

新疆西昆仑木吉地区锂铍稀有金属伟晶岩锆石及铌钽铁矿 U-Pb 年代学、Hf 同位素组成及其地质意义*

王核^{1,2} 高昊^{1,2} 王赛蒙³ 闫庆贺^{1,2} 王振宏^{1,2} 黄亮^{1,2} 秦艳¹

WANG He^{1,2}, GAO Hao^{1,2}, WANG SaiMeng³, YAN QingHe^{1,2}, WANG ZhenHong^{1,2}, HUANG Liang^{1,2} and QIN Yan¹

1. 中国科学院广州地球化学研究所矿物学与成矿学重点实验室, 广州 510640

2. 中国科学院大学, 北京 100049

3. 广东省有色地质勘查院, 广州 510089

1. CAS Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. Guangdong Nonferrous Metals Geological Exploration Institution, Guangzhou 510089, China

2022-03-01 收稿, 2022-06-13 改回.

Wang H, Gao H, Wang SM, Yan QH, Wang ZH, Huang L and Qin Y. 2022. Zircon and columbite-tantalite U-Pb geochronology of Li-Be rare metal pegmatite and its geological significance in Muji area, West Kunlun, China. *Acta Petrologica Sinica*, 38(7):1937–1951, doi:10.18654/1000-0569/2022.07.08

Abstract Muji is the most typical area where rare metal pegmatite veins containing lithium and beryllium are developed in the western section of the West Kunlun orogenic belt, Northwest China. In this paper, the emplacement age of rare metal pegmatite and nearby granites is limited by LA-ICP-MS zircon and coltan U-Pb method. Zircon U-Pb age of Kalawala two-mica granite was 207.5 ± 1.1 Ma. Zircon and coltan yield $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages of 204.8 ± 0.7 Ma and 204.7 ± 1.8 Ma, respectively, representing the emplacement ages of the Xiaerbulong pegmatites. The $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ value of rare metal pegmatite zircon ranges from -5.3 to -4.1 , and the $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ value of zircon from Kalawala granite ranges from -6.9 to -5.8 . The rare metal pegmatite veins are closely related in time-space to the Kalawala granite and the consistent Hf isotope ratio, indicating that the two-mica granite is the ore-forming parent rock. From a regional perspective, the Muji pegmatite is located in the west of the West Kunlun orogenic belt, with a similar emplacement time ($207 \sim 212$ Ma) to the Dahongliutan and Bailongshan lithium deposits in the east, and is the important part of the West Kunlun rare metal metallogenic belt.

Key words Muji; Xiaerbulong lithium-beryllium deposit; Two-mica granite; Zircon and coltan U-Pb ages; West Kunlun

摘要 木吉是西昆仑造山带西段最为典型的含锂铍稀有金属伟晶岩脉发育的地区。本文通过 LA-ICP-MS 锆石、铌钽铁矿 U-Pb 方法限定了含锂铍稀有金属伟晶岩脉及二云母花岗岩的就位年龄。卡拉瓦拉二云母花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 207.5 ± 1.1 Ma, 肖尔布龙含锂铍伟晶岩锆石、铌钽铁矿 U-Pb 年龄分别为 204.8 ± 0.7 Ma、 204.7 ± 1.8 Ma。伟晶岩锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 $-5.3 \sim -4.1$, 卡拉瓦拉二云母花岗岩锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 $-6.9 \sim -5.8$ 。含锂铍伟晶岩脉与卡拉瓦拉二云母花岗岩密切的时空联系以及一致的 Hf 同位素比值, 表明二云母花岗岩为成矿母岩体。从区域上看, 木吉地区伟晶岩位于西昆仑造山带西部, 与东部的大红柳滩、白龙山锂矿就位时间相似 ($207 \sim 212$ Ma), 为西昆仑稀有金属成矿带的重要组成部分。

关键词 木吉; 肖尔布龙锂铍矿床; 二云母花岗岩; 锆石及铌钽铁矿 U-Pb 年龄; 西昆仑

中图分类号 P588.121; P597.3; P618.6

* 本文受第二次青藏高原综合科学考察(2019QZKK0802)、国家自然科学基金项目(91962215、41972088)、新疆维吾尔自治区科技重大专项、重点研发专项(2019B00011、2020A03005)和国家重点研发项目(2019YFC0605201)联合资助。

第一作者简介: 王核, 男, 1966年生, 研究员, 博士生导师, 矿床学专业, E-mail: wanghe@gig.ac.cn

在日益严峻的环境保护形势下,碳减排成为了全球重要国家形成的共识。2020年9月,随着我国“双碳”(碳达峰、碳中和)目标的提出,清洁能源的发展成为重中之重。锂(Lithium)是自然界中最轻的金属元素,于1817年被瑞典化学家 Johan August Arfwedson 在一种稀有岩石中发现。锂作为地球实现低碳化的关键元素,被称为“推动世界进步的重要能源元素”,其合金及化合物在储能材料、绝热材料、润滑剂、轻质合金、航空航天等领域具有重要的用途(陈婷等, 2007; Sovacool *et al.*, 2020)。中生代以来,受古特提斯洋闭合的影响,西昆仑地区岩浆活动极为活跃,大量的岩浆带来了丰富的稀有金属元素,形成了如大红柳滩锂矿(Yan *et al.*, 2018)、白龙山锂矿(王核等, 2017; Wang *et al.*, 2020)、雪风岭锂矿(王核等, 2020)等众多的伟晶岩型 Li、Be、Rb 稀有金属矿床,这些锂矿主要赋存于前寒武布伦阔勒群和三叠系巴颜喀拉山群中(王核等, 2021)。

肖尔布龙稀有金属伟晶岩矿点位于西昆仑造山带西段的新疆阿克陶县木吉乡东南方向约25km处,部分已民采。1958年,新疆地质矿产局在该区域发现多条成矿伟晶岩脉,并进行了地质填图工作,但至今并未进行进一步的科研工作。该地区伟晶岩脉具有与造山带东段大红柳滩锂矿、白龙山锂矿相似的成矿特征。因此,对木吉地区含矿伟晶岩地质特征和年代学进行研究,对建立区域伟晶岩矿床年代格架、总结成矿规律有重要意义。

1 区域地质背景

西昆仑地区广泛分布前寒武纪地层,主要由西段的布伦阔勒群和东段的甜水海群、赛图拉群组成,上覆盖层包括寒武纪、奥陶纪和志留纪及晚古生代沉积。布伦阔勒群为一套中-深变质程度的变质岩,变质程度可达角闪岩相-麻粒岩相,具有孔兹岩岩石组合特征,以火山岩、碎屑岩和沉积岩为特征,其中火山岩和火山碎屑岩仅占其总厚度的30%左右,沉积地层约占70%(王爱国等, 2004; 计文化等, 2011; 刘文平等, 2013; Hu *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2018; 曲军峰等, 2021)。岩石组合为浅灰色黑云石英片岩、斜长黑云石英片岩夹大理岩、十字石榴白云石英片岩、夕线石榴黑云斜长片麻岩、黑云斜长变粒岩、含榴黑云石英片岩及角闪斜长变粒岩等(王核等, 2020)。1967年新疆区调队将在木吉-布伦口以及塔什库尔干地区广泛分布的变质岩命名为布伦阔勒岩群(新疆地质矿产局, 1993)。汪玉珍(1985^①)在经过大量工作后,将该套变质岩层称为布伦阔勒群。尽管已经对西昆仑造山带的早期古生代构造演化进行了大量的年代学和岩石地球化学研究(潘裕生, 1994; Matte *et al.*, 1996; Jiang *et al.*, 2002, 2008),但关于布伦阔勒群的具体形成年代和地球动力学背景仍有争议(计文化等, 2004, 2011; 张传林等, 2005 2019; 燕长海等, 2012; Zhang *et al.*, 2018a)。大多数学者认为布伦阔勒群形成于古元古

代,如在西帕米尔地区的变质岩中通过锆石 U-Pb 和全岩 Rb-Sr 等时线方法获得的年龄为 2130 ~ 2700Ma(潘裕生等, 2000; 王建平, 2008);孙海田等(2003)对布伦口湖岸边的黑云斜长片麻岩进行锆石 U-Pb 定年,获得 $2772 \pm 177\text{Ma}$ 的同位素年龄;韩芳林(2006)获得布伦口西卡拉玛混合岩化黑云斜长片麻岩继承锆石年龄 2500 ~ 650Ma。

西昆仑造山带广泛发育三叠纪岩浆岩,晚古生代和三叠-侏罗纪岩浆岩主要产于南昆仑地体和甜水海地体(图1),这可能与古特提斯大洋的演化有关(Pan, 1996)。甜水海地体东段(奇台达板、三十里和三十里西岩体)、中段(阿卡孜岩体)、西段(恰特东、克孜勒介克、布伦口、玉其卡帕岩体)广泛发育早中生代 I 型花岗岩(Jiang *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2016; 魏小鹏, 2018; Chen *et al.*, 2021),并分布少量同时期 S 型花岗岩和高镁闪长岩(魏小鹏等, 2017, 2018; Chen *et al.*, 2021)。Jiang *et al.* (2013)对西段的玉其卡帕等岩体进行锆石 U-Pb 定年,认为这些花岗岩形成于中三叠世(243 ~ 227Ma),研究还表明,形成包体的岩浆与其寄主花岗岩浆为同一时代(233 ~ 226Ma),魏小鹏(2018)玉其卡帕岩体东、西部花岗岩锆石 U-Pb 定年也获得了相似的年龄。Jiang *et al.* (2013)认为甜水海地体与南昆仑地体在中三叠世(~243Ma)发生碰撞,并导致古特提斯洋的闭合和麻扎-康西瓦缝合带的形成。张传林等(2005)综合分析西昆仑 230 ~ 240Ma 的区域变质事件及同时期花岗岩构造特征,认为南昆仑地体与甜水海地体之间的古特提斯洋在 240Ma 时发生向北消减并闭合,同时发生强烈的挤压造山运动。

2 矿区地质特征

肖尔布龙稀有金属伟晶岩矿区(图2)位于新疆阿克陶县木吉乡东南方25km,处于西昆仑-喀喇昆仑造山带的甜水海地块西段的塔什库尔干复背斜的轴心部分——前寒武纪隆起上,次一级构造属于皮拉尔-卡拉瓦拉的倒转背斜的 NE 翼部分。甜水海地体北边以麻扎-康西瓦缝合带为界,南边以红山湖-乔尔天山缝合带为界,走向 NW-SE,与西昆仑造山带整体构造格局一致。二十世纪五、六十年代新疆地质局对该地区进行了 1:10000 地形地质简测及 1:25000 地质普查工作,圈定出多个成矿伟晶岩脉群。

肖尔布龙矿区西部出露二云母花岗岩(图3a, b),岩体长约 6 ~ 10km,宽约 1km,由斜长石、钾长石、石英、黑云母和白云母组成(图3c),副矿物为石榴石(图3d)、磷灰石、锆石等。斜长石呈半自形-自形,约占 30% ~ 35%,发育聚片双晶;钾长石呈他形-半自形,约占 25% ~ 30%,发育格子双晶;石英呈他形,约占 20% ~ 25%;黑云母呈他形-半自形片状,粒径 1 ~ 2mm,约占 8% ~ 15%;白云母呈他形-半自形片状,约占 2% ~ 5%。在岩体的边缘或内部节理中可见后期的伟

