第 53 卷　第 3 期　　成都理工大学学报（自然科学版）　　Vol. 53　No. 3
2026 年 6 月　　JOURNAL OF CHENGDU UNIVERSITY OF TECHNOLOGY（Science & Technology Edition）　　Jun. 2026

DOI：10.12474/cdlgzrkx.2024111501　　**期刊主页**：https://xbzrkx.cdut.edu.cn/

川西木绒伟晶岩型锂矿高分异演化机制——来自独居石地球化学及年代学的证据

崔新宇[1]，赵甫峰[1*]，王国芝[1]，岳大斌[2]，刘雪敏[1]，王梓璇[1]，
雷　庆[1]，宋祥峰[2]，杨元良[1,2]，肖世一[3]，王　琦[4]

1. 成都理工大学 地球与行星科学学院，成都 610059；
2. 四川省第三地质大队，成都 611743；
3. 中国地质大学（北京）地球科学与资源学院，北京 100083；
4. 中国地质大学（北京）珠宝学院，北京 100083

[**摘要**] 四川西部木绒超大型伟晶岩型锂辉石矿位于松潘—甘孜造山带内的雅江穹隆群北东部，与甲基卡富锂伟晶岩群相邻。木绒锂辉石伟晶岩不同于松潘—甘孜造山带内其他锂矿床，为单脉伟晶岩锂矿，具有全脉矿化特征，是目前亚洲第一大单脉伟晶岩型锂矿床。结合木绒伟晶岩全岩元素地球化学，以伟晶岩中独居石为研究对象，采用 U-Th-Pb 年代学和原位地球化学研究方法，分析和讨论木绒富锂伟晶岩的成因和锂的富集机制。研究发现独居石可分为再循环晶（antecryst）和自生晶（autocryst）2 种类型，均具岩浆成因属性。2 种独居石的年龄分别为（200.1±1.9）Ma 和（196.3±2.4）Ma，分别代表伟晶岩岩浆熔体早期结晶年龄和最终结晶年龄。自生晶独居石比再循环晶独居石更加亏损 REE、更富集 U，具有更低的 Th/U 比值、更显著的负 Eu 异常和明显的四分组效应，说明木绒伟晶岩岩浆经历了多阶段的高分异演化过程。通过与甲基卡花岗岩、伟晶岩的全岩元素地球化学对比研究发现，木绒伟晶岩可能是甲基卡富锂伟晶岩群的外延部分，多阶段演化过程是获得高分异伟晶岩岩浆的重要途径，也可能是导致木绒富锂伟晶岩全脉矿化和锂巨量超常富集的关键原因。

[**关键词**] 木绒；富锂伟晶岩；独居石；再循环晶；岩浆演化

[**分类号**] P611.1　　[**文献标志码**] A

收稿日期：2024-11-15；**改回日期**：2025-03-20。　　**责任编辑**：甘娟娟。

基金项目：四川省自然科学基金项目（2023NSFSC0268, 2023NSFSC0793）；四川省地质矿产勘查开发专项项目（SCDZ-DZKC202403, SCDZ-KJXM202404）；自然资源部科技支撑项目（ZKKJ202413）；深地国家科技重大专项（2024ZD1001400）。

第一作者：崔新宇（1999—），女，硕士研究生，研究方向：矿物学、岩石学、矿床学，E-mail: 761599462@qq.com。

***通信作者**：赵甫峰（1983—），男，博士，副教授，研究方向：岩石地球化学、包裹体地球化学，E-mail:zhaofufeng2012@cdut.cn。

引用格式：崔新宇，赵甫峰，王国芝，等，2026. 川西木绒伟晶岩型锂矿高分异演化机制——来自独居石地球化学及年代学的证据［J］. 成都理工大学学报（自然科学版），53（3）：597—619.

Cui X Y, Zhao F F, Wang G Z, et al., 2026. Mechanism of highly fractionated evolution in the Murong pegmatite-type lithium deposit, western Sichuan: evidence from geochemistry and geochronology of monazite［J］. Journal of Chengdu University of Technology（Science & Technology Edition），53（3）：597—619.

Mechanism of highly fractionated evolution in the Murong pegmatite-type lithium deposit, western Sichuan: evidence from geochemistry and geochronology of monazite

CUI Xinyu[1], ZHAO Fufeng[1*], WANG Guozhi[1], YUE Dabin[2], LIU Xuemin[1], WANG Zixuan[1], LEI Qing[1], SONG Xiangfeng[2], YANG Yuanliang[1,2], XIAO Shiyi[3], WANG Qi[4]

1. *College of Earth and Planetary Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China*;
2. *The 3rd Geological Brigade of Sichuan, Chengdu 611743, China*;
3. *School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China*;
4. *School of Gemmology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China*

Abstract: The superlarge Murong pegmatite-type lithium deposit in western Sichuan is located in the northeastern part of the Yajiang dome group within the Songpan–Ganze orogenic belt, adjacent to the Jiajika lithium-rich pegmatite group. Unlike other lithium deposits in the Songpan–Ganze orogenic belt, the Murong spodumene pegmatite is characterized by a single-vein pegmatite lithium deposit with full-vein mineralization, making it the largest single-vein pegmatite-type lithium deposit yet discovered in Asia. This study integrates whole-rock elemental geochemistry of the Murong pegmatite and focuses on monazite within the pegmatite, employing U-Th-Pb geochronology and in situ major and trace element geochemical analyses to investigate the genesis and lithium enrichment mechanisms of the Murong lithium-rich pegmatite. The research reveals that monazite can be classified into two types: antecryst and autocryst, both of magmatic origin. The ages of the two types of monazite are (200.1 ± 1.9) Ma and (196.3 ± 2.4) Ma, representing the early crystallization age and the final crystallization age of the pegmatite magma, respectively. Autocrystic monazite is more depleted in REE, more enriched in U, has lower Th/U ratios, more pronounced negative Eu anomalies, and distinct tetrad effects compared to antecrystic monazite, indicating that the Murong pegmatite magma underwent a highly fractionated, multistage evolutionary process. Comparative studies of whole-rock elemental geochemistry between the Murong pegmatite and the Jiajika granite and pegmatite suggest that the former may be an extension of the Jiajika lithium-rich pegmatite group. The multistage evolutionary process identified in this work is a crucial pathway for obtaining highly fractionated pegmatite magma and may also be the key reason for the full-vein mineralization and massive lithium enrichment in the Murong lithium-rich pegmatite.

Key words: Murong; lithium-rich pegmatite; monazite; antecryst; magmatic evolution

锂是全球关键战略矿产,它同时兼顾动力燃料、核聚变能和强大储能作用,被称为“白色石油”和21世纪绿色“高能金”(Li et al., 2015; 许志琴等, 2018; Voskoboynik and Andreucci, 2022; 王登红等, 2022; 付小方等, 2023)。伟晶岩型锂矿是锂资源的重要类型之一,也是当前国际矿床学研究的热点(冉子龙和李艳军, 2021; 李建康等, 2023; Yue et al., 2024)。松潘—甘孜造山带及其西延的西昆仑地区是中国伟晶岩型锂矿床的重要产区,发育有甲基卡、扎乌龙和大红柳滩等超大型矿床(李建康等, 2023)。近年来,学者们对区带内锂等稀有金属伟晶岩的矿床地质特征、构造背景、地球化学、成岩时代、成岩机制、成矿模式等方面开展了大量的研究(王登红等, 2005; 李建康, 2006; 付小方等, 2017; Yan et al., 2018; Dai et al., 2019),但对于锂的巨量富集机制尚未查明。

木绒锂矿位于四川省雅江县,其东侧约20 km处为甲基卡富锂伟晶岩群。2019—2022年,四川省第三地质大队在木绒矿区开展找矿勘探工作,探明Li_2O总资源量约104.5×10^4 t,已经超过甲基卡X03脉89.18×10^4 t(付小方等, 2023; 岳大斌等, 2026),属于超大型伟晶岩型锂矿床。木绒矿床目前是亚洲第一大单脉伟晶岩型锂矿床,具有全脉矿化特征,是近年中国西部稀有金属找矿工作的又一重大突破,但其成矿机制仍不清楚,因此具有重要的科学研究价值。

年代学研究是伟晶岩成岩成矿作用和稀有金属富集机制的重要内容（蒋少涌等，2024）。独居石是一种磷酸轻稀土矿物，常以副矿物形式出现在过铝质花岗岩和伟晶岩中（Parrish, 1990；吴黎光和李献华，2020）。它具有 Th、U 含量高，U-Th-Pb 体系封闭温度高，抗辐射损伤能力强，普通铅含量低等特点，难以发生蜕晶化（Parrish, 1990；Cherniak et al., 2004；Williams et al., 2007；张雅等，2021），是 U-Th-Pb 定年的可靠对象（Harrison et al., 2002；Goudie et al., 2014；Warren et al., 2018；梁晓等，2022；蒋少涌等，2024）。在伟晶岩体系中，当锆石因高 U 含量出现蜕晶化无法用于定年时，即可以采用独居石测年。此外，独居石的成分环带（或分区）可以反映岩浆的多阶段演化和热液蚀变事件（邱昆峰和杨立强，2011；Wang et al., 2023；龙欣雨等，2024），对不同成分部位进行定年和矿物化学分析，可以同时获得岩浆至热液活动的年龄范围和岩浆演化的信息（邱昆峰和杨立强，2011；Wu et al., 2019；吴黎光和李献华，2020），这对揭示锂成矿机制具有重要意义。

近年来，再循环晶（antecryst）和自生晶（autocryst）的概念在岩石学研究中得到了广泛关注。再循环晶通常指在岩浆演化过程中从早期结晶的岩浆中继承的晶体，这些晶体记录了更早期的岩浆的信息，是研究岩浆源区和演化历史的重要载体（Olierook et al., 2020；谢元惠等，2021）。自生晶则是指在最终岩浆体系中直接结晶形成的矿物，其化学成分和结构特征能够反映岩浆的最终演化状态（马昌前等，2020）。通过对这 2 种晶体的区分和研究，可以更深入地揭示高分异岩浆系统中稀有元素的富集机制。

木绒富锂伟晶岩不同于川西其他稀有金属伟晶岩，具有全脉锂矿化的特征，又缺少母岩体（花岗岩）资料，其演化和成矿机制尚未查明。本文聚焦再循环晶和自生晶在岩浆高分异演化过程中的矿物化学变化规律，通过独居石 U-Th-Pb 同位素定年和元素地球化学研究，结合伟晶岩地球化学，分析和探讨木绒伟晶岩的成岩时代和成因机制，为伟晶岩中巨量锂的富集机制提供新的视角。

1　地质背景

1.1　区域地质背景

木绒锂矿位于松潘—甘孜造山带川西雅江穹隆群中（李建康等，2023）。该带从川西松潘—甘孜地区向西一直延伸至昆仑甜水海地区，东西横跨约 2 800 km；北侧与华北陆块和塔里木陆块相拼接，西侧与冈瓦纳大陆外缘的羌塘—昌都陆块毗邻，东南缘与扬子陆块相连，是一条东西带状和倒三角形复合形态的古特提斯造山带（图 1；许志琴等，2018，2023）；该带又被称为松潘—甘孜—西昆仑伟晶岩型稀有金属成矿带（李建康等，2023）。

区域出露地层主要为三叠系地层，主体属于

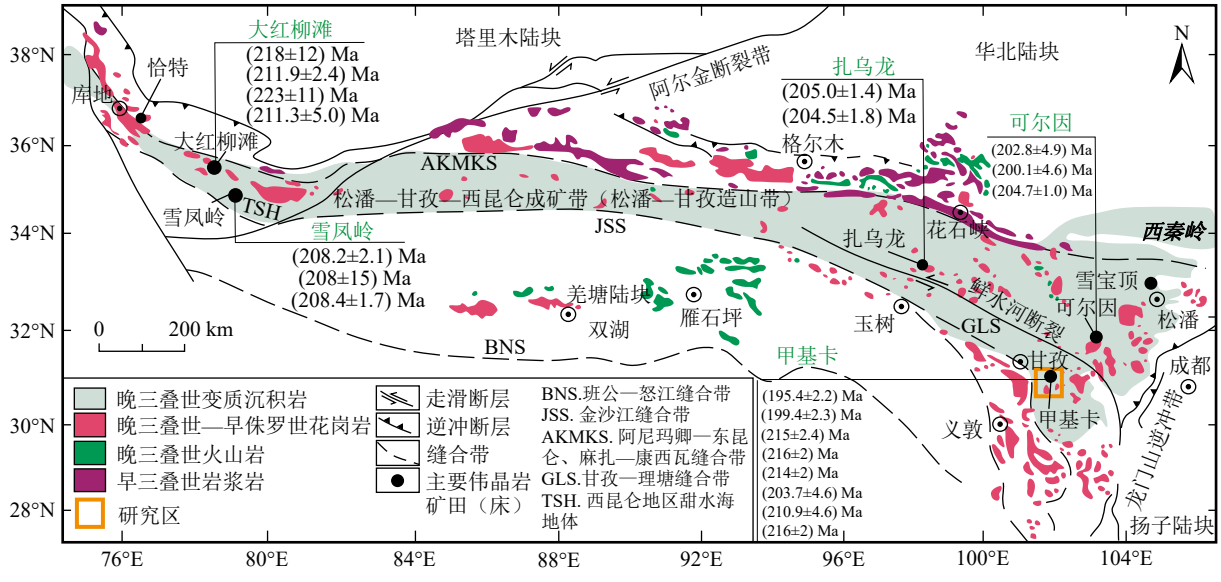


图 1　松潘—甘孜—西昆仑成矿带主要稀有金属伟晶岩矿田（床）分布简图

Fig. 1　Simplified distribution map of major rare metal pegmatite fields (deposits) in the Songpan–Ganze–West Kunlun metallogenic belt

（图据许志琴等，2024 修改；年龄数据参考文献见表 1）

泥质复理石沉积建造的变泥质岩(李建康等, 2023)。该套沉积在西昆仑地区称为巴颜喀拉山群,主要由片岩、砂岩和板岩组成;在川西地区被称为西康群,主要由板岩和砂岩组成。松潘—甘孜造山带经历了广泛的变质变形作用,由于三大板块的汇聚作用和南北向、东西向的"双向挤压",形成了大量北西和北西西向褶皱构造和北东向走滑断裂构造,这些构造系统控制了富稀有金属酸性岩浆的出露(许志琴等, 2018)。川西地区中–酸性侵入岩,主要为二长花岗岩、黑云母闪长岩、黑云母石英闪长岩,与伟晶岩矿化相关的通常为S型花岗岩(廖登海, 2021);岩脉主要有花岗伟晶岩脉和石英脉2类。自晚印支期以来,该带经历了双向推覆和滑脱构造变形,伴随地壳局部熔融导致了大量228～195 Ma同构造花岗岩及后造山花岗岩侵位,形成了浅部构造层次的"花岗岩浆底辟穹隆群"(王登红等, 2005; 付小方等, 2019, 2023),如川西雅江穹隆群。

