

DOI:10.13232/j.cnki.jnju.2022.06.016

## 喜马拉雅夏如淡色花岗岩-伟晶岩的矿物学特征

程飞越<sup>1</sup>, 谢磊<sup>1,2\*</sup>, 陈小明<sup>1</sup>

(1. 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 南京大学地球科学与工程学院, 南京, 210023;  
2. 关键地球物质循环前沿科学中心, 南京大学, 南京, 210023)

**摘要:**喜马拉雅夏如岩体出露大量淡色花岗岩-伟晶岩, 主要包括(含电气石-石榴子石)白云母花岗岩和花岗质伟晶岩, 局部岩石与铌钽钨等稀有金属成矿作用相关, 包含富含铌钽钨的氧化物, 如铌铁矿族矿物、骑田岭矿、黑钨矿、铌铁金红石等。为了查明夏如稀有金属矿化花岗岩-伟晶岩的岩石学、矿物学特征, 更好地了解夏如岩体稀有金属成矿特征, 对夏如岩体中出现矿化痕迹的样品进行研究, 包括含黑钨矿的白云母花岗岩、含有铌钽钨氧化物的白云母花岗岩和含有铌钽氧化物的伟晶岩作为研究对象, 同时还选取典型的未出现稀有金属矿物的白云母花岗岩(简称未矿化白云母花岗岩)进行对比研究。研究主要通过全岩地球化学主量和微量元素成分, 造岩矿物和副矿物的产状、主量和微量元素成分特征进行对比。随着样品中铌钽氧化物矿物含量的出现/增加, 电气石和石榴子石的含量也明显增加。这些花岗岩-伟晶岩富集 $\text{SiO}_2$  (72.29~75.53 wt. %), 富 $\text{Al}_2\text{O}_3$  (13.17~15.94 wt. %), 富碱( $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$  8.0~9.8 wt. %), 贫 $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  和  $\text{FeO}$ , 它们微量元素含量接近, 含铌钽伟晶岩具有较高的 Nb 和 Ta 含量。花岗岩-伟晶岩的稀土配分曲线相似, 具有明显的 Eu 负异常, 但三种具有矿化痕迹的花岗质岩石中的稀土总量(平均 $21\times 10^{-6}$ )明显低于未矿化白云母花岗岩的稀土总量(平均 $98\times 10^{-6}$ ), 且具有更明显的四分组效应。矿物学研究工作显示, 未矿化白云母花岗岩与含钨白云母花岗岩中的主要组成矿物成分相似, 含铌钽钨白云母花岗岩与含铌钽伟晶岩中的主要组成矿物成分相似, 其中白云母的 $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{FeO}$  含量, 石榴子石的 $\text{Mn}/(\text{Mn}+\text{Fe})$  比值和 Eu 负异常、电气石的 $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})$  值都显示了含铌钽钨白云母花岗岩和含铌钽伟晶岩比未矿化白云母花岗岩和含钨白云母花岗岩具有更高的岩浆演化程度。出现铌钽氧化物的花岗岩-伟晶岩中锆石的结构指示了岩浆晚期流体活动, 岩浆演化和流体活动的共同影响导致 Zr/Hf 值的降低。因此, 本次研究表明花岗岩-伟晶岩全岩成分指示流体活动更有效, 而白云母、电气石和石榴子石的成分特征指示岩浆演化过程和演化程度更有效。

**关键词:**淡色花岗岩, 造岩矿物, 花岗岩演化, 矿物学指标

**中图分类号:** P574.2; P578.94

**文献标志码:** A

## Mineralogical characteristics of the Xiaru leucogranite-pegmatite in the Himalayan orogen

Cheng Feiyue<sup>1</sup>, Xie Lei<sup>1,2\*</sup>, Chen Xiaoming<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing, 210023, China; 2. Frontiers Science Center for Critical Earth Material Cycling, Nanjing University, Nanjing, 210023, China)

**Abstract:** A large number of leucogranites and pegmatites occurred in the Xiaru pluton, Himalayan orogen, mainly including (tourmaline-garnet) muscovite granite and granitic pegmatite. Granite and pegmatite which are related to Nb-Ta-W rare-metal mineralization locally, contain Nb-Ta-W oxide minerals, such as columbite-group minerals, qitianlingite, wolframite, and

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0802), 国家自然科学基金(91855209, 42222202), 关键地球物质循环前沿科学中心“科技人才团队”项目和中央高校基本科研业务费专项资金(2022300192)

收稿日期: 2022-08-08

\* 通讯联系人, E-mail: xielei@nju.edu.cn

ilmenorutile. In order to investigate the petrological and mineralogical characteristics of the Xiaru granite-pegmatite related rare-metal mineralization, and gain insight of the rare-metal mineralization metallogenesis of the Xiaru pluton, the samples with rare-metal mineralization are selected, including muscovite granite with the occurrence of wolframite, muscovite granite with Nb-Ta-W oxide minerals and pegmatite with the occurrence of columbite-group minerals. Meanwhile, the typical muscovite granite without any rare-metal minerals (barren muscovite granite hereafter) is selected for comparison. Major and trace elements of whole rock geochemistry, the occurrence, major and trace elements of rock forming minerals and accessory minerals are comparable. The abundances of tourmaline and garnet increase significantly with the occurrence/increased abundance of Nb-Ta oxide minerals in the samples. The Xiaru granite-pegmatite are rich in  $\text{SiO}_2$  (72.29~75.53 wt.%),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (13.17~15.94 wt.%), total alkali ( $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$  8.0~9.8 wt.%), but poor in CaO, MgO and FeO. The trace elements concentrations of the granite-pegmatite are similar, and the Nb-Ta-bearing pegmatite is rich in Nb and Ta. The shapes of normalized REE patterns are similar, with obvious negative Eu anomalies. However, the mineralized granite-pegmatite have significantly lower total REE concentrations ( $\sim 21 \times 10^{-6}$  on average) than the barren muscovite granite ( $98 \times 10^{-6}$  on average), and they have more obvious REE tetrad effect. Mineralogical works show that the mineral compositions of barren muscovite granite are similar to that of W-bearing muscovite granite, while the mineral compositions of Nb-Ta-W-bearing muscovite granite are similar to that of Nb-Ta-bearing pegmatite. The  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and FeO contents of muscovite, Mn/(Mn+Fe) ratio and Eu negative anomaly of garnet, the Mg/(Mg+Fe) ratio of tourmaline show a progressive trend of magma evolution from barren muscovite granite and W-bearing muscovite granite to Nb-Ta-W-bearing muscovite granite and Nb-Ta-bearing pegmatite. The occurrences and Zr/Hf ratios of zircons in the Xiaru granite-pegmatite with Nb-Ta oxide minerals indicate strong fluid activity in the later magma. Therefore, it is suggested that whole-rock composition is indicative for the fluid activity, while the composition characteristics of muscovite, tourmaline and garnet are indicative for the process and degree of the magma evolution.

**Key words:** leucogranite, rock-forming minerals, magma evolution, mineral indicators

淡色花岗岩特指暗色矿物含量较低( $<5$  vol. %)的花岗岩。喜马拉雅造山带由新生代以来印度与亚洲碰撞形成,带中发育沿东西向展布、规模巨大的淡色花岗岩带<sup>[1]</sup>,包括二云母花岗岩、白云母花岗岩、钠长花岗岩、伟晶岩(细晶岩)等多种岩石类型<sup>[2]</sup>,它们具有高分异花岗岩的特征,与稀有金属成矿作用密切相关。在错那洞、普士拉、珠峰、告乌等多个岩体中发现Li, Be, Nb-Ta, Sn等稀有金属矿物大量赋存<sup>[3-7]</sup>,而W成矿作用相关的报道较少,目前仅在喜马拉雅东段错那洞岩体和拉隆岩体中发现与矽卡岩和蚀变带相关的W成矿作用,出现了黑钨矿和白钨矿<sup>[5,8]</sup>。而近期研究在特提斯喜马拉雅淡色花岗岩带中部的夏如岩体中发现了与铌钽钨成矿作用相关的淡色花岗岩与花岗质伟晶岩,包含大量铌铁矿-铌锰矿、骑田岭矿、黑钨矿和白钨矿<sup>[3,9]</sup>,铌钽钨成矿作用的出现表明夏如岩体在喜马拉雅诸多淡色花岗岩中具有特殊性。该稀有金属成矿作用也是目前喜马拉雅造山带内发现的最早稀有金属成矿事件(约

34~33 Ma)。在前人研究的基础上,为了全面了解夏如淡色花岗岩和伟晶岩的岩石学、矿物学特征,剖析成岩成矿的过程,本次研究选取了含钨白云母花岗岩、含铌钽钨白云母花岗岩和含铌钽伟晶岩等含有不同铌钽钨矿物的花岗岩-伟晶岩,并选取了未出现稀有金属矿物的白云母花岗岩(简称未矿化白云母花岗岩)进行了对比研究,通过全岩地球化学成分、矿物(白云母、石榴子石、电气石、锆石)EMPA(电子探针)成分和LA-ICP-MS(激光剥蚀等离子质谱仪)微量元素成分特征,从矿物学角度揭示夏如淡色花岗岩-伟晶岩的演化和稀有金属成矿作用的关系。

## 1 地质背景

喜马拉雅淡色花岗岩主要形成于48~7 Ma,大致分为三个阶段,包括始喜马拉雅阶段(44~26 Ma)、新喜马拉雅阶段(26~13 Ma)和后喜马拉雅阶段(13~7 Ma),较早的淡色花岗岩和喜马拉雅造山带的碰撞缩短阶段有关,而后两阶段的

淡色花岗岩都与造山作用晚期伸展减薄作用相关<sup>[1,10-13]</sup>。喜马拉雅淡色花岗岩根据所在的构造单元分为北部的特提斯喜马拉雅带和南部的高喜马拉雅带,特提斯喜马拉雅淡色花岗岩带分布在特提斯喜马拉雅构造单元内部,高喜马拉雅淡色花岗岩沿着藏南拆离系分布或以规模不等的岩席形式侵入高喜马拉雅单元内部<sup>[1]</sup>(图1a)。夏如穹隆位于特提斯喜马拉雅带中部,雅鲁藏布缝合带以南30 km处,出露面积约200 km<sup>2</sup>,被近东西走向的雅鲁藏布江贯穿<sup>[12,14]</sup>。穹隆核部为古生代花岗片麻岩(约478~429 Ma)和渐新世淡色花岗岩(约36~34 Ma),淡色花岗岩侵入到花岗片麻岩和中级变沉积岩(图1b)。变沉积岩的变质程度从底部的角闪岩相变质作用到顶部的低级变质作用不等<sup>[14-16]</sup>。夏如淡色花岗岩主体为含有不等量电气石-石榴子石的白云母花岗岩,野外观察到淡色花岗岩露头(图1c),密集分布的花岗质伟晶岩脉切穿白云母花岗岩(图1d),部分侵入至花岗片麻岩中。本次研究以夏如出露的白云母花岗岩和伟晶岩为研究对象,根据富铌钽钨矿物(铌铁矿族矿物(化学式为 $(\text{Fe}, \text{Mn})(\text{Nb}, \text{Ta})_2\text{O}_6$ )、骑田岭矿 $((\text{Fe}, \text{Mn})_2(\text{Nb}, \text{Ta})_2\text{WO}_{10})$ 、黑钨矿 $((\text{Mn}, \text{Fe})\text{WO}_4)$ 、白钨矿 $(\text{CaWO}_4)$ 的出现与否,分为未矿化白云母花岗岩、含钨白云母花岗岩、含铌钽钨白云母花岗岩和含铌钽伟晶岩,后三者也统称为矿化花岗岩-伟晶岩。

## 2 分析方法

全岩主量数据在核工业230研究所分析测试中心完成,采用湿化学法进行分析,具体标准参考GB/T 14506.14-2010和DZG93-05。除F元素采用离子活度计外,其他主量元素采用X射线荧光光谱仪测定,氧化物含量的相对误差低于 $\pm 5\%$ 。全岩微量元素测定在南京聚谱检测科技有限公司完成,采用Agilent 7700x型ICP-MS测定微量元素,以USGS标样(玄武岩BHVO-2、安山岩AGV-2、花岗闪长岩GSP-2)作为质控盲样,微量元素的偏离范围不超过 $\pm 10\%$ <sup>[17]</sup>。

矿物主量元素分析在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室完成,使用仪器为JEOL JXA8230型电子探针,工作条件为加速电

压15 kV,束流20 nA。分析矿物包括白云母、电气石、石榴子石、锆石。不同矿物束斑直径不同,白云母为5  $\mu\text{m}$ ,其余矿物的束斑直径为1  $\mu\text{m}$ 。主要元素的峰位测定时间是10 s,次要元素的峰位测定时间是20 s,背景测定时间为峰位时间的一半。标样包括天然矿物(角闪石、磷灰石、磷氯钼石、黄玉、钠长石、蔷薇辉石、锆石、锡石、橄榄石)和合成化合物( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SrSO}_4$ ),数据由ZAF校正程序进行统一校正<sup>[18]</sup>。

矿物微量元素分析在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室完成,实验仪器为RESolution-155(193 nm ArF 准分子激光剥蚀器)和Thermo Fisher Scientific iCAP Q等离子质谱仪。矿物的激光剥蚀频率为4.0 Hz,束斑直径为43  $\mu\text{m}$ ,白云母、电气石和石榴子石的能量密度分别为4.4, 4.6, 5.33  $\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。采用硅酸盐玻璃NIST SRM 610, NIST SRM 612和玄武岩玻璃USGS BCR-2G, USGS GSE-1G作为外标,同时采用探针主量数据中Si作为内标校正微量元素分析时仪器漂移。分析结果使用ICP MS Data Cal 9.9程序进行离线数据处理<sup>[19-20]</sup>,含量相对偏差优于 $\pm 10\%$ 。

## 3 岩相学与岩石地球化学特征

未矿化白云母花岗岩粒径在0.1~2 mm,主要矿物组成为石英(~35 vol. %)、钾长石(~30 vol. %)、钠长石(~23 vol. %)、白云母(~10 vol. %)(图2a),电气石(图2b)(1~2 vol. %)和石榴子石(图2c)(不高于0.5 vol. %)的含量较低且分布不均匀,样品部分区域未观察到石榴子石和电气石,副矿物主要有磷灰石、锆石、独居石、磷钇矿(图2d)、金红石等。

