第 59 卷 第 5 期
2026 年（总 249 期）

西 北 地 质
NORTHWESTERN GEOLOGY

Vol. 59 No. 5
2026(Sum249)



引文格式：李俊杰，王艳军，王水龙，等. 西昆仑造山带奥依塔格花岗岩体中褐帘石矿物学特征及其地质意义[J]. 西北地质，2026，59(5)：174−188. DOI：10.12401/j.nwg.2026061

Citation：LI Junjie，WANG Yanjun，WANG Shuilong，et al. Mineralogical Characteristics and Geological Significance of Allanite from the Oytag Granitic Pluton in the West Kunlun Orogenic Belt[J]. Northwestern Geology，2026，59(5)：174−188. DOI：10.12401/j.nwg.2026061

西昆仑造山带奥依塔格花岗岩体中褐帘石矿物学特征及其地质意义

李俊杰[1,2]，王艳军[1,*]，王水龙[1]，李雪[1,2]，冷成彪[1,2,3,*]

（1. 东华理工大学，铀资源探采与核遥感全国重点实验室，江西 南昌 330013；2. 东华理工大学地球与行星科学学院，江西 南昌 330013；3. 东华理工大学，江西省非金属矿产智能勘查与综合利用技术创新中心，江西 南昌 330013）

摘 要：西昆仑造山带奥依塔格花岗岩体发育不同类型的褐帘石，为揭示岩浆–热液过程中稀土元素（REE）的地球化学行为提供了理想载体。通过背散射电子（BSE）图像观察与电子探针（EPMA）原位成分分析，笔者对奥依塔格岩体中褐帘石进行了系统的岩相学与矿物化学研究。根据BSE图像灰度、空间包裹关系及矿物共生组合，将褐帘石划分为3期。第一期褐帘石具有原生岩浆成因，在BSE图像下呈均匀的亮灰色，呈自形柱状单晶产出，常包含于斜长石或石英中，矿物组合简单。第二期褐帘石呈不均匀的暗灰色，以不规则形态沿第一期晶体的裂隙和边缘分布，局部发育蠕虫状显微纹理，常见绿帘石、萤石、磷钇矿、钙铌钇石–(Y)等交代矿物共生。第三期褐帘石BSE图像灰度最低，呈极暗色，常以极薄且不规则的反应边形式产出，共生有石英、钠长石。三期褐帘石的主量元素呈现连续的演化趋势，第一期褐帘石富集LREE(如Ce)和Fe、Mg，而Ca、Al含量极低；第二期褐帘石LREE和Fe、Mg显著降低，Si发生剧烈震荡，而Ca、Al显著升高，暗示其受到了富Ca-Al自交代热液的作用；第三期褐帘石LREE、Fe、Mg达到剖面最低值，而Ca、Al达到峰值，且Si趋于稳定，代表晚期流体的交代产物。笔者提出奥依塔格岩体经历了从岩浆结晶到多期流体的演化过程：①在岩浆期，褐帘石结晶并强烈富集LREE；②至热液交代期，富Cl但贫F的深部岩浆热液诱发早期褐帘石耦合溶解–再沉淀反应，导致LREE随流体向外流失，而M-HREE则因在贫络合剂流体中极低溶解度而原地过饱和沉淀，形成钙铌钇石–(Y)与磷钇矿；③最后弧后盆地海水的侵入则导致了褐帘石的开放体系蚀变。两类热液改造过程均伴随LREE的持续丢失，不同于华南离子吸附型稀土成矿过程，指示西昆仑地区此类型成矿潜力较弱。

关键词：褐帘石；稀土元素；岩浆–热液过程；奥依塔格；西昆仑

中图分类号：P574　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1009-6248(2026)05-0174-15

Mineralogical Characteristics and Geological Significance of Allanite from the Oytag Granitic Pluton in the West Kunlun Orogenic Belt

收稿日期：2026-08-15；**修回日期**：2026-08-20；**责任编辑**：吕鹏瑞

基金项目：国家自然科学基金项目（42022021）、江西省国家级高层次人才创新创业项目联合资助。

作者简介：李俊杰（2000−），男，博士研究生，从事矿产普查与勘探研究。E−mail：ljj6419@163.com。

***通讯作者**：王艳军（1988−），男，副研究员，从事地球化学方面的科研工作。E−mail：yjwang8807@163.com。

冷成彪（1982−），男，教授，从事矿床地球化学方面的科研与教学工作。E−mail：lcb8207@163.com。

© Editorial Office of *Northwestern Geology*. OA under CC BY-NC-ND

LI Junjie[1,2], WANG Yanjun[1,*], WANG Shuilong[1], LI Xue[1,2], LENG Chengbiao[1,2,3,*]

（1. National Key Laboratory of Uranium Resources Exploration-Mining and Nuclear Remote Sensing, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China；2. School of Earth and Planetary Sciences, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China；3. East China University of Technology, Jiangxi Technology Innovation Center for Intelligent Exploration and Comprehensive Utilization of Non-metallic Minerals, Nanchang 330013, Jiangxi, China）

Abstract：Different types of allanite occur in the Oytag granitic pluton of the West Kunlun orogenic belt, providing an ideal target for investigating the geochemical behavior of rare earth elements (REEs) during magmatic-hydrothermal processes. In this study, systematic petrographic and mineralogical investigations of allanite from the Oytag pluton were conducted through backscattered electron (BSE) imaging and in-situ electron probe microanalysis (EPMA). Based on BSE greyscale variations, spatial textural relationships, and mineral paragenesis, allanite can be subdivided into three stages. Stage 1 allanite is of magmatic origin, which appears as homogeneous bright grey domains in BSE images and occurs as euhedral prismatic crystals commonly enclosed within plagioclase or quartz, exhibiting a simple mineral assemblage. Stage 2 allanite is characterized by heterogeneous dark grey domains, irregularly distributed along fractures and grain margins of Stage 1 crystals, locally developing vermicular micro-textures and coexisting with metasomatic minerals such as epidote, fluorite, xenotime, and hellandite-(Y). Stage 3 allanite exhibits the lowest BSE greyscale, appearing as extremely dark, thin, and irregular reaction rims, and is associated with quartz, and albite. The major elements of allanite display a continuous evolution from Stage 1 to Stage 3. Stage 1 allanite is highly enriched in LREE (e.g., Ce), Fe, and Mg, with extremely low Ca and Al contents. In Stage 2 allanite, LREEs and Fe-Mg decrease significantly, accompanied by intense fluctuations in Si, whereas Ca and Al increase markedly, suggesting the influence of Ca-Al-rich deuteric fluids. Stage 3 allanite is characterized by the lowest LREEs, Fe, and Mg contents and highest Ca and Al contents, accompanied by stabilization of Si, indicating complete metasomatism by late-stage fluids. We propose that the Oytag pluton records a complete evolution from magmatic crystallization to multi-stage fluid alteration. (1) During the magmatic stage, primary allanite crystallized and became strongly enriched in LREE. (2) During the hydrothermal stage, Cl-rich but F-poor deep-seated magmatic hydrothermal fluids induced coupled dissolution–reprecipitation reactions of primary allanite, resulting in the outward loss of LREEs, whereas M-HREEs, due to their extremely low solubility in ligand-poor fluids, were precipitated in situ under local supersaturation to form hellandite-(Y) and xenotime. (3) The subsequent infiltration of back-arc basin seawater during Stage 3 led to the final open-system alteration of allanite. The continuous loss of LREEs during both hydrothermal processes differs from the formation process of regolith-hosted REE deposits in South China and reduces the metallogenic potential of this type of deposit in the West Kunlun region.

