



引文格式: 高永宝, 吴欢欢, 李文渊, 等. 新疆 509 道班西锂矿电气石矿物学及⁴⁰Ar-³⁹Ar 同位素年代学特征[J]. 西北地质, 2025, 58(4): 207–222. DOI: 10.12401/j.nwg.2025026

Citation: GAO Yongbao, WU Huanhuan, LI Wenyuan, et al. Tourmaline Mineralogy, ⁴⁰Ar-³⁹Ar Dating and Implications for the 509 Daobanxi Lithium Deposit in Xinjiang Province[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(4): 207–222. DOI: 10.12401/j.nwg.2025026

新疆 509 道班西锂矿电气石矿物学及⁴⁰Ar-³⁹Ar 同位素年代学特征

高永宝^{1,2}, 吴欢欢¹, 李文渊^{2,3}, 李侃², 张江伟², Fred Jourdan⁴, 王子龙¹, 李永⁵

(1. 中国地质调查局金矿勘查技术创新中心/中国地质调查局西安矿产资源调查中心, 陕西 西安 710100; 2. 自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710119; 3. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 4. 西澳氩同位素实验室, 科廷大学, 澳大利亚 珀斯 WA6102; 5. 新疆维吾尔自治区有色地质勘查局地质矿产勘查研究院, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要: 西昆仑大红柳滩地区作为中国重要的超大型伟晶岩型锂矿集区之一, 其成矿元素超常富集机制备受关注。前人对区内富锂锂辉石伟晶岩开展了较为细致的研究, 但受限于伟晶岩定年技术的制约, 对于广泛出露的贫 Li 含电气石伟晶岩成因及其与富 Li 伟晶岩的关系尚未开展系统的对比研究。针对这一问题, 笔者对区内 509 道班西超大型锂矿中的贫 Li 伟晶岩开展了详细的岩相学和电气石矿物学研究, 并成功获得电气石⁴⁰Ar-³⁹Ar 同位素年龄。结果显示: ① 贫 Li 伟晶岩为含石榴子石电气石伟晶岩, 主要由斜长石、石英、碱性长石、白云母、电气石及少量石榴子石组成。② 贫 Li 伟晶岩中电气石为富 FeO^T (11.19%~13.24%)、贫 CaO (0.06%~0.29%)、MgO (0.02%~0.10%) 和 Na₂O (0.69%~1.12%) 的黑电气石亚族, 其成分主要受 (X_□, Al) (Na, R²⁺)₋₁ 元素置换对控制, 与区内二云母花岗岩及锂辉石伟晶岩中电气石成分特征相似, 属于典型的岩浆-热液成因电气石。③ 电气石⁴⁰Ar-³⁹Ar 坪年龄为 (229.8±0.4) Ma, 指示贫 Li 伟晶岩与二云母花岗岩及富 Li 伟晶岩为同期岩浆-热液产物。结合伟晶岩空间分布及电气石成分演化特征, 笔者认为贫 Li 伟晶岩代表演化早期贫稀有金属的熔体, 富 Li 伟晶岩则是演化程度更高的富稀有金属岩浆热液产物, 其中靠近岩体的伟晶岩中贫 Li 矿物 (长石、石榴子石、电气石等) 的结晶促进了稀有金属在残余熔/流体中的进一步富集, 最终导致了岩体近端贫矿、远端富矿的伟晶岩分布特点。

关键词: 大红柳滩地区; 509 道班西; 电气石; 矿物成分; ⁴⁰Ar-³⁹Ar 定年

中图分类号: P613

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2025)04-0207-16

Tourmaline Mineralogy, ⁴⁰Ar-³⁹Ar Dating and Implications for the 509 Daobanxi Lithium Deposit in Xinjiang Province

GAO Yongbao^{1,2}, WU Huanhuan¹, LI Wenyuan^{2,3}, LI Kan², ZHANG Jiangwei², Fred Jourdan⁴, WANG Zilong¹, LI Yong⁵

收稿日期: 2024-11-30; 修回日期: 2025-03-07; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 国家自然科学基金项目“战略性关键金属超常富集成矿动力学重大研究计划集成”(92262302), 国家自然科学基金地质联合基金重点项目(U2244204), 第二次青藏高原综合科学考察研究专题(2019QZKK0806), 国家重点研发计划项目“锂、铍等战略性金属矿产资源成矿规律与预测评价”课题(2019YFC0605201), 中国地质调查局项目(DD20230060)联合资助。

作者简介: 高永宝(1982-), 男, 研究员, 博士, 主要从事区域成矿及矿床学研究。E-mail: gaoyongbao2006@126.com。

(1. Technology Innovation Center for Gold Ore Exploration, Xi'an Mineral Resources Survey, China Geological Survey, Xi'an 710100, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, MNR, Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710119, Shaanxi, China; 3. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 4. Western Australian Argon Isotope Facility, Curtin University, Perth WA6102, Australian; 5. Institute of Geological and Mineral Exploration, Xinjiang Non-ferrous Geological Exploration Bureau, Urumqi 830000, Xinjiang, China)

Abstract: The Dahongliutan ore district in West Kunlun, one of the most important super-large pegmatite-type lithium mineralization zones in China, has attracted significant attention for the mechanisms of rare metal enrichment. Previous studies have conducted detailed research on the Li-rich spodumene-bearing pegmatites in the area. However, the genesis of the widely exposed, Li-poor tourmaline-bearing pegmatites and their relationship with lithium-rich pegmatites remains debated. This study focuses on the petrography and tourmaline mineralogy of the Li-poor pegmatites in the super-large 509 Daobanxi lithium deposit and successfully obtains a new tourmaline ^{40}Ar - ^{39}Ar isotope age. The results show that: ① the Li-poor garnet-tourmaline-bearing pegmatite, mainly composed of plagioclase, quartz, alkali feldspar, muscovite, tourmaline, and minor garnet; ② the composition of the tourmaline is relatively homogeneous and characterized by high FeO^T (11.19%–13.24%), low CaO (0.06%–0.29%), MgO (0.02%–0.10%), and Na_2O (0.69%–1.12%) contents, belonging to the schorl subgroup. Comparable to the tourmaline characteristics of two-mica granite and spodumene pegmatite in the area, the studied tourmaline is of typical magmatic-hydrothermal tourmaline. The tourmaline composition is mainly controlled by the $(\text{X}_{\square}, \text{Al})(\text{Na}, \text{R}^{2+})_{-1}$ substitution; ③ the ^{40}Ar - ^{39}Ar plateau age of the tourmaline is (229.8 ± 0.4) Ma, indicating that the Li-poor pegmatites, biotite granites, and Li-rich pegmatites are products of single magmatic-hydrothermal activity. Based on the characteristics of the pegmatite occurrence, it is proposed that the Li-poor pegmatites represent an early-stage melt poor in rare metals, while the Li-rich ones are more evolved magmatic-hydrothermal products enriched in rare metals. The crystallization of Li-poor minerals (garnet, tourmaline, feldspar, etc.) in the pegmatites near the intrusion facilitated further enrichment of rare metals in the residual melt/fluid, leading to the distribution of pegmatites with Li-poor zones near the intrusion and Li-rich zones further away.

Keywords: Dahongliutan area; 509 Daobanxi; tourmaline; mineral chemistry; ^{40}Ar - ^{39}Ar dating

锂是现代电子工业、农业、医药以及新能源产业(特别是新能源汽车电池)等领域被广泛使用的重要金属,被誉为 21 世纪的能源金属(Linnen et al., 2014; Li et al., 2015)。世界锂资源主要来源于盐湖型锂矿和硬岩型锂矿(Simmons et al., 2012),其中伟晶岩型锂矿是中国锂资源的主要来源(Li et al., 2015)。大红柳滩矿集区位于西昆仑造山带,自 20 世纪 60 年代大红柳滩稀有金属矿床发现以来,该带相继发现 509 道班西、507、俘虏沟南 1 号、2 号、509 北、康西瓦东、龙门山等多个稀有金属矿床,成为中国近年稀有金属最重要的勘查区之一(李侃等, 2019; Gao et al., 2020; Yan et al., 2022; 孔会磊等, 2023; 王核等, 2023; 洪涛等, 2024)。这些 Li-Be 稀有金属矿床以花岗伟晶岩脉的形式产出,并且沿着岩体向远端呈现不含矿的白云母-微斜长石型伟晶岩、Be 矿化白云母-微斜长石-钠长石型伟晶岩、

再到 Li-Ta-Nb 矿化的石英-钠长石-锂辉石型的空间分带(Gao et al., 2020)。目前,学界大多认为稀有金属伟晶岩脉是花岗质岩浆高度结晶分异的产物(Fan et al., 2020; Yan et al., 2022)。然而,也有一些学者认为,这类伟晶岩脉与造山运动过程中变沉积岩的深熔事件有关(Simmons et al., 2012; Chen et al., 2020; Lv et al., 2021)。解决这一争议的关键是准确厘定不同类型伟晶岩形成时代,进而建立成矿伟晶岩与同时代花岗岩体的成因演化关系。对于花岗伟晶岩定年,传统方法通常采用白云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 、锆石 U-Pb 等定年技术。然而近些年的研究表明,花岗伟晶岩中的锆石通常含有极高的 U、Th 含量,伴随显著的放射性衰变损伤和蜕晶化,从而导致 U-Pb 体系受到扰动,难以获得可靠的 U-Pb 年龄(闫庆贺等, 2017; Wu et al., 2024a)。同时,云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 定年因其同位素体系封闭温度较低,常

被后期热液事件所叠置,难以反映准确的结晶年龄。虽然如铌钽铁矿、锡石等矿石矿物的U-Pb定年结果已趋于成熟(杨岳衡等, 2024),但上述矿物在大红柳滩贫锂伟晶岩中并不发育。近年,国外学者针对封闭温度更高的一些矿物(如角闪石、电气石等)开展了 ^{40}Ar - ^{39}Ar 定年的尝试(Barredo et al., 2009)。其中,电气石作为伟晶岩中常见的副矿物,其 ^{40}Ar - ^{39}Ar 测试方法的建立为准确厘定伟晶岩形成年龄提供了新的视角(Martínez-Martínez et al., 2010; Thern et al., 2020)。