含钨白云母花岗岩粒径在0.1~2 mm,主要矿物组成为钾长石(~33 vol. %)、石英(~30 vol. %)、钠长石(~26 vol. %)、白云母(~10 vol. %)和黑云母(~0.5 vol. %)(图2e),副矿物主要有磷灰石、锆石、独居石、金红石、黑钨矿(图2f)、白钨矿等。

含铌钽钨白云母花岗岩粒径在0.1~4 mm,主要矿物组成为钾长石(~35 vol. %)、钠长石(~30 vol. %)、石英(~30 vol. %)、白云母(~5



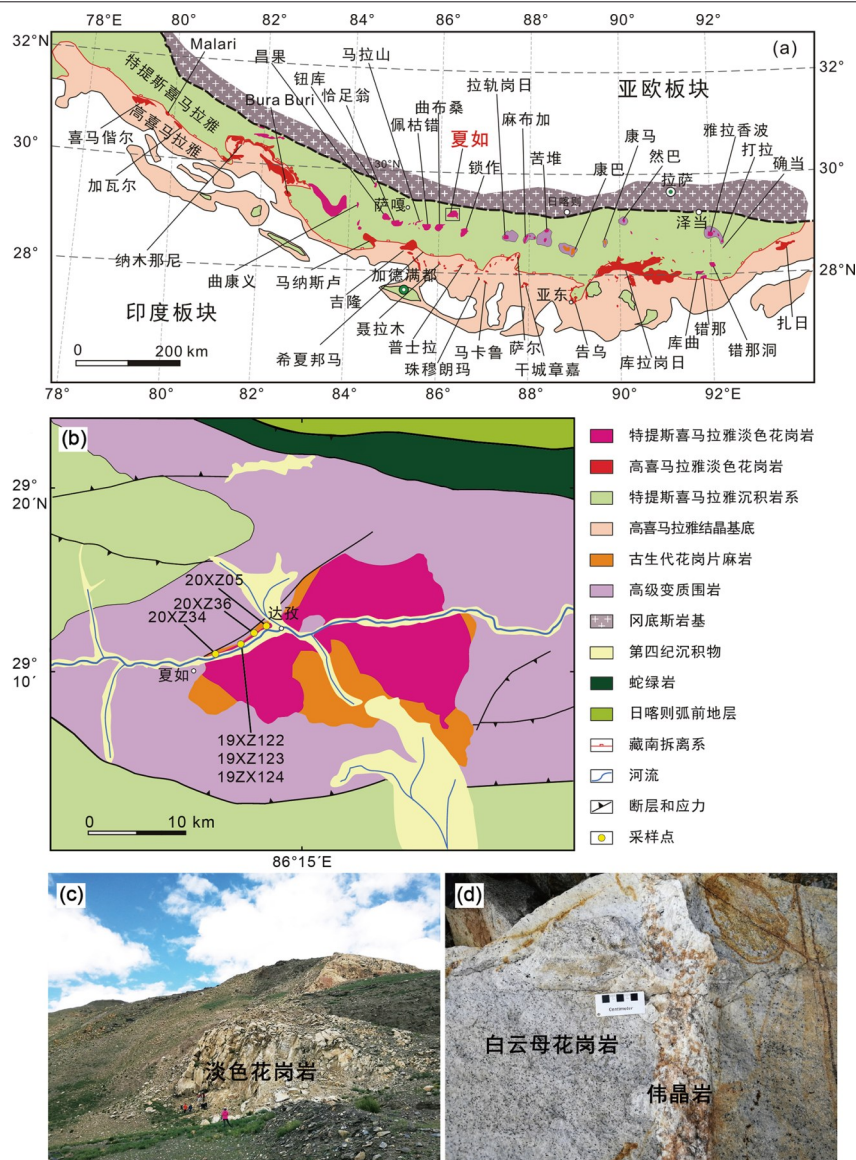


图 1 (a)喜马拉雅淡色花岗岩带地质简图(据文献[1]修改); (b)夏如岩体地质简图(据文献[14]修改); (c)夏如淡色花岗岩; (d)伟晶岩脉切穿白云母花岗岩

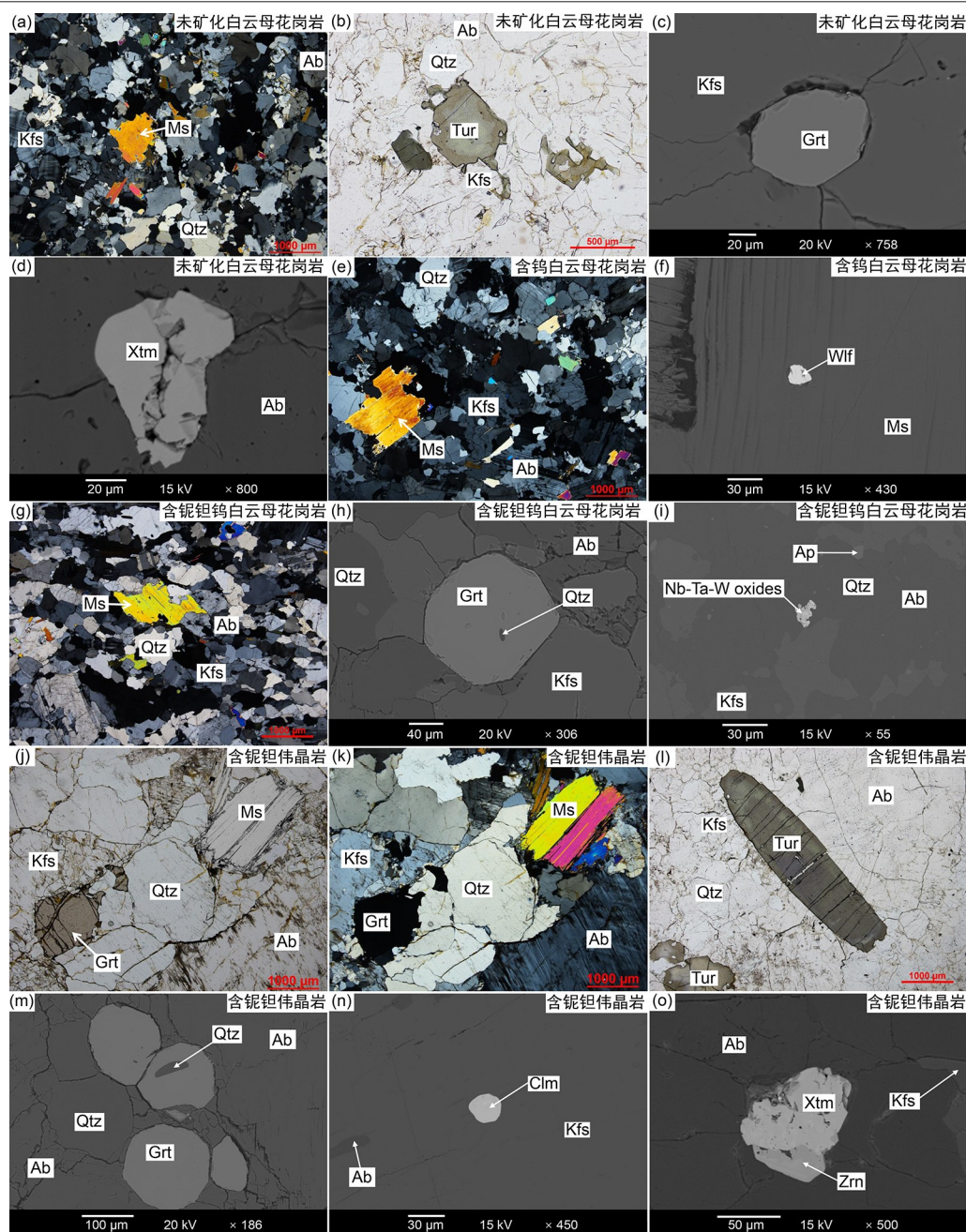
Fig. 1 Simplified geological maps of (a) Himalayan leucogranite belt (modified after ref. [1]) and (b) the Xiaru leucogranite (modified after ref. [14]), (c) the outcrop of the Xiaru leucogranite, (d) the pegmatite dike cut through the muscovite granite

vol. %)、电气石(~2 vol. %)和石榴子石(~1 vol. %)(图 2g 和图 2h),副矿物主要有铌铁矿族矿物、骑田岭矿、黑钨矿(图 2i)、白钨矿、萤石、金红石、磷灰石、锆石、独居石、磷钇矿等。

含铌钽伟晶岩中发育粗粒-巨晶矿物,粒径可达 15 mm,主要矿物组成为钠长石(~40 vol. %)、石英(~30 vol. %)、钾长石(~25 vol. %)、白云母(~2 vol. %)、电气石(~2 vol. %)和石榴子石(~

1 vol. %)(图 2j~m),副矿物主要有铌铁矿族矿物(图 2n)、铌铁金红石、磷灰石、锆石、独居石、磷钇矿(图 2o)等。

表 1 列出了本次研究中代表性样品的全岩主量元素与微量元素分析结果<sup>[9]</sup>。夏如淡色花岗岩-伟晶岩总体特征:富  $\text{SiO}_2$  (72.29~75.53 wt. %) 和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (13.17~15.94 wt. %),富碱 ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  8.0~9.8 wt. %),较低  $\text{CaO}$  (0.36~0.75



未矿化白云母花岗岩的(a,b)显微照片和(c,d)背散射电子图像,未矿化白云母花岗岩含有石英、钾长石、钠长石、白云母、电气石等矿物和石榴子石、磷钼矿等副矿物;含钨白云母花岗岩(e)的显微照片和(f)背散射电子图像;含铌钽钨白云母花岗岩的(g)显微照片和(h,i)背散射电子图像,含有石榴子石和铌钽钨氧化物;含铌钽伟晶岩的显微照片(j,k,l),包含石英、钾长石、钠长石、白云母、石榴子石、电气石等,(m,n,o)石榴子石、铌铁矿族和磷钼矿的背散射电子图像。矿物缩写:Kfs-钾长石,Ab-钠长石,Qtz-石英,Ms-白云母,Tur-电气石,Gr-石榴子石,Xtm-磷钼矿,Wlf-黑钨矿,Nb-Ta-W oxides-铌钽钨氧化物(包括铌铁矿族矿物、骑田岭矿和黑钨矿),Clm-铌铁矿族矿物,Zrn-锆石

图2 夏如淡色花岗岩-伟晶岩的显微照片和背散射电子(BSE)图像

Fig. 2 Microphotographs and backscattered electron (BSE) images of the Xiaru leucogranite-pegmatite

wt. %),  $\text{MgO}$  (0.06~0.15 wt. %) 和  $\text{FeO}$  (0.07~0.16 wt. %). 略有差异的是未矿化白云母花岗岩

中和含钨白云母花岗岩的  $\text{TiO}_2$  (0.08~0.12 wt. %),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (0.83~1.08 wt. %),  $\text{MgO}$  (0.09~



0.15 wt. %)含量较高,而含铌钽钨白云母花岗岩和含铌钽伟晶岩的  $\text{TiO}_2$  (0.01~0.04 wt. %),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (0.08~0.70 wt. %),  $\text{MgO}$  (0.06~0.07 wt. %)含量较低.

夏如淡色花岗岩-伟晶岩中 Nb, Ta, W 含量分别为  $(33\sim72)\times10^{-6}$ ,  $(6.0\sim19)\times10^{-6}$ ,  $(2.7\sim67)\times10^{-6}$ . 相较未矿化白云母花岗岩和含钨白云母花岗岩的 Nb ( $(32\sim36)\times10^{-6}$ ) 和 Ta ( $(7.8\sim9.5)\times10^{-6}$ ), 含铌钽钨白云母花岗岩和含铌钽伟晶岩中 Nb, Ta 含量较高, 分别为  $(39\sim72)\times10^{-6}$ ,  $(6.0\sim19)\times10^{-6}$ ; 出现钨矿物的含钨白云母花岗岩和含铌钽钨白云母花岗岩中 W 含量较高, 为  $(36\sim67)\times10^{-6}$ , 未矿化白云母花岗岩中 W 含量为  $(19\sim56)\times10^{-6}$ , 而含铌钽伟晶岩中 W 含量也较低, 为  $(2.7\sim15)\times10^{-6}$ . 从未矿化白云母花岗岩 (Y  $(38\sim60)\times10^{-6}$ , Th  $(15\sim25)\times10^{-6}$ ) 到出现矿化痕迹的花岗岩-伟晶岩 (Y  $(4.4\sim14)\times10^{-6}$ , Th  $(1.9\sim6.8)\times10^{-6}$ ), Y 和 Th 出现明显降低. 淡色花岗岩-伟晶岩的 Nb/Ta 值为 3.1~6.6, Zr/Hf 值为 13~27, K/Rb 值为 38~61, Y/Ho 值为 29~44, 尤其未矿化白云母花岗岩的 Zr/Hf 值 (约为 26~27), 含钨白云母花岗岩的 Zr/Hf 值 (约 22), 含铌钽钨白云母花岗岩和含铌钽伟晶岩的 Zr/Hf 值 (13~23) 呈逐渐降低的趋势.

夏如淡色花岗岩-伟晶岩的  $\Sigma\text{REE}$  总体较低, 未矿化白云母花岗岩中  $\Sigma\text{REE}$  为  $(74\sim121)\times10^{-6}$ , 含钨白云母花岗岩中  $\Sigma\text{REE}$  ( $32\times10^{-6}$ ) 略低于未矿化白云母花岗岩, 而含铌钽钨白云母花岗岩和含铌钽伟晶岩中  $\Sigma\text{REE}$  较低 ( $(10\sim26)\times10^{-6}$ ). 稀土元素球粒陨石标准化配分曲线属于“海鸥型”, 具有明显的 Eu 负异常 ( $\delta\text{Eu}$  为 0.07~0.18) (图 3), 且相较未矿化白云母花岗岩 ( $\delta\text{Eu}$  为 0.16~0.18), 含矿花岗岩-伟晶岩具有更明显的 Eu 负异常 ( $\delta\text{Eu}$  为 0.08~0.17). 从未矿化白云母花岗岩 ( $\text{TE}_{1,3}=1.08\sim1.11$ ) 到含钨白云母花岗岩 ( $\text{TE}_{1,3}=1.21$ ), 再到含铌钽钨白云母花岗岩和含铌钽伟晶岩 ( $\text{TE}_{1,3}=1.29\sim1.40$ ), 四分组效应逐渐增强.

