

赵洪飞, 刘亮, 阳杰华等. 2026. 川西可尔因业隆沟矿床白云母与铌铁族矿物地球化学特征及其对稀有金属成矿的制约. 岩石学报, 42(06): 2086-2104, doi: 10.18654/1000-0569/2026.06.08; CSTR: 32089.14. APS-ysxb. 2026.06.08

川西可尔因业隆沟矿床白云母与铌铁族矿物地球化学特征及其对稀有金属成矿的制约^{*}

赵洪飞^{1, 2} 刘亮^{1**} 阳杰华¹ 张辉¹ 毛伟¹ 周婷婷^{1, 3} 唐勇¹ 吕正航¹ 刘玉平¹
ZHAO HongFei^{1, 2}, LIU Liang^{1**}, YANG JieHua¹, ZHANG Hui¹, MAO Wei¹, ZHOU TingTing^{1, 3}, TANG Yong¹, LV ZhengHang¹ and LIU YuPing¹

1. 中国科学院地球化学研究所, 关键矿产成矿与预测全国重点实验室, 贵阳 550081
2. 中国科学院大学, 北京 100049
3. 桂林理工大学, 桂林 541006
1. *State Key Laboratory of Critical Mineral Research and Exploration, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China*
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*
3. *Guilin University of Technology, Guilin 541006, China*
- 2025-09-20 收稿, 2026-03-21 改回.

Zhao HF, Liu L, Yang JH, Zhang H, Mao W, Zhou TT, Tang Y, Lv ZH and Liu YP. 2026. Geochemical characteristics of muscovite and columbite-group minerals in the Yelonggou deposit, Ke'eryin area, West Sichuan: Constraints on rare-metal mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 42(6): 2086-2104, doi: 10.18654/1000-0569/2026.06.08; CSTR: 32089.14. APS-ysxb. 2026.06.08

Abstract The Songpan-Ganze orogenic belt hosts widespread pegmatite-type rare metal deposits and represents an important rare-metal metallogenic province in China. Clarifying the magmatic-hydrothermal evolution of pegmatites in this region and their control on rare-metal mineralization is of great significance for regional mineral exploration and prospecting. Taking the Yelonggou pegmatite-type Li-polymetallic deposit in the Ke'eryin area of western Sichuan as an example, this study systematically investigates the microstructures and microchemical compositions of muscovite and columbite-group minerals (CGM) in both mineralized and non-mineralized pegmatites, based on detailed field surveys and microscopic observations. Comparisons with muscovite from the Ke'eryin two-mica granite were also conducted, aiming to elucidate the genetic relationship between pegmatites and granites and the Li-Be-Nb-Ta mineralization mechanism during magmatic-hydrothermal evolution. EPMA and LA-ICP-MS results show that from Ke'eryin two-mica granite through non-mineralized to mineralized Yelonggou pegmatites, the Fe and Ti contents, as well as K/Rb and Nb/Ta ratios in muscovite, decrease progressively, while Al content increases, indicating increasing degrees of evolution. CGM1 exhibits homogeneous structure and chemical composition, whereas CGM2 develops zonation and replacement-dissolution features, sometimes growing as overgrowths on CGM1 rims. The structures and compositions of muscovite and CGM indicate that pegmatite evolution in the study area experienced two main stages: a magmatic stage and a magmatic-hydrothermal transitional stage. During the magmatic stage (from microcline-albite pegmatite to albite-spodumene pegmatite), fractional crystallization promoted continuous enrichment of Nb, Ta, Cs, Rb, Be, B and P. In contrast, continuous crystallization of spodumene gradually reduced the Li content in the system and led to the formation of homogeneous CGM1 with low Ta content. During the magmatic-hydrothermal transitional stage (from albite-spodumene pegmatite to saccharoidal albite aggregates), fluid exsolution caused significant decreases of Li, Cs, Rb, Nb and Ta in muscovite, and the development of zoned muscovite and CGM2 with both zoned and replacement-dissolution structures. The low Ta and Nb in the rims of zoned muscovite correspond to the high Ta and Nb in CGM2, indicating that late-stage volatile-rich fluids induced localized re-enrichment of Nb and Ta via replacement of early-formed minerals and host rocks. Muscovite in both Ke'eryin biotite monzogranite and Yelonggou pegmatites contains extremely high Li. From microcline-albite pegmatite to albite-spodumene pegmatite, the K/Rb and Nb/Ta ratios in muscovite vary little, suggesting that the initial mineralizing melt was extremely Li-rich and underwent limited subsequent

^{*} 本文受到国家重点研发计划(2023YFC2906401)、中国科学院战略性先导科技专项(XDA0430102)和新一轮找矿突破战略行动科技支撑项目(ZKKJ202424)联合资助。
第一作者简介: 赵洪飞, 男, 1999 年生, 硕士生, 资源与环境专业, E-mail: zhaohongfei@mail.gyig.ac.cn
^{**} 通讯作者: 刘亮, 男, 1985 年生, 特聘研究员, 主要从事花岗岩成因与稀有金属成矿规律研究, E-mail: liuliang@vip.gyig.ac.cn

evolution. Compositional and microscopic observations indicate that Columbite-group minerals underwent two stages of mineralization: the magmatic stage produced homogeneous, low-Ta CGM1 (Nb mineralization), while the magmatic-hydrothermal transitional stage formed CGM2 with higher Ta[#] and Mn[#] (Ta mineralization). Moreover, field and microscopic observations reveal widespread albitization in pegmatites, which can serve as an important indicator for identifying Nb-Ta mineralized pegmatites in the Yelonggou area.

Key words Pegmatite; Muscovite; Columbite-group minerals; Ke'eryin; Mineralization process

摘 要 松潘-甘孜造山带广泛分布伟晶岩型稀有金属矿床,是我国重要的稀有金属成矿带。厘清该区伟晶岩的岩浆-热液演化过程及其对稀有金属成矿的控制,对于区域勘查与找矿具有重要意义。本文以川西可尔因地区业隆沟伟晶岩型锂多金属矿床为例,基于详细的野外调查与显微观察,系统研究了含矿与不含矿伟晶岩中白云母及钽铁族矿物的显微结构与微区成分,并与可尔因二云母花岗岩中的白云母进行综合对比,旨在揭示伟晶岩与花岗岩的成因关系及Li-Be-Nb-Ta成矿机制。电子探针与LA-ICP-MS分析结果显示,从可尔因二云母花岗岩、业隆沟不含矿伟晶岩到含矿伟晶岩,白云母中Fe、Ti含量及K/Rb、Nb/Ta比值逐渐下降,而Al含量逐渐升高,反映演化程度增加;CGM1表现为结构和化学成分均一,而CGM2则发育环带与交代溶蚀结构,有时呈增生边生长于CGM1边缘。白云母与CGM的结构与成分表明,研究区伟晶岩演化经历了岩浆阶段与岩浆-热液过渡阶段两个主要阶段。在岩浆阶段(微斜长石-钠长石伟晶岩至钠长石-锂辉石伟晶岩),分离结晶促使Nb、Ta、Cs、Rb、Be、B、P等元素持续富集,而锂辉石的结晶导致体系Li含量逐渐降低,同时形成结构与成分均一、Ta含量较低的CGM1。在岩浆-热液过渡阶段(钠长石-锂辉石伟晶岩至糖粒状钠长石集合体),流体出溶过程使白云母中的Li、Cs、Rb、Nb、Ta等元素含量明显下降,同时出现环带白云母及发育环带与交代溶蚀结构的CGM2。环带白云母低Ta、Nb含量与CGM2高Ta、Nb含量对应,表明晚期富挥发分流体通过对早期矿物及围岩的交代,实现了Nb和Ta元素的小规模再富集。可尔因二云母花岗岩和业隆沟伟晶岩中白云母均具有极高Li含量。从微斜长石-钠长石伟晶岩到钠长石-锂辉石伟晶岩,白云母K/Rb和Nb/Ta变化幅度较小,显示成矿初始熔体极富Li,且后续演化程度有限。成分及显微结果表明,钽钽铁矿经历两阶段成矿:岩浆阶段形成结构与成分均一、Ta[#]较低的CGM1(Nb成矿);岩浆-热液过渡阶段形成Ta[#]和Mn[#]较高的CGM2(Ta成矿)。此外,野外与显微观察发现,伟晶岩中普遍发育钠长石化,可作为业隆沟Nb-Ta成矿伟晶岩的重要识别标志。

关键词 伟晶岩;白云母;钽铁族矿物;可尔因;成矿过程

中图法分类号 P588.131; P618.6

LCT(Li-Cs-Ta)型伟晶岩通常产于造山带中,是Li、Be、Nb、Ta、Rb、Cs等稀有金属的主要来源,因其品位高,易开采等优势而备受关注。传统观点认为伟晶岩是花岗质岩浆分异演化晚期残余岩浆固结的产物(Shearer *et al.*, 1992; Wang and Zhou, 2018)。然而,近年来研究指出,伟晶岩在成岩过程中经历了从岩浆阶段向热液阶段的复杂转换演化,并在此过程中实现了稀有金属元素的高效富集和分异(Kaeter *et al.*, 2018; Ballouard *et al.*, 2020; Choi *et al.*, 2024)。因此,系统研究伟晶岩的岩浆-热液过渡过程,对于深入理解伟晶岩型稀有金属矿床的成因机制以及指导找矿勘探具有重要意义。松潘-甘孜造山带位于青藏高原东部,是我国最重要的稀有金属成矿带之一,带内发育甲基卡、可尔因、扎乌龙等一系列大型至超大型伟晶岩型稀有金属矿床(李建康等, 2023)。其中,可尔因矿田位于造山带东段,围绕可尔因二云母花岗岩体分布有上千条伟晶岩脉,呈现出明显的空间分带性。部分伟晶岩脉中稀有金属高度富集,形成了以李家沟、党坝、加达、业隆沟等为代表的大型-超大型伟晶岩锂多金属矿床(廖远安和姚学良, 1992; 李建康等, 2023)。近年可尔因地区找矿勘察工作取得了许多重要成果,其中党坝Li₂O资源量超过107.82万t(四川省地质矿产勘查开发局化探队, 2022^①),李家沟Li₂O资源量51.22万t(四川省地质矿产勘查开发局化探队, 2022),加达Li₂O资源量22万t(王登

红等, 2022; 李鑫等, 2024),业隆沟Li₂O资源量16.9万t(四川省地质矿产勘查开发局化探队, 2023^②)。目前,可尔因预测Li₂O远景资源量已超400万t,是“川西大型锂资源基地”的重要组成部分(王登红, 2021)。前人研究主要集中于该矿田的成岩成矿时代(李建康等, 2006; Fei *et al.*, 2020; 费光春等, 2020; 朱汇派等, 2023; Yue *et al.*, 2024; Li *et al.*, 2025; 罗伟等, 2025)、成矿规律及典型矿床研究(李鑫等, 2024)、成矿熔-流体性质(Fei *et al.*, 2018; 邓运, 2018; Liu *et al.*, 2025)及岩石成因(Fei *et al.*, 2023; Yan *et al.*, 2025; Dai *et al.*, 2025; Liu *et al.*, 2025; 费光春等, 2025)等方面。而在矿物学特征方面,现有研究主要聚焦于李家沟和党坝矿床(Chen *et al.*, 2024; Xu *et al.*, 2024; 胡方洪等, 2024; Liu *et al.*, 2025; 费光春等, 2025),业隆沟矿床也已有多个团队陆续开展研究,但对于区内伟晶岩的岩浆-热液演化过程及其对稀有金属成矿作用的控制机制仍缺乏系统认识。

白云母是伟晶岩中主要的造岩矿物之一,既可在岩浆阶段结晶,也参与后期的热液演化过程,其成分和结构特征可

① 四川省地质矿产勘查开发局化探队. 2022. 四川省马尔康市党坝矿区锂矿勘探及资源储量核实报告. 1-165

② 四川省地质矿产勘查开发局化探队. 2023. 四川省金川县业隆沟锂辉石矿区生产勘探报告

记录岩浆-热液整个演化过程的信息(韩志辉等, 2024)。白云母由硅氧四面体片(T)与八面体片(O)交替构成的T-O-T结构层组成,可通过类质同象容纳多种稀有金属元素(如Rb和Cs可替代T-O-T层间的K、Li、Nb、Ta等可部分替代八面体位上的Al、Fe、Mg),是稀有金属的重要载体矿物(王汝成等, 2019)。采用微区原位分析技术对白云母的结构和成分特征进行研究,有助于揭示伟晶岩演化过程中稀有金属的共生特征(Kaeter *et al.*, 2018; 王汝成等, 2019; Xing *et al.*, 2020; Yin *et al.*, 2020; 秦克章等, 2024)。伟晶岩中的铌铁族矿物(columbite group minerals, 简称CGM),化学通式为 $(\text{Mn}, \text{Fe})(\text{Ta}, \text{Nb})_2\text{O}_6$,是Ta和Nb的主要赋存矿物,常表现出成分分带,溶蚀结构及晚期增生等特征。其成分与结构信息已被广泛用于识别稀有金属成矿过程中复杂的岩浆-热液演化路径(Van Lichtervelde *et al.*, 2007; Kaeter *et al.*, 2018; 罗耀清等, 2023; Xu *et al.*, 2024)。本研究在岩相学观察的基础上,结合原位微区分析技术(电子探针和LA-ICM-MS),系统开展业隆沟伟晶岩中白云母和CGM的结构及化学成分研究,并与可尔因二云母花岗岩中白云母的成分特征进行对比。研究旨在揭示业隆沟伟晶岩与花岗岩的成因关系以及岩浆-热液过渡对Li、Be、Rb、Cs、Nb、Ta等稀有金属成矿的控制机制,从而为区域稀有金属矿产勘查提供关键的地质依据。

1 地质背景

1.1 区域地质背景

松潘-甘孜造山带位于我国青藏高原东部,全长约2800km,占青藏高原约五分之一部分,是在古特提斯洋闭合背景下,华北、华南及羌塘陆块汇聚碰撞作用形成的复合型造山带(图1a)(Roger *et al.*, 2010; Xu *et al.*, 2020)。该造山带整体呈东西向展布,成矿带自东部的松潘-甘孜地区向西延伸至西部的西昆仑-祁连山,构造形态上表现为带状与倒三角形相叠加的复合几何形态。其东缘以龙门山断裂为界与扬子地块西缘相接;北界为阿尼玛卿缝-勉略缝合带,与东昆仑-秦岭造山带接壤;西南界则为金沙江缝合带,与北羌塘(又称东羌塘)地块相隔(图1a)(Roger *et al.*, 2010; Hu *et al.*, 2020; Xu *et al.*, 2020)。松潘-甘孜造山带的东段继承自扬子陆块,下部为新元古代结晶基底,其上覆盖有古生代至早-中三叠世的沉积盖层(许志琴等, 1992; Roger *et al.*, 2010; Dong and Santosh, 2016)。晚三叠世时期,该区沉积了厚度达5~15km的大规模复理石建造,主要由砂岩、板岩组成,总体上属于变泥质岩。约230Ma时,随着古特提斯洋的最终闭合,该地体经历了晚三叠世至早-中侏罗世的基里里造山作用,形成了广泛发育的复杂造山构造(Xu *et al.*, 2020; 许志琴等, 2020, 2023; Şengör *et al.*, 2023)。该阶段的变形特征主要表现为新元古代基底与上覆三叠系沉积盖层之间发育的大型褶皱系统以及滑脱剪切构造,同时伴随着

强烈的中生代岩浆活动(226~180Ma),形成了多种类型的花岗质岩石(Roger *et al.*, 2004; Zhang *et al.*, 2006, 2007; Roger *et al.*, 2010; Zhao *et al.*, 2019)。此外,松潘-甘孜造山带内存在大量片麻岩穹隆,它们由224~190Ma的核部花岗岩和幔部三叠纪浊积岩组成(Gao *et al.*, 2023; 许志琴等, 2023),其穹隆周缘广泛发育的断裂和裂隙系统为伟晶岩熔体提供了良好的上升通道,从而控制了大量伟晶岩脉的形成。近年来,松潘-甘孜-甜水海地体的锂等稀有金属资源潜力逐渐显现,成为中国西部锂成矿的重要区域。其中,东段已发现甲基卡、可尔因、扎乌龙等多个大型-超大型锂辉石矿床;西段则以白龙山-大红柳滩矿集区为代表,已发现多个大型-超大型锂辉石矿床。这些重大发现标志着松潘-甘孜-甜水海地体已成为我国西部最具成矿潜力的锂成矿带之一(王登红等, 2017; Yan *et al.*, 2020, 2020; 王登红, 2021)。