雅江穹隆群由甲基卡、容须卡、瓦多、长征4个穹隆体组成,木绒富锂伟晶岩出露于由甲基卡、瓦多2个相邻穹隆所围成的向斜部位(图2)。区内富锂伟晶岩主要出露于热穹隆核部及邻近地区。穹隆中心多发育花岗岩母岩,不同变质程度的变质岩常围绕花岗岩呈环带状分布,表现出巴罗式变质带的热递变特征(Xiong et al., 2019; 付小方等, 2021)。以穹隆核部花岗岩为中心,依次发育夕线石带→蓝晶石带→十字石带→石榴石带→黑云母带(许志琴等, 2018)。木绒矿床临近甲基卡矿床,但木绒矿床不从属于甲基卡巴罗式变质带中的任何一个带,而是具有一个独立的小规模热变质分带,以伟晶岩为中心,向外依次发育红柱石带、石榴石带和黑云母带(图2)。

1.2 木绒伟晶岩地质特征

矿区内出露地层为三叠系西康群新都桥组中段(T_3x^2)板岩、第四系残坡积物和洪积物(图3-A)。由于第四系盖层发育,地表仅见长度100～150 m伟晶岩脉零星出露。板岩片理产状倾向141°～159°,倾角73°～87°。区内总体构造为单斜构造,以小型压扭性断层为主,未见大型褶皱。伟晶岩沿围岩片理方向侵入,呈脉状、似层状或透镜状(图4-G、H)。目前勘探工作控制伟晶岩Ⅰ号和Ⅱ号脉2条主脉;其中Ⅰ号伟晶岩脉规模最大,贯穿整个矿区,延伸长度超过800 m,脉体最大斜深超过1 080 m。Ⅱ号伟晶岩脉紧贴Ⅰ号伟晶岩脉,出露于矿区西南侧,规模较小,产状与Ⅰ号伟晶岩脉近平行,并在深部与Ⅰ号伟晶岩脉相切,汇聚成单矿体。矿床中所发现的伟晶岩均为矿化伟晶岩,具有全脉锂矿化特征。

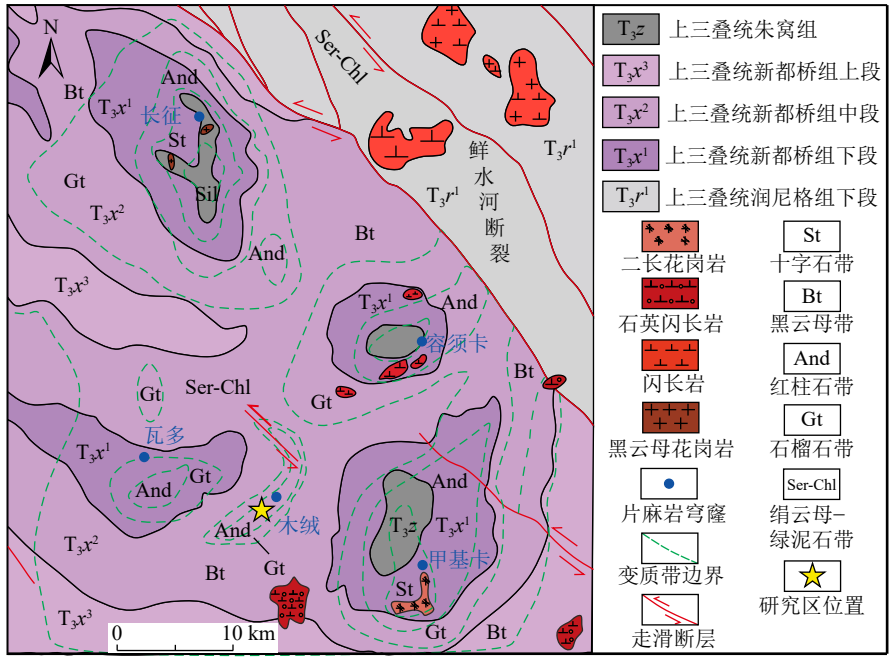


图 2 长征—甲基卡穹隆群地质略图(底图据付小方等, 2017)

Fig. 2 Simplified geological map of the Changzheng–Jiajika dome group

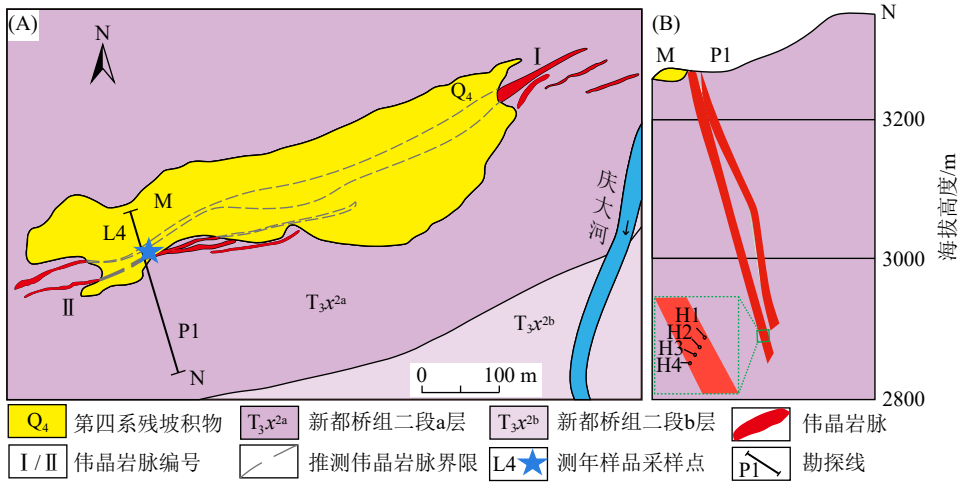


图 3　木绒伟晶岩锂矿矿床地质简图

Fig. 3　Simplified geological map of the Murong pegmatite lithium deposit

（A）勘探线剖面图；（B）P1 勘探线剖面图和采样点

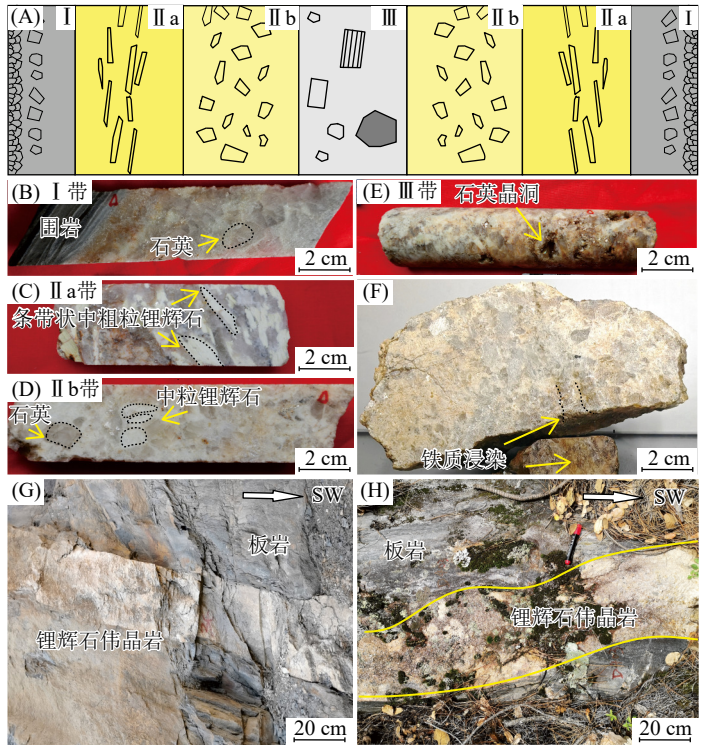


图 4　木绒伟晶岩分带特征、手标本照片及野外照片

Fig. 4　Characteristics of the zonation of Murong pegmatite, hand specimen photographs, and field photographs

（A）伟晶岩分带示意图；（B）Ⅰ带手标本照片；（C）Ⅱa 带手标本照片；（D）Ⅱb 带手标本照片；（E）Ⅲ带手标本照片；（F）测年样手标本，属于Ⅱb 带；（G）、（H）木绒伟晶岩锂矿野外露头特征照片

木绒Ⅰ、Ⅱ号伟晶岩脉在深部汇聚成单脉，矿物组合类似，主要为石英、钠长石、微斜长石、白云母和锂辉石；次要矿物主要为锂云母等；副矿物主要为铌钽矿、绿柱石、锂电气石、锡石、石榴石等。根据矿物组合将岩性定为锂辉石钠长石伟晶岩。

伟晶岩脉具有侧向分带性，根据矿物组合和结构、锂辉石发育程度从脉壁到中心，依次为长英质边界带（Ⅰ）、锂辉石–钠长石带（Ⅱ）和粗粒长英质带（Ⅲ）3 个带（图 4-A），锂辉石主要产出于锂辉石–钠长石带（Ⅱ）。

（1）长英质边界带（Ⅰ）与围岩具有明显的界

线,围岩旁可见细粒结构过渡带和垂直的长英质矿物生长带(图 4-B、图 5-A、B),含少量锂辉石,偶见自形程度较好的绿柱石(图 5-C)。

(2)板状锂辉石-钠长石带(Ⅱa)中锂辉石为半自形-自形,长柱状、板条状,具定向性且通常与脉壁呈平行产出(图 4-C),中-粗粒结构,粒径 2~6 cm。由锂辉石中心向边部,具有较自形的板状锂辉石→“蠕虫状”锂辉石+石英出溶体→微晶“毛发状”锂辉石+石英集合体(SQI)(图 5-D)。

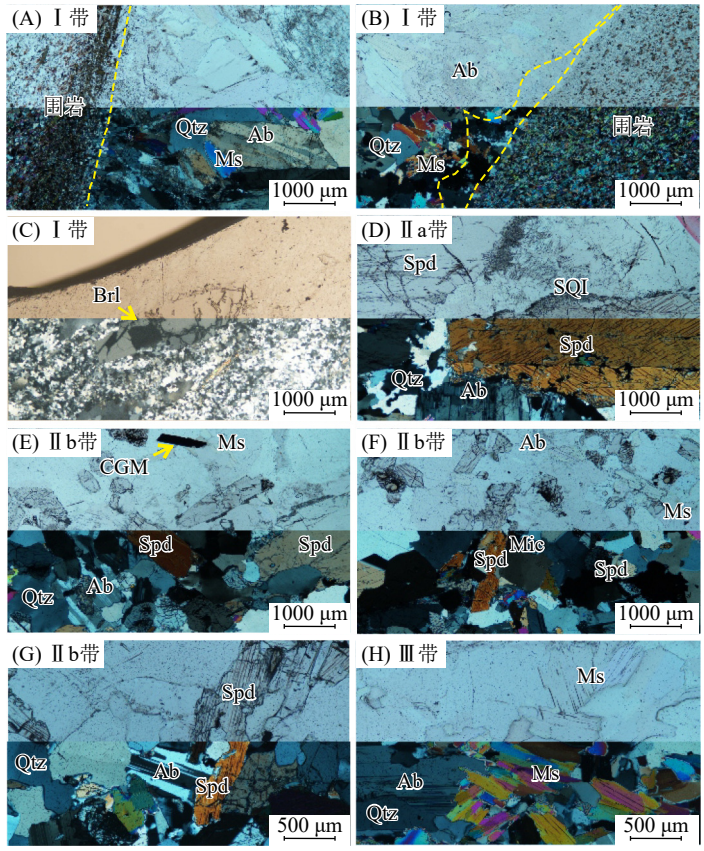


图 5 木绒伟晶岩显微照片

Fig. 5 Microphotographs of the Murong pegmatite

(A)围岩旁细颗粒过渡带和垂直的矿物生长带,未蚀变的白云母;(B)围岩与矿体交界处,围岩附近的矿物垂直于围岩;(C)自形程度较好的绿柱石;(D)石英出溶,可见蠕虫结构;(E)、(F)不具定向性细粒、中粒锂辉石与石英、钠长石共生呈块状构造;(G)不具定向性细粒、中粒锂辉石与石英、钠长石共生;(H)伟晶岩脉中片状、放射状白(锂)云母与石英、钠长石共生

(Spd. 锂辉石;Qtz. 石英;Ab. 钠长石;Mic. 微斜长石;Ms. 白云母;Brl. 绿柱石;CGM. 铌钽矿族矿物;A~H 图片上部分为单偏光,图片下部分为正交偏光)

(3)粒状锂辉石-钠长石带(Ⅱb)的锂辉石粒径相对变小至 1~2 cm,不具有定向性(图 4-D、图 5-E、F)。在木绒伟晶岩脉中,定向条带状锂辉石-钠长石带(Ⅱa)与非定向粒状锂辉石-钠长石带(Ⅱb)构成了内部的中间带。本文测年样品属于此带,手标本局部发育铁质浸染(图 4-F),在显微照片中显示长英质矿物与锂辉石共生(图 5-G)。

(4)粗粒长英质带(Ⅲ)为伟晶岩脉的核部带。手标本中常见石英团块和石英晶洞(图 4-E);其中片状、放射状(锂)云母与石英、钠长石共生(图 5-H),该带锂辉石基本不发育。

2 样品采集及分析方法

2.1 样品采集方法

本文在探槽中选取 12 kg 单一整块伟晶岩(样号 L4)用于独居石定年研究(采样点如图 3 所示),对应Ⅱb 带,挑选独居石 137 粒。4 件全岩化学样品取自 1 号勘探线剖面钻孔中,无明显蚀变的岩心;所取样品的矿物分布和颗粒大小相对均匀。样品 H1 和 H2 为Ⅰ带细粒钠长石伟晶岩,

H3 和 H4 样品为Ⅱb带中粗粒锂辉石钠长石伟晶岩。脉中心部位因为发育石英团块及晶洞构造导致岩石成分不均，本次未测试脉中心粗粒长英质带（Ⅲ）的伟晶岩全岩化学成分。具体取样位置见图 3-B。

2.2　分析方法

2.2.1　独居石挑选及背散射（BSE）方法

独居石的单矿物挑选、制靶和 BSE 照相由廊坊市拓轩岩矿检测服务有限公司完成，单矿物分离采用重选和磁选，以及最后的双目镜挑选完成；BSE 照相由 TESCAN MIRA3 场发射扫描电镜完成，条件为 10 kV 加速电压、15 nA 波束电流。

2.2.2　独居石 U-Pb 定年方法

独居石 U-Pb 同位素定年和微量元素含量在武汉上谱分析科技有限责任公司利用 LA-ICP-MS 同时分析完成。分析仪器由相干 193 nm 准分子激光剥蚀系统（Geolas HD）和安捷伦电感耦合等离子质谱仪（Agilent7900）联合组成。实验过程中的仪器工作参数具体如下：激光剥蚀束斑直径为 16 μm、频率为 2 Hz、激光能量为 80 mJ，详细的分析流程见 Zong et al.（2015）。同位素比值和微量元素校正标样分别为 44 069 和 NIST610，同位素比值监控标样为 TRE。数据处理采用软件 ICPMSDATECAL 10.8（Liu et al., 2008, 2010）完成。TRE 独居石的 $^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均年龄为（274.4±0.73）Ma（n=6），与国际推荐值在误差范围内一致［（272±4）Ma］（Tomascak et al., 1996）。独居石样品的 U-Pb 年龄谐和图绘制和年龄加权平均计算采用 Isoplot 4.15 完成。

