

# 阿尔金中段库木萨依伟晶岩型锂矿床独居石U-Pb定年和云母的化学组成分析及其地质意义

钟金长<sup>1</sup>, 张勇<sup>1,2\*</sup>, 安倩<sup>3</sup>, 黄杰<sup>1,4</sup>, 潘家永<sup>2</sup>, 张笑天<sup>2</sup>, 韩善楚<sup>2</sup>, 严杰<sup>1,2</sup>, 张思远<sup>1</sup>,  
戴浩槿<sup>1</sup>, 王福梅<sup>1</sup>, 姜华阳<sup>1</sup>, 张浩赛<sup>1</sup>, 陈俊豪<sup>1</sup>, 章霞<sup>1</sup>

1. 东华理工大学战略性矿产成矿理论与深部预测江西省重点实验室, 江西 南昌 330013;
2. 东华理工大学核资源与环境国家重点实验室, 江西 南昌 330013;
3. 江西省核工业地质调查院, 江西 南昌 330038;
4. 江西科技师范大学, 江西 南昌 330030



**摘要:**近年来阿尔金地区锂矿找矿工作取得巨大突破,发现了一系列加里东期锂辉石伟晶岩型锂矿床,其中印支期锂成矿潜力和伟晶岩型锂矿床的迁移富集过程是备受关注的科学问题。库木萨依锂矿床是一个中型花岗伟晶岩型锂矿床,具有超大型远景规模,其赋矿围岩为黑云母片岩,矿体两侧发育明显的云英岩化等热液蚀变。通过开展详细的野外地质调查,并结合显微岩相学、电子探针和LA-ICP-MS等分析测试方法,厘定了锂成矿伟晶岩的形成时代,揭露了伟晶岩和围岩中不同类型云母矿物学组分特征,探讨了Li等稀有金属元素迁移演化的规律。库木萨依锂矿床的独居石U-Pb同位素研究显示,含斑中粗粒电气石锂辉石花岗伟晶岩和白云母花岗伟晶岩形成年龄分别为(224.6±3.0)Ma和(224.2±3.6)Ma,形成时代均为印支期。库木萨依锂矿床云母矿物研究揭示了岩浆—热液的演化过程,即:在岩浆活动阶段,锂辉石的沉淀析出,消耗了岩浆体系中的大量Li元素,而后形成含锂白云母(岩浆型);在岩浆热液蚀变围岩过程中,从围岩中带出一定量的锂,再沉淀形成富锂白云母(Li<sub>2</sub>O含量为1.8%~2.3%),之后形成的热液白云母(H1-H2-H3)不断消耗热液中的Li元素,直至最晚阶段的低锂热液白云母(H4)(Li<sub>2</sub>O含量为0.08%~0.15%)的形成。综合研究表明,岩浆作用叠加热液作用是富锂云母型锂矿床锂富集成矿的关键因素之一。库木萨依锂矿床印支期锂成矿时代的厘定和岩浆—热液作用锂迁移富集过程的揭示,为阿尔金地区锂矿勘查提供了新的年代学证据和找矿信息。

**关键词:**云母;独居石;LA-ICP-MS分析方法;U-Pb同位素;伟晶岩型锂矿;库木萨依;阿尔金地区

中图分类号:P618.71 文献标志码:A 文章编号:1005-2518(2025)04-0696-21 DOI:10.11872/j.issn.1005-2518.2025.04.034

引用格式:钟金长,张勇,安倩,等.阿尔金中段库木萨依伟晶岩型锂矿床独居石U-Pb定年和云母的化学组成分析及其地质意义[J].黄金科学技术,2025,33(4):696-716.ZHONG Jinchang,ZHANG Yong,AN Qian,et al.Monazite U-Pb Geochronology and Mica Chemistry of the Kumusayi Pegmatite-Type Li Deposit, Central Altyn Tagh: Geological Implications[J].Gold Science and Technology,2025,33(4):696-716.

收稿日期:2024-12-30;修订日期:2025-04-17

**基金项目:**新疆自治区重大科技专项项目“昆仑—阿尔金地区锂等稀有稀土矿产成矿背景与构造演化”(编号:2023A03002)、江西省自然科学基金资助项目“江西省岩浆作用有关战略性矿产成矿理论与深部预测研究”(编号:20242BAB27002)、国家重点研发计划项目“梯多金属矿床找矿模型与勘查方法研究”(编号:2023YFC2906803)、国家自然科学基金项目“赣西北大湖塘钨矿岩浆—热液演化与钨富集成矿精细过程研究”(编号:42062006)、江西省自然科学基金项目“锂在岩浆—热液过程中的富集机制:云母锂同位素和原位成分约束”(编号:20232BAB213067)和江西省地质局科技计划项目“江西省钨锡矿床稀有金属富集机制研究”(编号:2024JXDZKJRC05)联合资助

**作者简介:**钟金长(1998—),男,江西赣州人,硕士研究生,从事地质学研究工作。E-mail:jinchang.zhongecut@foxmail.com

\***通信作者:**张勇(1983—),男,江西新余人,副教授,从事矿床地球化学研究工作。E-mail:zhycy2004@163.com

© Editorial Department of *Gold Science and Technology* (CC BY-NC-ND)

锂是一种稀有金属,因被广泛应用于新能源汽车、储能技术和可控核聚变等领域,被赋予“绿色高能金属”“白色石油”之称。随着全球对锂资源需求的持续增长,寻找锂矿资源已成为当务之急(王秋舒等,2016,2019;李庆哲等,2025)。目前已发现的锂矿床主要有3种类型,分别是卤水型、硬岩型和黏土型(王核等,2022;徐喆等,2024;郭春丽等,2024)。花岗伟晶岩型锂矿属于硬岩型,在这3类矿床中,伟晶岩型锂矿因其品位高且常伴生铍(Be)、铌(Nb)、钽(Ta)、铷(Rb)和铯(Cs)等稀有元素,而占据主导地位(Wang et al,2013;王核等,2021;王登红等,2022;刘雪等,2024)。

阿尔金地区花岗伟晶岩相当发育,近几年陆续发现一批加里东期锂矿床。除超大型规模的黄龙岭锂矿之外,其余大多为中型锂矿床,如:库木萨依锂矿、阿亚克(吐格曼北)锂矿、瓦石峡南锂矿、吐格曼锂铍矿、恰达克锂矿、塔什达坂锂矿和塔木切锂矿(徐兴旺等,2019;王核等,2022;张焕等,2022)。其中,库木萨依伟晶岩型锂矿床作为新疆在新一轮找矿突破战略行动中新发现的锂矿,展现出巨大的潜力,有望成为超大型锂矿床(汪辉等,2024),但其成矿时代和成矿机理尚不清楚。

本文以库木萨依锂矿床作为研究对象,采用独居石LA-ICP-MS U-Pb定年技术精确厘定其成矿年龄,并采用电子探针显微分析(EPMA)和激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)相结合的技术手段,对库木萨依锂矿床中的云母矿物进行原位微区精细观察和分析,系统研究云母矿物的类型及微量元素变化特征,从而反演岩浆和热液性质及其物理化学条件。在此基础上,初步探讨库木萨依锂矿床中Li和Rb等稀有金属元素的富集机制及其成矿潜力,为阿尔金地区印支期锂矿勘查提供新的年代学和矿物学证据,进一步指导该区域地质找矿工作。

## 1 区域地质背景

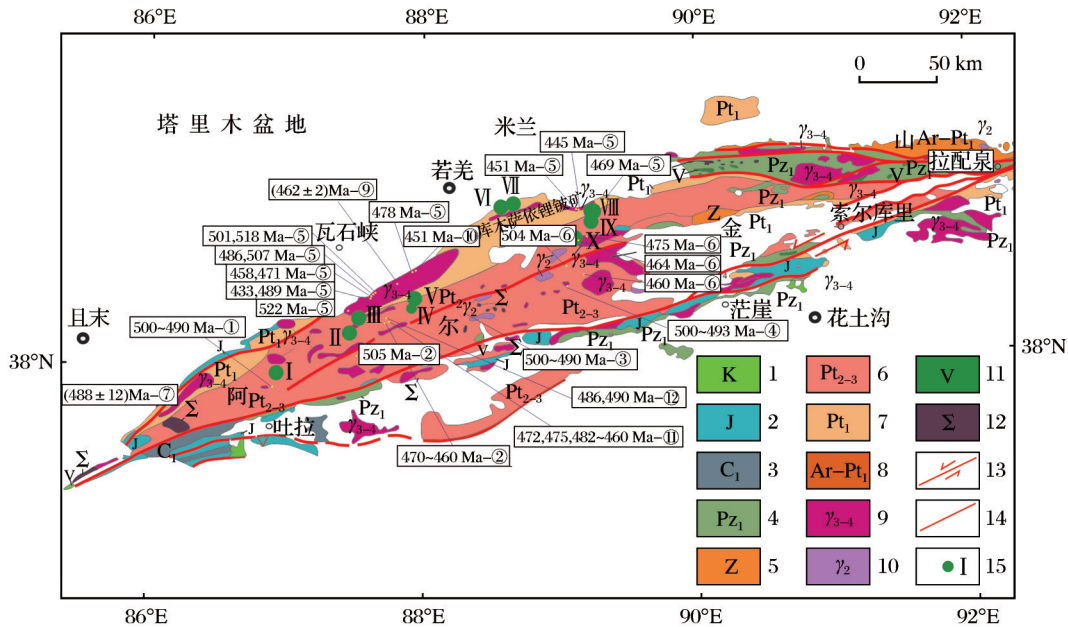
阿尔金造山带位于青藏高原北缘,北接柴达木地块,南邻祁连—昆仑造山带与塔里木板块,该复合造山带形成于原特提斯洋俯冲—碰撞—增生过程(Liu et al,2012;Cao et al,2019;Hong et al,2021)。从北至南,该区域被划分为4个部分,分别

是阿北地块、红柳沟—拉配泉混杂岩带、阿中地块和阿南俯冲碰撞杂岩带(Liu et al,2012;Wang et al,2013)(图1)。该区域发育多样化的沉积序列、广泛的岩浆活动及多期次构造变形,具有典型的“块—带相间”构造格局(葛肖虹等,2002;袁四化,2006;程晓敢等,2008)。

阿尔金中段位于红柳沟—拉配泉混杂岩带以南,阿南俯冲碰撞杂岩带以北,是阿尔金造山带稀有金属成矿集中区,也是本文的主要研究地区。阿中地块北部主要出露中元古界长城系巴什库尔干岩群(ChB)和蓟县系塔昔达坂群(JxT),南部则以新元古界青白口系索尔库里群(Pt<sub>3</sub>Qb)为主,东部有少量震旦系。该区域发育有大量的NE和NNE向断裂。巴什库尔干岩群、塔昔达坂群和索尔库里群沉积特征相似,三者之间呈断裂接触。该区域地层呈NW-SE向展布,下构造层(ChB)与上构造层(JxT)之间为一区域性韧性滑脱剪切带,断裂主要呈NEE-SWW向切穿地层(闵壮等,2024)。

阿尔金中段地区的花岗岩岩浆作用主要发生在早古生代,尤其是中奥陶世晚期,与塔里木板块和柴达木地块的碰撞以及南阿尔金洋的闭合紧密相关。这一时期的后碰撞伸展阶段促使大量花岗岩和花岗伟晶岩的侵入,对吐格曼地区稀有金属矿床的形成起到关键作用。吐格曼北锂铍矿床的形成时代为436.0~434.6 Ma和415.4~414.7 Ma,与区域上的碰撞或后碰撞伸展事件相吻合(徐兴旺等,2019;李杭等,2020,2022)。阿尔金中段的大通沟花岗岩体主要由二长花岗岩构成,年龄为(353.7±1.1)Ma,其形成与造山带根部块体的拆沉作用相关(菅坤坤等,2018)。阿尔金断裂带中段的花岗质、角闪质糜棱岩及糜棱岩化岩石形成于223~226 Ma,是左行走滑剪切作用下深熔的结果(李海兵等,2001)。

阿尔金地区矿产资源十分丰富,库木萨依位于阿尔金陆缘地块金、铁、稀有金属、玉石、石膏、石棉、白云母、白云岩和石英岩成矿带,该成矿带包括瓦石峡矿田(瓦石峡南、星新、牙恰甫和刀把沟)、库木萨依矿田(库木萨依南、库木萨依、西云沟、云母山和砂梁西)、塔什达坂矿田(塔什达坂、塔什达坂北、塔木切—稀长沟和塔什库里)和阿亚克矿田(吐格曼、阿亚克和阿亚克东)。阿尔金地区稀有金属成岩成矿时代主要为加里东期(Li et al,2013;徐兴



1. 白垩系; 2. 侏罗系; 3. 下石炭统; 4. 下古生界; 5. 震旦系; 6. 中-上元古界; 7. 下元古界; 8. 下元古-太古代; 9. 古生代花岗岩类; 10. 元古代花岗岩类; 11. 辉长岩; 12. 超基性岩; 13. 走滑断层; 14. 断层; 15. 锂铍矿床及编号; 矿床名称如下: I-江嘎萨依锂矿; II-瓦石峡南锂矿; III-恰达克锂矿; IV-吐格曼锂矿; V-阿亚克锂矿; VI-库木萨依锂矿; VII-砂梁西锂矿; VIII-黄龙岭锂矿; IX-塔木切锂矿; X-塔什达坂锂矿; 图中测年数据的文献来源: ①-Zhang et al, 2005; ②-曹玉亭等, 2009; ③-Liu et al, 2012; ④朱小辉等, 2014; ⑤-Liu et al, 2016; ⑥-刘春华, 2014; ⑦-Cowgill et al, 2003; ⑧-张若愚等, 2016; ⑨-曹玉亭等, 2010; ⑩-康磊等, 2013; ⑪-Gao et al, 2021; ⑫-Hong et al, 2021; ⑬徐兴旺等, 2019

图1 阿尔金构造带地质简图与锂铍矿床分布图(修改自 Li et al, 2023; 王核等, 2023)

Fig. 1 Geological map and lithium-beryllium deposit distribution map of the Altyn Orogenic Belt (modified after Li et al, 2023; Wang et al, 2023)

旺等, 2019; 李杭等, 2022), 目前仅发现砂梁西锂矿的伟晶岩成矿时代为印支期(沈明宏等, 2024)。

## 2 矿床地质特征

### 2.1 矿区地质特征

库木萨依锂矿床地处新疆若羌县县城东南方直线距离 40 km 处, 位于阿尔金造山带的阿中地块北缘(图 1)。2019 年, 新疆地质矿产勘查开发局第三地质大队在自主探矿权勘探过程中发现了该矿床。2022—2023 年, 在新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局自筹资金的支持下, 研究人员在该矿床开展了进一步勘探和成矿潜力评估工作(华克强等, 2024)。