1.2 矿床地质特征

可尔因矿田位于松潘-甘孜造山带东部,区域地层主要出露三叠系西康群的变质沉积岩(图1b)。三叠系自下而上依次为中三叠统杂谷脑组,上三叠统侏倭组和新都桥组,各组之间呈整合接触,上覆第四系地层与其间为不整合接触关系。该区三叠系沉积岩以灰黑色长英质砂岩、粉砂岩、绢云母板岩、泥质板岩及灰岩为主,沉积特征指示深水浊积环境(Xu *et al.*, 2020)。区域内岩浆活动较为频繁,主要发育太阳河岩体与可尔因岩体(图1b)。其中太阳河岩体为典型I型花岗岩,主要岩性包括石英闪长岩和黑云母二长花岗岩(锆石U-Pb年龄为239~202Ma),研究表明其与可尔因岩体不属于同一岩浆来源(Yuan *et al.*, 2010; Deschamps *et al.*, 2017)。而可尔因岩体则为典型S型花岗岩,岩性包括黑云母正长花岗岩、黑云母二长花岗岩、二云母花岗岩和白云母(钠长)花岗岩(图1b),其中二云母花岗岩的出露面积达188km²(廖远安和姚学良, 1992)。年代学显示二云母花岗岩的锆石U-Pb年龄为219.2±2.3Ma(Fei *et al.*, 2020),被认为是区域伟晶岩脉的母岩(Yan *et al.*, 2025)。伟晶岩脉的分布与可尔因岩体有明显的空间对应关系(李建康等, 2023),在距离岩体5km范围内呈明显的水平分带特征,由岩体向外依次发育:(I)微斜长石伟晶岩带(0~800m);(II)微斜长石-钠长石伟晶岩带(800~1500m);(III)钠长石伟晶岩带(150~2300m);(IV)钠长石-锂辉石伟晶岩带(2300~5000m);以及(V)锂(白)云母伟晶岩脉(>5000m)(图1b)(古城会, 2014)。业隆沟矿床位于可尔因西南侧,区内地层主要包括杂谷脑组上段与侏倭组,局部有第四系沉积物覆盖。受区域动力变质作用及燕山期岩浆热液影响,矿区沉积地层变质为各类片岩和角闪岩。由于勘查区范围相对较小,仅出露II、III、IV型伟晶岩脉体(图1b),且自(II)型至(IV)型伟晶岩,稀有元素富集程度逐渐升高。其中钠长石-锂辉石伟晶岩(IV)为矿区内最主要的赋矿岩石类型,其锡石U-Pb年龄为202.6Ma(Yue *et al.*, 2024)。业隆沟锂矿区共计发

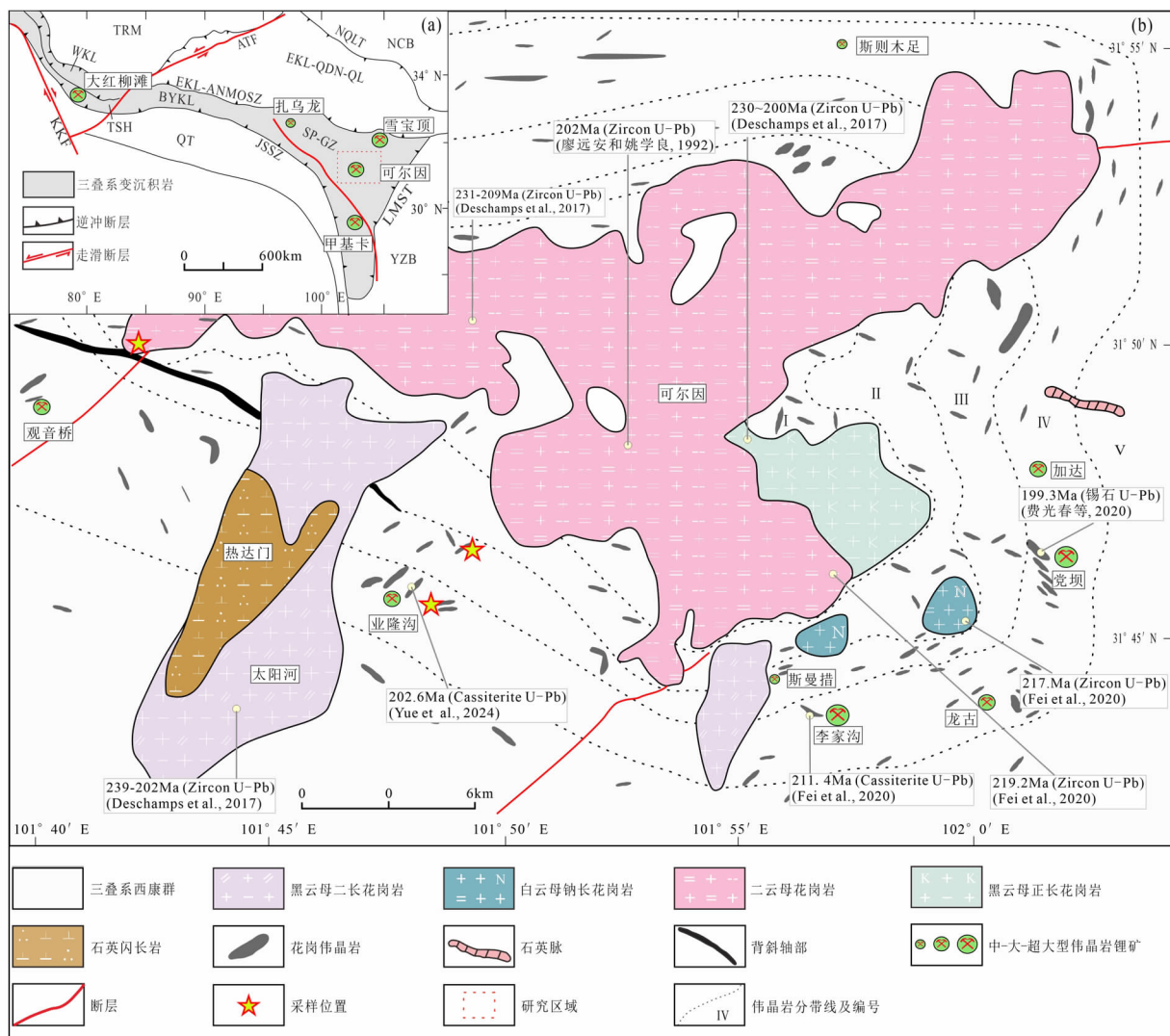


图1 松潘甘孜地体的构造简图(a,据 Xu *et al.*, 2020 修改)及可尔因矿田地质简图(b,据费光春等, 2020 修改)

(Ⅰ) 微斜长石伟晶岩带; (Ⅱ) 微斜长石-钠长石伟晶岩带; (Ⅲ) 钠长石伟晶岩带; (Ⅳ) 钠长石-锂辉石伟晶岩带以及 (Ⅴ) 锂(白)云母伟晶岩脉。ATF-阿尔金断层; BYKL-巴颜喀拉地体; EKL-ANMQSZ-东昆仑-阿尼玛卿缝合带; EKL-QDM-QL-东昆仑-柴达木-祁连地体; JSSZ-金沙江缝合带; LMST-龙门山逆冲断层; KKF-喀喇昆仑断层; NCB-华北陆块; NQLT-北祁连逆冲断层; QT-羌塘地体; SP-GZ-松潘-甘孜亚地体; TRM-塔里木陆块; TSH-甜水海地体; WKL-西昆仑地体; XSHF-鲜水河断层; YZB-扬子陆块

Fig.1 Simplified tectonic map of the Songpan-Ganze terrane (a, modified after Xu *et al.*, 2020) and geological map of the Ke'erwin ore field (b, modified after Fei *et al.*, 2020)

(I) Microcline pegmatite zone; (II) Microcline-albite pegmatite zone; (III) Albite pegmatite zone; (IV) Albite-spodumene pegmatite zone; and (V) Lepidolite (muscovite) pegmatite zone. ATF-Altin-Tagh fault; BYKL-Bayankala subterrane; EKL-ANMQSZ-East Kunlun-Animaqen suture zone; EKL-QDM-QL-East Kunlun-Qaidam-Qilian terrane; JSSZ-Jingsha suture zone; KKF-Karakorum fault; LMST-Longmenshan thrust; NCB-North China Block; NQLT-North Qilian thrust; QT-Qiantang terrane; SP-GZ-Songpan-Ganze subterrane; TRM-Tarim Block; TSH-Tanshuihai subterrane; WKL-West Kunlun terrane; XSHF-Xianshuihe fault; YZB-Yangtze block

现锂矿体 32 条,矿体形态受节理控制,多呈似层状、透镜状产出,成群分布在勘查区北部、中部、西南部。矿体主要赋存于杂谷脑组上段二云石英片岩、透辉石英角岩中。矿石以块状构造和斑杂状构造为主,部分呈条带状构造。虽然矿石结构构造类型与锂辉石成矿的直接关系不明显,但研究发现斑杂状构造的矿石普遍富集铌钽矿化(廖芝华等, 2017)。截止目前,业隆沟矿床累计探明 Li_2O 资源量 169,547t,平均品位

位达 1.34%, 达到大型锂矿床规模, 并伴生有 Nb、Ta 等稀有金属资源 (四川省地质矿产勘查开发局化探队, 2023)。

业隆沟 1 号伟晶岩脉是矿区内主要开采对象,脉体东西走向,倾向北,倾角 $65^{\circ} \sim 80^{\circ}$,长约 300m,宽 2 ~ 10m。伟晶岩脉呈全脉锂矿化,内部分带很弱,在脉体与围岩接触处可见约 5cm 的细粒结构带,主要由细粒的钠长石和石英组成,向内过渡为 10 ~ 15cm 的文象-似文象结构带,该结构带连续

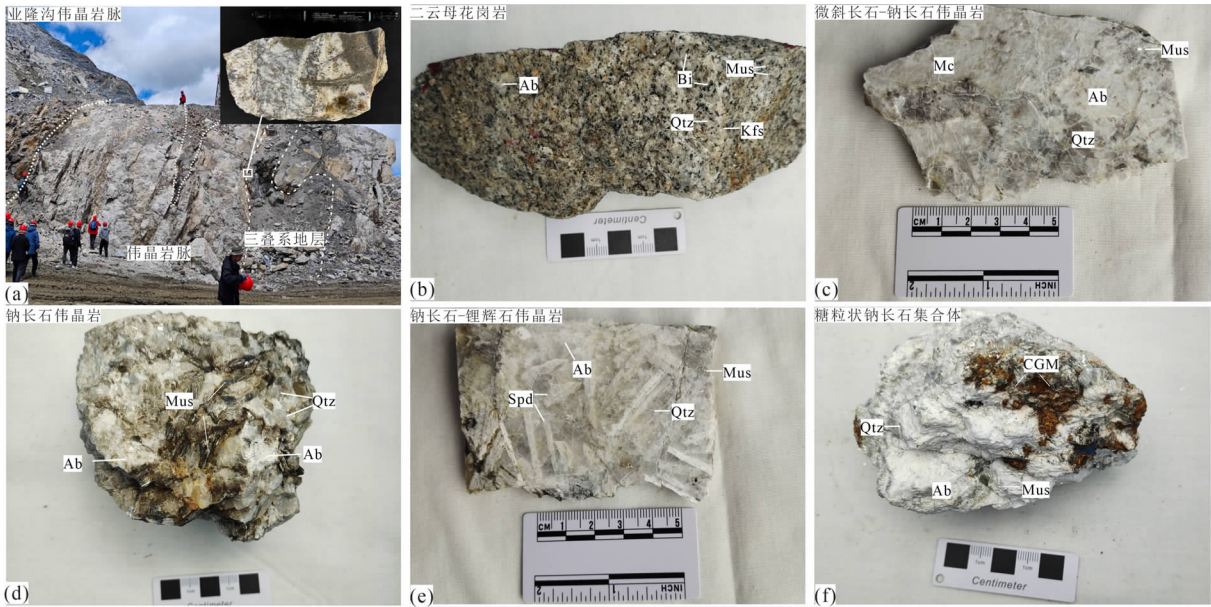


图2 科尔因二云母花岗岩、业隆沟伟晶岩脉的野外及代表性手标本照片
Ab-钠长石; Bi-黑云母; CGM-铌钽铁矿; Kfs-钾长石; Mc-微斜长石; Mus-白云母; Qtz-石英; Spd-锂辉石
Fig. 2 Field outcrops and representative hand specimens of the Ke'eryin two-mica granite and Yelonggou pegmatite dykes
Ab-albite; Bi-biotite; CGM-columbite-group minerals; Kfs-potassium feldspar; Mc-microcline; Mus-muscovite; Qtz-quartz; Spd-spodumene

表1 代表性样品的岩性及矿物组成特征

Table 1 Lithological and mineralogical characteristics of representative samples		
样品岩性	主要矿物组成 (vol %)	副矿物和稀有金属矿物
二云母花岗岩	钠长石(28 ~ 31)、石英(31 ~ 33)、微斜长石(25 ~ 29)、黑云母(2 ~ 3)、白云母(4 ~ 5)	磷灰石、石榴子石、独居石、电气石、锆石
微斜长石-钠长石伟晶岩	石英(33 ~ 40)、微斜长石(35 ~ 45)、钠长石(10 ~ 14)、锂辉石(2 ~ 4)、白云母(5 ~ 7)	锂辉石、磷灰石、石榴子石、电气石、锆石
钠长石伟晶岩	钠长石(49 ~ 55)、石英(33 ~ 36)、白云母(8 ~ 10)、微斜长石(5 ~ 10)	磷灰石、锆石
钠长石-锂辉石伟晶岩	锂辉石(33-40)、石英(20 ~ 24)、钠长石(23 ~ 30)、微斜长石(3 ~ 5)、白云母(5 ~ 7)	锂辉石、磷灰石、CGM、氟磷锰铁矿、磁铁矿、锡石、锆石
糖粒状钠长石集合体	钠长石(40 ~ 45)、白云母(33 ~ 35)、石英(18 ~ 25)	磷灰石、锆石、锡石、CGM

性较差,主要为粗粒的石英和长石,随即出现锂辉石矿化(图2a),锂辉石呈柱状晶型(图2e),长2~10cm,脉内未见石英核。本次的锂成矿伟晶岩均采自业隆沟矿床1号伟晶岩脉露头 and 原矿堆场。本研究以业隆沟伟晶岩为研究对象,同时采集了矿区北部的二云母花岗岩样品(图2b、表1)。由于业隆沟矿床范围较小,区内仅出露微斜长石-钠长石型、钠长石型及钠长石-锂辉石型伟晶岩,缺乏微斜长石型和白(锂)云母伟晶岩,为此,我们沿垂直于区域岩性分带方向自矿区外围西北部向矿区南部进行了系统采样,所采集样品的具体岩性特征如下:

二云母花岗岩 整体呈灰白色,因风化表面呈浅黄褐色,具块状构造,中-细粒等粒结构(图2b)。主要矿物组成为斜长石(30%~40vol%)、石英(30%~35vol%)及微斜长石(20%~30vol%),黑云母和白云母总量少于10vol%。副矿

物包括磷灰石、独居石、锆石、石榴子石和电气石等。

伟晶岩 自微斜长石-钠长石型到钠长石型再到钠长石-锂辉石型,岩性变化主要表现在长石类型的演化。其主导长石类型由钾长石逐渐被钠长石取代(图2c-e),且普遍可见钾长石被钠长石交代形成的残余结构(图3b)。微斜长石-钠长石伟晶岩中微斜长石占35%~45vol%,其次是石英,约30vol%,除造岩矿物,在该类伟晶岩中还可可见极少量锂辉石,并受晚期矿物交代;钠长石伟晶岩中钠长石约占50vol%,其次是石英和云母,仅少量微斜长石;钠长石-锂辉石型伟晶岩中锂辉石约占38vol%,锂辉石多呈灰白色至浅绿色,粒径约3~10cm,具良好自形,常见被钠长石、白云母和石英交代的