2.2.3　独居石电子探针分析方法

独居石的电子探针成分分析在武汉上谱分析科技有限责任公司完成，仪器型号为日本电子（JEOL）（JXA-8230）。采用 SPI 矿物标样，电流 1×10^{-8} A、电压 15 kV、束斑 3 μm、元素特征峰的测定时间为 10 s、元素背景测定时间为 5 s。所有数据校正采用 ZAF 校正方法进行修正。

2.2.4　伟晶岩全岩主微量元素分析方法

全岩主量和微量元素在澳实矿物实验室完成。主量元素由 X 射线荧光光谱仪（XRF）分析，分析仪器为荷兰 PANalytical PW2424。微量元素由电感耦合等离子体质谱（美国 Aglient 5110）和电感耦合等离子体发射光谱（美国 Aglient 7900）完成。分析精度为 5%～10%。

3　分析结果

3.1　独居石形貌特征

木绒伟晶岩独居石呈透明、褐黄色，主要为半自形短柱状−他形粒状，大小为 50～160 μm，长宽比为 1∶1～3∶1；颗粒发育熔蚀现象，边缘呈港湾状。BSE 图像显示不同独居石内部结构均匀性存在明显的差异，交代结构发育，个别晶粒具有环带结构。根据生长环带和交代特征明暗程度不同，将独居石划分为 4 种类型，即：（1）发育生长环带的晶体，该类晶体有灰色内核和暗灰色幔部的双层结构，数量较少，核幔边界平直或呈角状，无渐变过渡特征（图 6-A、B），部分颗粒因碎裂，只留平直的生长线（图 6-C），部分学者将其定义为岩浆成因的板状环带（Crowley et al., 2008; Itano et al., 2018; 梁晓等, 2022）；（2）暗灰色均质结构的晶体，晶体通常无明显明暗亮度差，内部成分结构均匀，该类晶体是最主要的类型，但受交代作用的影响，边缘处发育不同程度的交代白边（图 6-D～F）；（3）具有交代残余结构的晶体，该类晶体较发育，以出现交代状的亮白色网脉、条带、不规则斑块为特征（图 6-G～I）；（4）亮白色晶体，该类呈亮白色，成分相对均匀，局部存在弱的明暗变化或补丁状；亮白特征类似于交代残余晶体的被交代部位。（图 6-J～L）。

3.2　独居石电子探针分析结果

电子探针分析发现，BSE 下的明暗程度主要受 Th、U 含量控制，呈灰白或亮白色的交代部位和亮白色晶体的 ThO_2 和 UO_2 含量较高，总体具有以下特征（电子探针分析数据见附表 1）：

所有测点具有类似的 P_2O_5 质量分数 26.92%～29.25%（均值 28.62%），在三角图解中均落入高 REE 独居石范围（图 7-A），并含有一定量的 F 和 Cl。ThO_2 质量分数 2.47%～19.25%（均值 8.74%），均大于 1%，与伟晶岩独居石范围吻合（梁晓等, 2022; 蒋少涌等, 2024）。

环带晶体、均质结构晶体和交代残余晶体中的未交代部位成分基本一致：ThO_2 质量分数 2.17%～5.25%（均值 3.34%）；UO_2 质量分数 0.27%～1.05%（均值 0.58%）；CaO 质量分数 0.45%～0.84%（均值 0.64%）；La_2O_3 质量分数 13.53%～15.70%（均值 14.69%）；Ce_2O_3 质量分数 28.47%～31.08%（均值 30.09%）；Nd_2O_3 质量分数 10.43%～12.20%（均

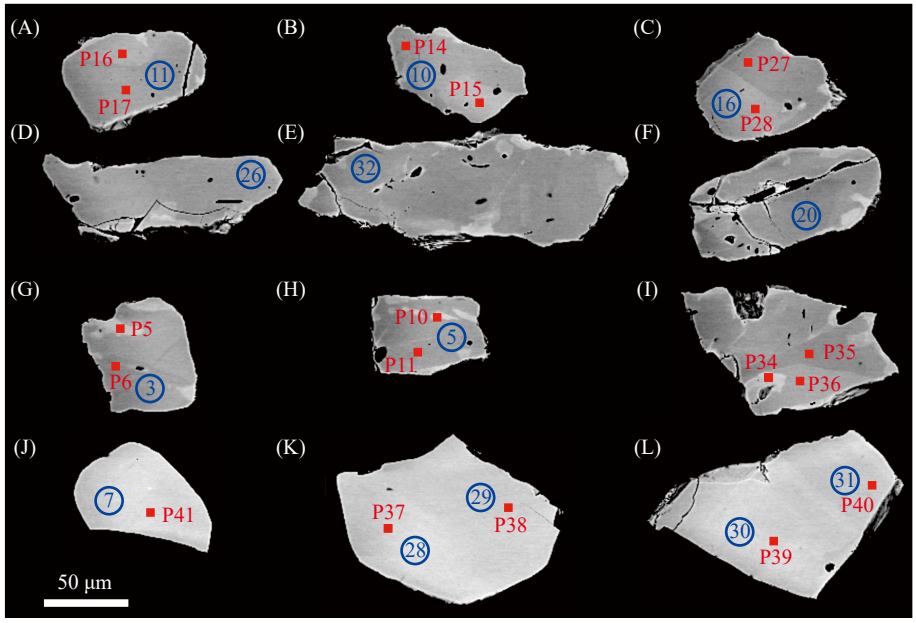


图 6 木绒伟晶岩独居石 BSE 照片及分析点位置

Fig. 6 BSE Images of monazite in the Murong pegmatite, and analysis points

(A)～(C) 具有生长环带的独居石;(D)～(F) 均质弱交代结构独居石;(G)～(I) 具交代残余结构的独居石;(J)～(L) 亮白色独居石颗粒

(图中红色方框为电子探针点位,字母和数字为样品测试点号;蓝色圆圈为定年分析点位,数字为样品测试点号)

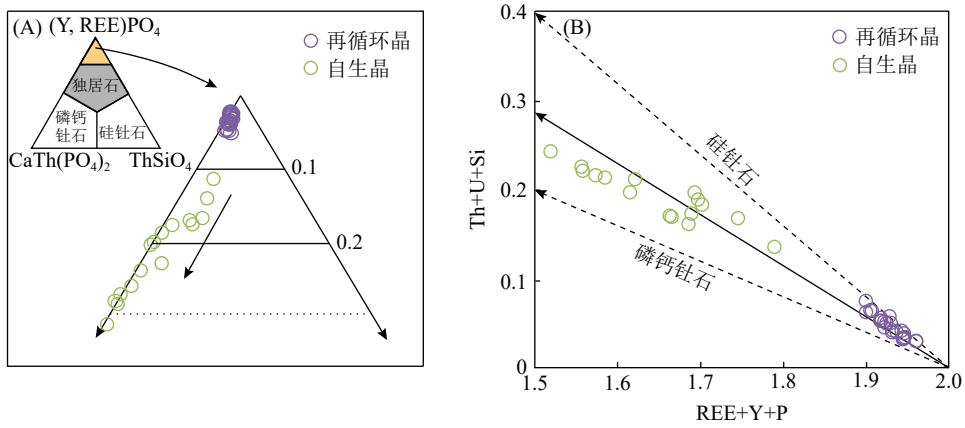


图 7 木绒独居石成分分类图解

Fig. 7 Compositional classification diagram of monazite from Murong

(A)独居石类型判别三角图解(底图据 Wu et al., 2019 修改);

(B)独居石(REE+Y+P)-(Th+U+Si)图解(底图据 Pyle et al., 2001 修改)

值 11.30%)。在三角图解中均落入 REE 富集的高 Ce 独居石范围(图 7-A)。交代残余晶体的交代部位和亮白色晶体具有相似的主量元素特征,即相对更高的 ThO_2 质量分数 11.37%～19.25%(均值 15.86%);CaO 质量分数 1.86%～5.80%(均值 3.93%);UO_2 质量分数 0.52%～7.58%(均值 3.76%)。相对较低的 Ce_2O_3 质量分数 14.43%～27.57%(均值 21.02%);Nd_2O_3 质量分数 3.91%～10.50%(均值 6.42%);Y_2O_3 质量分数 0.17%～1.91%(均值 1.07%),与非交代差别明显。

独居石成分分析证实交代部位和亮白晶体的成分一致,是岩浆晚期作用产物;而环带晶体和暗灰色均质晶体成分一致,是岩浆早期作用产物。据此,本文将早期和晚期独居石定义为再循环晶和自生晶。这一点也得到后文独居石微量元素和年代学的证实。各数据在三角图解中落入向磷钙钍石端元演化的范围(图 7-A)。在(REE+Y+P)-(Th+U+Si)图解中(图 7-B),再循环

晶和自生晶独居石数据所构成的趋势线处于磷钙钍石演化线附近，反映独居石向高 Th、U 方向演化。

3.3　独居石 U-Th-Pb 定年和微量元素结果

本文以 16 μm 束斑为准，在成分相对均匀和回避包裹体的前提下，对 L4 样品中独居石的再循环晶和自生晶进行定年和微量元素分析（数据见附表 2 和附表 3）。木绒独居石成分不均，LA-ICP-MS 测点束斑较大，以及激光剥蚀深度的原因，不能完全保证电子探针测试的部位与对应 LA-ICP-MS 测点部位成分相同，本文未采用 Ce 的电子探针含量作为内标校准 LA-ICP-MS 微量元素数据。经比对，激光点位与对应的电子探针点位的 Th、U、La 等含量基本一致，认为只经过外标 NIST610 校正的微量数据是可信的。

LA-ICP-MS 分析数据表明，再循环晶独居石的总 Pb、Th、U 质量分数明显低于自生晶独居石，分别为（269～700）×10^{-6}（均值 390×10^{-6}）、（19 033～55 144）×10^{-6}（均值 32 451×10^{-6}）和（1 942～7 662）×10^{-6}（均值 3 677×10^{-6}）；普通 Pb 质量分数明显低于交代颗粒，为（0～5.35）×10^{-6}（均值 2.32×10^{-6}）；Th/U 高于交代颗粒，为 4.84～22.21（均值 10.05）。交代独居石总 Pb、Th、U 质量分数分别为（2 351～3 153）×10^{-6}（均值2 741×10^{-6}）、（84 419～192 780）×10^{-6}（均值 144 498×10^{-6}）和（40 048～65 043）×10^{-6}（均值50 358×10^{-6}）；含有一定量普通 Pb，为（29.81～63.94）×10^{-6}（均值 46.10×10^{-6}）；Th/U 相对较低，为 1.56～4.78（均值 2.98）。

在稀土元素特征方面，再循环晶和自生晶独居石也存在明显差异（图 8-A），主要表现为：（1）再循环晶独居石的稀土总量和 LREE 富集程度均高于自生晶独居石。再循环晶和自生晶独居石的∑REE 分别为（508 637～547 889）×10^{-6}（均值 534 828×10^{-6}）和（318 331～418 544）×10^{-6}（均值 360 622×10^{-6}）；再循环晶和自生晶独居石的 LREE/HREE 分别为20.52～34.82（均值27.71）和5.27～17.63（均值 9.44）。（2）再循环晶独居石的负 Eu 程度明显弱于自生晶独居石，极弱正 Nd 异常；而自生晶独居石为强负 Eu 异常，弱负 Nd 异常。再循环晶和自生晶独居石的 δEu 值分别为 0.31～0.50（均值 0.44）和 0～0.04（均值 0.02）；δNd 值分别为 1.21～1.32（均值 1.26）和 0.44～0.60（均值 0.51）。（3）指示四分组效应的 $TE_{1,3}$ 值存在差异，再循环晶独居石 $TE_{1,3}$ 值为 0.96～1.06（均值 1.01），明显低于自生晶独居石 $TE_{1,3}$ 值 1.46～1.61（均值 1.55）。

虽然 2 类独居石的主微量元素特征存在差异，但定年同位素比值基本一致，暗示两者结晶时代相似。在 $^{208}Pb/^{232}Th$-$^{206}Pb/^{238}U$ 谐和图中，所有数据落点集中于一致线及附近（图 8-C），全部数据 $^{208}Pb/^{232}Th$ 加权年龄为（206.5±1.1）Ma（MSWD=4.9, n=27）；在 Tera-Wasserburg 谐和图中（下文简述为 T-W 谐和图），全部数据落点也相对集中，位于一致线上方，获得下交点年龄（198.5±1.5）Ma（MSWD=1.4, n=27）（图 8-B）。将再循环晶和自生晶独居石数据分类，获得再循环晶独居石 $^{208}Pb/^{232}Th$ 加权年龄为（206.1±1.6）Ma（MSWD=5.4, n=17）（图 8-D），T-W 谐和图下交点年龄（200.1±1.9）Ma（MSWD=0.55, n=17）（图 8-E）；自生晶独居石 $^{208}Pb/^{232}Th$ 加权年龄为（206.9±1.7）Ma（MSWD=4.3, n=10）（图 8-D），T-W 谐和图下交点年龄（196.3±2.4）Ma（MSWD=0.77, n=10）（图 8-F）。

独居石的 Th 含量较高，可能会存在过剩 ^{206}Pb（^{230}Th 衰变而来），会导致 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 偏低，测点会落在 T-W 谐和图一致线的下方（Schärer, 1984；杨雷等, 2024）；同时引起 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄大于 $^{207}Pb/^{235}U$ 和 $^{208}Pb/^{232}Th$ 年龄。本文所有数据在 T-W 谐和图中均处于一致线上方，且不存在 $^{206}Pb/^{238}U$ 表面年龄偏大的现象，说明本文独居石没有受到过剩 ^{206}Pb 的影响。当含普通 Pb 时，会导致测点偏离谐和图的一致线，其加权 $^{208}Pb/^{232}Th$ 年龄和加权 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄可信度较低（偏离一致的测点进行加权，也可能获得较低的 MSWD 值，但并不可靠）。因此，本文将 T-W 谐和图下交点年龄作为独居石的结晶时代。而全部数据的 T-W 谐和图下交点年龄（198.5±1.5）Ma（MSWD=1.4）的 MSWD 值也相对较低，是因为 2 类独居石基本同期形成，但存在早晚时序关系，该年龄可以作为再循环晶和自生晶独居石 2 组下交点年龄的验证参考。本文认为，再循环晶和自生晶独居石的结晶年龄以 T-W 谐和图下交点年龄为准，分别为（200.1±1.9）Ma 和（196.3±2.4）Ma。