509道班西矿床是近年在大红柳滩矿集区新发现的一处超大型伟晶岩型锂矿床,矿体主要赋存在富锂辉石的花岗伟晶岩脉中,前人对该矿床成矿地质特征开展了较为详细的研究(彭海练等, 2018; 李永等, 2022; 孔会磊等, 2023; 霍海龙等, 2024),同时结合年代学工作初步厘定了富锂伟晶岩的侵位时代(Wang et al., 2020; 谭克彬等, 2021),结合空间展布特征认为其形成与区内三叠纪二长花岗岩密切相关(王威等, 2022; Zhao et al., 2024)。然而,目前对区内贫锂伟晶岩的成因及其与富锂伟晶岩的关系尚缺乏清晰的认识。笔者选取509道班西矿床为研究对象,运用电气石 ^{40}Ar - ^{39}Ar 定年技术对贫锂伟晶岩形成时代进行限定,结合矿物学研究探究岩浆-热液演化特征,为该矿床形成过程及稀有金属成矿机制提供新的约束。

1 区域地质背景

大红柳滩一带位于青藏高原北缘西部,大地构造位置处于西藏-三江造山系之巴颜喀拉地块(图1a)(李荣社等, 2011)。区内花岗伟晶岩群分布广泛,是帕米尔-昆仑山伟晶岩区的重要组成部分(邹天人, 2006)。近年来大红柳滩一带伟晶岩型锂矿取得了一系列找矿突破,已成为中国重要的锂矿资源基地,与甲基卡锂矿资源基地共同构成了西昆仑-松潘甘孜巨型伟晶岩型锂成矿带。

大红柳滩一带目前已发现的伟晶岩型稀有金属矿主要分布在康西瓦断裂以南、大红柳滩-郭扎错断裂以北(图1b),构造位置属于可可西里-松潘二叠纪—三叠纪前陆盆地。出露地层主要有古元古界康西瓦岩群(Pt_1K)、二叠系黄羊岭群(PH)及三叠系巴颜喀拉山群(TB),整体呈近NW向带状展布。康西瓦岩群总体为一套深变质、强变形地层,岩性主要有黑云石英片岩、黑云斜长石英麻粒岩、片麻岩、大理岩等,呈构

造岩片状展布。黄羊岭群主要为一套细碎屑岩夹少量碳酸盐岩及中基性火山岩。巴颜喀拉山群为一套碎屑岩夹少量碳酸盐岩建造,具复理石建造特征,为深水浊积岩盆地沉积。富锂伟晶岩在上述地层均有产出,但大部分发育在巴颜喀拉山群。

区内断裂构造较为发育,整体呈NW-SE向展布,主要有康西瓦断裂、大红柳滩-郭扎错断裂(图1b)。其中,康西瓦断裂是秦祁昆造山系与西藏-三江造山系的分界断裂,具有长期活动的特点,控制区内古生代至中生代各个时期的沉积建造和岩浆岩的展布。大红柳滩-郭扎错断裂为巴颜喀拉地块与羌塘弧盆系的分界线,断裂两侧沉积建造与成矿类型均存在明显差异。

该区属中生代三十里营房-泉水沟构造岩浆岩带,大规模的中酸性花岗岩以岩基状产出,复式岩体位于喀拉喀什河南岸,呈狭长NW-SE向带状展布,走向与区域康西瓦断裂一致。岩体中岩石类型多样,主要有中-细粒黑云母二长花岗岩、二云母二长花岗岩、黑云母花岗闪长岩、黑云母石英闪长岩、含石榴石电气石二云母二长花岗岩等,其中以含斑黑云母二长花岗岩规模最大。岩体侵入于三叠系巴颜喀拉山岩群(TB)、二叠系黄羊岭岩群(PH)及古元古界康西瓦岩群(Pt_1K)之中,接触界限陡倾。近年来测年数据显示,岩体主体形成于220~208 Ma(乔耿彪等, 2015; 魏小鹏等, 2017; Yan et al., 2018; 谭克彬等, 2021; 唐俊林等, 2022),属晚三叠世岩浆活动的产物。

大红柳滩一带伟晶岩脉主要分布于康西瓦-俘虏沟一带。伟晶岩脉与岩体关系密切,整体沿岩体两侧分布。区域上伟晶岩脉分布不均匀,脉体成群成带出现、分段集中,在康西瓦-大红柳滩、509道班西及俘虏沟一带最为发育。伟晶岩少部分发育在岩体内部,大多数呈脉状、不规则脉状、似层状、扁豆状、透镜状、串珠状产出于古元古界康西瓦岩群、二叠系黄羊岭群、三叠系巴颜喀拉山群中,受构造控制明显,沿岩石节理、裂隙充填,长轴方向整体呈NW-SE向,与区域构造线方向一致。伟晶岩脉长短不一,一般在十几米~几百米之间,部分可达几公里,厚度一般在几米~几十米,个别可达百米。

2 矿床地质特征及电气石产出特征

509道班西锂矿床位于和田县南西方向约150 km处,处于甜水海地体东段,大红柳滩-郭扎错断裂以北,

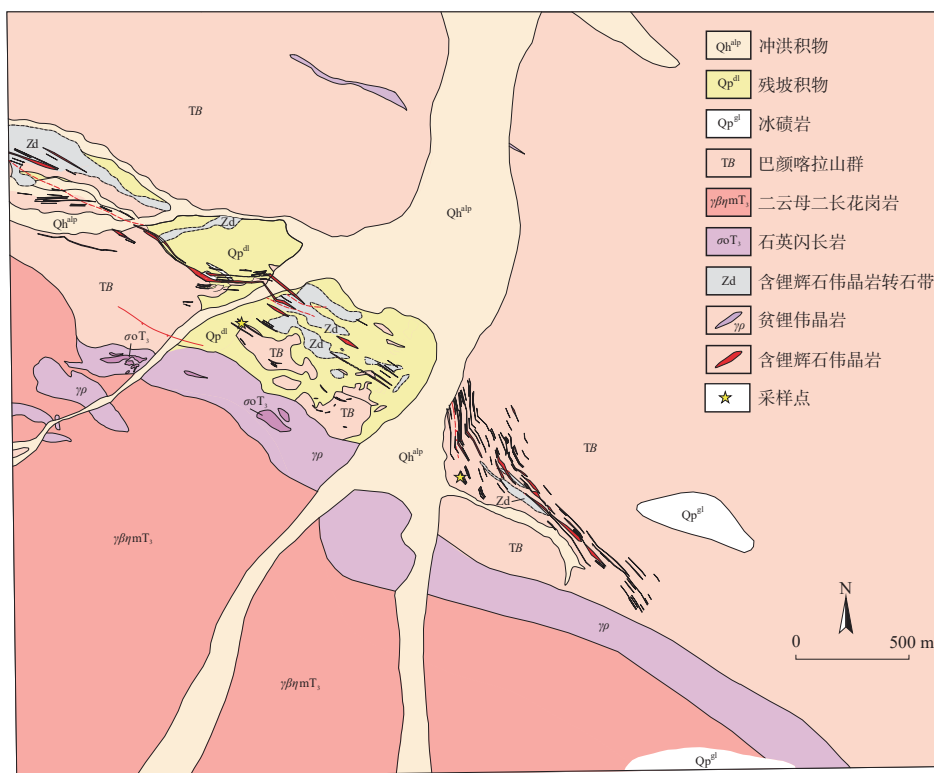
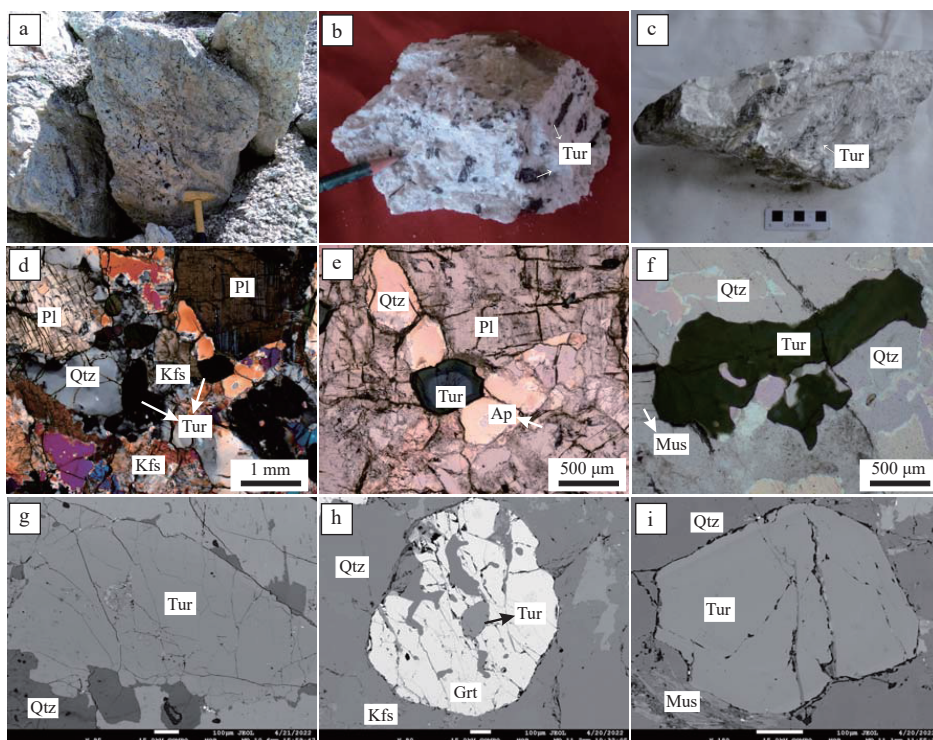


图2 509 道班西锂矿床矿区地质简图

Fig. 2 Simplified geological map of the 509 Daobanxi lithium deposit



a、b. 石榴子石电气石伟晶岩脉中墨绿色长柱状电气石；c. 含锂辉石伟晶岩脉中绿色充填状电气石；d、e. 石榴子石电气石伟晶岩中电气石呈粒状分布于长石和石英颗粒间；f. 含锂辉石伟晶岩中充填状电气石；g~i. 石榴子石电气石伟晶岩脉中电气石 BSE 特征

图3 509 道班西锂矿床含石榴子石电气石伟晶岩与含锂辉石伟晶岩野外及镜下照片

Fig. 3 Field and microscopic photos of garnet-tourmaline pegmatite and spodumene pegmatite in the 509 Daobanxi lithium deposit