现象(图3d)。

糖粒状钠长石集合体 除典型的区域分带伟晶岩外,本次还采集到糖粒状钠长石集合体,样品采于业隆沟原矿堆

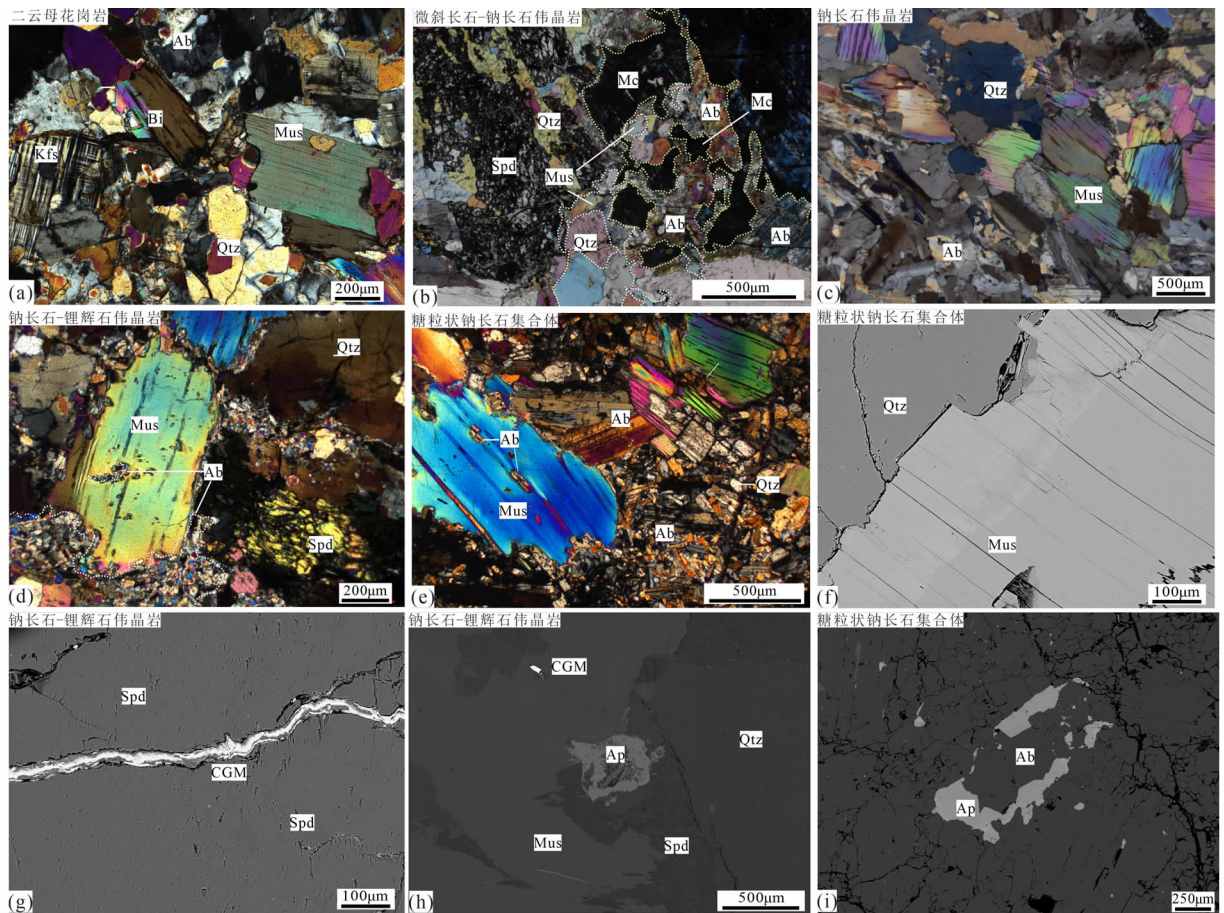


图3 可尔因二云母花岗岩与业隆沟伟晶岩显微照片(a-d)及背散射电子图像(f-i)

(a) 二云母花岗岩中的主要造岩矿物为石英、正长石、钠长石、白云母和黑云母; (b) 微斜长石-钠长石伟晶岩中, 微斜长石被钠长石交代, 早期结晶的锂辉石被石英交代; (c) 钠长石伟晶岩中, 白云母与钠长石、石英共生; (d) 钠长石-锂辉石伟晶岩中, 白云母与锂辉石、钠长石、石英共生, 且白云母和锂辉石被钠长石交代; (e) 糖粒状钠长石集合体中白云母与钠长石共生; (f) 糖粒状钠长石集合体中, 白云母发育明显环带结构; (g) 次生 CGM 细脉填充于锂辉石裂隙间; (h) 磷灰石与白云母、锂辉石、石英共生; (i) 糖粒状钠长石集合体中磷灰石受热液交代分解呈交代残余结构。Ap-磷灰石

Fig. 3 Microphotographs (a-d) and backscattering electron images (f-i) of the Ke'eryin two-mica mica granite and Yelonggou pegmatites

(a) The main rock-forming minerals in the mica granite include quartz, orthoclase, albite, muscovite and biotite; (b) The microcline-albite pegmatite, where microcline is metasomatized by albite, and early crystallized spodumene is metasomatized by quartz; (c) Albite pegmatite, muscovite coexisting with albite and quartz; (d) Albite-spodumene pegmatite, where muscovite coexists with spodumene, albite and quartz, while both muscovite and spodumene are replaced by albite; (e) Coexistence of muscovite and albite in sacchroidal albite; (f) Zoned muscovite developed in sacchroidal albite; (g) Secondary CGM veinlets fills the fissures in spodumene; (h) Apatite coexists with muscovite, spodumene and quartz; (i) Sacchroidal albite, where apatite undergoes xenomorphic alteration due to hydrothermal fluid metasomatism. Ap-apatite

场, 呈块状产出主要矿物有钠长石(40% ~ 45vol%)、白云母(33% ~ 35vol%) 和石英(18% ~ 25vol%), 副矿物包括CGM、磷灰石和锡石等。其矿物颗粒均匀细小, 呈他形糖粒状(图2f)。已有研究认为该类型集合体源自伟晶岩演化晚期富 Nb、Ta、Zr、Hf 及高场强元素的残余熔体结晶形成(邹天人和李庆昌, 2006)。而近年对于该类结构单元可能是伟晶岩演化后期出溶流体对已固结不同结构带中矿物进行交代形成的交代体(张辉等, 2021)。这些特征都证明该岩石属于伟晶岩演化晚期阶段的产物。

从不含矿伟晶岩(微斜长石-钠长石伟晶岩、钠长石伟晶岩)到含矿伟晶岩(钠长石-锂辉石伟晶岩、糖粒状钠长石集合体), 样品中白云母晶粒度逐渐减小, 自形程度降低, 且受钠长石交代程度增强(图3b, e)。在锂成矿伟晶岩中, 白云母与锂辉石、钠长石、石英、磷灰石及钾长石共生, 常被钠长石强烈交代(图3d, e)。背散射图像(BSE)显示糖粒状钠长石集合体中部分云母晶体呈明-暗环带结构(图3f), 指示其可能为岩浆-热液过渡阶段的产物(王汝成等, 2019)。磷灰石广泛存在于钠长石-锂辉石伟晶岩及糖粒状钠长石集合体

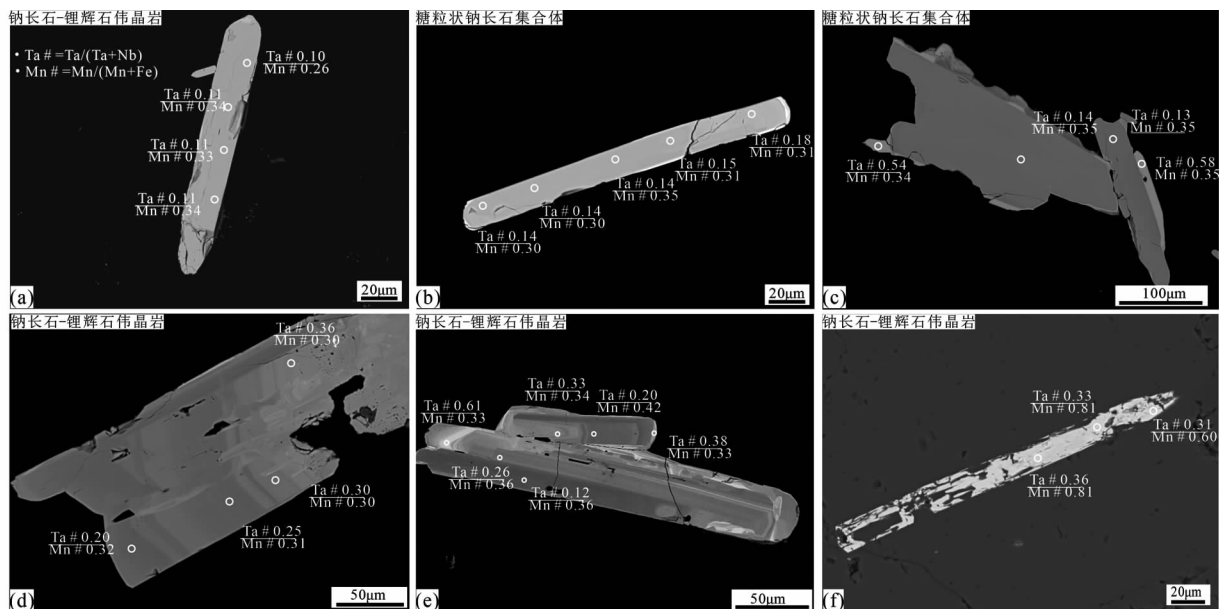


图4 业隆沟伟晶岩中 CGM 背散射图像

(a-b) 自形、成分均一的 CGM1, 代表岩浆阶段的产物; (c) 半自形 CGM2 的交代构造, 边缘发育富 Ta 的亮边结构; (d-e) 发育环带结构的半自形 CGM; (f) 高 Mn[#] CGM2, 呈交代残余特征

Fig. 4 Back-scattered electron (BSE) images of columbite group minerals (CGMs) from the Yelonggou pegmatites

(a-b) Euhedral, compositionally homogeneous CGM1, representing a magmatic stage; (c) Subhedral CGM2 with Ta-rich bright rims; (d-e) subhedral CGM2 exhibiting oscillatory zoning; (f) CGM2 with high Mn[#] showing residual textures indicative of metasomatic alteration

中, 部分磷灰石受到热液流体交代呈交代残余结构 (图 3h, i)。糖粒状钠长石集合体中白云母多呈细粒鳞片状集合体, 自形-半自形, 普遍受钠长石交代 (图 3e), 部分白云母在 BSE 图像中呈环带结构 (图 3f)。样品中的 CGM 主要赋存于糖粒状钠长石集合体及钠长石-锂辉石伟晶岩中, 晶体为细粒 (0.1 ~ 0.5 mm) 柱状、针状或板状, 具他形-半自形特征, 常与钠长石、白云母、锂辉石及锡石共生, 少量 CGM 细脉分布于锂辉石裂隙中 (图 3g)。BSE 图象显示 CGM 普遍具有明-暗环带及明显的溶蚀结构, 其边缘常被溶蚀为港湾状、岛屿状, 部分颗粒内部可见微孔隙, 并在边部发育高反射亮边 (图 4c-f)。

2 分析方法

2.1 原位主量元素分析

白云母和 CGM 的主量元素分析采用中国科学院地球化学研究所关键矿产成矿与预测全国重点实验室完成, 采用日本电子公司生产的 JXA8230 型场发射电子探针 (EPMA)。测试条件为加速电压 25kV、束流 20nA、束斑直径 1 ~ 10 μm。分析元素的最低检测限为 0.01%, 相对分析误差控制在 ±5% 以内。数据采用 ZAF 方法校正 (Henoc and Tong, 1978)。白云母中 Li 含量的计算方法依据 (Tischendorf *et al.*, 1997), H₂O 的计算方法依据 (Tindle and Webb, 1990),

均按每个晶胞含 22 个氧原子的标准进行换算。

2.2 原位微量元素分析

白云母微量元素分析采用激光剥蚀等离子体质谱 (LA-ICP-MS), 同在关键矿产成矿与预测全国重点实验室完成。分析仪器包括 GeoLasPro193mArF 准分子激光器和 Agilent 7900ICP-MS。激光剥蚀过程中采用氦气作为载气、补偿气为氩气, 并加入少量氮气以提高灵敏度, 三者在进入 ICP 之前通过 T 型接头混合。样品放置于标准剥蚀池中, 通过树脂模具缩小样品舱容积, 以减弱记忆效应并提高冲洗效率。测试条件为激光频率约 5Hz、能量密度 4 ~ 5J/cm²、束斑 44 μm。分析前通过 SRM610 对仪器性能进行优化, 以实现高灵敏度和电离效率 (U/Th ~ 1)、较低的氧化物产率 (ThO/Th < 0.3%) 及较低背景值。微量元素定量采用多外标, 无内标方法, 以 Si 为归一化元素。使用的外标包括 BCR-2G、BIR-1G 和 BHVO-2G, 质量监控样为 NIST612。标准参考值引用自 GeoReM 数据库 (<http://georem.mpch-mainz.gwdg.de/>)。数据离线处理, 包括样品和空白信号选取、仪器灵敏度漂移校正、元素含量校正和计算均采用软件 ICPMSDataCal (Liu *et al.*, 2008, 2010) 完成。结果表明, 大多数元素的测定误差优于 10%。

表 2 可尔因二云母花岗岩与业隆沟伟晶岩白云母电子探针分析结果(平均值)(wt%)

Table 2 Electron microprobe analysis results of muscovite in the Ke'eryin two-mica granites and Yelonggou pegmatites (wt%)

岩性	二云母花岗岩	微斜长石- 钠长石伟晶岩	钠长石伟晶岩	钠长石- 锂辉石伟晶岩	糖粒状钠长石集合 体岩浆阶段	糖粒状钠长石 集合体岩浆- 热液阶段
测点数	13	14	43	34	16	3
SiO ₂	47.17	46.45	46.22	46.67	46.49	47.85
TiO ₂	1.00	0.09	0.02	0.02	0.04	0.07
Al ₂ O ₃	34.04	36.12	36.64	37.17	37.12	34.01
FeO	1.96	1.55	1.23	0.96	1.10	1.85
MnO	0.02	0.04	0.04	0.03	0.02	0.01
MgO	0.86	0.05	0.0	0.0	0.0	1.00
CaO	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Na ₂ O	0.40	0.49	0.58	0.55	0.66	0.31
K ₂ O	10.77	10.49	10.29	10.27	10.16	10.42
Rb ₂ O	0.02	0.36	0.45	0.62	0.42	0.30
Cs ₂ O	0.0	0.01	0.02	0.03	0.01	0.01
F	0.14	0.22	0.22	0.12	0.01	0.05
Cl	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Total	96.32	95.77	95.65	96.41	96.05	95.87
H ₂ O*	4.46	4.41	4.41	4.50	4.54	4.50
O = F, Cl	0.06	0.09	0.09	0.05	0.01	0.02
Si	6.24	6.17	6.14	6.14	6.13	6.34
Al ^{iv}	1.76	1.83	1.86	1.86	1.87	1.66
Al ^{vi}	3.55	3.83	3.88	3.90	3.90	3.65
Ti	0.10	0.01	0.0	0.0	0.0	0.01
Fe	0.22	0.17	0.14	0.11	0.12	0.21
Mn	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Mg	0.17	0.01	0.0	0.0	0.0	0.20
Li*	0.02	0.03	0.03	0.01	0.0	0.0
Ca	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Na	0.10	0.13	0.15	0.14	0.17	0.08
K	1.82	1.78	1.74	1.72	1.71	1.76
Rb	0.0	0.03	0.04	0.05	0.04	0.03
Cs	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
OH*	3.94	3.91	3.91	3.95	3.99	3.98
F	0.06	0.09	0.09	0.05	0.0	0.02
Cl	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Sum	17.96	17.96	17.96	17.93	17.94	17.93
Mg-Li*	0.16	-0.02	-0.03	-0.01	0.0	0.19
Fe ^T + Mn + Ti-Al ^{vi}	-3.23	-3.64	-3.73	-3.79	-3.76	-3.75

