

吕正航,刘堃,张辉等. 2023. 新疆阿尔泰潜在的中大型铍矿床:以冲乎尔伟晶岩为例. 岩石学报,39(11): 3319-3333, doi: 10.18654/1000-0569/2023.11.07

新疆阿尔泰潜在的中大型铍矿床:以冲乎尔伟晶岩为例*

吕正航¹ 刘堃^{1,2} 张辉^{1**} 唐勇¹

LÜ ZhengHang¹, LIU Kun^{1,2}, ZHANG Hui^{1**} and TANG Yong¹

1. 中国科学院地球化学研究所地球内部物质高温高压实验室,贵阳 550081

2. 中国科学院大学地球与行星科学学院,北京 100049

1. Key Laboratory of High-temperature and High-pressure Study of the Earth's Interior, Institute of Geochemistry, Chinese Academy Sciences, Guiyang 550081, China

2. College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

2023-06-15 收稿, 2023-08-26 改回.

Lü ZH, Liu K, Zhang H and Tang Y. 2023. The potential medium- and large-scale Be ore deposit in Altai, Xinjiang: A case study of pegmatites from Chonghur. *Acta Petrologica Sinica*, 39(11): 3319-3333, doi: 10.18654/1000-0569/2023.11.07

Abstract Rare metals such as lithium and beryllium are strategic resources, and the supply risk in beryllium resource is higher than lithium for China. The Altai Orogen, Xinjiang, is the largest pegmatite province and mineral resource base for Be and other rare metals in our country. However, it is urgent to seek increasing reserves of resources because of the closure of many existing mines due to long-term mining and resource exhaustion. Besides, previous exploration, study and utilization of rare metal resources in the Altai Orogen were mainly limited to the Central Altai terrane, while the resource potential in other areas was less concerned. Several beryl-rich pegmatites in Chonghur area in the Qiongkur terrane have been identified by the authors after long term field works, and the typical one was chosen to study on whole rock rare metal content, chronology and mineralogy, aim to evaluate the Be ore-forming potential in pegmatites from the Chonghur area. Results show that monazite grains yield a weighted mean age of 250.5 ± 3.6 Ma, indicating the formation of pegmatite in the end of Permian to the Early Triassic coeval with many other rare metal pegmatites in the Chinese Altai. Beryls are rich in alkali metals such as Cs Na and Li, with high enrichment levels equal to the beryl from the Koktokay No.3 pegmatite, indicating a high degree of differentiation and evolution of the pegmatite-forming melt after emplacement. Combined with the consistent isotope composition of the studied pegmatite with the Late Triassic medium-superlarge rare metal ore deposits, the pegmatite is believed to meet the source and differentiation requirements for significant mineralization. Be mineralization was mainly developed in the quartz-muscovite zone of the pegmatite, with high BeO grades of 0.321% ~0.999% and average grade of 0.590%. The inferred BeO resource of the pegmatite reach to a medium scale at least after a preliminary calculation. With consideration of other Be-rich pegmatites juxtaposed with the studied pegmatite, a large scale Be ore deposit is expected to form in the Chonghur area in the Chinese Altai.

Key words Beryl; Pegmatite; Medium-large scale Be ore deposit; Chonghur; Altai

摘要 锂铍等稀有金属是战略资源,其中,我国的铍资源比锂存在更高的供应风险。新疆阿尔泰是我国最大的伟晶岩省和稀有金属铍资源产地,然而长期开采导致已有矿山闭坑,亟待寻求资源增储。此外,先前对阿尔泰稀有金属资源的勘查、研究和利用主要局限于中阿尔泰地体,而忽略其他地区的资源潜力。笔者通过长期的野外工作,在琼库尔地体冲乎尔地区识别出数条富含绿柱石的伟晶岩,并对其中的典型伟晶岩进行了全岩稀有金属含量、年代学和矿物学等研究,目的在于评价该区伟晶岩的铍成矿潜力。研究结果显示,独居石 U-Pb 年龄为 250.5 ± 3.6 Ma,伟晶岩形成于二叠纪末期至三叠纪早期的稀有金

* 本文受国家自然科学基金重点项目(91962222)和面上项目(41873030)以及2019年贵州省补助资金(GZ2019SIG)联合资助。

第一作者简介:吕正航,男,1984年生,副研究员,硕士生导师,主要从事伟晶岩及相关的稀有金属矿床研究,E-mail: lvzhenghang@vip.gyig.ac.cn

** 通讯作者:张辉,男,1965年生,研究员,博士生导师,主要从事伟晶岩及相关的稀有金属矿床研究,E-mail: zhanghui@vip.gyig.ac.cn

属伟晶岩成岩期。伟晶岩中的绿柱石以富 Cs、Na 和 Li 等碱金属为特征,且富集程度达到可可托海 3 号伟晶岩脉绿柱石水平,表明伟晶岩岩浆侵位后经历了高度分异演化。此外,笔者先前研究证实冲乎尔伟晶岩具有与晚三叠世中大型稀有金属矿床一致的同位素组成,表明冲乎尔伟晶岩从物质源区到分异演化条件上都具备成大矿的条件。冲乎尔伟晶岩中 Be 成矿主要发生在石英-白云母结构带中,其中的 BeO 品位高达 0.321% ~ 0.999%,平均 0.590%。初步计算,该伟晶岩的 BeO 科研储量达中大型规模,考虑到周边同时出露的多条 Be 矿化伟晶岩,笔者提出冲乎尔萨尔加克伟晶岩具备形成大型 Be 矿床的潜力。

关键词 绿柱石;伟晶岩;中大型铍矿床;冲乎尔;阿尔泰

中图法分类号 P588.131; P597.3; P618.72

稀有金属是指地壳丰度低、提取分离难度大但具有特殊物理化学性质的金属。我国只把锂、铍、铌、钽、铷、铯、锆和铪等金属元素称为稀有金属(邹天人和李庆昌, 2006)。近年来,“四稀”(稀有、稀土、稀散、稀贵)矿产之一的稀有金属被多国和组织列为战略性关键矿产(翟明国等, 2019),继而引发了极大的研究和勘查热潮。铍(Be)是原子量仅次于锂的超轻金属元素,具有无磁、抗腐、高硬度、高热吸附性等特点(Taylor *et al.*, 2003),其产品主要用于工业、航空航天、国防、电子及电信基础设施等战略及新兴领域(USGS, 2022)。美国作为全球最大的铍储产地,高纯铍金属向来被该国国防部视为战略关键资源之一(Foley, 2017),足见其重要性。相较而言,我国的铍资源在国际储量和产量上的占比较低,对美的进口依赖程度高达约 70%(Gulley *et al.*, 2018),资源供应存在较大风险。然而,目前对稀有金属的富集成矿研究及勘查主要集中在锂资源之上,而对铍等其他稀有金属的关注较少。

根据成矿岩石类型,全球的铍矿床可分为火山岩型、花岗岩型、伟晶岩型、云英岩型、矽卡岩型、碳酸岩型和石英型(饶灿等, 2022)。我国的铍矿床类型丰富,分布广泛,但优势类型和产地高度集中,主要以伟晶岩型和火山岩型为主,花岗岩型和矽卡岩型次之,且集中分布在新疆、四川、内蒙古、云南和江西(李建康等, 2017)。最近,在西藏喜马拉雅成矿带中发现的错那洞矽卡岩型铍矿规模预计达超大型,预示巨大的铍成矿潜力(李光明等, 2017)。新疆是我国当前最重要的铍矿产地,产出了可可托海超大型伟晶岩型铍矿和白杨河特大火山岩型铍矿,二者分别以绿柱石和羟硅铍石为主要矿石矿物,合计探明的 BeO 储量超过 10 万 t(Li *et al.*, 2015; 邹天人和李庆昌, 2006)。新疆阿尔泰是我国最早的铍矿产区之一,可可托海 3 号伟晶岩中已探明的 BeO 储量超过 6 万 t(邹天人和李庆昌, 2006),为新中国的国防经济建设做出了重要贡献,因此被称为“功勋矿”。历经半个多世纪的开采,其中的铍等稀有金属资源已近枯竭。而火山岩型铍矿开采所面临的环境压力,以及其他类型如矽卡岩型,其矿石矿物符山石和方柱石的利用存在难度,导致利用受限。

长期以来,对新疆阿尔泰稀有金属成矿研究和资源开发主要局限于中阿尔泰的可可托海至哈龙一带,而南部的琼库勒和南阿尔泰地体目前仅发现一些小型矿床和矿化点。近年来,笔者在琼库勒地体中冲乎尔一带的伟晶岩中发现了大

量的绿柱石晶体。这些伟晶岩规模较大,但由于 Be 的成矿主要集中于脉体内部的石英-白云母结构带内,因此其成矿潜力被严重低估。本次研究以代表性的铍矿化伟晶岩脉为研究对象,开展全岩 Be 含量、绿柱石矿物学和年代学等研究,目的在于揭示其成矿时代、物质来源和分异演化程度,进而对伟晶岩中铍等稀有金属成矿潜力进行评价,以期为阿尔泰未来的稀有金属矿床勘查提供思路。

1 地质背景

1.1 区域地质

中国新疆阿尔泰位于中亚增生造山带的西段,是古生代阿尔泰岩浆弧的重要组成部分,其北、西、南、东分别与俄罗斯山区阿尔泰、哈萨克斯坦矿区阿尔泰、中国准噶尔盆地和蒙古戈壁阿尔泰相连。根据构造、地层、岩浆和变质变形等特征,新疆阿尔泰可分为四个地体,从北到南分别为北阿尔泰、中阿尔泰、琼库勒地体和南阿尔泰(图 1; Yuan *et al.*, 2007)。

北阿尔泰位于红山嘴-诺尔特断裂以北,主要出露浅变质的泥盆-石炭纪的变火山岩(Windley *et al.*, 2002)和志留-泥盆纪的花岗斑岩和花岗岩(袁峰等, 2001; 吕正航等, 2015; 秦纪华等, 2016)。

中阿尔泰是新疆阿尔泰的主体,位于红山嘴-诺尔特断裂和阿巴宫-库尔提断裂之间。区内西北和东南主要出露一套奥陶纪的巨厚的复理石和火山碎屑岩沉积建造,即哈巴河群(图 1),岩性主要为变质砂岩、变质粉砂岩、片岩和变质页岩等,变质程度较高。中部主要为志留纪库木提群,为一套浊积质大陆碎屑岩,岩性主要为片岩、混合片麻岩、变质砂岩、变质粉砂岩和千枚岩等(新疆维吾尔自治区地质矿产局, 1993; Windley *et al.*, 2002)。花岗质岩石在中阿尔泰大量出露,包括可可托海和哈龙等十余个中生代花岗岩基和一个中生代阿拉尔花岗岩基(图 1)。岩性主要为准铝-过铝质钙碱性的 I 和 S 型片麻状黑云母花岗岩、黑云母二长花岗岩、斑状黑云母花岗岩等(Windley *et al.*, 2002; Wang *et al.*, 2006, 2009a, 2014, Sun *et al.*, 2008; Cai *et al.*, 2011a, b; Zhang *et al.*, 2017; 王涛等, 2010; 马占龙等, 2015)。此外,有少量的中生代花岗岩株出露(刘文政, 2014; 陈有忻等, 2017)。大量的中生代稀有金属伟晶岩主要形成于此地体中(Wang *et al.*, 2007; Lü *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2016;