及少量石榴子石(~3%)组成(图 3d)。其中,斜长石粒径约为 0.5~3.0 mm,呈他形板状,主要为更长石-钠长石,裂纹发育,常被石英交代。石英粒径约为 0.1~2.0 mm,呈他形粒状,裂纹发育,波状消光,较均匀分布。碱性长石粒径约为 0.5~4.0 mm,呈他形板状,主要为微斜长石、正长石,裂纹发育,常被石英交代。白(绢)云母粒径约为 0.05~0.8 mm,白云母呈鳞片状、片状,绢云母呈显微鳞片状,杂乱分布于长英质粒间。石榴子石粒径约为 0.1~1.0 mm,呈半自形粒状,裂纹发育,见被石英交代(图 3e)。副矿物主要为磷灰石,约为 0.001~0.005 mm×0.05~0.25 mm,呈针柱状,杂乱分布于长石、石英中。该类型电气石粒径约为 0.1~2.8 mm,呈半自形-自形长柱状,淡蓝-深蓝色或淡墨绿-深墨绿色;常具颜色环带,核部呈淡蓝色-深蓝色,边部呈淡墨绿-墨绿色(图 3e~图 3g);与石英、长石和云母直接或呈弧形接触,少数颗粒被包含于石榴子石中(图 3h)。

3 采样及测试方法

新鲜样品的探针片磨制和双面抛光在自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室完成。电气石单矿物挑选及 ^{40}Ar - ^{39}Ar 同位素前处理在澳大利亚科廷大学完成。首先利用 Frantz 等磁力重磁分选机对电气石颗粒进行分离,随后在双目镜下进行挑选,随后在稀释的 HF(2N)溶液中浸泡 5 min 后利用蒸馏水冲洗干净用以同位素分析。

3.1 电子探针分析

电气石主量元素分析在自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室配备的 JEOL JXA-8230 电子探针完成。分析时电子束斑为 1 μm ,电压 15 kV,电流 15 nA,分析了 Si、Ti、Al、Fe、Mn、Mg、Ca、Na、K、F 及 Cl 在内的 11 种元素。Al 和 Ca 的峰值及背景信号收集时间分别为 15 s 和 10 s,其他元素峰值及背景信号收集时间均为 10 s。对于氧化物含量大于 1% 的元素,测试精度(相对偏差 RSD)优于 3%;对于氧化物含量介于 0.1%~1% 的元素,测试精度(相对偏差 RSD)优于 20%。

3.2 电气石 ^{40}Ar - ^{39}Ar 同位素分析

将电气石样品及标样装在样品盘中辐照 40 h,标样为 GA1550(Renne et al., 1998),其年龄为 99.74 Ma($\pm 0.10\%$)(Renne et al., 2010)。样品盘进行 Cd 屏蔽后(以减少核干扰反应),置于俄勒冈州立大学核反应堆(美国)中央位置进行中子辐照。基于标准物质计

算的电气石的平均 J 值为 0.010 991($\pm 0.06\%$)。使用自动空气移液器监测质量歧视效应,结果显示相对于空气比值(298.56 ± 0.31)(Lee et al., 2006)测试期间平均值为 0.990 895($\pm 0.07\%$)每道尔顿(原子质量单位)。干扰同位素的校正因子分别为($^{39}\text{Ar}/^{37}\text{Ar}$)Ca= 6.95×10^{-4} ($\pm 1.3\%$),($^{36}\text{Ar}/^{37}\text{Ar}$)Ca= 2.65×10^{-4} ($\pm 0.84\%$)及($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$)K= 7.30×10^{-4} ($\pm 12.4\%$)(Renne et al., 2013)。 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 分析在科廷大学氩同位素实验室进行。使用 100W PhotonMachine CO_2 (IR, 10.6 μm)激光连续照射电气石晶体 60 s,对电气石晶体和基体进行阶段加热。每个标准晶体都在一个步骤中融合。气体在 240cc 的超低体积不锈钢提取管线中使用一个 SAES AP10 和一个 GP50 吸气剂进行纯化。使用 Thermofisher 的小体积(600cc)ARGUS VI 质谱仪以静态模式测量 Ar 同位素,固定分辨率设置为~200。测量在多接收模式下进行的,使用 4 个法拉第杯测量质量数 40 到 37,并使用一个 0 背景紧凑型离散倍增电极离子计数器来测量质量数 36。同时使用 10 个跳峰循环测量每个质量数的相对丰度和。每个质量数的积分时间为 33 s。检测器通过电子方式相互校准并使用空气射束信号。使用 ArArCALC 软件(Koppers, 2002)处理原始数据,并使用 Renne 等(2010)推荐的衰变常数计算年龄。每 3 到 4 个步骤监测一次空白。给出数据经过了空白、质量歧视和放射性衰变校正。坪谱确定标准如下:坪必须包含至少 70% 的 ^{39}Ar ;坪应分布在至少 3 个连续的步骤上,这些步骤在 95% 的置信水平上一致,并且满足至少 0.05 的拟合概率(P)。坪年龄在 2σ 水平上给出,并使用所有高原步骤的平均值计算,每个步骤均由其各自分析误差的逆方差加权。

4 分析结果

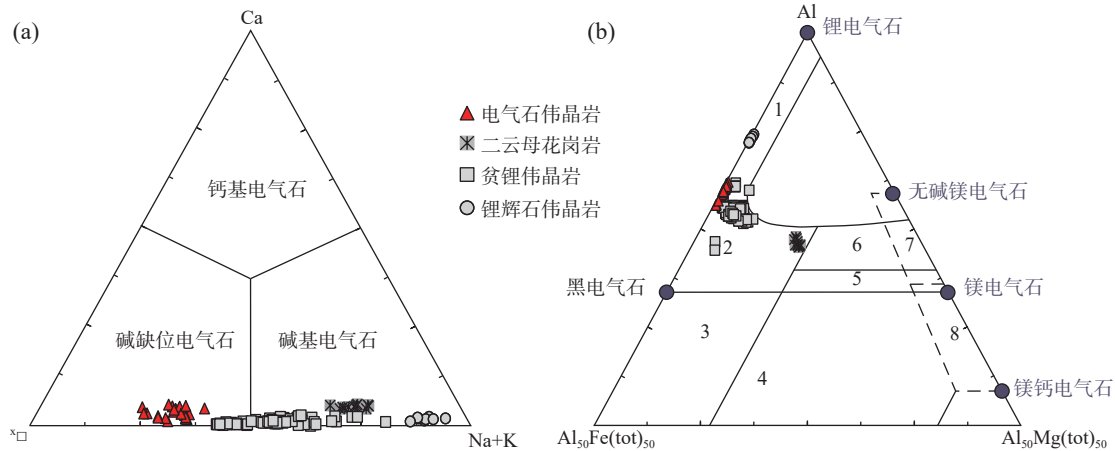
4.1 电子探针分析

电气石晶体化学的理想分子式为 $\text{XY}_3\text{Z}_6(\text{T}_6\text{O}_{18})(\text{BO}_3)_3\text{V}_3\text{W}$,其中 $\text{X} = \text{Na}^+、\text{Ca}^{2+}、\text{K}^+、\text{空位}$; $\text{Y} = \text{Mg}^{2+}、\text{Fe}^{2+}、\text{Mn}^{2+}、\text{Al}^{3+}、\text{Fe}^{3+}、\text{Ti}^{4+}$; $\text{Z} = \text{Al}^{3+}、\text{Fe}^{3+}、\text{Mg}^{2+}$; $\text{T} = \text{Si}^{4+}、\text{Al}^{3+}、\text{B}^{3+}$; $\text{V} = \text{OH}^-、\text{O}^{2-}$; $\text{W} = \text{F}^-、\text{OH}^-、\text{O}^{2-}$ (Henry et al., 2011)。文中电气石的结构式基于 $\text{T}+\text{Z}+\text{Y}=15$ (阳离子数)计算获得(Henry et al., 1996),其中 B_2O_3 和 H_2O 含量分别依据 $\text{B}=3$ 和 $\text{OH}+\text{F}+\text{Cl}=4$ 计算。测试结果及结构式见表 1。

测试结果显示所有电气石成分较为均一,均表现为

富 FeO^{T} (11.19%~13.24%)、 Al_2O_3 (33.11%~34.65%)，贫 CaO (0.06%~0.29%)、 MgO (0.02%~0.10%)、 Na_2O (0.69%~1.12%)、 K_2O ($\leq 0.03\%$) 的特点。F 含量整体较低，低于 0.04%。根据电气石 X 位置阳离子的占位分类 (Henry et al., 2011)，所有样品均属于碱缺位电气石 (图 4a)。在 Henry 等 (1985) 提出的 Mg-Al-Fe 电气石成因判别图解中 (图 4b)，样品落入贫 Li 花岗岩和伟晶岩向富 Li 花岗岩和伟晶岩过渡区域，与区内已发表的二云母花岗岩、贫 Li 伟晶岩及锂辉石伟晶岩特征相似。在 $\text{Mg}/(\text{Fe}+\text{Mg})$ - $\text{Na}/(\text{Na}+\text{Ca})$ 电气石分类图

解中 (图 5a)，所有样品均属于富 Fe 黑电气石。由于文中电气石中极低的 Mg 含量；在 Mg-Fe 图中 (图 5b) 测点较为集中，指示 Y 位置 Fe^{2+} 和 Mg 的替代不明显，而主要成分变化受控于 Fe 与 Al 的相互替代。结构式计算结果显示，Y 位存在显著的 Al，指示 Al 通过替代 Fe 进入 Y 位，该过程中电价可通过 X 位空位或者 O 与 OH 的替换达到平衡。在 $\text{Al}-\text{X}$ (图 5c) 和 $\text{Na}-\text{X}$ (图 5d) 中，测点与区域已发表电气石数据显示出良好的 X 位空位与 Na 的替换趋势，指示 $(\text{X}_{\square}, \text{Al})(\text{Na}, \text{R}^{2+})$ -1 是控制区内电气石成分变化的主要替代机制。



1. 富 Li 花岗岩和伟晶岩、细晶岩；2. 贫 Li 花岗岩和伟晶岩、细晶岩；3. 富 Fe^{3+} 的石英-电气石岩 (热液蚀变花岗岩)；4. 含 Al 饱和和矿物相的变泥质岩和变砂屑岩；5. 不含 Al 饱和和矿物相的变泥质岩和变砂屑岩；6. 富 Fe^{3+} 的石英-电气石岩、钙质硅酸盐岩和变泥质岩；7. 贫 Ca 变质超镁铁岩和富 Cr、V 的变质沉积岩；8. 变质碳酸盐和变质辉石岩；大红柳滩地区二云母花岗岩、贫 Li 伟晶岩和锂辉石伟晶岩数据引自 Cao 等 (2023) 和夏永旗等 (2024)