Keywords：allanite；rare earth elements；magmatic-hydrothermal processes；Oytag；west Kunlun

褐帘石是大陆地壳中最重要的稀土载体矿物之一, 其化学组成和稀土配分反映形成环境的物理化学条件(Gieré et al., 2004)。在花岗岩体系中, 褐帘石是轻稀土元素(LREE)、Th、U 及 Sr 的重要储库。近年来, 褐帘石的精细矿物学研究已成为示踪岩浆–热液演化过程和稀土成矿作用的重要方式(李光来等, 2022)。研究表明, 褐帘石在热液蚀变过程中会经历复杂的结构改造和成分重组, 其稀土元素会发生活化、迁移和再富集(豆敬兆等, 2024)。尤其值得注意的是, 褐帘石的蚀变往往具有明显的多期次特征, 原生褐帘石被热液流体交代后可形成次生褐帘石、REE-F 碳酸盐矿物(如氟碳钙铈矿、氟碳铈矿)等多种产物。这些特征为反演热液活动的期次、流体性质及稀土元素地球化学行为提供了重要约束(Chen et al., 2014;Gros et al., 2020)。

随着离子吸附型与热液型稀土矿床研究的深入, 褐帘石在稀土成矿过程中的作用日益受到关注(李光来等, 2022; Dou et al., 2024)。已有研究表明, 原生岩

浆褐帘石经热液流体交代后，稀土元素发生活化迁移，可在有利空间重新富集形成工业矿体，褐帘石的蚀变程度与稀土矿化强度具有显著相关性(冯雨周等，2023)。然而，目前对褐帘石从岩浆结晶到热液改造的连续演化序列尚缺乏系统的微尺度刻画，尤其是不同期次褐帘石之间的岩浆结晶至热液交代过程中的成分转变机制、稀土元素分异规律仍有待深化。

西昆仑造山带位于塔里木板块西南缘，是一个经历了原特提斯和古特提斯多期俯冲–增生造山作用的复合造山带(徐进鸿等，2019；丁坤等，2020)。奥依塔格地区地处西昆仑北缘的奥依塔格–库地缝合带附近，形成于石炭纪弧后伸展环境，发育一系列长英质岩浆岩，是研究古特提斯洋早期演化的重要对象(Wang et al.，2022)。现有研究多关注岩体的年代学、岩石成因和构造背景。然而，该区花岗岩中褐帘石的精细矿物学特征、蚀变期次及其稀土元素迁移规律尚缺乏系统研究。笔者以奥依塔格岩体中的多期褐帘石为研究对象，通过 BSE 成像识别期次结构，利用 EPMA 主量元素原位分析方法，厘定多期褐帘石的矿物学特征与成分差异，揭示岩浆–热液演化过程中稀土元素的迁移富集规律，探讨其对稀土成矿的指示意义，为区域上花岗岩型稀土找矿提供矿物学支撑。

1 区域背景

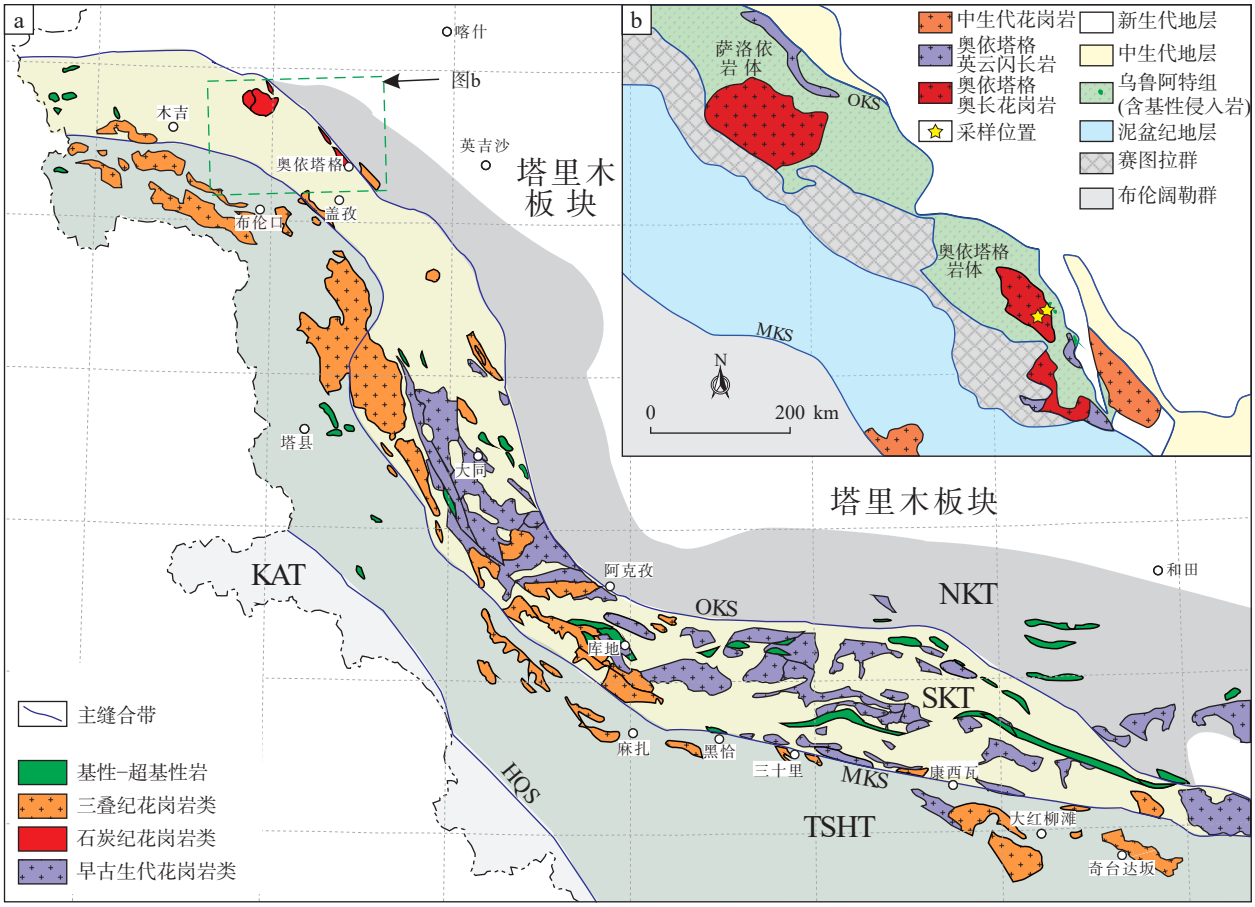
西昆仑造山带位于青藏高原西北缘，北邻塔里木陆块，南接羌塘地块(张传林等，2007)。该造山带自北向南可分为西昆北岩浆弧、西昆和西昆南俯冲增生杂岩带 3 个次级构造单元(肖文交等，2000)。西昆仑造山带北缘发育多条分段缝合带，主缝合带整体呈 NW–SE 向长条带状延伸，控制全区岩浆岩、地层空间分布格局(许志琴等，2007；图 1a)。以奥依塔格–库地缝合带、麻扎–康西瓦缝合带为界，分隔出北昆仑地体(北部)、南昆仑地体(中部)、塔什库尔干甜水海地体(南部)3 个核心构造地体单元。