该矿床地层总体呈 NW-SE 走向, 主要由碎屑岩、碳酸盐岩和火山岩单元组成。地层以长城系巴什库尔干群 a 岩组(ChBa)为主, 主要岩性包括黑云母石英片岩和白云质大理岩, 夹有花岗伟晶岩脉。

这些岩石经历了中-高级变质作用和后期变形, 原始沉积构造虽部分被改造, 但整体仍保存较好。在矿区范围内未见花岗岩出露, 但距矿区南侧约 2 km 处出露有库木达坂早古生代花岗岩体, 主要岩性为细粒和中粒黑云母二长花岗岩(王核等, 2023)。

由于受变质作用和后期改造作用的共同影响, 库木萨依锂矿床发育褶皱和次级褶皱。在库木萨依锂矿床南侧发育有阿尔金大断裂, 呈 NEE 向延伸, 为一张扭性断裂, 倾向时北时南, 倾角为 68°~80°, 该断裂对区内地层分布、岩浆活动和成矿作用具有控制作用。

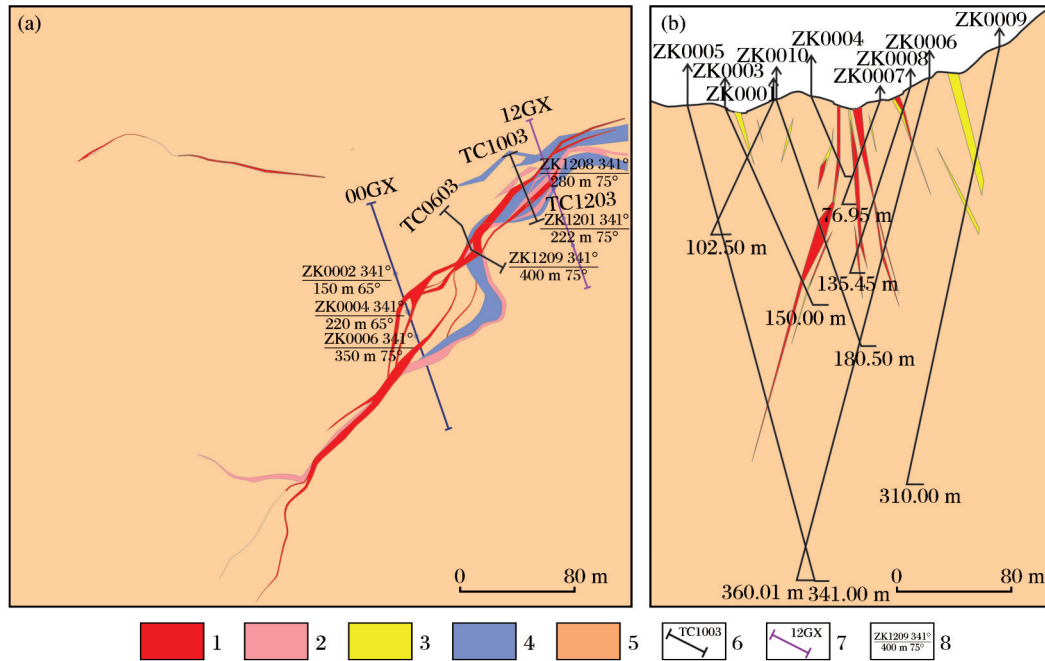
### 2.2 矿体特征

在库木萨依锂矿床内, 发现了 2 条含锂辉石伟晶岩脉(编号:  $\rho Li_6$  和  $\rho Li_8$ )。伟晶岩脉体在平面上表现为脉状, 呈 NE 向展布, 往西南方向延伸尖灭。锂、钽矿体长度为 200~1 600 m, 宽度为 0.5~8.0 m, 脉体局部膨大, 通常呈单体或分支复合状, 主要由含电气石锂辉石花岗伟晶岩组成[图 2(a)]。钻孔

最大探明深度为360 m,含锂辉石花岗伟晶岩脉体最大深度为314 m,多数含矿伟晶岩脉体在深部延伸超过150 m[图2(b)]。

其中, $\rho\text{Li}_6$ 号含锂辉石伟晶岩脉位于研究区东侧中部,呈薄板状,产于灰黑色黑云母石英片岩中,地表出露长度约为170 m,宽度为0.5~1.0 m,脉体

倾向约为 $350^\circ$ ,倾角为 $65^\circ\sim 75^\circ$ (图2和图3); $\rho\text{Li}_8$ 号含锂辉石伟晶岩脉位于 $\rho\text{Li}_6$ 号南侧60 m处,呈厚板状,产于黑色黑云母石英片岩中,地表长度约为400 m,宽度为1~5 m,倾向约为 $354^\circ$ ,倾角为 $70^\circ\sim 80^\circ$ 。这两条伟晶岩脉均呈白—灰白色,具有粗粒结构和块状构造(图3)。



1. 锂、钽矿体;2. 锂、钽矿化体;3. 钽矿体;4. 无矿化伟晶岩;5. 黑云母片岩;6. 探槽及编号;7. 勘探线及编号;8. 钻孔参数

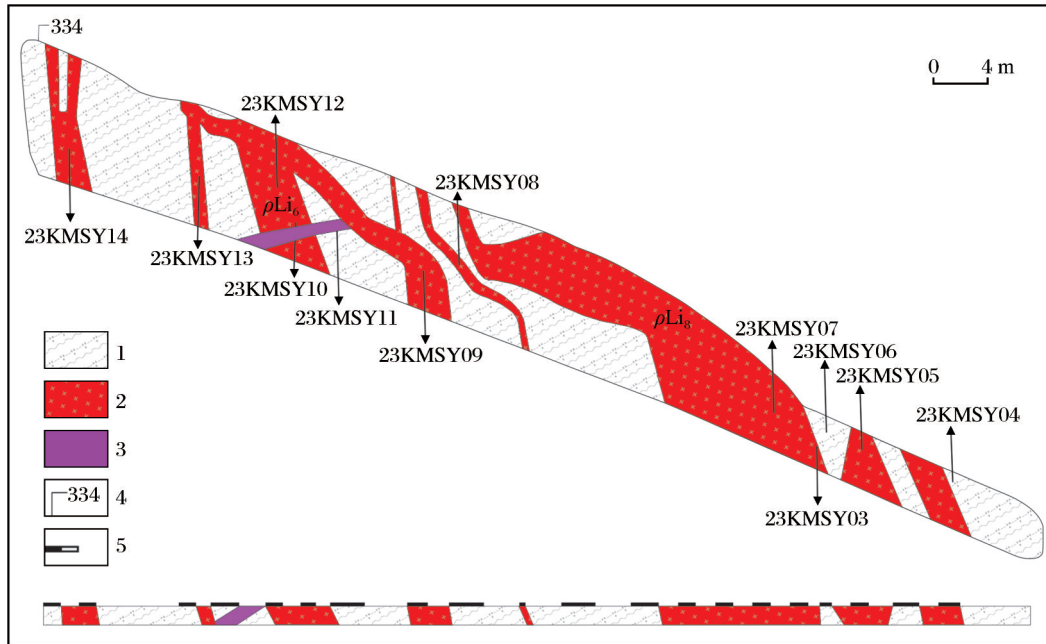
图2 库木萨依锂矿床地质简图(a)和勘探线剖面图(b)(新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第三地质大队,2022)

Fig. 2 Geological map(a) and exploration line profile(b) of the Kumusayi lithium deposit(The Third Geological Brigade of the Bureau of Geological and Mineral Resource Exploration and Development of Xinjiang, 2022)

### 2.3 矿石特征

库木萨依锂矿床的主要矿物有锂辉石和锂云母,还有少量绿柱石和铌钽铁矿。这些矿物产自锂辉石花岗伟晶岩脉,伴生的Be、Rb、Cs、Nb和Ta等元素均达到综合利用的要求。锂矿石中的 $\text{Li}_2\text{O}$ 品位为0.63%~2.86%,平均品位为1.63%; $\text{BeO}$ 品位为0.02%~0.09%; $\text{Rb}_2\text{O}$ 品位为0.05%~0.27%; $\text{Cs}_2\text{O}$ 品位为0.02%~1.46%; $\text{Nb}_2\text{O}_5$ 品位为0.01%~0.07%; $\text{Ta}_2\text{O}_5$ 品位为0.01%~0.06%。锂辉石通常呈自形柱状晶体,与脉石矿物的接触边界清晰且平直。锂辉石晶体内部含有少量石英包裹体,而方解石、绢云母和黏土矿物则充填在解理面和裂隙中,观察到部分锂辉石被白云母、石英和钠长石集合体交代。脉石矿物主要由石英和钠长石组成。

围岩黑云母片岩呈棕黑色[(图4(a))],显微镜下观察主要矿物有原生黑云母(Bt)和铁橄榄石等暗色矿物,其次为石英和纤闪石[(图4(b)、4(c))].白云母化黑云母片岩手标本呈灰白色[(图4(d))],主要矿物有石英、黑云母、白云母和斜长石,副矿物有磷灰石、锆石和少量稀土矿物等[(图4(e)、4(f))].显微镜观察可见白云母填充在黑云母裂隙中[图4(f)],黑色部分为交代平衡黑云母(Btr),灰白色部分为热液白云母(H4),二者在背散射图中可以见到清晰的明暗变化。强白云母化黑云母片岩手标本呈灰白色,清晰显示伟晶岩与围岩的接触带[图4(g)、4(h)],主要矿物有白云母、黑云母和石英[图4(i)],左侧靠近伟晶岩,矿物颗粒较大,右侧云英岩化现象显著。锂辉石花岗伟晶岩呈白色[图4(j)],



1.黑云母石英片岩;2.含锂辉石伟晶岩脉;3.无矿化锂辉石伟晶岩脉;4.倾角;5.刻槽取样位置

图3 新疆若羌县库木萨依一带锂铍稀有金属矿探槽素描图(新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第三地质大队,2022)

Fig. 3 Schematic diagram of the exploration trench for lithium, beryllium, and rare metal in the Kumusayi area of Ruoqiang County, Xinjiang (The Third Geological Brigade of the Bureau of Geological and Mineral Resource Exploration and Development of Xinjiang, 2022)

主要矿物有石英、钠长石、斜长石、白云母和锂辉石 [图4(k)、4(l)],伴生矿物有锆石、磷灰石、铌钽铁矿和稀土矿物。白云母呈自形板片状,片径为0.5~5.0 mm,伟晶岩形成过程中形成的岩浆白云母(P1) [图4(l)],其内部常被晚期石英等矿物充填。

### 3 样品采集与分析方法

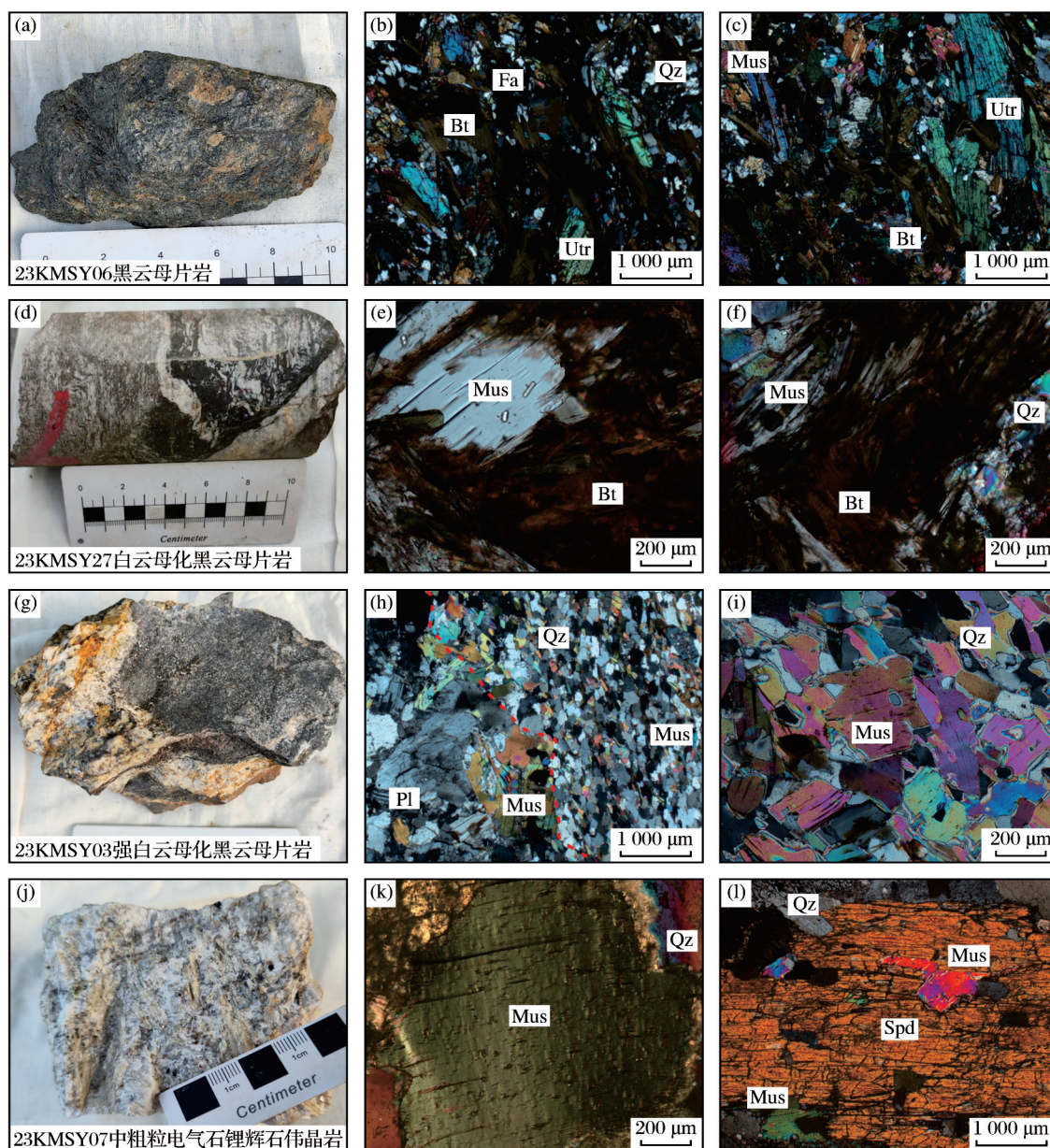
#### 3.1 样品采集

本研究以库木萨依花岗伟晶岩、围岩及其接触带为研究对象,系统选取具有代表性的花岗伟晶岩脉样品,包括含锂辉石花岗伟晶岩(样品编号:23KMSY07)、无矿化花岗伟晶岩带(样品编号:23KMSY11)、围岩(样品编号:23KMSY06)和接触蚀变带(样品编号:23KMSY27和23KMSY03)(图3和表1),并将这些代表性样品制备成薄片。通过显微镜、扫描电镜和电子探针的观察和分析,筛选出不同产出部位和成因类型的云母矿物,然后对这些矿物进行主量元素和微量元素分析。同时,对含斑中粗粒电气石锂辉石花岗伟晶岩(样品编