图4 $\text{Ca}-\text{X}-(\text{Na}+\text{K})$ 三元图解 (a) (底图据 Henry et al., 2011)、Al-Fe-Mg 图解 (b) (底图据 Henry et al., 1985)

Fig. 4 (a) $\text{Ca}-\text{X}-(\text{Na}+\text{K})$ ternary diagram, and (b) Al-Fe-Mg diagram

4.2 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 同位素年代学

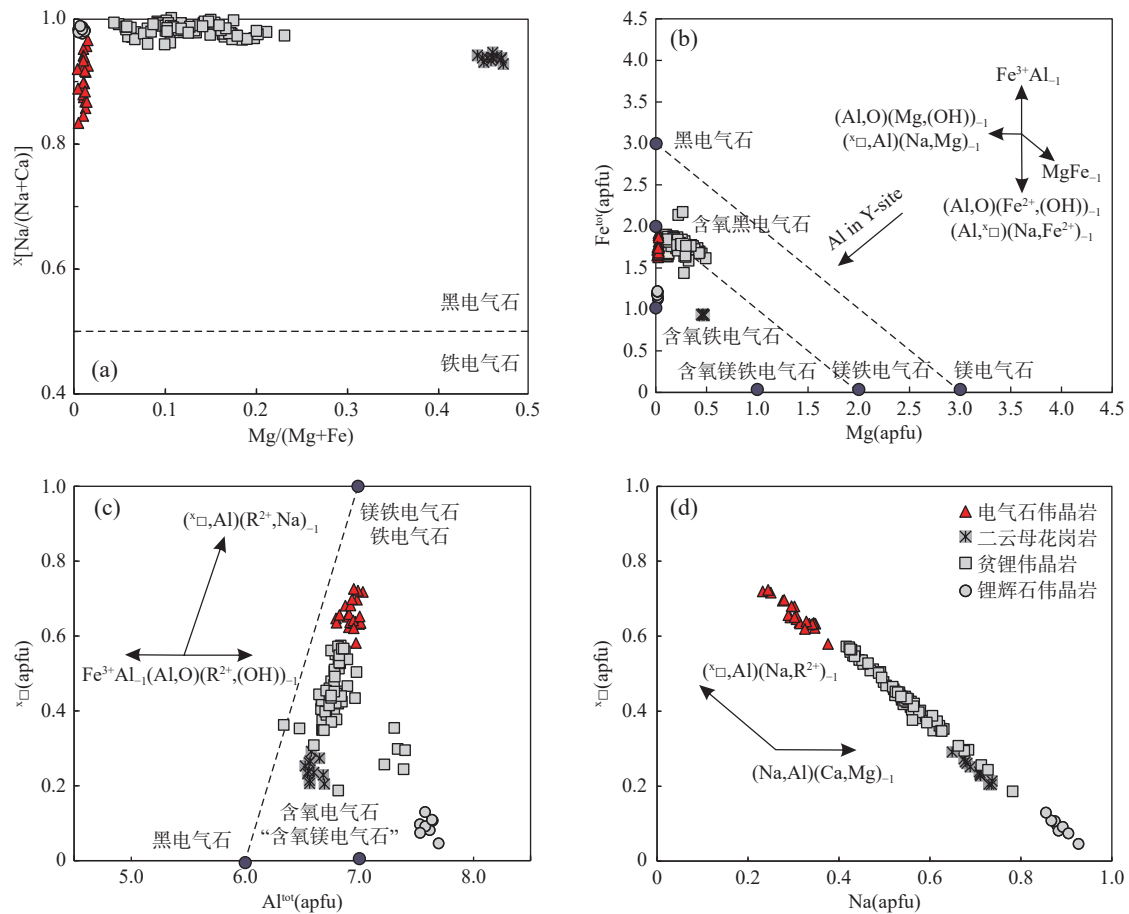
509 矿床电气石样品 509-5-2 的加热分析结果见表 2。坪年龄及 MSWD 的计算根据每一步释放的 ^{39}Ar 的百分比进行。显著性水平基于 $n-1$ 个自由度采用 χ^2 检验计算，其中 n 为步数， $\chi^2 = \text{MSWD} * (n-1)$ 。该样品总气体年龄为 $(301.4 \pm 1.2) \text{Ma}$ ，其中 7 个温度阶段形成了一个较为平坦的年龄坪，坪年龄为 $(229.8 \pm 0.4) \text{Ma}$ (MSWD=77.5)，对应了 81% 的 ^{39}Ar 析出量 (图 5)。

5 讨论

5.1 电气石类型及成因

元素 B 在岩浆热液过程中是一种易于迁移的元素，常在岩浆热液晚阶段富气相的流体中富集 (Liu et al., 2021; Wu et al., 2024b)。B 及其他易迁移元素 (如 F、

Cl 等) 的出溶与稀有金属成矿关系密切，而电气石则是花岗岩-热液系统中唯一显著沉淀 B 的矿物。关于花岗岩中电气石的 B 来源问题，大部分研究者认为其部分或完全源自岩浆，即电气石是在岩浆流体结晶过程中形成的 (Trumbull et al., 2008; Yang et al., 2015)。然而，并非所有的电气石都是富 B 岩浆的产物，电气石也可能在岩浆期后形成，即流体成因 (Rozendaal et al., 1995)。研究表明，岩浆成因的电气石通常呈均一分布，缺乏明显的成分分带，化学特征是具有高 Fe/Mg 值，且在 Y 位富集 Al (Yang et al., 2015)。相比之下，热液成因的电气石则通常呈现细的成分振荡分带，相比岩浆电气石常更为富 Mg，而在 Y 点位则缺乏 Al 或 Al 含量较低 (Slack, 1996; Trumbull et al., 2008)。本次研究的电气石镜下并未观察到明显的成分振荡环带，化学成分上属于富 Fe、贫 Mg 的黑电气



大红柳滩地区二云母花岗岩、贫 Li 伟晶岩和锂辉石伟晶岩数据引自 Cao 等(2023)和夏永旗等(2024)

图5 电气石 $Mg/(Fe+Mg)$ - $Na/(Na+Ca)$ 分类图解(a) (据 Henry et al., 2011) 及离子占位替换趋势图解(b~d)

Fig. 5 (a) $Mg/(Fe+Mg)$ - $Na/(Na+Ca)$ classification diagram of tourmaline, and (b~d) ion occupation replacement trend diagram

石); 同时, Y 位存在显著的 Al, 显示出典型的岩浆电气石特征。这些特征与区内前人发表的二云母花岗岩、贫 Li 伟晶岩和锂辉石伟晶岩中的电气石特征相似, 指示其具有相似的母岩浆成分特征。在 Al-Fe-Mg 图解中(图 4b), 测试点集中落在贫 Li 花岗岩和伟晶岩、细晶岩向富 Li 花岗岩和伟晶岩、细晶岩中电气石的过渡区域。以上特征排除了岩浆期后外来热液成因, 指示 509 矿区贫锂伟晶岩中电气石为岩浆-热液过渡成因。此外, 前人针对大红柳滩矿区中电气石的研究表明, 不同类型电气石存在弱的 B 同位素分馏 ($-8.82\text{‰} \sim -7.85\text{‰}$), 但均落在典型岩浆电气石范围, 是岩浆-热液作用过渡阶段的产物(Cao et al., 2023)。由此可见, 区域上贫锂的电气石伟晶岩与富锂伟晶岩均为岩浆-热液成因。

5.2 电气石⁴⁰Ar-³⁹Ar 定年——成岩成矿时代新约束

前人对二长花岗岩及富锂伟晶岩开展了部分定年工作, 结果显示两者形成时代接近(201~179 Ma),

认为锂辉石花岗伟晶岩由二长花岗岩演化而来, 为晚三叠世岩浆热液富集成矿(王核等, 2017; 彭海练等, 2018)。但贫 Li 伟晶岩与富 Li 伟晶岩是否为同期作用产物, 两者是否存在演化关系, 目前尚未系统研究。近年, 国内学者对大红柳滩一带花岗岩和伟晶岩开展了较为详细的年代学工作, 包括锆石 U-Pb 定年、独居石 U-Pb 定年和白云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 定年, 也包括近几年新发展的锡石和铌铁矿等稀有金属矿物的直接定年。例如, Zhou 等(2021)对大红柳滩岩体的二云母花岗岩、二云母二长花岗岩、白云母二长花岗岩、黑云母花岗闪长岩及黑云母石英闪长岩等多种岩性开展了锆石 U-Pb 测年, 年龄范围为 217~209 Ma; 唐俊林等(2022)对龙门山锂矿黑云母花岗岩及细晶花岗岩开展锆石 U-Pb 定年获得 217~210 Ma 的年龄; 庾明洁等(2024)白龙山和俘虏沟的闪长岩及大红柳滩的二云母花岗岩开展了锆石 U-Pb 定年, 获得 213~211 Ma 的结晶年龄。这些研究

表 2 509 道班西锂矿床电气石(样品 509-5-2)⁴⁰Ar-³⁹Ar 阶段升温加热分析数据

Tab. 2 ⁴⁰Ar-³⁹Ar stepwise heating data for tourmaline (Sample 509-5-2) from the 509 Daobanxi lithium deposit