3.4　全岩主微量元素分析结果

本文对 4 件木绒伟晶岩进行了全岩主微量元素分析，数据见附表 4。木绒伟晶岩具有高硅（SiO_2 质量分数：73.62%～75.29%，均值 74.31%）、低钾（K_2O 质量分数：0.90%～1.51%，均值 1.34%）、

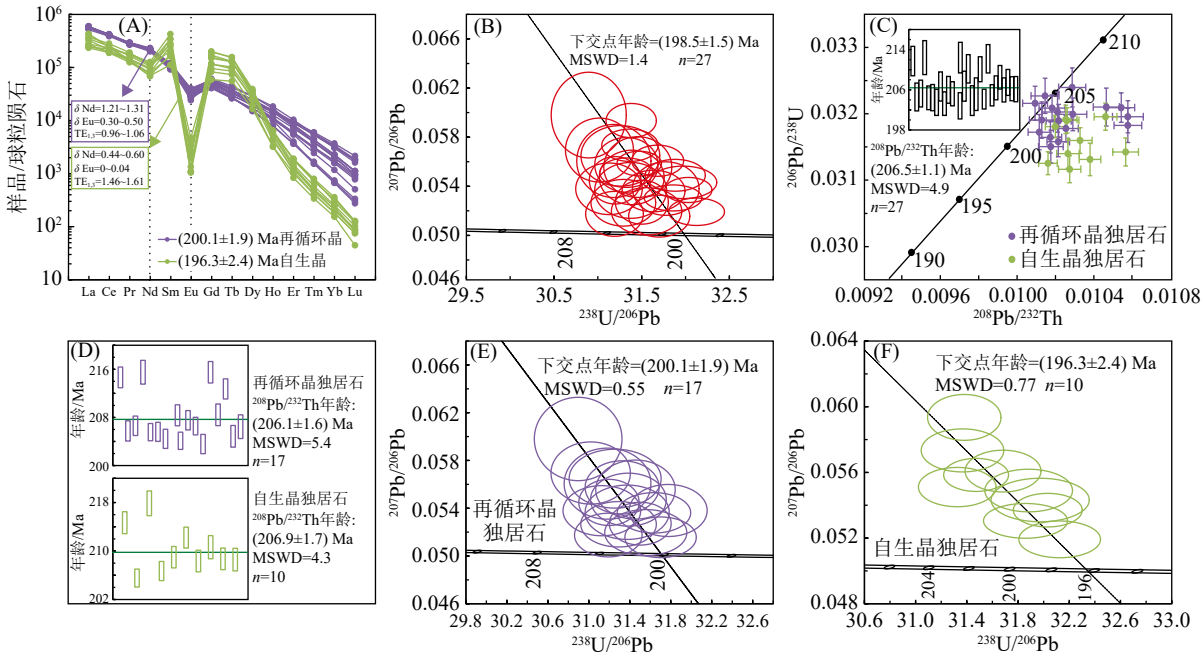


图 8 独居石 U-Th-Pb 定年结果及稀土配分曲线

Fig. 8 U-Th-Pb dating results and rare earth element distribution curves of monazite

(A)独居石稀土标准化配分曲线;(B)所有数据 T-W 图解;(C)所有数据 $^{208}Pb/^{232}Th$-$^{206}Pb/^{238}U$ 谐和图;(D)$^{208}Pb/^{232}Th$ 加权年龄;(E)再循环晶独居石 T-W 图解;(F)自生晶独居石 T-W 图解

强过铝质(A/CNK=1.58～2.30, 均值 1.85)特征(图 9);全碱含量[$w(Na_2O+K_2O)$=4.42%～6.67%],均值 5.66%。在 TAS(total alkali-silica)全碱−二氧化硅图解中(图 9-A),木绒伟晶岩均落入花岗岩范围;在 SiO_2-K_2O 图解中(图 9-B),主要集中于钙碱性系列和低钾(拉斑)系列界线处。微量元素上表现出高 Rb/Sr(11.08～25.53, 均值 15.62)、低 Zr/Hf(6.74～10.53, 均值 9.00)、Nb/Ta(1.45～2.25, 均值 1.90)的特征,且 Nb/Ta<5, 符合锂−铯−钽(lithium-cesium-tantalum, LCT)型伟晶岩特征(Černý and Ercit, 2005; 张辉等, 2021)。木绒伟晶岩和甲基卡锂辉石伟晶岩具有类似的全碱与 SiO_2 含量呈反比的关系(图 9-A),它们全碱、K_2O 含量和 A/CNK 值的范围有所重叠,但木绒伟晶岩有着更低的全碱、K_2O 含量下限和更高的 A/CNK 值上限。相比,甲基卡二云母花岗岩的碱质含量更高,A/CNK 值更低(图 9-C)。这暗示研究区伟晶岩具有更高的分异程度。

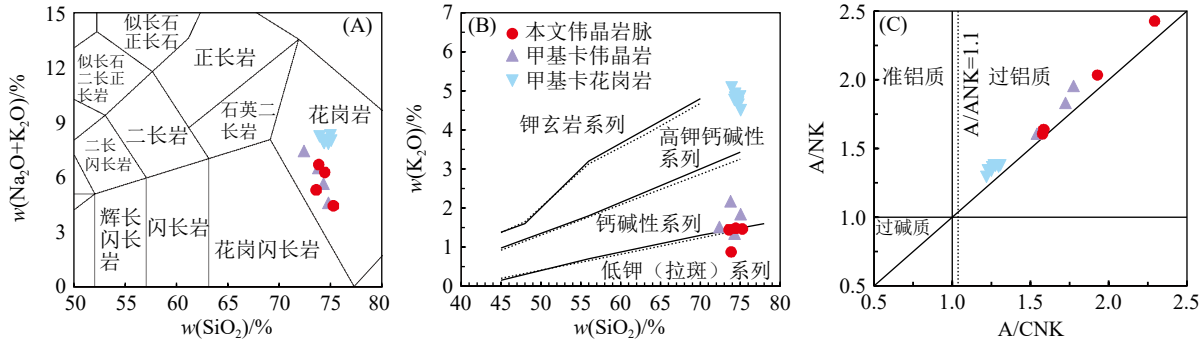


图 9 木绒伟晶岩及甲基卡锂辉石伟晶岩、二云母花岗岩全岩主量元素图解

Fig. 9 Major element diagrams of Murong pegmatite, Jiajika spodumene pegmatite, and two-mica granite

(A)SiO_2-(Na_2O+K_2O)图解(底图据 Middlemost, 1994);(B)SiO_2-K_2O 图解(底图据 Peccerillo and Taylor, 1976; Middlemost, 1985);(C)A/CNK-A/NK 图解(底图据 Maniar and Piccoli, 1989)

(甲基卡伟晶岩数据引自武文辉等, 2021;甲基卡花岗岩数据引自李名则等, 2018)

木绒伟晶岩具有轻稀土富集的右倾配分模式（图 10-A），极低的总稀土含量，负 Eu 异常［∑REE=（3.00～6.85）×10^{-6}，均值 4.66×10^{-6}；LREE/HREE=4.67～7.42，均值 6.41；δEu =0～0.59，均值 0.28；其中 2 组数据的 Eu 含量低于检出限，实际 δEu 下限值更低］。木绒伟晶岩和甲基卡伟晶岩、二云母花岗岩的稀土配分模式极为相似，只是伟晶岩的总稀土含量更低（图 10-A）。

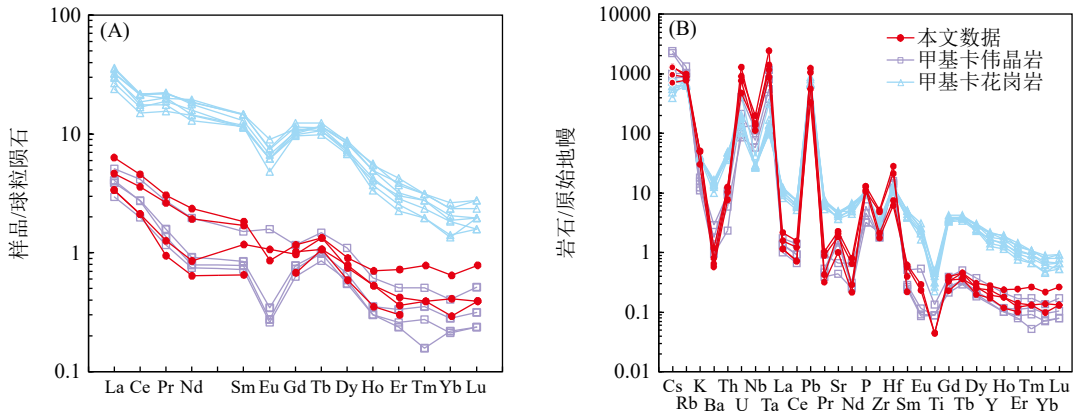


图 10　木绒伟晶岩及甲基卡锂辉石伟晶岩、二云母花岗岩全岩稀土配分曲线及微量元素蛛网图

Fig. 10　Rare earth element distribution curves and trace element spider diagrams of Murong pegmatite, Jiajika spodumene pegmatite, and two-mica granite

（A）全岩稀土元素标准化配分曲线（C1 球粒陨石标准化据 Sun and McDonough, 1989）；（B）微量元素蛛网图（原始地幔标准化）

（甲基卡伟晶岩数据引自武文辉等，2021；甲基卡花岗岩数据引自李名则等，2018）

微量元素蛛网图（图 10-B）显示，木绒伟晶岩富集 Cs、Rb、U、Ta、Pb、P、Hf，而相对亏损 Ba、La、Ce、Pr、Sr、Nd、Ti 元素；不同伟晶岩曲线模式基本一致。与甲基卡伟晶岩、花岗岩相比，元素富集与亏损的模式相同，只是木绒伟晶岩在富集和亏损程度上更加明显。稀土和微量元素配分曲线模式高度相似，说明甲基卡与木绒伟晶岩可能存在同源关系，不同分异程度导致了元素进一步富集和亏损。

4　讨论

4.1　木绒伟晶岩独居石成因类型

独居石主要有岩浆、变质、热液 3 种主要成因，与岩浆有关的独居石普遍出现在过铝质 S 型和高分异 I 型花岗岩、花岗伟晶岩以及碳酸岩中（吴黎光和李献华，2020；梁晓等，2022；蒋少涌等，2024）。岩浆独居石通常具有成分上的环带或振荡环带、板状、扇形分区或均质结构，而变质独居石可以出现特有的补丁状和骨架状特征；热液独居石可以出现环带、扇形分区和均质结构，但集合体呈团簇和放射状等（Williams et al., 2007；Crowley et al., 2008；Itano et al., 2018；梁晓等，2022）。本文独居石取自伟晶岩中，再循环晶独居石具有环带、板状、均质特征，与岩浆独居石特征吻合。

岩浆独居石的 Th 质量分数较高（一般大于 1%），多数在 5%～6% 甚至更高（Zhu and O'nions, 1999a, 1999b；Zi et al., 2015, 2019；梁晓等，2022；Wang et al., 2023）；而热液和低级变质成因独居石的 Th 质量分数通常低于 1%（梁晓等，2022）。梁晓等（2022）统计了不同成因类型独居石的地化参数和稀土配分曲线（不包括碳酸岩，如图 11、图 12），认为岩浆独居石具有最显著的负 Eu 异常（一般 δEu= 0.01～0.20），而低级变质岩和热液独居石的负 Eu 异常极弱，甚至是弱正异常；高级变质独居石的 δEu 值集中于 0.1～0.6，稀土配分曲线与岩浆独居石有所重叠，但 HREE 相对弱亏损（图 12）。此外，岩浆独居石的 Y 质量分数集中范围［（15 000～24 000）×10^{-6}］明显高于变质独居石［（1 000～11 000）×10^{-6}］和热液独居石［（1 000～5 000）×10^{-6}］（图 11）。

本文再循环晶独居石的 Th、U、Y 含量及 Th/U 比值和稀土配分曲线均在（梁晓等，2022）统计的岩浆独居石范围，只是 δEu 值略高；在 Th-Th/Ce 图解中（图 13-A），再循环晶独居石均落入岩浆和

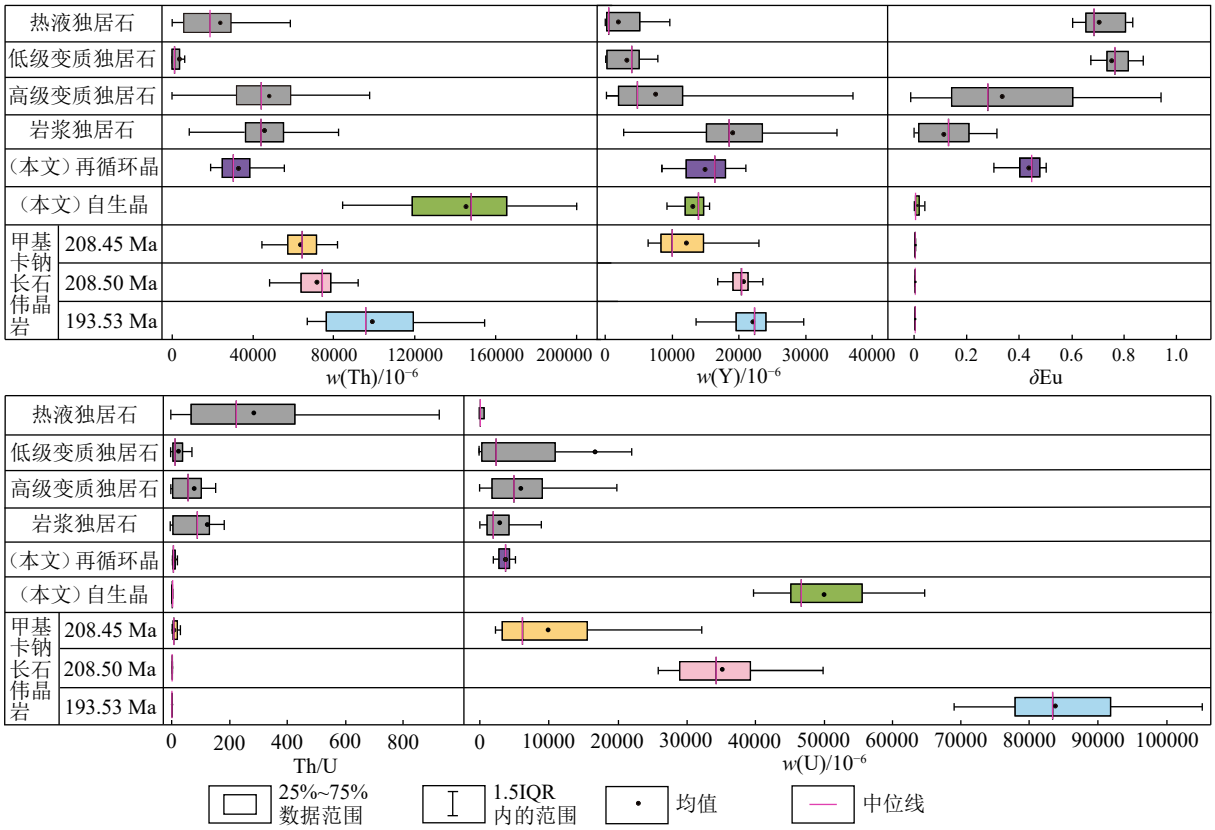


图 11 不同成因独居石的 Th、Y、U 含量和 Th/U、δEu 值箱形图

Fig. 11 Box blots of Th, Y, and U content and Th/U and δEu values of monazite with different origins