## 4 矿物学特征

### 4.1 云母族矿物

**4.1.1 白云母** 夏如淡色花岗岩-伟晶岩中白云母呈片状, 粒径在 0.1~1.5 mm (图 2), 背散射电子图像中未见明显环带. 白云母主量元素成分显示所有白云母的  $\text{SiO}_2$  (44.64~46.90 wt. %) 和  $\text{K}_2\text{O}$  (9.83~10.53 wt. %) 含量变化范围小, 贫 CaO,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{Rb}_2\text{O}$ ,  $\text{Cs}_2\text{O}$ , F, Cl, 含量分别不高于 0.11 wt. %, 0.50 wt. %, 0.48 wt. %, 0.07 wt. %, 0.67 wt. %, 0.01 wt. %, 而其他一些元素含量有差异 (表 2, 见 1099 页). 未矿化白云母花岗岩和含钨白云母花岗岩中白云母的成分接近, 含有一定的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (29.09~32.37 wt. %),  $\text{TiO}_2$  (0.43~0.87 wt. %),  $\text{MnO}$  (0.14~0.26 wt. %),  $\text{MgO}$  (0.48~1.05 wt. %),  $\text{FeO}$  (5.29~6.59 wt. %) 和  $\text{Li}_2\text{O}$  (0.33~0.88 wt. %); 含铌钽钨白云母花岗岩和含铌钽伟晶岩中的白云母成分相似, 与前两者样品中白云母相比, 它们有更高的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量 (31.84~37.22 wt. %), 但  $\text{TiO}_2$  (0.01~0.58 wt. %),  $\text{MnO}$  (0.07~0.19 wt. %),  $\text{MgO}$  (0.05~0.55 wt. %),  $\text{FeO}$  (2.06~5.06 wt. %),  $\text{Li}_2\text{O}$  (0.04~0.44 wt. %) 含量下降 (图 4b~d, 表 2).

白云母的 V, Co 从未矿化白云母花岗岩和含钨白云母花岗岩 ( $\text{V}$   $(11\sim25)\times10^{-6}$ ,  $\text{Co}$   $(1.5\sim3.5)\times10^{-6}$ ) 到含铌钽钨白云母花岗岩和含铌钽伟晶岩 ( $\text{V}$   $(0.17\sim25)\times10^{-6}$ ,  $\text{Co}$   $(0\sim1.6)\times10^{-6}$ ) 明显降低 (图 4e; 表 2). 含铌钽伟晶岩中白云母具有最高的 Nb ( $459\times10^{-6}$ ), Ta ( $117\times10^{-6}$ ), W ( $302\times10^{-6}$ ), Sn ( $508\times10^{-6}$ ) 含量 (表 2).

**4.2 电气石** 夏如淡色花岗岩-伟晶岩中电气石粒径从 1~3 mm 不等, 在单偏光镜下呈蓝黑色-黑色 (图 2b 和图 2i), 均为黑电气石 (图 5a). 未矿化白云母花岗岩中电气石含量为 1~2 vol. %, 样品部分区域未观察到电气石, 且含钨白云母花岗岩中未观察到电气石, 而含铌钽钨白云母花岗岩和含铌钽伟晶岩中电气石含量为 2 vol. %. 电气石具有相近的  $\text{SiO}_2$  (32.98~35.34 wt. %),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (29.66~34.43 wt. %),  $\text{B}_2\text{O}_3$  (9.38~10.90 wt. %),  $\text{Na}_2\text{O}$  (1.54~2.39 wt. %) 含量, 均贫  $\text{TiO}_2$ , CaO,

表1 夏如淡色花岗岩-伟晶岩的全岩主量(wt.%)和微量成分(×10<sup>-6</sup>)分析结果

Table 1 Whole-rock major (wt.%) and trace (×10 <sup>-6</sup> ) elements of the Xiaru leucogranite-pegmatite															
岩性	未矿化白云母花岗岩		含钠白云母花岗岩		含钨钼伟晶岩		岩性	未矿化白云母花岗岩		含钠白云母花岗岩		含钨钼伟晶岩			
样号	20XZ05	20XZ34A	19XZ124	19XZ122 <sup>•</sup>	19XZ123 <sup>•</sup>	20XZ34B	20XZ36	样号	20XZ05	20XZ34A	19XZ124	19XZ122 <sup>•</sup>	19XZ123 <sup>•</sup>	20XZ34B	20XZ36
SiO <sub>2</sub> (wt.%)	72.61	72.66	75.52	75.53	72.87	72.29	74.86	Str	37	27	10	5.4	10	19	12
TiO <sub>2</sub>	0.12	0.09	0.08	0.04	0.04	0.03	0.01	Y	60	38	12	4.4	8.0	14	7.6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.05	15.14	13.17	13.52	15.43	15.94	14.02	Zr	93	67	43	20	6.7	30	28
FeO	0.11	0.16	0.07	0.11	0.14	0.15	0.12	Nb	36	36	32	58	39	72	56
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.83	1.08	1.07	0.70	0.55	0.37	0.08	Mo	0.15	0.27	0.17	0.10	0.55	0.70	0.27
MnO	0.03	0.06	0.05	0.02	0.02	0.22	0.06	Sn	24	28	25	9.1	24	9.1	1.9
MgO	0.09	0.13	0.15	0.06	0.07	0.07	0.07	Cs	61	108	50	30	41	86	22
CaO	0.38	0.75	0.56	0.48	0.49	0.36	0.69	Ba	95	78	24	4.4	15	16	3.4
Na <sub>2</sub> O	3.20	3.44	3.18	4.63	4.26	6.02	5.82	La	21	11	4.9	1.2	1.9	4.3	3.2
K <sub>2</sub> O	5.29	5.00	4.84	3.98	5.10	3.74	3.41	Ce	44	25	14	3.6	5.0	9.6	7.3
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.04	0.21	0.24	0.24	0.26	0.04	0.02	Pr	4.7	2.9	1.2	0.36	0.61	1.1	0.83
H <sub>2</sub> O	0.49	0.35	0.27	0.23	0.28	0.34	0.34	Nd	16	11	4.2	1.1	2.1	3.4	2.8
LOI	0.89	0.79	0.78	0.46	0.39	0.32	0.64	Sm	4.2	3.4	1.3	0.56	1.0	1.4	1.4
总量	99.14	99.85	99.98	99.98	99.91	99.90	100.14	Eu	0.26	0.19	0.06	0.02	0.06	0.03	0.04
F	0.14	0.15	0.13	0.08	0.08	0.04	0.02	Gd	4.3	3.7	1.3	0.54	1.0	1.3	1.2
K <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> O	8.49	8.44	8.02	8.61	9.35	9.77	9.23	Tb	1.1	0.84	0.30	0.14	0.26	0.35	0.24
A/CNK	1.29	1.22	1.15	1.06	1.15	1.09	0.97	Dy	8.2	5.8	2.1	0.92	1.5	2.1	1.3
A/NK	1.37	1.37	1.26	1.13	1.23	1.14	1.06	Ho	1.9	1.2	0.41	0.15	0.22	0.32	0.19
								Er	5.9	3.4	1.2	0.43	0.55	0.84	0.46
Li(×10 <sup>-6</sup> )	146	124	149	31	63	28	24	Tm	1.1	0.59	0.21	0.10	0.10	0.15	0.08
Be	7.3	26	5.3	4.6	6.5	17	40	Yb	7.1	3.9	1.4	0.88	0.65	1.0	0.51
B	197	376	593	780	229	61	8.1	Lu	1.0	0.56	0.20	0.12	0.08	0.12	0.07
Sc	5.9	4.8	1.2	2.3	9.9	1.4	0.41	Hf	3.4	2.6	2.0	1.5	0.29	2.3	1.4
Ti	751	661	467	220	258	191	50	Ta	8.6	7.8	9.5	17	6.0	19	18
V	2.7	2.8	2.5	0.31	0.42	1.8	0.29	W	56	19	36	67	15	3.4	2.7
Cr	3.3	5.4	0.77	0.60	7.6	8.3	4.1	Pb	30	36	21	19	26	35	41
Mn	214	512	342	124	146	1750	389	Th	25	15	6.4	4.3	1.9	6.8	3.3
Co	0.68	0.91	0.58	0.19	0.39	0.15	0.19	U	8.8	6.7	2.4	2.1	2.0	11	4.1
Ni	1.6	2.4	0.55	0.23	3.4	3.6	2.0	ΣREE	120.60	74.45	32.42	10.16	15.13	25.99	19.62
Cu	3.9	2.6	0.67	0.38	0.85	6.2	1.8	δEu	0.18	0.16	0.13	0.12	0.17	0.07	0.08
Zn	22	30	20	12	19	26	12	Ta	759.90	729.07	694.65	635.80	572.49	659.52	648.34
Ga	22	22	13	17	26	32	21	Nb/Ta	4.14	4.69	3.41	3.42	6.57	3.70	3.08
As	1.2	0.74	1.0	0.16	1.0	1.1	1.7	Zr/Hf	27.38	26.33	21.69	13.69	22.93	12.98	19.57
Se	0.72	0.53	0.20	0.13	0.30	0.15	0.23	Rb/Sr	21.09	39.96	78.87	101.29	75.20	35.17	41.54
Rb	771	1085	790	543	758	675	486	TE <sub>1.3</sub>	1.08	1.11	1.21	1.40	1.35	1.33	1.29

“■”的全岩主量和微量数据引自谢磊等<sup>[14]</sup>; δEu=Eu/Eu<sup>15</sup>; TE<sub>1.3</sub>=(TE1×TE<sub>2</sub>)<sup>0.5</sup>; TE1=(Ce/Ce<sup>15</sup>×Pr/Pr<sup>15</sup>)<sup>0.5</sup>; TE<sub>2</sub>=(Tb/Tb<sup>15</sup>×Dy/Dy<sup>15</sup>)<sup>0.5</sup>

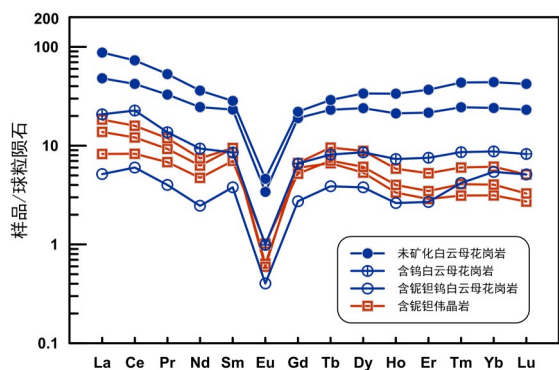


图 3 夏如淡色花岗岩-伟晶岩的稀土元素球粒陨石标准化配分曲线(标准化数据来自文献[21])

Fig. 3 Chondrite-normalized REE patterns of the Xia-ru leucogranite - pegmatite (normalized data are from ref. [21])

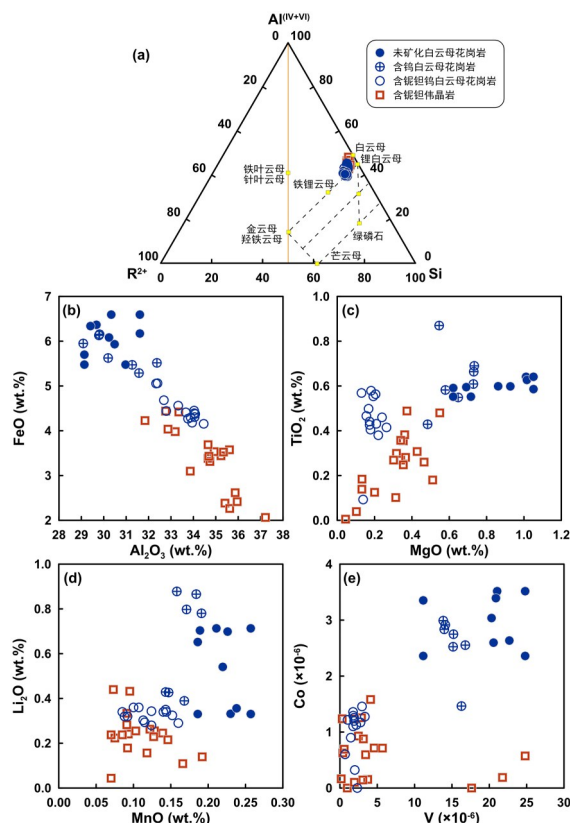


图 4 夏如淡色花岗岩-伟晶岩的(a)云母分类图(据文献[22]修改)和(b~e)白云母成分特征

Fig. 4 (a) Classification diagram (modified after ref. [22]) and (b~e) variable chemical composition diagrams of muscovites from the Xia-ru leucogranite-pegmatite

MnO, K<sub>2</sub>O, F 和 Cl, 含量分别不高于 1.21 wt. %, 0.74 wt. %, 0.28 wt. %, 0.11 wt. %, 0.02 wt. %

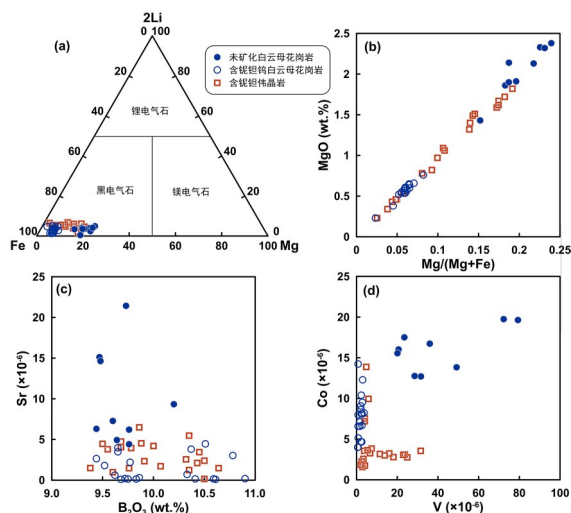


图 5 夏如淡色花岗岩-伟晶岩的(a)电气石分类图(据文献[23]修改)和(b~d)成分特征

Fig. 5 (a) Classification diagram (modified after ref. [23]) and (b~d) composition diagrams of tourmalines from the Xia-ru leucogranite-pegmatite

和 0.02 wt. % (表 3, 见 1100 页). 而不同岩石类型中的电气石的 Mg, Fe 含量有差异, 在未矿化白云母花岗岩的电气石中 MgO 含量为 1.43~2.38 wt. %, FeO 含量为 13.48~16.56 wt. %, Mg/(Mg+Fe) 值介于 0.15~0.24, 而含铌钽钨白云母花岗岩和含铌钽伟晶岩中电气石 MgO 含量略低 (0.23~1.82 wt. %), FeO 含量略高, 为 13.57~17.11 wt. %, Mg/(Mg+Fe) 值 (0.02~0.19) 较低 (图 5b 和图 5c, 表 3).

