti-Al<sup>IV</sup> and (Na + K)-Ti metamorphic facies discriminative diagrams for amphiboles from the Altay mafic granulites

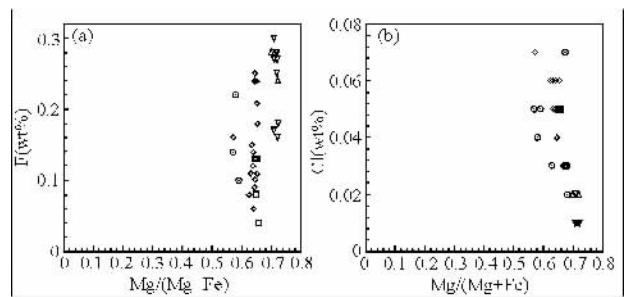


图8 阿尔泰麻粒岩中黑云母的Mg/(Mg + Fe)对F及Cl图解(来自 Munoz, 1984)

Fig. 8 Mg/(Mg + Fe) vs. F and Mg/(Mg + Fe) vs. Cl diagrams for biotites from the Altay mafic granulites



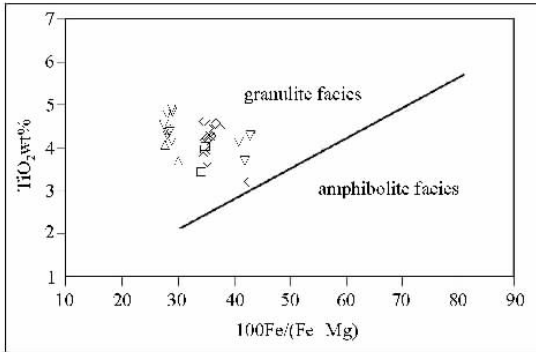


图9 阿尔泰麻粒岩中黑云母的  $100\text{Fe}/(\text{Mg} + \text{Fe})$  对  $\text{TiO}_2$  图解(据索书田等,1993)

Fig. 9  $100\text{Fe}/(\text{Mg} + \text{Fe})$  vs.  $\text{TiO}_2$  diagram for biotites from the Altay mafic granulites

## 5 初步的结论

(1) 通过笔者详细的岩相学和矿物学研究,证实了阿尔泰地区基性麻粒岩的存在。其形成的矿物,如辉石、部分角闪石和黑云母为高温变质的产物。

(2) 矿物特征和矿物成分特征以及温压估算证实阿尔泰基性麻粒岩是经麻粒岩相变质作用及随后的角闪岩相退变质作用而形成。部分角闪石和黑云母为高温下含水矿物、较低的氟和氯含量及较高的水逸度,指示麻粒岩相变质作用及以后发生有一定的含水而氟和氯流体作用不显著的地质环境中。

(3) 阿尔泰地区麻粒岩产出的位置属新疆北部额尔齐斯构造带中。虽然在旧苏联额尔齐斯构造带中存在麻粒岩,可是在新疆北部额尔齐斯构造带中尚未见有麻粒岩的报道(韩宝福,1991)。新疆北部额尔齐斯构造带是与旧苏联额尔齐斯构造带相连,为同一构造的东、西组成部分,且它们的地质特征基本相同或十分相似(韩宝福,1991)。可以说,中国境内阿尔泰地区基性麻粒岩的发现,将对新疆北部额尔齐斯构造带和旧苏联额尔齐斯构造带进行下地壳成分、麻粒岩的成因与变质作用以及所处的大地构造背景等进行对比,无疑将起到非常重要的作用。

**致谢** 此项研究得到日本神户大学 Venture Business Laboratory 电子探针室 Dr. N. Tomioka 在仪器的使用、日本神户大学 Tainosho 实验室 Drs. Arai, K. Morioka 和 Kanamaru 在 X 射线荧光分析测试方面给予的支持,参加野外地质考察的还有董传万教授、研究生林秀斌、余星和王建,本文在完成初稿的写作过程中得到中国科技大学地球和空间学院郑永飞教授的支持和鼓励,在此一并表示衷心感谢。