阶段加热过程		³⁶ Ar(a) [V]	³⁷ Ar(ca) [V]	³⁸ Ar(cl) [V]	³⁹ Ar(k) [V]	⁴⁰ Ar(r) [V]	Age (Ma)	± 2s	⁴⁰ Ar(r) (%)	³⁹ Ar(k) (%)	K/Ca	± 2s
1M75558	2.5%	0.000 073 5	0.001 188 0	0.000 006 2	0.000 118 3	0.066 427 0	3 561.96	± 391.40	75.16	0.04	0.052	± 0.243
1M75559	3.0%	0.000 171 0	0.002 241 3	0.000 066 8	0.000 182 4	0.102 216 9	3 558.86	± 251.53	66.69	0.07	0.042	± 0.132
1M75561	3.5%	0.000 169 1	0.003 323 4	0.000 000 0	0.000 279 8	0.081 106 1	2 588.98	± 158.83	61.63	0.10	0.044	± 0.090
1M75562	4.0%	0.000 136 5	0.000 458 8	0.000 000 0	0.000 292 9	0.074 369 2	2 409.52	± 143.66	64.60	0.11	0.332	± 4.720
1M75563	4.5%	0.000 138 7	0.002 051 0	0.000 000 0	0.000 364 3	0.048 151 2	1 622.18	± 126.31	53.76	0.13	0.092	± 0.300
1M75565	5.0%	0.000 133 9	0.001 297 9	0.000 000 0	0.000 359 9	0.052 818 0	1 736.89	± 119.41	56.92	0.13	0.144	± 0.669
1M75566	5.5%	0.000 124 3	0.000 305 0	0.000 033 0	0.000 306 4	0.039 859 7	1 605.42	± 143.45	51.78	0.11	0.522	± 11.512
1M75567	6.0%	0.000 092 4	0.003 431 5	0.000 000 0	0.000 289 7	0.023 510 5	1 153.06	± 172.95	46.02	0.11	0.044	± 0.088
1M75569	7.0%	0.000 215 6	0.001 551 2	0.000 000 0	0.000 504 5	0.075 084 4	1 752.48	± 86.03	53.84	0.19	0.169	± 0.804
1M75570	8.0%	0.000 161 4	0.001 292 5	0.000 000 0	0.000 664 5	0.092 266 5	1 675.56	± 64.45	65.68	0.25	0.267	± 1.297
1M75571	10.0%	0.000 489 3	0.006 759 1	0.000 000 0	0.004 277 0	0.272 672 6	960.21	± 12.98	65.12	1.58	0.329	± 0.316
1M75573	12.0%	0.000 633 0	0.025 872 0	0.000 057 3	0.017 973 9	0.392 937 9	389.36	± 3.92	67.52	6.66	0.361	± 0.104
1M75574	14.0%	0.000 593 7	0.045 957 6	0.000 019 9	0.031 469 4	0.488 491 2	284.83	± 2.34	73.37	11.66	0.356	± 0.046
1M75575	17.0%	0.000 547 4	0.067 891 1	0.000 044 4	0.049 245 0	0.635 505 5	239.83	± 1.54	79.54	18.24	0.377	± 0.034
1M75577	20.0%	0.000 390 8	0.075 564 7	0.000 077 6	0.056 229 3	0.671 460 3	222.99	± 1.34	85.19	20.83	0.387	± 0.036
1M75578	24.0%	0.000 372 8	0.055 369 5	0.000 068 7	0.042 527 7	0.537 313 9	235.12	± 1.73	82.84	15.75	0.399	± 0.052
1M75580	28.0%	0.000 217 4	0.030 191 0	0.000 057 9	0.024 766 2	0.324 263 7	243.10	± 2.92	83.32	9.17	0.427	± 0.098
1M75581	33.0%	0.000 188 8	0.024 692 5	0.000 090 0	0.015 408 1	0.197 194 5	237.97	± 4.69	77.76	5.71	0.324	± 0.088
1M75583	40.0%	0.000 092 8	0.018 813 2	0.000 099 7	0.014 088 3	0.164 308 4	218.08	± 5.15	85.56	5.22	0.389	± 0.151
1M75584	50.0%	0.000 226 4	0.013 149 3	0.000 034 3	0.010 639 1	0.115 782 3	204.29	± 6.90	63.13	3.94	0.421	± 0.206

一致表明,大红柳滩一带与富 Li 伟晶岩相伴生的花岗岩体成岩时代较为接近,集中在 230~207 Ma。然而,由于伟晶岩中锆石普遍存在明显的蜕晶化以及相伴随的 U-Pb 体系扰动(闫庆贺等, 2017; Wu et al., 2024a),伟晶岩的准确定年一直是该类型矿床成岩成矿年代学研究的难点。

传统方法上多采用白云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 定年技术对热液活动年龄进行限定,然而由于云母 Ar-Ar 体系封闭温度较低(图 6a),很容易受到后期构造热事件的影响发生 Ar-Ar 体系重置,导致记录的年龄不能准确反映伟晶岩的结晶年龄。例如, Gao 等(2020)对阿克塔斯和 509 道班西的含锂辉石伟晶岩开展了白云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 定年,年龄分别为(185±1)Ma 和(197±1)Ma;李永等(2022)测得 509 道班西矿床富 Li 矿与贫 Li 伟晶岩中白云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄一致,为 185~179 Ma;乔耿彪等(2020)对阿克塔斯花岗伟晶岩中白云母开展年代学研究,获得(144.7±4.3)Ma 的白云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 坪年龄。这些年龄均明显低于其他矿物获得的年龄(图 6b),表明伟晶岩在侵位后遭受了后期构造热事件的扰动,白云母很可能记录了 Ar-Ar 体系重置的时间。除此以外,

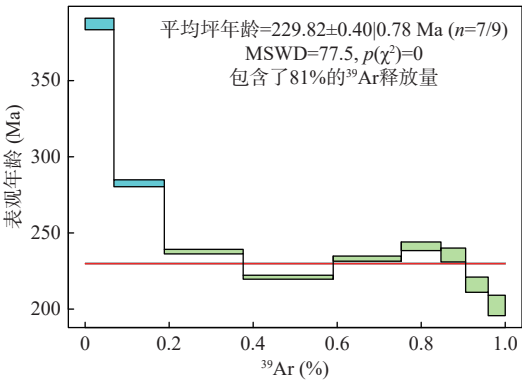


图6 509 道班西锂矿电气石⁴⁰Ar-³⁹Ar 坪年龄图
Fig. 6 ⁴⁰Ar-³⁹Ar plateau age of tourmaline from the 509 Daobanxi lithium deposit

Yan 等(2018)对阿克塔斯的锂辉石伟晶岩开展锡石和铌钽铁矿定年,分别获得 218 Ma 和 212 Ma 的成矿年龄;李侃等(2019)对 505 矿床中的锂辉石伟晶岩开展锡石定年,获得 223 Ma 的成矿年龄;Zhou 等(2021)测得白龙山成矿和贫 Li 伟晶岩的铌钽铁矿 U-Pb 年龄分别为(213.9±0.7)Ma 和(212.3±0.9)Ma; Yan 等(2022)对白龙山和雪风岭锂辉石伟晶岩开展独居石和铌钽

铁矿定年,分别获得 $(207.4\pm 0.6)\text{Ma}$ 和 $(208.4\pm 1.7)\text{Ma}$ 。这些年龄与前述花岗岩的锆石结晶年龄基本一致,表明伟晶岩型稀有金属成矿与晚三叠世的花岗质岩浆作用密切相关。

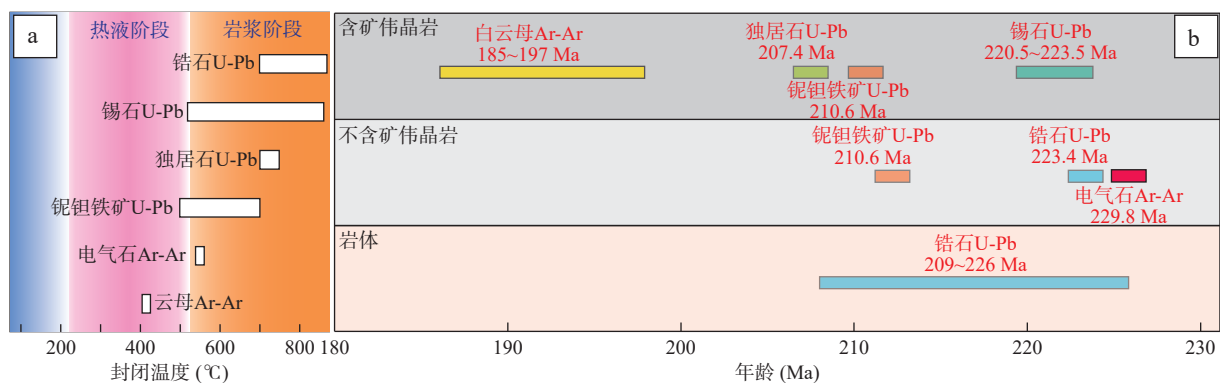
电气石作为花岗岩系统中常见的副矿物,国外学者对其开展了 ^{40}Ar - ^{39}Ar 定年的尝试。电气石 Ar 封闭温度目前尚缺乏准确的限定,但基于电气石、角闪石和白云母的年龄对比(Andriessen et al., 1991),一般认为其高于 $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ (即与角闪石的封闭温度相当)(McDougall et al., 1999)。 ^{40}Ar - ^{39}Ar 定年成功的关键因素是测试矿物需要含有足够高的 K 含量以产生可测的放射性 Ar 含量(McDougall et al., 1999),然而电气石中 K 含量较低(一般小于 0.05%),因此对样品的要求较为苛刻。国外目前仅有少数几个电气石 ^{40}Ar - ^{39}Ar 定年技术的成功报道,包括 Barredo 等(2009)对西班牙马尔蒂纳背斜变质岩中电气石测得 $370\sim 342\text{ Ma}$ 的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 坪年龄, Martínez-Martínez 等(2010)测得 Nevado-Filabride 复式岩体中电气石 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄为 $320\sim 318\text{ Ma}$; Thern 等(2020)测得西澳大利亚 Illaara 绿岩带的元古宙年龄为 $2\,935\sim 2\,624\text{ Ma}$ 等,但该方法在国内尚无报道。本研究在大红柳滩地区首次运用和报道电气石 ^{40}Ar - ^{39}Ar 定年技术,获得509道班西锂矿床中含石榴子石电气石伟晶岩的电气石 Ar-Ar 年龄为 $(229.8\pm 0.4)\text{Ma}$,结果与前述花岗岩和富 Li 伟晶岩的结晶年龄在误差范围内基本一致,表明二长花岗岩、成矿与贫 Li 伟晶岩为同一期岩浆-热液事件产物。