未矿化白云母花岗岩中的电气石 Sr ((4.4~21) × 10<sup>-6</sup>), V ((20~79) × 10<sup>-6</sup>), Co ((13~20) × 10<sup>-6</sup>) 含量高于矿化花岗岩-伟晶岩中电气石的 Sr ((0.10~6.4) × 10<sup>-6</sup>), V ((0.63~32) × 10<sup>-6</sup>), Co ((1.6~14) × 10<sup>-6</sup>) 含量 (图 5c 和图 5d). 含铌钽伟晶岩的电气石具有所有样品中最高的 Zn 含量 (高达 1851 × 10<sup>-6</sup>) (表 3). 所有样品中电气石均贫 Zr, Nb, Ta, 含量分别不高于 0.45 × 10<sup>-6</sup>, 6.6 × 10<sup>-6</sup>, 2.0 × 10<sup>-6</sup>.

**4.3 石榴子石** 夏如淡色花岗岩-伟晶岩中石榴子石粒径为 0.1~1 mm, 常包裹石英等造岩矿物, 未见明显环带 (图 2c, h, m). 未矿化白云母花岗岩中石榴子石含量不高于 0.5 vol. %, 且含钨白云母花岗岩中未观察到石榴子石, 而含铌钽钨白云母花岗岩中未观察到石榴子石, 而含铌钽钨白云母花岗岩中未观察到石榴子石, 而含铌钽钨白云母花岗岩中未观察到石榴子石.



母花岗岩和含铌钽伟晶岩中石榴子石可达 1 vol. %。夏如石榴子石都富集 FeO (9.04~24.84 wt. %) 和 MnO (16.01~31.86 wt. %), CaO 和 MgO 含量总体较低 (分别低于 2.49 wt. % 和 0.13 wt. %), 属于铁铝榴石-锰铝榴石中间成分 (图 6a)。未矿化白云母花岗岩中石榴子石 CaO 含量约为 2.24~2.49 wt. %, 而矿化花岗岩-伟晶岩的石榴子石 CaO 含量更低, 为 0.88~1.81 wt. % (图 6b)。石榴子石中 MnO 含量从未矿化白云母花岗岩 (16.72~17.05 wt. %)、含铌钽钨白云母花岗岩 (16.01~21.07 wt. %) 到含铌钽伟晶岩 (17.79~31.86 wt. %) 出现明显上升 (表 4, 见 1101 页), Mn/(Mn+Fe) 值亦随之逐渐升高, 未矿化白云母花岗岩、含铌钽钨白云母花岗岩和含铌钽伟晶岩的 Mn/(Mn+Fe) 值分别为 0.42~0.43, 0.39~0.52 和 0.44~0.78 (图 6)。

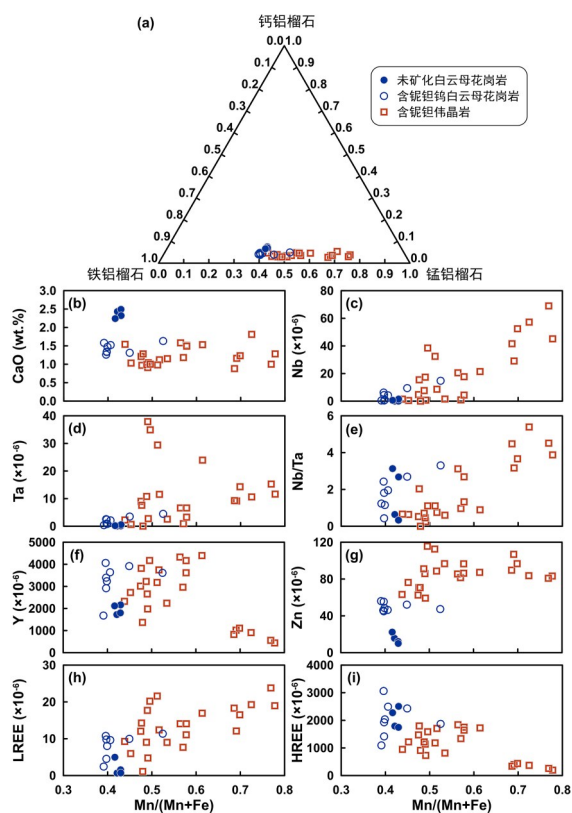


图 6 夏如淡色花岗岩-伟晶岩中石榴子石 (a) 分类图解和 (b~i) 成分特征

Fig. 6 (a) Classification diagram and (b~i) compositional diagrams of garnets from the Xiaru leucogranite-pegmatite

未矿化白云母花岗岩中的石榴子石贫 Nb, Ta, Zr, Hf 等高场强元素, 含量分别不高于  $1.5 \times 10^{-6}$ ,  $0.55 \times 10^{-6}$ ,  $0.49 \times 10^{-6}$ ,  $0.12 \times 10^{-6}$ , Nb/Ta 值为 0.33~3.13。含铌钽钨白云母花岗岩和含铌钽伟晶岩中的石榴子石略富 Nb (最高  $69 \times 10^{-6}$ )、Ta (最高  $38 \times 10^{-6}$ )、Zr (最高  $28 \times 10^{-6}$ )、Hf (最高  $3.0 \times 10^{-6}$ ) 等高场强元素, Nb/Ta 值可达 5.39 (图 6c~e, 表 4)。随着 Mn/(Mn+Fe) 值增加, 石榴子石的 Y 含量从未矿化白云母花岗岩 ( $(1722 \sim 2161) \times 10^{-6}$ ) 到含铌钽钨白云母花岗岩 ( $(1678 \sim 4064) \times 10^{-6}$ ) 和含铌钽伟晶岩 ( $(1369 \sim 4392) \times 10^{-6}$ ) 出现明显上升, 含铌钽伟晶岩内部出现 Y 的降低 ( $(439 \sim 1109) \times 10^{-6}$ ) (图 6f)。含铌钽钨白云母花岗岩和含铌钽伟晶岩的石榴子石 Zn ( $(45 \sim 116) \times 10^{-6}$ ) 和 Ga ( $(19 \sim 52) \times 10^{-6}$ ) 含量高于未矿化白云母花岗岩的石榴子石中 Zn ( $(10 \sim 22) \times 10^{-6}$ ) 和 Ga 含量 ( $(15 \sim 17) \times 10^{-6}$ ) (图 6g)。含铌钽钨白云母花岗岩和含铌钽伟晶岩中石榴子石存在一定程度的 Sn 富集 (最高为  $156 \times 10^{-6}$ ) (表 4)。

未矿化白云母花岗岩中的石榴子石轻稀土含量极低 ( $(0.68 \sim 5.0) \times 10^{-6}$ ), 重稀土含量较高 ( $(1748 \sim 2504) \times 10^{-6}$ ) (图 6h~i), 具有较弱的 Eu 负异常 ( $\delta\text{Eu} = 0.05 \sim 0.14$ ) (图 7a, 表 4)。含铌钽钨白云母花岗岩和含铌钽伟晶岩中的石榴子石中轻稀土 ( $(1.1 \sim 24) \times 10^{-6}$ ) 含量略微上升, 含铌钽伟晶岩中石榴子石重稀土含量 ( $\text{HREE} = (198 \sim 1841) \times 10^{-6}$ ) 整体低于含铌钽钨白云母花岗岩中石榴子石的重稀土 ( $\text{HREE} = (1093 \sim 3060) \times 10^{-6}$ ), 且重稀土含量随着 MnO 含量上升出现从较高 ( $\text{HREE} = (407 \sim 1841) \times 10^{-6}$ ) 到较低 ( $\text{HREE} = (52 \sim 539) \times 10^{-6}$ ) 的变化 (图 6i), 两种含铌钽矿化痕迹的花岗岩-伟晶岩具有相近的稀土元素配分曲线型式和强烈的 Eu 负异常 ( $\delta\text{Eu} < 0.02$ ) (图 7b, 表 4)。

**4.4 锆石** 夏如未矿化白云母花岗岩和含钨白云母花岗岩中锆石呈自形-半自形颗粒 (图 8a 和图 8b), 而含铌钽钨白云母花岗岩和含铌钽伟晶岩中的锆石多呈半自形-他形颗粒, 内部常含有晶质铀矿且孔洞较多 (图 8c 和图 8d)。锆石粒径为 10~40  $\mu\text{m}$ , SiO<sub>2</sub> 含量为 32.55~34.82 wt. %, ZrO<sub>2</sub> 含量为 54.53~64.67 wt. % (表 5, 见 1103

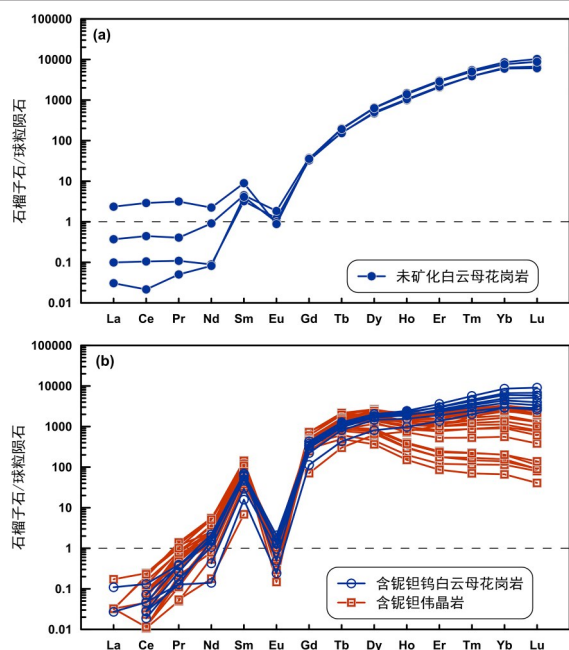
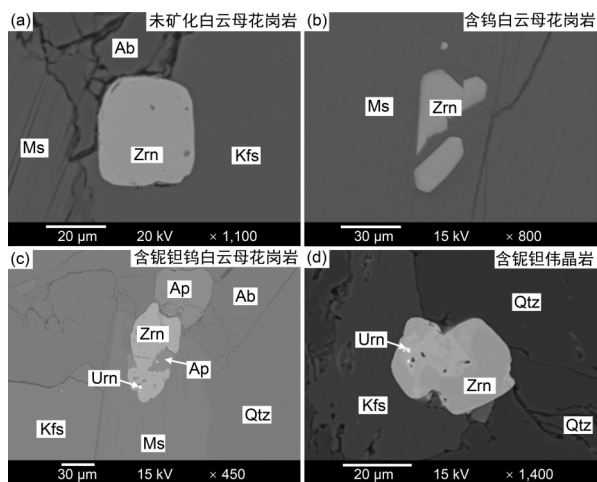


图 7 夏如淡色花岗岩-伟晶岩中石榴子石稀土元素球粒陨石标准化配分图解(标准化数据引自文献[21])

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns of garnets from the Xiaru leucogranite - pegmatite (the data of chondrite are from ref. [21])



(a)未矿化白云母花岗岩中;(b)含钨白云母花岗岩中,自形程度较高;(c)含铌钽钨白云母花岗岩中的锆石,内部孔隙较多,与晶质铀矿和磷灰石共生;(d)含铌钽伟晶岩中的锆石,斑状,有孔洞。矿物缩写:Qtz-石英,Ab-钠长石,Kfs-钾长石,Ms-白云母,Zrn-锆石,Ap-磷灰石,Urn-晶质铀矿

图 8 夏如淡色花岗岩-伟晶岩中锆石的背散射电子(BSE)图像

Fig. 8 Backscattered electron (BSE) images of zircons from the Xiaru leucogranite-pegmatite

页)。未矿化白云母花岗岩和含钨白云母花岗岩中锆石  $\text{HfO}_2$  含量分别为 1.66~3.74 wt. % 和 1.50~2.51 wt. %,  $\text{Zr}/\text{Hf}$  值分别为 14~32 和 22~37; 含铌钽钨白云母花岗岩  $\text{HfO}_2$  含量较高, 为 2.67~5.37 wt. %,  $\text{Zr}/\text{Hf}$  值为 9.7~20; 含铌钽伟晶岩中的锆石  $\text{HfO}_2$  含量最高, 为 3.92~10.79 wt. %,  $\text{Zr}/\text{Hf}$  值为 4.4~13 (图 9, 表 5)。锆石均贫  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{ThO}_2$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3$  含量分别不高于 1.14 wt. %, 0.13 wt. %, 1.01 wt. % (表 5)。

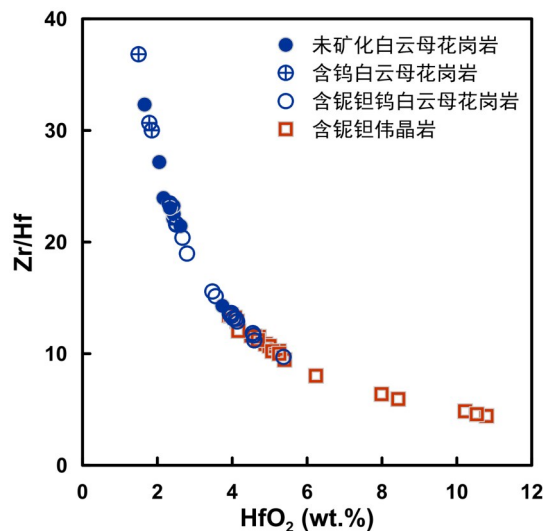


图 9 夏如淡色花岗岩-伟晶岩中锆石  $\text{HfO}_2$  与  $\text{Zr}/\text{Hf}$  图解

Fig. 9 The diagram of  $\text{HfO}_2$  content and  $\text{Zr}/\text{Hf}$  ratio of zircons from the Xiaru leucogranite-pegmatite

## 5 讨论

**5.1 全岩地球化学成分对淡色花岗岩-伟晶岩演化的指示** 野外地质考察发现夏如淡色花岗岩被密集分布的花岗质伟晶岩脉切穿, 地球化学研究表明夏如淡色花岗岩经历了高度结晶分异<sup>[14]</sup>, 淡色花岗岩-伟晶岩以过铝质为主, 稀土元素含量低且 Eu 负异常明显。夏如淡色花岗岩-伟晶岩的  $\text{Nb}/\text{Ta}$ ,  $\text{Zr}/\text{Hf}$ ,  $\text{K}/\text{Rb}$  和  $\text{Y}/\text{Ho}$  值均表现出偏离大陆平均地壳值 ( $\text{Nb}/\text{Ta}=11.4$ ,  $\text{Zr}/\text{Hf}=35.7$ ,  $\text{K}/\text{Rb}=349$ ,  $\text{Y}/\text{Ho}=24.7$ ) 的特征<sup>[24]</sup>, 表明夏如淡色花岗岩-伟晶岩的微量元素存在不受价态和离子半径控制的行为<sup>[25-26]</sup>, 指示夏如淡色花岗岩-伟晶岩在成岩过程中存在明显的流体相出溶。随着花岗质岩浆结晶分异程度增强, 分离结晶作用促进

残余熔体中 $H_2O$ 等挥发份和碱金属富集,饱和后可能导致液相分离和富 $H_2O$ 等挥发份流体相的出现<sup>[27]</sup>.岩浆-热液共存体系中稀土元素在熔体-流体之间的分配系数不同导致M型四分组效应的形成<sup>[28]</sup>,夏如含矿花岗岩-伟晶岩的稀土配分曲线表现出明显的四分组效应特征,从未矿化白云母花岗岩到含钨白云母花岗岩,再到含铌钽钨白云母花岗岩和含铌钽伟晶岩, $TE_{1,3}$ 值出现明显上升达到1.1以上, $TE_{1,3} > 1.1$ 时为典型的四分组效应<sup>[29]</sup>,指示了夏如含矿花岗岩-伟晶岩流体活动的增强.