号:23KMSY07)和白云母花岗伟晶岩(样品编号:23KMSY26)进行LA-ICP-MS独居石U-Pb同位素测年。

#### 3.2 锂辉石伟晶岩独居石U-Pb年龄分析

本研究采用LA-ICP-MS技术对独居石进行U-Pb同位素定年分析,测试工作由东华理工大学核资源与环境国家重点实验室完成。测试系统由Coherent公司GeoLasHD 193 nm准分子激光剥蚀系统与Agilent 7900型ICP-MS联机构成,以氦气作为载气、氩气作为补偿气,通过T型玻璃接口混合导入质谱仪(Hu et al, 2015)。独居石分析参数设置如下:激光频率为3 Hz,束斑直径为16  $\mu\text{m}$ 、能量密度为3  $\text{J}/\text{cm}^2$ ;采用国际标样TS-Mnz (Budzyń et al, 2021)进行同位素分馏校正,Bananeira标样监控数据质量,样品U-Th-Pb含量以NIST SRM 610标样归一化,数据分析使用ICPMSDataCal 11.0软件完成信号积分与时间漂移校正(Liu et al, 2008; Liu et al, 2010)。U-Pb谐和图通过Isoplot 4.15/Ex\_ver3程序生成,所有结果均通过标准样品验证,确保数据可靠。



(a)黑云母片岩;(b)、(c)黑云母片岩中石英、黑云母、铁橄榄石和纤闪石特征;(d)白云母化黑云母片岩;(e)、(f)白云母化黑云母片岩中白云母、黑云母和石英等矿物特征;(g)强白云母化黑云母片岩;(h)强白云母化黑云母片岩中铁锂云母、斜长石和石英等矿物特征;(i)强白云母化黑云母片岩中锂多硅白云母和石英等矿物特征;(j)中粗粒电气石锂辉石伟晶岩;(k)中粗粒电气石锂辉石伟晶岩中白云母和石英特征;(l)中粗粒电气石锂辉石伟晶岩中锂辉石、白云母和石英等矿物特征;Pl-斜长石;Bt-黑云母;Mus-白云母;Spd-锂辉石;Qz-石英;Fa-铁橄榄石;Utr-纤闪石

图4 库木萨依锂矿伟晶岩及围岩蚀变带手标本及矿物特征

Fig. 4 Hand specimens and mineral characteristics of pegmatite and wall rock altered zones in the Kumusayi lithium deposit

### 3.3 云母电子探针分析

云母电子探针分析测试工作由东华理工大学核资源与环境国家重点实验室完成,使用 JEOL Super-probe JXA-8530F Plus 型电子探针微区分析

仪对不同岩石类型中的主要岩浆矿物和蚀变矿物进行分析。具体测试参数如下:加速电压为 15 kV,束流为 20 nA(波长色散谱模式),束斑直径为 5 μm。主要分析元素包括 F、SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Cl、K<sub>2</sub>O、MgO 和

表1 库木萨依锂矿采样清单  
Table 1 Sampling list of the Kumusayi lithium deposit

样品编号	采样位置	手标本定名
23KMSY03	88°37'50.37"E, 38°56'25.23"N	强白云母化的黑云母片岩
23KMSY06	88°37'50.40"E, 38°56'25.26"N	黑云母片岩, 围岩(云母片岩)
23KMSY07	88°37'50.41"E, 38°56'25.27"N	含斑中粗粒电气石锂辉石花岗伟晶岩
23KMSY10	88°37'50.44"E, 38°56'25.30"N	电气石锂辉石花岗伟晶岩
23KMSY11	88°37'50.45"E, 38°56'25.31"N	白云母花岗伟晶岩(顺层)
23KMSY26	88°37'50.55"E, 38°56'25.41"N	白云母花岗伟晶岩(顺层不含电气石)
23KMSY27	钻孔ZK0412, 取样深度为50 m	白云母化的黑云母石英片岩

FeO等, Li<sub>2</sub>O和H<sub>2</sub>O则通过计算得出。所有数据经过ZAF校正程序统一校正。所用标样包括黄玉(F)、硬玉(Si、Na)、黑云母(Al、K、Mg、Fe)、蔷薇辉石(Mn)、金红石(Ti)、透辉石(Ca)和铍方钠石(Cl)等。

### 3.4 云母LA-ICP-MS原位成分分析

云母矿物微区原位微量元素分析测试工作由东华理工大学核资源与环境国家重点实验室完成。采用Agilent 7900型四极杆电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)联用ASI RESOLUTION S-155激光剥蚀系统, 配备TwoVol2剥蚀池。具体分析参数如下: 束斑直径为44 μm, 激光频率为4 Hz, 能量密度为10.0 J/cm<sup>2</sup>; 测试流程包括20 s背景值采集(激光关闭)、40 s样品信号采集(激光开启)和30 s清洗时间。分析使用NIST 610和NIST 612作为参考标准, EPMA测定的Si作为内参考元素。数据处理通过IOLITE4软件进行离线校准, 确保氧化物矿物内部标准化, 云母微量元素分析误差小于10%(Pearce et al, 1997)。

## 4 测试结果

### 4.1 独居石U-Pb同位素特征

库木萨依含斑中粗粒电气石锂辉石花岗伟晶岩和白云母花岗伟晶岩中的独居石矿物呈浅黄色至无色透明, 发育自形一半自形短柱状或板状晶形, 晶粒直径为40~180 μm。背散射电子(BSE)图像显示其内部结构均一, 未见明显环带, 但部分颗粒可见晶棱圆化现象及局部港湾状溶蚀结构。含斑中粗粒电气石锂辉石花岗伟晶岩中独居石U-Pb同位素测定结果见表2, 对20颗独居石进行LA-ICP-MS U-Pb同位素测年, 共获得14个有效点, 利

用分布于谐和线或靠近谐和线上的14个测点计算加权平均年龄, 获得年龄值为(224.6±3.0) Ma( $n=14$ ,  $MSWD=0.99$ )(表2, 图5)。对白云母花岗伟晶岩中的20颗独居石进行LA-ICP-MS U-Pb同位素测年, 共获得10个有效点, 利用分布于谐和线或靠近谐和线上的10个测点计算加权平均年龄, 获得年龄值为(224.2±3.6) Ma( $n=10$ ,  $MSWD=1.8$ )(表2, 图5)。

### 4.2 云母矿物岩相学特征

根据产出位置和显微镜下的结构特征, 库木萨依锂矿床中的云母矿物主要可划分为3种类型, 分别是原生云母、交代平衡云母和热液白云母。其中, 原生云母包括: 来自围岩黑云母片岩的原生黑云母(Bt)[图6(a)、6(b)], 为铁黑云母; 来自含锂辉石伟晶岩的岩浆白云母(P1)[图6(c)、6(d)], 为铁锂云母; 来自白云母花岗伟晶岩的岩浆白云母(P2)[图6(e)、6(f)], 为铁锂云母。交代平衡黑云母(Btr)产自白云母化黑云母片岩[图6(g)、6(h)], 在形态和成分上, 与热液白云母存在明显差异, 表现为亮度更高且颗粒较大, 其矿物分类图解显示为富铁黑云母。

根据形态特征和产出位置, 热液白云母可划分为4类: 第一类产自强蚀变带—强白云母化黑云母片岩中的热液白云母1(H1)[图6(i)、6(j)], 在分类图解中为锂多硅白云母, 背散射图像显示其内部包裹石英颗粒, 且有明显的明暗变化, 明亮部分Fe含量较高; 第二类和第三类产自强蚀变带—强白云母化黑云母片岩中的热液白云母2(H2)和热液白云母3(H3)[图6(k)、6(l)], 其分类图解均为铁锂云母, H2云母颗粒比H3云母更细小, Fe和Li含量均高于H3云母; 第四类产自弱蚀变带—白云母化黑云母片岩中的热液白云母(H4)[图6(f)、6(l)], 该类热

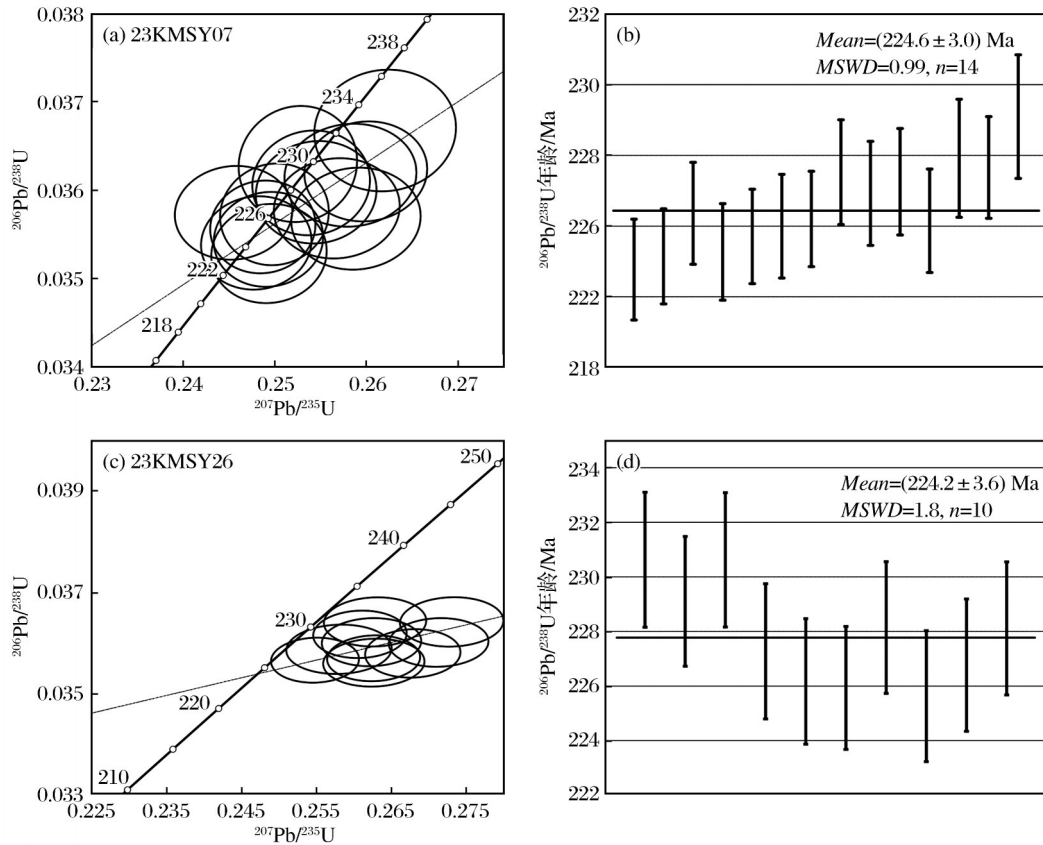
表2 库木萨依锂铍稀有金属矿床LA-ICP-MS独居石原位微区U-Pb定年数据  
 Table 2 U-Pb dating data of LA-ICP-MS monazite primary micro-area in the Kumusayi lithium-beryllium rare metal deposit