5.3 成矿机制探讨

花岗伟晶岩通常是花岗质岩浆演化晚期的富挥发分熔-流体相结晶产物,常具有稀有金属成矿专

属性(吴福元等, 2015),也是大红柳滩地区硬岩型锂矿找矿勘查中最直接的成矿地质体。前期一些研究提出,大红柳滩地区富 Li 伟晶岩与贫 Li 伟晶岩具有明显不同的矿物组合特征,成矿元素含量差别巨大,且年代学数据也显示弱的差异,可能属于不同期次岩浆热液作用产物(Liu et al., 2020; 谭克彬等, 2021; 李永等, 2022; 王威等, 2022)。然而,基于年代学数据统计来看,这些成矿年代的差异很可能只是不同矿物封闭温度差异导致的假象(图7)。如果仅考虑封闭温度较高的矿物的定年结果,富 Li 与贫 Li 伟晶岩年龄误差范围内一致,集中在 $230\sim 207\text{ Ma}$ 之间。同时,这些伟晶岩均围绕岩体的分布,距离岩体 $0\sim 400\text{ m}$ 以贫 Li 的含电气石伟晶岩为主, $400\sim 2\,000\text{ m}$ 以富 Li 的锂辉石伟晶岩为主(Gao et al., 2020)。这些特征表明,贫 Li 伟晶岩很可能代表演化早期贫稀有金属的熔体结晶,富 Li 伟晶岩则是演化程度更高的富稀有金属岩浆热液产物,其中靠近岩体的伟晶岩中不含/基本不含稀有金属元素的矿物结晶分离(石榴子石、电气石、长石等)导致了稀有金属在残余熔/流体中的进一步富集。

在与花岗岩有关的矿床中,电气石的转变通常是由岩浆岩中的富 Fe 电气石向热液组合中的富 Mg 电气石过渡(Yang et al., 2015; Zhao et al., 2021),这一过程对于寻找潜在的矿床具有指导意义。Pirajno(1992)研究表明,岩浆电气石中 $\text{Fe}^{\#}$ ($\text{Fe}^{\#}=\text{FeO}/(\text{FeO}+\text{MgO})$)和 $\text{Na}^{\#}$ ($\text{Na}^{\#}=\text{Na}_2\text{O}/(\text{Na}_2\text{O}+\text{CaO})$)被认为可以判断母岩体的距离,即随着距离的增加,电气石的 $\text{Fe}^{\#}$ 值通常逐渐减小而 $\text{Na}^{\#}$ 逐渐升高。具体而言,较高的 $\text{Fe}^{\#}$ 和 $\text{Na}^{\#}$ 比值(分别为 $0.83\sim 0.93$ 和 $0.82\sim 0.97$),表示与花岗岩



数据引自闫庆贺等(2017)、Zhou 等(2021)、唐俊林等(2022)、唐明洁等(2024)及其引用文献

图7 不同定年矿物封闭温度对比(a)(据 Chiaradia et al., 2013 修改)及大红柳滩花岗岩/伟晶岩多矿物定年结果对比(b)
Fig. 7 (a) Comparison of closure temperatures of minerals with different ages, and (b) comparison of multi-mineral dating results of granite/pegmatite in the Dahongliutan area

系统或近源(距接触带几百米内)脉有关的电气石; $Fe^\#$ 和 $Na^\#$ 值介于中间(分别为 $0.41\sim 0.67$ 和 $0.52\sim 0.91$), 表示与近源到中源脉有关的电气石; 而较低的 $Fe^\#$ 和 $Na^\#$ (分别为 $0.06\sim 0.40$ 和 $0.31\sim 0.91$), 则表明电气石及与其有关的矿床可能是由运移了较长距离的流体生成, 在距离热液发源处大于 1 km 的生成环境。大红柳滩贫矿伟晶岩中电气石具有极高的 $Fe^\#$ ($0.991\sim 0.998$) 和 $Na^\#$ 值 ($0.73\sim 0.94$), 这与其靠近岩体的特征相吻合。此外, 富 Fe 电气石通常在高盐度的流体环境中形成, 而高盐度的流体有助于增加热液中迁移金属络合物的含量, 从而促进稀有金属矿床的形成。509 道班西矿床中贫 Li 伟晶岩中电气石主要为富 Fe 的黑电气石, 指示有利的稀有金属富集物理化学条件。同时, 自二长花岗岩到贫矿伟晶岩再到锂辉石伟晶岩, 其成分呈现出 $Mg/(Mg+Fe)$ 逐渐下降的趋势(图 4a), 在 Al-Fe-Mg 图解中同样显示自贫 Li 体系向富 Li 体系过渡的演化趋势(图 3b), 进一步支持了上述近源电气石伟晶岩结晶促进 Li 在残余熔/流体进一步富集的观点。

此外, 近些年研究者对大红柳滩地区不同类型岩石中 Li 同位素开展了大量研究。研究表明, 正常的熔体结晶分异会致使残存熔体中更富 ^7Li (Teng et al., 2006; Fan et al., 2020), 而大红柳滩晚期富 Li 伟晶岩的 ^7Li 值总体低于贫 Li 伟晶岩, 可见其 $\delta^7\text{Li}$ 值变化存在其他因素控制 (Deveaud et al., 2015)。一般认为, 含稀有金属伟晶岩在低温结晶分异过程中较少存在的围岩混染的现象 ($400\text{ }^\circ\text{C}$; Thomas et al., 2010; London et al., 2012; Gammel et al., 2016), 这与大红柳滩地区伟晶岩与围岩接触部位未见蚀变现象, 以及富 Li 伟晶岩锂同位素明显区别于三叠纪巴颜喀拉山群和康西瓦群的观

察结果相一致。综上所述, 伟晶岩可能形成于封闭体系, 因此岩浆分异过程中的超临界流体出溶以及封闭岩浆热液系统中的水岩反应也难以产生明显的 Li 同位素分馏 (Teng et al., 2006; Li et al., 2018)。大红柳滩地区存在岩体 $\rightarrow$ 含电气石伟晶岩脉 (贫 Li) $\rightarrow$ 含锂辉石伟晶岩脉的分带规律 (富 Li), 三者的 $\delta^7\text{Li}$ -Li 变化(图 8) 显示稀有金属成矿与岩浆熔体-流体演化过程密切相关, 即受控于晚期富水的硅酸盐流体分异作用。

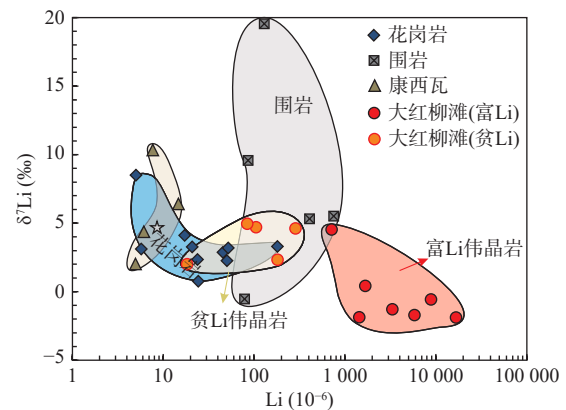


图8 大红柳滩花岗岩、伟晶岩及地层 $\delta^7\text{Li}$ -Li 关系协变图 (据 Fan et al., 2020; 梁婷等, 2021; 李文渊等, 2023)

Fig. 8 Covariation diagram of $\delta^7\text{Li}$ vs Li between granite, pegmatite and country rocks in the Dahongliutan area

综上所述, 大红柳滩地区三叠纪广泛的地壳重熔促使大规模岩浆活动的发生。在岩浆演化的晚期阶段, 挥发分逐渐达到饱和, 由于熔体-流体的不混溶作用, 在花岗岩基周边形成富水的硅酸盐熔体(图 9)。这种低粘度的熔体受热驱动向外迁移, 并沿花岗岩基周边的张性裂隙充填结晶, 受结晶分异和熔/流体相互作用影响, 这些富水熔体在近端形成贫锂的伟晶岩脉,

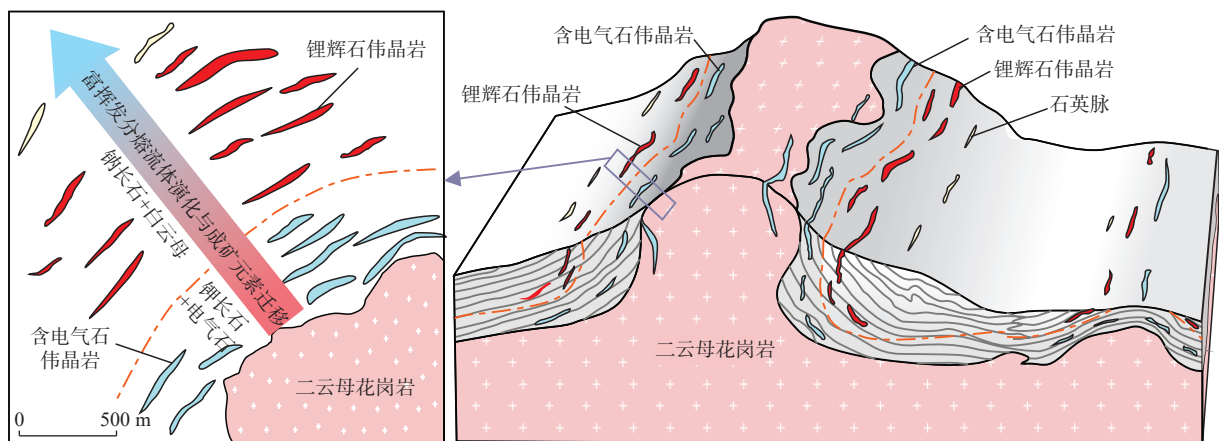


图9 大红柳滩伟晶岩型锂矿成矿模式图(据 Gao et al., 2020 修改)

Fig. 9 Metallogenic model of the Dahongliutan pegmatitic lithium deposit

在远端演化为富水的贫硅酸盐流体,并结晶形成富Li、Rb、Cs的伟晶岩脉。

6 结论

(1)贫Li伟晶岩岩性为含石榴子石电气石伟晶岩,主要由斜长石、石英、碱性长石、白云母、电气石及少量石榴子石组成,具有典型过铝质岩浆特点。

(2)贫Li伟晶岩中电气石成分较为均一,表现为富 FeO^{T} 、贫CaO、MgO和 Na_2O 的特点,属于黑电气石亚族,形成于高盐度流体环境。电气石成分演化主要受 $(\text{X}_{\square}, \text{Al})(\text{Na}, \text{R}^{2+})_{-1}$ 元素置换对控制,为岩浆-热液过渡成因。

(3)首次报道了大红柳滩地区电气石 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄,结果显示坪年龄为 $(229.8 \pm 0.4)\text{Ma}$,与前人获得的二云母花岗岩及富锂伟晶岩形成时代一致,为同期岩浆-热液产物。贫Li伟晶岩很可能代表演化早期贫稀有金属的熔体,富Li伟晶岩则是演化程度更高的富稀有金属岩浆热液产物。

致谢:野外工作得到了中国地质调查局西安地质调查中心孔会磊工程师的支持,实验测试工作得到中国地质调查局西安地质调查中心周宁超老师的指导和帮助,两位审稿人对稿件提出了宝贵意见,在此一并致以衷心的感谢!