相较夏如未矿化白云母花岗岩和含钨白云母花岗岩,含铌钽钨白云母花岗岩和含铌钽伟晶岩含有较高的 $Na_2O$ ,较低的 $\Sigma REE$ ,Zr,Th,Y,略低的 $FeO+MgO+TiO_2$ 含量和Zr/Hf,Th/U值,指示了含铌钽钨白云母花岗岩和含铌钽伟晶岩具有较高的结晶分异演化程度.根据锆石饱和温度计算公式<sup>[30]</sup>,未矿化白云母花岗岩( $T_z=729\sim 760^\circ C$ )和含钨白云母花岗岩( $T_z=695^\circ C$ )的锆石饱和温度接近,而含铌钽钨白云母花岗岩( $T_z=636^\circ C$ )和含铌钽伟晶岩( $T_z=572\sim 660^\circ C$ )的锆石饱和温度较低.因此推断含钨白云母花岗岩与未矿化白云母花岗岩的初始结晶温度相似,仅后期受到了微弱的含W流体作用,而随着演化程度升高,结晶温度降低,岩浆发生了铌钽成矿作用形成了含有铌钽氧化物的白云母花岗岩和伟晶岩.

**5.2 矿物成分特征对淡色花岗岩-伟晶岩岩浆演化的指示** 矿物的种类和成分可以指示花岗岩演化<sup>[31]</sup>,夏如岩体中未矿化花岗岩与矿化花岗岩-伟晶岩中出现的矿物种类和成分显示了它们的演化程度的差异,同时也可以反映演化过程中元素的富集程度变化<sup>[32-35]</sup>.本次研究重点选择了白云母、电气石和石榴子石进行讨论,白云母是造岩矿物,它贯穿于岩浆演化阶段形成的不同岩相中,而特征副矿物电气石和石榴子石的体积含量明显在铌钽成矿作用相关的花岗岩-伟晶岩中有所升高,并具有特征的元素组成来显示岩浆的演化过程.

岩浆演化过程中,随着黑云母、钛铁矿、金红石、石榴子石等矿物的结晶分异,熔体的Fe,Mg,Ti,Mn含量随之降低,随着演化形成于不同岩相中的白云母所含的相关元素含量也会逐渐降

低<sup>[36-37]</sup>.在夏如未矿化白云母花岗岩和含钨白云母花岗岩中白云母的FeO,MgO, $TiO_2$ ,MnO含量接近,而到含铌钽钨白云母花岗岩,再到含铌钽伟晶岩,白云母的这些元素含量呈逐渐降低而 $Al_2O_3$ 含量上升的趋势(图4b~d),反映了未矿化白云母花岗岩与含钨白云母花岗岩形成母岩浆中镁铁质组分相近,而与铌钽矿化相关的白云母花岗岩与伟晶岩中铁镁组分降低,演化程度逐渐升高.这两种演化程度较高的岩石中的白云母还呈现出降低V和Co的趋势,体现了早期熔体中与之相关的矿物的分异结晶作用.花岗伟晶岩也是锂矿床相关的重要岩石类型,锂的工业品位可达到 $0.4\%\sim 0.6\%$ <sup>[38]</sup>,锂还通常赋存在锂云母中.夏如淡色花岗岩-伟晶岩中白云母的 $Li_2O$ 含量较低,且全岩Li含量不高于 $149\times 10^{-6}$ ,虽然夏如岩体南部普士拉、珠峰地区有明显富锂区域<sup>[39-41]</sup>,但夏如淡色花岗岩-伟晶岩全岩和白云母的特征都未显示出该地区存在Li成矿潜力.

夏如淡色花岗岩-伟晶岩中电气石均属于黑电气石,从未矿化白云母花岗岩到含铌钽钨白云母花岗岩和含铌钽伟晶岩,电气石体积含量明显增加.电气石中V含量可以区分电气石的成因,岩浆成因的电气石中V含量通常小于 $100\times 10^{-6}$ ,热液或变质成因的电气石中V含量较高且通常具有较大的变化范围<sup>[42-43]</sup>.夏如电气石大都具有自形柱状晶型和弱环带结构,结合V含量最高为 $79\times 10^{-6}$ ,判别这些电气石属岩浆成因.未矿化白云母花岗岩和铌钽成矿的花岗岩-伟晶岩的电气石在Sr,V,Co等微量元素含量上也有差别,呈降低趋势(图5c和图5d),与白云母中这些微量元素的变化趋势相一致.岩浆电气石中 $Mg/(Mg+Fe)$ 值通常可以用来指示岩浆演化<sup>[44]</sup>,从未矿化白云母花岗岩到含铌钽钨白云母花岗岩和含铌钽伟晶岩,电气石的 $Mg/(Mg+Fe)$ 值出现明显降低,与其他特征指示的演化趋势相同(图5b).

岩浆成因的石榴子石以无明显环带,高MnO和FeO,低CaO和MgO,富集重稀土,亏损轻稀土为特征<sup>[12,45]</sup>,其 $Mn/(Mn+Fe)$ 值可以指示结晶分异演化程度<sup>[46-47]</sup>.夏如的石榴子石成分介于锰铝榴石-铁铝榴石之间,属于岩浆成因,从未矿化白云母花岗岩到演化程度更高的含铌钽钨白云母花



岗岩和含铌钽伟晶岩,石榴子石的体积含量增加且  $Mn/(Mn+Fe)$  值上升. 不相容元素在结晶分异过程中趋向于在晚期熔体中逐步富集,石榴子石中 Nb, Ta 从未矿化白云母花岗岩到含铌钽钨白云母花岗岩,再到含铌钽伟晶岩出现明显的递增(图 6c 和图 6d), Zn, Ga 等微量元素也呈现富集趋势(图 6g). 在夏如淡色花岗岩-伟晶岩演化过程中,早期岩浆结晶了锆石、磷灰石、磷钇矿等富含稀土元素的矿物,导致残余熔体中稀土含量降低,相对晚期形成的铁铝榴石-锰铝榴石中的稀土含量随着 MnO 含量上升而降低,尤其以重稀土更明显,同时含铌钽伟晶岩中石榴子石的 Y 含量也出现明显降低(图 6f 和图 6i). 石榴子石稀土配分曲线的重稀土回归直线斜率也是指示岩浆演化程度的重要指标<sup>[35]</sup>,从未矿化白云母花岗岩中石榴子石重稀土曲线斜率(0.31~0.34)为正(图 7a),到含铌钽钨白云母花岗岩中重稀土曲线斜率为正(0.11~0.19)但略小于未矿化白云母花岗岩,再到含铌钽伟晶岩中重稀土曲线斜率小于未矿化白云母花岗岩且部分为负(图 7b). 斜长石的分离结晶会导致其他共生矿物出现明显的 Eu 负异常<sup>[45]</sup>,未矿化白云母花岗岩中石榴子石的稀土配分曲线表现出明显的 Eu 负异常( $\delta Eu=0.05\sim0.12$ ),而演化程度更高的含铌钽钨白云母花岗岩和含铌钽伟晶岩中石榴子石 Eu 负异常更明显( $\delta Eu<0.02$ ).

**5.3 矿物锆石结构和成分特征对淡色花岗岩-伟晶岩岩浆演化和流体富集的指示** 不同于夏如淡色花岗岩-伟晶岩中白云母、电气石和石榴子石较少受到流体活动的影响,锆石受到岩浆演化和岩浆晚期流体活动共同影响. 岩浆锆石内部结构均匀,少见包裹体,热液锆石包括热液中结晶的锆石或热液改造的岩浆锆石,常以多孔状为特征,并且存在矿物包裹体<sup>[48-49]</sup>. 未矿化白云母花岗岩和含钨白云母花岗岩中的锆石自形程度较高,  $HfO_2$  含量均较低,内部少见孔洞和包裹体,常与磷灰石等矿物共生,认为其主要为岩浆锆石,锆石的结构和成分特征表明含 W 流体并未对锆石产生明显的影响. 而含铌钽钨白云母花岗岩和含铌钽伟晶岩中不仅存在自形程度较高的岩浆锆石,亦存在内

部孔洞较多,自形程度较差的热液锆石,并发现岩浆锆石与热液锆石共生(图 8d),指示演化程度更高的含铌钽钨白云母花岗岩和含铌钽伟晶岩存在岩浆后期流体活动. 过铝质花岗岩熔体中锆石的分离结晶会降低残余熔体的 Zr/Hf 值,增加锆石中  $HfO_2$  的丰度<sup>[50-52]</sup>,如雅山铌钽花岗岩体<sup>[53]</sup>、加拿大 Tanco 伟晶岩<sup>[54]</sup>等. Hf 在锆石中的富集还与岩浆晚期至岩浆后热液阶段的热液活动有关,热液活动导致残余熔体温度降低, Hf 在锆石/熔体中的分配系数随温度降低而增加<sup>[55]</sup>,热液锆石从残余熔体-富水流体系统中结晶,其  $HfO_2$  含量显著高于岩浆锆石<sup>[56]</sup>,从未矿化白云母花岗岩和含钨白云母花岗岩到演化程度更高的含铌钽钨白云母花岗岩和含铌钽伟晶岩演化的过程中,锆石的  $HfO_2$  含量上升, Zr/Hf 值下降(图 9),可能是结晶分异和热液流体共同作用的结果.

## 6 结论

(1) 夏如岩体出露中的花岗质岩石主要为白云母花岗岩和伟晶岩,部分出现了矿化痕迹,含有铌-钽-钨矿物(铌铁矿族矿物、骑田岭矿、黑钨矿、白钨矿),全岩微量元素数据表明铌-钽-钨矿化的花岗质岩石流体活动更强.

(2) 白云母、电气石和石榴子石的矿物学特征显示了它们是指示岩浆演化程度的标志性矿物. 相较夏如未矿化白云母花岗岩与含钨白云母花岗岩,含铌钽花岗岩-伟晶岩中含有更高含量的电气石和石榴子石,且白云母更高的  $Al_2O_3$  含量和更低的 FeO 含量,电气石更低的  $Mg/(Mg+Fe)$  值,石榴子石更高的  $Mn/(Mn+Fe)$  值、更低的稀土总量和更明显的 Eu 负异常等这些特征有效地显示了花岗质岩浆的演化过程和含铌钽花岗岩-伟晶岩更高的演化程度.

(3) 含铌钽钨白云母花岗岩和含铌钽伟晶岩中热液锆石的出现,指示了岩浆晚期的流体活动. 相较未矿化白云母花岗岩和含钨白云母花岗岩中锆石较低的  $HfO_2$  含量和较高的 Zr/Hf 值,岩浆演化和热液流体的共同作用导致含铌钽钨白云母花岗岩和含铌钽伟晶岩中锆石  $HfO_2$  含量升高和 Zr/Hf 值降低.