注：* 为计算值

3 测试结果

3.1 白云母化学成分特征

本文可尔因二云母花岗岩及伟晶岩中白云母均呈自形-半自形,晶体以 0.2~1mm 大小板状产出(图 3)。背散射图像显示,多数白云母成分均一无环带,而糖粒状钠长石集合体中白云母则可见典型环带结构(图 3f, h)。业隆沟不同岩性中白云母主量分析结果见图 5 和表 2,完整版数据参考电子版附表 1。根据 Tischendorf *et al.* (1997)提出的 Mg-Li 与

Fe^T + Mn + Ti + Al^{vi}二元判别图,花岗岩和伟晶岩中的白云母均落入白云母区域内,并呈略向锂多硅白云母方向的偏移趋势,这种特征可能指示业隆沟地区伟晶岩的演化程度相对较低(王汝成等, 2019;图 6)。二云母花岗岩中白云母的 SiO₂ 含量为 46.70%~47.80%, Al₂O₃ 含量为 33.13%~33.45%, FeO 为 1.80%~2.23%, MgO 为 0.77%~1.00%。对比而言,伟晶岩中白云母 SiO₂ 含量相似(44.86%~48.66%),但具有更高的 Al₂O₃ (31.28%~37.93%),而 FeO (0.58%~2.50%)和 MgO (0~1.95%)含量相对较低,业隆沟伟晶岩中白云母具有低 F 含量(平均值<0.09%)。糖粒

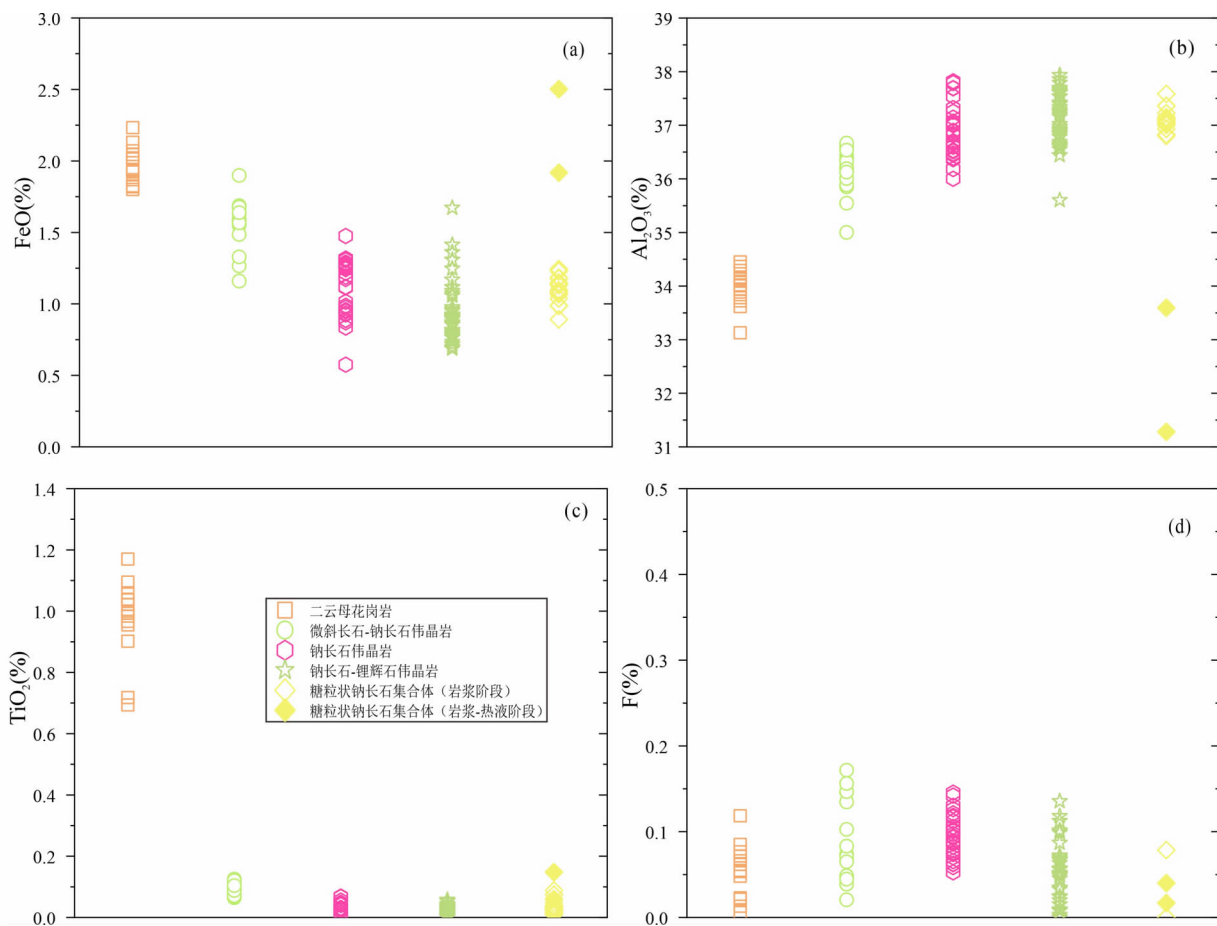


图5 可尔因二云母花岗岩与业隆沟伟晶岩中白云母 FeO、 Al_2O_3 、 TiO_2 和 F 含量变化图解

Fig. 5 Variations of FeO, Al_2O_3 , TiO_2 and F contents in muscovite from the Ke'eryin two-mica granite and Yelonggou pegmatites

状钠长石集合体中环带白云母核部 Mg、Fe、Ti 含量与其他伟晶岩中白云母相近,但边部具有相对较高的 Mg(0 ~ 0.39%) 和 Fe(0.13% ~ 0.28%) 含量。

白云母的微量元素测试分析数据见表3和图7,完整版数据参考电子版附表2。部分元素如 REE、Sb、Y、Cu、Mo、Co、Ag 等均低于检测限,可检测的主要微量元素包括 Li、Be、Rb、Mn、Nb、Sn、Cs、Ta、W、B 和 P。花岗岩与伟晶岩中白云母均表现出较低的 Be、Ta、W 和 B 含量($< 100 \times 10^{-6}$),但 Li、Nb、P 和 Mn 含量普遍较高($> 100 \times 10^{-6}$) (表2、图7)。不同岩性中白云母微量元素的主要差异体现为:二云母花岗岩中的白云母具有最高的 Li 含量($1159 \times 10^{-6} \sim 1291 \times 10^{-6}$)、K/Rb 比值(20.2 ~ 24.1)和最低的 Be、Cs、Nb、Ta、Rb、Sn、B、P 含量;钠长石-锂辉石伟晶岩中的白云母含有相对低的 Li 含量($520 \times 10^{-6} \sim 1113 \times 10^{-6}$)和 K/Rb 比值(2.1 ~ 3.3),并含有最高的 Be、Rb、Cs、B 和 P 含量;糖粒状钠长石集合体中属岩浆阶段结晶(暗带)的白云母则具有最低的 Li ($562 \times 10^{-6} \sim 618 \times 10^{-6}$)和 Mn 含量,而岩浆-热液阶段的边部白云母(亮带)具有相对较高的 Li、Mg、Ti、Fe、Ba 和 Ta 含量,以及更低的 P、Mn、Rb、Nb、Sn 和 Cs 含量。从二云母花岗岩到不

同类型伟晶岩中,白云母中 Li 含量 K/Rb 比值呈逐渐下降趋势(图7、图8)。P 和 Be 含量则表现为从花岗岩到伟晶岩的持续上升趋势,Rb、Mn、Nb、Sn、Cs、Ta 和 B 在伟晶岩中呈现从微斜长石-钠长石伟晶岩到钠长石-锂辉石伟晶岩的逐渐升高趋势,最终在糖粒状钠长石集合体中骤然降低(图7)。

3.2 CGM 化学特征

业隆沟伟晶岩中 CGM 的主量元素分析结果见表4,完整版数据参考电子版附表3。根据其结构特征和化学成分,可将本次采集样品中的 CGM 分为两类:CGM1 和 CGM2。详述如下:

CGM1:主要以自形板状或柱状晶体产出,在 BSE 图像中呈均质,无环带结构(图4a, b)。主量元素特征表现为低 $\text{Ta}^\#$ [$0.10 \sim 0.38$, 平均值 0.18; $\text{Ta}^\# = \text{Ta}/(\text{Nb} + \text{Ta})$] 和中等 $\text{Mn}^\#$ [$0.10 \sim 0.40$, 平均值 0.33; $\text{Mn}^\# = \text{Mn}/(\text{Fe} + \text{Mn})$];在分类图解中均落入锆钛矿域(图9)。

CGM2:在背散射图像中有明显的成分不均一性,且通常呈亮边生长于 CGM1 边部,可分为环带构造和交代构造(溶蚀结构和富 Ta 增生边)(图4c-f),主量元素特征表现为变化

表 3 可尔因二云母花岗岩与业隆沟伟晶岩中白云母 LA-ICP-MS 分析结果 ($\times 10^{-6}$)
Table 3 LA-ICP-MS data for muscovites in the Ke'eryin two-mica granites and Yelonggou pegmatites ($\times 10^{-6}$)

岩性	二云母花岗岩			微斜长石-钠长石伟晶岩			钠长石伟晶岩			钠长石-锂辉石伟晶岩			糖粒状钠长石(岩浆阶段)			糖粒状钠长石(岩浆热液阶段)		
	13		6	28		19	17		3									
测点数	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围		
Li	1235	1158 ~ 1290	1022	916.0 ~ 1063	939.5	749.6 ~ 1162	780.3	520.3 ~ 1113	166.4	94.9 ~ 264.7	588.6	562.0 ~ 618.3						
Be	17.4	15.4 ~ 18.8	18.1	16.0 ~ 20.3	29.2	16.5 ~ 113.0	25.2	20.1 ~ 30.9	21.9	16.1 ~ 24.7	13.6	11.2 ~ 15.0						
B	11.7	9.4 ~ 15.3	25.3	23.7 ~ 27.7	29.8	19.5 ~ 44.3	31.5	21.1 ~ 46.1	27.9	20.8 ~ 34.7	16.4	14.5 ~ 18.1						
P	179.8	115.9 ~ 554.4	207.5	176.3 ~ 243.7	226.3	135.5 ~ 384.3	315.0	256.4 ~ 467.7	292.1	210.5 ~ 364.3	75.5	60.3 ~ 89.1						
Ca	116.1	0.0 ~ 1066	26.9	0.0 ~ 97.7	2280	0.0 ~ 46222	41.6	0 ~ 107.2	44.7	0 ~ 107.1	53.4	0.0 ~ 153.0						
Sc	42.1	24.6 ~ 55.3	1.0	0.9 ~ 1.1	2.5	0.3 ~ 16.3	1.1	0.1 ~ 2.3	1.1	0.7 ~ 2.4	8.2	5.8 ~ 10.0						
Ti	622	4775 ~ 7102	578.3	400.5 ~ 677.0	237.6	89.8 ~ 334.6	201.1	156.6 ~ 340.2	283.0	248.2 ~ 305.4	1172	480.6 ~ 1585						
V	42.1	19.3 ~ 57.2	0.2	0 ~ 0.5	0.1	0 ~ 0.9	0.0	0 ~ 0.1	0.1	0 ~ 0.3	152.1	53.1 ~ 229.4						
Cr	9.30	0 ~ 16.6	0.2	0 ~ 0.6	1.2	0 ~ 13.8	0.8	0 ~ 3.6	0.5	0 ~ 1.7	0.3	0.0 ~ 1.0						
Mn	250.0	229.2 ~ 277.7	295.2	249 ~ 346.7	444.0	224.1 ~ 2183	269.6	93.9 ~ 608.0	241.2	212.1 ~ 265.6	93.2	81.6 ~ 102.3						
Ni	0.6	0.0 ~ 1.6	1.6	1.2 ~ 2.5	5.9	0 ~ 91.6	0.3	0.0 ~ 0.7	0.2	0 ~ 1.1	10.3	4.3 ~ 15.1						
Zn	98.9	86.8 ~ 111.7	136.6	125.6 ~ 153.1	190.7	77.5 ~ 268.6	335.1	182.9 ~ 568.7	0.5	68.2 ~ 255.5	32.9	20.9 ~ 39.8						
Ga	140.9	132.5 ~ 151.2	242.7	217.2 ~ 255.9	192.8	169.2 ~ 228.7	196.4	179.2 ~ 267.5	134.2	186.1 ~ 198.7	86.8	68.9 ~ 115.0						
Ge	1.0	0.6 ~ 1.4	3.4	2.4 ~ 4.0	10.7	2.8 ~ 77.8	4.1	3.0 ~ 6.0	191.2	2.8 ~ 4.7	3.9	3.3 ~ 4.5						
Rb	776.3	723.7 ~ 905.4	4621.4	4204 ~ 4973	5412	3904 ~ 7969	6210	5262 ~ 7826	3.7	4383 ~ 5292	2471	1895 ~ 3408						
Sr	8.6	5.8 ~ 10.6	1.4	1.2 ~ 1.5	1.4	0.1 ~ 10.2	0.2	0.1 ~ 0.5	4967	0.2 ~ 0.6	13.6	2.1 ~ 20.1						
Zr	3.4	2.7 ~ 3.9	0.7	0.6 ~ 0.9	6.2	0.3 ~ 59.1	0.6	0.5 ~ 0.8	0.3	0 ~ 0.6	0.1	0.0 ~ 0.3						
Nb	106.5	88.4 ~ 124.7	259.2	238.1 ~ 285.3	233.1	126.9 ~ 327.5	245.3	204.3 ~ 325.4	249.4	213.6 ~ 268.6	63.7	46.6 ~ 73.1						
Sn	126.5	77.5 ~ 172.7	1137	964.3 ~ 1279	787.2	357.3 ~ 1060	1084	758.1 ~ 1611	1018	729.1 ~ 1091	559.1	491.2 ~ 597.1						
Cs	10.7	8.1 ~ 19.1	253.5	191.7 ~ 310.3	296.7	125.6 ~ 772.1	298.6	226.4 ~ 438.3	206.2	168.2 ~ 230.9	113.3	63.3 ~ 173.3						
Ba	111.8	55.1 ~ 153.1	3.8	2.5 ~ 4.9	2.2	0.8 ~ 5.4	1.6	0.4 ~ 5.2	3.0	1.3 ~ 6.0	804.9	327.8 ~ 1097						
Hf	0.3	0.3 ~ 0.4	0.2	0.2 ~ 0.3	12.1	0.1 ~ 126.1	0.2	0.1 ~ 0.2	0.2	0.1 ~ 0.2	0.0	0.0						
Ta	4.0	3.2 ~ 6.1	57.8	50.0 ~ 70.1	33.2	21.4 ~ 74.6	31.6	26.6 ~ 43.9	33.6	26.1 ~ 58.1	34.3	15.8 ~ 48.6						
W	24.1	20.4 ~ 26.7	11.2	10.0 ~ 12.6	8.5	3.4 ~ 21.9	17.4	6.9 ~ 32.6	6.7	5.7 ~ 7.7	29.1	14.4 ~ 42.1						
Pb	4.8	4.0 ~ 5.3	3.7	3.1 ~ 4.0	7.4	1.2 ~ 62.6	1.9	1.1 ~ 2.8	2.6	2.1 ~ 3.0	1.3	0.2 ~ 2.0						
K/Rb	23.5	20.2 ~ 24.1	3.9	3.6 ~ 4.3	3.3	2.2 ~ 4.5	2.8	2.1 ~ 3.3	3.5	3.2 ~ 4.0	7.6	5.3 ~ 9.4						
Nb/Ta	26.8	20.4 ~ 31.6	4.6	3.5 ~ 5.2	7.8	1.9 ~ 12.2	7.8	5.8 ~ 9.6	7.7	4.6 ~ 8.9	2.1	1.5 ~ 2.9						

表4 业隆沟伟晶岩中 CGM 电子探针分析结果(平均值)(wt%)

Table 4 Electron microprobe analysis results of CGM in Yelonggou pegmatites (wt%)