① 汪玉珍. 1985. 新疆南疆西部 1:50 万地质图及说明书

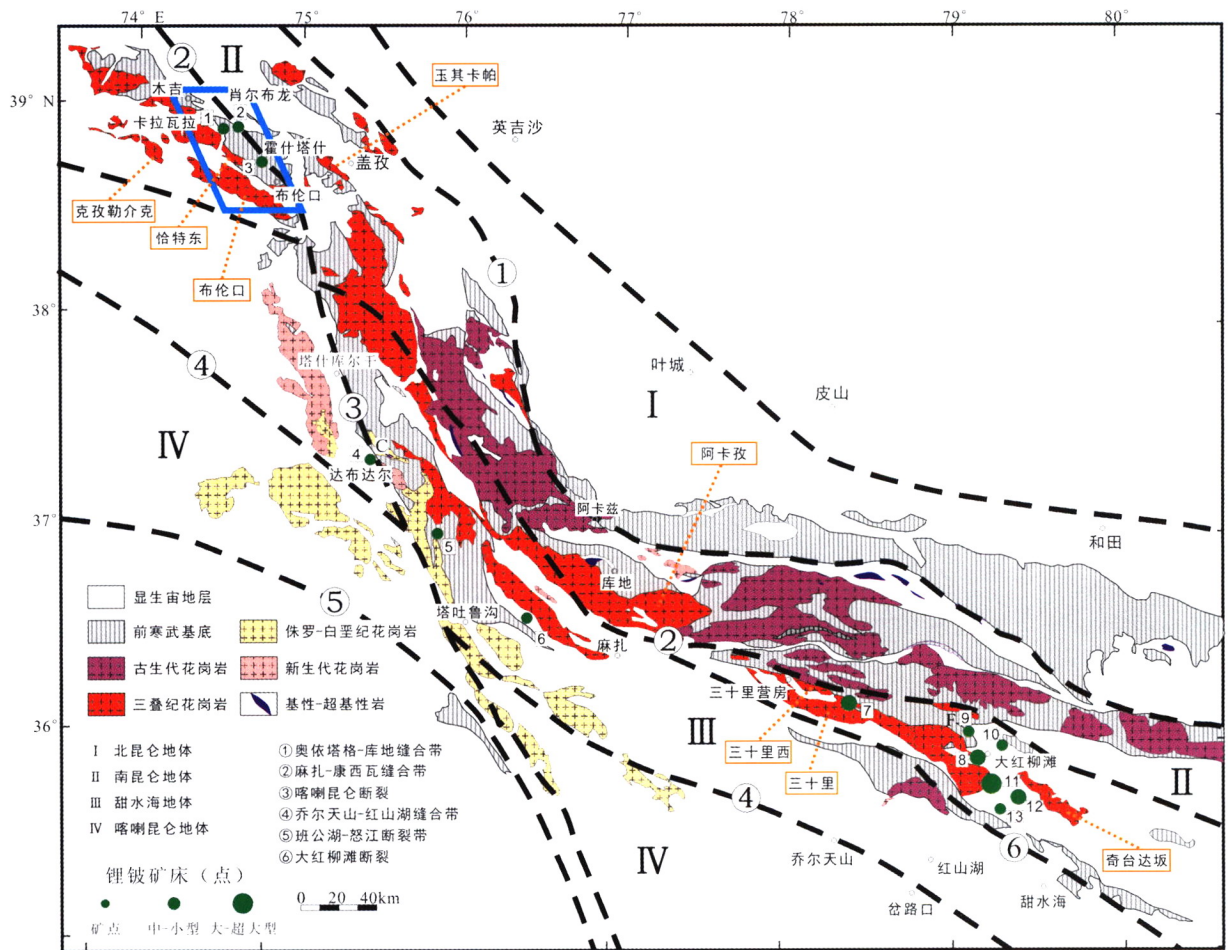


图1 西昆仑造山带地质简图(据 Wang *et al.* , 2020; 王核等, 2021 修改)

1-卡拉瓦拉;2-肖尔布龙;3-霍什塔什;4-达布达尔;5-三素;6-塔吐鲁沟;7-康西瓦;8-大红柳滩;9-阿克苏依;10-496 锂矿;11-白龙山;12-雪凤岭;13-冰舟

Fig. 1 Simplified geological map of the West Kunlun orogenic belt (modified after Wang *et al.* , 2020, 2021)

1-Kalawala; 2-Xiaerbulong; 3-Huoshitashi; 4-Dabudar; 5-Sansu; 6-Tatulugou; 7-Kangxiwa; 8-Dahongliutan; 9-Aksay; 10-496 lithium-mine; 11-Bailongshan; 12-Xuefengling; 13-Bingzhou

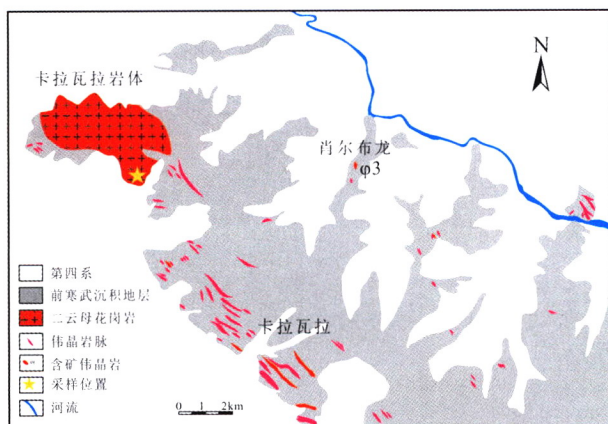


图2 肖尔布龙矿区地质图

Fig. 2 Simplified geological map of the Xiaerbulong deposit

晶岩脉产出,规模很小,矿化程度较低(图 3a)。

肖尔布龙矿区位于卡拉瓦拉岩体东部,地层为黑云母石英片岩,云母石英片岩夹少量黝帘石石英岩及黑云母斜长片岩中,呈灰色,风化面为深褐色-褐黑色,鳞片花岗变晶粒状结构,具有片理构造,岩层倾向 NE30°~60°,倾角较陡,50°~80°。黑云母石英片岩矿物成份以石英为主(~57%),次为黑云母(15%~25%),斜长石(10%~15%);黑云母斜长片岩中斜长石达40%~50%和极少白云母片,副矿物有褐铁矿、赤铁矿、磷灰石、电气石、锆石、绢云母等。黝帘石石英岩或石英黝帘石片岩中石英(10%~68%)、黝帘石(25%~77%),另有少量透辉石。

肖尔布龙矿区3号脉(图4)曾被小规模民采,含矿伟晶岩脉为透镜状(图5a),产状大致为65°∠65°~75°,中部膨胀变大(最厚),脉长42.5m,宽2.5~8.0m,平均5.9m,具有典型的伟晶岩内部分带的特征,从外向内可分为四个结构带:黑色电气石细晶岩带、中-粗粒伟晶岩带(图5b)、叶钠长

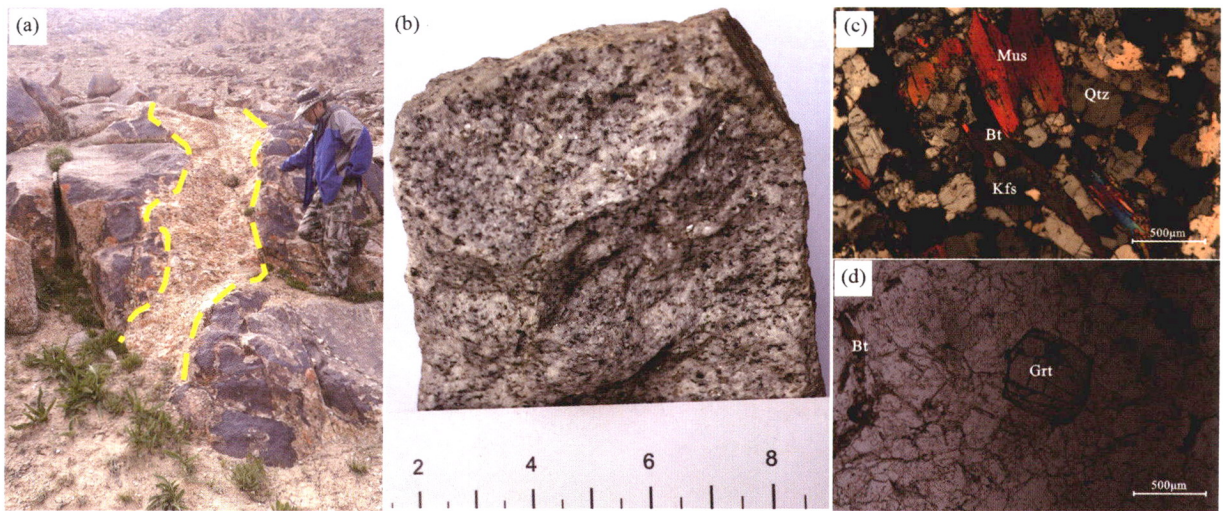


图3 卡拉瓦拉二云母花岗岩野外及镜下照片

(a)伟晶岩穿插卡拉瓦拉二云母花岗岩;(b)卡拉瓦拉二云母花岗岩手标本照片;(c、d)卡拉瓦拉二云母花岗岩镜下照片。Bt-黑云母;Grt-石榴子石;Kfs-钾长石;Mus-白云母;Qtz-石英

Fig. 3 Field and microscopic photos of Kalavala mica granite

(a) pegmatite vein crosscutting two-mica granite; (b) hand specimens of Kalawala two-mica granite; (c) microscopic photographs of Kalawala two-mica granite; (d) garnet in Kalawala two-mica granite. B-biotite; Grt-garnet; Kfs-K-feldspar; Mus-muscovite; Qtz-quartz

石-白云母-石英带、叶钠长石-石英-锂辉石带(图4), 锂铍矿化体位于中部的叶钠长石-石英-锂辉石带(图5c), 拣块样分析, Li_2O 品位 1.58% ~ 2.96%。主要矿石矿物为绿柱石、锂辉石, 少量铌钽铁矿、锡石。其中绿柱石呈浅黄色白色(图5d), 一般直径约 5 ~ 8cm, 长轴约 8 ~ 20cm。

3 样品及分析方法

3.1 样品描述

采集卡拉瓦拉二云母花岗岩岩体东南部相对新鲜的花岗岩样品用于锆石 U-Pb 定年; 采自肖尔布龙矿区的 3 号伟晶岩脉样品用于锆石和铌钽铁矿 U-Pb 定年。将进行年代学分析的花岗岩与伟晶岩样品破碎至 40 ~ 60 目, 在双目显微镜下精心挑选出颗粒完整、无裂隙的锆石、铌钽铁矿。将挑选出的二种矿物黏在载玻片上并放上 PVC 环, 然后将环氧树脂和固化剂混合后注入 PVC 环中, 固化后打磨抛光至露出一个光洁平面然后进行阴极发光 (CL) 以及铌钽铁矿的背散射 (BSE) 照相, 结合这些图像选择适宜的测试点位及进行合理的数据解释。

3.2 LA-ICP-MS 锆石定年

锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年测试由中国科学院广州地球化学研究所矿物学和成矿学重点实验室完成。仪器采用美国 Resonetics 公司生产的 RESOLUTION M-50 激光剥蚀系统和 Agilent 7500a 型的 ICP-MS 联机。用 He 作为剥蚀物质的载气。采用国际标准锆石 91500 ($1062.4 \pm 0.8Ma$, Wiedenbeck

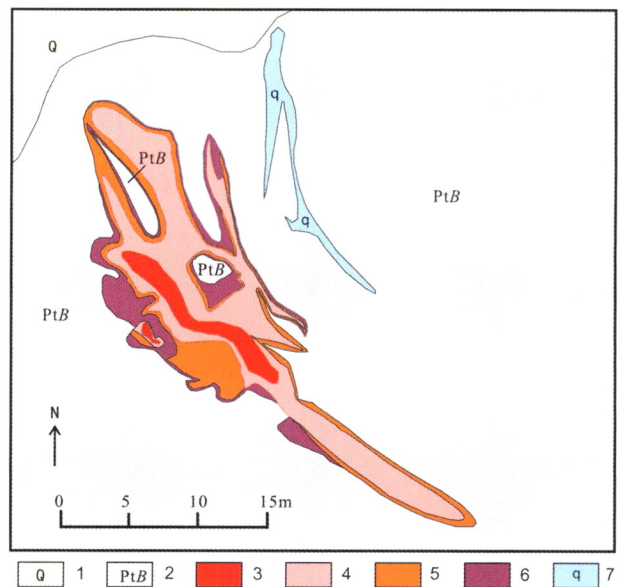


图4 肖尔布龙3号脉矿点地质简图

1-第四系;2-布伦阔乐群黑云母石英片岩;3-锂铍矿体(叶钠长石-石英-锂辉石带);4-叶钠长石-白云母-石英集合体带;5-中-粗粒伟晶岩带;6-黑色电气石细晶岩带;7-石英脉

Fig. 4 Geologic map of Xiaerbulong No. 3 vein deposit

1-Quaternary; 2-biotite quartz schist in Bulunkuole Group; 3-lithium beryllium ore body (cleavelandite-quartz-lithium zone); 4-cleavelandite-quartz-spodumene zone; 5-medium-coarse grain pegmatite; 6-black tourmaline aplite; 7-quartz vein

et al., 1995) 和 Plesovice ($337 \pm 0.37Ma$, Sláma et al., 2008) 作为外标进行同位素分馏校正, 每 5 个待测样品插入测试两次标样 91500, 所测元素激光斑束直径为 $29\mu m$, 频率为 8Hz。