研究区主体大地构造位置为北部北昆仑地体。奥依塔格–库地缝合带贯穿区内，该断裂带是塔里木陆块与西昆仑造山带的早古生代—晚古生代板块边界，完整记录原特提斯洋俯冲、闭合全过程(袁超等，2003)。奥依塔格构造带北侧紧邻喀什、英吉沙中新生代断陷盆地，向南延伸至塔县、大同一带，造山隆起区与塔里木盆地构成典型盆山耦合结构。研究区南部南昆仑地体内广泛出露赛图拉群变质岩系与康西瓦构造混杂岩带，是西昆北、西昆中构造单元的分界标识。研究区东南部归属于塔什库尔干甜水海地体，该构造单元沿主缝合带连续展布，与北部奥依塔格岩体同属原特提斯洋北支俯冲形成的弧岩浆系统(方爱民等，2003)。塔什库尔干至奥依塔格沿线产出沉积变质型铁矿，矿体普遍发育稀土矿化现象，褐帘石作为区域广泛发育的稀土副矿物，是制约稀土元素迁移、富集与沉淀的关键矿物载体(丁明朋等，2018)。

研究区地层较为完整，泥盆系、石炭系、中生界、新生界沉积–变质地层均有出露，其中石炭系火山碎屑岩分布范围最广，构成区域地层主体(李荣社等，2007)。受多期洋陆转换、陆内造山事件叠加改造，区内完整保留早古生代、石炭纪、三叠纪等多期花岗岩，同时产出多条基性–超基性岩带，完整记录西昆仑北缘多旋回岩浆演化历史(潘裕生，1990)。研究区内规模最大的复式花岗岩基为奥依塔格岩体，主体岩性为奥长花岗岩与英云闪长岩，岩体内部及围岩接触带大量发育基性侵入岩脉，记录活动陆缘环境下壳幔岩浆混合作用(张传林等，2006)。本次研究与 Wang et al.(2022)研究所用样品一致，均采集于奥依塔格岩体。Wang et al.(2022)报道称西昆仑造山带由北昆仑、南昆仑及甜水海地体构成，并被麻扎–康西瓦和奥依塔格–库地两条 NW–SE 向缝合带所分割。区内发育两期近平行的中酸性岩浆岩带，分别对应原特提斯和古特提斯的演化产物。石炭纪奥依塔格岩体是该带出露面积最大的岩体之一，侵入前寒武纪赛图拉群和石炭纪乌鲁阿特组。该岩体主要由低钾的奥长花岗岩和英云闪长岩组成，至少经历了 338 Ma、330～324 Ma、314 Ma 等 3 期岩浆活动，其中奥长花岗岩(324 Ma)的化学演化程度高于早期英云闪长岩(Wang et al.，2022)。二者在全岩地球化学及 Sr-Nd-Hf 同位素上具有相似性，指示其源自相似的新生地壳源区(Wang et al.，2022)。

2 分析方法

本研究的矿物成分检测工作在武汉上谱分析科技有限责任公司电子探针实验室完成，所使用的仪器型号为日本电子(JEOL)JXA-8230 型电子探针仪。测试全过程严格遵循美国 SPI 53 国际矿物标准及 GB/T 17359—1998 国家标准，确保检测结果的规范性与准



MKS. 麻扎–康西瓦缝合带；NKT. 北昆仑地体；OKS. 奥依塔克–库地缝合带；SKT. 南昆仑地体；TSHT. 甜水海地体

图1　研究区地质概况图(据孔会磊等，2023; Yu et al., 2026 修改)

Fig. 1　Geological sketch map of the study area

确性。具体实验参数设定如下: 加速电压设定为 15 kV, 束流强度控制在 8～20 nA, 束斑尺寸为 3 μm; X 射线信号采集采用“峰值计数 10 s、背景计数 5 s”的方案, 检测灵敏度可达 0.008%～0.02%(1σ 置信度), 所有检测数据均校正采用日本电子(JEOL)的 ZAF 矩阵校正方法, 保障数据精度。针对不同矿物的检测, 采用差异化参数配置: 褐帘石检测设置为 15 k V/10 nA/3 μm; 磷灰石检测设置为 15 kV/20 nA/5 μm 参数; 矿物晶体化学计算以特定氧原子数为基础, 其中褐帘石的化学式依据 Yavuz et al.(2015)的 WinEpclas 软件, 以 12.5 个氧原子和 8 个阳离子为基准计算。*$Fe^{3+}/(Fe^{3+}+Fe^{2+})=(REE^{3+}+Th^{4+})/(Al^{3+}-3)+1$, 采用 Poitrasson(2002)方法。