岩性	钠长石-锂辉石伟晶岩 CGM1	钠长石-锂辉石伟晶岩 CGM2	糖粒状钠长石集合体 CGM1	糖粒状钠长石集合体 CGM2
测点数	31	38	22	19
FeO	13.37	10.59	13.83	12.24
MnO	5.97	7.01	5.98	5.28
TiO ₂	0.37	0.38	0.55	0.91
Ta ₂ O ₅	22.27	38.44	18.52	47.20
WO ₃	0.04	0.03	0.00	0.01
Nb ₂ O ₅	57.96	41.46	61.19	34.02
SnO ₂	0.32	0.19	0.20	0.43
CaO	0.00	0.00	0.00	0.00
ZrO ₂	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	100.31	98.10	100.28	100.09
Fe	0.17	0.13	0.17	0.15
Mn	0.08	0.10	0.08	0.07
Nb	0.44	0.31	0.46	0.26
Ta	0.10	0.17	0.08	0.21
Mn/(Fe + Mn)	0.34	0.42	0.33	0.33
Ta/(Nb + Ta)	0.19	0.37	0.15	0.48

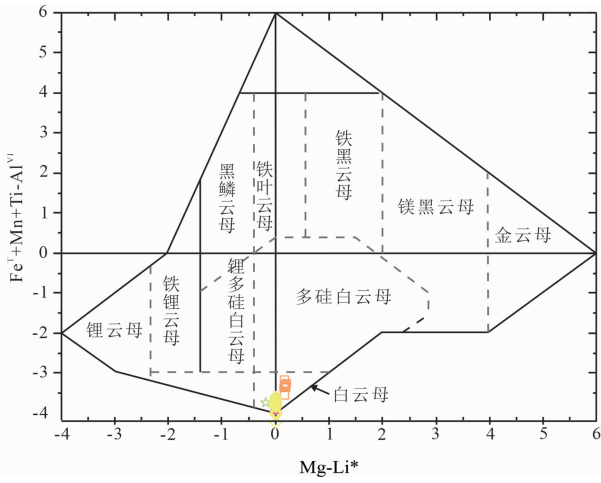


图6 可尔因二云母花岗岩与业隆沟伟晶岩中白云母的Mg-Li对(Fe^T + Mn + Ti + Al^{vi})判别图解(据 Tischendorf et al., 1997)

Fig. 6 Discrimination diagram of Mg-Li vs. (Fe^T + Mn + Ti + Al^{vi}) for muscovite from the Ke'eryin two-mica granite and Yelonggou pegmatites (after Tischendorf et al., 1997)

较大的Ta[#](0.26~0.63, 平均值0.40)和Mn[#](0.10~0.84, 平均值0.40)变化范围。钠长石-锂辉石伟晶岩与糖粒状钠长石集合体中的CGM2表现出不同特征。在钠长石-锂辉石伟晶岩中,CGM2常见明显环带构造和交代构造(图4d,e),并且内带与外带成分并不连续变化。其暗色环带部分成分

接近于CGM1而亮带具有明显的高Ta[#](>0.30)特征,并常伴随后期流体交代而成溶蚀结构和Ta增生边(图4d,e)。另一类CGM2晶体则表现出高Mn[#](>0.60)和高Ta[#](>0.35)的特征,呈交代残余状(图4f)。在糖粒状钠长石集合体中,CGM2仅发现交代构造,即后期流体沿早期结晶的低Ta[#]铌铁矿边缘交代,并在边缘形成富Ta边缘,主量元素显示高Ta[#](>0.50)特征(图4c)。

4 讨论

4.1 业隆沟伟晶岩岩浆-热液演化过程

伟晶岩岩浆的演化通常经历岩浆-热液多阶段作用,其中分离结晶作用是演化过程中最重要的方式,随着伟晶岩系统中无水矿物结晶,残余熔体中挥发分持续富集直至饱和出溶,此时,体系进入晶体-熔体-流体三相共存的岩浆-热液过度阶段(Thomas R and Davidson, 2016; 张辉等, 2021)。同时,出溶流体会交代早期形成的矿物甚至交代围岩,同时可能将流体活动性元素(Ca、Mg和Mn等)带入伟晶岩体系(Kaeter et al., 2018; Ballouard et al., 2020)。

可尔因二云母花岗岩与业隆沟(不含矿)伟晶岩(微斜长石-钠长石型、钠长石型)中白云母成分上均属白云母,且晶面平整(图3a-c),表明其是岩浆结晶分异的产物;而在含矿伟晶岩如钠长石-锂辉石伟晶岩和糖粒状钠长石集合体中,白云母自形程度较差,晶面溶蚀呈不规则状(图3d-f),可能与晚期热液作用有关。高度演化的花岗质熔体通常具有较低的Nb/Ta值(Ballouard et al., 2016),并在演化过程中富集不相容元素(如Li、Rb、Cs、F、B、P、Sn等),而K/Rb比值逐渐降低(Černý et al., 1985; Černý, 1991; Foord et al., 1995; Roda Robles et al., 1995; Wise, 1995; Pesquera et al., 1999; Viana et al., 2007; Vieira et al., 2011)。

从可尔因二云母花岗岩向业隆沟伟晶岩演化过程中,FeO、TiO₂含量,K/Rb、Nb/Ta值显著降低(图8),伟晶岩中不相容元素(如Rb、Cs、Sn、Nb、P、B和F)显著富集(图7),表明业隆沟伟晶岩相较于可尔因二云母花岗岩具有更高的演化程度。从不含矿伟晶岩向锂成矿伟晶岩演化过程中,白云母的K/Rb、Nb/Ta值变化幅度较小(图8),而不相容元素如Rb、Cs、Sn、Nb、P、B等表现出持续富集的趋势(图7)。这表明虽然伟晶岩熔体就位后经历了一定程度分离结晶作用,但整体分异程度较弱。在从可尔因二云母花岗岩向业隆沟各类伟晶岩演化过程中,白云母中Li含量并未随岩浆分离结晶的进行而逐渐富集,反而呈现逐步降低的趋势;而其他不相容元素则沿着典型的伟晶岩演化路径逐步升高(图7、图8),表明这一阶段主要受控于岩浆分异过程,仍属于岩浆主导的演化阶段。然而,在糖粒状钠长石集合体中,白云母的化学组分发生了显著变化,不仅出现了环带结构,且Cs、Li、F、B、P、Rb等典型不相容元素的含量显著降低(图3f、图7、图8),这种特征表明体系已由单一硅酸盐熔体转变为进入

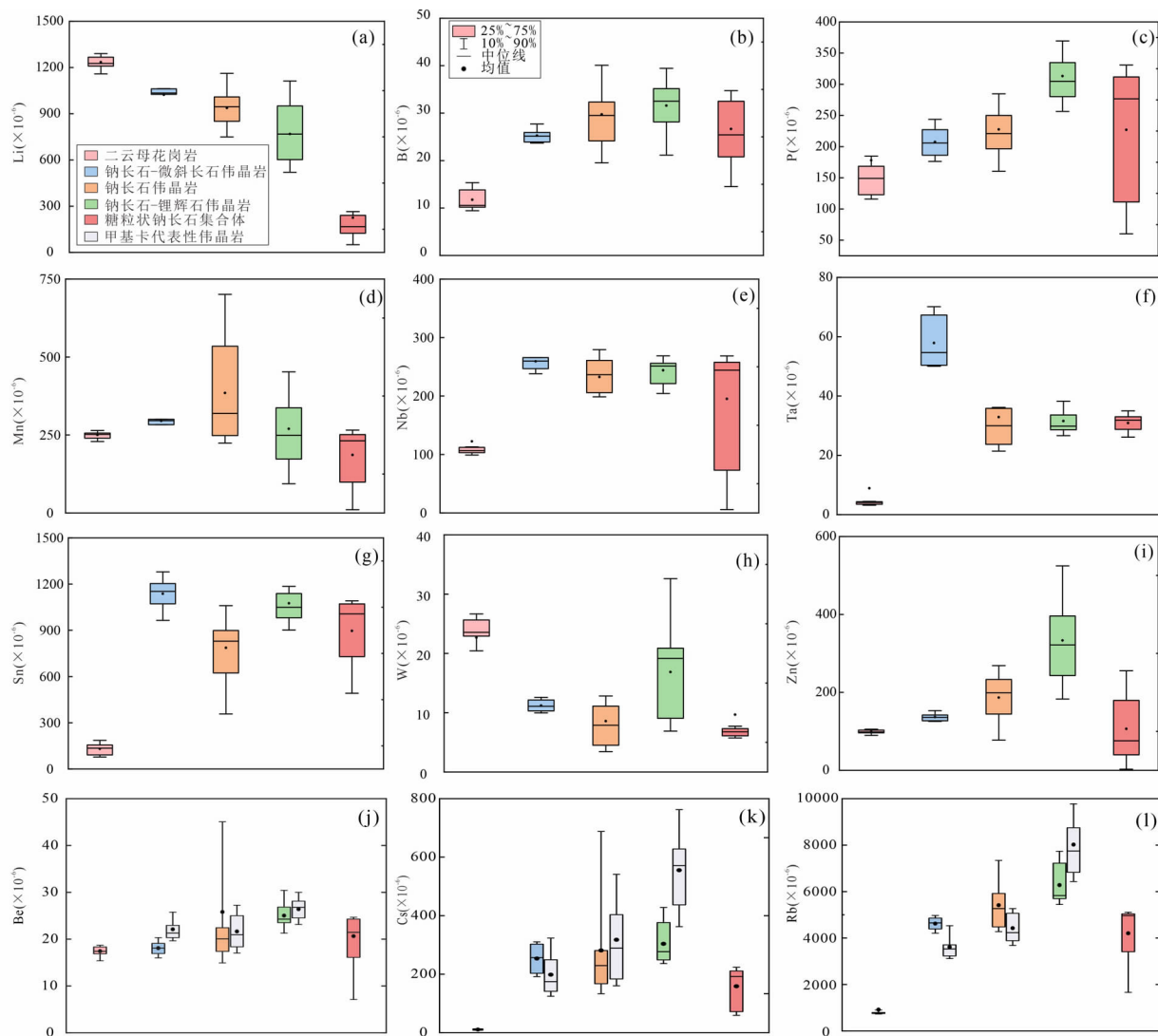


图7 可尔因二云母花岗岩与业隆沟伟晶岩白云母微量元素箱线图(甲基卡伟晶岩数据引自韩志辉等, 2024)

Fig.7 Box and whisker plots of representative trace elements in muscovites from Ke'eryin two-mica granite and Yelonggou pegmatites (data for the Jiajika pegmatites from Han *et al.* , 2024)

流体出溶过程的岩浆-热液过渡阶段。

CGM 在花岗质熔体中的溶解度顺序为：钽铁矿 < 钽铀矿，随着伟晶岩岩浆的演化,CGM 组分通常向富 Ta 的端元演化 (Badanina *et al.* , 2015), 其中 Ta[#] 值被广泛指示伟晶岩体系的分异程度。业隆沟伟晶岩中 CGM1 普遍表现出自形、均一和较低的 Ta[#] (0.10 ~ 0.48, 平均值 0.15) 和 Mn[#] (0.22 ~ 0.37, 平均值 0.32) 值(图 4a, b), 这一特征与上述基于白云母成分特征所推断的业隆沟伟晶岩熔体分异程度较低的观点相一致, 并表明该阶段 Nb-Ta 富集处于早期岩浆分异主控阶段。而 CGM2 表现出明显不同的性质, 在背散射图像中可观察到明显的成分不均一性, 其发育有典型的环带和交代构造(图 4c-f) 和高 Ta[#] (0.11 ~ 0.63, 平均值 0.30)、Mn[#] (0.10 ~ 0.84, 平均值 0.38) 特征(图 6), 指示其是在流体活动的条件下结晶, 在结晶的同时受到流体的交代, 这表明体系进入

岩浆结晶晚期的流体出溶阶段。尽管业隆沟伟晶岩中流体交代作用整体发育不强(图 3d、图 8), 但上述变化仍反映出流体活动的局部参与及其对白云母组分的改造效应(图 3f)。综合所述, 业隆沟伟晶岩演化可划分为两个阶段: 前期以分离结晶为主导的岩浆阶段(包括微斜长石-钠长石伟晶岩、钠长石伟晶岩和钠长石-锂辉石伟晶岩), 后期进入矿物-熔体-流体三相共存的岩浆-热液阶段(以钠长石-锂辉石伟晶岩晚期阶段和糖粒状钠长石集合体为代表) (Kaeter *et al.* , 2018)。

实验岩石学表明富 Li 硅酸盐熔体随着体系的压力降低, 锂辉石停止结晶后残余的 Li 会进入云母, 并在早期云母边部结晶成富锂边, 即部分云母的增生边可能并非热液交代而成(高杰等, 2024)。但如果是花岗质熔体压力降低结晶出的白云母, 其总体上仍反映熔体成分, 即低的 Fe、Mg、Ti 含

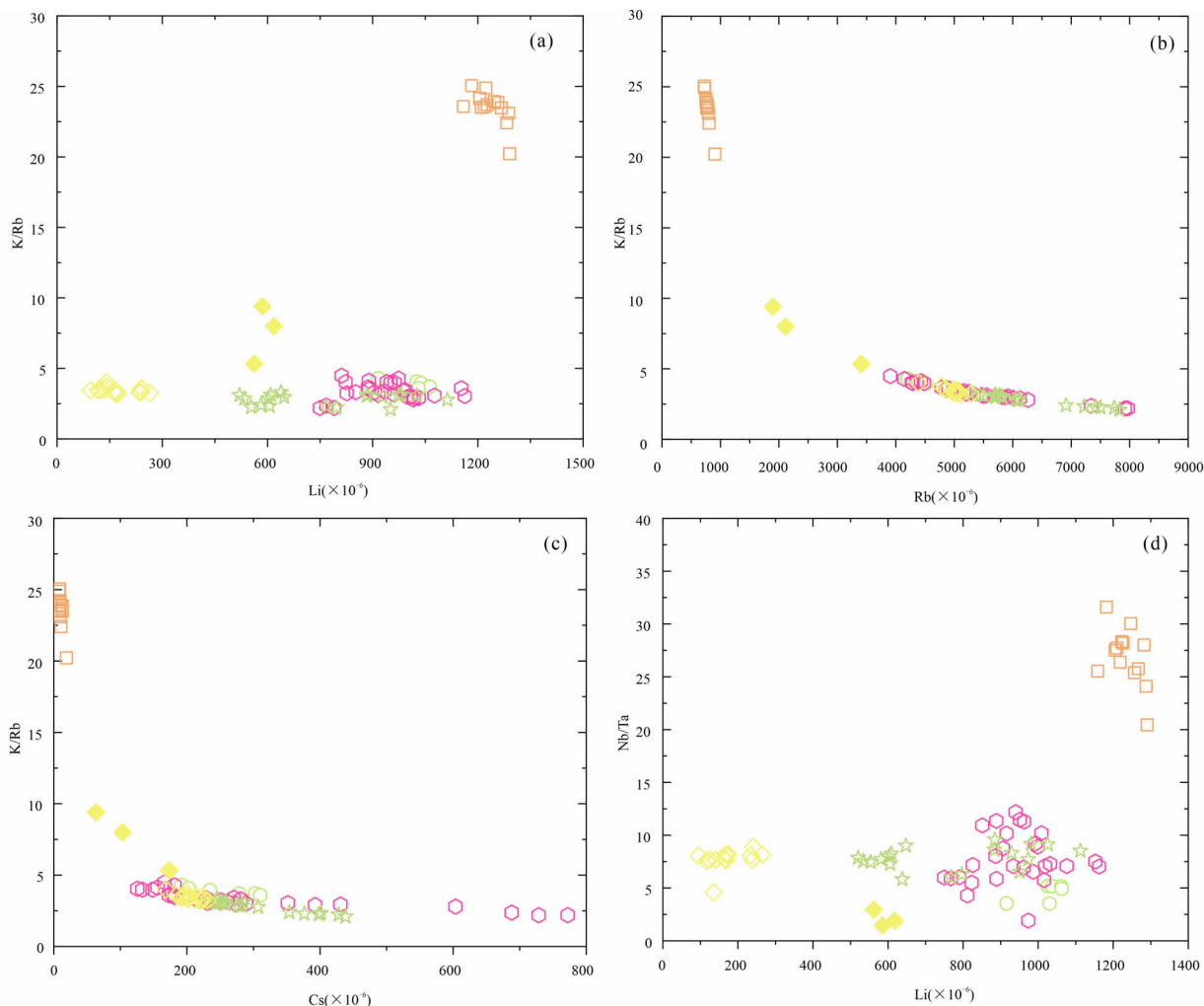


图8 可尔因二云母花岗岩与业隆沟伟晶岩中白云母 K/Rb 对 Li、Rb 和 Sr 及 Nb/Ta-Li 图解

Fig. 8 Plots of K/Rb against Li, Rb and Sr, and Nb/Ta vs. Li for muscovite from the Ke'eryin two-mica granite and Yelonggou pegmatites