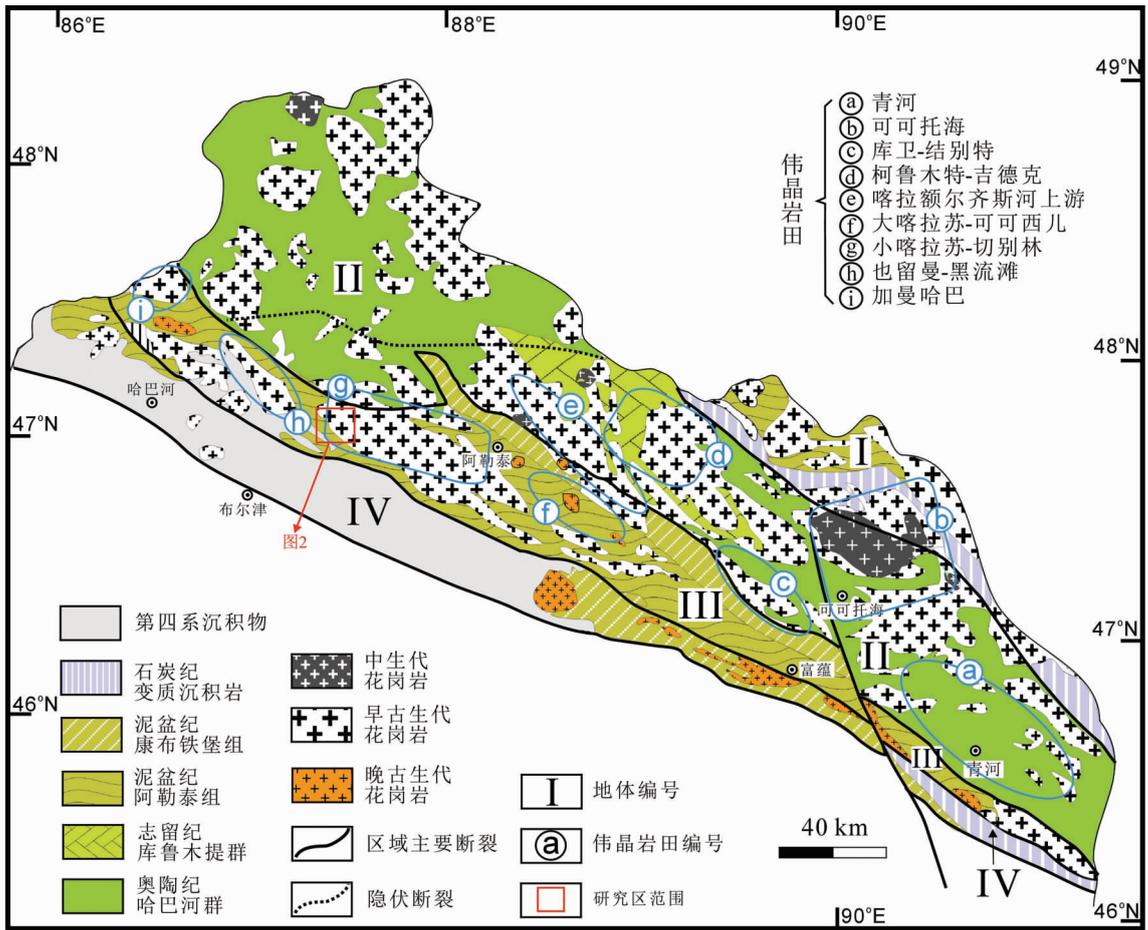


图1 中国阿尔泰地质简图(据 Windley *et al.* , 2002; Lü *et al.* , 2021)

I-北阿尔泰地体; II-中阿尔泰地体; III-琼库尔地体; IV-南阿尔泰地体

Fig. 1 Geological sketch map of the Chinese Altai (modified after Windley *et al.* , 2002; Lü *et al.* , 2021)

I-North Altai domain; II-Central Altai Domain; III-Qiongkuer domain; IV-South Altai domain

Zhou *et al.* , 2018; 任宝琴等, 2011; 马占龙等, 2015)。

琼库尔地体位于阿巴宫-库尔提断裂与克孜加尔-特斯巴汗断裂之间,其间出露泥盆纪阿勒泰组和康布铁堡组,为一套弧火山岩地层,经历了泥盆纪和二叠纪高温变质作用(Jiang *et al.* , 2010; Li *et al.* , 2014)。花岗质岩类主要包括冲乎尔、塔尔浪等数个早古生代岩基和大量二叠纪岩株(图1)。前者主要为英安岩、花岗闪长岩和黑云母花岗岩等,多呈I型;后者主要为黑云母花岗岩、二长花岗岩和石英二长岩,呈I、A和I-A过渡型(王涛等, 2010; 童英等, 2006; Wang *et al.* , 2006; Yuan *et al.* , 2007; Tong *et al.* , 2014; Liu *et al.* , 2018),极少数呈S型(周刚等, 2009)。此外,有较多的二叠纪基性-超基性岩,呈岩脉、岩墙和岩株等出露(Zhang *et al.* , 2010, 2014; Wan *et al.* , 2013; Cai *et al.* , 2016)。琼库尔地体中同样出露大量花岗伟晶岩,期次复杂,但成矿作用比较弱(Lü *et al.* , 2018, 2021; Zhou *et al.* , 2018; 任宝琴等, 2011; 秦克章等, 2013)。

南阿尔泰地体位于额尔齐斯断裂以北的构造带上,其北

西段被第四纪沉积物覆盖,东南段出露变质沉积岩,岩性主要为泥盆纪石英片岩、混合片麻岩等,以及石炭纪的砂岩和粉砂岩等,显示挤压变形。岩浆岩主要为二叠纪的二长花岗岩和黑云母花岗岩(Briggs, 2007; Tong *et al.* , 2014; 童英等, 2006; 赵玉梅等, 2016),以及喀拉通克周边广泛出露的苏长岩和闪长岩等(Han *et al.* , 2004)。

1.2 伟晶岩地质特征

本次研究的伟晶岩位于小喀拉苏-切别林伟晶岩田中的冲乎尔伟晶岩区内(图1),直线距离冲乎尔镇约7km。区内岩浆岩非常发育,主要为海西期中粒黑云母花岗岩和中细粒二云母花岗岩,白云母花岗岩呈小岩株局部出露于黑云母花岗岩中。此外还有少量的斜长花岗岩、花岗闪长岩和基性岩。北部出露奥陶纪哈巴河群变质沉积岩,主要为黑云母石英片岩,局部可见蓝晶石-十字石片岩。中部主要出露泥盆纪阿勒泰组,岩性为石英斑岩、砂岩、凝灰岩和千枚岩等(图2)。哈巴河群片岩与花岗岩的接触带上,发育一条宽约2~3km的

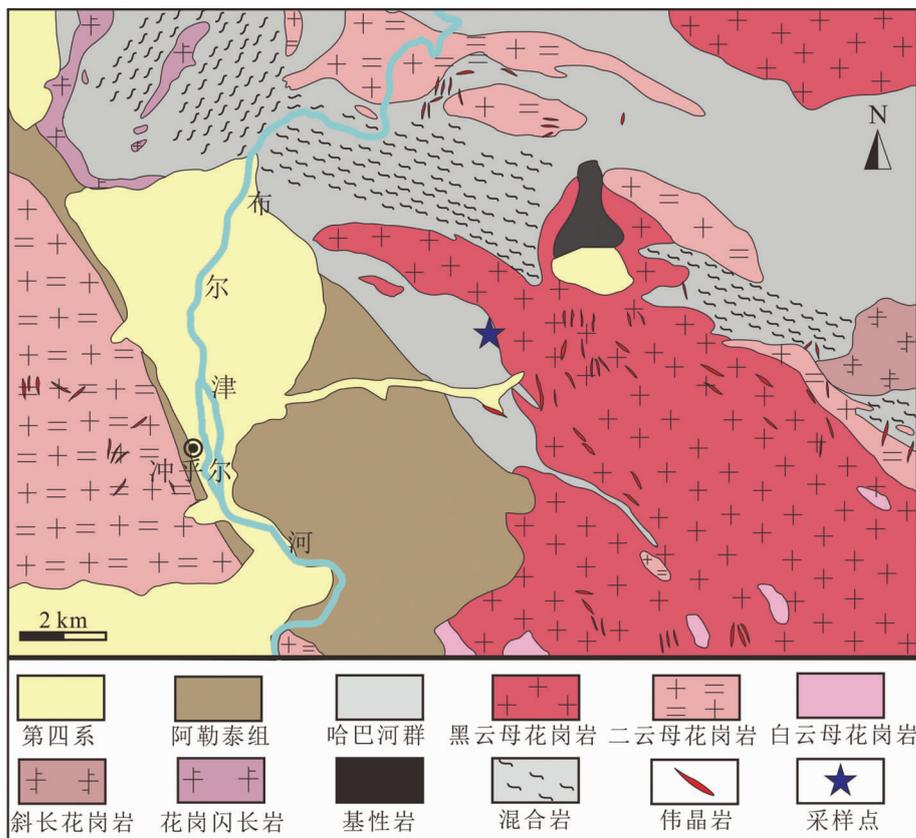


图2 中国阿尔泰冲乎尔地区地质图(据新疆维吾尔自治区地质局, 1966^①)

Fig. 2 Geological map of the Chonghur area in Chinese Altai

混合岩化带,沿 NW 向延伸数十千米。伟晶岩主要分布于海西期黑云母花岗岩和二云母花岗岩,以及哈巴河群片岩中(图2)。区内伟晶岩主要显示 Be 或 Be-Nb-Ta 矿化,极少数发育 Li 矿化。伟晶岩脉体顺层侵入黑云母石英片岩中,走向 NNW330°,倾向 SE,倾角 50°~70°。本文所研究的编号为 SEJK01 的伟晶岩(48°6'31"N~48°6'7"N,87°16'11"E~87°16'37"E)是区内规模较大且具有一定内部分带的伟晶岩脉。该脉体厚 2~12m,出露长度超过 800m(图 3a)。据矿物组合,其内部可分为文象结构带(25%~30%)、块体长石带(20%~25%)、石英-白云母巢体带(30%~35%)、石英-叶钠长石-锂辉石带(3%~5%)和石英核带(5%~10%)。绿柱石全脉发育,露头上皆可见,主要发育于文象结构带和石英-白云母巢体带中(图 3b-e),前者多呈筷子粗细的柱状单晶,直径 1~2cm,长大多在 10cm 以内,浅绿色。后者多为粗晶或集合体,直径 2~20cm,浅绿色或灰白色(图 3b, c)。锂辉石偶见与石英、叶钠长石、钾长石共生,浅红色,长 8~20cm 不等,遭受过后期风化作用(图 3g),局部可见伴生的锂云母(图 3h)。除石英、长石和白云母造岩矿物以外,伟晶岩中非常富集电气石和磷灰石副矿物(图 3f, i, j),几乎在各

结构带内均有显著发育。矿石矿物主要以绿柱石为主,少量锂辉石和锂云母,而锆铁矿族和细晶石等矿物仅见于人工重砂。

2 样品采集和测试方法

本次研究的样品均取自冲乎尔西边的 SEJK01 伟晶岩。定年样品采自文象结构带,绿柱石样品采自石英-白云母巢体带,全岩样品随机采自发育绿柱石的文象带(1 件)和石英-白云母带(6 件),每件重量大约 20kg。将全岩样品进行颞式破碎,破碎至 0.5cm 进行充分混合,再挑出 500g 进行充分研磨至 20 目左右,取出 50g 研磨至 120 目以下,最后取出适量进行化学消减和 ICP-MS 测试。将定年样品依次进行破碎、筛选、淘洗和磁选等,选出用于定年的独居石矿物,然后制作成树脂靶。用于测试的绿柱石均采自石英-白云母带,其中,SEJK-22-B1 样品(图 3e)呈浅灰绿色,局部呈乳白色,自形至半自形,粒径约 5cm;SEJK-22-B2 样品(图 3c 右侧绿柱石)呈浅蓝绿色,局部灰白色,较自形,粒径约 5cm;SEJK-70-1A(图 3d)晶体较大,自形,粒径超过 10cm,浅绿色,内部