参考文献(References):

- 洪涛,胡明曦,唐俊林,等.新疆西昆仑大红柳滩花岗伟晶岩型锂矿叠加改造成矿特征:来自矿石构造、3D成像技术与年代学的约束[J].岩石学报,2024,40(2):553-570.
- HONG Tao, HU Mingxi, TANG Junlin, et al. Metallogenic characteristics of superimposed deformation and mineralization of Dahongliutan granite-pegmatite type lithium deposit belt in West Kunlun, Xinjiang: Constraints from ore structure, 3D imaging technology and chronology[J]. Acta Petrologica Sinica, 2024, 40(2): 553-570.
- 霍海龙,陈正乐,张青,等.新疆西昆仑509道班西锂矿伟晶岩石英变形特征、温度及其对伟晶岩就位的约束[J].地质力学学报,2024,30(1):72-87.
- HUO Hailong, CHEN Zhenle, ZHANG Qing, et al. Quartz deformation characteristics, deformation temperature, and their constraints on pegmatites of the 509 Daobanxi lithium deposit in the West Kunlun area, Xinjiang[J]. Journal of Geomechanics, 2024, 30(1): 72-87.
- 孔会磊,任广利,李文渊,等.西昆仑大红柳滩东含锂辉石花岗伟晶岩脉年代学和地球化学特征及其地质意义[J].西北地质,2023,56(2):61-79.
- KONG Huilei, REN Guangli, LI Wenyuan, et al. Geochronology, Geochemistry and Their Geological Significances of Spodumene Pegmatite Veins in the Dahongliutandong Deposit, Western Kunlun, China[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(2): 61-79.
- 李文渊,高永宝,张照伟,等.镁铁-超镁铁质岩与花岗岩-伟晶岩“小岩体成大矿”对比——以昆仑成矿带夏日哈木和大红柳滩超大型矿床为例[J].地球科学与环境学报,2023,45(5):1036-1048.
- LI Wenyuan, GAO Yongbao, ZHANG Zhaowei, et al. Comparison of Mafic-ultramafic and Granite-pegmatite "Small Intrusion Forming Large Deposit": Taking Xiarihamu and Dahongliutan Super-large Deposits in Kunlun Metallogenic Belt, China as Examples[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2023, 45(5): 1036-1048.
- 梁婷,滕家欣,王登红,等.新疆大红柳滩锂铍稀有金属矿床[M].北京:地质出版社,2021.
- LIANG Ting, TENG Jiaxin, WANG Denghong, et al. Lithium beryllium rare metal deposit in Dahongliutan, Xinjiang [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2021.
- 李侃,高永宝,滕家欣,等.新疆和田县大红柳滩一带花岗伟晶岩型稀有金属矿成矿地质特征、成矿时代及找矿方向[J].西北地质,2019,52(4):206-221.
- LI Kan, GAO Yongbao, TENG Jiaxin, et al. Metallogenic Geological Characteristics, Mineralization Age and Resource Potential of the Granite-Pegmatite-Type Rare Metal Deposits in Dahongliutan Area, Hetian County, Xinjiang[J]. Northwestern Geology, 2019, 52(4): 206-221.
- 李荣社,计文化,何世平,等.中国西部古亚洲与特提斯两大构造域划分问题讨论[J].新疆地质,2011,29(3):247-250.
- LI Rongshe, JI Wenhua, HE Shiping, et al. The Two Tectonic Domain Division Discussion between the Ancient Asian and Tethys in Western China[J]. Xinjiang Geology, 2011, 29(3): 247-250.
- 李永,王威,杜晓飞,等.西昆仑509道班西锂铍稀有金属矿白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年及对区域成矿的限定[J].中国地质,2022,49(6):2031-2033.
- LI Yong, WANG Wei, DU Xiaofei, et al. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of muscovite of the west 509 Daoban Li-Be rare metal deposit in the West Kunlun orogenic belt and its limitation to regional mineralization[J]. Geology in China, 2022, 49(6): 2031-2033.
- 彭海练,贺宁强,王满仓,等.新疆和田县大红柳滩地区509道班西稀有金属矿地质特征与成矿规律探讨[J].西北地质,2018,51(3):146-154.
- PENG Hailian, HE Ningqiang, WANG Mancang, et al. Geological Characteristics and Metallogenic regularity of West Track 509 Rare Polymetallic Deposit in Dahongliutan Region, Hetian,

- Xinjiang[J]. *Northwestern Geology*, 2018, 51(3): 146–154.
- 乔耿彪, 伍跃中, 刘拓. 西昆仑大红柳滩伟晶岩型稀有金属矿的形成时代: 来自白云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 同位素年龄的证据[J]. *中国地质*, 2020, 47(5): 1591–1593.
- QIAO Gengbiao, WU Yuezhong, LIU Tuo. Formation age of the Dahongliutan pegmatite type rare metal deposit in Western Kunlun Mountains: Evidence from muscovite ⁴⁰Ar/³⁹Ar isotopic dating[J]. *Geology in China*, 2020, 47(5): 1591–1593.
- 乔耿彪, 张汉德, 伍跃中, 等. 西昆仑大红柳滩岩体地质和地球化学特征及对岩石成因的制约[J]. *地质学报*, 2015, 89(7): 1180–1194.
- QIAO Gengbiao, ZHANG Hande, WU Yuezhong, et al. Petrogenesis of the Dahongliutan Monzogranite in Western Kunlun: Evidence from SHRIMP Zircon U-Pb Geochronology and Geochemical Characteristics[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89(7): 1180–1194.
- 谭克彬, 郭岐明, 郭勇明. 新疆和田 509 道班西锂铍多金属矿床花岗岩 U-Pb 年龄及其构造意义[J]. *新疆有色金属*, 2021, 44(2): 6–10.
- TAN Kebin, GUO Qiming, GUO Yongming. U-Pb Ages and Tectonic Significance of Granite from the 509 Daobanxi Lithium Beryllium Polymetallic Deposit in Hotan, Xinjiang[J]. *Xinjiang Nonferrous Metals*, 2021, 44(2): 6–10.
- 唐俊林, 柯强, 徐兴旺, 等. 西昆仑大红柳滩地区龙门山锂铍伟晶岩区岩浆演化与成矿作用[J]. *岩石学报*, 2022, 38(3): 655–675.
- TANG Junlin, KE Qiang, XU Xingwang, et al. Magma evolution and mineralization of Longmenshan lithium-beryllium pegmatite in Dahongliutan area, West Kunlun[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2022, 38(3): 655–675.
- 庾明洁, 夏永旗, 李诺, 等. 西昆仑大红柳滩地区花岗岩类侵位时代与成因[J]. *矿床地质*, 2024, 43(2): 265–288.
- TUO Mingjie, XIA Yongqi, LI Nuo, et al. Age and petrogenesis of granitoids in Dahongliutan area, West Kunlun[J]. *Mineral Deposits*, 2024, 43(2): 265–288.
- 王核, 黄亮, 马华东, 等. 西昆仑大红柳滩-白龙山矿集区锂矿成矿特征与成矿规律初探[J]. *岩石学报*, 2023, 39(7): 1931–1949.
- WANG He, HUANG Liang, MA Huadong, et al. Geological characteristics and metallogenic regularity of lithium deposits in Dahongliutan-Bailongshan area, West Kunlun, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2023, 39(7): 1931–1949.
- 王核, 李沛, 马华东, 等. 新疆和田县白龙山超大型伟晶岩型锂铷多金属矿床的发现及其意义[J]. *大地构造与成矿学*, 2017, 41(6): 1053–1062.
- WANG He, LI Pei, MA Huadong, et al. Discovery of the Bailongshan Superlarge Lithium-Rubidium Deposit in Karakorum, Hetian, Xinjiang, and its Prospecting Implication[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2017, 41(6): 1053–1062.
- 王威, 杜晓飞, 刘伟, 等. 西昆仑 509 道班西锂铍稀有金属矿地质特征与成矿时代探讨[J]. *岩石学报*, 2022, 38(7): 1967–1980.
- WANG Wei, DU Xiaofei, LIU Wei, et al. Geological characteristic and discussion on metallogenic age of the West 509-Daoban Li-Be rare metal deposit in the West Kunlun Orogenic Belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2022, 38(7): 1967–1980.
- 魏小鹏, 王核, 胡军, 等. 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[J]. *地球化学*, 2017, 46(1): 66–80.
- WEI Xiaopeng, WANG He, HU Jun, et al. Geochemistry and geochronology of the Dahongliutan two-mica granite pluton in western Kunlun orogen: Geotectonic implications[J]. *Geochimica*, 2017, 46(1): 66–80.
- 吴福元, 刘志超, 刘小驰, 等. 喜马拉雅淡色花岗岩[J]. *岩石学报*, 2015, 31(1): 1–36.
- WU Fuyuan, LIU Zhichao, LIU Xiaochi, et al. Himalayan leucogranite: Petrogenesis and implications to orogenesis and plateau uplift[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 31(1): 1–36.
- 夏永旗, 庾明洁, 李诺, 等. 云母和电气石矿物化学特征对西昆仑大红柳滩地区伟晶岩型锂矿化的指示[J]. *地球科学*, 2024, 49(3): 922–938.
- XIA Yongqi, TUO Mingjie, LI Nuo, et al. Mineral Characteristics of Mica and Tourmaline and Geological Implication for the Pegmatite-Type Lithium Mineralization, Dahongliutan Area, West Kunlun[J]. *Earth Science*, 2024, 49(3): 922–938.
- 闫庆贺, 王核, 丘增旺, 等. 西昆仑大红柳滩稀有金属伟晶岩矿床锡石及铌钽铁矿年代学及其地质意义[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2017, 36: 802–803.
- YAN Qinghe, WANG He, QIU Zengwang, et al. Chronology and Geological Significance of Cassiterite and Niobium Tantalum Iron Deposits in the Rare Metal Pegmatite Deposit of Dahongliutan, West Kunlun Mountains[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2017, 36: 802–803.
- 杨岳衡, 吴石头, 车旭东, 等. 稀有金属矿物微区同位素定年与示踪[J]. *岩石学报*, 2024, 40(4): 1023–1043.
- YANG Yueheng, WU Shitou, CHE Xudong, et al. In-situ isotopic dating and tracing of the rare-metal minerals in ore deposit[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2024, 40(4): 1023–1043.
- 邹天人. 中国新疆稀有及稀土金属矿床[M]. 北京: 地质出版社, 2006.
- ZOU Tianren. Rare and Rare Earth Metal Deposits in Xinjiang, China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006.
- Andriessen P A M, Hebeda E H, Simon O J, et al. Tourmaline K Ar ages compared to other radiometric dating systems in Alpine anatectic leucosomes and metamorphic rocks (Cyclades and southern Spain)[J]. *Chemical Geology*, 1991, 91(1): 33–48.