量,而在业隆沟伟晶岩中,环带云母边部具有异常高的 Fe、Mg、Ti 含量,这与其从高分异花岗质熔体结晶相悖。此外,环带白云母边部具有低 Nb、Ta 含量与 CGM2 高 Nb、Ta 含量形成对比,证明了业隆沟伟晶岩晚期的岩浆-热液过渡阶段。

4.2 对 Li-Be-Rb-Cs 矿化的指示

前人研究认为,随伟晶岩岩浆演化,白云母中的 Li、Rb、Cs 含量应逐渐升高(Černý, 1991; Foord *et al.*, 1995; Wise, 1995)。然而,本研究中却观察到相反的 Li 元素特征:从可尔因二云母花岗岩、到不含矿伟晶岩(微斜长石-钠长石伟晶岩和钠长石伟晶岩),再到 Li 成矿伟晶岩(钠长石-锂辉石伟晶岩),白云母的 Li 含量逐渐降低。前人研究认为白云母中不相容元素在演化过程中不增反降的行为主要是由流体不混溶引起的(周起凤等,2013;韩志辉等,2024),然而业隆沟伟晶岩中不混溶的范围很有限,无法解释整个演化过程白云

母 Li 含量逐渐降低的现象(图7、图8)。对此,我们提出以下观点:可尔因二云母花岗岩中白云母 Li 平均含量为 1232×10^{-6} ,远高于典型稀有金属花岗岩白云母中常见的 Li 含量($100 \times 10^{-6} \sim 500 \times 10^{-6}$; London, 2008),表明岩体在形成阶段已具有极高 Li 含量。即便未经历流体出溶主导的分相过程,其后续演化形成的伟晶岩熔体结晶出的白云母 Li 含量仍显著高于锂成矿伟晶岩的白云母阈值(500×10^{-6}) (Maneta and Baker, 2019),微斜长石-钠长石伟晶岩中锂辉石的早期结晶进一步支持了该观点。值得注意的是,这种在演化程度尚低阶段即开始结晶锂辉石的现象,在甲基卡、琼嘉岗等典型锂矿床也有报道(赵俊兴等, 2021; 韩志辉等, 2024)。岩浆中的 F、B、P 等挥发分元素以及 Li、Cs、Rb 等碱金属元素可以大大降低岩浆粘度,增加 Li 等稀有金属的溶解度(Bailey, 1977; Černý *et al.*, 2012; Thomas *et al.*, 2012)。不仅如此, F 在岩浆中会与 Li 络合为稳定的中性

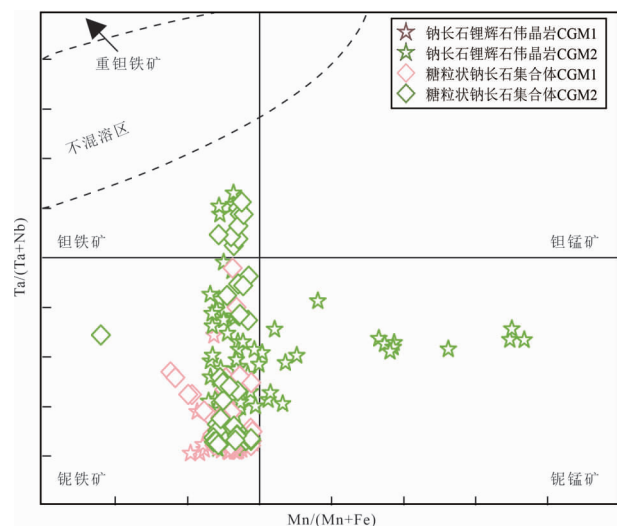


图9 业隆沟伟晶岩 CGM 的 $Ta/(Ta+Nb)$ 与 $Mn/(Mn+Fe)$ 关系图

Fig. 9 $Ta/(Ta+Nb)$ vs. $Mn/(Mn+Fe)$ diagram of columbite-group minerals from the Ke'erlyn two-mica granite and Yelonggou pegmatite

LiF^0 络合物,当结晶条件变化,由于 F 强烈倾向分配进入白云母,促使 Li^+ 一同进入白云母八面体空位,从而影响 Li 的分配 (London, 2008; Černý *et al.*, 2012)。然而业隆沟伟晶岩中岩浆阶段白云母的 F 含量很低 ($<0.22\%$),远低于常见锂辉石成矿伟晶岩中白云母的 F 含量 (Van Lichtervelde *et al.*, 2008; 周起凤等 2013; 韩志辉等, 2024)。由于缺乏 F 作为“载体”,当体系达到锂辉石结晶的条件时,熔体中的 Li 被锂辉石争夺,导致云母中 Li 含量未能沿正常分离结晶路线变化。因此,晚期熔体中的 Li 主要进入锂辉石,而白云母中 Li 含量则相对下降。在糖粒状钠长石集合体伟晶岩中,白云母出现明显的化学组分突变与分带结构,并伴随元素浓度的震荡变化。这表明,在锂辉石结晶之后,残余熔体因冷却及流体出溶作用的影响,亏损 P、F、B 等挥发分元素,导致体系中不相容元素如 Li、Rb、Cs、Nb 等的浓度随之显著下降 (图 7)。类似白云母成分和结构的变化现象在甲基卡、新疆可可托海三号脉等典型伟晶岩稀有金属矿床中亦有提及 (周起凤等, 2013; 韩志辉等, 2024)。

伟晶岩中 Be 的富集程度主要受控于岩浆源区的富集特性,高分异伟晶岩中,Be 通常随着岩浆的结晶分异而富集、结晶和成矿 (Michaud *et al.*, 2021; 饶灿等, 2022)。LCT 型伟晶岩是最具工业价值的 Be 矿床类型, LCT 伟晶岩通常与 S 型花岗岩 (壳源) 相关 (Černý *et al.*, 2012)。即母体花岗岩中 Be 含量较高, Be 非常依赖于分离结晶作用的进一步富集, 岩浆-热液过程以及高挥发分 (F、P、B、 H_2O) 含量对伟晶岩中 Be 的迁移和富集也非常重要 (朱金初等, 2002; 饶灿等, 2022)。然而可尔因二云母花岗岩和业隆沟伟晶岩白云

母中的 Be 富集并不明显,伟晶岩中亦罕见典型富 Be 硅酸盐矿物 (如绿柱石)。与同一矿田内的党坝矿床,及同一成矿带内的甲基卡矿床相比,白云母 Be 含量相近 ($20 \times 10^{-6} \sim 30 \times 10^{-6}$),显示业隆沟地区 Be 资源潜力较为有限 (韩志辉等, 2024, Xu *et al.*, 2024)。一般而言, Rb 和 Cs 性质与 Li 类似,在白云母中主要通过类质同象替代进入层间阳离子位中的 K (王汝成等, 2019)。在业隆沟伟晶岩白云母中, Rb 和 Cs 的富集主要见于钠长石伟晶岩和钠长石-锂辉石伟晶岩,其中白云母的 Rb 含量整体较高 ($>5000 \times 10^{-6}$)。但与党坝、甲基卡矿床伟晶岩的白云母相比, Cs 含量明显偏低 ($200 \times 10^{-6} \sim 300 \times 10^{-6}$),也低于全球主要锂成矿伟晶岩 (如 Tanco、甲基卡、可可托海等) 白云母中 Cs 的富集水平 (Goad and Černý, 1981; 周起凤等, 2013; Xiong *et al.*, 2025; 韩志辉等, 2024)。伟晶岩的 Cs 矿化通常发生在演化最高的区域即距离伟晶岩最末端 (Shearer *et al.*, 1992; London, 2008), 矿区内尚未见到演化末期常见的富 Cs 矿物 (如铯沸石、锂云母等), 结合上文根据矿物化学特征的推断表明业隆沟伟晶岩侵位后经历的分离结晶过程相对较弱,对 Cs 的富集能力有限。综上所述,针对业隆沟矿床而言, Li 成矿的关键机制主要是源于花岗质母岩浆在初始阶段已达到 Li 饱和状态,后续因快速冷却促使锂辉石结晶,从而实现 Li 的成矿,而 Rb 和 Cs 的成矿潜力较弱。

4.3 对 Nb-Ta 成矿的指示

Nb 和 Ta 具有相近的电价和离子半径,被认为是地球化学上的“孪生元素”,在地质过程中的行为通常高度相似,应表现出同步的分配特征 (Goldschmidt, 1937)。然而,近年来针对高分异花岗岩和伟晶岩的研究却发现 Nb-Ta 之间存在普遍分异现象,其成因机制仍存在较大争议,尚需进一步研究 (London, 2008; Ballouar *et al.*, 2016)。CGM 是伟晶岩中 Nb 和 Ta 的主要赋存矿物,通常被认为是在岩浆冷却及非平衡结晶阶段直接从熔体中析出 (London, 2018)。也有研究指出, CGM 可能形成于岩浆演化晚期,是晶体-熔体-流体三相共存时条件下的相互作用的产物 (Kaeter *et al.*, 2018)。除 CGM 外,白云母也是伟晶岩中影响 Nb-Ta 分异的重要矿物之一 (Kovalenko *et al.*, 1996)。在业隆沟矿床中, Nb-Ta 成矿主要赋存在钠长石-锂辉石伟晶岩和糖粒状钠长石集合体中,尤其是以糖粒状钠长石集合体中最为发育,白云母和 CGM 为 Nb-Ta 的主要赋存矿物。因此,这两类矿物中 Nb-Ta 赋存状态及其变化趋势对研究 Nb-Ta 的富集过程具有重要指示意义。业隆沟伟晶岩白云母所记录的中 Nb 和 Ta 元素变化并不同步,显示出以下两个阶段的成矿演化过程:

岩浆阶段:该阶段形成的 CGM1 主要产于钠长石-锂辉石伟晶岩及糖粒状钠长石集合体中,特征为自形、均质,属于典型的 CGM1 类型,具有低 $Ta^{\#}$ 和中等 $Mn^{\#}$ 值,其在分类图解中均落入钨铁矿域 (图 4a-b、图 9),并且向钨铁矿方向演化。该阶段 Ta 成矿较弱,主要为 Nb 成矿,并且是业隆沟 Nb-Ta

成矿最重要的阶段。

岩浆-热液过渡阶段:该阶段形成 CGM2, 在不同类型伟晶岩中,CGM2 的特征也有所差异。相对而言,钠长石-锂辉石伟晶岩中的 CGM2 既存在向富 Ta 演化的趋势,也部分向富 Mn 演化,而糖粒状钠长石集合体中 CGM2 则主要表现为富 Ta 方向演化(图 9)。结合糖粒状钠长石集合体中白云母普遍发育环带结构(图 3f),表明该阶段的 CGM2 应为伟晶岩演化晚期,由富挥发分流体出溶与早期矿物共同作用的产物(Kaeter *et al.*, 2018)。糖粒状钠长石集合体中的环带白云母呈现明显的明暗环带结构(图 3f),其核心暗部代表岩浆阶段早期结晶产物,具有低 Li、F、Fe、Mg、Mn、Ti 等特征;而外围亮部则富含 Li、F、Fe、Mg、Mn、Nb 和 Ti,且 P、Nb 和 Ta 含量较低,指示其形成于岩浆晚期热液活动阶段(图 5、表 2、表 3)(王汝成等, 2019)。Fe、Mg、Ti 等元素在花岗岩质熔体演化过程中通常呈降低趋势,因此这类元素在亮带白云母中的升高,可能反映了流体交代作用对早期矿物或围岩的改造(罗耀清等, 2023)。Mn 为典型的流体活动性元素,已有研究表明,伟晶岩中 Mn[#]值受电气石、石榴石、磷灰石及 CGM 的结晶控制(Anderson *et al.*, 2013; London, 2018)。在业隆沟钠长石-锂辉石伟晶岩和糖粒状钠长石集合体中,石榴子石和电气石矿物极为稀少,但普遍发育磷灰石,其中部分磷灰石呈现交代残余结构(图 3h, i)。这表明,磷灰石的溶解可能是部分 CGM2 向富 Mn 端元演化的主要控制因素(Xiong *et al.*, 2025)。

此外,碱金属元素如 Li、Cs 以及挥发分 F 等能够显著提高 Ta 在流体/熔体间的分配系数(Linnen and Keppler, 1997; Bartels *et al.*, 2010)。从白云母亮带中富 Li、F 特征含量可推断(图 5),该阶段的出溶流体富含 Li 和 F。这类高活性流体可交代早期结晶的 CGM1、白云母、锂辉石、磷灰石等矿物,促使 Nb、Ta、Mn 等元素释放并再次富集,进而诱导 CGM 的再结晶作用。其中一部分形成富 Mn 的 CGM2,另一部分则因流体-矿物相互作用,形成具有环带结构的 CGM2,甚至有部分沿锂辉石裂隙形成热液成因的带状 CGM 集合体(图 6d-f)。相应地,在糖粒状钠长石集合体中,出溶流体交代早期 CGM1 和白云母,并在其边部结晶形成富 Ta 的 CGM2(图 6c)。因此,业隆沟伟晶岩 Nb、Ta 成矿过程分为岩浆阶段 Nb 成矿和岩浆-热液阶段 Ta 成矿。业隆沟有限的岩浆分异程度导致岩浆阶段白云母和 CGM 结晶主要是 Nb 的富集阶段, Ta 富集有限,而晚期出溶流体交代早期结晶的 Ta 赋存矿物导致 Ta 二次富集。

值得注意的是,业隆沟伟晶岩普遍经历了明显的钠长石化作用(图 3),尤其是在富集稀有金属的伟晶岩中,晚期出溶流体交代早期结晶的微斜长石、锂辉石矿物,形成钠长石、石英、白云母集合体。已有研究指出,钠长石化过程能够促使原生矿物中的 Li、K、P、F、Cs、Nb、Ta 等元素释放进入富 Na-F-Li 的热液流体中(London and Burt, 1982)。值得注意的是,研究区伟晶岩中白云母呈现出具有较低的 Nb/Ta 值及

升高的 K/Rb 值(图 8),与分离结晶作用造成体系中 Nb/Ta 和 K/Rb 比值同时降低的趋势明显不同,上述钠长石化作用则能有效解释该现象。此外 K⁺ 和 Li⁺ 的释放还会诱导次生白云母的结晶,导致原生云母边部被富含 Fe、Mn、Li、F 和 Cs 的白云母取代(图 3f),形成交代白云母。同时,快速减压冷却下的非平衡结晶促成粒度和化学成分不均一的 CGM2 的形成(Van Lichtervelde *et al.*, 2018)。因此,钠长石交代作用可能不仅在成矿过程起了关键作用,广泛发育的钠长石化作用也是业隆沟矿区 Nb-Ta 成矿伟晶岩的重要标志。

5 结论

(1) 可尔因花岗岩为富锂花岗岩,其演化出的业隆沟伟晶岩具有极高的初始 Li 含量,后期仅经历了中等程度结晶分异便足以达到成矿,业隆沟地区 Li-Rb-Nb 成矿潜力较大, Be 和 Cs 成矿潜力较弱。

(2) 业隆沟伟晶岩演化过程经历岩浆与岩浆-热液过渡两个阶段,稀有金属成矿以岩浆阶段为主(Li、Cs、Rb、Nb、Ta),流体交代引发次级 Ta 富集。

(3) 岩浆阶段白云母和 CGM 结晶是控制 Nb-Ta 富集的主要机制,晚期出溶流体交代早期结晶的 Nb、Ta 赋存矿物导致 Nb-Ta 二次富集和分异。

(4) 区域广泛发育的钠长石化作用可能是指示业隆沟含 Nb-Ta 矿伟晶岩的重要标志。

致谢 由衷感谢两位匿名审稿专家的细心评审和提出的宝贵意见;感谢中国地质科学院赵正研究员在论文写作中提供的指导与帮助。中国科学院地球化学研究所关键矿产成矿与预测全国重点实验室唐燕文高级工程师、李响工程师、李赆助理工程师和韩俊杰助理工程师在实验过程中提供了帮助,在此表示感谢。