① 新疆维吾尔自治区地质局. 1966. 1:20 万冲乎尔幅矿产图

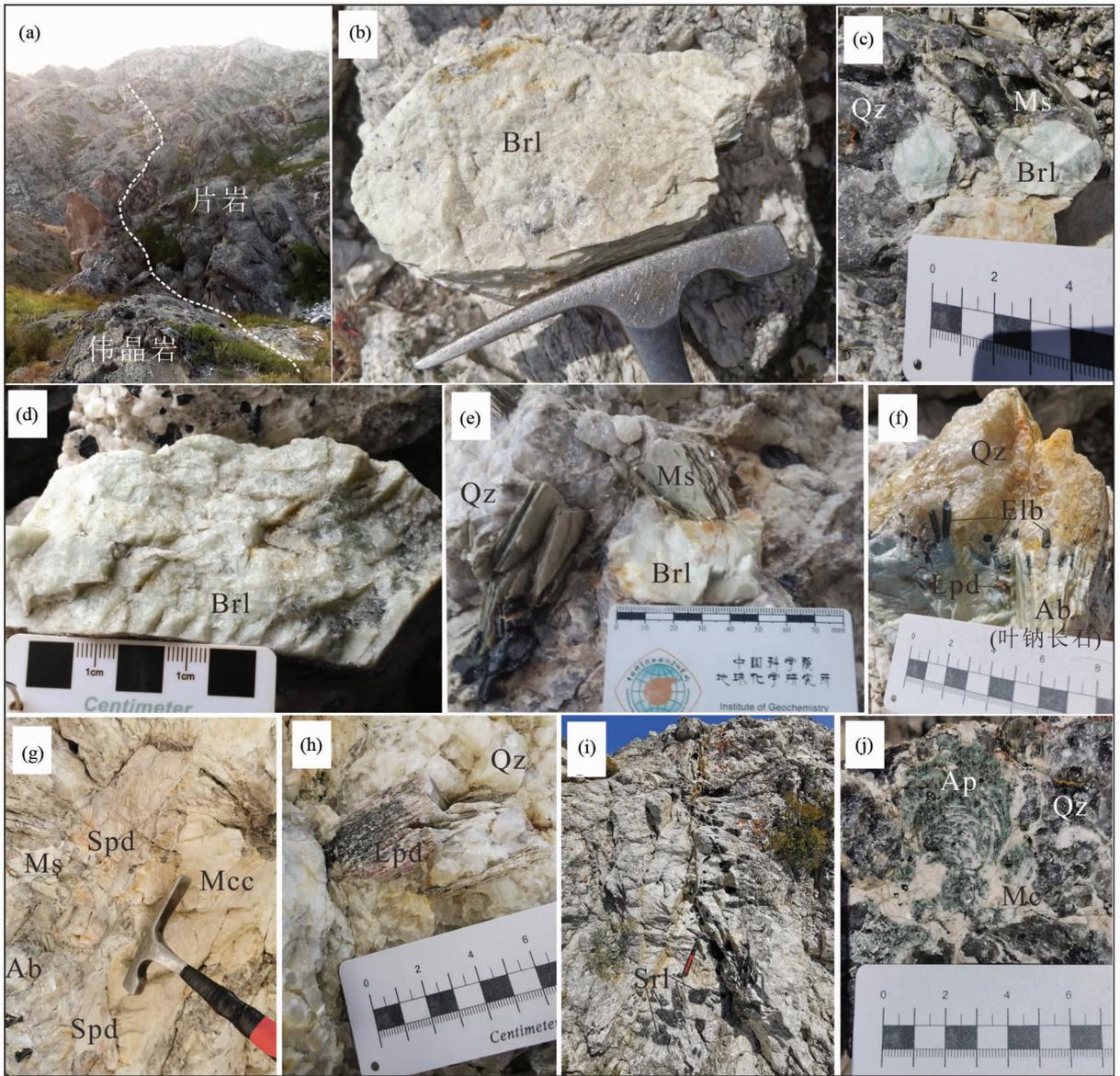


图3 冲乎尔萨尔加克01号伟晶岩露头及内部矿物组合

(a) 伟晶岩局部产状; (b-e) 绿柱石粒径及矿物组合; (f) 石英-叶钠长石矿物组合; (g) 锂辉石等矿物组合; 锂云母(h)、黑电气石(i)和磷灰石骸晶(j)产出特征. Ab-钠长石, Ap-磷灰石; Brl-绿柱石; Elb-锂电气石; Lpd-锂云母; Mcc-微斜长石; Ms-白云母; Spd-锂辉石; Qz-石英; Srl-黑电气石

Fig. 3 Outcrop and internal mineral assemblage of the Saerjiake No. 1 pegmatite in Chonghur area

(a) local geological occurrence of pegmatite; (b-e) size and occurrence of beryl; (f) quartz and cleavelandite; occurrences of spodumene (g) and lepidolite (h); occurrences of coarse schorl (i) and skeletal apatite (j). Ab-albite, Ap-apatite, Brl-beryl, Elb-elbaite, Lpd-lepidolite, Mcc-microcline, Ms-muscovite, Spd-spodumene, Qz-quartz, Srl-schorl

有烟灰色石英。样品进行光薄片和激光片制备。

独居石和绿柱石样品的背散射成像(BSE)、绿柱石的电子探针成分分析(EPMA)以及独居石的U-Pb定年研究均在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成。BSE和成分分析使用的是JEOL JXA-8230型电子探针,工作条件为加速电压25kV,束流20nA,束斑10 μ m,元素峰值和背景时间计数分别为10s和5s。天然矿物和人工合成氧化物作为标样计算元素含量,所有结果均进行了ZAF校

正。独居石U-Pb定年采用LA-ICP-MS该仪器由ArF 193nm准分子激光器和MicroLas光学系统组成激光剥蚀系统,再配备Agilent 7900型ICP-MS质谱仪。仪器的运行流程见Hu *et al.* (2015)。仪器的工作条件为激光束斑24 μ m,频率5Hz和能量密度3J/cm²。U-Pb同位素定年采用哈佛大学独居石117531标样(Tomascak *et al.*, 1996)和标准物质NIST610玻璃作外标分别进行同位素和微量元素分馏校正。每次剥蚀收集包括20s左右的背景信号和50s样品信号。数据处理

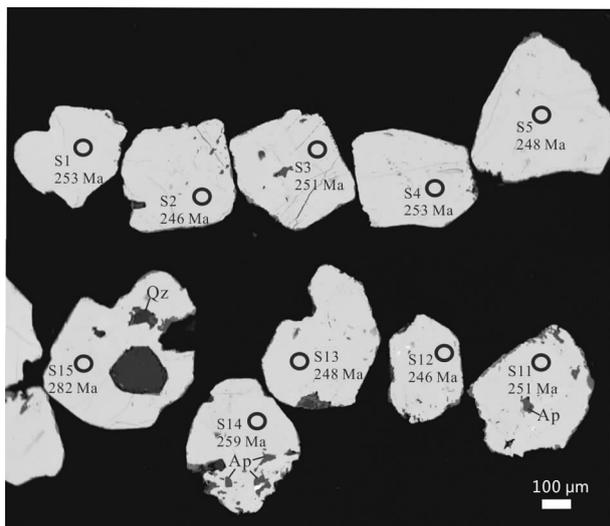


图4 冲乎尔萨尔加克1号伟晶岩代表性定年独居石的背散射成像特征

Fig. 4 BSE imaging features of the representative dating monazite from the Saerjiaka No. 1 pegmatite in Chonghuer

(包括样品和背景信号的选择、元素含量及 U-Th-Pb 同位素比值和年龄计算)通过软件 ICPMSDataCal (Liu *et al.*, 2008, 2010)完成。独居石的 U-Pb 年龄谱和图绘制和年龄加权平均计算采用 Isoplot/Ex_ver3 (Ludwig, 2003)完成。

3 测试结果

全岩微量元素组成结果显示,1件样品(SEJK-22-B1)具有较低的 Li (113×10^{-6}) 和 Be (109×10^{-6}) 含量,和相对较高的 Nb (56×10^{-6}) 和 Ta (42×10^{-6}) 含量。而其余6件样品都显示了较高的 Be ($1154 \times 10^{-6} \sim 3597 \times 10^{-6}$)、Li ($97 \times 10^{-6} \sim 412 \times 10^{-6}$) 和 Cs ($80.2 \times 10^{-6} \sim 486 \times 10^{-6}$) 含量,以及相对含量较低且变化较大的 Rb ($14.4 \times 10^{-6} \sim 640 \times 10^{-6}$)、Nb ($0.61 \times 10^{-6} \sim 35.2 \times 10^{-6}$) 和 Ta ($1.08 \times 10^{-6} \sim 21 \times 10^{-6}$) (表1)。6件全岩样品对应的 BeO 含量为 0.321% ~ 0.999%。

背散射成像结果显示,独居石颗粒呈自形-半自形,350 ~ 500 μm ,成像均匀,微裂隙发育和富集磷灰石和石英等矿物包体(图4)。U-Pb 定年结果显示(表2),15颗独居石具有非常高的 Th ($51182 \times 10^{-6} \sim 143409 \times 10^{-6}$) 和较高的 U ($815 \times 10^{-6} \sim 15389 \times 10^{-6}$),以及相对高的 Pb 含量 ($902 \times 10^{-6} \sim 1711 \times 10^{-6}$)。其中14个测点显示较为一致的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 比值,分别介于 0.0389 ~ 0.0410 和 0.2701 ~ 0.3157,对应的年龄范围分别为 245 ~ 259 Ma 和 243 ~ 269 Ma,两组年龄谱和度介于 90% ~ 99% (表2、图5a)。另外1个测点(S-Mnz-15)显示较大的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄(分别为 282 Ma 和 421 Ma) 和较低的年龄谱和度(60%),

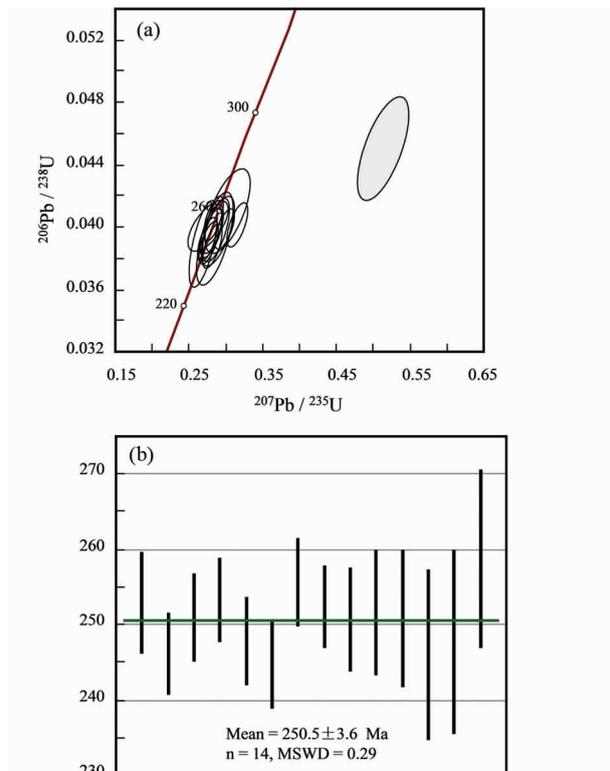


图5 冲乎尔萨尔加克1号伟晶岩独居石 U-Pb 年龄谱和图(a)和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄(b)

Fig. 5 Concordant diagram of U-Pb age (a) and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ weighted mean age (b) of monazite from the Saerjiaka No. 1 pegmatite in Chonghuer

结合伟晶岩中独居石颗粒含有较多的矿物包体(图4),推测在剥蚀过程中受到内部矿物包体影响。据14个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄得到加权平均年龄 $250.5 \pm 3.6 \text{ Ma}$ (2σ , MSWD = 0.29) (图5b),代表伟晶岩的形成年龄。

结合绿柱石颜色、BSE 成像特征和电子探针分析结果来看,浅绿色和浅蓝绿色绿柱石通常具有均一且较暗的 BSE 特征,成分上含有相对高的 SiO_2 (64.51% ~ 65.66%) 和 BeO (11.98% ~ 12.68%) 以及低的 Cs_2O (0.44% ~ 1.08%) (图6a-d 中暗色区域测点;表3)。灰白色和乳白色绿柱石区域则显示马赛克式和网脉状且较亮的 BSE 特征,成分上具有相对低的 SiO_2 (62.13% ~ 63.81%) 和 BeO (10.50% ~ 11.54%) 以及高的 Cs_2O (3.03% ~ 5.33%) (图6a, b, d 中不规则的亮色区域测点;表3)。其他 BSE 亮度介于上述二者间的绿柱石区域,具有中等含量的 SiO_2 、BeO 和 Cs_2O 。此外,不同期次绿柱石的 Na_2O (1.06% ~ 1.86%)、 Li_2O (0.56% ~ 1.39%) 和 FeO^* (全铁,0.05% ~ 0.64%) 相对含量变化也较大(表3)。BeO、 Na_2O 、 Li_2O 和 Cs_2O 含量变化较大反映了碱金属对 Be 不同程度的置换。背散射成像结果显示,部分绿柱石具有马赛克式(图6a, d)和不规则网脉状(图6b)的成像特点,反映后期遭受多次的流体改造。相较