3　岩相学和矿物化学

3.1　岩相学分析

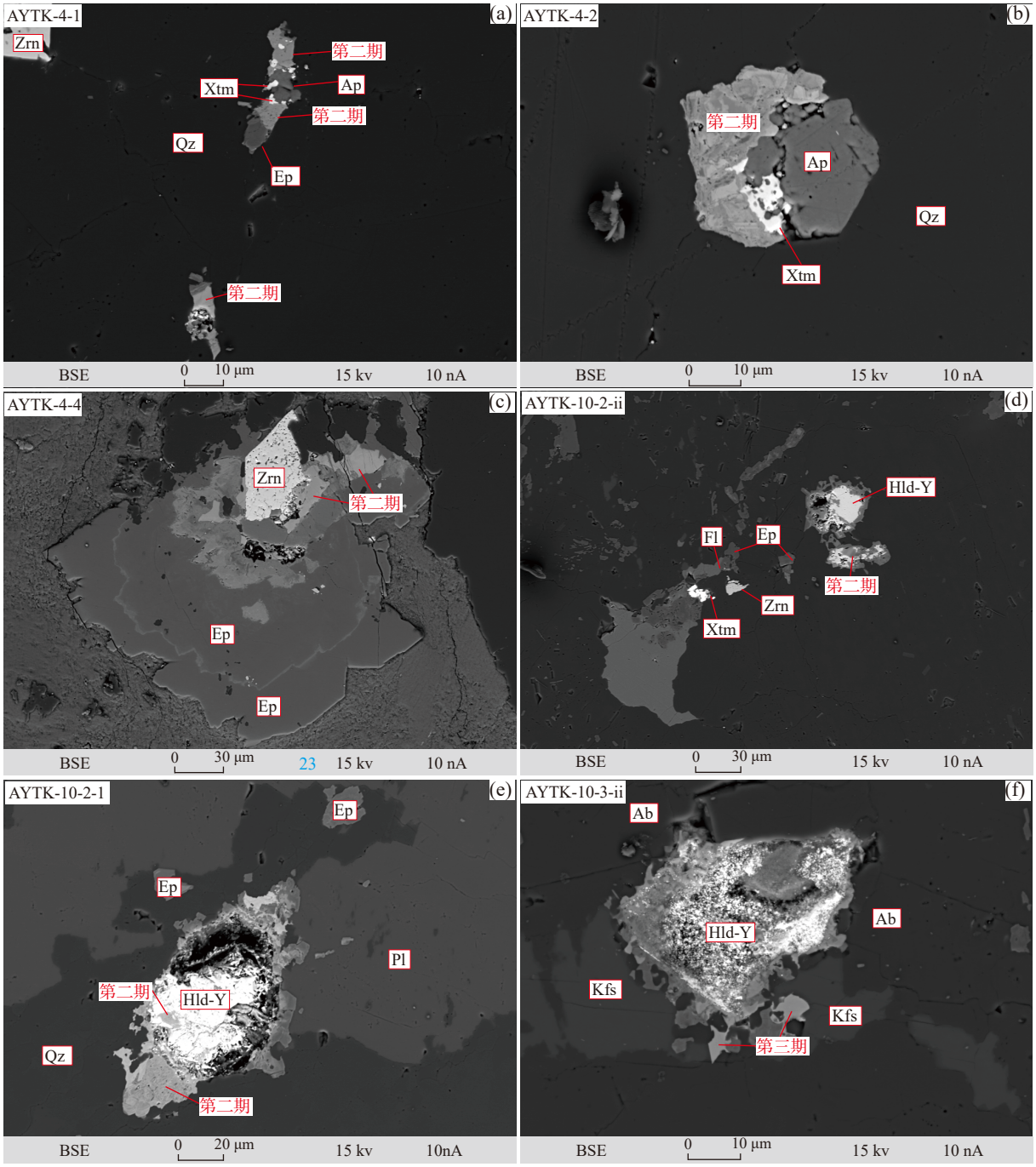
本次研究的 9 块样品均采自奥依塔格岩体内部, 其中英云闪长岩 3 块、奥长花岗岩 6 块。英云闪长岩为深灰色、暗灰白色。英云闪长岩主要矿物组合为斜长石(60%～65%)+石英(20%～25%)+角闪石(10%～15%), 副矿物为褐帘石、锆石、磷灰石。矿物分析表明, 斜长石为钠长石, 常发育聚片双晶, 角闪石为铁–镁–角闪石, 多呈半自形柱状, 部分可见被绿泥石、绿帘石交代的迹象。

奥长花岗岩为灰白色, 矿物粒度较前者更细, 其主要矿物组合为斜长石(50%～60%)+石英(30%～40%)+黑云母(5%～10%), 副矿物为褐帘石、锆石、磷灰石。斜长石以钠长石为主, 暗色矿物仅少量镁质黑云母, 未见角闪石(张传林等, 2006)。

在显微镜下, 两种岩性的岩石均发生了不同程度的蚀变。斜长石常见绢云母化和泥化现象, 部分边缘被细粒角闪石或绿帘石交代; 黑云母多沿解理面和边缘发生绿泥石化, 局部完全被绿帘石集合体所替代, 暗示岩石在固结后经历了明显的流体渗透与热液交

代作用。

褐帘石作为本研究的目标矿物，在两类岩石中呈浸染状分布。其粒径变化较大，从数十微米至数百微米不等，且产状表现出显著的多样性：部分褐帘石晶体呈自形柱状单晶，形态完整，晶面清晰；部分呈碎裂状，沿晶内裂隙发育网状微裂隙；另有相当数量褐帘石颗粒表现出特征的核–边结构，边缘及裂隙部位呈现出强烈的交代蚀变现象（图 2e～图 2h）。背散射电子（BSE）图像进一步揭示，褐帘石颗粒内部成分极不均匀，发育清晰的多期生长环带与不同类型的暗色蚀变斑块，记录了复杂的交代演化历史。这些多期次、多结构的微区特征，为本研究开展褐帘石期次划分及



矿物缩写据 Whitney et al.（2010）；Ab. 钠长石；Aln. 褐帘石；Ap. 磷灰石；Ep. 绿帘石；Fl. 萤石；Hld-Y. 钙铒钇石–（Y）；Kfs. 钾长石；Pl. 斜长石；Qz. 石英；Zrn. 锆石；Xtm. 磷钇矿

图2 奥依塔格样品中的褐帘石颗粒及其共生矿物 BSE 图像

Fig. 2 BSE images of allanite grains and their coexisting minerals in the Oytag samples

探讨其成因演化提供了理想对象。

3.2　褐帘石期次

在奥长花岗岩和英云闪长岩中, 绝大多数褐帘石颗粒具有相似的化学分带模式。根据褐帘石的 BSE 图像的形态和灰度, 识别出 3 个不同的期次(图 3)。

第一期褐帘石颗粒在 BSE 图像中通常表现出明亮、均匀的特征, 共生的矿物有石英, 斜长石。第一期褐帘石常具有典型的分带结构, 边部为不规则的均质斑块, 颜色较核部区域更暗。

第二期褐帘石在 BSE 图像中呈现为灰黑色且不均匀的区域, 通常沿着褐帘石的晶体平面取代第一期, 共生矿物有石英、钠长石、绿帘石、萤石、磷钇矿、磷灰石、锆石和钙铈钇石–(Y)(图 2)。在这些交代产物中, 磷钇矿与钙铈钇石–(Y)表现出与残余褐帘石具有极其紧密的共生关系, 说明钙铈钇石–(Y)与磷钇矿并非远离母体迁移的产物, 而是原生褐帘石在流体交代过程中重结晶的结果。局部位置可见, 第二期的褐帘石被磷钇矿、钙铈钇石取代(图 2a、图 2b、图 2e)。值得注意的是, 这种褐帘石交代的产物主要是富 HREE 的矿物, 表明该热液对重稀土元素具有极强的原位捕获与沉淀能力。在局部地区可以观察到第二期褐帘石仍然保持着第一期褐帘石的晶体平面。第二期通常与第一期尖锐接触。在局部区域, 沿第一期和第二期之间的微小裂缝形成蠕虫状纹理。第二期偶尔显示弱振荡带, 但普遍被裂缝横切(图 3d)。在局部区域, 褐帘石也被薄薄的绿帘石边缘所覆盖, 呈外壳状包裹着经第二期交代后的褐帘石残骸(图 2c)。

第三期褐帘石在 BSE 图像中最暗, 且常发育在第一期褐帘石的边缘, 共生矿物有石英、钠长石等(图 2f)。该期褐帘石常表现为一层极薄且极不规则的反应边, 有时呈锯齿状贯入第一期褐帘石核心, 表明其并非岩浆生长环带, 而是后期强烈的交代蚀变产物。第三期蚀变的褐帘石颗粒广泛发育, 部分甚至发生彻底蚀变。