测点编号	元素含量/( $\times 10^{-6}$ )		同位素比值						同位素年龄值/Ma					
	Pb	U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$2\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$2\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$2\sigma$
23KMSY07-1	12 021	48 801	0.0508	0.0011	0.2480	0.0049	0.0354	0.0004	235.3	48.1	224.9	4.0	224.3	2.7
23KMSY07-2	10 040	33 026	0.0521	0.0012	0.2568	0.0056	0.0358	0.0005	300.1	51.8	232.1	4.5	226.7	2.9
23KMSY07-3	12 636	53 284	0.0510	0.0010	0.2493	0.0049	0.0354	0.0004	242.7	46.3	226.0	4.0	224.5	2.7
23KMSY07-4	12 053	45 825	0.0506	0.0009	0.2487	0.0047	0.0356	0.0004	233.4	38.0	225.5	3.8	225.4	2.7
23KMSY07-5	12 919	46 678	0.0541	0.0011	0.2643	0.0056	0.0354	0.0005	376.0	46.3	238.2	4.5	224.4	2.8
23KMSY07-6	10 129	30 255	0.0527	0.0012	0.2589	0.0058	0.0357	0.0005	316.7	51.8	233.8	4.7	226.0	2.9
23KMSY07-7	12 683	48 691	0.0512	0.0011	0.2475	0.0053	0.0350	0.0004	255.6	48.1	224.6	4.3	222.1	2.8
23KMSY07-8	12 058	42 916	0.0513	0.0011	0.2494	0.0051	0.0353	0.0005	253.8	43.5	226.1	4.2	223.5	2.9
23KMSY07-9	10 411	36 289	0.0498	0.0011	0.2455	0.0052	0.0357	0.0004	187.1	19.4	222.9	4.3	226.4	2.7
23KMSY07-10	8 458	27 685	0.0518	0.0012	0.2583	0.0059	0.0362	0.0005	276.0	47.2	233.3	4.8	229.1	3.0
23KMSY07-11	12 019	45 525	0.0513	0.0011	0.2545	0.0054	0.0360	0.0005	253.8	45.4	230.2	4.4	227.8	2.9
23KMSY07-12	9 736	31 739	0.0512	0.0011	0.2540	0.0052	0.0361	0.0005	255.6	51.8	229.8	4.2	228.5	3.0
23KMSY07-13	12 434	48 803	0.0507	0.0010	0.2500	0.0048	0.0357	0.0005	227.8	43.5	226.6	3.9	226.3	2.9
23KMSY07-14	11 405	45 169	0.0487	0.0011	0.2440	0.0053	0.0363	0.0005	200.1	53.7	221.7	4.3	229.9	3.1
23KMSY07-15	9 611	30 332	0.0509	0.0012	0.2559	0.0059	0.0365	0.0005	235.3	55.5	231.4	4.8	230.9	3.3
23KMSY07-16	10 816	36 372	0.0506	0.0011	0.2525	0.0053	0.0363	0.0005	220.4	82.4	228.6	4.3	229.8	3.3
23KMSY07-17	11 897	49 276	0.0507	0.0010	0.2546	0.0050	0.0365	0.0005	227.8	41.7	230.3	4.0	230.8	3.1
23KMSY07-18	9 344	31 508	0.0519	0.0012	0.2621	0.0063	0.0367	0.0006	279.7	49.1	236.3	5.1	232.2	3.5
23KMSY07-19	11 099	35 993	0.0520	0.0011	0.2599	0.0055	0.0362	0.0005	287.1	52.8	234.6	4.4	229.3	2.9
23KMSY07-20	9 905	30 738	0.0505	0.0012	0.2529	0.0057	0.0364	0.0005	216.7	86.1	228.9	4.6	230.6	3.1
23KMSY26-01	7 728	51 946	0.0542	0.0011	0.2730	0.0056	0.0364	0.0004	388.9	44.4	245.1	4.5	230.6	2.5
23KMSY26-02	6 355	39 631	0.0519	0.0011	0.2636	0.0053	0.0369	0.0004	279.7	48.1	237.5	4.3	233.4	2.7
23KMSY26-03	7 147	43 532	0.0528	0.0011	0.2668	0.0055	0.0366	0.0004	320.4	48.1	240.1	4.4	231.9	2.5
23KMSY26-04	8 586	49 349	0.0534	0.0011	0.2725	0.0058	0.0369	0.0004	346.4	46.3	244.7	4.6	233.8	2.6
23KMSY26-05	8 520	56 421	0.0522	0.0010	0.2608	0.0051	0.0362	0.0004	294.5	41.7	235.3	4.1	229.1	2.4
23KMSY26-06	7 018	43 697	0.0522	0.0011	0.2628	0.0056	0.0364	0.0004	294.5	43.5	236.9	4.5	230.6	2.5
23KMSY26-07	7 322	45 839	0.0521	0.0012	0.2580	0.0057	0.0359	0.0004	300.1	53.7	233.1	4.6	227.3	2.5
23KMSY26-09	7 632	49 876	0.0533	0.0010	0.2626	0.0051	0.0357	0.0004	338.9	44.4	236.8	4.1	226.2	2.3
23KMSY26-10	6 989	28 919	0.0542	0.0011	0.4791	0.0091	0.0640	0.0006	388.9	44.4	397.4	6.2	400.0	3.8
23KMSY26-11	6 604	45 928	0.0517	0.0010	0.2548	0.0048	0.0357	0.0004	272.3	44.4	230.5	3.9	225.9	2.3
23KMSY26-12	6 054	37 031	0.0528	0.0011	0.2623	0.0054	0.0360	0.0004	320.4	15.7	236.5	4.4	228.1	2.4
23KMSY26-13	7 250	45 895	0.0523	0.0011	0.2515	0.0050	0.0348	0.0003	298.2	43.5	227.8	4.1	220.8	2.1
23KMSY26-14	6 534	37 874	0.0522	0.0012	0.2547	0.0056	0.0353	0.0004	294.5	51.8	230.4	4.5	223.9	2.4
23KMSY26-15	6 561	38 291	0.0534	0.0011	0.2626	0.0055	0.0356	0.0004	346.4	50.0	236.8	4.4	225.6	2.4
23KMSY26-16	7 075	44 287	0.0541	0.0010	0.2678	0.0052	0.0358	0.0004	376.0	42.6	241.0	4.2	226.8	2.4
23KMSY26-17	8 062	66 600	0.0519	0.0009	0.2533	0.0045	0.0353	0.0004	279.7	40.7	229.3	3.6	223.6	2.2
23KMSY26-18	7 585	52 707	0.0517	0.0010	0.2523	0.0047	0.0352	0.0004	272.3	45.4	228.4	3.8	223.3	2.3
23KMSY26-19	7 197	43 968	0.0749	0.0035	0.3920	0.0206	0.0370	0.0005	1 066.4	98.3	335.8	15.0	234.5	2.8
23KMSY26-20	6 589	45 578	0.0544	0.0011	0.2713	0.0054	0.0360	0.0004	387.1	46.3	243.7	4.3	228.1	2.4

液白云母通常呈片状或长条状,围绕、交代平衡黑云母生长,并填充其中。各云母分类图解见图7。

### 4.3 云母矿物化学组成特征

库木萨依锂矿床中各类云母矿物的主量元素



(a) 含斑中粗粒电气石锂辉石花岗岩伟晶岩独居石 U-Pb 谐和年龄; (b) 含斑中粗粒电气石锂辉石花岗岩伟晶岩加权平均年龄; (c) 白云母花岗岩伟晶岩独居石 U-Pb 谐和年龄; (d) 白云母花岗岩伟晶岩独居石加权平均年龄

图5 库木萨依花岗岩伟晶岩独居石 U-Pb 谐和图和加权平均年龄图

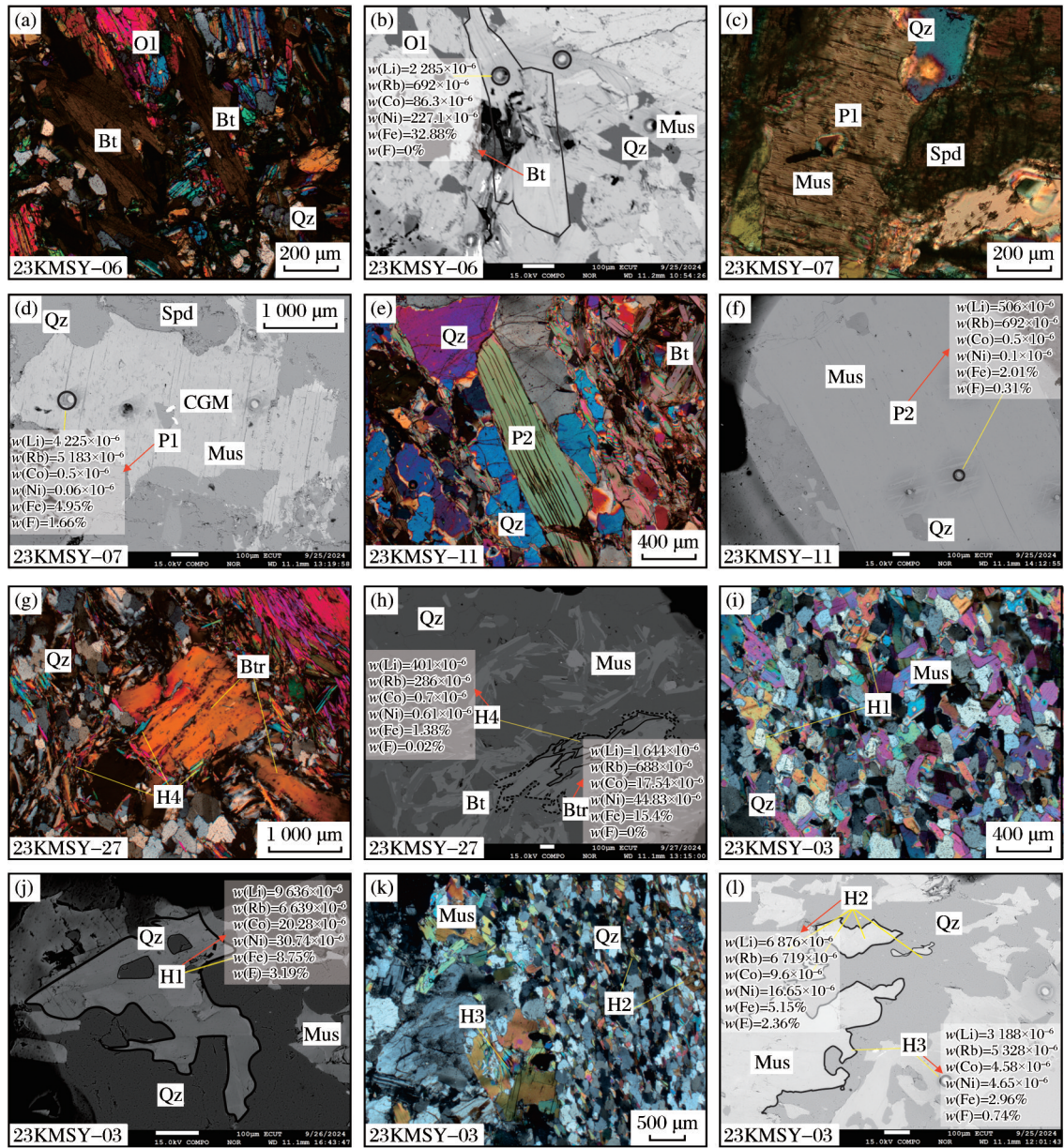
Fig. 5 U-Pb concordia diagram and weighted average age diagram of monazite in the Kumusayi granite pegmatite

测试结果见表3。白云母矿物的  $\text{SiO}_2$  含量为 41.935%~48.421%， $\text{TiO}_2$  含量为 0~1.721%， $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为 21.570%~35.564%， $\text{FeO}^T$  含量为 0.968%~12.803%， $\text{MnO}$  含量为 0~1.068%， $\text{MgO}$  含量为 0.032%~5.143%， $\text{CaO}$  含量为 0~0.059%， $(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$  含量为 9.467%~10.871%， $\text{F}$  含量为 0~3.196%。黑云母矿物的  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量从围岩到蚀变带逐步增加， $\text{FeO}^T$  和  $\text{TiO}_2$  含量则逐渐降低。同样地，白云母矿物的  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量从伟晶岩到蚀变带逐步升高， $\text{FeO}^T$  和  $\text{TiO}_2$  含量则呈现逐渐减少的变化趋势。

白云母的微量元素测试结果见表4，根据云母矿物 LA-ICP-MS 分析结果，原生黑云母 (Bt) 的 Li 元素含量为  $1\,231.41\times 10^{-6}$ ~ $2\,350.36\times 10^{-6}$ ，交代平衡黑云母 (Btr) 的 Li 含量为  $1\,372.76\times 10^{-6}$ ~ $1\,708.89\times 10^{-6}$ 。蚀变带中热液白云母 (H1) 的 Li 含量为  $7\,696.45\times 10^{-6}$ ~ $9\,636.64\times 10^{-6}$ ，热液白云母 (H2) 的

Li 含量为  $6\,085.86\times 10^{-6}$ ~ $9\,524.52\times 10^{-6}$ ，热液白云母 (H3) 的 Li 含量为  $1\,523.22\times 10^{-6}$ ~ $3\,654.14\times 10^{-6}$ ，热液白云母 (H4) 的 Li 含量为  $368.32\times 10^{-6}$ ~ $655.86\times 10^{-6}$  (表4)。含锂辉石伟晶岩的岩浆白云母 (P1) 的 Li 含量为  $3\,475.89\times 10^{-6}$ ~ $5\,544.56\times 10^{-6}$ ，无矿化伟晶岩岩浆白云母 (P2) 的 Li 含量为  $452.98\times 10^{-6}$ ~ $767.07\times 10^{-6}$ 。含锂辉石伟晶岩的岩浆白云母 (P1) 中 Li 含量远高于无矿化伟晶岩的岩浆白云母 (P2)。

热液白云母 (H1) 中 Li 含量最高，变化范围为  $7\,696.45\times 10^{-6}$ ~ $9\,636.64\times 10^{-6}$ ，Rb 含量为  $6\,555.82\times 10^{-6}$ ~ $7\,904.53\times 10^{-6}$ ，Co 含量为  $13.30\times 10^{-6}$ ~ $20.28\times 10^{-6}$ ，Ni 含量为  $22.58\times 10^{-6}$ ~ $31.35\times 10^{-6}$ 。从热液白云母 H1 到 H4，Li、Rb、Co 和 Ni 这4种元素含量逐渐减少，在 H4 中降至最低。Nb、W、Sn 和 Ta 在岩浆白云母 (P1) 到热液白云母 (H1~H4) 中的变化趋势不同。在岩浆白云母 (P1) 中，Nb 含量为  $93.00\times 10^{-6}$ ~



(a)、(b)围岩黑云母片岩中原生黑云母、橄榄石和石英等矿物特征(正交偏光、背散射);(c)、(d)矿化伟晶岩中岩浆白云母、锂辉石、石英和铌钽铁矿等矿物特征(背散射、正交偏光);(e)、(f)无矿化伟晶岩中岩浆白云母和石英等矿物特征(背散射、正交偏光);(g)、(h)弱蚀变带白云母化黑云母片岩中交代平衡黑云母和热液白云母4等矿物特征(正交偏光、背散射);(i)、(j)强蚀变带强白云母化黑云母片岩中热液白云母1和石英等矿物特征(正交偏光、背散射);(k)、(l)强蚀变带强白云母化黑云母片岩中热液白云母2和热液白云母3等矿物特征(背散射、正交偏光)

图6 库木萨依锂矿床云母矿物类型及其岩相学特征

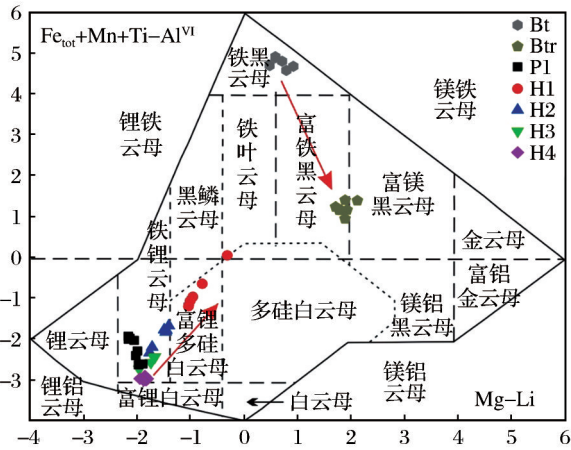
Fig. 6 Mica mineral types and their petrographic characteristics in the Kumusayi lithium deposit

$362.31 \times 10^{-6}$ , W 含量为  $31.31 \times 10^{-6} \sim 87.76 \times 10^{-6}$ , Sn 含量为  $118.0 \times 10^{-6} \sim 817.2 \times 10^{-6}$ , Ta 含量为  $84.35 \times 10^{-6} \sim 232.15 \times 10^{-6}$ , 均为最高值。在强蚀变带中, 热液白云母(H1~H3)中 Nb、W、Sn 和 Ta 元素含量上升, 而在弱蚀变带, 这些元素含量显著下降。

## 5 讨论

### 5.1 库木萨依锂辉石伟晶岩型锂矿成岩成矿时代及其对锂成矿的指示

精确厘定成岩成矿年龄, 有助于理解岩浆—热



Bt-原生黑云母; Btr-交代平衡黑云母; P1-含锂辉石伟晶岩岩浆白云母; H1-热液白云母1; H2-热液白云母2; H3-热液白云母3; H4-热液白云母4

图7 库木萨依锂矿云母化学组成(Mg-Li)-(Fe<sup>tot</sup>+Mn+Ti-Al<sup>VI</sup>)分类图解(底图据 Tischendorf et al, 1997)  
Fig. 7 Classification diagram of muscovite chemical composition (Mg-Li)-(Fe<sup>tot</sup>+Mn+Ti-Al<sup>VI</sup>) in the Kumusayi lithium deposit (base map according to Tischendorf et al, 1997)