表 1 冲乎尔萨尔加克 1 号伟晶岩不同结构带的稀有金属含量 ($\times 10^{-6}$)Table 1 Rare metal contents of different zones of the Saerjiake No. 1 pegmatite in Chonghuer ($\times 10^{-6}$)

样品号	S-22-B1	S-22-B2	S-22-B8	S-22-B9	S-22-D1	S-22-D2	S-22-D3
结构带	文象带	石英-白云母巢集带					
Li	113	412	213	206	131	97	244
Be	109	3226	2826	2256	1710	1154	3597
Rb	286	155	14.4	226	640	66.1	436
Cs	88.8	486	83.8	80.2	201	112	179
Nb	56	18.5	1.39	35.2	0.61	8.15	1.46
Ta	42.2	17.5	1.51	21	1.08	2.9	2.94
W	1.87	1.11	1.20	5.16	0.671	1.94	1.19
Sn	0.439	0.245	0.077	1.01	0.016	0.112	0.068

表 2 冲乎尔萨尔加克 1 号伟晶岩独居石 U-Pb 年龄测试结果

Table 2 U-Pb dating results of monazite from the Saerjiaka No. 1 pegmatite in Chonghuer

Spot No.	含量 ($\times 10^{-6}$)			Ratios				Ages (Ma)				Concord.
	Pb	Th	U	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	
S-Mnz-1	1007	104183	815	0.2762	0.0180	0.0400	0.0011	248	14.3	253	6.8	97%
S-Mnz-2	1234	71121	12735	0.2771	0.0083	0.0389	0.0009	248	6.6	246	5.5	99%
S-Mnz-3	902	51182	9274	0.2818	0.0090	0.0397	0.0009	252	7.1	251	5.9	99%
S-Mnz-4	1257	73647	12147	0.3157	0.0093	0.0401	0.0009	279	7.2	253	5.6	90%
S-Mnz-5	1056	67762	8718	0.2758	0.0090	0.0392	0.0009	247	7.2	248	5.8	99%
S-Mnz-6	1276	65592	15389	0.2823	0.0086	0.0387	0.0009	253	6.8	245	5.8	96%
S-Mnz-7	1711	143409	5328	0.2839	0.0090	0.0404	0.0009	254	7.1	256	5.9	99%
S-Mnz-8	1164	65699	12294	0.2985	0.0088	0.0398	0.0009	265	6.9	252	5.4	90%
S-Mnz-9	1202	70805	11790	0.2818	0.0103	0.0397	0.0011	252	8.1	251	6.9	99%
S-Mnz-10	1368	77641	14039	0.2873	0.0127	0.0398	0.0013	256	10.0	252	8.3	98%
S-Mnz-11	1469	90822	11937	0.2895	0.0143	0.0397	0.0015	258	11.3	251	9.1	97%
S-Mnz-12	1311	79422	12244	0.2701	0.0125	0.0389	0.0018	243	10.0	246	11.2	98%
S-Mnz-13	1237	72091	12306	0.2850	0.0162	0.0392	0.0020	255	12.8	248	12.2	97%
S-Mnz-14	1525	103427	11435	0.3031	0.0206	0.0410	0.0018	269	16.0	259	11.9	96%
S-Mnz-15	1327	87816	9556	0.5131	0.0291	0.0448	0.0027	421	19.5	282	16.6	60%

而言,含有自形铍尖晶石的绿柱石(图 6c)通常成像较为均匀且 Cs_2O 含量 ($> 1.0\%$) 较低,反映原生的绿柱石成像和成分特点。面扫描结果显示,不同亮度的绿柱石区域中的 Cs_2O 含量变化较大,是引起 BSE 成像亮度变化的重要原因(图 6d)。如图 6a, b 和 d 中测点所示,较亮的区域具有高的 Cs_2O 含量 ($3.31\% \sim 5.14\%$),反之则 Cs_2O 含量较低 ($0.44\% \sim 0.91\%$)。局部可见网脉状结构发育在马赛克结构之上(图 6d),并且前者具有更高的 Cs_2O 含量(见图 6b 和 d 中测点),表明网脉状结构的绿柱石形成时间更晚。

4 讨论

目前已发现的含 Be 矿物大约有 112 种(Grew and Hazen, 2014)。伟晶岩中的 Be 矿物类型非常丰富,相对而言,富 Li-Cs-Ta(LCT)的伟晶岩比富 Nb-Y-F(NYF)具有更加复杂的铍矿物类型(Černý, 2002)。近年来,国内学者在福建

南平的 LCT 伟晶岩中发现了多种 Be 的新矿物,指示晚期流体作用是形成次生 Be 矿物的重要途径(Rao *et al.*, 2014, 2015, 2017)。新疆阿尔泰虽然是我国最重要的伟晶岩型 Be 矿产区,但 Be 矿石矿物非常简单,以绿柱石最为重要,其他如金绿宝石和硅铍石等只在少数伟晶岩中少量发育(邹天人和李庆昌, 2006)。已有研究表明,绿柱石在伟晶岩中的结晶主要受控于 Be 含量、熔体温度和铝饱和指数(即 $\text{ASI} = \text{Al}_{\text{mol}} / (\text{Ca} + \text{Na} + \text{K})_{\text{mol}}$)(Evensen *et al.*, 1999; Evensen and London, 2002; London, 2015)。对世界范围内的绿柱石伟晶岩全岩组成统计显示,富绿柱石伟晶岩的全岩平均 Be 含量为 205×10^{-6} ,最低仅为 36×10^{-6} (London, 2015)。虽然绿柱石结晶的 Be 含量阈值仅为 35×10^{-6} ,但相比 Be 极低的上地壳丰度(2.1×10^{-6})需要约 17 倍的富集,而要达到 BeO 工业品位 0.096% (对应 Be 含量为 346×10^{-6}),则需要富集 165 倍。

4.1 物源对 Be 成矿的制约

现有研究表明,物源和岩浆分异是控制 Be 富集成矿的

表 3 冲乎尔萨拉克 1 号伟晶岩中绿柱石的主要成分 (wt%)

Table 3 Major compositions (wt%) of beryls from the Saerjake No. 1 pegmatite in Chonghuer

样品号	SEJK-22-B1										SEJK-22-B2											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO ₂	64.25	64.29	65.02	64.81	62.22	63.27	64.68	64.83	63.81	64.48	64.94	64.03	63.02	62.13	62.68	62.69	62.41	65.40	65.66	61.92	64.38	64.04
Al ₂ O ₃	18.03	17.76	17.70	17.43	17.01	17.55	17.72	17.76	17.39	17.66	17.72	17.51	17.00	16.88	16.99	16.97	16.96	17.91	17.71	16.78	17.70	17.28
FeO*	0.135	0.119	0.176	0.299	0.192	0.048	0.132	0.211	0.146	0.206	0.335	0.083	0.214	0.185	0.189	0.172	0.19	0.314	0.296	0.157	0.117	0.088
BeO*	11.89	11.70	12.18	12.07	10.50	11.13	12.07	12.09	11.45	11.77	12.23	11.83	10.91	10.74	10.86	10.87	10.66	12.68	12.62	10.66	12.05	11.87
Li ₂ O*	0.889	1.001	0.810	0.846	1.461	1.218	0.832	0.837	1.092	0.987	0.766	0.891	1.31	1.31	1.31	1.30	1.39	0.56	0.62	1.33	0.81	0.87
Na ₂ O	1.369	1.732	1.505	1.642	1.857	1.860	1.494	1.499	1.428	1.456	1.467	1.332	1.69	1.59	1.75	1.72	1.79	1.06	1.19	1.58	1.42	1.46
Ca ₂ O	2.157	1.568	0.792	0.516	5.333	3.029	1.05	1.082	3.806	2.686	2.553	2.349	4.72	5.14	4.39	4.47	5.02	0.44	0.48	5.34	1.12	1.62
Total	98.72	98.17	98.19	97.62	98.58	98.10	97.98	98.31	99.13	99.25	98.02	98.02	98.86	97.96	98.16	98.19	98.41	98.36	98.58	97.77	97.60	97.22
样品号	SEJK-22-B2										SEJK-70-1A											
测点号	11	12	13	14	15	16	17	18	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
SiO ₂	63.80	64.54	64.85	64.75	64.74	64.82	64.21	64.21	64.26	64.02	63.01	64.51	64.22	64.82	64.75	63.47	63.89	64.42	63.22	63.38	64.31	63.31
Al ₂ O ₃	17.38	17.35	17.65	17.35	17.66	17.45	17.45	17.44	17.61	17.73	17.46	17.56	17.61	17.67	17.74	17.64	17.35	17.70	17.24	17.56	17.63	17.44
FeO*	0.067	0.211	0.216	0.223	0.113	0.232	0.096	0.191	0.131	0.15	0.128	0.639	0.174	0.251	0.207	0.082	0.225	0.186	0.084	0.058	0.13	0.083
BeO*	11.49	11.82	12.29	12.10	11.91	12.03	11.82	11.54	11.87	11.54	11.29	11.98	11.90	12.08	12.12	11.54	11.80	11.98	11.50	11.43	11.60	11.43
Li ₂ O*	1.07	0.96	0.72	0.82	0.93	0.87	0.92	1.09	0.901	1.063	1.092	0.866	0.879	0.843	0.812	1.000	0.894	0.853	0.991	1.052	1.069	1.041
Na ₂ O	1.36	1.29	1.30	1.39	1.41	1.55	1.29	1.45	1.439	1.839	1.359	1.577	1.302	1.574	1.485	1.347	1.437	1.497	1.262	1.457	1.774	1.400
Ca ₂ O	3.90	3.23	0.91	1.43	2.39	1.19	2.84	3.69	1.956	1.666	4.117	1.001	2.368	0.789	0.905	3.307	1.893	1.241	3.608	3.297	2.011	3.456
Total	99.06	99.40	97.94	98.06	99.16	98.15	98.63	99.61	98.16	98.01	98.45	98.13	98.45	98.03	98.02	98.39	97.49	97.87	97.90	98.23	98.52	98.16

注: FeO* 代表全铁含量; Li₂O* 和 BeO* 为计算的含量, 计算方式参考 Wang *et al.* (2009b)