表2 夏如淡色花岗岩-伟晶岩中白云母化学成分

Table 2 Chemical compositions of micas from the Xiaru leucogranite-pegmatite

	未矿化白云母花岗岩				平均			含钙白云母花岗岩				平均			含铈钼伟晶岩				平均		
	1	2	3	n=10	4	5	n=7	6	7	8	n=14	9	10	11	12	n=19					
EPMA (wt. %)																					
SiO <sub>2</sub>	46.26	46.06	46.64	45.87	46.64	45.43	45.77	45.28	45.67	46.68	45.58	45.21	45.93	46.03	46.36	45.70					
TiO <sub>2</sub>	0.59	0.55	0.87	0.61	0.66	0.43	0.63	0.58	0.56	0.42	0.45	0.36	0.18	0.14	0.31	0.25					
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	29.68	30.48	32.37	30.35	30.20	31.58	30.59	33.66	33.76	32.33	33.53	35.23	35.41	35.86	33.19	34.62					
FeO	6.37	5.93	6.59	6.04	5.63	5.29	5.73	4.41	4.27	5.05	4.47	3.44	2.39	2.62	3.98	3.36					
MnO	0.19	0.26	0.26	0.21	0.14	0.18	0.17	0.11	0.14	0.14	0.12	0.09	0.07	0.19	0.10	0.11					
MgO	1.05	0.72	1.05	0.83	0.73	0.48	0.64	0.18	0.21	0.26	0.19	0.35	0.51	0.13	0.43	0.32					
CaO	0.02	—	0.05	0.02	0.01	—	0.01	—	0.01	—	0.00	—	0.05	0.02	0.01	0.02					
Na <sub>2</sub> O	0.18	0.19	0.40	0.25	0.40	0.29	0.29	0.32	0.42	0.34	0.37	0.32	0.20	0.15	0.29	0.32					
K <sub>2</sub> O	10.45	10.35	10.48	10.30	10.03	10.40	10.19	10.33	10.32	10.18	10.28	10.53	10.53	10.43	10.02	10.25					
F	0.59	0.18	0.67	0.34	0.50	0.23	0.41	0.37	0.38	0.50	0.37	0.13	0.12	—	0.04	0.10					
Cl	0.00	—	0.01	0.00	0.01	—	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—	0.00	0.00	0.00	0.00					
H <sub>2</sub> O*	4.11	4.29	4.40	4.22	4.16	4.29	4.19	4.26	4.28	4.22	4.26	4.42	4.44	4.51	4.44	4.41					
O=F,Cl	0.25	0.08	0.28	0.14	0.21	0.10	0.17	0.16	0.16	0.21	0.16	0.05	0.05	—	0.02	0.04					
LA-ICP-MS (wt. %)																					
Li <sub>2</sub> O	0.65	0.33	0.88	0.56	0.43	0.87	0.65	0.30	0.35	0.34	0.33	0.24	0.24	0.14	0.43	0.24					
Rb <sub>2</sub> O	0.29	0.33	0.39	0.32	0.37	0.37	0.35	0.28	0.28	0.36	0.30	0.28	0.27	0.43	0.22	0.30					
Cs <sub>2</sub> O	0.03	0.03	0.04	0.03	0.02	0.03	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.00	0.02					
Total	100.20	99.62	100.20	99.74	99.71	99.76	99.46	99.94	100.51	100.64	100.12	100.56	100.30	100.67	99.80	99.98					
以 22 个 O 原子计算																					
Si	6.314	6.308	6.405	6.278	6.359	6.192	6.267	6.127	6.139	6.280	6.155	6.052	6.121	6.120	6.237	6.138					
Al iv	1.686	1.692	1.893	1.722	1.641	1.808	1.733	1.873	1.861	1.720	1.845	1.948	1.879	1.880	1.763	1.862					
Al vi	3.088	3.228	3.327	3.169	3.212	3.265	3.204	3.495	3.488	3.407	3.492	3.612	3.683	3.741	3.500	3.618					
Ti	0.060	0.057	0.090	0.063	0.068	0.044	0.065	0.059	0.057	0.042	0.046	0.036	0.018	0.014	0.031	0.025					
Fe	0.727	0.679	0.756	0.691	0.641	0.603	0.657	0.499	0.480	0.569	0.505	0.385	0.266	0.291	0.448	0.378					
Mn	0.022	0.030	0.030	0.025	0.017	0.021	0.019	0.013	0.016	0.016	0.014	0.011	0.008	0.022	0.011	0.013					
Mg	0.214	0.146	0.214	0.170	0.149	0.098	0.130	0.037	0.041	0.053	0.038	0.071	0.102	0.026	0.086	0.063					
Li	0.358	0.182	0.483	0.308	0.235	0.475	0.359	0.165	0.188	0.187	0.177	0.130	0.127	0.075	0.234	0.129					
Ca	0.004		0.007	0.003	0.001		0.001		0.001		0.001		0.007	0.002	0.001	0.003					
Na	0.048	0.051	0.106	0.067	0.106	0.076	0.077	0.084	0.109	0.089	0.096	0.084	0.051	0.039	0.075	0.084					
K	1.818	1.807	1.839	1.799	1.744	1.807	1.780	1.782	1.770	1.747	1.770	1.798	1.791	1.769	1.720	1.756					
Rb	0.025	0.029	0.034	0.028	0.032	0.032	0.031	0.025	0.024	0.031	0.026	0.024	0.023	0.036	0.019	0.026					
Cs	0.002	0.002	0.002	0.002	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001					
F	0.255	0.078	0.291	0.148	0.217	0.097	0.176	0.159	0.163	0.213	0.158	0.054	0.050		0.017	0.044					
Cl	0.001		0.003	0.001	0.003		0.001	0.000	0.000	0.001	0.001		0.000	0.000	0.000	0.001					
OH <sup>+</sup>	3.744	3.922	4.000	3.852	3.780	3.903	3.823	3.841	3.837	3.786	3.841	3.946	3.950	4.000	3.983	3.955					
LA-ICP-MS (×10 <sup>-6</sup> )																					
Be	34	39	47	35	22	23	24	39	27	35	32	26	32	46	26	31					
B	71	72	189	100	125	168	122	144	139	104	166	98	170	348	124	174					
Sc	61	47	61	49	49	43	50	114	107	131	116	96	63	11	31	57					
V	23	21	25	20	14	14	15	2.0	2.3	1.9	2.0	4.1	0.40	0.99	18	5.5					
Cr	4	12	51	10	7.5	51	13	—	—	1.4	2.5	1.5	—	2.3	2.7	2.3					
Co	2.6	3.4	3.5	2.9	2.8	3.0	2.6	0.32	—	1.3	1.0	1.6	0.63	—	—	0.62					
Ni	2.1	0.93	2.8	1.6	2.3	2.6	1.4	—	0.66	—	0.22	0.63	0.67	—	—	0.20					
Cu	—	1.1	2.1	0.66	0.68	0.48	0.45	0.38	0.72	0.05	0.48	1.1	—	0.15	—	1.2					
Zn	90	109	115	97	114	113	104	77	78	72	78	124	166	275	135	143					
Ga	102	98	116	94	104	101	107	150	147	167	157	151	135	212	187	167					
Ge	2.1	3.7	6.3	4.1	3.6	2.6	3.2	2.8	4.4	6.8	5.1	6.4	4.9	3.3	3.9	5.3					
Sr	1.1	1.6	2.2	1.4	1.3	2.2	1.4	0.68	0.70	0.79	0.68	0.74	0.82	0.14	0.87	0.93					

续表

	未矿化白云母花岗岩				平均			含钨白云母花岗岩				平均				含钨钼白云母花岗岩				平均				含钨钼伟晶岩				平均			
	1	2	3	n=10	4	5	n=7	6	7	8	n=14	9	10	11	12	n=19	9	10	11	12	n=19	9	10	11	12	n=19	9	10	11	12	n=19
Zr	0.49	1.2	1.2	0.84	0.77	1.0	0.90	0.91	0.93	0.68	0.80	0.94	0.67	1.4	0.15	0.68	0.94	0.67	1.4	0.15	0.68	0.94	0.67	1.4	0.15	0.68	0.94	0.67	1.4	0.15	0.68
Nb	196	209	341	233	247	314	298	343	354	295	329	90	173	245	17	168	90	173	245	17	168	90	173	245	17	168	90	173	245	17	168
Mo	—	0.08	0.26	0.09	—	—	0.04	0.10	—	1.6	0.28	—	—	—	—	0.11	—	—	—	—	0.11	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.11
Ag	0.13	—	0.53	0.15	0.03	0.10	0.18	0.03	—	—	0.02	0.10	—	0.57	0.12	0.11	0.10	—	0.57	0.12	0.11	0.10	—	0.57	0.12	0.11	0.10	—	0.57	0.12	0.11
Cd	—	0.37	0.67	0.20	0.07	—	0.14	0.10	0.09	0.10	0.03	0.09	—	0.37	0.20	0.06	0.09	—	0.37	0.20	0.06	0.09	—	0.37	0.20	0.06	0.09	—	0.37	0.20	0.06
In	1.2	1.4	1.6	1.1	1.2	1.1	1.4	2.0	2.0	2.3	1.8	1.7	1.6	0.67	1.2	1.3	1.7	1.6	0.67	1.2	1.3	1.7	1.6	0.67	1.2	1.3	1.7	1.6	0.67	1.2	1.3
Sn	235	254	289	214	210	218	237	233	253	320	244	236	204	85	259	200	236	204	85	259	200	236	204	85	259	200	236	204	85	259	200
Sb	0.15	—	0.60	0.26	—	0.06	0.10	—	—	—	0.08	—	0.21	0.32	—	0.09	—	0.21	0.32	—	0.09	—	0.21	0.32	—	0.09	—	0.21	0.32	—	0.09
Ba	78	66	96	78	65	61	49	6.1	3.4	0.91	4.8	5.1	7.2	3.4	2.1	7.4	5.1	7.2	3.4	2.1	7.4	5.1	7.2	3.4	2.1	7.4	5.1	7.2	3.4	2.1	7.4
Hf	0.04	0.08	0.13	0.08	0.06	0.13	0.09	0.14	0.12	0.15	0.12	0.13	0.15	0.17	—	0.15	0.13	0.15	0.17	—	0.15	0.13	0.15	0.17	—	0.15	0.13	0.15	0.17	—	0.15
Ta	27	33	91	41	39	69	70	48	53	37	50	19	38	19	1.1	41	19	38	19	1.1	41	19	38	19	1.1	41	19	38	19	1.1	41
W	233	231	276	183	143	222	221	181	209	136	183	100	138	18	16	90	100	138	18	16	90	100	138	18	16	90	100	138	18	16	90
Au	0.11	0.26	0.44	0.21	0.22	0.40	0.34	0.29	0.33	0.14	0.25	0.03	0.22	0.18	0.02	0.21	0.03	0.22	0.18	0.02	0.21	0.03	0.22	0.18	0.02	0.21	0.03	0.22	0.18	0.02	0.21
Tl	8.6	11	13	10	11	11	11	8.2	8.3	8.4	8.3	7.6	8.0	15	7.0	9.6	7.6	8.0	15	7.0	9.6	7.6	8.0	15	7.0	9.6	7.6	8.0	15	7.0	9.6
Pb	3.3	3.5	4.4	3.0	1.5	2.1	2.5	3.4	3.3	3.3	3.1	4.0	3.1	4.2	6.1	4.4	4.0	3.1	4.2	6.1	4.4	4.0	3.1	4.2	6.1	4.4	4.0	3.1	4.2	6.1	4.4
Th	0.00	—	0.04	0.01	0.04	0.03	0.01	0.00	—	0.01	0.01	—	—	—	0.00	0.15	—	—	—	0.00	0.15	—	—	—	0.00	0.15	—	—	—	0.00	0.15
U	—	0.01	0.03	0.01	0.03	0.01	0.01	0.01	—	0.01	0.01	0.01	0.02	—	0.01	0.24	0.01	0.02	—	0.01	0.24	0.01	0.02	—	0.01	0.24	0.01	0.02	—	0.01	0.24

“—”表示含量低于检测限

表 3 夏如淡色花岗岩-伟晶岩中代表性电气石的主量(wt.%)和微量成分( $\times 10^{-6}$ )分析结果Table 3 Major (wt.%) and trace ( $\times 10^{-6}$ ) elements of representative tourmalines from the Xiaru leucogranite-pegmatite

	未矿化白云母花岗岩				含钨钼白云母花岗岩				含钨钼伟晶岩			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
EPMA (wt. %)												
SiO <sub>2</sub>	34.01	34.52	34.52	34.95	34.56	33.86	34.59	34.60	33.96	34.81	35.11	33.87
TiO <sub>2</sub>	0.35	0.20	0.33	0.32	0.27	0.43	0.31	0.20	0.62	0.24	0.46	1.21
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	32.31	33.69	32.88	33.54	34.20	32.27	33.65	34.24	32.80	32.45	33.27	32.42
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.64	0.04	—	0.04	0.01	—	—	—	—	0.01	—	—
FeO	13.66	14.21	14.25	13.75	15.11	16.76	15.46	15.01	15.68	15.81	15.57	15.90
MgO	2.13	1.43	2.33	2.32	0.76	0.65	0.66	0.54	0.97	0.23	0.53	0.78
CaO	0.57	0.20	0.43	0.39	0.11	0.28	0.14	0.10	0.34	0.26	0.15	0.39
MnO	0.03	0.12	0.10	0.13	0.10	0.11	0.10	0.12	0.14	0.25	0.28	0.23
Na <sub>2</sub> O	1.92	2.01	2.16	1.91	1.84	2.16	1.85	1.72	1.98	1.96	2.12	2.11
K <sub>2</sub> O	0.08	0.05	0.05	0.04	0.04	0.06	0.03	0.03	0.07	0.04	0.03	0.02
Cl	0.02	0.01	0.02	0.01	—	0.01	—	—	—	—	0.01	0.01
LA-ICP-MS (wt. %)												
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.20	9.76	9.60	9.73	10.33	10.41	10.51	9.77	9.78	9.68	9.68	9.55
H <sub>2</sub> O*	3.54	3.53	3.52	3.56	3.57	3.51	3.57	3.53	3.50	3.49	3.54	3.49
Total*	100.45	99.76	100.19	100.69	100.9	100.52	100.86	99.86	99.84	99.23	100.75	99.99
以 31 个阴离子(O <sup>2-</sup> , OH <sup>-</sup> , F <sup>-</sup> )计算												
T: Si	5.757	5.867	5.865	5.878	5.806	5.775	5.816	5.879	5.814	5.986	5.945	5.814
Al	0.243	0.133	0.135	0.122	0.194	0.225	0.184	0.121	0.186	0.014	0.055	0.186
B	2.980	2.862	2.815	2.824	2.995	3.066	3.050	2.865	2.891	2.874	2.828	2.830
Z: Al	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000
Y: Al	0.203	0.614	0.450	0.526	0.578	0.261	0.484	0.735	0.432	0.562	0.584	0.373
Ti	0.045	0.026	0.042	0.040	0.034	0.055	0.039	0.026	0.080	0.031	0.059	0.156
Cr	0.219	0.005	—	0.005	0.001	—	—	—	—	0.001	—	—
Mg	0.538	0.362	0.590	0.582	0.190	0.165	0.165	0.137	0.248	0.059	0.134	0.200
Mn	0.004	0.017	0.014	0.019	0.014	0.016	0.014	0.017	0.020	0.036	0.040	0.033