液过程中稀有金属元素富集过程,为探讨成矿作用及成因联系提供了重要依据(周振华等,2016;王倩等,2019;李杭等,2020;Huang et al, 2023)。库木萨依锂矿床是近年来新发现的阿尔金中段花岗伟晶岩型锂矿的典型代表之一,厘定其成矿时代是认识库木萨依锂等稀有金属成矿过程的关键。与锂等稀有金属成矿相关的高演化花岗岩中,锆石普遍富集U元素,易发生蜕晶化,致使原位U-Pb定年数据离散度增大,年龄结果偏差显著(Xu et al, 2023)。独居石是中酸性岩浆岩中常见的一种富含轻稀土的副矿物,具有吸收Th和U的能力。前人研究表明,独居石U-Th-Pb体系封闭温度高,耐放射性损伤能力强,对高演化花岗岩进行测年可以获得良好的结果(万渝生等,2004;Williams et al, 2007;吴黎光等,2020)。因此,本研究选取库木萨依锂矿床中独居石进行U-Pb同位素分析,获得含斑中粗粒电气石锂辉石花岗伟晶岩和白云母花岗伟晶岩中独居石U-Pb年龄分别为(224.6±3.0) Ma和(224.2±3.6) Ma(图5),均归属于晚三叠世。2个伟晶岩样品的独居石U-Pb年龄在误差范围内高度一致,基本可以确定其为同一印支期岩浆作用的产物。

阿尔金中段发现的含锂辉石花岗伟晶岩型锂矿床的形成时代主要为加里东期,多数矿床规模为中型。典型代表有阿亚格锂铍矿床(464~468 Ma)(李杭等,2022)和吐格曼伟晶岩(460 Ma)(徐兴旺等,2019)。印支晚期至燕山早期的构造转折期是我国西部伟晶岩型锂矿的成矿高峰期,形成了一大批具有代表性的大型—超大型伟晶岩型锂矿床,如:新疆阿尔泰卡鲁安锂矿床(198~223 Ma)(马占龙等,2015;Feng et al, 2019)、西昆仑大红柳滩锂矿床[(211.9±2.4) Ma](Yan et al, 2018)、四川甲基卡锂矿床(195~199 Ma)(王登红等,2005;Li et al, 2013)和扎乌龙锂矿床(236 Ma)(李建康等,2014)等(表5)。

三叠纪是我国伟晶岩型锂矿床成矿相对集中的重要时间段之一(张辉等,2021),以往研究中阿尔金地区尚未发现印支期形成的大型—超大型锂矿床。砂梁西锂矿床是近期新发现的产于印支期的中型锂矿床,利用铷钽铁矿U-Pb法测得该矿床成矿年龄为(228.8±5.8) Ma(沈明宏等,2024),这一数据与库木萨依锂矿床的成矿年龄[(224.6±3.0) Ma]一致,说明在阿尔金地区印支期锂成矿事件并非孤例,该地区可能存在广泛的印支期伟晶岩型锂矿床,具有巨大的锂成矿潜力。本研究首次确定了库木萨依花岗伟晶岩型锂矿成矿时代为印支期,这一发现为阿尔金地区稀有金属找矿工作提供了新的同位素年龄信息,并指出新的找矿方向。

## 5.2 伟晶岩型锂矿热液蚀变作用与锂的迁移富集过程及其启示

云母是花岗岩、花岗伟晶岩和云英岩中常见的矿物,其独特的层状结构能够容纳多种元素,特别是Li、Rb和Cs等稀有元素,不同阶段云母中的锂等稀有金属的分配特征,可能是揭示Li等元素超常富集成矿过程的关键矿物(张勇等,2020;戴浩瞳等,2023;Xu et al, 2023;Zhang et al, 2023;徐欣宇等,2024)。在库木萨依花岗伟晶岩和蚀变带中,铁锂云母是主要的云母类型。从伟晶岩到蚀变带,云母的成分呈现出由铁锂云母向锂多硅白云母的演化趋势;从围岩到蚀变带,云母类型具有从铁黑云母向富铁黑云母的变化趋势(图7)。

库木萨依锂矿床从花岗伟晶岩→蚀变带→围岩,云母中的Li和Rb含量变化可划分为3个阶段:

表3 库木萨依锂矿云母矿物电子探针分析测试结果

Table 3 Test results of electron microprobe analysis results of muscovite minerals in the Kumusayi lithium deposit

成分	Bt		Btr		P1		H1		H2		H3		H4		P2	
	均值	方差	均值	方差	均值	方差	均值	方差	均值	方差	均值	方差	均值	方差	均值	方差
SiO <sub>2</sub>	35.04	0.13	37.66	0.19	46.45	0.15	44.12	1.69	46.98	0.13	46.76	0.13	47.63	0.16	46.91	0.14
TiO <sub>2</sub>	2.54	0.03	1.93	0.10	0.07	0.00	1.58	0.01	0.82	0.02	0.34	0.02	0.57	0.01	0.06	0.00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.47	0.09	19.51	0.09	31.61	1.43	23.64	1.61	28.96	3.36	32.71	0.75	35.02	0.46	35.60	0.18
FeO	32.88	1.36	15.13	0.58	4.95	0.82	8.87	5.24	4.68	0.45	3.37	0.10	1.16	0.02	2.28	0.04
MnO	0.22	0.00	0.18	0.00	0.81	0.03	0.73	0.04	0.36	0.01	0.20	0.00	0.01	0.00	0.04	0.00
MgO	4.25	0.24	11.97	0.31	0.06	0.00	4.32	0.26	2.54	0.43	1.16	0.32	1.06	0.01	0.40	0.01
CaO	0.04	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
Na <sub>2</sub> O	0.30	0.01	0.23	0.00	0.33	0.01	0.20	0.01	0.34	0.00	0.45	0.01	0.61	0.00	0.52	0.00
K <sub>2</sub> O	7.01	0.36	8.79	0.05	9.91	0.03	9.47	0.01	10.00	0.00	10.07	0.01	9.86	0.02	10.26	0.02
K <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> O	7.31	0.25	9.02	0.04	10.24	0.03	9.67	0.03	10.34	0.01	10.52	0.00	10.48	0.01	10.78	0.02
F	0.00	0.00	0.02	0.00	1.66	0.15	3.02	0.03	2.00	0.26	0.87	0.06	0.07	0.00	0.36	0.01
Cl	0.06	0.00	0.08	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (cal)	4.83	0.02	1.94	0.32	0.67	0.01	1.19	0.09	0.64	0.01	0.46	0.00	0.16	0.00	0.31	0.00
FeO(cal)	30.43	1.47	12.63	0.98	4.34	0.64	6.95	3.32	4.11	0.34	2.95	0.08	0.89	0.02	2.00	0.03
H <sub>2</sub> O(cal)	3.78	0.00	4.11	0.00	3.79	0.05	2.91	0.02	3.65	0.09	4.25	0.02	4.76	0.00	4.58	0.00
O=F, Cl	0.01	0.00	0.03	0.00	0.70	0.03	1.28	0.01	0.85	0.05	0.37	0.01	0.03	0.00	0.15	0.00
Li <sub>2</sub> O(cal)	0.50	0.01	1.26	0.02	3.78	0.01	3.11	0.14	3.93	0.01	3.87	0.01	4.12	0.01	3.91	0.01
Total	101.09	2.89	100.86	0.32	103.44	0.82	101.99	0.49	104.28	0.64	104.09	0.15	104.88	0.67	104.92	0.21
Si <sup>4+</sup>	5.53	0.00	5.46	0.00	6.08	0.00	6.09	0.01	6.12	0.00	6.01	0.00	5.96	0.00	5.92	0.00
Al <sup>IV</sup>	2.47	0.00	2.54	0.00	1.92	0.00	1.91	0.01	1.88	0.00	1.99	0.00	2.04	0.00	2.08	0.00
T-site	8.00	0.00	8.00	0.00	8.00	0.00	8.00	0.00	8.00	0.00	8.00	0.00	8.00	0.00	8.00	0.00
Al <sup>VI</sup>	0.23	0.00	0.79	0.00	2.96	0.01	1.93	0.04	2.56	0.03	2.96	0.01	3.13	0.00	3.22	0.00
Ti <sup>4+</sup>	0.30	0.00	0.21	0.00	0.01	0.00	0.16	0.00	0.08	0.00	0.03	0.00	0.05	0.00	0.01	0.00
Fe <sup>3+</sup>	0.58	0.00	0.22	0.00	0.07	0.00	0.12	0.00	0.06	0.00	0.05	0.00	0.02	0.00	0.03	0.00
Fe <sup>2+</sup>	4.04	0.02	1.56	0.01	0.49	0.01	0.81	0.05	0.46	0.00	0.33	0.00	0.10	0.00	0.22	0.00
Mn <sup>2+</sup>	0.03	0.00	0.02	0.00	0.09	0.00	0.09	0.00	0.04	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg <sup>2+</sup>	1.00	0.01	2.59	0.01	0.01	0.00	0.89	0.01	0.49	0.02	0.22	0.01	0.20	0.00	0.07	0.00
Y-site	6.18	0.02	5.39	0.01	3.62	0.00	4.01	0.04	3.69	0.00	3.61	0.00	3.50	0.00	3.55	0.00
Ca <sup>2+</sup>	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na <sup>+</sup>	0.09	0.00	0.06	0.00	0.08	0.00	0.05	0.00	0.09	0.00	0.11	0.00	0.15	0.00	0.13	0.00
K <sup>+</sup>	1.41	0.01	1.63	0.00	1.66	0.00	1.67	0.00	1.66	0.00	1.65	0.00	1.57	0.00	1.65	0.00
X-site	1.51	0.01	1.69	0.00	1.74	0.00	1.72	0.00	1.75	0.00	1.76	0.00	1.72	0.00	1.78	0.00
Cations	15.69	0.01	15.08	0.01	13.36	0.00	13.73	0.04	13.44	0.01	13.38	0.00	13.22	0.00	13.33	0.00
Li(cal)	0.32	0.00	0.73	0.00	1.99	0.00	1.72	0.03	2.06	0.00	2.00	0.00	2.07	0.00	1.98	0.00
OH(cal)	3.98	0.00	3.97	0.00	3.31	0.03	2.67	0.01	3.17	0.05	3.64	0.01	3.97	0.00	3.86	0.00
Mg-Li	0.68	0.03	1.86	0.02	-1.98	0.00	-0.83	0.09	-1.56	0.02	-1.78	0.02	-1.88	0.00	-1.91	0.00
Fe <sup>tot</sup> +Mn+Ti-Al <sup>VI</sup>	4.72	0.01	1.21	0.02	-2.30	0.04	-0.75	0.24	-1.91	0.07	-2.53	0.02	-2.96	0.00	-2.96	0.00

注: Bt-原生黑云母; Btr-交代平衡黑云母; P1-含锂辉石伟晶岩岩浆白云母; H1-热液白云母1; H2-热液白云母2; H3-热液白云母3; H4-热液白云母4; P2-无矿化伟晶岩岩浆白云母

(1) 岩浆演化阶段, 锂辉石的沉淀析出消耗了体系中的部分Li元素, 而后形成含锂的岩浆白云母(P1)。随后, 伟晶岩岩浆侵入周围的黑云母片岩

中, 其结晶过程中释放出的富锂热液, 结合伟晶岩岩浆提供的热源, 促使围岩发生蚀变, 进而产生云英岩化现象。在这一过程中, 围岩中的原生黑云母

表4 库木萨依锂矿伟晶岩中云母矿物LA-ICP-MS分析测试结果

Table 4 Results of LA-ICP-MS analysis of mica minerals in pegmatites of the Kumusayi lithium deposit

成分	Bt		Btr		P1		P2	
	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围
Li	2 033.92	1 231.41~2 350.37	1 539.40	1 372.76~1 708.89	4 422.31	3 475.89~5 544.56	565.91	452.98~767.07
Rb	560.00	483.38~692.26	663.59	613.2~699.58	5 411.40	4 520.42~6 609.15	1 104.56	684.77~1 524.92
V	97.00	90.66~107.91	83.20	78.48~94.07	0.05	0.02~0.19	38.77	0~205.01
Cr	167.77	145.86~213.23	65.29	59.57~76.41	0.63	0~1.93	0.23	0~1.55
Sc	1.79	1.52~2.08	15.13	13.75~18.56	0.76	0.52~1.01	67.65	0.06~234.33
Co	84.88	80.73~89.33	25.36	17.55~30.44	0.58	0.43~0.79	67.23	0.35~280.46
Ni	226.74	213.44~252.21	51.81	22.72~60.26	0.23	0~0.86	62.89	0.11~265.89
Cu	70.28	31.05~127.67	3.53	0.23~21.73	0.16	0~0.46	36.95	0~279.17
Sr	224.36	6.75~872.74	1.51	0.92~4.97	0.61	0.26~1.03	53.95	0.51~283.46
Y	2.67	0.58~6.00	1.80	0~18.64	0.01	0~0.01	46.59	0~199.43
Zr	64.70	0.12~256.83	260.62	0.09~2 795.73	0.80	0.36~1.48	68.40	0.12~355.51
Nb	25.11	23.95~26.42	22.78	21.74~24.94	272.47	150.45~362.31	134.81	10.21~330.1
Mo	0.12	0.01~0.24	0.07	0~0.44	0.11	0.01~0.18	1 565.06	0~9 641.56
Sn	1.02	0.88~1.25	30.11	27.99~33.54	628.94	486.40~817.02	139.78	56.90~363.65
Ba	6 511.81	3 915.19~13 309.54	598.09	545.52~668.52	9.43	3.45~17.10	457.23	7.81~5 176.14
Hf	1.31	0~5.14	7.54	0.01~80.60	0.26	0.15~0.38	64.08	0.02~256.02
Ta	1.49	1.42~1.53	2.13	1.95~2.43	138.94	84.35~232.15	74.51	6.65~289.51
W	2.96	2.06~5.32	6.07	5.03~7.16	68.87	31.31~87.76	95.43	1.67~538.09
U	0.52	0.09~1.03	1.21	0~8.69	0.02	0~0.09	0.02	0~0.13
Nb/Ta	16.87	16.43~17.70	10.69	10.24~11.17	2.25	0.73~3.85	3.72	0.84~10.63
Zr/Hf	22.60	0~49.95	20.97	3.35~34.69	3.22	1.24~5.84	3.15	0.65~11.78
Li/Rb	3.80	1.78~4.73	2.32	2.03~2.52	0.82	0.67~0.94	0.55	0.40~1.05
K/Rb	109.81	85.38~122.29	118.16	110.91~126.22	16.14	12.97~19.49	158.92	63.34~283.79
Li	2 033.92	1 231.41~2 350.37	1 539.40	1 372.76~1 708.89	4 422.31	3 475.89~5 544.56	565.91	452.98~767.07
Rb	560.00	483.38~692.26	663.59	613.20~699.58	5 411.40	4 520.42~6 609.15	1 104.56	684.77~1 524.92
V	97.00	90.66~107.91	83.20	78.48~94.07	0.05	0.02~0.19	38.77	0~205.01
Cr	167.77	145.86~213.23	65.29	59.57~76.41	0.63	0~1.93	0.23	0~1.55
Sc	1.79	1.52~2.08	15.13	13.75~18.56	0.76	0.52~1.01	67.65	0.06~234.33
Co	84.88	80.73~89.33	25.36	17.55~30.44	0.58	0.43~0.79	67.23	0.35~280.46
Ni	226.74	213.44~252.21	51.81	22.72~60.26	0.23	0~0.86	62.89	0.11~265.89
Cu	70.28	31.05~127.67	3.53	0.23~21.73	0.16	0~0.46	36.95	0~279.17
Sr	224.36	6.75~872.74	1.51	0.92~4.97	0.61	0.26~1.03	53.95	0.51~283.46
Y	2.67	0.58~6.00	1.80	0~18.64	0.01	0~0.01	46.59	0~199.43
Zr	64.70	0.12~256.83	260.62	0.09~2 795.73	0.80	0.36~1.48	68.40	0.12~355.51
Nb	25.11	23.95~26.42	22.78	21.74~24.94	272.47	150.45~362.31	134.81	10.21~330.10
Mo	0.12	0.01~0.24	0.07	0~0.44	0.11	0.01~0.18	1 565.06	0~9 641.56
Sn	1.02	0.88~1.25	30.11	27.99~33.54	628.94	486.40~817.02	139.78	56.90~363.65
Ba	6 511.81	3 915.19~13 309.54	598.09	545.52~668.52	9.43	3.45~17.10	457.23	7.81~5 176.14
Hf	1.31	0~5.14	7.54	0.01~80.60	0.26	0.15~0.38	64.08	0.02~256.02
Ta	1.49	1.42~1.53	2.13	1.95~2.43	138.94	84.35~232.15	74.51	6.65~289.51
W	2.96	2.06~5.32	6.07	5.03~7.16	68.87	31.31~87.76	95.43	1.67~538.09
U	0.52	0.09~1.03	1.21	0~8.69	0.02	0~0.09	0.02	0~0.13
Nb/Ta	16.87	16.43~17.70	10.69	10.24~11.17	2.25	0.73~3.85	3.72	0.84~10.63
Zr/Hf	22.60	0~49.95	20.97	3.35~34.69	3.22	1.24~5.84	3.15	0.65~11.78
Li/Rb	3.80	1.78~4.73	2.32	2.03~2.52	0.82	0.67~0.94	0.55	0.40~1.05
K/Rb	109.81	85.38~122.29	118.16	110.91~126.22	16.14	12.97~19.49	158.92	63.34~283.79