3.3　矿物化学成分分析

本次研究对样品中典型褐帘石颗粒分别开展了成分剖面分析, 并结合矿物成分的分类图解进行深入分析。对于每一颗褐帘石, 进行了数量不等的测试, 测试点数为 30～50 个, 且测试点之间的距离也不尽相同, 间距为 20～40 μm(图 3a、图 3d)。

背散射图像(BSE)和成分剖面投图均显示褐帘石内部发育了明显的环带结构与暗色斑块, 成分极不均匀。不同期次褐帘石在主量元素(Ce、Ca、Al、Fe、Si)上呈现出显著的变化。

第一期: Ce^{3+}、Fe_{tol}、LREE 的含量分别为 0.40～0.45、1.41～1.52、0.68～0.91, 达到整条剖面最高, 而 Ca^{2+}、$A1^{3+}$的含量分别为 0.91～1.00、1.21～1.35, 达到整条剖面最低。Si^{4+}、M-HREE 的含量分别为 2.99～3.12、0.09～0.24, 阳离子数未出现明显波动, 属于富稀土褐帘石生长带(图 3c、图 3e)。这一特征表明, 第一

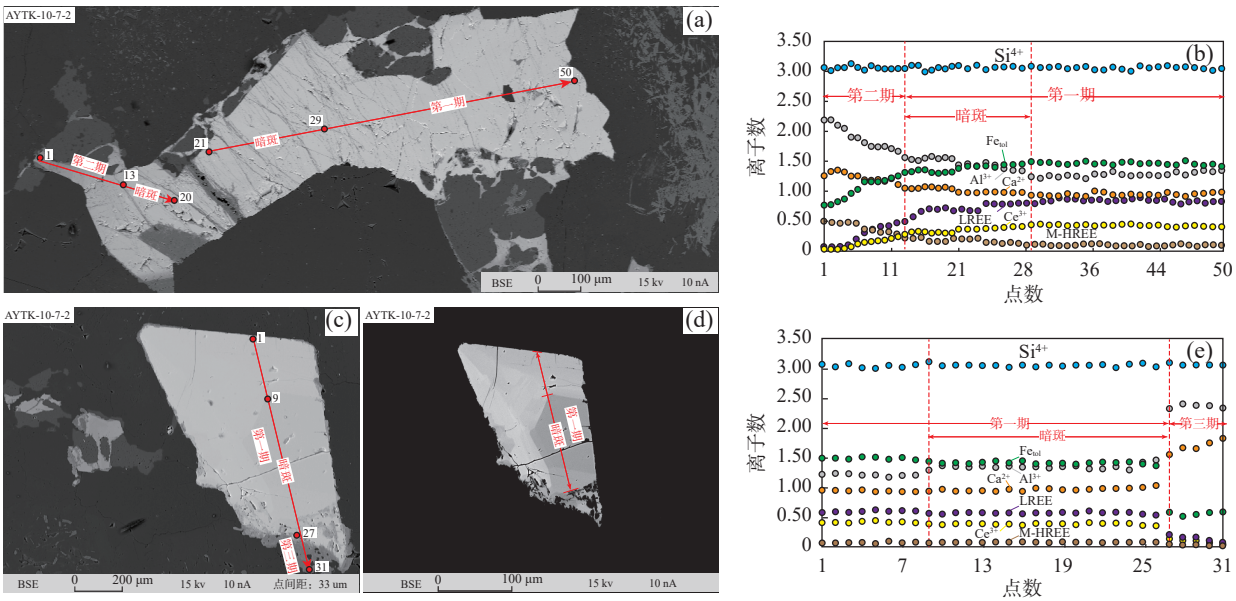


图3　褐帘石颗粒成分剖面及特征曲线

Fig. 3　Compositional profiles and characteristic curves of allanite grains

期属于典型的富 LREE 褐帘石原生岩浆结晶核，代表了岩浆早期结晶阶段的产物（图 3c、图 3e）。

暗斑：Ce^{3+}、Fe_{tol}、LREE 的含量分别为 0.36～0.42、1.37～1.46、0.77～0.87，由高值开始降低。Ca^{2+}、$A1^{3+}$的含量分别为 0.94～1.04，1.30～1.47，由低值开始上升。Si^{4+}、M-HREE 的含量为 3.02～3.12、0.10～0.13，暗斑构成了第一期与第二期之间的成分梯度缓冲区间，反映了岩浆房化学组分在封闭系统下的连续演化过渡（图 3c、图 3e）。

第二期：Ce^{3+}、Fe_{tol}、LREE 的含量分别为 0.03～0.36、0.77～1.26、0.09～1.68，离子数持续降低，而 Ca^{2+}、$A1^{3+}$的含量分别为 1.11～1.46、1.67～2.19，离子数持续升高。Si^{4+}、M-HREE 的含量为 2.91～3.13、0.13～3.97，开始出现较大幅度的震荡，暗示晶格的局部稳定性被破坏。这些数据明确记录了褐帘石生长过程中遭遇的一次剧烈的流体环境转折，标志着体系由封闭的岩浆结晶转变为开放的热液交代作用（图 3e）。

第三期：Ce^{3+}、Fe_{tol}、LREE 的含量分别为 0.01～0.15、0.52～0.65、0.03～0.30，达到整条剖面最低，而 Ca^{2+}、$A1^{3+}$的含量分别为 1.56～1.83、2.25～2.41，达到整条剖面最高。Si^{4+}、M-HREE 的含量为 3.07～3.18、0.03～0.30。极高浓度的 Ca-Al 聚集且 Ce 的彻底缺失，指示褐帘石在此阶段已彻底丢失了原有的化学特征，完成了晚期富 Ca-Al 流体的全部改造过程（图 3c）。

3.4 矿物成分特征分析

在 REE + Th vs. Al total 图中（图 4a），3 个期次的褐帘石表现出不同的地球化学组成，从第一期→第二期→第三期呈现出明显的演化趋势，其 REE 和 Th 离子数随着 Al 的增加而减少，反映褐帘石晶格中发生了强烈的类质同象替代作用，从高铁褐帘石向绿帘石