(热液、低级变质、高级变质和岩浆独居石数据底图引自梁晓等, 2022;
甲基卡钠长石伟晶岩数据引自 Zhou et al., 2023)

变质范围;在 Y/LREE-Si/Ce-Ca/Ce 三角分类图解中(图 13-B),主要落入岩浆和变质岩区,个别落入变质岩区。结合独居石的形貌特征,本文认为木绒伟晶岩中再循环晶独居石是岩浆成因的独居石,其测得的年龄可以代表伟晶岩岩浆结晶年龄。岩浆和变质独居石在图解中难以分开,因为一些变质程度相对较高的岩石(如片麻岩、麻粒岩、片岩等)中的独居石 Th、Y、U 含量及 δEu 值等与岩浆独居石部分重叠(图 12;梁晓等, 2022)。本文再循环晶独居石具有相对较高的 δEu 值,这可能与伟晶岩岩浆的演化程度有关。

岩浆体系中,被流体交代的独居石通常与晚期热液作用联系起来。本文自生晶独居石在 BSE 下呈亮白色(图 6),虽具所谓的"热液交代特征",但其高 Th、Y、U 含量及低 δEu 值和 Th/U 比值特征与热液独居石截然不同;而与甲基卡相近年龄的钠长石伟晶岩中岩浆独居石地球化学特征相似(图 11、12)。同时,在 Th-Th/Ce 图解中(图 13-A),本文自生晶独居石落入岩浆和变质独居石范围,与甲基卡独居石部分重叠;在 Y/LREE-Si/Ce-Ca/Ce 三角分类图解中(图 13-B)主要落入变质范围(一个点落入岩浆-变质范围),而与甲基卡 193.53 Ma 独居石相近。Th 和 U 具有较高的化学活动性,多富集于演化晚期或高分异的岩浆中,这导致了与伟晶岩有关的独居石具有高 Th、U 的特征。如聂潇等(2023)报道的南秦岭宁陕地区 Be-Nb 矿化伟晶岩中独居石 ThO_2 质量分数为 7.0%~13.9%(均值 10.56%, n=26), UO_2 质量分数为 1.9%~4.9%(均值 3.28%, n=26)。Wang et al.(2023)报道的湖南仁里—传梓源含铌钽的锂辉石钠长石伟晶岩中岩浆原生独居石 ThO_2 质量分数高达 30.45%~36.97%(均值 33.46%, n=30), UO_2 质量分数为 2.05%~3.20%(均值 2.57%, n=30);独居石中被流体交代的部位 ThO_2 质量分数更高,为 39.73%~48.80%(均值 45.04%, n=9)。又如川西扎乌龙白云母钠长石伟晶岩独居石 Th 质量分数 8.38%~15.09%(平均值 10.83%, n=22), U 质量分数 1.88%~5.09%(平均值 3.49%, n=22)(高建

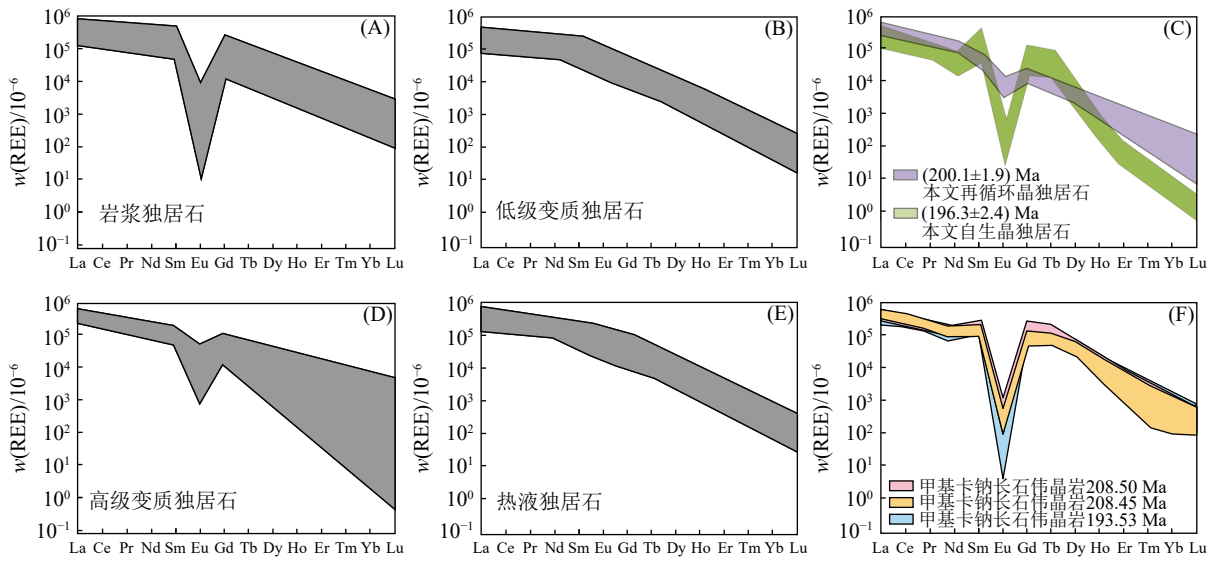


图 12　不同成因独居石的稀土配分曲线

Fig. 12　Rare earth element distribution curves of monazite with different origins

（A）岩浆独居石稀土配分曲线；（B）低级变质独居石稀土配分曲线；（C）本文再循环晶独居石和自生晶独居石稀土配分曲线；（D）高级变质独居石稀土配分曲线；（E）热液独居石稀土配分曲线；（F）甲基卡钠长石伟晶岩稀土配分曲线

（A、B、D、E 数据底图引自 梁晓等，2022，F 数据引自 Zhou et al., 2023）

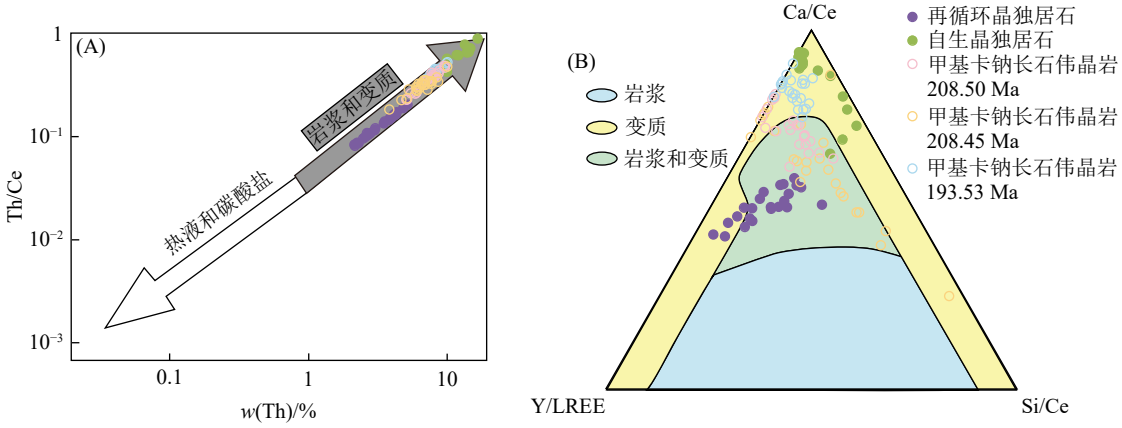


图 13　独居石元素含量的成因分类图解

Fig. 13　Genetic classification diagram of monazite

（A）独居石 Th-Th/Ce 分类图解（底图据 Wu et al., 2019）；（B）独居石 Y/LREE-Si/Ce-Ca/Ce 三角分类图解（底图据 Wu et al., 2019）

国等，2024）。以上显示，伟晶岩独居石可以具有高 Th、U 含量而不同于普通岩浆成因独居石，也明显区别于热液独居石。因此，木绒自生晶独居石是一种伟晶岩岩浆成因的独居石，是后续伟晶岩岩浆作用叠加在早阶段独居石之上的产物。

4.2　木绒富锂伟晶岩成岩时代

木绒伟晶岩独居石经历了多期结晶作用，早期再循环晶独居石的结晶年龄为（200.1±1.9）Ma，晚期自生晶独居石的结晶年龄为（196.3±2.4）Ma。自生晶独居石与再循环晶独居石具有相同的伟晶岩岩浆成因属性，2 组年龄可以代表木绒伟晶岩岩浆的活动时限。早期再循环晶独居石的年龄［（200.1±1.9）Ma］代表的是初始伟晶岩岩浆的活动年龄，而自生晶独居石的年龄［（196.3±2.4）Ma］代表后续演化阶段中伟晶岩岩浆活动年龄。本文独居石年龄与松潘—甘孜造山带中同类稀有金属矿床中伟晶岩的成岩年龄（集中于 220～200 Ma）基本一致（图 14、表 1），说明木

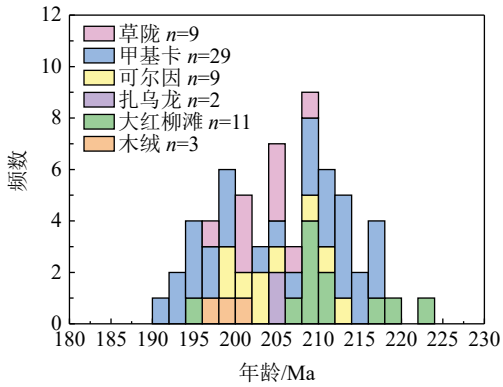


图 14 甘孜—松潘—西昆仑造山带稀有金属伟晶岩年龄分布直方图

Fig. 14 Age distribution histogram of rare metal pegmatite in the Songpan–Ganze–West Kunlun orogenic belt

(数据来源见表 1; *n* 为数据个数)

绒矿床是成矿带的重要组成部分,与周围临近矿床有着统一的构造背景和成因联系。

本文独居石记录了 2 次岩浆作用,说明木绒富锂伟晶岩并非由单一的一次岩浆作用所形成,其至少经历了 2 个阶段的分异演化过程。李建康等(2023)研究认为,二云母花岗岩是甲基卡伟晶岩的母岩,其分异出的伟晶岩熔体可再进一步演化形成富锂伟晶岩熔体,而表现出富锂熔体的二阶段演化模式。许志琴等(2023)研究确认,甲基卡的确存在 2 期伟晶岩岩浆–热液事件(210～204 Ma 和 193～192 Ma)。因此,木绒富锂伟晶岩成岩时代为 ca.200.1～196.3 Ma,也是富锂熔体多阶段演化过程的时限。

4.3 木绒富锂伟晶岩岩浆演化

稀有金属伟晶岩一直存在花岗质岩浆结晶分异和地壳源区深熔 2 种成因机制之争(蒋少涌等, 2021),那些与花岗岩解耦的伟晶岩容易与深熔作用联系起来。传统模型认为伟晶岩是花岗岩高度结晶分异演化产生的富挥发分残余岩浆–热液结晶而成。该模型认为伟晶岩与花岗岩具有密切时空关系(赵振华和严爽, 2023):伟晶岩壳分布于花岗岩顶部或围绕花岗岩内、外接触带成群成带分布;伟晶岩形成年龄与花岗岩基本一致或略晚;地球化学特征显示它们源区物质相似,两者具有明显的演化关系。LCT 型伟晶岩通常分布在以 S 型稀有金属花岗岩母岩为中心的 10 km 半径范围内,母岩体不应是小岩体;花岗岩与伟晶岩之间距离与伟晶岩分异程度成正比,即伟晶岩分异程度越高,两者相距越远,但伟晶岩与母岩体的距离不超过 10 km(Baker, 1998;

表 1 甘孜—松潘—西昆仑造山带伟晶岩和稀有金属矿床年龄统计表

Table 1 Ages of the pegmatite and rarel metals ore deposits in the Ganze–Songpan–West Kunlun orogenic belt

矿床	测试对象	样品编号	测试方法	加权平均年龄/Ma	出处
木绒	锂辉石伟晶岩	再循环晶	LA-ICP-MS独居石U-Th-Pb	200.1±1.9	本文
		自生晶		196.3±2.4	
	钠长石锂辉石伟晶岩		LA-MC-ICP-MS锡石U-Pb	199.5±2.4	廖登海, 2021
大红柳滩	伟晶岩脉	DHLT-1	LA -ICP-MS锡石U-Pb	218±12	Yan et al., 2018
			LA -ICP-MS铌钽铁矿U-Pb	211.9±2.4	
	锂辉石伟晶岩	505-2	LA-MC-ICP-MS锡石U-Pb	223±11	李侃等, 2019
	花岗伟晶岩	HLT-14	LA-MC-ICP-MS锡石U-Pb	211.3±5.0	唐俊林等, 2022
	锂辉石花岗伟晶岩		LA -ICP-MS铌钽铁矿U-Pb	208.1±1.5	Wang et al., 2020
	贫锂伟晶岩		LA -ICP-MS锆石U-Pb	195±2	Zhao et al., 2024
	富锂伟晶岩		LA -ICP-MS锡石U-Pb	216±2	
雪凤岭(大红柳滩)	锂辉石伟晶岩		LA -ICP-MS铌钽铁矿U-Pb	208.4±1.7	王核等, 2023
	锂辉石伟晶岩		LA -ICP-MS铌钽铁矿U-Pb	206.3±1.8	Yan et al., 2022
	石英–锂辉石–钠长石伟晶岩	18XFL-B02	LA -ICP-MS铌钽铁矿U-Pb	208.2±2.1	白洪阳等, 2022
			LA -ICP-MS锡石U-Pb	208±15	
扎乌龙	锂辉石伟晶岩脉	ZWL14-3-3	LA -ICP-MS铌钽铁矿U-Pb	204.5±1.8	李兴杰, 2019
	白云母花岗伟晶岩	GY-7-3-3	LA-ICP-MS独居石U-Pb	205.0±1.4	高建国等, 2024