注: Bt-原生黑云母; Btr-交代平衡黑云母; P1-含锂辉石伟晶岩岩浆白云母; P2-无矿化伟晶岩岩浆白云母

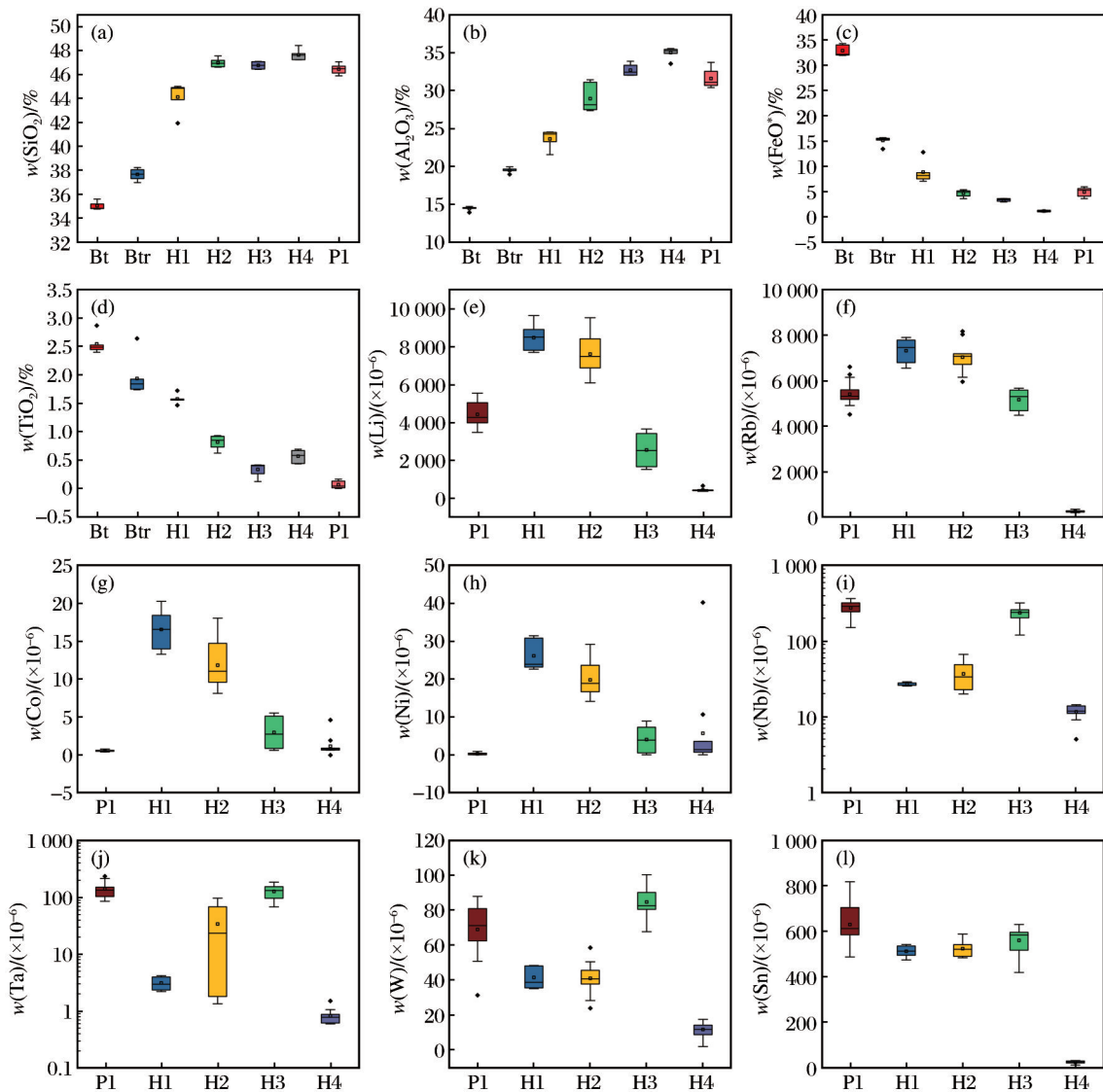
表5 我国西部地区典型锂矿床成矿时代统计  
Table 5 Statistics of metallogenic age of typical lithium deposits in western China

矿床名称	岩石类型	测年方法	年龄/Ma
吐格曼铍矿	绿柱石伟晶岩脉	锆石 U-Pb	459.9±3.7
阿亚克锂铍锡矿床	锂辉石伟晶岩脉	锡石 U-Pb	468.0±8.7
塔什萨依锂矿	锂伟晶岩脉	铌钽铁矿 U-Pb	441.3±2.2
阿亚格铍矿	绿柱石伟晶岩脉	铌钽铁矿 U-Pb	485.5±5.4
瓦石峡锂矿	锂辉石伟晶岩脉	铌钽铁矿 U-Pb	446.7±5.4
塔木切锂矿	电气石伟晶岩脉	铌钽铁矿 U-Pb	448.2±3.4
塔什达坂锂矿	锂辉石伟晶岩脉	铌钽铁矿 U-Pb	418.1±6.6
砂梁西锂矿	锂辉石伟晶岩脉	铌钽铁矿 U-Pb	228.8±5.8
库木萨依锂矿	锂辉石伟晶岩脉	独居石 U-Pb	224.6±3.0
库木萨依锂矿	白云母伟晶岩	独居石 U-Pb	224.2±3.6
四川甲基卡	花岗伟晶岩型	白云母 Ar-Ar	195~199
四川可尔因	花岗伟晶岩型	白云母 Ar-Ar	152~176
四川可尔因加达	花岗伟晶岩型	铌钽铁矿 U-Pb	195~206
四川雪宝顶	伟晶岩	白云母 Ar-Ar	190±2
四川扎乌龙	花岗伟晶岩型	白云母 Ar-Ar	236
青海茶卡北山	花岗伟晶岩型	锆石 U-Pb	217
青海草陇	花岗伟晶岩型	独居石 U-Pb	200~204
新疆大红柳滩90号伟晶岩	花岗伟晶岩型	铌钽铁矿 U-Pb	211.9±2.4
新疆大喀拉苏	花岗伟晶岩型	白云母 Ar-Ar	248
新疆镜儿泉	花岗伟晶岩型	白云母 Ar-Ar	243
新疆可可托海	花岗伟晶岩型	白云母 Ar-Ar	178~182
新疆切木尔切克	花岗伟晶岩型	锆石 U-Pb	253.5±3.2
新疆库儒尔特	花岗伟晶岩型	锆石 U-Pb	180.7±0.5
新疆佳木开	花岗伟晶岩型	锆石 U-Pb	199.1±1.0
新疆卡鲁安	花岗伟晶岩型	铌钽矿、锆石 U-Pb	198~223
新疆库卡拉盖	花岗伟晶岩型	锆石 U-Pb	211.3±2.4
新疆505锂矿	花岗伟晶岩型	锡石 U-Pb	223.5±7.9
新疆白龙山	花岗伟晶岩型	钽铁矿 U-Pb	208

(Bt)被蚀变形成交代平衡黑云母(Btr),导致原生黑云母中的Fe、Ti、Li、Co和Ni等元素释放进入富锂热液中,使得热液更加富集Li、Fe、Ti、Co和Ni等元素。(2)热液锂成矿阶段,富锂热液依次沉淀形成热液白云母(H1-H2-H3),热液白云母(H1)中的Li(Li<sub>2</sub>O含量为1.8%~2.3%)和Rb相较于岩浆白云母(P1)表现出显著的富集现象,这是由前文提到的围岩蚀变形成的富Fe、Li热液形成的,之后形成的白云母(H2-H3)不断消耗热液中的Li元素。(3)锂成矿后阶段,在弱蚀变带白云母化黑云母片岩中形成低锂白云母(Li<sub>2</sub>O含量为0.08%~0.15%),热液流体中的Li、Fe等元素在迁移沉淀的过程中消耗殆

尽,残余流体填充在交代平衡黑云母(Btr)的裂隙中。在上述过程中主量元素Si、Al呈上升趋势,Fe、Ti呈下降趋势[图8(a)~8(d)]。

云母是贯穿伟晶岩和热液阶段的重要矿物,也是稀有金属的重要载体,其微量元素含量变化显著,使其成为稀有金属矿床的重要指示矿物(Zhu et al, 2018; 王汝成等, 2019)。库木萨依锂矿床岩浆白云母(P1)具有贫Co和Ni,以及富Li、Rb、Nb、Ta、W和Sn的特征。岩浆白云母(P1)中具有较低含量的Li( $4.422 \times 10^{-6}$ )、Rb( $5.411 \times 10^{-6}$ )和极低含量的Co和Ni[图8(e)~8(h)],说明岩浆的Co和Ni含量较低。而后期的热液白云母1(H1)具有最高含



Bt-原生黑云母; Btr-交代平衡黑云母; P1-含锂辉石伟晶岩岩浆白云母; H1-热液白云母1; H2-热液白云母2; H3-热液白云母3; H4-热液白云母4

图8 库木萨依锂矿白云母代表性主微量元素箱线图

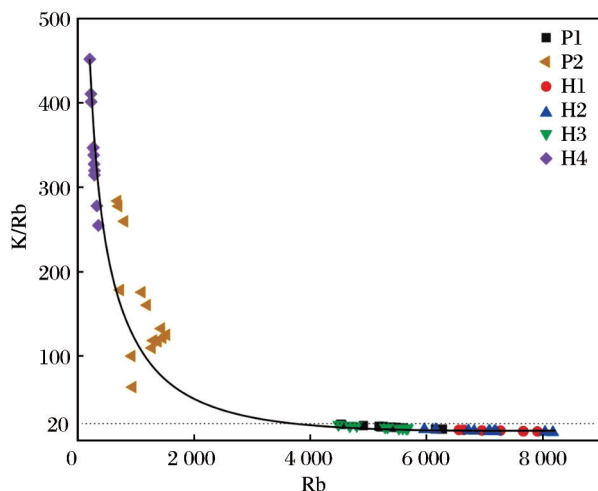
Fig. 8 Box plots of representative major and trace elements of muscovites in the Kumusayi lithium deposit

量的Li ( $8.579 \times 10^{-6}$ ), 以及较高含量的Co ( $16.56 \times 10^{-6}$ )和Ni ( $26.07 \times 10^{-6}$ ) (表4)。热液白云母(H1)的Co、Ni和Li可能是由围岩提供。热液白云母(H1→H2→H3) Nb、Ta、W和Sn的变化, 随着富Li热液沉淀形成热液白云母的过程中Nb、Ta、W和Sn含量逐渐升高[图8(i)~8(l)], 而Li、Rb、Co和Ni的含量则呈逐渐降低趋势, 说明热液中的Nb、Ta、W和Sn元素倾向于富集在晚期热液中。库木萨依矿床不同类型云母的微量元素记录了热液蚀变过程和Li等稀有金属元素的迁移富集成矿过程。综合研究表

明, 岩浆作用与热液作用叠加是富锂云母型锂矿床中Li富集成矿的关键因素之一。

白云母中的微量元素(如Li、Rb)含量及其特征比值(如K/Rb)常作为判别伟晶岩体系演化趋势与分异程度的重要地球化学指标(Černý, 1989; Vieira et al, 2011; Maneta et al, 2015; 韩志辉等, 2024)。随着伟晶岩演化程度的增加, 云母中的Li和Rb含量上升, K/Rb比值下降。库木萨依锂矿床中白云母的Li含量与其K/Rb比值呈负相关关系, 白云母中的Li含量随着K/Rb比值的降低而逐渐升高(图9),