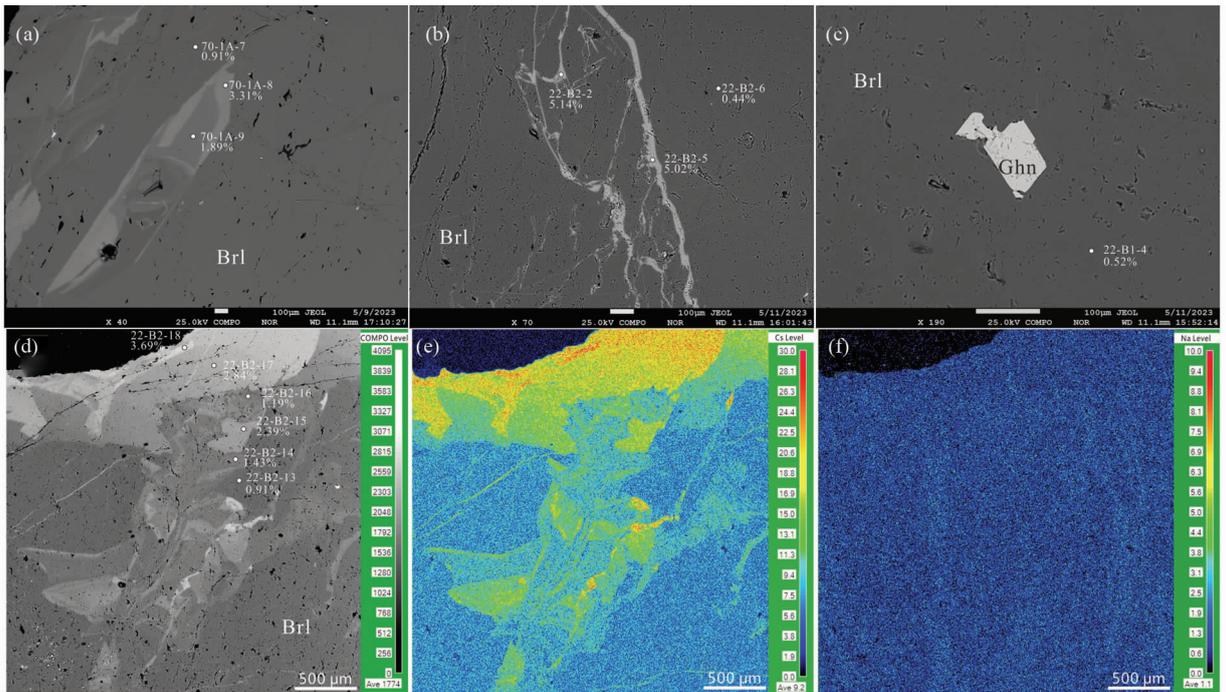


图6 冲乎尔萨拉克1号伟晶岩绿柱石的BSE成像特征和碱金属元素面扫描

(a) 马赛克式的绿柱石 BSE 特征; (b) 发育于原生绿柱石中的网脉状绿柱石; (c) 原生绿柱石及其中的铋尖晶石矿物包体; (d) 马赛克式和网脉状的绿柱石 BSE 特征; 图中圆圈和数字为测点位置、编号和 Cs_2O 含量. 不同期次绿柱石中 Cs (e) 和 Na (f) 的含量分布. Ghn-铋尖晶石

Fig. 6 BSE imaging features and alkali metal mapping of beryls from the Saerjiake No. 1 pegmatite in Chonghur

(a) mosaic BSE of beryl; (b) reticular beryl in primary beryl; (c) gahnite inclusion in primary beryl; (d) mosaic and reticular BSE imaging of beryl; images showing the representative location; number and Cs_2O content for analytical spot. Content distributions of Cs (e) and Na (f) in different beryl phases. Ghn-gahnite

两个重要因素。物源上,阿尔泰以发育数量众多的绿柱石伟晶岩以及国内唯一已开采闭坑的超大型 Be 矿可可托海 3 号脉。与松潘甘孜-西昆仑和江南造山带中的中大型稀有金属矿床对比不难发现,二者的优势稀有金属矿产分别为 Li 和 Ta(Nb),显著不同于阿尔泰,表明不同造山带中的稀有金属禀赋有所差异。笔者曾对阿尔泰大量的稀有金属矿床开展年代学和同位素研究,结果显示阿尔泰至少存在四期(泥盆纪、二叠纪、三叠纪和侏罗纪)伟晶岩稀有金属成矿事件(表 4),成岩成矿峰期为三叠纪(Lü *et al.*, 2012, 2018, 2021; 吕正航等, 2015; 张辉等, 2019)。不同时代的稀有金属矿床都显示亏损的 Hf 同位素特征(图 7),表明源区以新生或年轻的地壳物质为主,显著区别于松潘甘孜-西昆仑和江南造山带伟晶岩源于古老地壳物质。上述差异表明阿尔泰在源区上具有 Be 成矿的禀赋,可能与新疆阿尔泰作为陆缘岩浆弧的地体属性及其中大量发育的火山岩有关。此外,阿尔泰不同时代的矿化伟晶岩也显示出同位素差异。同造山的泥盆纪伟晶岩与晚二叠世的部分伟晶岩产出小型的 Be-Nb-Ta \pm Li 矿床,显示中等亏损的 Hf 同位素组成, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 和二阶段模式年龄分别为 +4.5 ~ +8 和 1.09 ~ 0.86Ga; 二叠纪的稀土矿化伟晶岩则显示显著亏损的 Hf 同位素组成, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值主要介于 +6 ~ +10 和二阶段模式年龄 0.86 ~ 0.63Ga(Lü

et al., 2018, 2021); 与上述伟晶岩不同,三叠纪的伟晶岩产出了大多数中型至超大型稀有金属矿床,如可可托海 3 号脉、柯鲁木特 112 号脉、阿祖拜和阿斯喀尔特等 Be 矿化伟晶岩(Lü *et al.*, 2012; Tang *et al.*, 2021; 陈剑锋和张辉, 2011),且以相对富集的 Hf 同位素组成,即 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 普遍小于 +2 和二阶段模式年龄大于 1.09Ga。本次研究所涉及的冲乎尔伟晶岩形成时间为 $250.5 \pm 3.6\text{Ma}$ (图 5),属于二叠纪末期至三叠纪早期。该时期处于阿尔泰弧与准噶尔弧碰撞后伸展阶段,幔源岩浆底侵为壳源物质的熔融提供了条件(Lü *et al.*, 2021)。琼库尔地体中含有大量的古生代火山岩物质,以阿勒泰组火山沉积地层为代表。众所周知,火山岩型 Be 矿是全球最重要的 Be 矿床类型之一,以美国 Spormountain 矿床为代表。古生代时期的琼库尔地体处于弧前盆地演化阶段,沉积于其中的火山岩物质随着洋壳俯冲被带入地壳深处进行改造和循环,继而为该地体中的伟晶岩及其 Be 成矿提供了物质基础。冲乎尔伟晶岩其同位素组成 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 和二阶段模式年龄分别为 -0.32 ~ +1.52 和 1.30 ~ 1.18Ga(Lü *et al.*, 2021),显著不同于其他晚二叠世至早三叠世的稀有稀土矿化伟晶岩,而与晚三叠世矿化伟晶岩的同位素组成非常相似(图 7),表明冲乎尔伟晶岩具备 Be 成大矿的物质基础。

表4 中国阿尔泰典型稀有金属伟晶岩的矿化类型、规模及成矿时代

Table 4 Mineralization type, size and age of typical rare metal pegmatites in the Chinese Altay

矿区	脉体/样品号	矿化类型	规模	年龄 (Ma)	定年方法	数据来源
切别林	QBL02	Be-Nb-Ta	小型	402 ± 5.5	1	Lü <i>et al.</i> , 2018
加曼哈巴	JMHB02	Be-Nb-Ta	小型	394.8 ± 4.0	1	Lü <i>et al.</i> , 2018
塔拉提	TKT01	Li-Be-Nb-Ta	小型	385.9 ± 3.5	1	Lü <i>et al.</i> , 2018
阿木拉宫	AMLG01	Li-Be-Nb-Ta	小型	358.3 ± 4.6	1	Lü <i>et al.</i> , 2018
加曼哈巴	HB08-6	Be-Nb-Ta	小型	260.4 ± 4.0	1	Lü <i>et al.</i> , 2021
大喀拉苏	No. 1	Be-Nb-Ta	中型	258.0 ± 3.8	1	Lü <i>et al.</i> , 2021
冲乎尔	SEJK01	Be-Li-Nb-Ta	中大型	250.5 ± 3.6	2	本次研究
阿克巴斯塔乌	BRJ08-10	Be	小型	249.7 ± 0.7	1	任宝琴等, 2011
阿巴宫	ALT10-1	Be-Nb-Ta	小型	246.8 ± 1.2	1	任宝琴等, 2011
虎斯特	FH08-8	Be-Nb-Ta	小型	244.3 ± 1.1	1	任宝琴等, 2011
切别林	BRJ08-7	Be	小型	240.5 ± 1.4	1	任宝琴等, 2011
柯鲁木特	No. 112	Li-Be-Nb-Ta	中大型	238 ~ 210	1	Lü <i>et al.</i> , 2012
库卡拉盖	No. 650	Li-Be-Nb-Ta	中型	211 ~ 228	1	马占龙等, 2015
卡鲁安	No. 805, 806, 807	Li	大型	216 ~ 223	1	马占龙等, 2015
可可托海	No. 3	Be-Li-Ta-Nb-Cs	超大型	220 ~ 198	1, 3	Wang <i>et al.</i> , 2007; Che <i>et al.</i> , 2015
阿斯喀尔特	AKG06	Be-Mo	中型	220.6 ± 1.6	1	刘文政, 2014
阿祖拜	No. 328	Be-Nb-Ta	小型	215.6 ± 0.9	1	周天怡, 2015
佳木开	JMK10-2	Be-Nb-Ta-Cs	小型	212.2 ± 1.7	1	任宝琴等, 2011
群库	QK10-2	Be-Nb-Ta	小型	206.8 ± 1.6	1	任宝琴等, 2011
阿祖拜	No. 528	Be-Nb-Ta	小型	201.0 ± 1.3	1	周天怡, 2015
佳木开	JMK10-A	Li-Be-Nb-Ta	小型	199.1 ± 1.0	1	任宝琴等, 2011
虎斯特	HST-P	Be	小型	198.5 ± 2.5	1	Zhou <i>et al.</i> , 2018
小虎斯特	No. 91	Li-Be-Nb-Ta	中型	190.6 ± 1.2	1	任宝琴等, 2011
尚克兰	20SKL12-2	Be-W	小型	190 ± 1	2	Luo <i>et al.</i> , 2023
库儒尔特	KP4-08-6	Li-Be-Nb-Ta	小型	180.7 ± 0.5	1	任宝琴等, 2011
别也萨麻斯	No. L1	Li-Be-Nb-Ta	中型	157.2 ± 0.5	1	吕正航等, 2015

注:定年方法分别为1-锆石 U-Pb,2-独居石 U-Pb,3-铌铁矿组 U-Pb

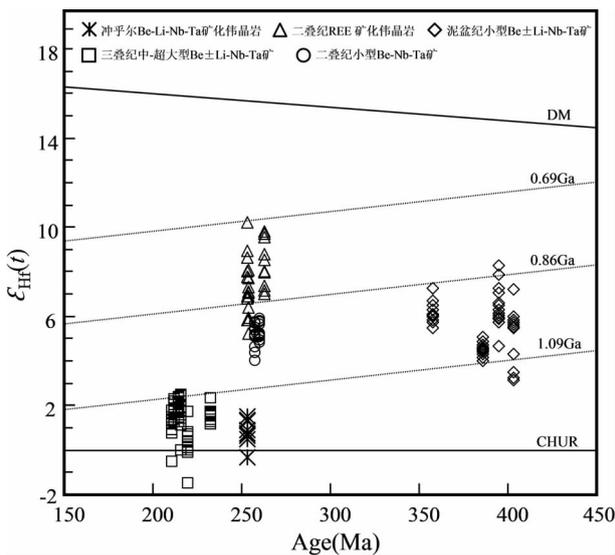


图7 新疆阿尔泰矿化伟晶岩的锆石 Hf 同位素组成
数据引自 Lü *et al.*, 2012, 2018, 2021; Zhang *et al.*, 2016; 陈剑锋和张辉, 2011; 刘文政, 2014

Fig. 7 Zircon Hf isotope compositions of the mineralized pegmatites in Altai, Xinjiang
Data from Lü *et al.*, 2012, 2018, 2021; Zhang *et al.*, 2016; Chen and Zhang, 2011; Liu, 2014