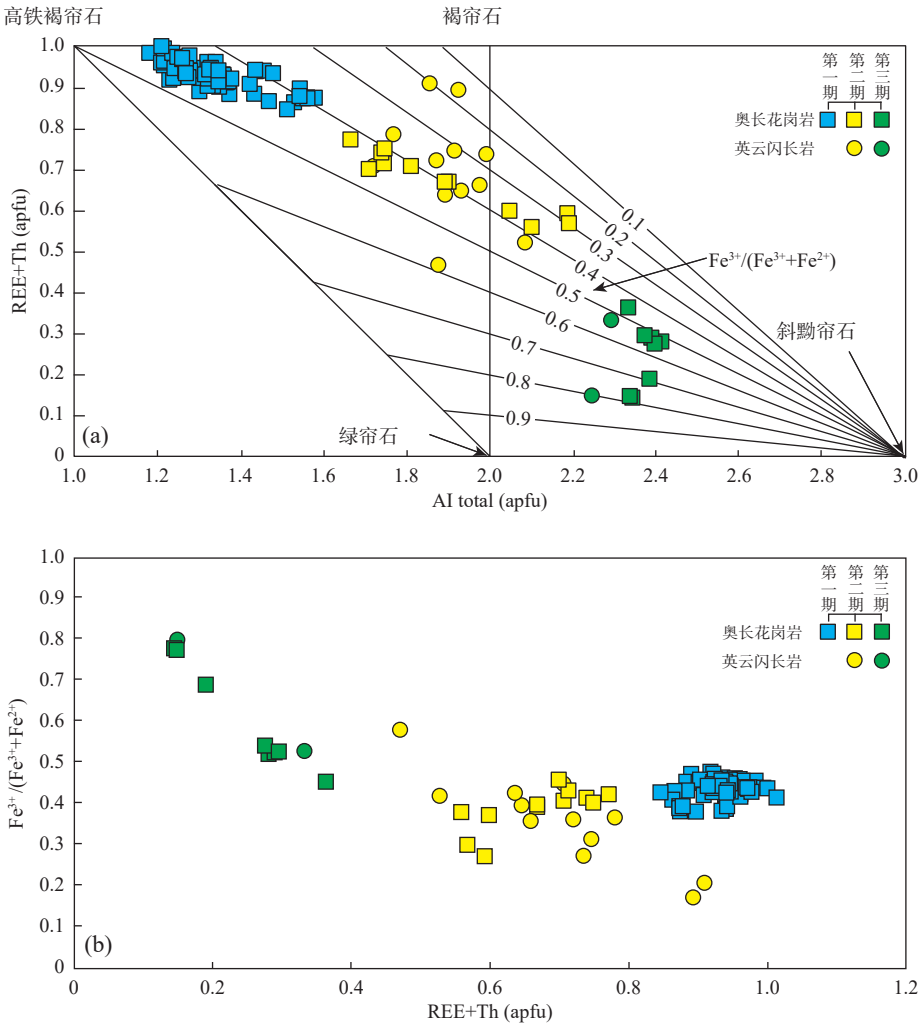


图4 REE+Th vs. Al total 和 $Fe^{3+}/(Fe^{3+}+Fe^{2+})$ vs. REE + Th 图（Petrík et al., 1995）

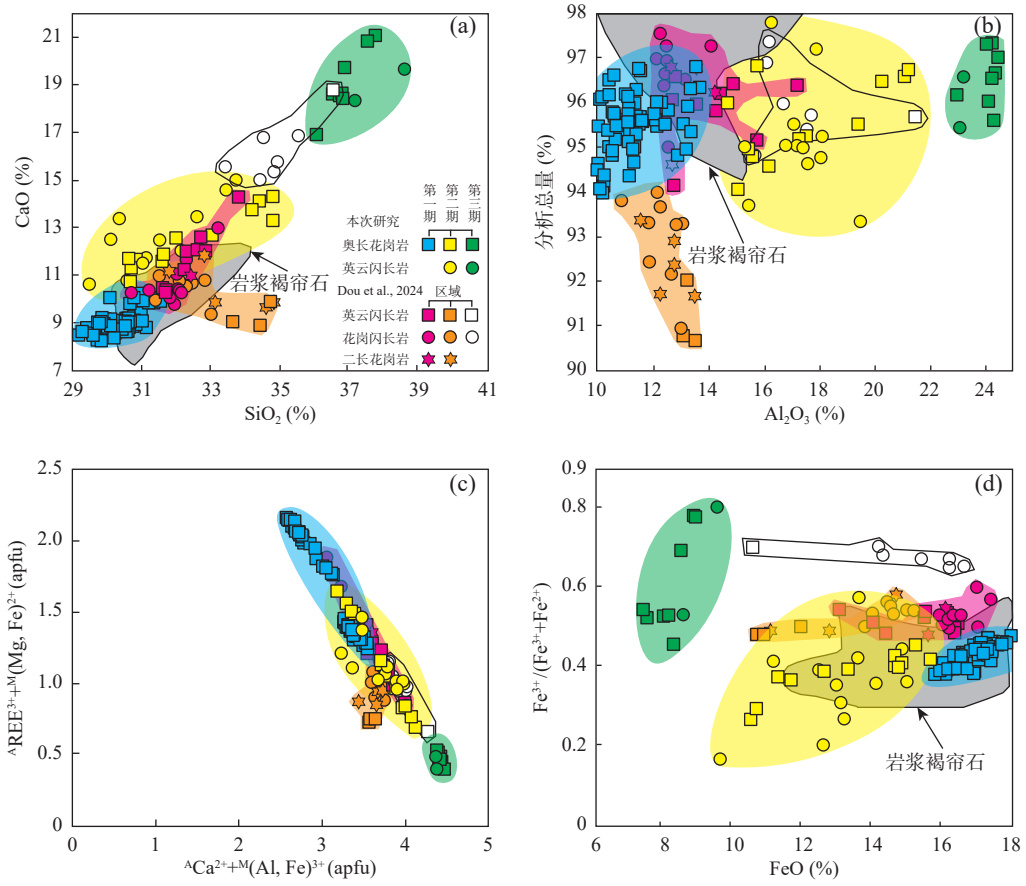
Fig. 4 REE+Th vs. Al total and $Fe^{3+}/(Fe^{3+}+Fe^{2+})$ vs. REE+Th diagrams

组成转移。第一期褐帘石的(REE+Th)(apfu)含量远高于第二期和第三期褐帘石。第一期褐帘石在组成上接近高铁褐帘石,第三期褐帘石更接近绿帘石端元,而第二期褐帘石介于中间(图 4a; Petrík et al., 1995)。

在 $Fe^{3+}/(Fe^{3+}+Fe^{2+})$ vs. REE+Th 图中(图 4b),三个期次的褐帘石也表现出了显著的地球化学差异。第一期和第二期褐帘石的 $Fe^{3+}/(Fe^{3+}+Fe^{2+})$ 比值普遍较低,绝大多数数据点低于 0.5。相比之下,第三期褐帘石的 $Fe^{3+}/(Fe^{3+}+Fe^{2+})$ 值普遍升高,高于第一期褐帘石(多数小于 0.5; 图 4b)。