References

- Anderson MO, Lentz DR, McFarlane CRM and Falck H. 2013. A geological, geochemical and textural study of an LCT pegmatite: Implications for the magmatic versus metasomatic origin of Nb-Ta mineralization in the Moose II pegmatite, Northwest Territories, Canada. *Journal of Geosciences*, 58(4): 299-320
- Badanina EV, Sitnikova MA, Gordienko VV, Melcher F, Gäbler HE, Lodziak J and Syritso LF. 2015. Mineral chemistry of columbite-tantalite from spodumene pegmatites of Kolmozero, Kola Peninsula (Russia). *Ore Geology Reviews*, 64: 720-735
- Bailey JC. 1977. Fluorine in granitic rocks and melts: A review. *Chemical Geology*, 19(1-4): 1-42
- Ballouard C, Poujol M, Boulvais P, Branquet Y, Tartèse R and Vigneresse JL. 2016. Nb-Ta fractionation in peraluminous granites: A marker of the magmatic-hydrothermal transition. *Geology*, 44(3): 231-234
- Ballouard C, Elburg MA, Tappe S, Reinke C, Ueckermann H and Daggart S. 2020. Magmatic-hydrothermal evolution of rare metal pegmatites from the Mesoproterozoic Orange River pegmatite belt

- (Namaqualand, South Africa). *Ore Geology Reviews*, 116: 103252
- Bartels A, Holtz F and Linnen RL. 2010. Solubility of manganotantalite and manganocolumbite in pegmatitic melts. *American Mineralogist*, 95(4): 537-544
- Černý P, Meintzer RE and Anderson AJ. 1985. Extreme fractionation in rare-element granitic pegmatites: Selected examples of data and mechanisms. *The Canadian Mineralogist*, 23(3): 381-421
- Černý P. 1991. Rare-element granitic pegmatites. Part I: Anatomy and internal evolution of pegmatitic deposits. *Geoscience Canada*, 18(2): 49-67
- Černý P, London D and Novák M. 2012. Granitic pegmatites as reflections of their sources. *Elements*, 8(4): 289-294
- Chen XJ, Chen CH, Lai X, Yang YL, Gu Y and Cai YH. 2024. Whole-rock geochemistry and mica compositions in Lijiagou pegmatite spodumene deposit, western Sichuan, China. *Minerals*, 14(1): 69
- Choi W, Park C, Heo CH, Yang SJ, Oh IH, Park KS and Choi SH. 2024. Magmatic to aqueous phase transition in Li-pegmatite: Microtextural and geochemical study of muscovite-lepidolite from Boam mine area, Uljin, South Korea. *Mineralium Deposita*, 59(8): 1641-1660
- Dai HZ, Li X, Wang DH, Gu PY, Liu SB and Wang GH. 2025. Geochemical and geochronological constraints on the petrogenesis of granitoids from the Ke'eryin area. *Ore Geology Reviews*, 179: 106507
- Deng Y, Fei GC, Li J, Tang WC, Zhong W and Yang GB. 2018. Study of C-H-O isotopes and geochronology of the Lijiagou pegmatite spodumene deposit in Sichuan Province. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 38(3): 40-47 (in Chinese with English abstract)
- Deschamps F, Duchêne S, de Sigoyer J, Bosse V, Benoit M and Vanderhaeghe O. 2017. Coeval mantle-derived and crust-derived magmas forming two Neighbouring plutons in the Songpan-Ganze accretionary orogenic wedge (SW China). *Journal of Petrology*, 58(11): 2221-2256
- Dong YP and Santosh M. 2016. Tectonic architecture and multiple orogeny of the Qinling Orogenic Belt, Central China. *Gondwana Research*, 29(1): 1-40
- Fei GC, Li BH, Yang JY, Chen X, Luo W, Li YG, Tang WC, Gu CH, Zhong W and Yang GB. 2018. Geology, fluid inclusion characteristics and H-O-C isotopes of large Lijiagou pegmatite spodumene deposit in Songpan-Garze Fold Belt, Eastern Tibet: Implications for ore genesis. *Resource Geology*, 68(1): 37-50
- Fei GC, Menuge JF, Li YQ, Yang JY, Deng Y, Chen CS, Yang YF, Yang Z, Qin LY, Zheng L and Tang WC. 2020. Petrogenesis of the Lijiagou spodumene pegmatites in Songpan-Garze Fold Belt, West Sichuan, China; Evidence from geochemistry, zircon, cassiterite and coltan U-Pb geochronology and Hf isotopic compositions. *Lithos*, 364-365: 105555
- Fei GC, Yang Z, Yang JY, Luo W, Deng Y, Lai YT, Tao XX, Zheng L, Tang WC and Li J. 2020. New precise timing constraint for the Dangba granitic pegmatite type rare-metal deposit, Markam, Sichuan Province: Evidence from cassiterite LA-MC-ICP-MS U-Pb dating. *Acta Geologica Sinica*, 94(3): 836-849 (in Chinese with English abstract)
- Fei GC, Li TR, Menuge JF, Hui ZQ, Yuan YW, Zhu HP, Tan H, Cai YH, Tang WC, Yang GB, Luo XL, Chen ZP, Chen X and Yun H. 2023. Petrogenesis of aplites in the Ke'eryin rare metal orefield in the Songpan-Garze Fold Belt, Eastern Tibet: Evidence from mineralogy, geochemistry, geochronology and Hf-Nd isotopes. *Lithos*, 438-439: 107017
- Fei GC, Tan X, Yuan YY, Lu X, Cai YH and Zhao TP. 2025. The genesis of spodumene pegmatites in the Ke'eryin orefield, Sichuan Province: Evidence from mineralogy, in-situ geochemistry and Rayleigh fractionation simulation of K-feldspar. *Acta Petrologica Sinica*, 41(6): 2161-2178 (in Chinese with English abstract)
- Forod EE, Černý P, Jackson LL, Sherman DM and Eby RK. 1995. Mineralogical and geochemical evolution of micas from miarolitic pegmatites of the anorogenic pikes peak batholith, Colorado. *Mineralogy and Petrology*, 55(1-3): 1-26
- Gao J, Li JK, Li YJ, Liu YC, Xiong X, Liu Q and Liu QL. 2024. Experimental study on the co-occurrences of spodumene and lepidolite in granitic-class lithium deposits. *Acta Petrologica Sinica*, 40(2): 605-614 (in Chinese with English abstract)
- Gao JG, Xu ZQ, Li GW, Ding F, Das S, Lian DY, Zheng BH, Yan HY, Pan M, Jiang XF and Lu YX. 2023. Sources and petrogenesis of Late Triassic granitoids in the Yajiang Gneiss Dome Group (eastern Songpan-Ganze orogenic belt) with tectonic implications. *Ore Geology Reviews*, 161: 105623
- Goad BE and Černý P. 1981. Peraluminous pegmatitic granites and their pegmatite aureoles in the Winnipeg River District, southeastern Manitoba. *The Canadian Mineralogist*, 19(1): 177-194
- Goldschmidt VM. 1937. The principles of distribution of chemical elements in minerals and rocks. *Journal Chemical Society (Resumed)*, 655-673
- Gu CH. 2014. Metallogenic regularity of spodumene deposits in the closely spaced pegmatite area in the southeastern Ke'eryin pegmatite field, Sichuan Province. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 29(1): 59-65 (in Chinese with English abstract)
- Han ZH, Xiong X, Li JK, Yan QG and Jiang PF. 2024. Muscovite as a potential tool for magmatic differentiation and identifying Li mineralization in the Jiajika regional pegmatites, West Sichuan. *Acta Petrologica Sinica*, 40(2): 499-509 (in Chinese with English abstract)
- Henoc J and Tong M. 1978. Automation of microsonde. *Journal De Microscopie Et De Spectroscopie Electroniques*, 3(3): 247-253
- Hu FY, Liu SW, Ducea MN, Chapman JB, Wu FY and Kusky T. 2020. Early Mesozoic magmatism and tectonic evolution of the Qinling Orogen: Implications for oblique continental collision. *Gondwana Research*, 88: 296-332
- Hu FY, Yang L, Chen GH and Wu FY. 2024. Tracking the magmatic-hydrothermal evolution during lithium mineralization with zircon trace elements. *Acta Geologica Sinica*, 98(5): 1615-1636 (in Chinese with English abstract)
- Kaeter D, Barros R, Menuge JF and Chew DM. 2018. The magmatic-hydrothermal transition in rare-element pegmatites from southeast Ireland: LA-ICP-MS chemical mapping of muscovite and columbite-tantalite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 240: 98-130
- Kovalenko VI, Tsaryeva GM, Naumova VB, Hervig R and Newman S. 1996. Magma of pegmatites from Volhynia: Composition and crystallization parameters determined by magmatic inclusion studies. *Petrology*, 4(3): 277-290
- Li JK, Wang DH and Fu XF. 2006. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of the Ke'eryin pegmatite type rare metal deposit, western Sichuan, and its tectonic significances. *Acta Geologica Sinica*, 80(6): 843-848 (in Chinese with English abstract)
- Li JK, Li P, Yan QG, Wang DH, Ren GL and Ding X. 2023. Geology and mineralization of the Songpan-Ganze-West Kunlun pegmatite-type rare-metal metal-type rare-metal metallogenic belt in China: An overview and synthesis. *Science China (Earth Sciences)*, 66(8): 1702-1724
- Li X, Dai HZ, Wang DH, Liu SB, Fan XD, Liang Z, Gao Y, Wen JH and Zhu HY. 2024. Metallogenic regularity and exploration prediction of the Ke'eryin lithium ore field in Aba, Sichuan. *Acta Petrologica Sinica*, 40(9): 2819-2840 (in Chinese with English abstract)
- Li X, Dai HZ, Wang CH, Wang DH, Wu LM, Fan XD, Liang Z, Liu SB, Wang GH, Huang F, Gao Y and Wen JH. 2025. Apatite low-temperature thermochronology constraints on the Cenozoic differential uplift/denudation of the Ke'eryin lithium ore field in western China: Implications for lithium exploration. *Ore Geology Reviews*, 176: 106430
- Liao YA and Yao XL. 1992. Evolution feature and minerogenetic relations peraluminous granites from Jinchuan, Western Sichuan. *Mineralogy and Petrology*, 12(1): 12-22 (in Chinese with English abstract)

- Liao ZH, Zhang W, Zhang ZF and Ren JG. 2017. Geological features and metallogeny for the Yelonggou Li deposit in Jinchuan, Sichuan. *Acta Geologica Sichuan*, 37(4): 609-612 (in Chinese with English abstract)
- Linnen RL and Keppler H. 1997. Columbite solubility in granitic melts: Consequences for the enrichment and fractionation of Nb and Ta in the Earth's crust. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 128(2-3): 213-227
- Liu SJ, Zhou MF, Sun Y, Li WJ, Chen B and Zhao GC. 2025. Contrasting geochemistry of apatite from Triassic Li-mineralized and barren pegmatites in the Ke'eryin Field, Eastern Tibetan Plateau. *Journal of Petrology*, 66(1): egae130
- Liu YS, Hu ZC, Gao S, Günther D, Xu J, Gao CG and Chen HH. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard. *Chemical Geology*, 257(1-2): 34-43
- Liu YS, Gao S, Hu ZC, Gao CG, Zong KQ and Wang DB. 2010. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the trans-North China orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1-2): 537-571
- London D and Burt DM. 1982. Alteration of spodumene, montebrasite and lithiophilite in pegmatites of the White Picacho District, Arizona. *American Mineralogist*, 67(1-2): 97-113
- London D. 2008. Pegmatites. Ottawa: Mineralogical Association of Canada, 1-347
- London D. 2018. Ore-forming processes within granitic pegmatites. *Ore Geology Reviews*, 101: 349-383
- Luo W, Peng J and Liao ZH. 2025. Genesis and mineralization age of the Yelonggou lithium deposit in the Ke'eryin area of the western Sichuan: Evidences from whole rock geochemistry and cassiterite U-Pb geochronology. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 44(5): 1096-1109 (in Chinese with English abstract)
- Luo YQ, Feng HX, Shen P, Menuge JF, Bai YX, Cao C and Wu Y. 2023. Magmatic-hydrothermal evolution and Nb-Ta mineralization process of the Kelumute No. 112 albite-spodumene pegmatite, Altai, Xinjiang: Insights from mica compositional variation. *Acta Petrologica Sinica*, 39(11): 3369-3391 (in Chinese with English abstract)
- Maneta V and Baker DR. 2019. The potential of lithium in alkali feldspars, quartz, and muscovite as a geochemical indicator in the exploration for lithium-rich granitic pegmatites: A case study from the spodumene-rich Moblan pegmatite, Quebec, Canada. *Journal of Geochemical Exploration*, 205: 106336
- Michaud JAS, Pichavant M and Villaras A. 2021. Rare elements enrichment in crustal peraluminous magmas: Insights from partial melting experiments. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 176(11): 96
- Monier G and Robert JL. 1986. 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, 2kbar P_{H_2O} . Comparison with Natural Lithium Micas, 50(358): 641-651
- Pesquera A, Torres-Ruiz J, Gil-Crespo PP and Velilla N. 1999. Chemistry and genetic implications of tourmaline and Li-F-Cs micas from the Valdeflores area (Caceres, Spain). *American Mineralogist*, 84(1-2): 55-69
- Qin KZ, Liu YC, Zhao JX, Zhao YN, Zhou QF, Shi RZ, Zhu LQ, He CT, Li JY and Cao MJ. 2024. Indication of magma evolution and ore-bearing potential on granitic pegmatite in the view of texture-composition of rock-forming minerals. *Acta Geologica Sinica*, 98(5): 1527-1549 (in Chinese with English abstract)
- Rao C, Wang RC, Che XD, Li XF, Wang Q, Zhang ZQ and Wu RQ. 2022. Metallogenic mechanism and prospect of key metal beryllium. *Acta Petrologica Sinica*, 38(7): 1848-1860 (in Chinese with English abstract)
- Roda Robles E, Pesquera Pérez A and Velasco Roldán F. 1995. Micas of the muscovite-lepidolite series from the fregeneda pegmatites (Salamanca, Spain). *Mineralogy and Petrology*, 55(1-3): 145-157
- Roger F, Malavieille J, Leloup PH, Calassou S and Xu Z. 2004. Timing of granite emplacement and cooling in the Songpan-Garzê Fold Belt (eastern Tibetan Plateau) with tectonic implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 22(5): 465-481
- Roger F, Jolivet M and Malavieille J. 2010. The tectonic evolution of the Songpan-Garzê (North Tibet) and adjacent areas from Proterozoic to Present: A synthesis. *Journal of Asian Earth Sciences*, 39(4): 254-269
- Şengör AMC, Altuner D, Zabcı C, Sunal G, Lom N, Aylan E and Öner T. 2023. On the nature of the Cimmerian Continent. *Earth-Science Reviews*, 247: 104520
- Shearer CK, Papike JJ and Jolliff BL. 1992. Petrogenetic links among granites and pegmatites in the Harney Peak rare-element granite-pegmatite system, Black Hills, South Dakota. *The Canadian Mineralogist*, 30(3): 785-809
- Thomas R, Davidson P and Beurlen H. 2012. The competing models for the origin and internal evolution of granitic pegmatites in the light of melt and fluid inclusion research. *Mineralogy and Petrology*, 106(1-2): 55-73
- Thomas R and Davidson P. 2016. Origin of miarolitic pegmatites in the Königshain granite/Lusatia. *Lithos*, 260: 225-241
- Tindle AG and Webb PC. 1990. Estimation of lithium contents in trioctahedral micas using microprobe data: Application to micas from granitic rocks. *European Journal of Mineralogy*, 2(5): 595-610
- Tischendorf G, Gottesmann B, Forster HJ and Trumbull RB. 1997. On Li-bearing micas: Estimating Li from electron microprobe analyses and an improved diagram for graphical representation. *Mineralogical Magazine*, 61(409): 809-834
- Van Lichtervelde M, Salvi S, Beziat D and Linnen RL. 2007. Textural features and chemical evolution in tantalum oxides: Magmatic versus hydrothermal origins for ta mineralization in the Tanco lower pegmatite, Manitoba, Canada. *Economic Geology*, 102(2): 257-276
- Van Lichtervelde M, Grégoire M, Linnen RL, Béziat D and Salvi S. 2008. Trace element geochemistry by laser ablation ICP-MS of micas associated with Ta mineralization in the Tanco pegmatite, Manitoba, Canada. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 155(6): 791-806
- Van Lichtervelde M, Holtz F and Melcher F. 2018. The effect of disequilibrium crystallization on Nb-Ta fractionation in pegmatites: Constraints from crystallization experiments of tantalite-tapiolite. *American Mineralogist*, 103(9): 1401-1416
- Viana RR, Jordt-Evangelista H and Stern WB. 2007. Geochemistry of muscovite from pegmatites of the Eastern Brazilian pegmatite province: A clue to petrogenesis and mineralization potential. *European Journal of Mineralogy*, 19(5): 745-755
- Vieira R, Roda-Robles E, Pesquera A and Lima A. 2011. Chemical variation and significance of micas from the Fregeneda-Almendra pegmatitic field (Central-Iberian Zone, Spain and Portugal). *American Mineralogist*, 96(4): 637-645
- Wang DH, Liu LJ, Dai HZ, Liu SB, Hou JL and Wu XS. 2017. Discussion on particularity and prospecting direction of large and super-large spodumene deposits. *Earth Science*, 42(12): 2243-2257 (in Chinese with English abstract)
- Wang DH. 2021. Theory, Method and Practice of Investigation and Evaluation of Large Lithium Resource Base: A Case Study of Jianjika Super Large Lithium Deposit in Western Sichuan. Beijing: Science Press: 1-458 (in Chinese)
- Wang DH, Dai HZ, Liu SB, Li JK, Wang CH, Lou DB, Yang YQ and Li P. 2022. New progress and trend in ten aspects of lithium exploration practice and theoretical research in China in the past decade. *Journal of Geomechanics*, 28(5): 743-764 (in Chinese with English abstract)
- Wang RC and Zhou MF. 2018. Granites: Origin and associated mineralization. *Science China (Earth Sciences)*, 61(12): 1932-1933