## References

Brey GP, Kohler TP. 1990. Geothermobarometry in four-phase lherzolites: II. New thermobarometers and practical assessment of existing thermobarometers. *J. Petrol.*, (6):1353 - 1378

Charvet J, Laurent-Charvet S, Shu L, and Ma R. 2001. Paleozoic continental accretions in Central Asia around Junggar block: new structural and geochronological data. *Gondwana Research*, 4:590 - 591

Coleman RG. 1989. Continental growth of northwest China. *Tectonics*, 8 (3):621 - 635

Droop GTR. 1987. A general equation for estimating  $\text{Fe}^{3+}$  concentration in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analysis using stoichiometric criteria. *Mineralogical Magazine*, 51:431-435

Fang Tonghui, Wang Jingbin, Zhang Jinhong, Ding Rufu. 2002. Proterozoic basaltic magma intrusion event in the Altai, Xinjiang. *Geology in China*, 29(1):48 - 54 (in Chinese with English abstract)

Federovskii V S, Khain E V, Vladimirov A G, Karkopolov S A, Gibsher A S, and Izokh A E. 1995. Tectonics, metamorphism, and magmatism of collisional zones of the Central Asian Caledonides. *Geotectonics*, 29: 93 - 212

Han B, Wang S, Jahn B, Hong D, Kagami H, and Sun Y. 1997. Depleted-mantle source for the Ulungur River A-type granites from North Xinjiang, China: geochemistry and Nd-Sr isotopic evidence, and implications for Phanerozoic crustal growth. *Chem. Geol.*, 138:135 - 159

Han Baofu. 1991. Doubts about the age of strata within the Ertix compressed zone in northern Xinjiang. *Regional Geology of China*, 2: 169 - 175 (in Chinese with English abstract)

He Guoqi, Han Baofu, Yue Yongjun, Wang J. 1990. Tectonic division and crustal evolution of Altay orogenic belt in China. *Geoscience of Xinjiang*, 2: 9 - 20 (in Chinese with English abstract)

Holland, T., Blundy, J. 1994. Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 116: 433 - 447

Hollister L S, et al. 1987. Confirmation of the empirical correlation of aluminium in hornblende with pressure of solidification of calc-alkaline plutons. *Am. Mineral.*, 72: 231 - 239

Hu Aiqin, Zhang Guoxin, Li Qixin, Zhang Q F, Hu S R, Fan S K, Guo T Z. 1995. The isotopic chronological scale of major geological events in northern Xinjiang, China. *Geochimica*, 24(1): 20 - 31 (in Chinese with English abstract)

Hu AQ, Zhang GX, Zhang QF, Li TD, Zhang JB. 2002. A review on ages of Precambrian metamorphic rocks from Altai orogen in Xinjiang, NW China. *Chinese Journal of Geology*, 37(2): 129 - 142 (in Chinese with English abstract)

Laurent-Charvet S, Charvet J, Shu L, Ma R, and Lu HF. 2001. Paleozoic late collisional strike-slip deformations in Tianshan and Altai, Eastern Xinjiang, NW China. *Terra Nova*, 4: 590 - 591

Leake BE, Woolley AR, et al. 1997. Nomenclature of amphiboles: report of the subcommittee on amphiboles of the International Mineralogical Association Commission on new minerals and mineral names. *Mineral Mag.*, 61: 295 - 321

Li Sanzhong, Zhang Guowei, Li Yalin, Yang Yongcheng. 2000. Discovery of granulite in the Mianxian-Loeyang suture zone, Mianxian area and its tectonic significance. *Acta Petrologica Sinica* 16(2): 220 - 226 (in Chinese with English abstract)

Li Tiande, Poliyangsiji B H. 2001. Tectonics and crustal evolution of Altai in China and Kazakhstan. *Xinjiang Geology*, 19(1): 27 - 32 (in Chinese with English abstract)