续表												
	未矿化白云母花岗岩				含铌钽铈白云母花岗岩				含铌钽伟晶岩			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Fe <sup>2+</sup>	1.934	2.020	2.025	1.934	2.123	2.390	2.174	2.133	2.245	2.274	2.205	2.282
ΣY	2.994	3.087	3.154	3.160	2.973	2.937	2.935	3.083	3.100	3.044	3.091	3.117
X: Ca	0.103	0.036	0.078	0.070	0.020	0.051	0.025	0.018	0.062	0.048	0.027	0.072
Na	0.630	0.662	0.712	0.623	0.599	0.714	0.603	0.567	0.657	0.653	0.696	0.702
K	0.017	0.011	0.011	0.009	0.009	0.013	0.006	0.007	0.015	0.009	0.006	0.004
X□	0.249	0.290	0.199	0.298	0.372	0.222	0.365	0.409	0.265	0.290	0.270	0.222
OH	3.994	3.997	3.994	3.997	4.000	3.997	4.000	4.000	4.000	4.000	3.997	3.997
Cl	0.006	0.003	0.006	0.003		0.003					0.003	0.003
Mg/(Mg+Fe)	0.22	0.15	0.23	0.23	0.08	0.06	0.07	0.06	0.10	0.03	0.06	0.08
LA-ICP-MS (×10 <sup>-6</sup> )												
Li	350	289	223	372	225	332	404	247	509	544	471	487
Be	2.8	11	1.0	6.4	8.2	0.92	6.1	9.2	10	11	13	9.5
V	72	29	36	23	3.7	2.5	2.1	2.3	18	24	25	23
Co	20	13	17	18	8.2	4.7	9.1	10	2.8	3.1	2.8	3.1
Ni	15	5.1	8.6	5.8	0.55	0.28	0.41	0.48	0.57	—	0.12	0.14
Cu	—	0.35	—	0.69	—	0.15	—	—	2.3	1.6	—	—
Zn	220	194	193	251	269	257	414	408	1294	1232	1207	1234
Ga	91	117	116	63	123	132	87	90	144	147	134	119
Ge	1.7	5.9	2.3	3.3	2.5	5.1	4.3	5.7	5.1	5.1	3.5	2.1
Rb	—	0.06	0.06	0.04	—	—	—	—	—	0.39	0.22	—
Sr	9.3	4.4	7.3	21	0.71	0.16	4.5	2.2	4.0	4.7	4.1	3.8
Y	0.10	0.01	0.02	0.51	0.03	—	0.02	—	0.10	0.43	0.01	0.01
Zr	0.16	0.11	0.18	0.02	0.12	0.10	0.02	0.09	0.10	0.03	0.08	—
Nb	1.5	1.4	1.3	0.35	1.5	0.58	1.1	0.51	0.92	1.4	0.99	1.1
Mo	0.39	—	0.23	—	—	0.08	0.07	—	—	0.07	0.08	—
Ag	0.02	—	—	0.25	0.12	0.43	0.09	0.05	—	—	—	0.20
Cd	—	0.06	—	—	0.15	—	—	—	0.07	0.54	0.28	—
In	0.19	0.22	0.20	0.08	0.17	0.18	0.10	0.09	0.14	0.19	0.13	0.22
Sn	26	36	44	11	28	32	15	14	16	21	17	12
Sb	—	—	0.15	0.42	0.03	0.10	0.04	—	0.04	—	—	—
Cs	—	0.02	0.04	—	—	—	0.02	0.05	0.09	0.16	0.02	0.02
Ba	—	—	—	0.06	—	0.07	—	—	—	—	—	—
Ta	0.49	1.2	0.44	0.14	0.63	0.28	0.62	0.26	0.43	0.71	0.84	0.63
W	0.07	—	0.10	—	0.07	—	0.06	—	0.03	0.02	0.03	0.04
Bi	0.02	0.01	0.00	0.03	—	0.02	—	0.02	0.03	0.04	0.04	—
Pb	2.5	1.5	2.2	5.6	0.81	0.33	6.6	2.3	8.1	10	10	7.2
Th	0.01	—	0.01	0.03	0.00	0.00	0.00	—	0.01	—	0.00	0.01
U	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.01	0.00	—

\*计算所得;X□表示X位置的空位;“—”表示含量低于检测限

表4 夏如淡色花岗岩-伟晶岩中代表性石榴子石的主量(wt.%)和微量成分(×10<sup>-6</sup>)分析结果

Table 4 Major (wt.%) and trace (×10<sup>-6</sup>) elements of representative garnets from the Xiaru leucogranite-pegmatite

	未矿化白云母花岗岩		含铌钽铈白云母花岗岩				含铌钽伟晶岩					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
EPMA (wt. %)												
SiO <sub>2</sub>	36.12	36.36	35.84	35.89	35.66	35.83	36.64	37.12	36.59	36.32	36.31	36.37
TiO <sub>2</sub>	0.00	0.02	0.14	0.13	0.18	0.15	0.07	0.11	0.11	0.06	0.14	0.12
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21.25	21.24	21.14	21.14	21.33	21.23	21.27	20.44	21.55	21.36	21.08	21.10
FeO	22.27	22.54	24.58	24.84	22.59	19.02	22.70	21.52	16.91	15.64	12.43	9.53

续表

	未矿化白云母花岗岩		含铌钽钙白云母花岗岩				含铌钽伟晶岩					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
MnO	16.82	17.05	16.25	16.01	18.49	21.07	17.79	20.55	23.23	24.95	28.93	31.86
MgO	0.10	0.12	0.08	0.13	0.09	0.08	0.05	0.04	0.04	0.03	—	—
CaO	2.49	2.32	1.33	1.58	1.31	1.63	1.54	0.99	1.49	1.53	1.23	1.00
Total	99.05	99.65	99.36	99.72	99.65	99.01	100.06	100.79	99.92	99.89	100.12	99.98
锰铝榴石	39.4	39.7	38.3	37.7	43.8	49.7	41.1	46.8	53.7	58.1	67.3	74.0
铁铝榴石	52.8	53.0	57.4	57.1	52.0	45.2	54.2	50.2	41.8	37.3	29.1	23.0
钙铝榴石	7.5	7.0	4.0	4.7	3.9	4.9	4.7	2.9	4.6	4.6	3.6	3.0
镁铝榴石	0.4	0.5	0.3	0.5	0.4	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1	0.0	0.0
Mn/(Mn+Fe)	0.43	0.43	0.40	0.39	0.45	0.52	0.44	0.49	0.58	0.61	0.70	0.77
LA-ICP-MS ( $\times 10^{-6}$ )												
Li	172	221	304	188	374	344	236	328	357	369	135	77
Be	—	0.14	0.11	—	0.34	0.67	—	0.15	0.37	0.12	—	—
B	8.0	7.3	11	3.2	11	13	4.3	12	8.7	14	19	15
Sc	53	51	116	119	166	150	61	48	142	40	38	22
V	5.9	7.8	0.96	0.75	1.3	0.22	0.36	0.64	1.6	1.2	0.11	—
Cr	507	4.9	—	2.0	—	1.4	0.98	—	2.3	2.5	—	2.1
Co	2.4	2.3	1.5	1.8	1.6	1.3	0.72	0.63	0.39	0.71	—	0.18
Ni	—	0.26	0.32	0.11	0.10	0.21	—	0.38	0.23	0.13	—	0.52
Cu	0.51	—	—	0.01	0.65	0.06	—	3.2	—	3.4	1.4	0.18
Zn	12	10	55	56	52	47	63	91	97	87	97	81
Ga	15	16	32	23	38	38	37	42	40	52	37	37
Ge	50	62	62	55	62	57	64	83	70	89	63	43
Rb	0.72	16	0.21	0.27	0.50	0.28	—	0.43	0.25	0.14	0.07	—
Sr	0.28	0.47	0.13	0.25	0.36	0.20	0.01	0.06	0.19	0.16	0.01	—
Y	1801	2161	2920	1678	3916	3612	2326	3224	3618	4393	1109	556
Zr	0.49	0.27	3.3	1.8	7.7	8.5	6.5	8.2	14	25	28	22
Nb	0.04	1.5	0.42	0.48	9.4	15	1.5	7.6	4.4	21	52	69
Mo	2.1	1.4	1.9	1.7	1.2	2.0	2.0	1.6	3.0	2.6	3.1	2.6
Ag	—	—	0.20	—	—	0.17	0.15	0.34	0.20	0.06	0.34	0.02
Cd	1.7	2.3	5.0	4.7	5.6	5.5	5.3	5.9	6.2	7.1	10	9.1
In	0.03	0.05	0.13	0.05	0.24	0.17	0.38	0.34	0.31	0.56	0.25	0.36
Sn	2.2	1.5	17	9.2	42	50	79	75	62	129	38	34
Sb	—	1.7	0.07	0.08	—	0.08	—	0.40	0.10	—	—	—
Cs	1.4	1.4	0.02	0.87	—	0.04	0.03	—	—	—	0.00	0.00
Ba	0.06	0.33	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Hf	0.07	0.12	0.32	0.19	0.60	0.94	0.60	0.82	0.95	2.2	1.9	1.7
Ta	0.11	0.55	0.96	0.39	3.5	4.5	2.2	11	3.3	24	14	15
W	0.59	14	0.46	0.36	0.73	0.38	0.06	0.13	0.36	0.40	0.24	0.38
Au	—	—	—	—	0.03	0.02	—	0.04	—	0.11	0.06	0.05
Tl	0.10	0.16	0.00	0.01	0.00	—	—	—	—	—	0.01	—
Bi	—	0.20	0.00	0.02	—	—	0.00	—	—	0.02	—	0.01
Pb	0.09	—	0.07	0.05	—	—	0.06	—	0.00	—	0.05	0.03
Th	0.02	0.06	0.03	—	—	—	—	—	—	—	0.02	0.00
U	0.02	0.12	0.07	0.06	0.22	0.33	0.09	0.21	0.26	0.94	1.8	2.0
La	0.09	0.01	—	—	—	—	0.01	—	—	—	—	0.01
Ce	0.27	0.01	—	0.02	0.03	0.04	0.03	0.02	0.04	0.04	0.07	0.13
Pr	0.04	0.00	—	0.01	0.03	0.03	0.03	0.01	0.06	0.07	0.07	0.11
Nd	0.41	0.04	0.19	0.06	0.69	0.99	0.71	0.72	1.1	1.2	1.5	2.4
Sm	0.66	0.60	4.3	2.3	9.1	10	8.4	8.2	13	16	15	21
Eu	0.10	0.06	0.05	0.01	0.09	0.07	0.07	0.05	0.06	0.01	0.04	0.05

续表

	未矿化白云母花岗岩		含铌钽白云母花岗岩				含铌钽伟晶岩					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Gd	7.3	7.0	44	22	75	84	70	94	85	119	85	74
Tb	5.6	7.2	30	16	43	46	38	54	47	70	34	22
Dy	122	157	355	197	495	492	344	464	482	638	213	110
Ho	59	82	86	54	126	111	60	77	104	111	22	11
Er	342	477	302	216	474	368	161	199	318	289	39	19
Tm	94	132	58	48	102	72	30	34	59	52	5.4	2.8
Yb	970	1391	479	469	975	616	218	266	487	400	33	19
Lu	148	251	63	70	142	81	24	32	61	46	2.7	1.9
LREE	1.6	0.72	4.5	2.4	10.0	11	9.3	9.0	14	17	16	24
HREE	1748	2504	1417	1093	2433	1871	947	1220	1644	1726	434	260
ΣREE	1749	2505	1422	1095	2443	1882	956	1229	1658	1743	451	284
δEu	0.14	0.08	0.01	0.01	0.01	0.01	0.66	0.71	1.33	0.89	3.66	4.51
k(HREE)	0.31	0.34	0.13	0.18	0.15	0.11	0.04	0.03	0.09	0.04	-0.11	-0.12

“—”表示含量低于检测限;k(HREE)表示石榴子石稀土配分曲线中重稀土(Gd-Lu)回归直线的斜率<sup>[1]</sup>

表5 夏如淡色花岗岩-伟晶岩中代表性锆石的主量元素数据(wt.%)

Table 5 Major element composition (wt.%) of representative zircons from the Xiaru leucogranite-pegmatite

	未矿化白云母花岗岩 n=10				含钨白云母花岗岩 n=6				含铌钽白云母花岗岩 n=14				含铌钽伟晶岩 n=23			
	1	2	3	平均	4	5	6	平均	7	8	9	平均	10	11	12	平均
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.95	0.14	0.34	0.24	0.40	0.33	0.10	0.25	0.06	0.07	0.21	0.33	0.17	0.27	0.49	0.19
SiO <sub>2</sub>	33.39	33.53	34.08	33.94	34.46	33.89	34.14	34.17	34.21	34.19	34.55	34.12	33.51	34.22	33.48	33.78
ZrO <sub>2</sub>	61.50	62.81	62.29	61.78	62.61	62.72	62.10	62.66	61.83	59.77	60.74	61.10	54.53	60.78	57.41	59.46
HfO <sub>2</sub>	1.66	2.44	2.42	2.34	2.33	1.79	2.51	2.08	3.47	5.37	4.03	3.98	10.79	3.94	8.43	5.73
ThO <sub>2</sub>	0.13	—	0.05	—	—	—	0.04	0.03	0.02	0.05	0.01	0.01	—	—	0.05	0.02
UO <sub>2</sub>	1.27	0.56	0.65	0.84	0.72	0.42	0.25	0.44	0.14	0.22	0.42	0.42	1.39	0.46	0.51	0.73
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.55	—	0.12	—	—	0.02	—	0.00	—	—	—	0.02	0.03	0.04	—	0.11
Total	99.45	99.48	99.94	99.14	100.53	99.17	99.13	99.64	97.72	99.69	99.95	99.97	100.42	99.70	100.37	100.01
Zr/Hf	32.33	22.49	23.34	23.05	23.45	30.68	21.64	27.36	15.56	9.72	13.17	13.87	4.41	13.46	5.94	10.15

“—”表示含量低于检测限

## 参考文献

- [1] 吴福元, 刘志超, 刘小驰, 等. 喜马拉雅淡色花岗岩. 岩石学报, 2015, 31(1): 1—36. (Wu F Y, Liu Z C, Liu X C, et al. Himalayan leucogranite: Petrogenesis and implications to orogenesis and plateau uplift. Acta Petrologica Sinica, 2015, 31(1): 1—36.)
- [2] 吴福元, 刘小驰, 纪伟强, 等. 高分异花岗岩的识别与研究. 中国科学: 地球科学, 2017, 47(7): 745—765. (Wu F Y, Liu X C, Ji W Q, et al. Highly fractionated granites: Recognition and research. Science China: Earth Sciences, 2017(60): 1201—1219.)
- [3] Wang R C, Wu F Y, Xie L, et al. A preliminary study of rare-metal mineralization in the Himalayan leucogranite belts, South Tibet. Science China Earth Sciences, 2017(60): 1655—1663.
- [4] 付建刚, 李光明, 王根厚, 等. 西藏错那洞穹窿同构造矽卡岩特征及相关铍钨锡稀有金属矿化的成矿时代. 吉林大学学报(地球科学版), 2020, 50(5): 1304—1322. (Fu J G, Li G M, Wang G H, et al. Syntectonic Skarn characteristics and mineralization age of associated Be-W-Sn rare metal deposit in Cuonadong Dome, Southern Tibet, China. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2020, 50(5): 1304—1322.)
- [5] Xie L, Tao X Y, Wang R C, et al. Highly fractionated leucogranites in the eastern Himalayan Cuonadong dome and related magmatic Be-Nb-Ta and hydrothermal Be-W-Sn mineralization. Lithos, 2020 (354—355): 105286.
- [6] 秦克章, 赵俊兴, 何畅通, 等. 喜马拉雅琼嘉岗超大型伟晶岩型锂矿的发现及意义. 岩石学报, 2021, 37(11): 3277—3286. (Qin K Z, Zhao J X, He C T, et al.