表明经历更高的热液演化是锂富集的关键。当白云母中K/Rb比值小于20时,可作为判断矿化形成锂辉石的地球化学指标(韩志辉等,2024)。库木萨依未矿化的白云母花岗伟晶岩的K/Rb比值(63.3~283.8),远高于含斑中粗粒电气石锂辉石花岗伟晶岩的K/Rb比值(9.87~19.49)(图9)。因此,通过伟晶岩中白云母的K/Rb比值可以判断能否形成锂矿化,再次验证了白云母K/Rb比值小于20可作为判别锂辉石矿化的重要找矿标志。



P1-含锂辉石伟晶岩岩浆白云母;P2-无矿化伟晶岩岩浆白云母;  
H1-热液白云母1;H2-热液白云母2;H3-热液白云母3;H4-热液白云母4

图9 库木萨依伟晶岩型锂矿白云母矿物K/Rb-Rb散点图  
Fig. 9 Scatter plot of K/Rb-Rb of muscovites minerals in the Kumusayi pegmatite-type lithium deposit

## 6 结论

(1)库木萨依锂矿床含斑中粗粒电气石锂辉石花岗伟晶岩和白云母花岗伟晶岩独居石U-Pb年龄分别为(224.6±3.0)Ma和(224.2±3.6)Ma,形成时代为印支期。库木萨依和砂梁西锂矿床的出现,填补了阿尔金中段印支期锂成矿的空白,揭示了阿尔金地区加里东期以外另一期重要的锂成矿事件,这一发现为阿尔金地区锂矿找矿工作提供了新的信息。

(2)库木萨依锂矿中岩浆白云母具有贫Co、Ni,富Li-Rb-Nb-Ta-W-Sn的特征。库木萨依锂矿中Li的来源主要是伟晶岩岩浆作用的结果,围岩黑云母片岩可能提供了部分Fe和Li,是伟晶岩型锂矿

两侧富锂云母型锂矿床形成的物质基础之一。含锂辉石伟晶岩中的白云母K/Rb比值小于20,再次验证了白云母的K/Rb比值小于20可作为是否形成矿化锂辉石的找矿标志。

## 参考文献(References):

- Budzyń B, Sláma J, Corfu F, et al, 2021. TS-Mnz-A new monazite age reference material for U-Th-Pb microanalysis [J]. *Chemical Geology*, 572: 120195.
- Cao Y T, Liu L, Wang C, et al, 2019. Timing and nature of the partial melting processes during the exhumation of the garnet-bearing biotite gneiss in the southern Altyn Tagh HP/UHP belt, Western China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 170: 274-293.
- Černý P, 1989. Contrasting geochemistry of two pegmatite fields in Manitoba: products of juvenile Archean crust and polycyclic Archean evolution [J]. *Precambrian Research*, 45(1/2/3): 215-234.
- Cowgill E, An Y, Harrison T M, et al, 2003. Reconstruction of the Altyn tagh fault based on U-Pb geochronology: role of back thrusts, mantle sutures, and heterogeneous crustal strength in forming the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Geophysical Research*, 108(B7): 2346.
- Feng Y G, Liang T, Zhang Z, et al, 2019. Columbite U-Pb geochronology of Kalu'an lithium pegmatites in northern Xinjiang, China: implications for genesis and emplacement history of rare-element pegmatites [J]. *Minerals*, 9(8): 456.
- Gao Y B, Zhao X M, Bagas L, et al, 2021. Newly discovered Ordovician Li-Be deposits at Tugeman in the Altyn-tagh Orogen, NW China [J]. *Ore Geology Reviews*, 139: 104515.
- Hong T, Zhai M G, Xu X W, et al, 2021. Tourmaline and quartz in the igneous and metamorphic rocks of the Tashisayi granitic batholith, Altyn Tagh, northwestern China: geochemical variability constraints on metallogenesis [J]. *Lithos*, 400: 106358.
- Hu Z C, Zhang W, Liu Y S, et al, 2015. "Wave" signal-smoothing and mercury-removing device for laser ablation quadrupole and multiple collector ICPMS analysis: application to lead isotope analysis [J]. *Analytical Chemistry*, 87(2): 1152-1157.
- Huang G W, Pan C R, Pan J Y, et al, 2023. REE mineralization age and geodynamic setting of the Huanglongpu deposit in the East Qinling orogen, China: evidence from mineralogy, U-Pb geochronology, and in situ Nd isotope [J]. *Ore*

- Geology Reviews, 152: 105255.
- Li H, Hong T, Liu S K, et al, 2023. Characteristics of Early Paleozoic granite-pegmatite and associated lithium-beryllium mineralization in the Tugeman area, Altyn orogenic system, northwestern China [J]. *Ore Geology Reviews*, 160: 105603.
- Li J K, Wang D H, Chen Y C, 2013. The ore-forming mechanism of the Jiajika pegmatite-type rare metal deposit in western Sichuan Province: evidence from isotope dating [J]. *Acta Geologica Sinica - English Edition*, 87(1): 91-101.
- Liu C H, Wu C L, Gao Y H, et al, 2016. Age, composition, and tectonic significance of Palaeozoic granites in the Altyn orogenic belt, China [J]. *International Geology Review*, 58(2): 131-154.
- Liu L, Wang C, Cao Y T, et al, 2012. Geochronology of multi-stage metamorphic events: constraints on episodic zircon growth from the UHP eclogite in the south Altyn, NW China [J]. *Lithos*, 136: 10-26.
- Liu Y S, Gao S, Hu Z C, et al, 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 [J]. *Journal of Petrology*, 51(1/2): 537-571.
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, et al, 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard [J]. *Chemical Geology*, 257(1/2): 34-43.
- Maneta V, Baker D R, Minarik W, 2015. Evidence for lithium-aluminosilicate supersaturation of pegmatite-forming melts [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 170(1): 4.
- Pearce N J G, Perkins W T, Westgate J A, et al, 1997. A compilation of new and published major and trace element data for NIST srm 610 and NIST srm 612 glass reference materials [J]. *Geostandards Newsletter*, 21(1): 115-144.
- Tischendorf G, Gottesmann B, Foerster H J, et al, 1997. On Li-bearing micas: estimating Li from electron microprobe analyses and an improved diagram for graphical representation [J]. *Mineralogical Magazine*, 61(6): 809-834.
- Vieira R, Roda-Robles E, Pesquera A, et al, 2011. Chemical variation and significance of micas from the Fregeneda-Almendra pegmatitic field (Central-Iberian Zone, Spain and Portugal) [J]. *American Mineralogist*, 96(4): 637-645.
- Wang C, Liu L, Yang W Q, et al, 2013. Provenance and ages of the Altyn complex in Altyn Tagh: implications for the early Neoproterozoic evolution of northwestern China [J]. *Pre-cambrian Research*, 230: 193-208.
- Williams M L, Jercinovic M J, Hetherington C J, 2007. Microprobe monazite geochronology: understanding geologic processes by integrating composition and chronology [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 35(1): 137-175.
- Xu Z, Zhang Y, Pan J Y, et al, 2023. In situ LA-ICP-MS analyses of muscovite: constraints on granite-type Li mineralization in northwestern Jiangxi, South China [J]. *Ore Geology Reviews*, 156: 105402.
- Yan Q H, Qiu Z W, Wang H, et al, 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 [J]. *Ore Geology Reviews*, 100: 561-573.
- Zhang J X, Mattinson C G, Meng F C, et al, 2005. An Early Palaeozoic HP/HT granulite-garnet peridotite association in the south Altyn Tagh, NW China: P-T history and U-Pb geochronology [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 23(7): 491-510.
- Zhang Y, Pan J Y, Xia F, et al, 2023. Textures and chemical compositions of muscovite and quartz: implications for granite-hosted high-purity quartz mineralization and exploration in South China [J]. *Ore Geology Reviews*, 161: 105635.
- Zhu Z Y, Wang R C, Marignac C, et al, 2018. A new style of rare metal granite with Nb-rich mica: the Early Cretaceous Huangshan rare-metal granite suite, northeast Jiangxi Province, southeast China [J]. *American Mineralogist*, 103(10): 1530-1544.
- 曹玉亭, 刘良, 王超, 等, 2009. 阿尔金淡水泉早古生代泥质高压麻粒岩及其P-T演化轨迹 [J]. *岩石学报*, 25(9): 2260-2270. Cao Yuting, Liu Liang, Wang Chao, et al, 2009. P-T path of Early Paleozoic pelitic high-pressure granulite from Danshuiquan area in Altyn Tagh [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(9): 2260-2270.
- 曹玉亭, 刘良, 王超, 等, 2010. 阿尔金南缘塔特勒克布拉克花岗岩的地球化学特征、锆石U-Pb定年及Hf同位素组成 [J]. *岩石学报*, 26(11): 3259-3271. Cao Yuting, Liu Liang, Wang Chao, et al, 2010. Geochemical, zircon U-Pb dating and Hf isotope composition studies for Tatelekebulake granite in south Altyn Tagh [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(11): 3259-3271.
- 程晓敢, 廖林, 陈汉林, 等, 2008. 塔里木盆地东南缘新生代构造变形特征研究 [J]. *岩石学报*, 24(4): 645-654.

- Cheng Xiaogan, Liao Lin, Chen Hanlin, et al, 2008. Research of Cenozoic structural deformation in southeastern Tarim Basin, northwest China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(4): 645-654.
- 戴浩檀, 张勇, 潘家永, 等, 2023. 赣南珠坑钨矿白云母矿物特征及其地质意义[J]. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 46(5): 472-485. Dai Haotang, Zhang Yong, Pan Jiayong, et al, 2023. Characteristics and geological significance of muscovite in Zhukeng tungsten deposit, southern Jiangxi Province [J]. *Journal of East China University of Technology (Natural Science)*, 46(5): 472-485.
- 葛肖虹, 刘永江, 任收麦, 2002. 青藏高原隆升动力学与阿尔金山断裂[J]. *中国地质*, 29(4): 346-350. Ge Xiaohong, Liu Yongjiang, Ren Shoumai, 2002. Uplift dynamics of the Qinghai-Tibet Plateau and Altun fault [J]. *Chinese Geology*, 29(4): 346-350.
- 郭春丽, 张斌武, 郑义, 等, 2024. 中国花岗岩型锂矿床: 重要特征、成矿条件及形成机制[J]. *岩石学报*, 40(2): 347-403. Guo Chunli, Zhang Binwu, Zheng Yi, et al, 2024. Granite-type lithium deposits in China: important characteristics, metallogenic conditions, and genetic mechanism [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 40(2): 347-403.
- 韩志辉, 熊欣, 李建康, 等, 2024. 川西甲基卡区域伟晶岩分异演化及锂成矿过程: 来自白云母矿物学的约束[J]. *岩石学报*, 40(2): 499-509. Han Zhihui, Xiong Xin, Li Jiankang, et al, 2024. Muscovite as a potential tool for magmatic differentiation and identifying Li mineralization in the Jiakaka regional pegmatites, West Sichuan [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 40(2): 499-509.
- 华克强, 王敬国, 张朋, 等, 2024. 阿尔金地区锂铍稀有金属找矿进展及成矿远景分析[J]. *新疆地质*, 42(2): 224-229. Hua Keqiang, Wang Jingguo, Zhang Peng, et al, 2024. Prospecting progress and metallogenic prospect analysis of lithium and beryllium rare metals in Altun area [J]. *Xinjiang Geology*, 42(2): 224-229.
- 菅坤坤, 刘向东, 何元方, 等, 2018. 阿尔金中段大通沟花岗岩体年代学、地球化学特征及其成因[J]. *中国地质*, 45(4): 740-752. Jian Kunkun, Liu Xiangdong, He Yuanfang, et al, 2018. Geochronology, geochemistry and petrogenesis of the Datonggou granitic plutons in the middle section of Altun Mountains [J]. *Geology in China*, 45(4): 740-752.
- 康磊, 刘良, 曹玉亭, 等, 2013. 阿尔金南缘塔特勒克布拉克复式花岗岩体东段片麻状花岗岩的地球化学特征、锆石U-Pb定年及其地质意义[J]. *岩石学报*, 29(9): 3039-3048. Kang Lei, Li Liang, Cao Yuting, 2013. Geochemistry, zircon U-Pb age and its geological significance of the gneissic granite from the eastern segment of the Tatelekebulake composite granite in the south Altyn Tagh [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(9): 3039-3048.
- 李海兵, 杨经绥, 许志琴, 等, 2001. 阿尔金断裂带印支期走滑活动的地质及年代学证据[J]. *科学通报*, 46(16): 1333-1338. Li Haibing, Yang Jingsui, Xu Zhiqin, et al, 2001. Geological and chronological evidence of Indosinian strike-slip activity in Altun fault zone [J]. *Chinese Science Bulletin*, 46(16): 1333-1338.
- 李杭, 洪涛, 杨智全, 等, 2022. 阿尔金中段吐格曼北花岗伟晶岩型锂铍矿床多阶段岩浆一成矿作用[J]. *岩石学报*, 38(10): 3085-3103. Li Hang, Hong Tao, Yang Zhiquan, et al, 2022. Multi-stage magmatism-mineralization and tectonic setting of the North Tugeman granitic pegmatite lithium-beryllium deposit in the middle of Altyn Tagh [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 38(10): 3085-3103.
- 李杭, 柯强, 李昊, 等, 2020. 喀喇昆仑地体甜水海地区102 Ma辉长岩的发现及其对区域中生代构造演化的约束[J]. *岩石学报*, 36(4): 1041-1058. Li Hang, Ke Qiang, Li Hao, et al, 2020. Discovery of 102 Ma gabbro in the Tianshuihai area of Karakoram terrane, and its constraints on regional Mesozoic tectonic evolution [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 36(4): 1041-1058.
- 李建康, 刘喜方, 王登红, 2014. 中国锂矿成矿规律概要[J]. *地质学报*, 88(12): 2269-2283. Li Jiankang, Liu Xifang, Wang Denghong, 2014. The metallogenic regularity of lithium deposit in China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(12): 2269-2283.
- 李庆哲, 王京彬, 刘大文, 等, 2025. 全球锂矿资源勘查开发现状 & 国外典型锂矿床概述[J]. *地质与勘探*, 61(3): 636-654. Li Qingzhe, Wang Jingbin, Liu Dawen, et al, 2025. Exploration and development status of global lithium resources and overview of typical foreign lithium deposits [J]. *Geology and Exploration*, 61(3): 636-654.
- 刘春华, 2014. 阿尔金造山带花岗质岩体的时空分布与构造演化[D]. 北京: 中国地质科学院. Liu Chunhua, 2014. Temporal-spatial distribution and tectonic evolution of the granitoids in the Altyn orogenic belt [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Science.
- 刘雪, 王春连, 刘学龙, 等, 2024. 中国锂矿床主要类型特征、分布情况及开发利用现状[J]. *中国地质*, 51(3): 811-832. Liu Xue, Wang Chunlian, Liu Xuelong, et al, 2024. Main types, distribution, development and utilization of