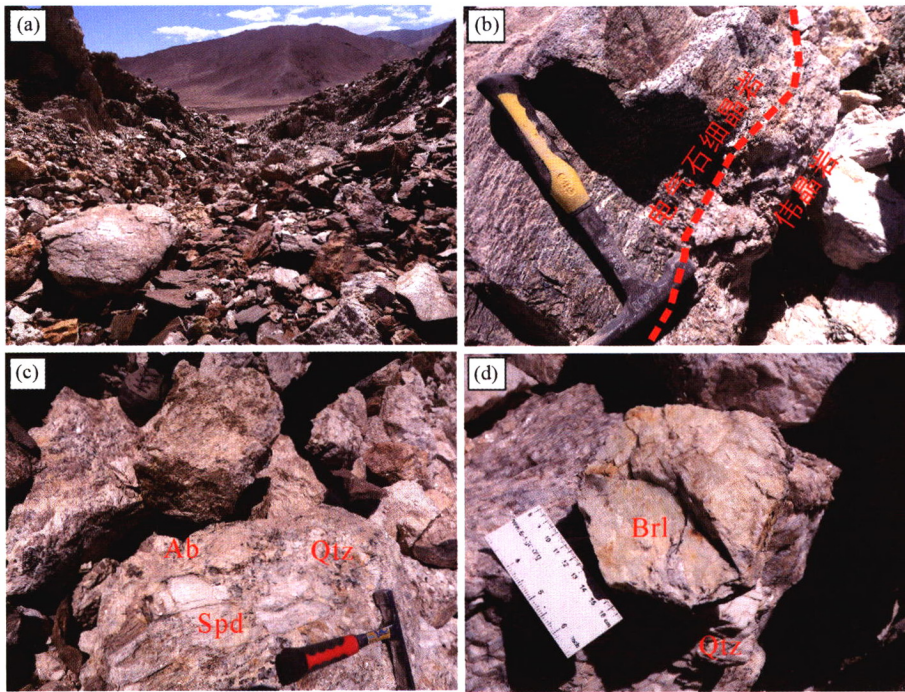


图5 肖尔布龙3号脉野外照片

(a) 3号伟晶岩脉采坑；(b)中-粗粒伟晶岩带与黑色电气石细晶岩带；(c)叶钠长石-石英-锂辉石带中的绿柱石；(d)锂辉石。Ab-钠长石；Brl-绿柱石；Spd-锂辉石

Fig. 5 Field photos of V-3 pegmatite vein in Xiaerbulong deposit

(a) outcrop of V-3 pegmatite vein; (b) medium-coarse grain pegmatite and Black tourmaline aplite; (c) beryl in cleavelandite-quartz-spodumene zone; (d) cleavelandite-quartz-spodumene zone. Ab-albite; Brl-beryl; Spd-spodumene

普通铅计算按 Andersen(2002)的3D坐标法进行校正,元素含量用美国国家标样技术研究院的人工合成硅酸盐标准参考物质 NIST SRM610 为外标 (Pearce *et al.*, 1997; Gao *et al.*, 2002), ^{29}Si 作为内标校正,每10个样品测试两次 NIST SRM610。数据处理使用软件 ICPMSDataCal 10.1 (Liu *et al.*, 2008, 2010), 锆石的谐和年龄图绘制和加权平均年龄计算采用软件 Isoplot 3.0 (Ludwig, 2003)。

3.3 LA-ICP-MS 铌钽铁矿定年

铌钽铁矿 LA-ICP-MS U-Pb 定年测试于南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室完成。通过联用 GeoLas PLUS 193nm 准分子 ArF 激光烧蚀系统与 Agilent 7500a 四极杆 ICP-MS 仪器进行测试,激光束斑直径为 $43\mu\text{m}$, 频率为 4Hz。采用 Coltan139 作为外标,其 U-Pb 年龄为 $505.4 \pm 1.0\text{Ma}$ (BGR, Hannover, Germany; ID-TIMS)、 $506.6 \pm 2.4\text{Ma}$ (ID-TIMS) 和 $506.2 \pm 5.0\text{Ma}$ (LA-ICP-MS; Goethe University Frankfurt, Germany) (Melcher *et al.*, 2015)。元素含量采用美国国家标样技术研究院的人工合成硅酸盐标准参考物质 NIST SRM610 为外标 (Pearce *et al.*, 1997; Gao *et al.*, 2002), ^{29}Si 作为内标校正。数据处理使用软件 ICPMSDataCal 10.1 (Liu *et al.*, 2008, 2010), 铌钽铁矿的谐和年龄图绘制和加权平均年龄计算使用软件 Isoplot 3.0

(Ludwig, 2003)。

3.4 锆石 Lu-Hf 同位素分析

锆石 Hf 同位素测试分析在同位素国家重点实验室完成。实验仪器为 Neptune Plus MS-ICP-MS 和 Research Resolution M50 激光烧蚀系统。

锆石 Hf 同位素测试时,向气流中引入少量水蒸气,可以提高 MC-ICP-MS 对 Hf 40% 的灵敏度 (Zhang *et al.*, 2021), 激光束斑直径为 $45\mu\text{m}$, 频率为 6Hz。每个分析由 300 个循环组成,每个循环的积分时间为 0.131s。前 20s 用于在激光束关闭的情况下检测气体空白,然后是 30s 的激光烧蚀用于在激光束打开的情况下收集样品信号。 ^{173}Yb 和 ^{175}Lu 用于校正 ^{176}Yb 和 ^{176}Lu 对 ^{176}Hf 的等压干扰。校正中使用的 $^{176}\text{Yb}/^{173}\text{Yb}$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{175}\text{Lu}$ 的自然比值分别为 0.79381 (Segal *et al.*, 2003) 和 0.02656 (Wu *et al.*, 2006)。Yb 的质量偏差是根据测得的 $^{173}\text{Yb}/^{171}\text{Yb}$ 和自然比 1.13268 计算得出的,假设 Lu 的质量偏差与 Yb 的质量偏差相同。 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 的质量偏差按指数规律归一化为 $^{179}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.7325$ (张亚峰等, 2015)。对 Plešovice 锆石进行了 40 次分析,得出的加权平均值为 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.282483 \pm 0.000035$, 与 Sláma *et al.* (2008) 中的报告值在误差范围内。

表 1 卡拉瓦拉二云母花岗岩 (KLWLYT-1)、肖尔布龙伟晶岩 (XEBL-1) 锆石 U-Pb 分析结果

Table 1 Zircon LA-ICP-MS U-Pb data for the Kalawala two-mica granite (KLWLYT-1) and Xiaerbulong pegmatite (XEBL-1)

测点号	元素 ($\times 10^{-6}$)			Th/U	同位素比值						年龄 (Ma)			
	Pb	Th	U		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1 σ
KLWLYT-1 卡拉瓦拉二云母花岗岩														
-01	25.97	121.2	688.1	0.18	0.05085	0.00116	0.22989	0.00529	0.03267	0.00033	210.1	4.4	207.3	2.1
-02	29.48	176.5	765.0	0.23	0.05143	0.00109	0.23111	0.00492	0.03246	0.00027	211.1	4.1	205.9	1.7
-03	58.22	302.8	1522	0.20	0.0508	0.00092	0.23048	0.00423	0.0327	0.00025	210.6	3.5	207.4	1.5
-04	34.20	272.8	881.2	0.31	0.05204	0.00112	0.23338	0.0051	0.03235	0.00029	213	4.2	205.2	1.8
-05	48.81	291.1	1270	0.23	0.05433	0.00132	0.24599	0.00643	0.0326	0.00027	223.3	5.2	206.8	1.7
-06	66.11	341.3	1752	0.19	0.05178	0.00085	0.23599	0.00409	0.033	0.00038	215.1	3.4	209.3	2.4
-07	55.76	485.4	1422	0.34	0.04949	0.00085	0.2268	0.00407	0.03293	0.00027	207.6	3.4	208.8	1.7
-08	34.81	111.4	940.4	0.12	0.0511	0.00106	0.23248	0.00476	0.03279	0.00032	212.2	3.9	208	2
-09	73.72	264.4	1999	0.13	0.04985	0.00088	0.22736	0.00416	0.03297	0.0004	208	3.4	209.1	2.5
-10	51.45	230.6	1364	0.17	0.04988	0.00087	0.22819	0.00405	0.03298	0.00029	208.7	3.3	209.2	1.8
XEBL-1 肖尔布龙伟晶岩														
-01	289.0	5.72	8225	0.00070	0.04948	0.00064	0.22113	0.00352	0.03225	0.00032	202.9	2.9	204.6	2
-02	100.1	6.08	2815	0.00216	0.04945	0.00084	0.2201	0.00393	0.03217	0.00025	202	3.3	204.1	1.6
-03	279.1	5.41	7760	0.00070	0.05016	0.00061	0.22561	0.00308	0.03244	0.00024	206.6	2.6	205.8	1.5
-04	172.4	3.86	4857	0.00080	0.05045	0.00066	0.22545	0.00327	0.03223	0.00025	206.4	2.7	204.5	1.6
-05	283.8	5.56	8048	0.00069	0.05029	0.00062	0.22462	0.00318	0.03219	0.00026	205.7	2.6	204.2	1.7
-06	348.4	7.36	9810	0.00075	0.04952	0.00061	0.22179	0.00306	0.03227	0.00026	203.4	2.5	204.8	1.6
-07	279.7	5.49	7859	0.00070	0.04972	0.00067	0.22329	0.00316	0.03236	0.00025	204.6	2.6	205.3	1.6
-08	340.7	7.05	9630	0.00073	0.04989	0.00063	0.22368	0.00307	0.03226	0.00026	205	2.5	204.7	1.6
-09	293.5	5.41	8286	0.00065	0.05021	0.00063	0.22567	0.00302	0.03236	0.00026	206.6	2.5	205.3	1.6
-10	326.3	6.91	9240	0.00075	0.05011	0.0006	0.22619	0.00306	0.03248	0.00028	207	2.5	206.1	1.8
-11	269.7	5.60	7645	0.00073	0.04986	0.00065	0.22443	0.00305	0.03239	0.00024	205.6	2.5	205.5	1.5
-12	158.8	4.44	4554	0.00098	0.04968	0.00075	0.22213	0.00342	0.03218	0.00026	203.7	2.8	204.2	1.6
-13	77.21	3.56	2205	0.00161	0.04991	0.00082	0.22255	0.0036	0.0321	0.00023	204	3	203.7	1.4
-14	301.3	5.41	8669	0.00062	0.04942	0.00063	0.22226	0.00313	0.03233	0.00026	203.8	2.6	205.1	1.6
-15	296.9	5.82	8545	0.00068	0.04885	0.00061	0.2197	0.00298	0.03236	0.00027	201.7	2.5	205.3	1.7
-16	108.4	2.96	3162	0.00094	0.04911	0.00077	0.2192	0.00351	0.03211	0.00025	201.2	2.9	203.8	1.5
-17	392.6	9.20	11238	0.00082	0.04983	0.00067	0.22408	0.00328	0.03234	0.00028	205.3	2.7	205.2	1.8
-18	119.7	9.17	3517	0.00261	0.04871	0.00082	0.21888	0.00395	0.03232	0.00031	201	3.3	205	1.9
-19	179.6	4.35	5184	0.00084	0.04981	0.0007	0.22315	0.00328	0.03221	0.00025	204.5	2.7	204.3	1.6
-20	122.4	3.41	3598	0.00095	0.04841	0.0007	0.21712	0.00345	0.03224	0.00029	199.5	2.9	204.6	1.8

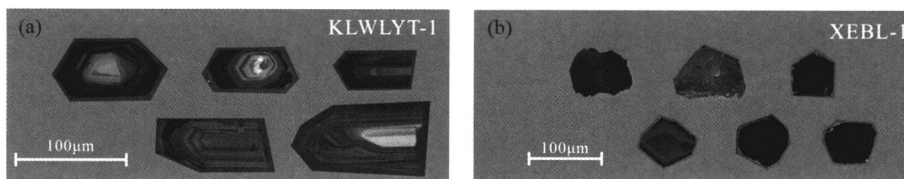


图 6 卡拉瓦拉岩体(a)和肖尔布龙伟晶岩(b)代表性锆石 CL 图像

Fig. 6 Representative cathodoluminescence (CL) images of zircons from the Kalawala pluton (a) and Xiaerbulong pegmatite (b)