续表 1

矿床	测试对象	样品编号	测试方法	加权平均年龄/Ma	出处
李家沟（可尔因）	钠长石锂辉石伟晶岩	LPD4H2	LA-MC-ICP-MS锡石U-Pb	211.4±3.3	许家斌等, 2020
	钠长石锂辉石伟晶岩	LPD2H2	LA -ICP-MS锆石U-Pb	198.0±3.4	邓运等, 2018
业隆沟（可尔因）	锂辉石钠长石伟晶岩		LA -ICP-MS锡石U-Pb	202.6±6.6	Yue et al., 2024
党坝（可尔因）	钠长石锂辉石伟晶岩	DB2	LA-MC-ICP-MS锡石U-Pb	208.1±1.9	费光春等, 2020
	含锂云母钠长石锂辉石伟晶岩	DB1		199.3±1.6	
	钠长石锂辉石伟晶岩		LA -ICP-MS铌钽铁矿U-Pb	213.1±1.2	朱汇派等, 2023
可尔因	钠长石伟晶岩	LKH3	LA-MC-ICP-MS锆石U-Pb	202.8 ±4.9	Fei et al., 2020
	钠长锂辉石伟晶岩	LPD4H2		200.1 ±4.6	
	钠长石锂辉石伟晶岩	ZK107-04	LA-MC-ICP-MS铌钽铁矿U-Pb	204.7±1.0	Li et al., 2022
甲基卡	伟晶岩脉	134-11	LA-MC-ICP-MS锡石U-Pb	203.7±4.6	周雄等, 2021
	锂辉石伟晶岩	JJK134	白云母$^{40}Ar/^{39}Ar$	195.4±2.2	王登红等, 2005
	钠长石伟晶岩	JJK104	白云母$^{40}Ar/^{39}Ar$	199.4±2.3	
	锂辉石伟晶岩		LA -ICP-MS锡石U-Pb	215.0±2.4；210.9±4.6	代鸿章等, 2018
	伟晶岩脉	zz50-1	LA -ICP-MS锡石U-Pb	192.4±7.3	Zhu et al., 2023
		zz51-1	LA -ICP-MS铌钽铁矿U-Pb	213.3±1.9	
		zz51-1	LA -ICP-MS锡石U-Pb	199.4±3.3	
		zz53-1	LA -ICP-MS铌钽铁矿U-Pb	207.7±1.5	
		zz53-1	LA -ICP-MS锡石U-Pb	198.1±3.8	
		zz54-3	LA -ICP-MS锡石U-Pb	195±12	
		zz57-1	LA -ICP-MS铌钽铁矿U-Pb	208.2±1.9	
		zz57-1	LA -ICP-MS锡石U-Pb	194.9±4.1	
		zz61-2	LA -ICP-MS锡石U-Pb	196.2±4.5	
		zz63-1	LA -ICP-MS铌钽铁矿U-Pb	209.3±1.7	
		zz63-1	LA -ICP-MS锡石U-Pb	197.8±2.6	
	花岗伟晶岩		LA -ICP-MS锆石U-Pb	216±2	付小方等, 2015
	钠长石伟晶岩（523 m）	J019501	LA-ICP-MS独居石U-Th-Pb	208.45±1.41	Zhou et al., 2023
	微斜长钠长伟晶岩（1 082 m）	J039610		205.87±1.67	
	微斜钠长伟晶岩（2 494 m）	J079211		210.70±0.69	
	钠长石伟晶岩（3 186 m）	J096204		193.53±0.71	
	锂辉石花岗伟晶岩	甲X03-重砂1	LA -ICP-MS锆石U-Pb	216±2	郝雪峰等, 2015
	锂辉石花岗伟晶岩	X03-NT	LA -ICP-MS铌钽铁矿U-Pb	214±2	
	钠长石−石英−锂辉石伟晶岩	J002305	LA -ICP-MS铌钽铁矿U-Pb	213.0±1.6	Jin et al., 2023
	钠长石−石英−白云母伟晶岩	J096204		190.6±2.5	
	钠长石−石英−锂辉石伟晶岩			213.0±1.9	
	钠长石−石英−锂辉石伟晶岩			210.0±2.3	
	钠长石−石英−锂辉石伟晶岩			212.0±1.8	
	9号伟晶岩脉		石榴石LA -ICP-MS	216.7±5.9	Zhao et al., 2023

续表 1

矿床	测试对象	样品编号	测试方法	加权平均年龄/Ma	出处
草陇	绿柱伟晶岩	19CL01-2	LA -ICP-MS铌钽铁矿U-Pb	204±2	Liu et al., 2023
	贫矿伟晶岩	19CL02-1		205±7	
	锂辉石伟晶岩	19CL02-2		201±2	
	绿柱伟晶岩	19CL01-2	LA -ICP-MS锡石U-Pb	207±3	
	锂辉石伟晶岩	19CL01-6		201±2	
	锂辉石伟晶岩	19CL02-2		196±2	
	锂辉石伟晶岩	19CL02-3		209±3	
	花岗伟晶岩	ZKCL-1	LA-ICP-MS独居石U-Pb	204.0±0.7	李五福等, 2023
		ZKCL-5		200.4±0.9	

Selway et al., 2005)。绿柱石是高分异花岗岩中的常见标志性矿物(吴福元等, 2017)。未分异的花岗质岩浆的 Be 质量分数大约在(4～6)×10^{-6}(London and Evensen, 2002),而在过铝质花岗质岩浆中,绿柱石结晶要求 Be 的最低饱和浓度为 106×10^{-6}(700 ℃以下)(Evensen et al., 1999; London, 2015),岩浆分异是花岗质岩浆中绿柱石晶出的重要途径(吴福元等, 2017)。尽管研究区伟晶岩中的矿石矿物以锂辉石矿物为主,但也见有少量绿柱石的存在,本文伟晶岩 Be 质量分数为(130.5～241)×10^{-6}(均值 171×10^{-6}),它从另一个侧面也说明研究区的伟晶岩曾经历过岩浆分异作用。

稀有金属伟晶岩的分异演化可以表现为随着与母体花岗岩距离的增加出现不同矿化类型的伟晶岩,在纵向和横向上呈现花岗岩→贫矿伟晶岩→Be 矿化伟晶岩→Li-Be-Ta-Nb 矿化伟晶岩→Li-Cs-Be-Ta-Nb 矿化伟晶岩的分带。Li 更趋向在高度结晶分异的最晚期伟晶岩相带中富集成矿(London, 2018)。岩浆的高度结晶分异作用是稀有金属成矿的关键,分异程度最高的岩相就是稀有金属成矿的最重要母岩(吴福元等, 2023)。

再循环晶和自生晶的形成环境和特征反映了岩浆系统的多阶段演化过程。再循环晶通常具有复杂的内部结构(如环带结构或核-边结构),化学成分可能与当前岩浆系统不一致,记录了多阶段的生长历史。而自生晶通常具有均一的成分和简单的内部结构,反映了当前岩浆系统的化学成分和结晶条件。例如 Heinonen et al.(2016)在芬兰古元古代环斑花岗岩中,碱性长石巨晶包裹的锆石具有较老的 U-Pb 年龄和较高的不相容元素(如 U、REE)含量,表明其来源于早期岩浆。基质中的锆石通常具有较年轻的 U-Pb 年龄和较低的不相容元素含量,代表了岩浆的最终结晶年龄。本文木绒伟晶岩中的再循环晶和自生晶独居石也有相似的特征,晚期自生晶独居石比早期再循环晶独居石更加亏损 REE、更富集 U、具有更低的 Th/U 比值、更显著的负 Eu 异常和更高的 $TE_{1,3}$ 值,表明伟晶岩经历了强烈的分异演化过程。

微量元素的比值在衡量岩浆结晶分异程度上具有更明显的优势,岩浆由于分异而发生性质改变时,Nb/Ta、Zr/Hf、K/Rb 和 Th/U 比值都将在高分异岩浆(或晚期岩浆)中显著变小(吴福元等, 2017),而 Rb/Sr 比值将显著增大(赵如意和王登红, 2023; 赵如意等, 2024)。在 Zr-10000Ga/Al 图解中(图 15-A),木绒锂辉石伟晶岩和甲基卡花岗岩、伟晶岩落点范围相近,并处于甲基卡二云母花岗岩高演化的方向(吴福元等, 2017);在 SiO_2-K/Rb 图解中(图 15-B),木绒伟晶岩和部分甲基卡锂辉石伟晶岩处于演化趋势的末端;在 Zr/Hf-Nb/Ta 图解(图 15-C)中,木绒伟晶岩和甲基卡锂辉石伟晶岩处于稀有金属花岗岩范围,并处于甲基卡二云母花岗岩向伟晶岩演化的趋势线附近。以上微量元素特征综合反映,木绒伟晶岩具有强分异特征。

同一岩浆演化过程中不同阶段形成的独居石化学组成呈规律性变化,一些反映岩石分异程度的微量元素比值也可以用于判断独居石寄主岩浆的分异程度(吴福元等, 2023; 高建国等, 2024)。Th 和 U 虽然具有较高的化学活动性,但相较而言,花岗岩中 Th 含量相对稳定,而 U 可以随着岩

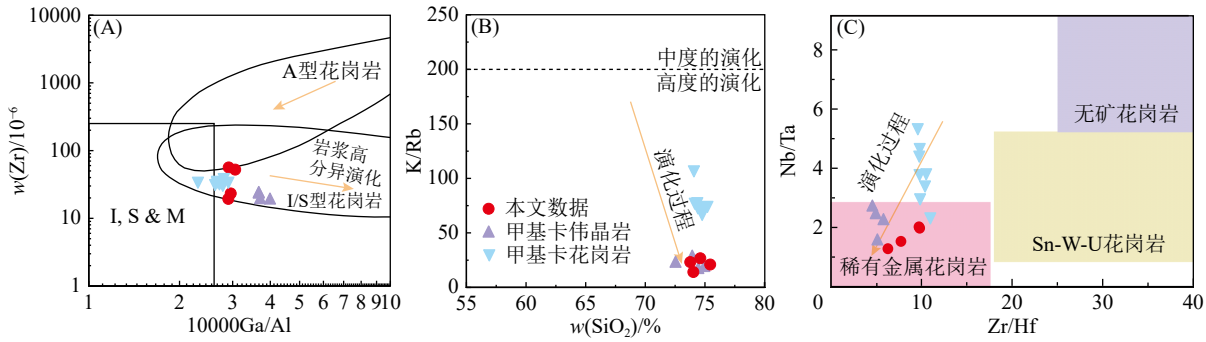


图 15　伟晶岩微量元素协变图

Fig. 15　Covariant map of the trace element pegmatite

（A）Zr-10000Ga/Al 图解（底图据吴福元等，2017）；（B）K/Rb-SiO_2 图解；（C）Nb/Ta- Zr/Hf 图解（底图据 Ballouard et al., 2016）（甲基卡伟晶岩数据引自武文辉等，2021；甲基卡花岗岩数据引自李名则等，2018）

浆演化不断向更富水的岩浆中富集，而导致晚期岩浆中副矿物更加富集 U，使得矿物 Th/U 比值逐渐减小。

强过铝质花岗岩中的独居石、石榴石、磷灰石等富集 REE 的矿物如果发生结晶分异，会导致晚期岩浆的总稀土含量逐渐减低（汪程等，2024），这也是伟晶岩稀土总量一般低于花岗岩母岩的主要原因。而 Eu 在岩浆分异过程中容易被斜长石等矿物分离出来，导致残余熔体中 Eu 的含量降低。因此高分异或晚期岩浆的独居石的总稀土含量和 δEu 值会显著降低。$TE_{1,3}$ 参数通常用来表示稀土元素四分组效应强度，分异程度越高的花岗岩往往具有更高的 $TE_{1,3}$ 值；而独居石总稀土含量降低、δEu 值减小往往和 $TE_{1,3}$ 值的增大是同步的（汪程等，2024）。以上说明同源岩浆演化过程中，晚期岩浆中的独居石的 U 含量增高、Th/U 值降低、总稀土含量降低、δEu 值减小和 $TE_{1,3}$ 值增大。上述特征与木绒早晚 2 期独居石的元素含量差异规律是吻合的。该特征也表现在川西其他伟晶岩中，如附表 5 中数据可以证实演化晚期独居石的 U 含量和 $TE_{1,3}$ 值显著增大；而 Th/U 值、总稀土含量和 δEu 值明显减小。综上反映了木绒伟晶岩岩浆曾经历了强烈的分异演化过程，晚期独居石结晶于相对更高演化程度的熔体当中。

木绒富锂伟晶岩的高分异特征是多种因素共同作用的结果。多阶段的岩浆活动，长距离的迁移过程（吴福元等，2017，2023），共同导致了锂元素在伟晶岩中富集。长时间、多阶段的演化不仅有助于元素的分异，还为后期的矿化提供了充足的时间和条件。在每一个演化阶段，岩浆中的元素都会发生重新分配和富集，特别是锂元素在多次的结晶和熔融过程中逐渐富集到残余熔体中。这些因素的综合作用，使得木绒伟晶岩极度富锂。

木绒富锂伟晶岩是松潘—甘孜—西昆仑稀有金属成矿带的重要组成部分，与邻近矿床密切相关，受制于统一的构造背景。各矿床在岩石学和矿物学等方面均具相似性，表明它们可能具有相同的成矿物质来源和演化历史。木绒伟晶岩可能是甲基卡伟晶岩群的重要外延。川西热穹隆群中富锂伟晶岩可以远离穹隆中心，这一发现对于理解成矿带的整体成矿规律具有重要意义。

5　结论

（1）川西木绒富锂伟晶岩形成于晚三叠世末期—早侏罗世初期。木绒伟晶岩发育 2 期独居石，均具岩浆成因属性。早阶段再循环晶独居石 U-Pb 年龄为（200.1±1.9）Ma，代表初始伟晶岩岩浆结晶年龄；晚阶段自生晶独居石年龄为（196.3±2.4）Ma，代表后续演化岩浆的最终结晶年龄。

（2）同一岩浆演化体系中不同阶段形成的独居石的 REE 和 U 含量、Th/U 比值、δEu 值和 $TE_{1,3}$ 值的相对高低可以指示寄主岩浆的分异程度。晚期自生晶独居石更加亏损 REE、更富集 U、更低的 Th/U 比值、更显著的负 Eu 异常和更高的 $TE_{1,3}$ 值（四分组效应），说明木绒伟晶岩岩浆经历了强烈的分异演化。

（3）木绒富锂伟晶岩年龄与松潘—甘孜—西昆仑稀有金属成矿带中同类型矿床伟晶岩年龄

基本一致,说明木绒与邻近矿床有着统一的构造背景,可能是甲基卡富锂伟晶岩群的外延部分。木绒富锂伟晶岩经历了相对长时间和多阶段的演化过程,使得它具有高度分异演化特征,同时也是锂巨量富集的关键原因。

附加材料:附表由作者提供,数据真实性由作者负责,在线查看网址:https://xbzrkx.cdut.edu.cn/article/doi/10.12474/cdlgzrkx.2024111501。

利益冲突声明:本文所有作者声明本研究无任何利益冲突。

作者贡献声明:崔新宇、赵甫峰、王国芝负责论文构思、数据分析、研究方法、观点论证和论文写作;崔新宇、赵甫峰、王国芝,岳大斌,宋祥峰,杨元良参与野外采样;刘雪敏,王梓璇,雷庆,肖世一,王琦参与数据分析、观点论证。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。

[参 考 文 献]

白洪阳,王核,闫庆贺,等,2022. 新疆西昆仑雪凤岭锂矿床铌钽铁矿、锡石年龄及其地质意义[J]. 岩石学报,38(7):2139—2152.