- lithium deposits in China [J]. *Geology in China*, 51 (3) : 811-832.
- 马占龙, 张辉, 唐勇, 等, 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 [J]. *地球化学*, 44 (1) : 9-26. Ma Zhanlong, Zhang Hui, Tang Yong, et al, 2015. Zircon U-Pb geochronology and Hf isotopes of pegmatites from the Kaluan mining area in the Altay, Xinjiang and their genetic relationship with the Halong granite [J]. *Geochimica*, 44 (1) : 9-26.
- 闵壮, 陈正乐, 王永, 等, 2024. 新疆若羌县砂梁西逆冲推覆构造特征及勘查找矿意义 [J]. *大地构造与成矿学*, 48 (5) : 939-947. Min Zhuang, Chen Zhengle, Wang Yong, et al, 2024. Characteristics and prospecting significance of the thrust nappe structure in Shaliangxi, Ruoqiang County, Xinjiang, China [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 48 (5) : 939-947.
- 沈明宏, 王核, 孙子龙, 等, 2024. 新疆若羌县阿尔金山砂梁西锂多金属矿床地质特征、成矿年龄及找矿潜力 [J/OL]. *中国地质* : 1-23. <https://link.cnki.net/urlid/11.1167.P.20240709.0953.008>. Shen Minghong, Wang He, Sun Zilong, et al, 2024. Geologic characteristics, metallogenic age and prospecting potential in the Altyn Shaliangxi lithium polymetallic deposit, Ruoqiang County, Xinjiang, China [J/OL]. *Geology in China* : 1-23. <https://link.cnki.net/urlid/11.1167.P.20240709.0953.008>
- 万渝生, 刘敦一, 简平, 2004. 独居石和锆石 SHRIMP-U-Pb 定年对比 [J]. *科学通报*, 49 (12) : 1185-1190. Wan Yusheng, Liu Dunyi, Jian Ping, 2004. SHRIMP-U-Pb dating of monazite and zircon [J]. *Chinese Science Bulletin*, 49 (12) : 1185-1190.
- 汪辉, 任龙飞, 邓浪江, 2024. 若羌库木萨依伟晶岩特征对锂矿形成的指示意义 [J]. *新疆地质*, 42 (2) : 254-258. Wang Hui, Ren Longfei, Deng Langjiang, 2024. Indicative significance of the characteristics of Kumusayi pegmatite in Ruoqiang County for the formation of lithium deposits [J]. *Xinjiang Geology*, 42 (2) : 254-258.
- 王登红, 代鸿章, 刘善宝, 等, 2022. 中国锂矿十年来勘查实践和理论研究的十个方面新进展新趋势 [J]. *地质力学学报*, 28 (5) : 743-764. Wang Denghong, Dai Hongzhang, Liu Shanbao, et al, 2022. New progress and trend in ten aspects of lithium exploration practice and theoretical research in China in the past decade [J]. *Journal of Geomechanics*, 28 (5) : 743-764.
- 王登红, 李建康, 付小方, 2005. 四川甲基卡伟晶岩型稀有金属矿床的成矿时代及其意义 [J]. *地球化学*, 34 (6) : 541-547. Wang Denghong, Li Jiankang, Fu Xiaofang, 2005.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating for the Jiajika pegmatite-type rare metal deposit in western Sichuan and its significance [J]. *Geochimica*, 34 (6) : 541-547.
- 王核, 黄亮, 白洪阳, 等, 2022. 中国锂资源的主要类型、分布和开发利用现状: 评述和展望 [J]. *大地构造与成矿学*, 46 (5) : 848-866. Wang He, Huang Liang, Bai Hongyang, et al, 2022. Types, distribution, development and utilization of lithium mineral resources in China: review and perspective [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 46 (5) : 848-866.
- 王核, 马华东, 张嵩, 等, 2023. 新疆阿尔金山地区黄龙岭超大型伟晶岩型锂矿床的发现及找矿意义 [J]. *岩石学报*, 39 (11) : 3307-3318. Wang He, Ma Huadong, Zhang Song, et al, 2023. Discovery of the Huanglongling giant lithium pegmatite deposit in Altyn Tagh, Xinjiang, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 39 (11) : 3307-3318.
- 王核, 徐义刚, 闫庆贺, 等, 2021. 新疆白龙山伟晶岩型锂矿床研究进展 [J]. *地质学报*, 95 (10) : 3085-3098. Wang He, Xu Yigang, Yan Qinghe, et al, 2021. Research progress on Bailongshan pegmatite type lithium deposit, Xinjiang [J]. *Acta Geologica Sinica*, 95 (10) : 3085-3098.
- 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 [J]. *地质学报*, 93 (6) : 1523-1532. Wang Qian, Hou Kejun, Zou Tianren, 2019. Isotopic dating method suitable for rare-metal deposits and its application [J]. *Acta Geologica Sinica*, 93 (6) : 1523-1532.
- 王秋舒, 2016. 全球锂矿资源勘查开发及供需形势分析 [J]. *中国矿业*, 25 (3) : 11-15, 24. Wang Qiushu, 2016. Analysis of global lithium resources exploration and development, supply and demand situation [J]. *China Mining Magazine*, 25 (3) : 11-15, 24.
- 王秋舒, 元春华, 2019. 全球锂矿供应形势及我国资源安全保障建议 [J]. *中国矿业*, 28 (5) : 1-6. Wang Qiushu, Yuan Chunhua, 2019. The global supply situation of lithium ore and suggestions on resources security in China [J]. *China Mining Magazine*, 28 (5) : 1-6.
- 王汝成, 谢磊, 诸泽颖, 等, 2019. 云母: 花岗岩—伟晶岩稀有金属成矿作用的重要标志矿物 [J]. *岩石学报*, 35 (1) : 69-75. Wang Rucheng, Xie Lei, Zhu Zeying, et al, 2019. Micas: important indicators of granite-pegmatite-related rare-metal mineralization [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35 (1) : 69-75.
- 吴黎光, 李献华, 2020. 独居石微区同位素和元素分析及地质应用 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 39 (6) : 1077-1094,

- 1064, 1066. Wu Liguang, Li Xianhua, 2020. Isotopic and elemental microanalyses of monazite and its geological application [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 39(6): 1077-1094, 1064, 1066.
- 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第三地质大队, 2022. 新疆库木萨依一带铁铜多金属矿普查报告[R]. 乌鲁木齐: 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第三地质大队. The Third Geological Brigade of the Bureau of Geological and Mineral Resource Exploration and Development of Xinjiang, 2022. Survey report of iron-copper polymetallic ore in Kumusayi area, Xinjiang [R]. Urumqi: The Third Geological Brigade of the Bureau of Geological and Mineral Resource Exploration and Development of Xinjiang.
- 徐欣宇, 张笑天, 张勇, 等, 2024. 湘赣交界高坳背钨—钼—锂矿床云母矿物特征及其地质意义[J]. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 47(3): 267-278. Xu Xinyu, Zhang Xiaotian, Zhang Yong, et al, 2024. Mica mineral characteristics and geological significance of Gao' aobei tungsten-molybdenum-lithium deposit in Hunan-Jiangxi junction [J]. *Journal of East China University of Technology (Natural Science)*, 47(3): 267-278.
- 徐兴旺, 李杭, 石福品, 等, 2019. 阿尔金中段吐格曼地区花岗伟晶岩型稀有金属成矿特征与找矿预测[J]. *岩石学报*, 35(11): 3303-3316. Xu Xingwang, Li Hang, Shi Fupin, et al, 2019. Metallogenic characteristics and prospecting of granitic pegmatite-type rare metal deposits in the Tugeman area, middle part of Altyn Tagh [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(11): 3303-3316.
- 徐喆, 张芳荣, 张福神, 等, 2024. 江西硬岩型锂矿类型划分及其找矿启示[J]. *华东地质*, 45(1): 62-77. Xu Zhe, Zhang Fangrong, Zhang Fushen, et al, 2024. Classification of hard rock lithium deposits in Jiangxi Province and its implication for prospecting [J]. *East China Geology*, 45(1): 62-77.
- 袁四化, 2006. 初论阿尔金山中—新生代走滑隆升史及其对柴西盆地形成的约束[D]. 长春: 吉林大学. Yuan Sihua, 2006. Preliminary study on Meso-Cenozoic strike-slip uplifting history of the Altyn Mountain and its constraints to the formation of the western Qaidam Basin, China [D]. Changchun: Jilin University.
- 张焕, 何鹏, 芦西战, 等, 2022. 阿尔金北缘瓦石峡南部稀有金属、稀土矿点的发现及意义[J]. *现代矿业*, 38(1): 34-36, 87. Zhang Huan, He Peng, Lu Xizhan, et al, 2022. Discovery and significance of rare and rare earth metal deposits in the south of Washixia, northern margin of Altun [J]. *Modern Mining*, 38(1): 34-36, 87.
- 张辉, 吕正航, 唐勇, 2021. LCT型伟晶岩及其锂矿床成因概述[J]. *地质学报*, 95(10): 2955-2970. Zhang Hui, Lü Zhenghang, Tang Yong, 2021. A review of LCT pegmatite and its lithium ore genesis [J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(10): 2955-2970.
- 张若愚, 曾忠诚, 朱伟鹏, 等, 2016. 阿尔金造山带帕夏拉依档岩体锆石U-Pb年代学、地球化学特征及地质意义[J]. *地质论评*, 62(5): 1283-1299. Zhang Ruoyu, Zeng Zhongcheng, Zhu Weipeng, et al, 2016. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating, geochemical features and their geological implications of Paxialayidang plutons on the southern margin of Altyn Tagh [J]. *Geological Review*, 62(5): 1283-1299.
- 张勇, 潘家永, 马东升, 2020. 赣西北大湖塘钨矿富锂—云母化岩锂元素富集机制及其对锂等稀有金属找矿的启示[J]. *地质学报*, 94(11): 3321-3342. Zhang Yong, Pan Jiayong, Ma Dongsheng, 2020. Lithium element enrichment and inspiration for prospecting for rare-metal mineralization in the Dahutang tungsten deposit: constraints from mineralogy and geochemistry of hydrothermal alteration [J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(11): 3321-3342.
- 周振华, 车合伟, 马星华, 等, 2016. 初论稀有金属矿床研究的一些重要进展[J]. *地质与勘探*, 52(4): 614-626. Zhou Zhenhua, Che Hewei, Ma Xinghua, et al, 2016. A preliminary discussion on some important advances of the rare metal deposit [J]. *Geology and Exploration*, 52(4): 614-626.
- 朱小辉, 曹玉亭, 刘良, 等, 2014. 阿尔金淡水泉花岗质高压麻粒岩P-T演化及年代学研究[J]. *岩石学报*, 30(12): 3717-3728. Zhu Xiaohui, Cao Yuting, Liu Liang, et al, 2014. P-T path and geochronology of high-pressure granitic granulite from Danshuiquan area in Altyn Tagh [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(12): 3717-3728.

## Monazite U–Pb Geochronology and Mica Chemistry of the Kumusayi Pegmatite–Type Li Deposit, Central Altyn Tagh: Geological Implications

ZHONG Jinchang<sup>1</sup>, ZHANG Yong<sup>1,2</sup>, AN Qian<sup>3</sup>, HUANG Jie<sup>1,4</sup>, PAN Jiayong<sup>2</sup>, ZHANG Xiaotian<sup>2</sup>, HAN Shanchu<sup>2</sup>, YAN Jie<sup>1,2</sup>, ZHANG Siyuan<sup>1</sup>, DAI Haotong<sup>1</sup>, WANG Fumei<sup>1</sup>, JIANG Huayang<sup>1</sup>, ZHANG Haosai<sup>1</sup>, CHEN Junhao<sup>1</sup>, ZHANG Xia<sup>1</sup>

1. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Genesis and Prospect for Strategic Minerals, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China;

2. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment (East China University of Technology), Nanchang 330013, Jiangxi, China;

3. Jiangxi Institute of Nuclear Industry Geological Survey, Nanchang 330038, Jiangxi, China;

4. Jiangxi Science and Technology Normal University, Nanchang 330030, Jiangxi, China

**Abstract:** In recent years, substantial advancements have been achieved in lithium prospecting within the Altyn region, where exploration and research have identified a series of Caledonian spodumene pegmatite-type lithium deposits. Nonetheless, the metallogenic potential of Indosinian lithium, along with the mechanisms of lithium migration and enrichment in pegmatite-type lithium deposits, continues to be a subject of considerable scientific interest. The Kumusayi granite-pegmatite type lithium-beryllium deposit is classified as a medium-sized spodumene deposit, with the potential to reach a super-large scale. Its host rock is biotite schist, which exhibits significant hydrothermal alterations, such as greisenization, adjacent to the ore bodies. Through comprehensive field investigations and analytical techniques, including petrographic microscopy, electron probe microanalysis (EPMA), and laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS), the formation age of the lithium-ore-forming pegmatite has been established. Furthermore, the mineralogical composition of various mica types within the pegmatite and host rocks has been elucidated, and the migration and evolution patterns of rare metal elements, such as lithium, have been investigated. The U-Pb isotopic analysis of monazite from the Kumusayi lithium deposit indicates that the formation ages of the coarse-grained tourmaline-spodumene granite pegmatite and the muscovite granite pegmatite with inclusions are (224.6±3.0) Ma and (224.2±3.6) Ma, respectively. These findings suggest that the formation occurred during the Indosinian period. The investigation of mica minerals elucidates the magmatic-hydrothermal evolution process of the Kumusayi pegmatite-type lithium deposit. During the magmatic stage, the crystallization of spodumene significantly depleted the system's lithium content, subsequently leading to the formation of lithium-bearing muscovite (magmatic-type). During the ensuing magmatic-hydrothermal alteration of the host rock, some lithium was leached from the host rock and re-precipitated to form lithium-rich muscovite ( $\text{Li}_2\text{O}=1.8\%\sim 2.3\%$ ). In later stages (H2-H3), the muscovite continued to consume lithium from the hydrothermal fluid, culminating in the formation of low-lithium muscovite ( $\text{Li}_2\text{O}=0.08\%\sim 0.15\%$ ) in the final stage. The study provides substantial evidence that the interplay between magmatic processes and hydrothermal activity is a critical factor in the enrichment and mineralization of lithium within muscovite-type lithium deposits. The determination of the Indosinian lithium mineralization age, along with insights into the detailed processes of lithium migration and enrichment during magmatic-hydrothermal events at the Kumusayi lithium deposit, offers new chronological data and exploration insights for lithium mineral exploration in the Altyn region.

**Key words:** mica; monazite; LA-ICP-MS; U-Pb isotopes; pegmatite-type lithium deposit; Kumusayi; Altyn region