第一期褐帘石中的组成相对均一(图 3c、图 3e、图 4),其平均组成为 $(Ca_{0.97}Ce_{0.40}La_{0.15}Nd_{0.19}Th_{0.01}Pr_{0.05})_{1.77}(Al_{1.34}Fe^{3+}_{0.84}Fe^{2+}_{0.59}Mg_{0.09}Ti_{0.11}Mn_{0.06})_{3.03}(Si_{1.02}O_4)_3(OH)$。其中,$SiO_2$ 含量为 29.17%～31.54%,Al_2O_3 含量为 9.68%～13.71%, FeO 含量为 15.75%～17.05 %, MgO 含量为 0.20%～0.79%, CaO 含量为 8.25%～10.24%, LREE 含量为 19.17%～35.48%, M-HREE 含量为 2.02%～7.17%, $Fe^{3+}/(Fe^{3+}+Fe^{2+})$值为 0.38～0.48(表 1)。相对于第一期的亮区,第一期的暗斑具有较高的 Al_2O_3(11.02%～12.58%)、CaO(8.77%～9.82%)、$Fe^{3+}/(Fe^{3+}+Fe^{2+})$(0.43～0.48)、FeO (16.56%～17.40%)和较低的 MgO (0.25%～0.69%)、LREE(21.29%～23.47%)、M-HREE(2.54%～6.11%)。暗斑和第一期亮区的 $^{A}Ca^{2+}+(Al, Fe)^{3+}$与 $^{A}REE^{3+}+(Mg, Fe)^{2+}$呈良好的负相关关系(图 5c)。

第二期褐帘石的成分变化很大(表 1, 图 5),其 SiO_2(30.50%～34.49%)、Al_2O_3(14.70%～21.22%)、CaO (10.66%～15.01%)、M-HREE (3.67%～14.36%)含量较高,FeO(9.54%～15.60%)、MgO(0.01%～0.24%)、LREE (2.76%～22.75%)、$Fe^{3+}/(Fe^{3+}+Fe^{2+})$ (0.17～0.58)含量较低,其 EPMA 分析总量与第一期、第三期相差不大



a. SiO_2 与 CaO 的对比图; b. Al_2O_3 与分析总量(EPMA)的关系图; c. $^{A}Ca^{2+}+^{M}(Al, Fe)^{3+}$ (apfu)与$^{A}REE^{3+}+^{M}(Mg, Fe)^{2+}$ (apfu)的对比图; d. FeO 与 $Fe^{3+}/(Fe^{3+}+Fe^{2+})$值图; 图 c 中的上标 A 和 M 表示褐帘石中阳离子的占位; 3 个期次的数据分布以手绘阴影区表示,以突出成分差异; 图 a、图 b、图 d 中花岗岩岩浆褐帘石的数据来源于 Dou(2024); 根据 Poitrasson(2002)的估计方法,$Fe^{3+}/(Fe^{3+}+Fe^{2+})=(REE^{3+}+Th^{4+})/(Al^{3+}-3)+1$

图5　不同期次褐帘石化学成分变化图

Fig. 5　Chemical compositional variations of different types of allanite

表 1　奥依塔格岩体褐帘石电子探针数据表

Tab. 1　Electron Probe microanalysis data of allanite in the Oytag pluton

样品号	AYTK-10-7-2				AYTK-10-2-1		AYTK-10-2-ii	AYTK-10-3-1		AYTK-10-3-ii		AYTK-4-1			AYTK-4-2	AYTK-4-4		AYTK-10-1
期次	第一期	第三期	第二期	第一期	第二期		第二期	第二期		第三期		第二期			第二期	第二期		第二期
点位	剖面一		剖面二		散点		散点	散点		散点		散点			散点	散点		散点
点号	1～26	27～34	1～12	13～50	1	2	1	1	2	1	2	1	2	3	1	1	2	1
SnO_2	0～0.05	0～0.07	0～0.01	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
CaO	8.49～9.82	16.91～21.07	10.77～14.32	8.25～10.24	10.82	13.49	13.41	11.77	12.51	18.34	19.66	12.07	11.13	10.66	14.60	11.53	12.54	15.01
TiO_2	0.85～2.28	0～0.16	0～0.45	0.28～2.08	–	0.22	0.02	0.62	0.41	–	–	0.14	0.30	1.22	0.08	0.20	0.22	0.33
La_2O_3	3.00～5.26	0.75～1.54	0.12～1.72	1.97～6.16	2.57	1.53	1.33	0.73	0.54	–	–	0.47	0.31	0.69	0.68	1.31	0.74	0.79
Ce_2O_3	10.02～11.95	1.68～4.63	0.89～6.79	7.84～21.91	10.15	5.61	5.29	4.32	3.75	0.23	0.17	2.15	1.41	3.25	2.39	5.14	2.73	3.29
Na_2O	0～0.09	0～0.05	0～0.04	0～0.04	–	–	0.02	–	–	–	0.07	0.05	–	–	–	–	–	–
Al_2O_3	9.68～12.58	22.99～24.47	14.70～21.22	9.94～13.71	16.27	17.89	17.08	15.32	17.19	23.23	23.10	18.10	17.41	15.46	19.48	16.79	18.05	17.58
MgO	0.25～0.79	0～0.04	0.03～0.21	0.20～0.74	0.10	0.10	0.01	0.16	0.16	0.02	0.04	0.14	0.22	0.18	0.08	0.24	0.18	0.15
Lu_2O_3	0～0.15	0～0.17	0～0.34	0～0.21	0.13	–	–	–	–	–	0.23	–	–	–	0.31	–	0.08	0.02
Ho_2O_3	0～0.34	0～0.17	0～0.39	0～0.37	0.08	0.61	0.15	0.23	–	–	0.05	0.54	0.46	0.04	0.01	–	0.17	–
Yb_2O_3	0～0.31	0～0.24	0～0.65	0～0.28	0.26	0.07	0.59	0.21	0.29	0.23	–	0.42	0.64	0.16	0.31	0.13	0.46	0.23
Tm_2O_3	0～0.15	0～0.06	0～0.27	0～0.12	–	0.12	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Er_2O_3	0～0.13	0～0.25	0.13～0.88	0～0.23	0.14	0.09	0.08	0.18	0.16	0.39	–	0.34	0.72	0.28	0.51	0.34	0.48	0.07
Gd_2O_3	0.23～0.73	0～0.30	0.89～1.60	0.16～1.26	0.80	0.89	0.98	1.62	1.45	0.88	0.78	1.89	1.90	2.42	0.73	0.99	1.71	0.98
Dy_2O_3	0.14～0.59	0～0.23	0.50～1.53	0.18～0.73	0.43	0.65	1.20	1.01	0.93	0.85	0.42	1.55	1.48	1.05	1.04	0.65	1.23	0.72
FeO	16.56～17.96	7.33～8.85	10.43～15.60	15.75～17.69	12.51	12.39	9.54	14.79	13.51	8.49	9.47	12.91	13.04	14.95	11.09	14.05	13.14	13.56
Tb_2O_3	0～0.15	0～0.11	0～0.21	0～0.21	0.01	0.14	0.18	0.12	0.01	0.10	0.11	0.02	0.24	0.14	0.05	0.14	0.04	0.21
MnO	0.58～0.96	0.16～0.47	0.77～1.53	0.60～1.01	0.34	0.51	0.55	0.76	0.93	0.32	0.20	0.79	0.65	0.53	0.56	0.56	0.42	0.60
Eu_2O_3	–	0～0.08	0～0.03	b.d.l.	–	–	–	–	–	–	–	–	0.13	–	–	–	–	–
Sm_2O_3	0.65～1.03	0.16～0.41	0.33～1.35	0.55～1.38	1.07	1.20	1.01	1.39	1.08	0.43	0.29	0.90	0.77	1.27	0.65	1.22	1.06	0.93
Pr_2O_3	1.04～1.58	0.12～0.64	0.15～1.26	0.98～1.68	1.80	0.85	1.06	0.58	1.05	0.24	–	0.29	0.27	0.71	0.08	0.98	0.62	0.76
Nd_2O_3	4.44～6.11	1.02～2.53	1.07～5.78	4.26～6.97	7.16	3.73	4.53	5.23	4.75	0.56	0.41	3.05	2.43	4.32	2.23	4.71	2.84	3.17