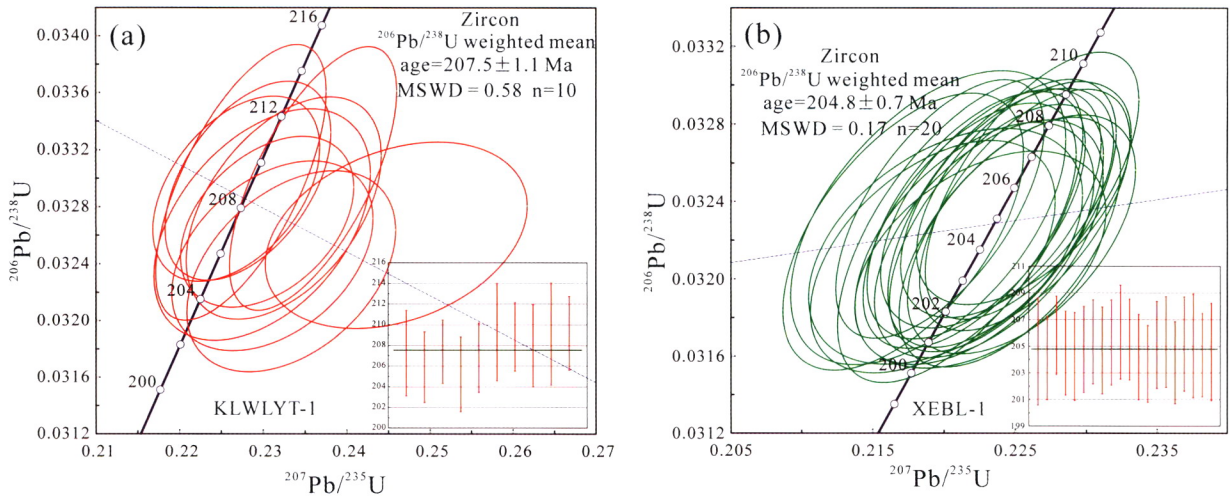


图 7 卡拉瓦拉岩体 (a) 和肖尔布龙伟晶岩 (b) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄谱和图

Fig. 7 LA-ICP-MS zircon U-Pb concordia diagrams of the Kalawala pluton (a) and Xiaerbulong pegmatite (b)

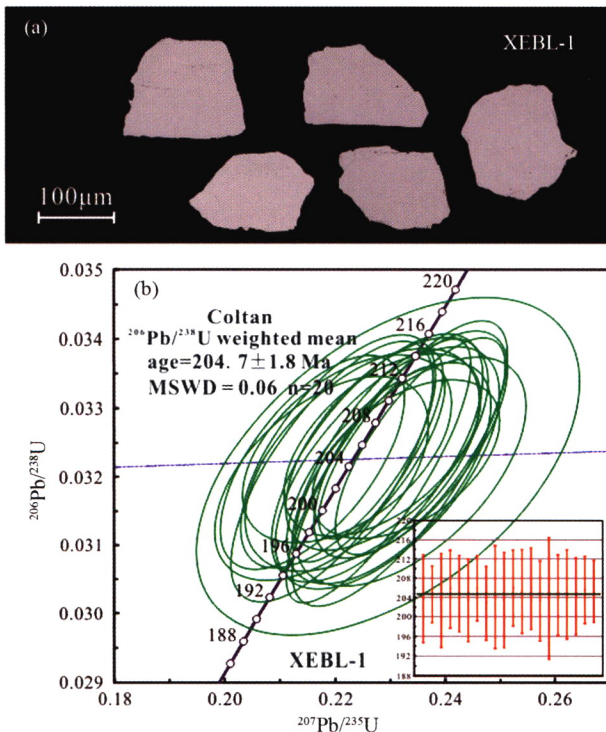


图 8 肖尔布龙伟晶岩代表性钽铌铁矿 BSE 图像 (a) 及 LA-ICP-MS 钽铌铁矿 U-Pb 年龄谱和图 (b)

Fig. 8 Representative BSE images (a) and LA-ICP-MS U-Pb concordia diagrams (b) of coltan in pegmatite from the Xiaerbulong

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 年龄

4.1.1 卡拉瓦拉二云母花岗岩

本文选取的用于定年的二云母花岗岩样品 (KLWLYT-

1) 为新鲜、无蚀变或蚀变较弱的样品, LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果见表 1。挑选出的锆石晶形较好, 无色透明, 无裂隙, 半自形-自形柱状, 长度为 50 ~ 160 μm, 长宽比为 1.5 : 1 ~ 3 : 1, 绝大多数的锆石长宽比较低, 是在花岗质岩石中缓慢结晶形成 (Corfu *et al.*, 2003; Hoskin and Schaltegger, 2003)。阴极发光 (CL) 图像显示, 该花岗岩中存在两种类型锆石, 分别为岩浆型锆石和岩浆复合型锆石 (图 6a)。岩浆锆石具有清晰的岩浆振荡环带, 复合型锆石存在一些老的残留核。复合锆石数量较多, 由浑圆状的残留核和厚薄不一的后期生长边组成, 核-边结构明显。残留核颜色较浅且环带不明显, 后期生长边具有清晰的岩浆振荡环带, 颜色通常较暗。

本次研究选取样品中的岩浆锆石和岩浆复合型锆石的边部进行了 U-Pb 定年测定。锆石的 Th 含量为 $111 \times 10^{-6} \sim 485 \times 10^{-6}$, U 含量为 $688 \times 10^{-6} \sim 1999 \times 10^{-6}$, Th/U 比值为 0.12 ~ 0.34。本次共选取 10 个点进行测试分析, 获得加权平均年龄为 $207.5 \pm 1.1 \text{ Ma}$ (MSWD = 0.58; 图 7a)。

4.1.2 肖尔布龙锂 (铍) 矿化伟晶岩

肖尔布龙稀有金属伟晶岩 (XEBL-1) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果见表 1。阴极发光 (CL) 图像显示, 该伟晶岩中存在两种锆石, 一种颜色呈暗灰色, 颗粒较小, 多呈他形-半自形, 长度为 50 ~ 120 μm, 长宽比为 1 : 1 ~ 1.5 : 1, 锆石表面发生热液蚀变, 阴极发光图像 (CL) 不能反映矿物内部结构, 岩浆振荡环带不可见; 另一种锆石颜色整体呈黑色, 多呈半自形, 长度为 50 ~ 100 μm, 长宽比为 1 : 1 ~ 2 : 1, 仅有部分颗粒可见弱的薄边, 岩浆振荡环带不发育 (图 6b)。这些特征表明其为岩浆成因的, 由于较高的 U 含量或残余流体的作用, 经历了强烈的脱晶化或重结晶。

本次研究选取未发生热液蚀变的黑色锆石进行了 U-Pb 定年测定。锆石的 Th 含量为 $2.96 \times 10^{-6} \sim 9.20 \times 10^{-6}$, U 含量为 $2205 \times 10^{-6} \sim 11237 \times 10^{-6}$, Th/U 比值极低, 为 0.0006

表2 肖尔布龙伟晶岩(XEBL-1)铌钽铁矿 U-Pb 分析结果

Table 2 Coltan LA-ICP-MS U-Pb data for the Xiaerbulong pegmatite (XEBL-1)

测点号	元素 ($\times 10^{-6}$)			Th/U	同位素比值						年龄 (Ma)			
	Pb	Th	U		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1σ
-01	7.59	0.89	237.1	0.004	0.05176	0.00142	0.22953	0.00832	0.03212	0.00072	209.8	6.9	203.8	4.5
-02	9.46	0.74	285.2	0.003	0.05270	0.00154	0.23289	0.00697	0.03226	0.00047	212.6	5.7	204.6	3.0
-03	8.72	0.89	269.1	0.003	0.05018	0.00153	0.21948	0.00749	0.03207	0.00078	201.5	6.2	203.5	4.9
-04	18.24	0.75	543.8	0.001	0.05280	0.00110	0.23550	0.00632	0.03244	0.00065	214.7	5.2	205.8	4.0
-05	25.21	3.32	769.8	0.004	0.05071	0.00084	0.22594	0.00558	0.03229	0.00063	206.8	4.6	204.9	3.9
-06	7.82	1.03	244.5	0.004	0.05273	0.00166	0.23376	0.00857	0.03207	0.00068	213.3	7.1	203.5	4.3
-07	6.64	0.85	200.5	0.004	0.05134	0.00152	0.22864	0.00731	0.03246	0.00054	209.1	6.0	205.9	3.4
-08	7.50	0.95	234.2	0.004	0.04938	0.00166	0.21758	0.00791	0.03197	0.00061	199.9	6.6	202.9	3.8
-09	7.70	0.85	245.1	0.003	0.05246	0.00142	0.23179	0.00801	0.03218	0.00085	211.7	6.6	204.2	5.3
-10	15.70	1.94	478.2	0.004	0.05201	0.00124	0.22789	0.00685	0.03208	0.00079	208.5	5.7	203.5	4.9
-11	7.52	0.85	230.4	0.004	0.05151	0.00156	0.22944	0.00751	0.03247	0.00063	209.7	6.2	206.0	4.0
-12	6.95	0.76	211.8	0.004	0.05026	0.00160	0.22060	0.00722	0.03236	0.00069	202.4	6.0	205.3	4.3
-13	7.33	0.81	221.9	0.004	0.05289	0.00154	0.23378	0.00719	0.03246	0.00068	213.3	5.9	205.9	4.2
-14	7.45	1.00	231.6	0.004	0.05189	0.00138	0.22976	0.00758	0.03205	0.00066	210.0	6.3	203.3	4.1
-15	2.40	0.06	71.58	0.001	0.05282	0.00330	0.22971	0.01422	0.03214	0.00101	210.0	12.0	203.9	6.3
-16	5.71	0.60	173.8	0.003	0.05077	0.00180	0.22498	0.00869	0.03224	0.00066	206.0	7.2	204.5	4.1
-17	6.87	0.84	208.9	0.004	0.05149	0.00147	0.22767	0.00784	0.03227	0.00074	208.3	6.5	204.7	4.6
-18	10.15	1.27	308.6	0.004	0.04877	0.00134	0.21593	0.00682	0.03220	0.00064	198.5	5.7	204.3	4.0
-19	6.82	0.77	206.6	0.004	0.05032	0.00175	0.22221	0.00774	0.03240	0.00056	203.7	6.4	205.6	3.5
-20	27.38	3.75	828.0	0.005	0.05127	0.00083	0.22850	0.00469	0.03235	0.00051	209.0	3.9	205.2	3.2

~ 0.0026 。本次共选取 20 个点进行测试分析,获得加权平均年龄为 $204.8 \pm 0.7\text{Ma}$ ($\text{MSWD} = 0.17$; 图 7b)。

4.2 铌钽铁矿 U-Pb 年龄

肖尔布龙稀有金属伟晶岩 (XEBL-1) 中的铌钽铁矿通常为半自形-自形板状,长度为 $200 \sim 400\mu\text{m}$,宽度为 $160 \sim 270\mu\text{m}$,在 BSE 图像下选择无包裹体和裂隙的颗粒进行分析 (图 8a),LA-ICP-MS 铌钽铁矿 U-Pb 定年结果见表 2。铌钽铁矿 Th 含量为 $0.06 \times 10^{-6} \sim 3.75 \times 10^{-6}$,U 含量为 $71.6 \times 10^{-6} \sim 828 \times 10^{-6}$,Th/U 比值为 $0.0008 \sim 0.0045$ 。本次共选取 20 个点进行测试分析,获得加权平均年龄为 $204.7 \pm 1.8\text{Ma}$ ($\text{MSWD} = 0.06$; 图 8b)。

4.3 锆石微量元素特征

卡拉瓦拉二云母花岗岩中锆石 Yb 含量为 $140 \times 10^{-6} \sim 419 \times 10^{-6}$,平均值为 272×10^{-6} ;Gd 含量为 $27.9 \times 10^{-6} \sim 128 \times 10^{-6}$,平均值为 78.5×10^{-6} ;Yb/Gd 比值为 $2.37 \sim 5.01$,平均值为 3.63 ;稀土总量 ($\sum \text{REE}$) 介于 $413 \times 10^{-6} \sim 1332 \times 10^{-6}$,平均值为 906×10^{-6} ;重稀土元素 (HREE) 富集,轻稀土元素 (LREE) 相对亏损,LREE/HREE 比值为 $0.02 \sim 0.05$,平均值为 0.03 ;Ce/Ce* 比值为 $1.91 \sim 21.1$,平均值为 8.97 ;Eu/Eu* 比值介于 $0.04 \sim 0.07$,平均值为 0.06 (表 3)。

球粒陨石标准化稀土元素配分曲线呈左倾趋势 (图 9),且具有较明显的正 Ce 异常和负 Eu 异常,与典型岩浆锆石的稀土元素配分特征相似 (Hoskin and Schaltegger, 2003; Hoskin, 2005)。

4.4 锆石 Hf 同位素特征

对卡拉瓦拉二云母花岗岩样品 (KLWLYT-1) 10 个锆石测点和肖尔布龙伟晶岩样品 (XEBL-1) 的 12 个锆石测点进行了原位 Hf 同位素分析,结果见表 4,所有测点的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 小于 0.002 ,表明锆石形成后无明显放射性成因 Hf 积累,因而所测 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值可代表花岗岩形成时其体系的 Hf 同位素组成 (吴福元等, 2007)。

卡拉瓦拉二云母花岗岩 ($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$)_i 的变化范围为 $0.282447 \sim 0.282480$, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 $-6.9 \sim -5.8$,二阶段模式年龄 (t_{DM2}) 为 $1613 \sim 1688\text{Ma}$ 。