Bai H Y, Wang H, Yan Q H, et al., 2022. Columbite-tantalite and cassiterite ages of Xuefengling lithium deposit in West Kunlun, Xinjiang and their geological significancein[J]. Acta Petrologica Sinica, 38(7): 2139—2152.(in Chinese)

代鸿章,王登红,刘丽君,等,2018. 川西甲基卡 308 号伟晶岩脉年代学和地球化学特征及其地质意义[J]. 地球科学,43(10):3664—3681.

Dai H Z, Wang D H, Liu L J, et al., 2018. Geochronology, geochemistry and their geological significances of No. 308 pegmatite vein in the Jiajika deposit, western Sichuan, China[J]. Earth Science, 43(10): 3664—3681.(in Chinese)

邓运,费光春,李剑,等,2018. 四川李家沟伟晶岩型锂辉石矿床碳氢氧同位素及成矿时代研究[J]. 矿物岩石,38(3):40—47.

Deng Y, Fei G C, Li J, et al., 2018. Study of C-H-O isotopes and geochronology of the Lijiagou pegmatite spodumene deposit in Sichuan Province[J]. Mineralogy and Petrology, 38(3): 40—47.(in Chinese)

费光春,杨峥,杨继忆,等,2020. 四川马尔康党坝花岗伟晶岩型稀有金属矿床成矿时代的限定:来自 LA-MC-ICP-MS 锡石 U-Pb 定年的证据[J]. 地质学报,94(3):836—849.

Fei G C, Yang Z, Yang J Y, et al., 2020. New precise timing constraint for the Dangba granitic pegmatite type rare-metal deposit, Markam, Sichuan Province, evidence from cassiterite LA-MC-ICP-MS U-Pb dating[J]. Acta Geologica Sinica, 94(3): 836—849.(in Chinese)

付小方,侯立玮,梁斌,等,2017. 甲基卡式花岗伟晶岩型锂矿床成矿模式与三维勘查找矿模型[M]. 北京:科学出版社:1—230.

付小方,黄韬,郝雪峰,等,2019. 综合找矿模型在甲基卡隐伏区稀有锂金属找矿中的应用[J]. 矿床地质,38(4):751—770.

Fu X F, Huang T, Hao X F, et al., 2019. Application of comprehensive prospecting model to rare lithium metal exploration in Jiajika concealed ore deposit[J]. Mineral Deposits, 38(4): 751—770.(in Chinese)

付小方,黄韬,郝雪峰,等,2023. 川西花岗细晶岩–伟晶岩型锂矿含矿性评价与示矿标志[J]. 地学前缘,30(5):227—243.

Fu X F, Huang T, Hao X F, et al., 2023. Granitic aplite-pegmatite lithium deposits in western Sichuan: orebearing property evaluation and geological indicators[J]. Earth Science Frontiers, 30(5): 227—243.(in Chinese)

付小方,梁斌,邹付戈,等,2021. 川西甲基卡锂等稀有多金属矿田成矿地质特征与成因分析[J]. 地质学报,95(10):3054—3068.

Fu X F, Liang B, Zou F G, et al., 2021. Discussion on metallogenic geological characteristics and genesis of rare polymetallic ore fields in western Sichuan[J]. Acta Geologica Sinica, 95(10): 3054—3068.(in Chinese)

付小方,袁蔺平,王登红,等,2015. 四川甲基卡矿田新三号稀有金属矿脉的成矿特征与勘查模型[J]. 矿床地质,34(6):1172—1186.

Fu X F, Yuan L P, Wang D H, et al., 2015. Mineralization characteristics and prospecting model of newly discovered X03 rare metal vein in Jiajika orefield, Sichuan[J]. Mineral Deposits, 34(6): 1172—1186.(in Chinese)

高建国,周明召,郑碧海,等,2024. 川西扎乌龙地区卡吉亚二云母花岗岩、稀有金属伟晶岩的地球化学、年代学特征及二者的成矿关系[J]. 地质学报,98(5):1380—1402.

Gao J G, Zhou M Z, Zheng B H, et al., 2024. Geochemistry, monazite geochronology, and metallogenic relation of Kajiya two-mica granite and rare-metal pegmatite in Zhawulong deposit, western Sichuan Province, China[J]. Acta Geologica Sinica, 98(5): 1380—1402.(in Chinese)

郝雪峰,付小方,梁斌,等,2015. 川西甲基卡花岗岩和新三号矿脉的形成时代及意义[J]. 矿床地质,34(6):1199—1208.

Hao X F, Fu X F, Liang B, et al., 2015. Formation ages of granite and X03 pegmatite vein in Jiajika, western Sichuan, and their geological significance[J]. Mineral Deposits, 34(6): 1199—1208.(in Chinese)

蒋少涌,王春龙,张璐,等,2021. 伟晶岩型锂矿中矿物原位微区

元素和同位素示踪与定年研究进展[J]. 地质学报, 95(10): 3017—3038.

Jiang S Y, Wang C L, Zhang L, et al., 2021. In situ trace element tracing and isotopic dating of pegmatite type lithium deposits: an overview[J]. Acta Geologica Sinica, 95(10): 3017—3038. (in Chinese)

蒋少涌, 张浩翔, 刘思祺, 等, 2024. 伟晶岩中不同副矿物 U-Pb 同位素定年和示踪的问题与应用[J]. 地质学报, 98(5): 1573—1599.

Jiang S Y, Zhang H X, Liu S Q, et al., 2024. The U-Pb isotope dating and tracing using different accessory minerals in pegmatite: problems and application[J]. Acta Geologica Sinica, 98(5): 1573—1599. (in Chinese)

李建康, 2006. 川西典型伟晶岩型矿床的形成机理及其大陆动力学背景[D]. 北京: 中国地质大学(北京).

Li J K, 2006. Mineralizing mechanism and continental geodynamics of typical pegmatite deposits in western Sichuan, China[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing). (in Chinese)

李建康, 李鹏, 严清高, 等, 2023. 松潘—甘孜—西昆仑花岗伟晶岩型稀有金属成矿带成矿规律[J]. 中国科学: 地球科学, 53(8): 1718—1740.

Li J K, Li P, Yan Q G, et al., 2023. Geology and mineralization of the Songpan−Ganze−West Kunlun pegmatite-type rare-metal metallogenic belt in China: an overview and synthesis[J]. Science China Earth Sciences, 66(8): 1702—1724.

李侃, 高永宝, 滕家欣, 等, 2019. 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, 52(4): 206—221.

Li K, Gao Y B, Teng J X, et al., 2019. 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, 52(4): 206—221. (in Chinese)

李名则, 秦宇龙, 李峥, 等, 2018. 川西甲基卡二云母花岗岩与伟晶岩脉地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 37(3): 366—378.

Li M Z, Qin Y L, Li Z, et al., 2018. Geochemical characteristics of two-mica granite and granite pegmatite in Jiajika area, western Sichuan, and their geological implications[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 37(3): 366—378. (in Chinese)

李五福, 李善平, 王秉璋, 等, 2023. 青海三江北段草陇(绿柱石−)锂辉石花岗伟晶岩的发现及其 Li-Be 找矿意义[J]. 大地构造与成矿学, 47(4): 895—913.

Li W F, Li S P, Wang B Z, et al., 2023. Discovery of the (beryl-bearing) spodumene pegmatite in the Caolong area in the Sanjiang northern segment in Qinghai: implications for Li-Be mineralization[J]. Geotectonica et Metallogenia, 47(4): 895—913. (in Chinese)

李兴杰, 2019. 川西扎乌龙花岗伟晶岩型锂矿床成矿机制研究[D]. 北京: 中国地质科学院.

Li X J, 2019. Metallogenic mechanism of Zhawulong granitic pegmatite-type lithium deposit in western Sichuan[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Science. (in Chinese)

梁晓, 徐亚军, 訾建威, 等, 2022. 独居石成因矿物学特征及其对 U-Th-Pb 年龄解释的制约[J]. 地球科学, 47(4): 1383—1398.

Liang X, Xu Y J, Zi J W, et al., 2022. Genetic mineralogy of monazite and constraints on interpretation of U-Th-Pb ages[J]. Earth Science, 47(4): 1383—1398. (in Chinese)

廖登海, 2021. 四川省雅江县木绒锂矿矿床地质特征及找矿方向[D]. 成都: 成都理工大学.

Liao D H, 2021. Geological characteristics and prospecting direction of the Murong lithium deposit in Yajiang County, Sichuan Province[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology. (in Chinese)

龙欣雨, 唐杰, 许文良, 2024. 花岗质岩浆作用及后期演化过程: 来自矿物原位微区成分与同位素组成的制约[J]. 岩石学报, 40(3): 785—810.

Long X Y, Tang J, Xu W L, 2024. The magmatic and post-magmatic processes of granitic magma: constraints from in situ element and isotope compositions of minerals[J]. Acta Petrologica Sinica, 40(3): 785—810. (in Chinese)

马昌前, 邹博文, 高珂, 等, 2020. 晶粥储存、侵入体累积组装与花岗岩成因[J]. 地球科学, 45(12): 4332—4351.

Ma C Q, Zou B W, Gao K, et al., 2020. Crystal mush storage, incremental pluton assemblyand granitic petrogenesis[J]. Earth Science, 45(12): 4332—4351. (in Chinese)

聂潇, 陈雷, 于涛, 等, 2023. 独居石矿物地球化学对南秦岭宁陕地区 Be-Nb 伟晶岩成因的指示[J]. 地质学报, 97(11): 3737—3751.

Nie X, Chen L, Yu T, et al., 2023. Geochemistry of monazites from Be-Nb rare-element pegmatites in the Ningshan district, South Qinling orogen: implications for pegmatite genesis[J]. Acta Geologica Sinica, 97(11): 3737—3751. (in Chinese)

邱昆峰, 杨立强, 2011. 独居石成因特征与 U-Th-Pb 定年及三江特提斯构造演化研究例析[J]. 岩石学报, 27(9): 2721—2732.

Qiu K F, Yang L Q, 2011. Genetic feature of monazite and its U-Th-Pb dating: critical considerations on the tectonic evolution of Sanjiang Tethys[J]. Acta Petrologica Sinica, 27(9): 2721—2732. (in Chinese)

冉子龙, 李艳军, 2021. 伟晶岩型稀有金属矿床成矿作用研究进展[J]. 地质科技通报, 40(2): 13—23.

Ran Z L, Li Y J, 2021. Research advances on rare metal pegmatite deposits[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 40(2): 13—23. (in Chinese)

唐俊林, 柯强, 徐兴旺, 等, 2022. 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, 38(3): 655—675.

Tang J L, Ke Q, Xu X W, et al., 2022. Magma evolution and mineralization of Longmenshan lithium-beryllium pegmatite in Dahongliutan area, West Kunlun[J]. Acta Petrologica Sinica, 38(3): 655—675. (in Chinese)

汪程, 王岳军, 邵拥军, 等, 2024. 江南造山带中段仁里—传梓源 Li-Cs-Ta 型伟晶岩中副矿物的稀土元素四分组效应[J]. 大地构造与成矿学, 48(3): 478—492.

Wang C, Wang Y J, Shao Y J, et al., 2024. The lanthanide tetrad effect of accessory minerals in the Renli−Chuanziyuan Li-Cs-Ta type pegmatite, central Jiangnan orogen[J]. Geotectonica et Metallogenia, 48(3): 478—492. (in Chinese)

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 D H, Dai H Z, Liu S B, 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. (in Chinese)

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 D H, Li J K, Fu X F, 2005. $^{40}Ar/^{39}Ar$ dating for the Jiajika pegmatite-type rare metal deposit in western Sichuan and its significance[J]. Geochimica, 34(6): 541—547. (in Chinese)

王核, 黄亮, 马华东, 等, 2023. 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, 39(7): 1931—1949.

Wang H, Huang L, Ma H D, et al., 2023. Geological characteristics and metallogenic regularity of lithium deposits in Dahongliutan−Bailongshan area, West Kunlun, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 39(7): 1931—1949. (in Chinese)

吴福元, 郭春丽, 胡方泱, 等, 2023. 南岭高分异花岗岩成岩与成矿[J]. 岩石学报, 39(1): 1—36.

Wu F Y, Guo C L, Hu F Y, et al., 2023. Petrogenesis of the highly fractionated granites and their mineralizations in Nanling range, South China[J]. Acta Petrologica Sinica, 39(1): 1—36. (in Chinese)

吴福元, 刘小驰, 纪伟强, 等, 2017. 高分异花岗岩的识别与研究[J]. 中国科学: 地球科学, 47(7): 745—765.

Wu F Y, Liu X C, Ji W Q, et al., 2017. Highly fractionated granites: recognition and research[J]. Science China Earth Sciences, 60(7): 1201—1219.

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.

Wu L G, Li X H, 2020. Isotopic and elemental microanalyses of monazite and its geological application[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 39(6): 1077—1094. (in Chinese)

武文辉, 赵春, 詹涵钰, 等, 2021. 川西甲基卡烧碳沟地区伟晶岩脉地球化学特征[J]. 中国地质调查, 8(1): 71—79.

Wu W H, Zhao C, Zhan H Y, et al., 2021. Geochemical characteristics of the pegmatite veins in Shaotangou area, Jiajika of western Sichuan Province[J]. Geological Survey of China, 8(1): 71—79. (in Chinese)

谢元惠, 单伟, 于学峰, 等, 2021. 胶东白垩纪煌斑岩中单斜辉石再循环晶的识别及其地质意义[J]. 岩石学报, 37(7): 2203—2233.

Xie Y H, Shan W, Yu X F, et al., 2021. Identification of clinopyroxene antecrysts in Cretaceous lamprophyre dykes from the Jiaodong Peninsula and their geological significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 37(7): 2203—2233. (in Chinese)

许家斌, 费光春, 覃立业, 等, 2020. 四川可尔因矿田李家沟伟晶岩型稀有金属矿床锡石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 定年及地质意义[J]. 地质与勘探, 56(2): 346—358.

Xu J B, Fei G C, Qin L Y, et al., 2020. LA-MC-ICP-MS U-Pb dating of cassiterite from the Lijiagou pegmatite-type rare-metal deposit in the Ke'eryin orefield, Sichuan Province and its geological implication[J]. Geology and Exploration, 56(2): 346—358. (in Chinese)

许志琴, 王汝成, 赵中宝, 等, 2018. 试论中国大陆"硬岩型"大型锂矿带的构造背景[J]. 地质学报, 92(6): 1091—1106.