Li Tiande, Qi Zhiming, Wu Boqing et al. 1996. New improvement of

- comparative study of geology and mineralization of Altai between China and Kazakhstan. in: Chinese Geological Society. ( ed. ) Thesis Volume of the Symposium of the 8th Five-Year Plan of Geoscience for Contribution to 30th IGC. Beijing: Metallurgical Industrial Publ. House. 256 - 259 ( in Chinese with English abstract )
- Li ZL, Chen HL, Yang SF, Dong CW, Xiao WJ, Li JL. 2003. The Discovery and genetic mechanism of the Altai basic granulite from the Altai orogenic belt. In: The 3rd Symposium of Chemical Geodynamics, Plate Subduction and Exhumation geodynamics( ed. Zheng Y F ), Hefei, China, abstract, 83 - 84 ( in Chinese )
- Li ZL, Chen HL, Yang SF, Dong CW, Xiao WJ, Li JL, Ye Y, Wang J. 2004. The discovery and genetic mechanism of Altai granulite from the Altai orogenic belt, Xinjiang, NW China. *Acta Geologica Sinica*, 78( 1 ): 147 - 155
- Liu Liang, Zhou Dingwu. 1994. The finding of high-pressure mafic granulite and its preliminary study from the Songshugou, Shangnan, East Qinglin. *Chinese Science Bulletin*, 39 ( 17 ): 1599 - 1601 ( in Chinese )
- Liu Yongsheng, Gao Shan, Luo Tingchuan. 1999. Geochemistry of granulites in north China Craton: implications for the composition of Archean lower crust. *Geology-Geochemistry*, 27( 3 ): 40 - 46 ( in Chinese with English abstract )
- Munoz, J.L. 1984. F-OH and Cl-OH exchange in micas with applications to hydrothermal ore deposits. In: Bailey, S.W. ( ed. ), *Micas, Rev. Mineral.*, 13: 469 - 494
- Munoz J.L. 1992. Calculation of HF and HCl fugacities from biotite compositions: revised equations. *Geol. Soc. Am. Abstract Programs*, 24: A221
- Perchuk LL. 1969. The effect of temperature and pressure on the equilibrium of natural iron-manganese minerals. *Internat. Geol. Rev.*, 11: 875 - 901
- Riemeijer FMJ. 1983. Chemical distinction between igneous and metamorphic orthopyroxene especially those coexisting with Ca-rich clinopyroxenes: a re-evaluation. *Mineral Mag.*, 47: 143 - 151
- Sengör AMC, Natal' In BA, Burtman VS. 1993. Evolution of the Altoid tectonic collage and Paleozoic crustal in Eurasia. *Nature*, 364( 22 ): 299 - 307
- Shen QH. 1991. Further discussion on the classification and nomenclature of granulites. *Acta Mineralogica Et Petrologica*, 10 ( 8 ): 193 - 204 ( in Chinese with English abstract )
- Shen QH, Shen Q, Geng YS, Xu HF. 2000. Formation and geological evolution of Yishui complex, Shandong, China. *Geological Publishing House, China*, 1 - 179 ( in Chinese with English abstract )
- Tarney J. 1976. Geochemistry of Archean high grade gneisses with implications as to origin and evolution of the Precambrian crust. In: Windley, B F ( ed. ), *The early history of Earth*. London ( Wiley ), 405 - 417
- Wei Chunjing, Yang Chonghui, Zhang Shouguang, Li Rongshe. 1998. Discovery of granulite from the Fuping area in southern Qinling Mountains and its geological significance. *Chinese Science Bulletin*, 43( 9 ): 983 - 985 ( in Chinese with English abstract )
- Wells RA. 1997. Pyroxene thermometry in the simple and complex systems. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 62: 129 - 139
- Windley B F, Kröner A, Guo J, Qu G, Li Y, Zhang C. 2002. Neoproterozoic to Paleozoic geology of the Altai orogen, NW China: New zircon age data and tectonic evolution. *Journal of Geology*, 110: 719 - 739.
- Wood B J, Banno S. 1973. Garnet-orthopyroxene and orthopyroxene-clinopyroxene relationship in simple and complex system. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 42: 109 - 124
- Xiao WJ, Windley BF, Badarch G, Sun S, Li JL, Qin KZ, Wang ZH. 2004. Palaeozoic accretionary and convergent tectonics of the southern Altai: implications for the lateral growth of Central Asia. *Journal of the Geological Society, London*, 161( 3 ): 339 - 342
- Xiao Xuchang, Tang Yaoqing, Li Jinyi. 1992. Tectonics in northern Xinjiang and its neighbouring areas. *Geol. Publ. House, Beijing*, 1 - 100 ( in Chinese with English abstract )
- Yu Jinhai, Fang Zhong, Zhong Xinmin, Lai Minyuan, Xu Xisheng, Zhou Xuan. 1998. Garnet granulite facies xenoliths from Yingfengling Cenozoic basalt in Leizhou, Guangdong Province. *Chinese Science Bulletin*, 43( 18 ): 1988 - 1992 ( in Chinese with English abstract )
- Yu Jinhai, Zhao Lei, Xu Xisheng. 2002. Discovery and implications of granulite facies xenoliths from some Cenozoic basalts, SE China. *Geological Journal of China University*, 8( 3 ): 280 - 282 ( in Chinese with English abstract )
- Yu Liangjun, Liu Xiaohan, Zhao Yue, Ju Yitai, Liu Xiaochun. 2002. Metamorphism of mafic granulites in the Grove Mountains, East Antarctica. *Acta Petrologica Sinica*, 18( 4 ): 501 - 516 ( in Chinese with English abstract )
- Yuan X. 1999. The global geoscience transect from Altai, China to the Philippine Sea and Taiwan: *International Geology Review*, 41: 275 - 286
- Zhai Mingguo. 1991. The main characteristics of granulites in north China and the orientation of further research on them. *Acta Petrologica Sinica*, 4: 66 - 77 ( in Chinese with English abstract )
- Zhai Mingguo, Liu Wenjun. 2001. The formation of granulites and its contribution to evolution of the continental crust. *Acta Petrologica Sinica*, 17( 1 ): 28 - 38
- Zhang Jianxin, Wang Yusheng, Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Meng Fancong. 2001. Discovery of mafic granulite and its formation age in Delingha area, North Qaidam Mountains. *Acta Petrologica Sinica*, 17( 3 ): 453 - 458 ( in Chinese with English abstract )
- Zhang Ruyuan, Cong Bolin. 1983. *Geothermometer and geobarometer*. Beijing: Geological Publishing House, 23 - 216 ( in Chinese with English abstract )
- Zhuang Yuxun. 1994. The *PT St* evolution of metamorphism and development mechanism of the thermal-structural-gneiss domes in the Chinese Altai. *Acta Geologica Sinica*, 68( 1 ): 35 - 47 ( in Chinese with English abstract )