肖尔布龙伟晶岩 ($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$)_i 的变化范围为 $0.282495 \sim 0.282529$, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 $-5.3 \sim -4.1$,二阶段模式年龄 (t_{DM2}) 为 $1506 \sim 1582\text{Ma}$ 。

5 讨论

5.1 成岩成矿年龄

锆石 U-Pb 同位素定年是花岗岩常用的定年方法,锆石

表 3 卡拉瓦拉二云母花岗岩 (KLWLYT-1) 和肖尔布龙伟晶岩 (XEBL-1) 锆石微量元素组成 ($\times 10^{-6}$)
 Table 3 Trace element compositions ($\times 10^{-6}$) of zircons from the Kalawala two-mica granite (KLWLYT-1) and Xiaerbulong pegmatite (XEBL-1)

测点号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	Hf	Ti	Eu/Eu*	Ce/Ce*	LREE/HREE	Σ REE
KLWLYT-1 卡拉瓦拉二云母花岗岩																					
-01	0.01	2.21	0.18	3.20	10.56	0.51	49.21	12.74	112.2	33.08	126.0	23.32	195.3	37.77	995.0	10599	14.02	0.07	15.0	0.028	606.3
-02	0.04	2.50	0.32	6.49	17.25	0.72	68.54	17.18	137.0	38.35	135.7	24.27	198.9	37.02	1109	10690	11.17	0.06	5.25	0.042	684.3
-03	0.02	3.90	0.32	6.84	18.44	0.99	94.18	25.92	232.2	70.04	260.9	46.63	378.9	71.06	2098	9897	19.09	0.07	11.1	0.026	1210
-04	0.02	3.75	0.58	10.52	23.75	1.02	87.76	20.66	163.0	44.85	156.8	26.96	217.1	39.97	1288	10566	13.26	0.07	8.17	0.052	796.8
-05	0.72	5.30	0.64	8.86	22.31	0.95	96.47	25.12	214.0	61.05	221.0	39.13	317.6	58.90	1811	10061	37.38	0.06	1.91	0.038	1072
-06	0.39	5.00	0.39	6.16	18.05	0.71	96.53	27.51	256.7	76.23	287.0	50.96	418.7	77.70	2272	11011	18.04	0.05	3.14	0.024	1322
-07	0.08	5.68	0.99	15.81	35.44	1.32	128.1	30.39	239.0	63.50	222.0	38.47	303.3	55.33	1847	9925	13.62	0.06	5.10	0.055	1139
-08	0.00	1.48	0.19	3.02	7.02	0.34	27.86	8.02	73.05	22.34	87.51	16.52	139.5	26.00	665.7	15663	4.45	0.07	13.7	0.030	412.9
-09	0.10	3.21	0.23	4.45	14.11	0.61	75.70	22.76	209.1	62.62	231.8	42.66	344.8	61.58	1890	13002	15.56	0.06	5.14	0.022	1074
-10	0.01	3.23	0.15	3.06	10.85	0.31	60.98	19.34	172.5	46.99	158.1	26.71	204.5	37.43	1471	11339	6.17	0.04	21.1	0.024	744.2
XEBL-1 肖尔布龙伟晶岩																					
-01	0.00	0.02	0.00	0.08	0.51	0.08	7.49	6.67	105.7	35.26	179.2	47.68	497.2	86.20	1574	30014	0.23	0.13		0.00	966.2
-02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02	0.85	0.41	4.52	1.94	32.79	10.08	28.78	59474	0.00			0.00	50.65
-03	0.00	0.02	0.01	0.07	0.64	0.05	9.77	8.48	115.8	35.75	162.4	39.46	395.0	64.73	1510	27948	0.13	0.06	1.56	0.00	832.1
-04	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.13	0.19	4.10	1.97	14.06	5.97	91.78	17.66	116.4	38409	0.44	2.82		0.00	135.9
-05	0.00	0.02	0.00	0.05	0.61	0.12	8.64	7.33	113.5	37.62	188.0	48.67	501.6	86.37	1658	29322	0.42	0.16	4.96	0.00	992.5
-06	0.00	0.03	0.00	0.06	0.77	0.06	9.26	7.62	105.0	31.72	142.2	34.12	327.7	53.24	1356	28857	0.26	0.06	2.01	0.00	711.8
-07	0.00	0.01	0.00	0.05	0.50	0.09	6.66	6.10	96.31	32.93	169.3	44.84	473.7	82.64	1479	28902	0.49	0.16		0.00	913.2
-08	0.00	0.02	0.00	0.12	0.94	0.11	10.58	9.23	127.6	39.05	177.6	43.71	435.3	71.92	1666	26880	0.44	0.11	2.14	0.00	916.2
-09	0.00	0.01	0.00	0.11	0.74	0.09	7.99	7.31	112.4	38.01	191.4	50.04	515.8	88.86	1652	28857	0.31	0.11	1.35	0.00	1013
-10	0.00	0.02	0.00	0.10	0.80	0.08	10.37	8.99	123.9	36.92	167.5	41.24	408.2	67.30	1585	27793	0.36	0.08		0.00	865.5
-11	0.00	0.04	0.01	0.08	0.68	0.05	7.99	6.76	93.40	28.38	130.1	32.11	321.0	53.12	1201	27935	0.45	0.07	2.27	0.00	673.7
-12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.03	0.36	0.11	0.85	0.41	6.79	1.46	9.30	43120	0.12	1.00		0.00	10.04
-13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.33	0.17	1.57	0.73	13.86	3.80	13.17	63305	0.42			0.00	20.50
-14	0.00	0.02	0.00	0.05	0.58	0.09	7.42	7.25	109.2	37.23	187.1	48.42	503.4	85.82	1606	29004	0.50	0.14	2.94	0.00	986.6
-15	0.00	0.01	0.00	0.05	0.54	0.08	6.29	6.41	101.8	34.39	177.6	48.14	508.9	87.32	1541	29584	0.32	0.12		0.00	971.5
-16	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.04	0.01	0.04	0.03	0.09	0.07	1.08	0.26	3.70	49136	0.20	0.57		0.02	1.65
-17	0.01	0.02	0.00	0.11	0.69	0.08	9.39	7.75	105.8	30.54	137.1	32.73	320.8	51.28	1320	28302	0.36	0.09	0.65	0.00	696.3
-18	0.02	0.14	0.01	0.06	0.08	0.07	0.23	0.04	0.41	0.13	0.59	0.22	3.20	0.85	7.50	53704	0.30	1.43	3.55	0.06	6.04
-19	0.01	0.00	0.00	0.03	0.01	0.01	0.12	0.18	3.75	1.66	13.07	5.93	89.90	17.59	109.1	38775	0.34	0.83	0.17	0.00	132.3
-20	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.02	0.20	0.07	0.45	0.23	3.69	0.84	6.47	47162	0.00	0.90		0.00	5.52

表4 卡拉瓦拉二云母花岗岩、肖尔布龙伟晶岩锆石 Lu-Hf 同位素分析结果

Table 4 Zircon Lu-Hf isotopic compositions of the Kalawala two-mica granite and Xiaerbulong pegmatite

测点号	年龄 (Ma)	$\frac{^{176}\text{Yb}}{^{177}\text{Hf}}$	$\frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}}$	$\frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}}$	2σ	$\left(\frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}}\right)_i$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	2σ	t_{DM1} (Ma)	t_{DM2} (Ma)
KLWLYT-1 卡拉瓦拉二云母花岗岩											
-01		0.025148	0.000824	0.282480	0.000008	0.282477	-10.3	-5.9	0.284476	1088	1621
-02		0.026918	0.000870	0.282466	0.000008	0.282463	-10.8	-6.4	0.287804	1108	1652
-03		0.035571	0.001163	0.282456	0.000011	0.282452	-11.2	-6.8	0.377843	1131	1677
-04		0.008479	0.000266	0.282456	0.000007	0.282455	-11.2	-6.7	0.239998	1105	1670
-05		0.035371	0.001216	0.282452	0.000010	0.282447	-11.3	-6.9	0.343276	1139	1688
-06	207.5	0.018653	0.000582	0.282472	0.000007	0.282470	-10.6	-6.1	0.232650	1092	1637
-07		0.021691	0.000689	0.282483	0.000006	0.282480	-10.2	-5.8	0.226959	1080	1613
-08		0.031076	0.001025	0.282453	0.000006	0.282449	-11.3	-6.9	0.223289	1131	1683
-09		0.035310	0.001111	0.282467	0.000007	0.282462	-10.8	-6.4	0.244435	1115	1653
-10		0.037804	0.001133	0.282455	0.000006	0.282451	-11.2	-6.8	0.213866	1132	1679
XEEL-1 肖尔布龙伟晶岩											
-01		0.015033	0.000436	0.282499	0.000005	0.282498	-9.6	-5.2	0.177686	1050	1576
-02		0.000350	0.000017	0.282502	0.000003	0.282502	-9.5	-5.1	0.103404	1035	1566
-03		0.001931	0.000063	0.282527	0.000004	0.282527	-8.7	-4.2	0.140011	1001	1510
-04		0.012932	0.000357	0.282496	0.000004	0.282495	-9.8	-5.3	0.149506	1052	1582
-05		0.016831	0.000491	0.282501	0.000005	0.282499	-9.6	-5.2	0.192404	1049	1572
-06		0.017271	0.000503	0.282522	0.000005	0.282520	-8.8	-4.4	0.167756	1020	1526
-07		0.012242	0.000338	0.282504	0.000004	0.282502	-9.5	-5.0	0.152364	1041	1565
-08		0.009982	0.000283	0.282507	0.000005	0.282506	-9.4	-4.9	0.172359	1036	1558
-09	204.8	0.000148	0.000005	0.282505	0.000004	0.282505	-9.4	-4.9	0.146577	1030	1559
-10		0.000231	0.000011	0.282516	0.000003	0.282516	-9.0	-4.6	0.089077	1015	1534
-11		0.015457	0.000452	0.282531	0.000005	0.282529	-8.5	-4.1	0.159399	1007	1506
-12		0.016093	0.000463	0.282529	0.000004	0.282528	-8.6	-4.2	0.146501	1009	1509
-13		0.000055	0.000002	0.282517	0.000004	0.282517	-9.0	-4.5	0.125142	1013	1532
-14		0.012590	0.000349	0.282505	0.000005	0.282504	-9.4	-5.0	0.191600	1040	1563
-15		0.015676	0.000448	0.282504	0.000006	0.282502	-9.5	-5.1	0.211424	1044	1566
-16		0.000075	0.000003	0.282526	0.000004	0.282526	-8.7	-4.2	0.155633	1001	1512
-17		0.001071	0.000035	0.282525	0.000003	0.282524	-8.7	-4.3	0.118153	1004	1516
-18		0.000115	0.000004	0.282511	0.000004	0.282511	-9.2	-4.7	0.141366	1022	1546

U-Pb 同位素定年是花岗岩常用的定年方法,卡拉瓦拉二云母花岗岩中的锆石可以分为两组:(1)随花岗岩结晶形成的同源锆石;(2)具有老的残留核的复合锆石。通常认为,复合锆石为源区中未被完全熔融的锆石在岩浆熔融过程中,被岩浆带到浅部,岩浆以继承锆石为核生长的锆石。因此,复合锆石生长边的 U-Pb 年龄与岩浆锆石的 U-Pb 年龄都可代表岩体的结晶年龄。两个岩体的锆石 Th/U 比值较低,与典型岩浆锆石不一致(Th/U > 0.4),然而,它们具有清晰的岩浆振荡环带,并且在锆石球粒陨石标准化稀土元素配分曲线中表现出明显的左倾趋势,具有较明显的正 Ce 异常和负 Eu 异常(图 8、表 3),表明它们是岩浆锆石(Hoskin and Schaltegger, 2003; Hoskin, 2005)。事实上,低 Th/U 比值的岩浆锆石广泛存在,特别是在高分异的岩浆侵入体中(陈富

文等, 1999; Hidaka *et al.*, 2002; Wu *et al.*, 2002; Clifford *et al.*, 2004; 刘锋等, 2014; Kirkland *et al.*, 2015; 刘丽君等, 2017; 陈剑锋等, 2018; Zhang *et al.*, 2019),在这种情况下,锆石稀土元素配分模式图解可以用来确定锆石的来源(Hidaka *et al.*, 2002; Long *et al.*, 2012)。

伟晶岩中有多种含 U 副矿物,如锡石、独居石、铌钽铁矿、锆石、磷灰石、石榴子石等,因此, U-Pb 同位素定年为伟晶岩常用的定年方式。目前,铌钽铁矿 U-Pb 定年是常用的伟晶岩型稀有金属矿床定年方法(Yan *et al.*, 2018; 王倩等, 2019; Wang *et al.*, 2020),铌钽铁矿的 U-Pb 年龄可以直接反映伟晶岩的形成时代(Romer and Wright, 1992; Romer *et al.*, 1996; Che *et al.*, 2015; Yan *et al.*, 2018, 2022; Wang *et al.*, 2020; 李杭等, 2020)。锆石封闭温度较高,后期热事件