- Barredo F B, Pérez A P, Montero P G, et al. Tourmaline $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ chronology of tourmaline-rich rocks from Central Iberia dates the main Variscan deformation phases[J]. *Geologica Acta*, 2009: 399–412.
- Cao R, Gao Y, Chen B, et al. Pegmatite magmatic evolution and rare metal mineralization of the Dahongliutan pegmatite field, Western Kunlun Orogen: Constraints from the B isotopic composition and mineral chemistry[J]. *International Geology Review*, 2023, 65(7): 1224–1242.
- Chen B, Huang C, Zhao H. Lithium and Nd isotopic constraints on the origin of Li-poor pegmatite with implications for Li mineralization[J]. *Chemical Geology*, 2020, 551: 119769.
- Chiaradia M, Schaltegger U, Spikings R, et al. How accurately can we date the duration of magmatic-hydrothermal events in porphyry systems?: an invited paper[J]. *Economic Geology*, 2013, 108(4): 565–584.
- Deveaud S, Millot R, Villaros A. The genesis of LCT-type granitic pegmatites, as illustrated by lithium isotopes in micas[J]. *Chemical Geology*, 2015, 411: 97–111.
- Fan J J, Tang G J, Wei G J, et al. Lithium isotope fractionation during fluid exsolution: Implications for Li mineralization of the Bailongshan pegmatites in the West Kunlun, NW Tibet[J]. *Lithos*, 2020, 352: 105236.
- Gammel E M, Nabelek P. Fluid inclusion examination of the transition from magmatic to hydrothermal conditions in pegmatites from San Diego County, California[J]. *American Mineralogist*, 2016, 101(8): 1906–1915.
- Gao Y B, Bagas L, Li K, et al. Newly discovered Triassic lithium deposits in the Dahongliutan area, Northwest China: A case study for the detection of lithium-bearing pegmatite deposits in rugged terrains using remote-sensing data and images[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2020, 8: 591966.
- Henry D J, Dutrow B L, Grew E S, et al. Metamorphic tourmaline and its petrologic applications[J]. *Reviews in Mineralogy*, 1996, 33: 503–558.
- Henry D J, Guidotti C V. Tourmaline as a petrogenetic indicator mineral: an example from the staurolite-grade metapelites of NW Maine[J]. *American Mineralogist*, 1985, 70(1–2): 1–15.
- Henry D J, Novák M, Hawthorne F C, et al. Nomenclature of the tourmaline-supergroup minerals[J]. *American Mineralogist*, 2011, 96(5–6): 895–913.
- Koppers A A P. ArArCALC—software for $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age calculations[J]. *Computers Geosciences*, 2002, 28(5): 605–619.
- Lee J Y, Marti K, Severinghaus J P, et al. A redetermination of the isotopic abundances of atmospheric Ar[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, 70(17): 4507–4512.
- Li J K, Zou T R, Liu X F, et al. The metallogenetic regularities of lithium deposits in China[J]. *Acta Geologica Sinica - English Edition*, 2015, 89(2): 652–670.
- Li J, Huang X L, Wei G J, et al. Lithium isotope fractionation during magmatic differentiation and hydrothermal processes in rare-metal granites[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2018, 240: 64–79.
- Linnen R, Trueman D L, Burt R. Tantalum and niobium[J]. *Critical Metals Handbook*, 2014: 361–384.
- Liu T, Jiang S Y. Multiple generations of tourmaline from Yushishanxi leucogranite in South Qilian of western China record a complex formation history from B-rich melt to hydrothermal fluid[J]. *American Mineralogist*, 2021, 106(6): 994–1008.
- Liu X Q, Zhang C L, Zou H B, et al. Triassic-Jurassic granitoids and pegmatites from western Kunlun-Pamir Syntax: Implications for the Paleo-Tethys evolution at the northern margin of the Tibetan Plateau[J]. *Lithosphere*, 2020(1): 7282037.
- London D, Morgan G B, Paul K A, et al. Internal evolution of miarolitic granitic pegmatites at the Little Three mine, Ramona, California, USA[J]. *The Canadian Mineralogist*, 2012, 50(4): 1025–1054.
- Lv Z H, Zhang H, Tang Y. Anatexis origin of rare metal/earth pegmatites: Evidences from the Permian pegmatites in the Chinese Altai[J]. *Lithos*, 2021, 380: 105865.
- Martínez-Martínez J, Torres-Ruiz J, Pesquera A, et al. Geological relationships and U-Pb zircon and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ tourmaline geochronology of gneisses and tourmalinites from the Nevado-Filabride complex (western Sierra Nevada, Spain): tectonic implications[J]. *Lithos*, 2010, 119(3–4): 238–250.
- McDougall I, Harrison T M. Geochronology and Thermochronology by the $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Method[M]. Oxford University Press, USA, 1999.
- Pirajno F, Smithies R H. The FeO/(FeO+ MgO) ratio of tourmaline: a useful indicator of spatial variations in granite-related hydrothermal mineral deposits[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1992, 42(2–3): 371–381.
- Renne P R, Deino A L, Hilgen F J, et al. Time scales of critical events around the Cretaceous-Paleogene boundary[J]. *Science*, 2013, 339(6120): 684–687.
- Renne P R, Mundil R, Balco G, et al. Joint determination of ^{40}K decay constants and $^{40}\text{Ar}^*/^{40}\text{K}$ for the Fish Canyon sanidine standard, and improved accuracy for $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2010, 74(18): 5349–5367.
- Renne P R, Swisher C C, Deino A L, et al. Intercalibration of standards, absolute ages and uncertainties in $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating[J]. *Chemical Geology*, 1998, 145(1–2): 117–152.
- Rozendaal A, Bruwer L. Tourmaline nodules: indicators of hydrothermal alteration and Sn Zn (W) mineralization in the Cape Granite Suite, South Africa[J]. *Journal of African Earth Sci-*

- ences, 1995, 21(1): 141–155.
- Simmons W B, Pezzotta F, Shigley J E, et al. Granitic pegmatites as sources of colored gemstones[J]. *Elements*, 2012, 8(4): 281–287.
- Slack J F. Tourmaline associations with hydrothermal ore deposits [J]. *Reviews in Mineralogy*, 1996, 33: 559–644.
- Teng F Z, McDonough W F, Rudnick R L, et al. Diffusion-driven extreme lithium isotopic fractionation in country rocks of the Tin Mountain pegmatite[J]. *Earth Planetary Science Letters*, 2006, 243(3–4): 701–710.
- Thern E R, Blereau E, Jourdan F, et al. Tourmaline $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology and thermochronology: example from Hadean-zircon-bearing siliciclastic metasedimentary rocks from the Yilgarn Craton[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2020, 277: 285–299.
- Thomas R, Davidson P. Hambergite-rich melt inclusions in morganite crystals from the Muiane pegmatite, Mozambique and some remarks on the paragenesis of hambergite[J]. *Mineralogy Petrology*, 2010, 100: 227–239.
- Trumbull R B, Krienitz M S, Gottesmann B, et al. Chemical and boron-isotope variations in tourmalines from an S-type granite and its source rocks: the Erongo granite and tourmalinites in the Damara Belt, Namibia[J]. *Contributions to Mineralogy Petrology*, 2008, 155: 1–18.
- Wang H, Gao H, Zhang X Y, et al. Geology and geochronology of the super-large Bailongshan Li–Rb–(Be) rare-metal pegmatite deposit, West Kunlun orogenic belt, NW China[J]. *Lithos*, 2020, 360: 105449.
- Wu H H, Huang H, Zhang Z C, et al. Magmatic-hydrothermal evolution and rare metal enrichment of the Huoshibulake B-rich rare metal granite in the Southern Tianshan: Insights from texture, geochemistry, and Hf–O isotopes of zircon[J]. *Lithos*, 2024a, 482: 107705.
- Wu H H, Huang H, Zhang Z C, et al. Tourmaline chemical and boron isotopic constraints on the magmatic-hydrothermal transition and rare-metal mineralization in alkali granitic systems[J]. *American Mineralogist*, 2024b, 109(8): 1461–1477.
- Yan Q H, Qiu Z W, Wang H, et al. 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*, 2018, 100: 561–573.
- Yan Q H, Wang H, Chi G X, et al. 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[J]. *Economic Geology*, 2022, 117(1): 213–236.
- Yang S Y, Jiang S Y, Zhao K D, et al. Tourmaline as a recorder of magmatic–hydrothermal evolution: an in situ major and trace element analysis of tourmaline from the Qitianling batholith, South China[J]. *Contributions to Mineralogy Petrology*, 2015, 170: 1–21.
- Zhao H D, Zhao K D, Palmer M R, et al. Magmatic-hydrothermal mineralization processes at the Yidong Tin Deposit, South China: Insights from in situ chemical and boron isotope changes of tourmaline[J]. *Economic Geology*, 2021, 116(7): 1625–1647.
- Zhao H, Chen B, Zheng B Q, et al. Petrogenesis of Mesozoic pegmatites in the Dahongliutan Li-mineralized belt (Western Kunlun, NW China)[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2024, 264: 106076.
- Zhou J S, Wang Q, Xu Y G, et al. Geochronology, petrology, and lithium isotope geochemistry of the Bailongshan granite-pegmatite system, northern Tibet: Implications for the ore-forming potential of pegmatites[J]. *Chemical Geology*, 2021, 584: 120484.