#### 附中文参考文献

- 方同辉, 王京彬, 张进红, 丁汝福. 2002. 新疆阿尔泰山古代基性岩浆侵入事件. *中国地质*, 29( 1 ): 48 - 54
- 韩宝福. 1991. 新疆北部额尔齐斯挤压带地层时代质疑. *中国区域地质*, 2: 169 - 175
- 何国琦, 韩宝福, 岳永军, 王嘉桁. 1990. 中国阿尔泰山造山带的构造分区和地壳演化. *新疆地质科学*, 2: 9 - 20
- 胡嵩琴, 张国新, 李启新等. 1995. 新疆北部主要地质事件同位素年表. *地球化学*, 24( 1 ): 20 - 31
- 胡嵩琴, 张国新, 张前锋, 李天德, 张积斌. 2002. 阿尔泰山造山带变质岩系时代问题的讨论. *地质科学*, 37( 2 ): 129 - 142
- 靳是琴, 李鸿超. 1986. *成因矿物学概论* (下册). 长春: 吉林大学出版社, 1986, 1 - 318
- 李三忠, 张国伟, 李亚林, 杨永成. 2000. 勉县地区勉略带内麻粒岩的发现及构造意义. *岩石学报*, 16( 2 ): 220 - 226
- 李天德, 波里扬斯基 B. H. 2001. 中国和哈萨克斯坦阿尔泰山大地构造及地壳演化. *新疆地质*, 19( 1 ): 27 - 32
- 李天德, 祁志明, 吴柏青等. 1996. 中国和哈萨克斯坦阿尔泰山地质及成矿研究的新进展. 见: 中国地质学会编, 献给三十届国际地质大会“八五”地质科技重要成果学术交流会议论文集, 北京:

冶金工业出版社,256-259

- 厉子龙,陈汉林,杨树锋,董传万,肖文交,李继亮. 2003. 阿尔泰造山带基性麻粒岩的发现及其成因机制探讨. 见郑永飞主编,《板块俯冲和折返的地球动力学论文摘要》,全国第三届化学地球动力学学术讨论会,合肥,2003年11月,中国科学技术大学,83-84
- 刘良,周鼎武. 1994. 东秦岭商南松树沟高压基性麻粒岩的发现及初步研究. 科学通报,39(17):1599-1601
- 刘勇胜,高山,骆庭川. 1999. 华北克拉通麻粒岩的地球化学特征及其对太古宙下地壳组成的指示意义. 地质地球化学,27(3):40-46
- 沈其韩. 1991. 再论麻粒岩的分类命名. 岩石矿物学杂志,10(8):193-204
- 沈其韩,沈昆,耿元生,徐惠芬. 2000. 山东沂水杂岩的组成与地质演化. 地质出版社,1-179
- 索书田,桑隆康,韩郁青等. 1993. 大别山前寒武纪变质地体岩石学与构造学. 武汉,中国地质大学出版社,121-125
- 魏春景,杨崇辉,张寿广等. 1998. 南秦岭佛坪地区麻粒岩的发现及其地质意义. 科学通报,43(9):983-985
- 肖序常,汤耀庆,李锦轶. 1992. 新疆北部及其邻区大地构造. 北京:地质出版社,1-100
- 于津海,方中,徐夕生等. 1998. 广东雷州新生代玄武岩中石榴麻粒

- 岩相岩石捕虏体的发现. 科学通报,43(18):1988-1992
- 于津海,赵蕾,徐夕生. 2002. 中国东南新生代玄武岩中麻粒岩相捕虏体的新发现及其意义. 高校地质学报,8(3):280-282
- 于津海,周新民,赵蕾,陈小明. 2003. 南岭东段麻粒岩相变质岩的发现及其地质意义. 岩石学报,19(3):461-467
- 俞良军,刘小汉,赵越,琚宜太,刘晓春. 2002. 东南极格罗夫山镁铁质麻粒岩的变质作用. 岩石学报,18(4):501-516
- 翟明国,郭敬辉,阎月华,韩秀怜,李永刚. 1992. 中国华北太古宙高压基性麻粒岩的发现及其初步研究. 中国科学(B辑),(12):1325-1330
- 翟明国,刘文军. 2001. 麻粒岩的形成及其对大陆地壳演化的贡献. 岩石学报,17(1):28-38
- 翟明国. 1991. 华北麻粒岩相岩石的主要特征及今后研究中值得注意的几个问题. 岩石学报,4:66-77
- 张建新,万渝生,许志琴,杨经绥,孟繁聪. 2001. 柴达木北缘德令哈地区基性麻粒岩的发现及其形成时代. 岩石学报,17(3):453-458
- 张儒媛,从柏林. 1983. 矿物温度计和矿物压力计. 北京:地质出版社,23-216
- 庄育勋. 1994. 中国阿尔泰造山带变质作用 PTSt 演化和热-构造-片麻岩穹窿形成机制. 地质学报,68(1):35-47