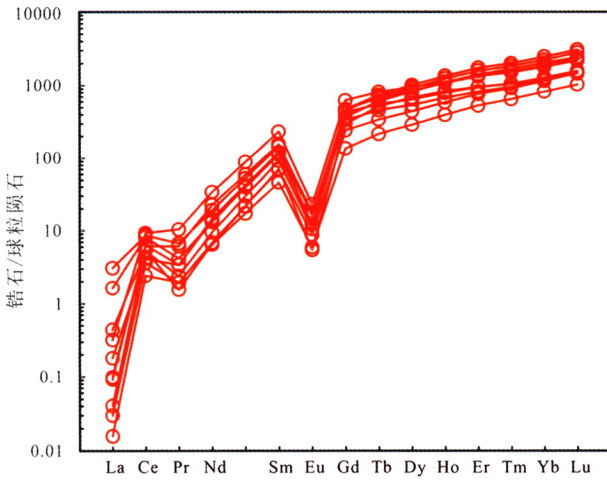


图9 卡拉瓦拉二云母花岗岩锆石球粒陨石标准化稀土元素配分曲线(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)
Fig.9 Chondrite-normalized REE patterns of zircon in two-mica granite from the Kalawala pluton (normalization data from Sun and McDonough, 1989)

对其影响较小,因此,锆石 U-Pb 是常用的定年方法之一。由于伟晶岩中的锆石 U 含量较高(可达 $10000n \times 10^{-6}$) (Romer *et al.*, 1996),易发生蜕晶化或重结晶,甚至形成曲晶石 (Dickin, 1995),造成年龄结果产生较大偏差。

肖尔布龙伟晶岩中的锆石具有两种不同的特征,一种被严重蚀变,无法获得年龄数据,另外一种锆石整体呈黑色,在 CL 图像下无法识别出岩浆环带,在锆石类型判别图中,这些锆石均落入岩浆锆石区域(图 10),并在定年工作中获得了与铀钽铁矿相似的定年结果,因此,在误差范围内,我们认为该锆石年龄也代表了该伟晶岩的形成年龄。综上所述,肖尔布龙伟晶岩的形成年龄为 $204.8 \pm 0.7\text{Ma}$ 。

5.2 岩浆岩与伟晶岩关系

伟晶岩和花岗岩的关系是一个广泛争论的话题,这种关

系是伟晶岩分类研究中需要考虑的问题之一。通常认为花岗岩伟晶岩矿床与花岗岩具有成因上的联系 (Martin and De Vito, 2005),伟晶岩为花岗质岩浆演化末期残余岩浆固结的产物 (Černý *et al.*, 1988; Černý and Erict, 1989; Selway *et al.*, 2005),也就是说伟晶岩与花岗岩一般同时存在,形成完整的伟晶岩-花岗岩体系。因此,确定成矿伟晶岩脉的母岩体对探讨伟晶岩脉的形成和稀有金属矿化的成因具有重要意义。

同时空产出是建立花岗岩-伟晶岩之间岩石成因关系的重要要求 (Tomascek *et al.*, 1998)。西昆仑地区的大红柳滩锂矿及近矿二云母花岗岩就位年龄为 209 ~ 218Ma (魏小鹏等, 2017; Yan *et al.*, 2018);课题组对 2017 年新发现的白龙山超大型锂矿床及与成矿有关的二云母花岗岩进行详细的年代学研究,确定岩体与伟晶岩脉的形成时代为 207 ~ 212Ma (Wang *et al.*, 2020; Yan *et al.*, 2022),均反映了从花岗岩到伟晶岩结晶的时间演化序列。在本次研究中,肖尔布龙伟晶岩与卡拉瓦拉二云母花岗岩基本在同一时间形成,二云母花岗岩就位时间(207Ma)略早。野外调查显示,卡拉瓦拉岩体边缘或内部节理中常发育后期的伟晶岩脉(图 3a)。

伟晶岩中的矿物粒度较大,全岩地球化学数据参考性较低,因此,我们通过锆石 Hf 同位素对伟晶岩的母岩体进行示踪。Kemp *et al.* (2007) 和 Bolhar *et al.* (2008) 指出岩浆混合会导致锆石 Hf 同位素比值产生较大变化(单个样品变化范围高达 10epsilon),并且后期的热液蚀变过程对锆石的原生 Hf 同位素特征影响很小 (Gerdes and Zeh, 2009; Lenting *et al.*, 2010)。二云母花岗岩与伟晶岩的锆石均为岩浆锆石,其 Hf 同位素比值相对均匀(图 11),变化范围分别为 0.282572、0.282512,这表明岩浆混合的影响在花岗岩成因中并不重要。因此,该锆石 Hf 同位素比值代表了成岩时熔体中的 Hf 同位素含量,二云母花岗岩与伟晶岩相似的锆石 Hf 同位素比值表明两者具有成因上的联系。

5.3 区域成矿规律

自 20 世纪 60 年代,在西昆仑造山带东段大红柳滩地区

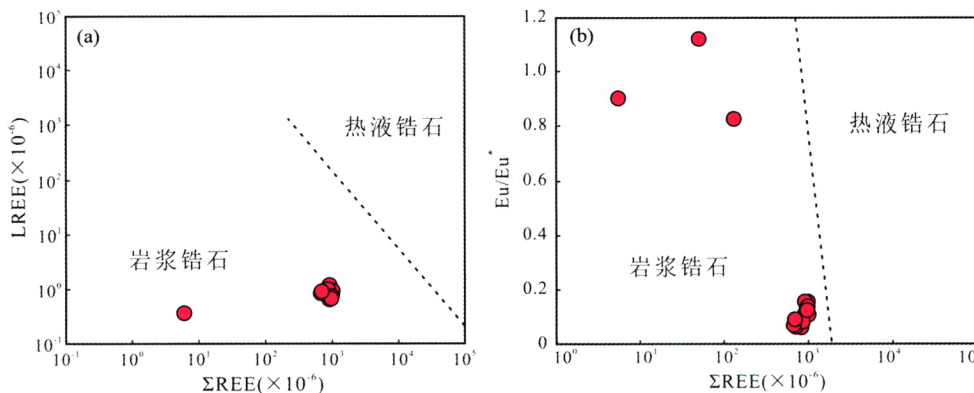


图 10 肖尔布龙伟晶岩锆石类型判别图解(底图据 Li *et al.*, 2018)
Fig.10 Discriminant diagram of zircons type for pegmatites of Xiaerbulong (base map after Li *et al.*, 2018)

表5 西昆仑地区甜水海地块典型锂铍稀有金属矿床二云母花岗岩母岩体成矿年龄对比

Table 5 Comparison of parent rock of typical lithium-beryllium rare metal deposits in West Kunlun area

矿床	构造位置	成矿母岩	岩性	年龄(Ma)	参考文献
大红柳滩矿床		大红柳滩岩体		209.7 ± 1.3	魏小鹏等, 2017; Yan <i>et al.</i> , 2018
白龙山矿床	甜水海地块	白龙山岩体	二云母花岗岩	210.3 ± 1.7	Wang <i>et al.</i> , 2020; Yan <i>et al.</i> , 2022
肖尔布龙体		卡拉瓦拉岩		207.5 ± 1.1	本文

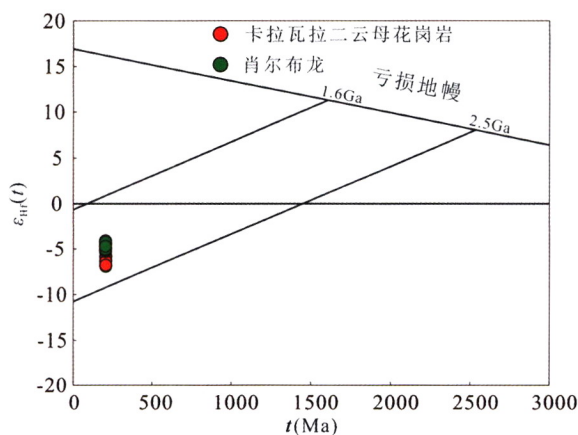


图11 锆石 Hf 同位素图解

Fig. 11 Zircon $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ vs. t diagram

陆续发现了大红柳滩、白龙山、雪凤岭、雪盆、双牙等中-超大型伟晶岩型稀有金属矿床(表5;王核等, 2017, 2020; Yan *et al.*, 2018);造山带中段发现了牧林场、达布达尔、三素矿点(王核等, 2017; Yan *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2020),造山带西段发现了霍什塔什、肖尔布龙、卡拉瓦拉锂矿点。

西昆仑造山带东部的康西瓦含绿柱石白云母伟晶岩锆石 U-Pb 年龄为 209Ma(张泽等, 2019);大红柳滩锂矿铌钽铁矿、锡石 U-Pb 年龄分别为 212Ma、218Ma(Yan *et al.*, 2018),大红柳滩锂矿近矿二云母花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 209Ma(魏小鹏等, 2017);Wang *et al.* (2020) 获得白龙山锂矿铌钽铁矿 U-Pb 年龄为 208Ma,周楷麟(2021)对白龙山锂矿及与成矿相关的二云母花岗岩进行锡石、锆石 U-Pb 同位素定年,获得了 211Ma 的成矿年龄和 210Ma 的成岩年龄;雪凤岭锂矿铌钽铁矿 U-Pb 年龄为 206Ma(Yan *et al.*, 2022)。因此,西昆仑造山带东部稀有金属伟晶岩的成矿年龄可能在 218 ~ 207Ma 之间。Yan *et al.* (2022) 对西昆仑造山带中部牧林场二云母花岗岩及伟晶岩进行锆石和铌钽铁矿 U-Pb 同位素定年,确定它们形成时间分别为 208Ma、206Ma。Yan *et al.* (2022) 获得西昆仑造山带西部霍什塔什伟晶岩独居石 U-Pb 年龄为 204Ma,综合本文所研究的岩体及伟晶岩年代学数据,西昆仑造山带西部稀有金属伟晶岩及其母花岗岩主要形成于 207 ~ 204Ma 的一个较窄的时间区间内。因此,西昆仑造山带的稀有金属伟晶岩成矿年龄约 218 ~ 204Ma,均处于晚三叠世。综合本文所研究的岩体及伟晶岩年代学数据,肖尔布龙矿床也是西昆仑稀有金属成矿带的组成部分(Yan *et*

al., 2022)。

因此,下一步西昆仑地区找矿工作应围绕区内具有与白龙山、大红柳滩、卡拉瓦拉相似年代学的晚三叠世二云母花岗岩展开。

6 结论

(1)卡拉瓦拉二云母花岗岩形成年龄为 207.5 ± 1.1Ma,属于晚三叠世岩浆作用的产物。

(2)伟晶岩定年选用的锆石均为岩浆锆石,其 U-Pb 年龄为 208 ± 0.7Ma,铌钽铁矿的 U-Pb 年龄为 204.7 ± 1.8Ma,均能反映伟晶岩的形成时代,为晚三叠世。

(3)肖尔布龙稀有金属伟晶岩为西昆仑稀有金属成矿带组成部分,下一步西昆仑地区找矿工作应围绕区内具有与白龙山、大红柳滩、卡拉瓦拉相似年代学的晚三叠世二云母花岗岩展开

致谢 野外工作得到新疆国家 305 办公室马华东教授、朱炳玉教授、王威高工和邢春辉工程师的大力支持和帮助;样品测试得到中国科学院广州地球化学研究所张乐高工的大力协助;论文撰写和修改过程中得到了李晓峰研究员以及编辑部老师的悉心帮助,使文章得以完善;审稿人提出了宝贵的意见和建议。在此一并致以诚挚的谢意。