- Wang RC, Xie L, Zhu ZY and Hu H. 2019. Micas: Important indicators of granite-pegmatite-related rare-metal mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 35 (1): 69-75 (in Chinese with English abstract)
- Wise MA. 1995. Trace element chemistry of lithium-rich micas from rare-element granitic pegmatites. *Mineralogy and Petrology*, 55 (1-3): 203-215
- Xing CM, Wang CY and Wang H. 2020. Magmatic-hydrothermal processes recorded by muscovite and columbite-group minerals from the Bailongshan rare-element pegmatites in the West Kunlun-Karakorum orogenic belt, NW China. *Lithos*, 364-365: 105507
- Xiong YQ, Fan ZW, Yu HY, Di HF, Cao YH, Wen CH and Jiang SY. 2025. Genetic linkage between parent granite and zoned rare metal pegmatite in the Renli-Chuanziyuan granite-pegmatite system, South China. *GSA Bulletin*, 137(3-4): 1607-1627
- Xu L, Chen L, Zhao JY, Li J, Wang SL, Yang WG, Li J, Yang B, Wang H, Yang YS, Zhang ZF and Lu WN. 2024. Magmatic-hydrothermal evolution of the Dangba rare-metal granitic pegmatites in the Songpan-Ganzê orogenic belt, Eastern Tibet: Insights from muscovite and columbite-group minerals. *Journal of Geochemical Exploration*, 265: 107559
- Xu ZQ, Hou LW, Wang ZX, Fu XF and Huang MH. 1992. *Orogenic Processes of the Songpan Ganze Orogenic Belt of China*. Beijing: Geological Publishing House, 1-202 (in Chinese)
- Xu ZQ, Fu XF, Wang RC, Li GW, Zheng YL, Zhao ZB and Lian DY. 2020. Generation of lithium-bearing pegmatite deposits within the Songpan-Ganze orogenic belt, East Tibet. *Lithos*, 354-355: 105281
- Xu ZQ, Wang RC, Zhu WB, Qin YL, Fu XF and Li GW. 2020. Scientific drilling project of granite-pegmatite-type lithium deposit in western Sichuan: Scientific problems and significance. *Acta Geologica Sinica*, 94 (8): 2177-2189 (in Chinese with English abstract)
- Xu ZQ, Zhu WB, Zheng BH, Li GW, Wei HZ, Zhang RQ, Che XD, Li WQ, Wang GG, Gao JG and Yan HY. 2023. New ore-controlling theory of “multilayered domal granitic sheets” of the Jiajika pegmatite-type lithium deposit: The major discoveries of the “Jiajika Pegmatite-type Lithium Deposit Scientific Drilling Project (JSD)”. *Acta Geologica Sinica*, 97 (10): 3133-3146 (in Chinese with English abstract)
- Yan QG, Li JK, Li XJ, Liu YC, Li P and Xiong X. 2020. Source of the Zhawulong granitic pegmatite-type lithium deposit in the Songpan-Ganzê orogenic belt, Western Sichuan, China: Constrants from Sr-Nd-Hf isotopes and petrochemistry. *Lithos*, 378-379: 105828
- Yan QG, Li JK, Wang DH, Zhu ZY, Li C and Chen ZY. 2025. Petrogenesis of Ke'eryin granitic pegmatites and associated Li mineralization in the Songpan-Ganze orogenic belt, China: Evidence from apatite and bulk-rock chemistry. *Mineralium Deposita*, 60(4): 723-742
- Yin R, Huang XL, Xu YG, Wang RC, Wang H, Yuan C, Ma Q, Sun XM and Chen LL. 2020. Mineralogical constraints on the magmatic-hydrothermal evolution of rare-elements deposits in the Bailongshan granitic pegmatites, Xinjiang, NW China. *Lithos*, 352-353: 105208
- Yuan C, Zhou MF, Sun M, Zhao YJ, Wilde S, Long XP and Yan DP. 2010. Triassic granitoids in the eastern Songpan-Ganzi Fold Belt, SW China: Magmatic response to geodynamics of the deep lithosphere. *Earth and Planetary Science Letters*, 290(3-4): 481-492
- Yue XY, Zhang Q, Zhang JJ, Zhang W, Zhang J, Jia ZQ and Luo LP. 2024. Cassiterite U-Pb dating of the Yelonggou pegmatite-type lithium deposit in western Sichuan and its metallogenic age constraints. *China Geology*, 7(1): 153-156
- Zhang H, Lü ZH and Tang Y. 2021. A review of LCT pegmatite and its lithium ore genesis. *Acta Geologica Sinica*, 95(10): 2955-2970 (in Chinese with English abstract)
- Zhang HF, Zhang L, Harris N, Jin LL and Yuan HL. 2006. U-Pb zircon ages, geochemical and isotopic compositions of granitoids in Songpan-Garze fold belt, eastern Tibetan Plateau: Constraints on petrogenesis and tectonic evolution of the basement. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 152(1): 75-88
- Zhang HF, Parrish R, Zhang L, Xu WC, Yuan HL, Gao S and Crowley QG. 2007. A-type granite and adakitic magmatism association in Songpan-Garze fold belt, eastern Tibetan Plateau: Implication for lithospheric delamination. *Lithos*, 97(3-4): 323-335
- Zhao JX, He CT, Qin KZ, Shi RZ, Liu XC, Hu FY, Yu KL and Sun ZH. 2021. Geochronology, source features and the characteristics of fractional crystallization in pegmatite at the Qongjiagang giant pegmatite-type lithium deposit, Himalaya, Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 37(11): 3325-3347 (in Chinese with English abstract)
- Zhao ZB, Du JX, Liang FH, Wu C and Liu XJ. 2019. Structure and metamorphism of Markam gneiss dome from the Eastern Tibetan Plateau and its implications for crustal thickening, metamorphism and exhumation. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20(1): 24-45
- Zhou QF, Qin KZ, Tang DM, Ding JG and Guo ZL. 2013. Mineralogy and significance of micas and feldspars from the Koktokay No. 3 pegmatitic rare-element deposit, Altai. *Acta Petrologica Sinica*, 29 (9): 3004-3022 (in Chinese with English abstract)
- Zhu HP, Fei GC, Tan H, Cai YH, Chen ZP, Luo XL, Yuan YW and Li TR. 2023. Geological characteristics and metallogenic age of pegmatites in the central zone of the Dangba pegmatite-type rare-metal deposit in the Ke'eryin orefield, Sichuan Province. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 42 (2): 350-359 (in Chinese with English abstract)
- Zhu JC, Rao B, Xiong XL, Li FC and Zhang PH. 2002. Comparison and genetic interpretation of Li-F rich, rare-metal bearing granitic rocks. *Geochimica*, 31(2): 141-152 (in Chinese with English abstract)
- Zou TR and Li QC. 2006. *Rare and Rare Earth Metallic Deposits in Xinjiang, China*. Beijing: Geological Publishing House, 1-284 (in Chinese)

附中文参考文献

- 邓运, 费光春, 李剑, 唐文春, 钟伟, 杨贵兵. 2018. 四川李家沟伟晶岩型锂辉石矿床碳氢氧同位素及成矿时代研究. *矿物岩石*, 38(3): 40-47
- 费光春, 杨峥, 杨继忆, 罗伟, 邓运, 赖宇涛, 陶鑫鑫, 郑略, 唐文春, 李剑. 2020. 四川马尔康党坝花岗伟晶岩型稀有金属矿床成矿时代的限定: 来自 LA-MC-ICP-MS 锡石 U-Pb 定年的证据. *地质学报*, 94(3): 836-849
- 费光春, 谭心, 袁彦伟, 陆雪, 蔡云华, 赵太平. 2025. 四川可尔因矿田锂辉石伟晶岩成因: 来自钾长石矿物学、微区地球化学和瑞利分馏模拟的证据. *岩石学报*, 41(6): 2161-2178
- 高杰, 李建康, 李英杰, 刘永超, 熊欣, 刘强, 刘秦龙. 2024. 花岗岩类锂矿床中锂辉石和锂云母共生性的实验模拟研究. *岩石学报*, 40(2): 605-614
- 古城会. 2014. 四川省可尔因伟晶岩田东南密集区锂辉石矿床成矿规律. *地质找矿论丛*, 29(1): 59-65
- 韩志辉, 熊欣, 李建康, 严清高, 姜鹏飞. 2024. 川西甲基卡区域伟晶岩分异演化及锂成矿过程: 来自白云母矿物学的约束. *岩石学报*, 40(2): 499-509
- 胡方决, 杨雷, 陈国辉, 吴福元. 2024. 锆石微量元素示踪锂成矿岩浆-热液演化过程. *地质学报*, 98(5): 1615-1636
- 李建康, 王登红, 付小方. 2006. 川西可尔因伟晶岩型稀有金属矿床的⁴⁰Ar/³⁹Ar年代及其构造意义. *地质学报*, 80(6): 843-848
- 李建康, 李鹏, 严清高, 王登红, 任广利, 丁欣. 2023. 松潘-甘孜-西昆仑花岗伟晶岩型稀有金属成矿带成矿规律. *中国科学: 地球科学*, 53(8): 1718-1740

- 李鑫, 代鸿章, 王登红, 刘善宝, 范小东, 梁志, 高原, 文佳豪, 朱海洋. 2024. 四川阿坝可尔因锂矿田成矿规律与成矿预测. 岩石学报, 40(9): 2819-2840
- 廖远安, 姚学良. 1992. 金川——过铝多阶段花岗岩体演化特征及其与成矿关系. 矿物岩石, 12(1): 12-22
- 廖芝华, 张伟, 张祖飞, 任继刚. 2017. 四川金川县业隆沟锂矿床地质特征及成矿规律. 四川地质学报, 37(4): 609-612
- 罗伟, 彭静, 廖芝华. 2025. 川西可尔因地区业隆沟锂矿床成因与成矿时代: 来自全岩地球化学、锡石 U-Pb 年代学的证据. 矿物岩石地球化学通报, 44(5): 1096-1109
- 罗耀清, 冯浩轩, 申萍, Menuge JF, 白应雄, 曹冲, 武阳. 2023. 新疆阿尔泰柯鲁木特 112 号钠长石-锂辉石伟晶岩脉的岩浆-热液演化与 Nb-Ta 成矿过程: 来自云母成分变化的启示. 岩石学报, 39(11): 3369-3391
- 秦克章, 刘宇超, 赵俊兴, 赵永能, 周起凤, 施睿哲, 朱丽群, 何畅通, 李俊瑜, 曹明坚. 2024. 花岗伟晶岩分异演化与含矿性评价——从造岩矿物组构视角. 地质学报, 98(5): 1527-1549
- 饶灿, 王汝成, 车旭东, 李晓峰, 王琪, 张志琦, 吴润秋. 2022. 关键金属铍的成矿机制与找矿前景. 岩石学报, 38(7): 1848-1860
- 王登红, 刘丽君, 代鸿章, 刘善宝, 侯江龙, 吴西顺. 2017. 试论国内外大型超大型锂辉石矿床的特殊性与找矿方向. 地球科学, 42(12): 2243-2257
- 王登红. 2021. 大型锂资源基地调查评价的理论、方法与实践——以川西甲基卡超大型锂矿为例. 北京: 科学出版社, 1-458
- 王登红, 代鸿章, 刘善宝, 李建康, 王成辉, 娄德波, 杨岳清, 李鹏. 2022. 中国锂矿十年来勘查实践和理论研究的十个方面新进展新趋势. 地质力学学报, 28(5): 743-764
- 王汝成, 谢磊, 诸泽颖, 胡欢. 2019. 云母: 花岗岩-伟晶岩稀有金属成矿作用的重要标志矿物. 岩石学报, 35(1): 69-75
- 许志琴, 侯立玮, 王宗秀, 傅小方, 黄明华. 1992. 中国松潘-甘孜造山带的造山过程. 北京: 地质出版社, 1-202
- 许志琴, 王汝成, 朱文斌, 秦宇龙, 付小芳, 李广伟. 2020. 川西花岗-伟晶岩型锂矿科学钻探: 科学问题和科学意义. 地质学报, 94(8): 2177-2189
- 许志琴, 朱文斌, 郑碧海, 李广伟, 魏海珍, 章荣清, 车旭东, 李伟强, 王国光, 高建国, 闫浩瑜. 2023. 川西甲基卡伟晶岩型锂矿的“多层次穹状花岗岩席”控矿新理论——记“川西甲基卡锂矿科学钻探”创新成果. 地质学报, 97(10): 3133-3146
- 张辉, 吕正航, 唐勇. 2021. LCT 型伟晶岩及其锂矿床成因概述. 地质学报, 95(10): 2955-2970
- 赵俊兴, 何畅通, 秦克章, 施睿哲, 刘小驰, 胡方泱, 余可龙, 孙政浩. 2021. 喜马拉雅琼嘉岗超大型伟晶岩锂矿的形成时代、源区特征及分异特征. 岩石学报, 37(11): 3325-3347
- 周起凤, 秦克章, 唐冬梅, 丁建刚, 郭正林. 2013. 阿尔泰可可托海 3 号脉伟晶岩型稀有金属矿床云母和长石的矿物学研究及意义. 岩石学报, 29(9): 3004-3022
- 朱汇派, 费光春, 谭华, 蔡云华, 陈治坪, 罗小龙, 袁彦伟, 李天瑞. 2023. 四川可尔因矿田党坝伟晶岩型稀有金属矿床中带伟晶岩地质特征及成矿时代. 矿物岩石地球化学通报, 42(2): 350-359
- 朱金初, 饶冰, 熊小林, 李福春, 张佩华. 2002. 富锂氟含稀有矿化花岗质岩石的对比和成因思考. 地球化学, 31(2): 141-152
- 邹天人, 李庆昌. 2006. 中国新疆稀有及稀土金属矿床. 北京: 地质出版社, 1-284