- Discovery of the Qongjiagang giant lithium pegmatite deposit in Himalaya, Tibet, China. *Acta Petrologica Sinica*, 37(11): 3277—3286.)
- [7] 吴福元, 王汝成, 刘小驰, 等. 喜马拉雅稀有金属成矿作用研究的新突破. *岩石学报*, 2021, 37(11): 3261—3276. (Wu F Y, Wang R C, Liu X C, et al. New breakthroughs in the studies of Himalayan rare-metal mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 2021, 37(11): 3261—3276.)
- [8] 梁维, 张林奎, 夏祥标, 等. 藏南地区错那洞钨锡多金属矿床地质特征及成因. *地球科学*, 2018, 43(8): 2742—2754. (Liang W, Zhang L K, Xia X B, et al. Geology and preliminary mineral genesis of the Cuonadong W-Sn polymetallic deposit, southern Tibet, China. *Earth Science*, 2018, 43(8): 2742—2754.)
- [9] 谢磊, 王汝成, 田恩农, 等. 喜马拉雅夏如渐新世淡色花岗岩铌钽钨成矿作用. *科学通报*, 2021, 66(35): 4574—4591. (Xie L, Wang R C, Tian E N, et al. Oligocene Nb-Ta-W mineralization related to the Xiaru leucogranite in the Himalayan Orogen. *Chinese Science Bulletin*, 2021, 66(35): 4574—4591.)
- [10] King J, Harris N, Argles T, et al. Contribution of crustal anatexis to the tectonic evolution of Indian crust beneath southern Tibet. *Geological society of America bulletin*, 2011, 123(1—2): 218—239.
- [11] 高利娥, 曾令森, 侯可军, 等. 藏南马礼山穹窿佩枯错复合淡色花岗岩体的多期深熔作用. *科学通报*, 2013, 58(27): 2810—2822. (Gao L E, Zeng L S, Hou K J, et al. Episodic crustal anatexis and the formation of Paiku composite leucogranitic pluton in the Malashan gneiss dome, southern Tibet. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(27): 3546—3563.)
- [12] Gao L E, Zeng L S, Gao J H, et al. Oligocene crustal anatexis in the Tethyan Himalaya, southern Tibet. *Lithos*, 2016(264): 201—209.
- [13] 田立明, 郑有业, 郑海涛. 特提斯喜马拉雅带东段列麦白云母花岗岩年代学及成因. *地质学报*, 2017, 91(5): 992—1006. (Tian L M, Zheng Y Y, Zheng H T. Geochronology and petrogenesis study of Liemai muscovite granite in the eastern Tethyan Himalaya. *Acta Geologica Sinica*, 2017, 91(5): 992—1006.)
- [14] Liu Z C, Wu F Y, Ding L, et al. Highly fractionated late Eocene (~35 Ma) leucogranite in the Xiaru dome, Tethyan Himalaya, south Tibet. *Lithos*, 2016 (240—243): 337—354.
- [15] 张士贞, 李奋其, 李勇, 等. 雅鲁藏布江结合带中段早奥陶世强过铝质花岗岩的厘定及其地质意义. *中国科学: 地球科学*, 2014, 44(7): 1388—1402. (Zhang S Z, Li F Q, Li Y, et al. Early Ordovician strongly peraluminous granite in the middle section of the Yarlung Zangbo junction zone and its geological significance. *Science China: Earth Sciences*, 2014, 44(7): 1388—1402.)
- [16] Gao L E, Zeng L S, Hu G Y, et al. Early Paleozoic magmatism along the northern margin of east Gondwana. *Lithos*, 2019(334—335): 25—41.
- [17] 高剑峰, 陆建军, 赖鸣远, 等. 岩石样品中微量元素的高分辨率等离子质谱分析. *南京大学学报(自然科学版)*, 2003(6): 844—850. (Feng G J, Lu J J, Yuan L M, et al. Analysis of trace elements in rock samples using HR-ICPMS. *Journal of Nanjing University (Natural Science)*, 2003(6): 844—850.)
- [18] Xie L, Wang Z J, Wang R C, et al. Mineralogical constraints on the genesis of W-Nb-Ta mineralization in the Laiziling granite (Xianghualing district, south China). *Ore Geology Reviews*, 2018(95): 695—712.
- [19] Liu Y S, Hu Z C, Gao S, et al. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard. *Chemical Geology*, 2008, 257(1—2): 34—43.
- [20] Chen L, Liu Y S, Hu Z C, et al. Accurate determinations of fifty-four major and trace elements in carbonate by LA-ICP-MS using normalization strategy of bulk components as 100%. *Chemical Geology*, 2011, 284(3—4): 283—295.
- [21] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geological Society London Special Publications*, 1989, 42(1): 313—345.
- [22] Monier G, Robert J L. Evolution of the miscibility gap between muscovite and biotite solid-solutions with increasing lithium content: an experimental study in the system  $K_2O-Li_2O-MgO-FeO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O-Hf$  at 600°C, 2 kbar  $P_{H_2O}$ : Comparison with natural lithium micas. *Mineralogical Magazine*, 1986, 50(358): 641—651.
- [23] Henry D J, Dutrow B L. Tourmaline at diagenetic to low-grade metamorphic conditions: Its petrologic

- applicability. *Lithos*, 2012(154):16–32.
- [24] Rudnick R L, Gao S. Composition of the continental crust. *Treatise on geochemistry*, 2003:1–64.
- [25] Bau M. Controls on the fractionation of isoivalent trace elements in magmatic and aqueous systems: Evidence from Y/Ho, Zr/Hf, and lanthanide tetrad effect. *Contributions to Mineralogy Petrology*, 1996, 123(3):323–333.
- [26] Ballouard C, Poujol M, Boulvais P, et al. Nb - Ta fractionation in peraluminous granites: A marker of the magmatic - hydrothermal transition. *Geology*, 2016, 44(3):231–234.
- [27] 朱金初, 吴长年, 刘昌实, 等. 新疆阿尔泰可可托海3号伟晶岩脉岩浆: 热液演化和成因. *高校地质学报*, 2000, 6(1):40–52. (Zhu J C, Wu C N, Liu C S, et al. Magmatic-hydrothermal evolution and genesis of Koktokay NO. 3 rare metal pegmatite dyke, Altai, China. *Geological Journal of China Universities*, 2000, 6(1):40–52.)
- [28] 赵振华, 熊小林, 韩小东. 花岗岩稀土元素四分组效应形成机理探讨——以千里山和巴尔哲花岗岩为例. *中国科学(D辑)*, 1999, 29(4):331–338. (Zhao Z L, Xiong X L, Han X D. Formation mechanism of REE tetrad effect in granites: A case study of Qianlishan and Baerzha granites. *Science in China (Series D)*, 1999, 29(4):331–338.)
- [29] Irber W. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu\*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(3–4):489–508.
- [30] Miller C F, McDowell S M, Mapes R W. Hot and cold granites? Implications of zircon saturation temperatures and preservation of inheritance. *Geology*, 2003(31):529–532
- [31] 王汝成, 朱金初, 张文兰, 等. 南岭地区钨锡花岗岩的成矿矿物学: 概念与实例. *高校地质学报*, 2008, 14(4):485–495. (Wang R C, Zhu J C, Zhang W L, et al. Ore-Forming Mineralogy of W-Sn granites in the Nanling range: Concept and case study. *Geological Journal of China Universities*, 2008, 14(4):485–495.)
- [32] Zhou Q F, Qin K Z, Tang D M, et al. A combined EMPA and LA-ICP-MS study of muscovite from pegmatites in the Chinese Altai, NW China; Implications for tracing rare - element mineralization type and ore - forming process. *Minerals*, 2022, 12(3):377.
- [33] de Costa I R, Antunes I M H R, Récio C. The Mg/(Fe+Mg) ratio and the Ti and a site contents of tourmaline as promising indicators of granitic magma evolution. *Journal of Iberian Geology*, 2021, 47(1–2):307–321.
- [34] 付建刚, 李光明, 董随亮, 等. 西藏拉隆穹窿淡色花岗岩中石榴子石矿物学研究及对岩浆-热液过程的指示. *沉积与特提斯地质*, 2022, 42(2):12. (Fu J G, Li G M, Dong S L, et al. Mineral chemistry of garnet and its implication for the magmatic - hydrothermal transition in rare metal leucogranites in the Lalong dome, southern Tibet, China. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2022, 42(2):12.)
- [35] Hernandez-Filiberto L, Roda-Robles E, Simmons W B, et al. Garnet as indicator of pegmatite evolution: The case study of pegmatites from the Oxford pegmatite field (Maine, USA). *Minerals*, 2021, 11(8):802.
- [36] Candela P A, Bouton S L. The influence of oxygen fugacity on tungsten and molybdenum partitioning between silicate melts and ilmenite. *Economic Geology*, 1990, 85(3):633–640.
- [37] Cao C, Shen P, Bai Y X, et al. Chemical evolution of micas and Nb - Ta oxides from the Koktokay pegmatites, Itay, NW China: Insights into rare-metal mineralization and genetic relationships. *Ore Geology Reviews*, 2022(146):104933.
- [38] 矿产资源工业要求手册编委会. 矿产资源工业要求手册. 北京:地质出版社, 2004.
- [39] Liu C, Wang R C, Wu F Y, et al. Spodumene pegmatites from the Pusila pluton in the higher Himalaya, south Tibet: Lithium mineralization in a highly fractionated leucogranite batholith. *Lithos*, 2020, 358–359(7):105421.
- [40] 刘晨, 王汝成, 吴福元, 等. 珠峰地区锂成矿作用: 喜马拉雅淡色花岗岩带首个锂电气石-锂云母型伟晶岩. *岩石学报*, 2021, 37(11):3287–3294. (Liu C, Wang R C, Wu F Y, et al. Lithium mineralization in Qomolangma: First report of elbaite - lepidolite subtype pegmatite in the Himalaya leucogranite belt. *Acta Petrologica Sinica*, 2021, 37(11):3287–3294.)
- [41] 刘小驰, 吴福元, 王汝成, 等. 珠峰地区热曲锂辉石

- 伟晶岩的发现及对喜马拉雅稀有金属成矿作用研究的启示. 岩石学报, 2021, 37(11): 3295—3304. (Liu X C, Wu F Y, Wang R C, et al. Discovery of spodumene-bearing pegmatites from Ra Chu in the Mount Qomolangma region and its implications for studying rare-metal mineralization in the Himalayan orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 2021, 37(11): 3295—3304.)
- [42] Jiang S Y, Yu J M, Lu J J. Trace and rare-earth element geochemistry in tourmaline and cassiterite from the Yunlong tin deposit, Yunnan, China: implication for migmatitic - hydrothermal fluid evolution and ore genesis. *Chemical Geology*, 2004, 209(3—4): 193—213.
- [43] Kalliomäki H, Wagner T, Fusswinkel T, et al. Major and trace element geochemistry of tourmalines from Archean orogenic gold deposits: Proxies for the origin of gold mineralizing fluids? *Ore Geology Reviews*, 2017, 91: 906—927.
- [44] Cheng L N, Zhang C, Liu X C, et al. Significant boron isotopic fractionation in the magmatic evolution of Himalayan leucogranite recorded in multiple generations of tourmaline. *Chemical Geology*, 2021, 571(6): 120194.
- [45] 曾令森, 赵令浩, 高利娥, 等. 喜马拉雅造山带中新世岩浆型石榴子石的矿物化学特征: 从高 Sr/Y 花岗岩到淡色花岗岩. 岩石学报, 2019, 35(6): 1599—1626. (Zeng L S, Zhao L H, Gao L E, et al. Magmatic garnet from Mid-Miocene co-genetic high Sr/Y granite and leucogranite from the Himalayan orogenic belt, southern Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 2019, 35(6): 1599—1626.)
- [46] Whitworth M P. Petrogenetic implications of garnets associated with lithium pegmatites from SE Ireland. *Mineralogical Magazine*, 1992, 56(382): 75—83.
- [47] Müller A, Kearsley A, Spratt J, et al. Petrogenetic implications of magmatic garnet in granitic pegmatites from Southern Norway. *Canadian Mineralogist*, 2012, 50(4): 1095—1115.
- [48] Zhu M T, Zhang L C, Dai Y P, et al. In situ zircon U - Pb dating and O isotopes of the Neoproterozoic Hongtoushan VMS Cu - Zn deposit in the North China Craton: Implication for the ore genesis. *Ore Geology Reviews*, 2015(67): 354—367.
- [49] 李长民. 锆石成因矿物学与锆石微区定年综述. 地质调查与研究, 2009, 32(3): 14. (Li C M. A review on the minerageny and situ microanalytical dating techniques of zircons. *Geological Survey and Research*, 2009, 32(3): 14.)
- [50] Raimbault L, Cuney M, Azencott C, et al. Geochemical evidence for a multistage magmatic genesis of Ta-Sn-Li mineralization in the granite at beauvoir, French Massif-Central. *Economic Geology*, 1995, 90(3): 548—576.
- [51] Wang R C, Fontan F, Xu S J, et al. Hafnian zircon from the apical part of the Suzhou granite, China. *The Canadian Mineralogist*, 1996, 34(5): 1001—1010.
- [52] Wang R C, Fontan F, Chen X M, et al. Accessory minerals in the Xihuashan Y - enriched granitic complex, southern China: A record of magmatic and hydrothermal stages of evolution. *The Canadian Mineralogist*, 2003, 41(3): 727—748.
- [53] 李洁. 华南中生代稀有金属花岗岩岩浆演化与热液作用过程的矿物学约束. 博士学位论文. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 2015. (Li J. Mineralogical constraints on magmatic and hydrothermal evolutions of the Mesozoic rare-metal granites in South China. Ph. D. Dissertation. Guangzhou, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2015.)
- [54] Van Lichtenvelde M, Melcher F, Wirth R. Magmatic vs. hydrothermal origins for zircon associated with tantalum mineralization in the Tanco pegmatite, Manitoba, Canada. *American Mineralogist*, 2009, 94(4): 439—450.
- [55] Wang X, Griffin W L, Chen J. Hf contents and Zr/Hf ratios in granitic zircons. *Geochemical Journal*, 2010, 44(1): 65—72.
- [56] Zeng L J, Niu H C, Bao Z W, et al. Chemical lattice expansion of natural zircon during the magmatic - hydrothermal evolution of A-type granite. *American Mineralogist*, 2017, 102(3): 655—665.

(责任编辑 杨 贞)