4.2 BeO 溶解度对 Be 成矿的制约

瑞利分馏模拟结果显示,含有 6×10^{-6} Be 的花岗质岩浆需经 75% 左右的分离结晶才能达到绿柱石饱和的 35×10^{-6} Be 含量阈值;而要达到富绿柱石伟晶岩所具备的 Be 平均含量 200×10^{-6} ,则需要高达 99.6% 的分离结晶 (London, 2015)。因此,绿柱石的出现代表着伟晶岩岩浆经历了较高分离程度的分异。然而,绿柱石的出现并不意味着 Be 的矿化程度高。比如发育在边缘文象结构带中的绿柱石,主要受控于降温引起的绿柱石饱和 (Evensen and London, 2002),反映岩浆侵位前经历了一定(约 75%)的分离结晶作用,岩浆中也初步富集了一定的 BeO ($\geq 35 \times 10^{-6}$),但这样的伟晶岩其 BeO 通常难以达到工业品位,如加曼哈巴、也留曼和库卫等地的含绿柱石伟晶岩,其文象带中的绿柱石晶体普遍较小且数量较少。而由 ASI 主导的机制则不同,该机制是 Be 富集和绿柱石晶出的重要途径 (Evensen and London, 2002)。一方面,Be 在富绿柱石的伟晶岩岩浆中对所有的造岩矿物皆不显示相容性,随着长石、石英等矿物的晶出,Be 元素得以富集;另一方面,石英-白云母结构带代表强过铝质 (ASI 为 1.3 ~ 1.4) 的环境,并且以高的 Al 活度和 Si 饱和为特征。在温度不变的情况下,ASI 的升高会显著降低 BeO 的溶解度,

导致绿柱石晶出。因此,在伟晶岩岩浆演化到由石英和白云母主导的阶段(即 ASI 增加)之前,必然经历了 Be 在较低 ASI 条件下(如长石主导的准铝质环境)的富集过程(通过边界层熔体实现, London, 2014),而当残余体系的 ASI 增加后,绿柱石因 BeO 溶解度降低而晶出。萨尔加克 01 号伟晶岩从矿物组合上显示 LCT(富 Li-Cs-Ta)伟晶岩的特征,其初始岩浆应为过铝质熔体(ASI > 1.1)。该脉主要由文象结构带(25% ~ 30%)、块体长石带(20% ~ 25%)和石英-白云母带(30% ~ 35%)组成,而前两个带主要矿物为微斜长石和石英,以及较多的磷灰石副矿物,反映准铝质的熔体组成(ASI 介于 1.0 ~ 1.1)。当这两个结构带结晶之后,残余体系必然是强过铝质的,以晶出大量的白云母矿物(ASI 约为 1.3)为特征,形成石英-白云母带。此后,残余的熔体又转变为准铝质熔体,形成了石英-叶钠长石-锂辉石带(3% ~ 5%)和石英核带(5% ~ 10%)。在这过程中,熔体中的 Be 含量随着文象结构带和块体长石带的结晶得到了进一步富集,而在石英和白云母主导的阶段晶出绿柱石矿物。

实验结果表明,温度不变情况下,ASI 从 1.05 增加至 1.24, BeO 溶解度从 1118×10^{-6} 骤降至 289×10^{-6} (Evensen *et al.*, 1999),这意味着大约 75% 的 BeO 从熔体中晶出。此外,实验研究表明,在相似温压条件下的低 Be 丰度的熔体中,Be 只对斜长石(An_{31})和白云母是相容的。而在高 Be 丰度(达到绿柱石饱和)的熔体中,Be 对所有的造岩矿物皆显示不相容性(Evensen and London, 2002)。以可可托海 3 号脉石英-白云母带为例,作为 Be 的主要矿化带之一,其中的石英、白云母和长石中 Be 的平均含量非常低,分别低于 60×10^{-6} 、 50×10^{-6} 和 10×10^{-6} (周起凤, 2013; 唐宏和张辉, 2018)。因此,对于缺乏其他富 Be 矿物的绿柱石伟晶岩来说,其中的 Be 含量主要受控于绿柱石数量。

4.3 岩浆分异对 Be 成矿的制约

岩浆分异是伟晶岩成岩和稀有金属成矿的重要方式。目前认为花岗岩岩浆可通过分离结晶(Trueman and Černý, 1982)、液态不混溶(Webster *et al.*, 1997; 张辉, 2001)、超临界流体(Thomas and Davidson, 2016)和组分带状纯化(constitutional zoning refine, London, 2018)等分异机制富集稀有金属。由于缺乏统一的辨别方法,因此很难有效区分上述机制(尤其是后三种)。然而,花岗岩岩浆分异可通过岩相的连续变化、伟晶岩的空间分带等宏观标志来识别,这些属于伟晶岩岩浆侵位前的分异过程。伟晶岩侵位后的分异特征主要表现为其内部分带,世代矿物的成分和同位素的系统变化。伟晶岩岩浆侵位前后的分异过程对于稀有金属富集成矿都比较重要,但对伟晶岩成岩特征影响较大。比如,川西甲基卡和西昆仑造山带中的富 Li 伟晶岩通常显示区域分带但内部分带不明显,伟晶岩表现为全脉矿化,反映侵位前分异的特征和贡献;而阿尔泰伟晶岩大多发育内部分带,比如可可托海 3 号脉,以近似同心环的 9 个内部结构带和分带

矿化为特征,反映侵位后的分异作用更为重要。如果可可托海 3 号脉初始岩浆侵位后不发生分异,其中的大部分稀有金属,尤其是 Li, 不可能成矿。因为全岩 Li_2O 含量仅为 0.365% (邹天人和李庆昌, 2006), 低于锂辉石饱和结晶所需含量(1% 左右, Maneta *et al.*, 2015), 而侵位后的分异使得 Li 在 V、VI 和 VIII 带中富集(Li_2O 含量分别为 0.95%, 1.28%, 2.57%) (邹天人和李庆昌, 2006), 继而成矿。

冲乎尔伟晶岩文象结构带中普遍发育绿柱石, Be 含量为 109×10^{-6} , 表明岩浆侵位前经历了较高的分离结晶作用。此外,伟晶岩显示出较好的内部分带,且发育锂辉石、锂云母和锂电气石等矿物(图 3f-h), 表明岩浆侵位后又发生了分异。以绿柱石成分为例,其中的碱金属氧化物含量与 BeO 具有非常好的负相关性(图 8a), 表明前者对后者的置换。而绿柱石中碱金属的含量往往与熔体的分异程度呈正相关。冲乎尔伟晶岩绿柱石中的碱金属含量非常高(图 8a), 尤其是 Cs_2O 含量,基本达到了可可托海 3 号脉绿柱石的 Cs 含量水平(图 8b), 表明了极高的分异程度。矿化带内 Be 含量高达 $1154 \times 10^{-6} \sim 3597 \times 10^{-6}$ 。此外,脉体中的绿柱石晶体普遍较大,笔者目前已发现的不完整绿柱石晶体直径超过 20cm(图 3b), 意味着 Be 的高度富集。绿柱石主要形成于石英-白云母带中,与其共生的造岩矿物石英(50% ~ 60%)、白云母(25% ~ 30%)和长石(5% ~ 10%)以及副矿物磷灰石(1% 左右)中 Be 的含量非常有限。萨尔加克 01 号伟晶岩石英-白云母带中的 BeO 含量为 0.321% ~ 0.999%, 平均 0.590%, 超过工业品位 0.096%。按照该结构带占全脉 25% ~ 30% 比例计算,全脉 BeO 平均含量 0.15% ~ 0.18%。按照脉体出露长度 890m(卫星图上测量)、平均厚度 6m、向下延伸长度 290m(长度的 1/3), 以及长英质岩石比重 $2.7g/cm^3$ 计算,该脉体的 BeO 科研预估储量为 6272 ~ 7526t。如果仅按照石英-白云母带的比例和 BeO 品位计算,该脉体中石英-白云母结构带内 BeO 科研预估储量为 4027 ~ 14619t, 达到中大型规模。需要说明的是,针对矿化结构的品位测量比整条脉体的全岩品位测定更加科学,对具有内部分带的伟晶岩尤其重要。本次计算的 BeO 科研储量仅限于石英-白云母带, 低于全脉实际的储量。虽然估计的脉体延深长度等存在不确定性,但所研究区域有多条脉体同时出露,露头上皆发现绿柱石矿物,且延伸较长。如果将这些脉体纳入考量范围,区域内的 BeO 储量更加可观。受制于出露条件,先前的勘查工作(新疆维吾尔自治区地质局, 1966)在不了解伟晶岩内部矿化特征的情况下,BeO 的品位被严重低估。

虽然可可托海 3 号脉超大型 Be 稀有金属矿床已闭坑,但阿尔泰现有的 Be 资源储量仍非常可观。除了本次研究提出的冲乎尔伟晶岩中潜在的中大型 Be 矿,在中阿尔泰佳木开-群库一带同样出露多条富绿柱石的伟晶岩脉,而且绿柱石大多发育在石英-白云母巢体带中,预示着较好的成矿潜力。阿尔泰伟晶岩中的 Be 富集成矿过程与岩浆的分异演化有关,然而更重要的贡献可能来自伟晶岩源区,这是未来研

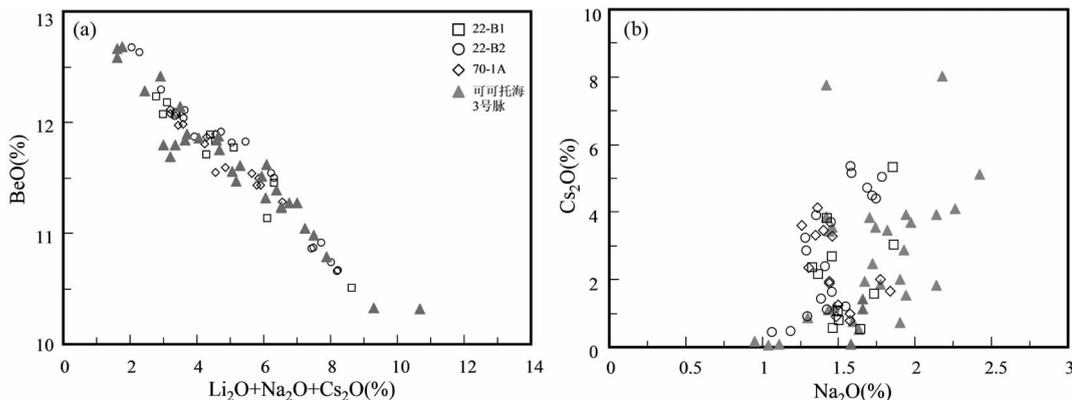


图 8 萨尔加克伟晶岩绿柱石的 BeO 与碱金属含量 (a) 和 Na_2O 与 Cs_2O 含量相关图 (b)

可可托海 3 号脉绿柱石成分参考周起凤 (2013)

Fig. 8 Correlation of BeO with alkali metals (a) and the Na_2O vs. Cs_2O contents (b) of beryls from the Saerjiake pegmatite

The beryl composition of the Koptokay No. 3 pegmatite refers to Zhou (2013)

究阿尔泰伟晶岩稀有金属矿床应当注重的一个方向。

5 结论

(1) 阿尔泰冲乎尔伟晶岩独居石 U-Pb 年龄为 $250.5 \pm 3.6\text{Ma}$, 形成于二叠纪末期至三叠纪早期;

(2) 伟晶岩中的绿柱石以富 Cs、Na 和 Li 等碱金属为特征, 且富集程度与可可托海 3 号脉类似, 表明伟晶岩岩浆侵位后经历了高度的分异演化。此外, 该伟晶岩具有与晚三叠世的中大型稀有金属矿床一致的同位素组成, 表明具备成矿物质基础;

(3) 冲乎尔伟晶岩中 Be 成矿主要发生在石英-白云母结构带中, 其中的 BeO 含量高达 $0.321\% \sim 0.999\%$, 平均 0.590% 。初步计算, 该伟晶岩的 BeO 储量达中大型规模, 考虑到区内的其他绿柱石伟晶岩, 提出冲乎尔伟晶岩具备形成大型 Be 矿床的潜力。

致谢 感谢矿床地球化学国家重点实验室郑文琴、胡静和杨淑琴老师以及李响、李赞和韩俊杰工程师在实验过程中提供的指导和帮助。感谢申萍老师的辛勤组织本次专辑, 以及两位匿名审稿人提出的建设性修改意见!