References

- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb . *Chemical Geology*, 192(1-2): 59-79
- Bolhar R, Weaver SD, Whitehouse MJ, Palin JM, Woodhead JD and Cole JW. 2008. Sources and evolution of arc magmas inferred from coupled O and Hf isotope systematics of plutonic zircons from the Cretaceous Separation Point Suite (New Zealand). *Earth and Planetary Science Letters*, 268(3-4): 312-324
- Bureau of Geology and Mineral Resource of Xinjiang Province. 1993. *Regional Geology of Xinjiang Province*. Beijing: Geological Publishing House, 23-78 (in Chinese)
- Černý P, Fransolet AM, Ercit TS and Chapman R. 1988. Foordite SnNb_2O_6 , a new mineral species, and the foordite-thoreaulite series. *The Canadian Mineralogist*, 26(4): 889-898
- Černý P and Ercit TS. 1989. Mineralogy of niobium and tantalum: Crystal chemical relationships, paragenetic aspects and their economic implications. *Lanthanides, Tantalum and Niobium*. Berlin Heidelberg: Springer, 27-79
- Che XD, Wu FY, Wang RC, Gerdas 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 FW, Li HQ, Gong DH, Cai H and Chen W. 1999. New chronological evidence for Yanshanian diagenetic mineralization in China's Altay orogenic belt. *Chinese Science Bulletin*, 45(2): 108–114
- Chen JF, Zhang H, Zhang JX and Ma HY. 2018. Geochronology and Hf isotope of zircon for Koktokay No. 3 granitic pegmatite in Xinjiang and its geological implications. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 28(9): 1832–1844 (in Chinese with English abstract)
- Chen SQ, Chen HL, Zhu KY and Tao Y. 2021. Petrogenesis of the Middle-Late Triassic S- and I-type granitoids in the eastern Pamir and implications for the Tanyamas-Jinshajiang Paleo-Tethys Ocean. *International Journal of Earth Sciences*, 110(4): 1213–1232
- Chen T, Yan SY and Kang ZH. 2007. Progress on the extraction of lithium from the Salt Lake Brine in China. *Journal of Salt and Chemical Industry*, 36(2): 19–21 (in Chinese with English abstract)
- Clifford TN, Barton ES, Stern RA and Duchesne JC. 2004. U-Pb zircon calendar for Namaquan (Grenville) crustal events in the granulite-facies terrane of the O'okiep copper district of South Africa. *Journal of Petrology*, 45(4): 669–691
- Corfu F, Hancher JM, Hoskin PWO and Kinny P. 2003. Atlas of zircon textures. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 469–500
- Dickin AP. 1995. *Radiogenic Isotope Geology*. Cambridge: Cambridge University Press, 101–135
- Gao S, Liu XM, Yuan HL, Hattendorf B, Günther D, Chen L and Hu SH. 2002. Determination of forty-two major and trace elements in USGS and NIST SRM glasses by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Geostandards Newsletter*, 26(2): 181–196
- Gerdes A and Zeh A. 2009. Zircon formation versus zircon alteration: New insights from combined U-Pb and Lu-Hf in-situ LA-ICP-MS analyses, and consequences for the interpretation of Archean zircon from the central zone of the Limpopo belt. *Chemical Geology*, 261(3–4): 230–243
- Han FL. 2006. Tectonic evolution and mineralization of the western Kunlun accretion-type orogen. Ph. D. Dissertation. Beijing: China University of Geosciences (Beijing)
- Hidaka H, Shimizu H and Adachi M. 2002. U-Pb geochronology and REE geochemistry of zircons from Palaeoproterozoic paragneiss clasts in the Mesozoic Kamiyama conglomerate, central Japan: Evidence for an Archean provenance. *Chemical Geology*, 187(3–4): 279–293
- Hoskin PWO and Schaltegger U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 27–62
- Hoskin PWO. 2005. Trace-element composition of hydrothermal zircon and the alteration of Hadean zircon from the Jack Hills, Australia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(3): 637–648
- Hu J, Wang H, Huang CY, Tong LX, Mu SL and Qiu ZW. 2016. Geological characteristics and age of the Dahongliutan Fe-ore deposit in the Western Kunlun orogenic belt, Xinjiang, northwestern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 116: 1–25
- Ji WH, Han FL, Wang JC and Zhang JL. 2004. Composition and geochemistry of the Subashi ophiolitic mélange in the West Kunlun and its geological significance. *Geological Bulletin of China*, 23(12): 1196–1201 (in Chinese with English abstract)
- Ji WH, Li RS, Chen SJ, He SP, Zhao ZM, Bian XW, Zhu HP, Cui JG and Ren JG. 2011. The discovery of Palaeoproterozoic volcanic rocks in the Bulunkuoler Group from the Tianshuihai Massif in Xinjiang of northwestern China and its geological significance. *Science China (Earth Sciences)*, 54(1): 61–72
- Jiang YH, Jiang SY, Ling HF, Zhou XR, Rui XJ and Yang WZ. 2002. Petrology and geochemistry of shoshonitic plutons from the western Kunlun orogenic belt, Xinjiang, northwestern China: Implications for granitoid geneses. *Lithos*, 63(3–4): 165–187
- Jiang YH, Liao SY, Yang WZ and Shen WZ. 2008. An island arc origin of plagiogranites at Oytay, western Kunlun orogen, Northwest China: SHRIMP zircon U-Pb chronology, elemental and Sr-Nd-Hf isotopic geochemistry and Paleozoic tectonic implications. *Lithos*, 106(3–4): 323–335
- Jiang YH, Jia RY, Liu Z, Liao SY, Zhao P and Zhou Q. 2013. Origin of Middle Triassic high-K calc-alkaline granitoids and their potassic microgranular enclaves from the western Kunlun orogen, Northwest China: A record of the closure of Paleo-Tethys. *Lithos*, 156–159: 13–30
- Kemp AIS, Hawkesworth CJ, Foster GL, Paterson BA, Woodhead JD, Hergt JM, Gray CM and Whitehouse MJ. 2007. Magmatic and crustal differentiation history of granitic rocks from Hf-O isotopes in zircon. *Science*, 315(5814): 980–983
- Kirkland CL, Smithies RH, Taylor RJM, Evans N and McDonald B. 2015. Zircon Th/U ratios in magmatic environs. *Lithos*, 212–215: 397–414
- Lenting C, Geisler T, Gerdes A, Cooijman E, Scherer EE and Zeh A. 2010. The behavior of the Hf isotope system in radiation-damaged zircon during experimental hydrothermal alteration. *American Mineralogist*, 95(8–9): 1343–1348
- Li H, Hong T, Yang ZQ, Chen JZ, Ke Q, Wang XH, Niu L and Xu XW. 2020. Comparative studying on zircon, cassiterite and coltan U-Pb dating and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of muscovite rare-metal granitic pegmatites: A case study of the northern Tugeman lithium-beryllium deposit in the middle of Altyn Tagh. *Acta Petrologica Sinica*, 36(9): 2869–2892 (in Chinese with English abstract)
- Li ZQ, Zhang LC, Xue CJ, Zheng MT, Zhu MT, Robbins LJ, Slack JF, Planavsky NJ and Konhauser KO. 2018. Earth's youngest banded iron formation implies ferruginous conditions in the Early Cambrian ocean. *Scientific Reports*, 8(1): 9970
- Liu F, Cao F, Zhang ZX and Li Q. 2014. Chronology and geochemistry of the granite near the Keketuohai No. 3 pegmatite in Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 30(1): 1–15 (in Chinese with English abstract)
- Liu LJ, Wang DH, Hou KJ, Tian SH, Zhao Y, Fu XF, Yuan LP and Hao XF. 2017. Application of lithium isotope to Jiajika new No. 3 pegmatite lithium polymetallic vein in Sichuan. *Earth Science Frontiers*, 24(5): 167–171 (in Chinese with English abstract)
- Liu WP, Wang H, Tong LX, Wu YF, Huang CY and Hu J. 2013. Geochemical characteristics and metamorphic *P-T* paths of the Bulunkuole Group in Taxkorgan, western Kunlun. *Acta Petrologica Sinica*, 29(3): 923–937 (in Chinese with English abstract)
- 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, Hu ZC, Zong KQ, Gao CG, Gao S, Xu J and Chen HH. 2010. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS. *Chinese Science Bulletin*, 55(15): 1535–1546
- Long XP, Sun M, Yuan C, Kröner A and Hu AQ. 2012. Zircon REE patterns and geochemical characteristics of Paleoproterozoic anatectic granite in the northern Tarim Craton, NW China: Implications for the reconstruction of the Columbia supercontinent. *Precambrian Research*, 222–223: 474–487
- Ludwig KR. 2003. *User's Manual for Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel*. Berkeley, CA: Berkeley Geochronology Center Special Publication, 4: 1–70
- Martin RF and De Vito C. 2005. The patterns of enrichment in felsic pegmatites ultimately depend on tectonic setting. *The Canadian Mineralogist*, 43(6): 2027–2048
- Matte P, Tapponnier P, Arnaud N, Bourjot L, Avouac JP, Vidal P, Liu Q, Pan YS and Wang Y. 1996. Tectonics of western Tibet, between the Tarim and the Indus. *Earth and Planetary Science Letters*, 142(3–4): 311–330
- Melcher F, Graupner T, Gäbler HE, Sitnikova M, Henjes-Kunst F, Oberthür T, Gerdes A and Dewaele S. 2015. Tantalum-(niobium-tin) mineralisation in African pegmatites and rare metal granites:

- Constraints from Ta-Nb oxide mineralogy, geochemistry and U-Pb geochronology. *Ore Geology Reviews*, 64: 667–719
- Pan YS. 1994. Discovery and evidence of the fifth suture zone of Qinghai-Xizang Plateau. *Acta Geophysica Sinica*, 37(2): 184–192 (in Chinese with English abstract)
- Pan YS. 1996. Geological Evolution of the Karakorum and Kunlun Mountains. Beijing: Seismological Press
- Pan YS, Wen SX, Sun DL *et al.* 2000. Geological Evolution of the Karakorum-Kunlun Mountains. Beijing: Science Press, 1–525 (in Chinese)
- Pearce NJG, Perkins WT, Westgate JA, Gorton MP, Jackson SE, Neal CR and Chenery SP. 1997. A compilation of new and published major and trace element data for NIST SRM 610 and NIST SRM 612 glass reference materials. *Geostandards Newsletter*, 21(1): 115–144
- Qu JF, Zhang LF, Zhang J and Zhang B. 2021. Petrology and geochronology on high-pressure pelitic granulite from Bulunkuoile complex in West Kunlun and its tectonic implication. *Acta Petrologica Sinica*, 37(2): 563–574 (in Chinese with English abstract)
- Romer RL and Wright JE. 1992. U-Pb dating of columbites: A geochronologic tool to date magmatism and ore deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56(5): 2137–2142
- Romer RL, Smeds SA and Černý P. 1996. Crystal-chemical and genetic controls of U-Pb systematics of columbite-tantalite. *Mineralogy and Petrology*, 57(3–4): 243–260
- Segal I, Halicz L and Platzner IT. 2003. Accurate isotope ratio measurements of ytterbium by multiple collection inductively coupled plasma mass spectrometry applying erbium and hafnium in an improved double external normalization procedure. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 18(10): 1217–1223
- Selway JB, Breaks FW and Tindle AG. 2005. A review of rare-element (Li-Cs-Ta) pegmatite exploration techniques for the Superior Province, Canada, and large worldwide tantalum deposits. *Exploration and Mining Geology*, 14(1–4): 1–30
- Sláma J, Košler J, Condon DJ, Crowley JL, Gerdes A, Hancher JM, Horstwood MSA, Morris GA, Nasdala L, Norberg N, Schaltegger U, Schoene B, Tubrett MN and Whitehouse MJ. 2008. Plešovice zircon: A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis. *Chemical Geology*, 249(1–2): 1–35
- Sovacool BK, Ali SH, Bazilian M, Radley B, Nemery B, Okatz J and Mulvaney D. 2020. Sustainable minerals and metals for a low-carbon future. *Science*, 367(6473): 30–33
- Sun HT, Li CJ, Wu H, Wang HJ, Qi SJ, Chen GM, Liu ZT and Gao P. 2003. Introduction to West Kunlun Metallogenic Province. Beijing: Geological Publishing House, 1–255 (in Chinese)
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313–345
- Tomaszack PB, Krogstad EJ and Walker RJ. 1998. Sm-Nd isotope systematics and the derivation of granitic pegmatites in southwestern Maine. *The Canadian Mineralogist*, 36(2): 327–337
- Wang AG, Zhang CL, Zhao Y, Guo KY and Dong YG. 2004. Depositional types of the lower part of Nanhuan System on the northern margin of Southwest Tarim and their tectonic significance. *Journal of Stratigraphy*, 28(3): 248–256 (in Chinese with English abstract)
- Wang H, Li P, Ma HD, Zhu BY, Qiu L, Zhang XY, Dong R, Zhou KL, Wang M, Wang Q, Yan QH, Wei XP, He B, Lu H and Gao H. 2017. Discovery of the Bailongshan superlarge lithium-rubidium deposit in Karakorum, Hetian, Xinjiang, and its prospecting implication. *Geotectonica et Metallogenia*, 41(6): 1053–1062 (in Chinese with English abstract)
- Wang H, Gao H, Zhang XY, Yan QH, Xu YG, Zhou KL, Dong R and Li P. 2020. Geology and geochronology of the super-large Bailongshan Li-Rb-(Be) rare-metal pegmatite deposit, West Kunlun orogenic belt, NW China. *Lithos*, 360–361: 105449
- Wang H, Gao H, Ma HD, Zhu BY, Xing CH, Zhou KL, Zhu BZ, Wang ZH, Wang M, Dong R, Yan QH and Zhang XY. 2020. Geological characteristics and pegmatite vein group zoning of the Xuefengling, Xuepen, and Shuangya lithium deposits in Karakorum, Hetian, Xinjiang. *Geotectonica et Metallogenia*, 44(1): 57–68 (in Chinese with English abstract)
- Wang H, Xu YG, Yan QH and Zhang XY. 2021. Research progress on Bailongshan pegmatite type lithium deposit, Xinjiang. *Acta Geologica Sinica*, 95(10): 3085–3098 (in Chinese with English abstract)
- Wang JP. 2008. Geological features and tectonic significance of mélange zone in the Taxkorgan area, West Kunlun. *Geological Bulletin of China*, 27(12): 2057–2066 (in Chinese with English abstract)
- Wang Q, Hou KJ and Zou TR. 2019. Isotopic dating method suitable for rare-metal deposits and its application. *Acta Geologica Sinica*, 93(6): 1523–1532 (in Chinese with English abstract)
- Wei XP, Wang H, Hu J, Mu SL, Qiu ZW, Yan QH and Li P. 2017. Geochemistry and geochronology of the Dahongliutan two-mica granite pluton in western Kunlun orogen: Geotectonic implications. *Geochimica*, 46(1): 66–80 (in Chinese with English abstract)
- Wei XP. 2018. Spatial-temporal pattern, petrogenesis and tectonic implications of the Triassic granitoids from the Western Kunlun Orogen, northwestern China. Ph. D. Dissertation. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 1–181 (in Chinese with English abstract)
- Wei XP, Wang H, Zhang XY, Dong R, Zhu SB, Xing CH, Li P, Yan QH and Zhou KL. 2018. Petrogenesis of Triassic high-Mg diorites in western Kunlun orogen and its tectonic implication. *Geochimica*, 47(4): 363–379 (in Chinese with English abstract)
- Wiedenbeck M, Allé P, Corfu F, Griffin WL, Meier M, Oberli F, von Quadt A, Roddick JC and Spiegel W. 1995. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses. *Geostandards Newsletter*, 19(1): 1–23
- Wu FY, Sun DY, Li HM, Jahn BM and Wilde S. 2002. A-type granites in northeastern China: Age and geochemical constraints on their petrogenesis. *Chemical Geology*, 187(1–2): 143–173
- Wu FY, Yang YH, Xie LW, Yang JH and Xu P. 2006. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology. *Chemical Geology*, 234(1–2): 105–126
- Yan CH, Chen CJ, Cao XZ, Zhang WS, Chen JK, Li SP and Liu PD. 2012. The discovery of the ‘‘Pamir-type’’ iron deposits in Taxkorgan area of Xinjiang and its geological significance. *Geological Bulletin of China*, 31(4): 549–557 (in Chinese with English abstract)
- Yan QH, Qiu ZW, Wang H, Wang M, Wei XP, Li P, Zhang RQ, Li CY and Liu JP. 2018. Age of the Dahongliutan rare metal pegmatite deposit, West Kunlun, Xinjiang (NW China): Constraints from LA-ICP-MS U-Pb dating of columbite-(Fe) and cassiterite. *Ore Geology Reviews*, 100: 561–573
- Yan QH, Wang H, Chi G, Wang Q, Hu H, Zhou KL and Zhang XY. 2022. Recognition of a 600-km-long Late Triassic rare-metal (Li-Rb-Be-Nb-Ta) pegmatite belt in the Western Kunlun orogenic belt, western China. *Economic Geology*, 117(1): 213–236
- Zhang CL, Yu HF, Wang AG and Guo KY. 2005. Dating of Triassic granites in the western Kunlun Mountains and its tectonic significance. *Acta Geologica Sinica*, 79(5): 645–652 (in Chinese with English abstract)
- Zhang CL, Zou HB, Ye XT and Chen XY. 2018. Tectonic evolution of the NE section of the Pamir Plateau: New evidence from field observations and zircon U-Pb geochronology. *Tectonophysics*, 723: 27–40
- Zhang CL, Ma HD, Zhu BY, Ye XT, Qiu L, Zhao HX, Liu XQ, Ding T, Wang Q and Hao XS. 2019. Tectonic evolution of the Western Kunlun-Karakorum Orogenic Belt and its coupling with the mineralization effect. *Geological Review*, 65(5): 1077–1102 (in Chinese with English abstract)
- Zhang L, Wu JL, Zhang YQ, Yang YN, He PL, Xia XP and Ren ZY.

2021. Simultaneous determination of Sm-Nd isotopes, trace-element compositions and U-Pb ages of titanite using a laser-ablation split-stream technique with the addition of water vapor. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 36(11): 2312–2321
- Zhang QC, Liu Y, Wu ZH, Huang H, Li K and Zhou Q. 2019. Late Triassic granites from the northwestern margin of the Tibetan Plateau, the Dahongliutan example: Petrogenesis and tectonic implications for the evolution of the Kangxiwa Palaeo-Tethys. *International Geology Review*, 61(2): 175–194
- Zhang Y, Niu YL, Hu Y, Liu JJ, Ye L, Kong JJ and Duan M. 2016. The syncollisional granitoid magmatism and continental crust growth in the West Kunlun Orogen, China: Evidence from geochronology and geochemistry of the Arkarz pluton. *Lithos*, 245: 191–204
- Zhang YF, Lin XW, Guo QM, Wang X, Zhao DC, Dang C and Yao S. 2015. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and geochemistry of Aral granitic plutons in Koktokay area in the southern Altay margin and their source significance. *Acta Geologica Sinica*, 89(2): 339–354 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Z, Liang T, Feng YG, Yang XQ, Li K, Ding K and Wang YQ. 2019. Geological feature and chronology study of Kangxiwar beryl-bearing muscovite pegmatite in West Kunlun Orogen, Xinjiang. *Northwestern Geology*, 52(1): 75–88 (in Chinese with English abstract)
- Zhou KL. 2019. Pegmatite evolution characteristics and constraints on genesis of Bailongshan lithium deposit, West-Kunlun, China. Ph. D. Dissertation. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences (in Chinese with English abstract)
- ### 附中文参考文献
- 陈富文, 李华芹, 王登红, 蔡红, 陈文. 1999. 中国阿尔泰山带燕山期成岩成矿同位素年代学新证据. *科学通报*, 44(11): 1142–1148
- 陈剑锋, 张辉, 张锦煦, 马慧英. 2018. 新疆可可托海3号伟晶岩脉锆石 U-Pb 定年、Hf 同位素特征及地质意义. *中国有色金属学报*, 28(9): 1832–1844
- 陈婷, 闫书一, 康自华. 2007. 我国盐湖卤水提锂的研究进展. *盐业与化工*, 36(2): 19–21
- 韩芳林. 2006. 西昆仑增生造山带演化及成矿背景. 博士学位论文. 北京: 中国地质大学(北京)
- 计文化, 韩芳林, 王炬川, 张俊量. 2004. 西昆仑于田南部苏巴什蛇绿混杂岩的组成、地球化学特征及地质意义. *地质通报*, 23(12): 1196–1201
- 计文化, 李荣社, 陈守建, 何世平, 赵振明, 边小卫, 朱海平, 崔继岗, 任绢刚. 2011. 甜水海地块古元古代火山岩的发现及其地质意义. *中国科学(地球科学)*, 41(9): 1268–1280
- 李杭, 洪涛, 杨智全, 陈建中, 柯强, 王学海, 牛磊, 徐兴旺. 2020. 稀有金属花岗伟晶岩锆石、锡石与钨钽铁矿 U-Pb 和白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测年对比研究——以阿尔金中段吐格曼北锂铍矿床为例. *岩石学报*, 36(9): 2869–2892
- 刘锋, 曹峰, 张志欣, 李强. 2014. 新疆可可托海近3号脉花岗岩成岩时代及地球化学特征研究. *岩石学报*, 30(1): 1–15
- 刘丽君, 王登红, 侯可军, 田世洪, 赵悦, 付小方, 袁瀚平, 郝雪峰. 2017. 锂同位素在四川甲基卡新三号矿脉研究中的应用. *地学前缘*, 24(5): 167–171
- 刘文平, 王核, 仝来喜, 吴玉峰, 黄朝阳, 胡军. 2013. 西昆仑塔什库勒干布伦阔勒群的岩石地球化学特征及变质 P-T 轨迹. *岩石学报*, 29(3): 923–937
- 潘裕生. 1994. 青藏高原第五缝合带的发现与论证. *地球物理学报*, 37(2): 184–192
- 潘裕生, 文世宣, 孙东立等. 2000. 喀喇昆仑山-昆仑山地区地质演化. 北京: 科学出版社, 1–525
- 曲军峰, 张立飞, 张进, 张波. 2021. 西昆仑布伦阔勒岩群中泥质高压麻粒岩的岩石学、年代学及其地质意义. *岩石学报*, 37(2): 563–574
- 孙海田, 李纯杰, 吴海, 王宏军, 祁世军, 陈贵民, 刘振涛, 高鹏. 2003. 西昆仑金属成矿省概论. 北京: 地质出版社, 1–255
- 王爱国, 张传林, 赵宇, 郭坤一, 董永观. 2004. 塔里木西南缘南华系下部沉积作用及其构造意义. *地层学杂志*, 28(3): 248–256
- 王核, 李沛, 马华东, 朱炳玉, 邱林, 张晓宇, 董瑞, 周楷麟, 王敏, 王茜, 闫庆贺, 魏小鹏, 何斌, 卢鸿, 高昊. 2017. 新疆和田县白龙山超大型伟晶岩型锂铍多金属矿床的发现及其意义. *大地构造与成矿学*, 41(6): 1053–1062
- 王核, 高昊, 马华东, 朱炳玉, 邢春辉, 周楷麟, 朱宝彰, 王振宏, 王敏, 董瑞, 闫庆贺, 张晓宇. 2020. 新疆和田县雪凤岭锂矿床、雪盆锂矿床和双牙锂矿床地质特征及伟晶岩脉群分带初步研究. *大地构造与成矿学*, 44(1): 57–68
- 王核, 徐义刚, 闫庆贺, 张晓宇. 2021. 新疆白龙山伟晶岩型锂矿床研究进展. *地质学报*, 95(10): 3085–3098
- 王建平. 2008. 西昆仑塔什库勒干混杂岩的地质特征及其大地构造意义. *地质通报*, 27(12): 2057–2066
- 王倩, 侯可军, 邹天人. 2019. 适合于稀有金属矿床的同位素定年方法及其应用. *地质学报*, 93(6): 1523–1532
- 魏小鹏, 王核, 胡军, 慕生禄, 丘增旺, 闫庆贺, 李沛. 2017. 西昆仑大红柳滩二云母花岗岩地球化学和地质年代学研究及其地质意义. *地球化学*, 46(1): 66–80
- 魏小鹏. 2018. 西昆仑造山带三叠纪花岗岩类时空分布、岩石成因及其构造背景. 博士学位论文. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 1–181
- 魏小鹏, 王核, 张晓宇, 董瑞, 朱世波, 邢春辉, 李沛, 闫庆贺, 周楷麟. 2018. 西昆仑东部晚三叠世高镁闪长岩的成因及其地质意义. *地球化学*, 47(4): 363–379
- 新疆地质矿产局. 1993. 新疆区域地质志. 北京: 地质出版社, 23–78
- 燕长海, 陈曹军, 曹新志, 张旺生, 陈俊魁, 李山坡, 刘品德. 2012. 新疆塔什库勒干地区“帕米尔式”铁矿床的发现及其地质意义. *地质通报*, 31(4): 549–557
- 张传林, 于海锋, 王爱国, 郭坤一. 2005. 西昆仑西段三叠纪两类花岗岩年龄测定及其构造意义. *地质学报*, 79(5): 645–652
- 张传林, 马华东, 朱炳玉, 叶现韬, 邱林, 赵海香, 刘晓强, 丁腾, 王倩, 郝晓妹. 2019. 西昆仑喀喇昆仑造山带构造演化及其成矿效应. *地质论评*, 65(5): 1077–1102
- 张亚峰, 蔺新望, 郭岐明, 王星, 赵瑞昌, 党晨, 姚珊. 2015. 阿尔泰山南缘可可托海地区阿拉尔花岗岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年、岩石地球化学特征及其源区意义. *地质学报*, 89(2): 339–354
- 张泽, 梁婷, 凤永刚, 杨秀清, 李侃, 丁坤, 王艺茜. 2019. 新疆西昆仑造山带康西瓦含绿柱石白云母伟晶岩的地质特征与年代学研究. *西北地质*, 52(1): 75–88
- 周楷麟. 2021. 西昆仑白龙山锂矿伟晶岩演化特征及对矿床成因的制约. 博士学位论文. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所