Xu Z Q, Wang R C, Zhao Z B, et al., 2018. On the structural backgrounds of the large-scale "hard-rock type" lithium ore belts in China[J]. Acta Geologica Sinica, 92(6): 1091—1106. (in Chinese)

许志琴, 朱文斌, 郑碧海, 等, 2023. 川西甲基卡伟晶岩型锂矿的"多层次穹状花岗岩席"控矿新理论——记"川西甲基卡锂矿科学钻探"创新成果[J]. 地质学报, 97(10): 3133—3146.

Xu Z Q, Zhu W B, Zheng B H, et al., 2023. New ore-controlling theory of "multilayered domal granitic sheets" of the Jiajika pegmatite-type lithium deposit: the major discoveries of the "Jiajika pegmatite-type lithium deposit scientific drilling project (JSD)" [J]. Acta Geologica Sinica, 97(10): 3133—3146. (in Chinese)

许志琴, 朱文斌, 郑碧海, 等, 2024. 川西伟晶岩型锂矿科学钻探工程竣工——为建立伟晶岩型锂矿成矿理论提供科学依据[J]. 地质学报, 98(10): 3169—3171.

Xu Z Q, Zhu W B, Zheng B H, et al., 2024. Completion of the scientific drilling for the pegmatitic lithium deposit in western Sichuan: a project to investigate the metallogenic mecha-

nism of the pegmatitic-type lithium deposit[J]. Acta Geologica Sinica, 98(10): 3169—3171. (in Chinese)

杨雷, 贺一凡, 王佳敏, 等, 2024. 希夏邦马峰地区含绿柱石花岗伟晶岩的地球化学及年代学研究[J]. 岩石学报, 40(5): 1548—1564.

Yang L, He Y F, Wang J M, et al., 2024. Geochemical and geochronological study of beryl-bearing granitic pegmatite in the Mount Shisha Pangma Himalaya region[J]. Acta Petrologica Sinica, 40(5): 1548—1564. (in Chinese)

岳大斌, 廖兴健, 王大壮, 等, 2026. 川西木绒隐伏伟晶岩型锂辉石矿床综合找矿模型的建立及在容须卡的应用示范[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 53(2): 384—402.

Yue D B, Liao X J, Wang D Z, et al., 2026. Establishment of an integrated exploration model for hidden pegmatite-type spodumene deposits in Murong, western Sichuan and their application in Rongxuka[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 53(2): 384—402.(in Chinese)

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 H, Lü Z H, Tang Y, 2021. A review of LCT pegmatite and its lithium ore genesis[J]. Acta Geologica Sinica, 95(10): 2955—2970. (in Chinese)

张雅, 李全忠, 闫峻, 等, 2021. LA-ICP-MS 独居石 U-Th-Pb 测年方法研究[J]. 岩矿测试, 40(5): 637—649.

Zhang Y, Li Q Z, Yan J, et al., 2021. Analytical conditions for U-Th-Pb dating of monazite by LA-ICP-MS[J]. Rock and Mineral Analysis, 40(5): 637—649. (in Chinese)

赵如意, 王登红, 2023. 赣粤界山发现花岗伟晶岩型铍多金属矿[J]. 矿床地质, 42(6): 1305—1309.

Zhao R Y, Wang D H, 2023. Discovery of granitic pegmatite type beryllium polymetallic deposit in border mountains between Jiangxi and Guangdong Provinces[J]. Mineral Deposits, 42(6): 1305—1309. (in Chinese)

赵如意, 王登红, 凤永刚, 等, 2024. 中国不同时代典型花岗伟晶岩型锂矿特征及其对找矿预测的启示[J]. 中国地质, 51(1): 17—41.

Zhao R Y, Wang D H, Feng Y G, et al., 2024. Characteristics of granitic pegmatite type lithium deposits in different mineralization epochs and its enlightenment for prospecting prediction, China[J]. Geology in China, 51(1): 17—41. (in Chinese)

赵振华, 严爽, 2023. 花岗伟晶岩成矿有关的几个问题讨论[J]. 大地构造与成矿学, 47(1): 1—41.

Zhao Z H, Yan S, 2023. Some issues relevant to rare metal metallogeny of granitic pegmatites[J]. Geotectonica et Metallogenia, 47(1): 1—41. (in Chinese)

周雄, 周玉, 孙宝伟, 等, 2021. 四川甲基卡稀有金属矿床 134 号脉锡石 U-Pb 定年与地质意义[J]. 岩矿测试, 40(1): 156—164.

Zhou X, Zhou Y, Sun B W, et al., 2021. Cassiterite U-Pb dating of No. 134 pegmatite vein in the Jiajika rare metal deposit, western Sichuan and its geological significances[J]. Rock and Mineral Analysis, 40(1): 156—164. (in Chinese)

朱汇派, 费光春, 谭华, 等, 2023. 四川可尔因矿田党坝伟晶岩型稀有金属矿床中带伟晶岩地质特征及成矿时代[J]. 矿物岩石地球化学通报, 42(2): 350—359.

Zhu H P, Fei G C, Tan H, et al., 2023. Geological characteristics and metallogenic age of pegmatites in the central zone of the Dangba pegmatite-type rare-metal deposit in the Ke'eryin orefield, Sichuan Province[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 42(2): 350—359. (in Chinese)

Baker D R, 1998. The escape of pegmatite dikes from granitic plutons: constraints from new models of viscosity and dike propagation[J]. The Canadian Mineralogist, 36(2): 255—263.

Ballouard C, Poujol M, Boulvais P, et al., 2016. Nb-Ta fractionation in peraluminous granites: a marker of the magmatic-hydrothermal transition[J]. Geology, 44(3): 231—234.

Černý P, Ercit T S, 2005. The classification of granitic pegmatites revisited[J]. The Canadian Mineralogist, 43(6): 2005—2026.

Cherniak D J, Zhang X Y, Nakamura M, et al., 2004. Oxygen diffusion in monazite[J]. Earth and Planetary Science Letters, 226(1/2): 161—174.

Crowley J L, Brown R L, Gervais F, et al., 2008. Assessing inheritance of zircon and monazite in granitic rocks from the Monashee complex, Canadian Cordillera[J]. Journal of Petrology, 49(11): 1915—1929.

Dai H Z, Wang D H, Liu L J, et al., 2019. Geochronology and geochemistry of Li(Be)-bearing granitic pegmatites from the Jiajika superlarge Li-polymetallic deposit in western Sichuan, China[J]. Journal of Earth Science, 30(4): 707—727.

Evensen J M, London D, Wendlandt R F, 1999. Solubility and stability of beryl in granitic melts[J]. American Mineralogist, 84(5/6): 733—745.

Fei G C, Menuge J F, Li Y Q, et al., 2020. Petrogenesis of the Lijiagou spodumene pegmatites in Songpan−Garze Fold Belt, west Sichuan, China: evidence from geochemistry, zircon, cassiterite and coltan U-Pb geochronology and Hf isotopic compositions[J]. Lithos, 364/365: 105555.

Goudie D J, Fisher C M, Hanchar J M, et al., 2014. Simultaneous in situ determination of U-Pb and Sm-Nd isotopes in monazite by laser ablation ICP-MS[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 15(6): 2575—2600.

Harrison T M, Catlos E J, Montel J M, 2002. U-Th-Pb dating of phosphate minerals[J]. Reviews in Mineralogy and

Geochemistry, 48(1): 524—558.

Heinonen A, Mänttäri I, Rämö O T, et al., 2016. A priori evidence for zircon antecryst entrainment in megacrystic Proterozoic granites[J]. Geology, 44(3): 227—230.

Itano K, Iizuka T, Hoshino M, 2018. REE-Th-U and Nd isotope systematics of monazites in magnetite- and ilmenite-series granitic rocks of the Japan arc: implications for its use as a tracer of magma evolution and detrital provenance[J]. Chemical Geology, 484: 69—80.

Jin W K, Che X D, Wang R C, et al., 2023. The deep rare metal metallogenic characteristics of the Jiajika lithium polymetallic deposit in Sichuan Province, China: revealed by the Jiajika scientific drilling[J]. Ore Geology Reviews, 160: 105579.

Li J K, Zou T R, Liu X F, et al., 2015. The metallogenetic regularities of lithium deposits in China[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 89(2): 652—670.

Li X, Dai H Z, Wang D H, et al., 2022. Geochronological and geochemical constraints on magmatic evolution and mineralization of the northeast Ke'eryin pluton and the newly discovered Jiada pegmatite-type lithium deposit, Western China[J]. Ore Geology Reviews, 150: 105164.

Liu J H, Wang Q, Li W F, et al., 2023. Origins and evolution of two types of Late Triassic granitic magmas in the Caolong−Xiangkariwa area of central-eastern Songpan−Ganze terrane, northern Tibet: implications for pegmatite lithium mineralization[J]. Geological Society of America Bulletin, 136(5/6): 2543—2557.

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.

London D, 2015. Reading pegmatites: part 1—what beryl says[J]. Rocks & Minerals, 90(2): 138—153.

London D, 2018. Ore-forming processes within granitic pegmatites[J]. Ore Geology Reviews, 101: 349—383.

London D, Evensen J M, 2002. Beryllium in silicic magmas and the origin of beryl-bearing pegmatites[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 50(1): 445—486.

Maniar P D, Piccoli P M, 1989. Tectonic discrimination of granitoids[J]. GSA Bulletin, 101(5): 635—643.

Middlemost E A K, 1985. Magmas and magmatic rocks: an introduction to igneous petrology[M]. London: Addison-Wesley Longman: 1—266.

Middlemost E A K, 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. Earth-Science Reviews, 37(3/4): 215—224.

Olierook H K H, Kirkland C L, Szilas K, et al., 2020. Differentiating between inherited and autocrystic zircon in granitoids[J]. Journal of Petrology, 61(8): egaa081.

Parrish R R, 1990. U-Pb dating of monazite and its application to geological problems[J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 27(11): 1431—1450.

Peccerillo A, Taylor S R, 1976. Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 58(1): 63—81.

Pyle J M, Spear F S, Rudnick R L, et al., 2001. Monazite-xenotime-garnet equilibrium in metapelites and a new monazite-garnet thermometer[J]. Journal of Petrology, 42(11): 2083—2107.

Schärer U, 1984. The effect of initial ^{230}Th disequilibrium on young U-Pb ages: the Makalu case, Himalaya[J]. Earth and Planetary Science Letters, 67(2): 191—204.

Selway J B, Breaks F W, Tindle A G, 2005. A review of rare-element (Li-Cs-Ta) pegmatite exploration techniques for the Superior province, Canada, and large worldwide tantalum deposits[J]. Exploration and Mining Geology, 14(1/2/3/4): 1—30.

Sun S S, McDonough W F, 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313—345.

Tomascak P B, Krogstad E J, Walker R J, 1996. U-Pb monazite geochronology of granitic rocks from Maine: implications for Late Paleozoic tectonics in the northern Appalachians[J]. The Journal of Geology, 104(2): 185—195.

Voskoboynik D M, Andreucci D, 2022. Greening extractivism: environmental discourses and resource governance in the "Lithium Triangle" [J]. Environment and Planning E: Nature and Space, 5(2): 787—809.

Wang C, Shao Y J, Cawood P A, et al., 2023. Regional zoning of a Li-Cs-Ta pegmatite field: insights from monazite-cheralite chemistry, U-Th-Pb and Sm-Nd isotopes[J]. Journal of Petrology, 64(7): egad044.

Wang H, Gao H, Zhang X Y, et al., 2020. Geology and geochronology of the super-large Bailongshan Li-Rb-(Be) rare-metal pegmatite deposit, West Kunlun orogenic belt, NW China[J]. Lithos, 360/361: 105449.

Warren C J, Greenwood L V, Argles T W, et al., 2018. Garnet-monazite rare earth element relationships in sub-solidus

metapelites: a case study from Bhutan[J]. Geological Society, London, Special Publications, 478: 145—166.

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.

Wu L G, Li X H, Ling X X, et al., 2019. Further characterization of the RW-1 monazite: a new working reference material for oxygen and neodymium isotopic microanalysis[J]. Minerals, 9(10): 583.

Xiong X, Li J K, Wang D H, et al., 2019. Fluid characteristics and evolution of the Zhawulong granitic pegmatite lithium deposit in the Ganzi−Songpan Region, Southwestern China[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 93(4): 943—954.

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.

Yan Q H, Wang H, Chi G X, et al., 2022. Recognition of a 600-km-long late Triassic rare metal (Li-Rb-Be-Nb-Ta) pegmatite belt in the western Kunlun orogenic belt, Western China[J]. Economic Geology, 117(1): 213—236.

Yue X Y, Zhang Q, Zhang J J, et al., 2024. Cassiterite U-Pb dating of the Yelonggou pegmatite-type lithium deposit in western Sichuan and its metallogenic age constraints[J]. China Geology, 7(1): 153—156.

Zhao H, Chen B, Zheng B Q, et al., 2024. Petrogenesis of Mesozoic pegmatites in the Dahongliutan Li-mineralized belt (Western Kunlun, NW China)[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 264: 106076.

Zhao W W, Zhou M F, Zhao Z, et al., 2023. Evolution of pegmatite recorded by zoned garnet from the No. 9 dike in the Jiajika Li polymetallic deposit, eastern Tibetan plateau[J]. Ore Geology Reviews, 158: 105484.

Zhou M Z, Zhang R Q, Hanchar J M, et al., 2023. Unravelling the genetic relationship between pegmatites and granites in the Jiajika Li-Be polymetallic district, Songpan−Ganze orogenic belt, Southwestern China: insights from monazite U-Pb geochronology and trace element geochemistry[J]. Ore Geology Reviews, 163: 105774.

Zhu J Y, Zhu W B, Xu Z Q, et al., 2023. The geochronology of pegmatites in the Jiajika lithium deposit, western Sichuan, China: implications for multi-stage magmatic-hydrothermal events in the Songpan−Ganze rare metal metallogenic belt[J]. Ore Geology Reviews, 159: 105582.

Zhu X K, O'Nions R K, 1999a. Monazite chemical composition: some implications for monazite geochronology[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 137(4): 351—363.

Zhu X K, O'Nions R K, 1999b. Zonation of monazite in metamorphic rocks and its implications for high temperature thermochronology: a case study from the Lewisian terrain[J]. Earth and Planetary Science Letters, 171(2): 209—220.

Zi J W, Rasmussen B, Muhling J R, et al., 2015. In situ U-Pb geochronology of xenotime and monazite from the Abra polymetallic deposit in the Capricorn Orogen, Australia: dating hydrothermal mineralization and fluid flow in a long-lived crustal structure[J]. Precambrian Research, 260: 91—112.

Zi J W, Rasmussen B, Muhling J R, et al., 2019. U-Pb monazite ages of the Kabanga mafic-ultramafic intrusions and contact aureoles, central Africa: geochronological and tectonic implications[J]. GSA Bulletin, 131(11/12): 1857—1870.

Zong K Q, Chen J Y, Hu Z C, et al., 2015. In-situ U-Pb dating of uraninite by fs-LA-ICP-MS[J]. Science China Earth Sciences, 58(10): 1731—1740.