References

Briggs SM, Yin A, Manning CE, Chen ZL, Wang XF and Grove M. 2007. Late Paleozoic tectonic history of the Ertix Fault in the Chinese Altai and its implications for the development of the Central Asian Orogenic System. *Geological Society of America Bulletin*, 119 (7-8): 944-960

Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang Uygur Autonomous Region (BGMRX). 1993. *Regional Geology of Xinjiang Uygur Autonomous Region*. Beijing: Geological Publishing House, 6-206 (in Chinese)

Cai KD, Sun M, Yuan C, Zhao GC, Xiao WJ, Long XP and Wu FY. 2011a. Geochronology, petrogenesis and tectonic significance of peraluminous granites from the Chinese Altai, NW China. *Lithos*, 127(1-2): 261-281

Cai KD, Sun M, Yuan C, Zhao GC, Xiao WJ, Long XP and Wu FY. 2011b. Prolonged magmatism, juvenile nature and tectonic evolution of the Chinese Altai, NW China: Evidence from zircon U-Pb and Hf isotopic study of Paleozoic granitoids. *Journal of Asian Earth Sciences*, 42(5): 949-968

Cai KD, Sun M, Jahn BM, Xiao WJ, Long XP, Chen HY, Xia XP, Chen M and Wang XS. 2016. Petrogenesis of the Permian intermediate-mafic dikes in the Chinese Altai, Northwest China: Implication for a postaccretion extensional scenario. *The Journal of Geology*, 124(4): 481-500

Černý P. 2002. Mineralogy of beryllium in granitic pegmatites. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 50(1): 405-444

Che XD, Wu FY, Wang RC, Gerdes A, Ji WQ, Zhao ZH, Yang JH and Zhu ZY. 2015. In situ U-Pb isotopic dating of columbite-tantalite by LA-ICP-MS. *Ore Geology Reviews*, 65: 979-989

Chen JF and Zhang H. 2011. Trace elements in quartz lattice and their implications for petrogenesis and mineralization. *Geological Journal of China Universities*, 17(1): 125-135 (in Chinese with English abstract)

Chen YX, Gao F, Pei XZ, Tian HB, Li ZC, Li RB, Wang M and He JL. 2017. Chronology, geochemistry and tectonic implication of the Huiteng granitic pluton in the Altay area, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 33(10): 3076-3090 (in Chinese with English abstract)

Evensen JM, London D and Wendlandt RF. 1999. Solubility and stability of beryl in granitic melts. *American Mineralogist*, 84(5-6): 733-745

Evensen JM and London D. 2002. Experimental silicate mineral/melt partition coefficients for beryllium and the crustal Be cycle from migmatite to pegmatite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66 (12): 2239-2265

Foley NK, Jaskula BW, Piatak NM and Schulte RF. 2017. Beryllium. In: Schulz KJ, DeYoung JH Jr, Seal RR II and Bradley DC (eds.). *Critical Mineral Resources of the United States: Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply*. U. S. Geological Survey, Professional Paper, 1802: E1-E32

Grew ES and Hazen RM. 2014. Beryllium mineral evolution. *American Mineralogist*, 99(5-6): 999-1021

Gulley AL, Nassar NT and Xun SA. 2018. China, the United States, and competition for resources that enable emerging technologies. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States*

- of America, 115(16): 4111–4115
- Han BF, Ji JQ, Song B, Chen LH and Li ZH. 2004. SHRIMP zircon U-Pb ages of Kalatongke No.1 and Huangshandong Cu-Ni-bearing mafic-ultramafic complexes, North Xinjiang, and geological implications. *Chinese Science Bulletin*, 49(22): 2424–2429
- Hu ZC, Zhang W, Liu YS, Gao S, Li M, Zong KQ, Chen HH and Hu SH. 2015. “Wave” signal-smoothing and mercury-removing device for laser ablation quadrupole and multiple collector ICPMS analysis: Application to lead isotope analysis. *Analytical Chemistry*, 87(2): 1152–1157
- Jiang YD, Sun M, Zhao GC, Yuan C, Xiao WJ, Xia XP, Long XP and Wu FY. 2010. The 390Ma high-T metamorphic event in the Chinese Altai: A consequence of ridge-subduction? *American Journal of Science*, 310(10): 1421–1452
- Li GM, Zhang LK, Jiao YJ, Xia XB, Dong SL, Fu JG, Liang W, Zhang Z, Wu JY, Dong L and Huang Y. 2017. First discovery and implications of Cuonadong superlarge Be-W-Sn polymetallic deposit in Himalayan metallogenic belt, southern Tibet. *Mineral Deposits*, 36(4): 1003–1008 (in Chinese with English abstract)
- Li JK, Zou TR, Wang DH and Ding X. 2017. A review of beryllium metallogenic regularity in China. *Mineral Deposits*, 36(4): 951–978 (in Chinese with English abstract)
- Li XF, Wang G, Mao W, Wang C, Xiao R and Wang M. 2015. Fluid inclusions, muscovite Ar-Ar age, and fluorite trace elements at the Baiyanghe volcanic Be-U-Mo deposit, Xinjiang, Northwest China: Implication for its genesis. *Ore Geology Reviews*, 64: 387–399
- Li ZL, Yang XQ, Li YQ, Santosh M, Chen HL and Xiao WJ. 2014. Late Paleozoic tectono-metamorphic evolution of the Altai segment of the Central Asian Orogenic Belt: Constraints from metamorphic *P-T* pseudosection and zircon U-Pb dating of ultra-high-temperature granulite. *Lithos*, 204: 83–96
- Liu WZ. 2014. The geochemical evolution of the Asikaerte granite-pegmatite system and its implication for the metallogenesis of Be and Mo, Xinjiang, China. Master Degree Thesis. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 1–71 (in Chinese with English abstract)
- Liu YL, Zhang H, Tang Y, Zhang X, Lü ZH and Zhao JY. 2018. Petrogenesis and tectonic setting of the Middle Permian A-type granites in Altai, northwestern China: Evidences from geochronological, geochemical, and Hf isotopic studies. *Geological Journal*, 53(2): 527–546
- 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. 2014. A petrologic assessment of internal zonation in granitic pegmatites. *Lithos*, 184–187: 74–104
- London D. 2015. Reading pegmatites: Part 1-What beryl says. *Rocks and Minerals*, 90(2): 138–153
- London D. 2018. Ore-forming processes within granitic pegmatites. *Ore Geology Reviews*, 101: 349–383
- Ludwig KR. 2003. *User's Manual for Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel*. Berkeley: Berkeley Geochronology Center, Special Publication, 4: 1–70
- Luo YQ, Shen P, Cao C, Feng HX, Li CH, Bai YX and Suo QY. 2023. From granite to highly evolved pegmatite: A case study of the Shangkelan rare-metal granite-pegmatite system (Altai, NW China). *Ore Geology Reviews*, 159: 105532
- Lü ZH, Zhang H, Tang Y and Guan SJ. 2012. Petrogenesis and magmatic-hydrothermal evolution time limitation of Kelumute No. 112 pegmatite in Altai, Northwestern China: Evidence from zircon U-Pb and Hf isotopes. *Lithos*, 154: 374–391
- Lü ZH, Zhang H and Tang Y. 2015. The study of genetic relationship between Biyesamasi No. 11 pegmatite Li-Nb-Ta ore deposit and wall rock granite, Xinjiang. *Acta Mineralogica Sinica*, 35 (Suppl. 1): 323 (in Chinese)
- Lü ZH, Zhang H, Tang Y, Liu YL and Zhang X. 2018. Petrogenesis of syn-orogenic rare metal pegmatites in the Chinese Altai: Evidences from geology, mineralogy, zircon U-Pb age and Hf isotope. *Ore Geology Reviews*, 95: 161–181
- Lü ZH, Zhang H and Tang Y. 2021. Anatexis origin of rare metal/earth pegmatites: Evidences from the Permian pegmatites in the Chinese Altai. *Lithos*, 380–381: 105865
- Ma ZL, Zhang H, Tang Y, Lü ZH, Zhang X and Zhao JY. 2015. Zircon U-Pb geochronology and Hf isotopes of pegmatites from the Kaluan mining area in the Altai, Xinjiang and their genetic relationship with the Halong granite. *Geochimica*, 44(1): 9–26 (in Chinese with English abstract)
- Maneta V, Baker DR and Minarik W. 2015. Evidence for lithium-aluminosilicate supersaturation of pegmatite-forming melts. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 170(1): 4
- Qin JH, Geng XX, Wen CQ, Guo JX and Ren YC. 2016. Zircon LA-ICP-MS U-Pb age of intrusion from Xiaotuergen copper deposit in Altai, Xinjiang, and its geological significance. *Mineral Deposits*, 35(1): 18–32 (in Chinese with English abstract)
- Qin KZ, Shen MD, Tang DM, Guo ZL, Zhou QF, Wang CL, Guo XJ, Tian Y and Ding JG. 2013. Types, intrusive and mineralization ages of pegmatite rare-element deposits in Chinese Altai. *Xinjiang Geology*, 31(Suppl. 1): 1–7 (in Chinese with English abstract)
- Rao C, Wang RC, Hatert F, Gu XP, Ottolini L, Hu H, Dong CW, Dal Bo F and Baijot M. 2014. Strontiohurlbutite, $\text{SrBe}_2(\text{PO}_4)_2$, a new mineral from Nanping No.31 pegmatite, Fujian Province, Southeastern China. *American Mineralogist*, 99(2–3): 494–499
- Rao C, Hatert F, Wang RC, Gu XP, Dal Bo F and Dong CW. 2015. Minjiangite, $\text{BaBe}_2(\text{PO}_4)_2$, a new mineral from Nanping No. 31 pegmatite, Fujian Province, southeastern China. *Mineralogical Magazine*, 79(5): 1195–1202
- Rao C, Hatert F, Dal Bo F, Wang RC, Gu XP and Baijot M. 2017. Mengxianminite ($\text{Ca}_2\text{Sn}_2\text{Mg}_3\text{Al}_8[(\text{BO}_3)(\text{BeO}_4)_6\text{O}_6]_2$) a new borate mineral from Xianghualing skarn, Hunan Province, China, with a highly unusual chemical combination (B + Be + Sn). *American Mineralogist*, 102(10): 2136–2141
- Rao C, Wang RC, Che XD, Li XF, Wang Q and Wu RQ. 2022. Metallogenic mechanism and prospect of key metal beryllium. *Acta Petrologica Sinica*, 38(7): 1848–1860 (in Chinese with English abstract)
- Ren BQ, Zhang H, Tang Y and Lü ZH. 2011. LA-ICPMS U-Pb zircon geochronology of the Altai pegmatites and its geological significance. *Acta Mineralogica Sinica*, 31(3): 587–596 (in Chinese with English abstract)
- Sun M, Yuan C, Xiao WJ, Long XP, Xia XP, Zhao GC, Lin SF, Wu FY and Kroner A. 2008. Zircon U-Pb and Hf isotopic study of gneissic rocks from the Chinese Altai: progressive accretionary history in the early to middle Palaeozoic. *Chemical Geology*, 247: 352–383
- Tang H and Zhang H. 2018. Characteristics of trace elements in quartz from No.3 pegmatite, Kaktokay area, Xinjiang, China and implication for magmatic-hydrothermal evolution. *Acta Mineralogica Sinica*, 38(1): 15–24 (in Chinese with English abstract)
- Tang Y, Zhang H and Lü ZH. 2021. The genesis of the Askartor Be-Mo deposit in the North Xinjiang, Northwest China: Evidence from geology, geochemistry, U-Pb, and Re-Os geochronology. *Frontiers in Earth Science*, 9: 646772
- Taylor TP, Ding M, Ehler DS, Foreman TM, Kaszuba JP and Sauer NN. 2003. Beryllium in the environment: A review. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 38(2): 439–469
- Thomas R and Davidson P. 2016. Revisiting complete miscibility between silicate melts and hydrous fluids, and the extreme enrichment of some elements in the supercritical state: Consequences for the formation of pegmatites and ore deposits. *Ore Geology Reviews*, 72: 1088–1101

- Tomascak PB, Krogstad EJ and Walker RJ. 1996. U-Pb monazite geochronology of granitic rocks from Maine: Implications for Late Paleozoic tectonics in the northern Appalachians. *The Journal of Geology*, 104(2): 185–195
- Tong Y, Hong DW, Wang T, Wang SG and Han BF. 2006. TIMS U-Pb zircon ages of Fuyun post-orogenic linear granite plutons on the southern margin of Altay orogenic belt and their implications. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 25(2): 85–89 (in Chinese with English abstract)
- Tong Y, Wang T, Jahn BM, Sun M, Hong DW and Gao JF. 2014. Post-accretionary Permian granitoids in the Chinese Altai orogen: Geochronology, petrogenesis and tectonic implications. *American Journal of Science*, 314(1): 80–109
- Trueman D and Černý P. 1982. Exploration for rare-element granitic pegmatites. In: Černý P (ed.). *Granitic Pegmatites in Science and Industry. Short-Course Handbook*, 8: 463–494
- U. S. Geological Survey (USGS). 2022. *Mineral Commodity Summaries 2022*. U. S. Geological Survey, 1–202
- Wan B, Xiao WJ, Windley BF and Yuan C. 2013. Permian hornblende gabbros in the Chinese Altai from a subduction-related hydrous parent magma, not from the Tarim mantle plume. *Lithosphere*, 5(3): 290–299
- Wang R, Xu CC, Wen DZ, Ai LZ and Hui CZ. 2009a. Geochemical evolution and late re-equilibration of NaCs-rich beryl from the Koktokay #3 pegmatite (Altai, NW China). *European Journal of Mineralogy*, 21(4): 795–809
- Wang T, Hong DW, Jahn BM, Tong Y, Wang YB, Han BF and Wang XX. 2006. Timing, petrogenesis, and setting of Paleozoic Synorogenic intrusions from the Altai Mountains, Northwest China: Implications for the tectonic evolution of an accretionary orogen. *The Journal of Geology*, 114(6): 735–751
- Wang T, Tong Y, Jahn BM, Zou TR, Wang YB, Hong DW and Han BF. 2007. SHRIMP U-Pb Zircon geochronology of the Altai No.3 Pegmatite, NW China, and its implications for the origin and tectonic setting of the pegmatite. *Ore Geology Reviews*, 32(1–2): 325–336
- Wang T, Jahn BM, Kovach VP, Tong Y, Hong DW and Han BF. 2009b. Nd-Sr isotopic mapping of the Chinese Altai and implications for continental growth in the Central Asian Orogenic Belt. *Lithos*, 110(1–4): 359–372
- Wang T, Tong Y, Li S, Zhang JJ, Shi XJ, Li JY, Han BF and Hong DW. 2010. Spatial and temporal variations of granitoids in the Altay orogen and their implications for tectonic setting and crustal growth: Perspectives from Chinese Altay. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(6): 595–618 (in Chinese with English abstract)
- Wang T, Jahn BM, Kovach VP, Tong Y, Wilde SA, Hong DW, Li S and Salmikova EB. 2014. Mesozoic intraplate granitic magmatism in the Altai accretionary orogen, NW China: Implications for the orogenic architecture and crustal growth. *American Journal of Science*, 314(1): 1–42
- Webster JD, Thomas R, Rhede D, Förster HJ and Seltmann R. 1997. Melt inclusions in quartz from an evolved peraluminous pegmatite: Geochemical evidence for strong tin enrichment in fluorine-rich and phosphorus-rich residual liquids. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(13): 2589–2604
- Windley BF, Kröner A, Guo JH, Qu GS, Li YY and Zhang C. 2002. Neoproterozoic to Paleozoic geology of the Altai Orogen, NW China: New zircon age data and tectonic evolution. *The Journal of Geology*, 110(6): 719–737
- Yuan C, Sun M, Xiao WJ, Li XH, Chen HL, Lin SF, Xia XP and Long XP. 2007. Accretionary orogenesis of the Chinese Altai: Insights from Paleozoic granitoids. *Chemical Geology*, 242(1–2): 22–39
- Yuan F, Zhou TF and Yue SC. 2001. The ages and the genetic types of the granites in the Nurt area, Altay. *Xinjiang Geology*, 19(4): 292–296 (in Chinese with English abstract)
- Zhai MG, Wu FY, Hu RZ, Jiang SY, Li WC, Wang RC, Wang DH, Qi T, Qin KZ and Wen HJ. 2019. Critical metal mineral resources: Current research status and scientific issues. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 33(2): 106–111 (in Chinese with English abstract)
- Zhang C, Liu LF, Santosh M, Luo Q and Zhang X. 2017. Sediment recycling and crustal growth in the Central Asian Orogenic Belt: Evidence from Sr-Nd-Hf isotopes and trace elements in granitoids of the Chinese Altay. *Gondwana Research*, 47: 142–160
- Zhang CL, Li ZX, Li XH, Xu YG, Zhou G and Ye HM. 2010. A Permian large igneous province in Tarim and Central Asian orogenic belt, NW China: Results of a ca. 275Ma mantle plume? *Geological Society of America Bulletin*, 122: 2020–2040
- Zhang CL, Zou HB, Yao CY and Dong YG. 2014. Origin of Permian gabbroic intrusions in the southern margin of the Altai Orogenic Belt: A possible link to the Permian Tarim mantle plume? *Lithos*, 204: 112–124
- Zhang H. 2001. The geochemical behaviors and mechanisms of incompatible trace elements in the magmatic-hydrothermal transition system: A case study of Altay No.3 pegmatite, Xinjiang. Ph. D. Dissertation. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 1–178 (in Chinese with English abstract)
- Zhang H, Lü ZH and Tang Y. 2019. Metallogeny and prospecting model as well as prospecting direction of pegmatite-type rare metal ore deposits in Altay orogenic belt, Xinjiang. *Mineral Deposits*, 38(4): 792–814 (in Chinese with English abstract)
- Zhang X, Zhang H, Ma ZL, Tang Y, Lv ZH, Zhao JY and Liu YL. 2016. A new model for the granite-pegmatite genetic relationships in the Kaluan-Azubai-Qiongkuer pegmatite-related ore fields, the Chinese Altay. *Journal of Asian Earth Sciences*, 124: 139–155
- Zhao YM, Peng G, Zhao DL and You YC. 2016. LA-ICP-MS zircon U-Pb age and geochemistry of the Kezile granitic pluton in Altay of China and their geological implications. *Geology and Exploration*, 52(2): 271–282 (in Chinese with English abstract)
- Zhou G, Wu GG, Dong LH, Zhang ZC, Dong YG, Tong Y, He LX and Ying LJ. 2009. Formation time and geochemical feature of Wutubulak pluton in the northeastern margin of Junggar in Xinjiang and its geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 25(6): 1390–1402 (in Chinese with English abstract)
- Zhou QF. 2013. The geochronology, mineralogy, melt-fluid evolution and metallogenesis of the Koktokay No.3 pegmatite rare-element deposit, Altai, China. Ph. D. Dissertation. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 1–222 (in Chinese with English abstract)
- Zhou QF, Qin KZ, Tang DM, Wang CL and Sakyi PA. 2018. LA-ICP-MS U-Pb zircon, columbite-tantalite and ⁴⁰Ar-³⁹Ar muscovite age constraints for the rare-element pegmatite dykes in the Altai orogenic belt, NW China. *Geological Magazine*, 155(3): 707–728
- Zhou TY. 2015. Study of the genesis of the Azubai pegmatitic aquamarines, Xinjiang, China. Ph. D. Dissertation. Beijing: Peking University, 1–222 (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 with English abstract)

附中文参考文献

- 陈剑锋, 张辉. 2011. 石英晶格中微量元素组成对成岩成矿作用的示踪意义. *高校地质学报*, 17(1): 125–135
- 陈有炳, 高峰, 裴先治, 田红彪, 李佐臣, 李瑞保, 王盟, 何峻岭. 2017. 新疆阿尔泰地区辉腾花岗岩体年代学、地球化学特征及构造意义. *岩石学报*, 33(10): 3076–3090
- 李光明, 张林奎, 焦彦杰, 夏祥标, 董陆亮, 付建刚, 梁维, 张志, 吴建阳, 董磊, 黄勇. 2017. 西藏喜马拉雅成矿带错那洞超大型铍锡钨多金属矿床的发现及意义. *矿床地质*, 36(4): 1003–1008
- 李建康, 邹天人, 王登红, 丁欣. 2017. 中国铍矿成矿规律. *矿床地*

- 质, 36(4): 951-978
- 刘文政. 2014. 新疆阿斯喀尔特花岗岩-伟晶岩地球化学演化及其Be-Mo成矿作用. 硕士学位论文. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 1-71
- 吕正航, 张辉, 唐勇. 2015. 新疆别也萨麻斯L1号伟晶岩脉Li-Nb-Ta矿床与围岩花岗岩成因关系研究. 矿物学报, 35(增1): 323
- 马占龙, 张辉, 唐勇, 吕正航, 张鑫, 赵景宇. 2015. 新疆卡鲁安矿区伟晶岩锆石U-Pb定年、铪同位素组成及其与哈龙花岗岩成因关系研究. 地球化学, 44(1): 9-26
- 秦纪华, 耿新霞, 温超权, 郭建新, 任宇晨. 2016. 阿尔泰小土尔根铜矿区岩体LA-ICP-MS锆石U-Pb定年及地质意义. 矿床地质, 35(1): 18-32
- 秦克章, 申茂德, 唐冬梅, 郭正林, 周起凤, 王春龙, 郭旭吉, 田野, 丁建刚. 2013. 阿尔泰造山带伟晶岩型稀有金属矿化类型与成岩成矿时代. 新疆地质, 31(增1): 1-7
- 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
- 任宝琴, 张辉, 唐勇, 吕正航. 2011. 阿尔泰造山带伟晶岩年代学及其地质意义. 矿物学报, 31(3): 587-596
- 唐宏, 张辉. 2018. 可可托海3号伟晶岩脉石英中微量元素组成特征与岩浆-热液演化. 矿物学报, 38(1): 15-24
- 童英, 洪大卫, 王涛, 王式泮, 韩宝福. 2006. 阿尔泰造山带南缘富蕴后造山线形花岗岩体锆石U-Pb年龄及其地质意义. 岩石矿物学杂志, 25(2): 85-89
- 王涛, 童英, 李舫, 张建军, 史兴俊, 李锦轶, 韩宝福, 洪大卫. 2010. 阿尔泰造山带花岗岩时空演变、构造环境及地壳生长意义——以中国阿尔泰为例. 岩石矿物学杂志, 29(6): 595-618
- 新疆维吾尔自治区地质矿产局. 1993. 新疆维吾尔自治区区域地质志. 北京: 地质出版社, 6-206
- 袁峰, 周涛发, 岳书仓. 2001. 阿尔泰诺尔特地区花岗岩形成时代及成因类型. 新疆地质, 19(4): 292-296
- 翟明国, 吴福元, 胡瑞忠, 蒋少涌, 李文昌, 王汝成, 王登红, 齐涛, 秦克章, 温汉捷. 2019. 战略性关键金属矿产资源: 现状与问题. 中国科学基金, 33(2): 106-111
- 张辉. 2001. 岩浆-热液过渡阶段体系中不相容元素地球化学行为及其机制——以新疆阿尔泰3号伟晶岩脉研究为例. 博士学位论文. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 1-178
- 张辉, 吕正航, 唐勇. 2019. 新疆阿尔泰造山带中伟晶岩型稀有金属矿床成矿规律、找矿模型及其找矿方向. 矿床地质, 38(4): 792-814
- 赵玉梅, 彭戈, 赵得龙, 尤悦程. 2016. 中国阿尔泰克孜勒花岗岩体LA-ICP-MS锆石U-Pb定年、岩石地球化学特征及其地质意义. 地质与勘探, 52(2): 271-282
- 周刚, 吴淦国, 董连慧, 张招崇, 董永观, 童英, 何立新, 应立娟. 2009. 新疆准噶尔北东缘乌图布拉克岩体形成时代、地球化学特征及地质意义. 岩石学报, 25(6): 1390-1402
- 周起凤. 2013. 阿尔泰可可托海3号脉伟晶岩型稀有金属矿床年代学、矿物学、熔-流体演化与成矿作用. 博士学位论文. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 1-222
- 周天怡. 2015. 中国新疆阿祖拜伟晶岩型海蓝宝石成因研究. 博士学位论文. 北京: 北京大学, 1-124
- 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