续表 1

样品号	AYTK-10-7-2				AYTK-10-2-1		AYTK-10-2-ii	AYTK-10-3-1		AYTK-10-3-ii		AYTK-4-1			AYTK-4-2	AYTK-4-4		AYTK-10-1
期次	第一期	第三期	第二期	第一期	第二期		第二期	第二期		第三期		第二期			第二期	第二期		第二期
点位	剖面一		剖面二		散点		散点	散点		散点		散点			散点	散点		散点
ThO_2	0.14～0.42	0～0.14	0～0.08	0～0.91	0.66	1.08	0.88	0.40	0.54	0.10	0.05	0.70	0.20	0.29	0.08	0.29	0.17	0.21
PbO	0～0.13	0～0.01	0～0.14	0～0.17	0.16	–	–	0.06	–	0.05	–	0.05	–	0.05	–	–	0.02	0.10
Y_2O_3	0.79～1.29	0.36～0.76	2.13～8.19	0.68～2.32	0.74	2.46	6.26	3.39	3.22	4.95	1.80	5.51	8.05	5.52	4.93	3.73	6.74	2.21
SiO_2	29.17～31.13	36.05～37.75	31.63～34.79	29.27～31.54	31.59	33.60	31.36	32.14	32.53	37.16	38.59	33.14	33.24	30.50	33.44	32.04	31.12	33.73
分析总量	93.98～96.76	95.60～97.34	94.07～96.85	94.07～96.80	97.80	97.20	95.52	95.01	95.04	96.58	95.44	95.24	94.99	93.69	93.35	95.04	94.77	94.65
LREE	21.29～23.79	3.94～9.58	2.76～16.90	19.17～35.48	22.75	12.90	13.22	12.25	11.18	1.46	0.87	6.85	5.19	10.23	6.03	13.35	7.99	8.94
M-HREE	2.02～3.36	0.85～2.03	5.72～12.75	2.15～6.11	3.67	6.22	10.45	8.15	7.15	7.83	3.68	11.19	14.39	10.87	8.56	7.20	11.98	5.37
Si	3.01～3.12	3.07～3.11	3.01～3.13	2.99～3.10	3.06	3.08	3.00	3.06	3.04	3.11	3.18	3.07	3.10	2.96	3.05	3.03	2.91	3.07
Ti	0.06～0.18	0～0.01	0～0.03	0.02～0.16	–	0.02	–	0.04	0.03	–	–	0.01	0.02	0.09	0.01	0.01	0.02	0.02
Al	1.18～1.47	2.33～2.41	1.67～2.19	1.21～1.58	1.86	1.93	1.92	1.72	1.89	2.29	2.25	1.98	1.92	1.77	2.09	1.87	1.99	1.88
Fe^{3+}	0.41～1.14	0.23～0.52	0.19～0.84	0.37～1.15	0.90	0.74	0.17	0.83	0.33	0.44	0.41	0.80	0.93	0.34	0.27	0.31	0.41	0.56
Fe^{2+}	0.31～1.09	0.07～0.38	0.09～0.84	0.32～1.08	0.11	0.21	0.59	0.35	0.73	0.15	0.25	0.20	0.09	0.88	0.58	0.80	0.62	0.47
Mg	0.04～0.12	0～0.01	0～0.03	0.03～0.11	0.01	0.01	–	0.02	0.02	–	0.01	0.02	0.03	0.03	0.01	0.03	0.03	0.02
Mn	0.05～0.08	0.01～0.03	0.06～0.11	0.05～0.08	0.03	0.04	0.04	0.06	0.07	0.02	0.01	0.06	0.05	0.04	0.04	0.05	0.03	0.05
Ca	0.94～1.04	1.56～1.83	1.11～1.35	0.91～1.07	1.12	1.32	1.37	1.20	1.25	1.65	1.74	1.20	1.11	1.11	1.43	1.17	1.26	1.46
Na	0～0.02	0～0.01	0～0.01	0～0.01	–	–	–	–	–	–	0.01	0.01	–	–	–	–	–	–
La	0.11～0.20	0.02～0.05	0～0.06	0.07～0.20	0.09	0.05	0.05	0.03	0.02	–	–	0.02	0.01	0.03	0.02	0.05	0.03	0.03
Ce	0.36～0.45	0.05～0.15	0.03～0.24	0.28～0.45	0.36	0.19	0.19	0.15	0.13	0.01	0.01	0.07	0.05	0.12	0.08	0.18	0.09	0.11
Pr	0.04～0.06	0～0.02	0.01～0.04	0.04～0.06	0.06	0.03	0.04	0.02	0.04	0.01	–	0.01	0.01	0.03	–	0.03	0.02	0.03
Nd	0.16～0.22	0.03～0.08	0.03～0.20	0.16～0.25	0.25	0.12	0.16	0.18	0.16	0.02	0.01	0.10	0.08	0.15	0.07	0.16	0.10	0.10
Sm	0.02～0.04	0～0.01	0.01～0.05	0.02～0.05	0.04	0.04	0.03	0.05	0.04	0.01	0.01	0.03	0.03	0.04	0.02	0.04	0.03	0.03
Eu	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Gd	0.01～0.02	0～0.01	0.03～0.05	0.01～0.04	0.03	0.03	0.03	0.05	0.05	0.02	0.02	0.06	0.06	0.08	0.02	0.03	0.05	0.03
Tb	0～0.01	b.d.l.	0～0.01	0～0.01	–	–	0.01	–	–	–	–	–	0.01	–	–	–	–	0.01

续表 1

样品号	AYTK-10-7-2				AYTK-10-2-1		AYTK-10-2-ii	AYTK-10-3-1		AYTK-10-3-ii		AYTK-4-1			AYTK-4-2	AYTK-4-4		AYTK-10-1
期次	第一期	第三期	第二期	第一期	第二期		第二期	第二期		第三期		第二期			第二期	第二期		第二期
点位	剖面一		剖面二		散点		散点	散点		散点		散点			散点	散点		散点
Dy	0～0.02	0～0.01	0.02～0.04	0.01～0.02	0.01	0.02	0.04	0.03	0.03	0.02	0.01	0.05	0.04	0.03	0.03	0.02	0.04	0.02
Ho	0～0.01	0～0.01	0～0.01	0～0.01	–	0.02	0.01	0.01	–	–	–	0.02	0.01	–	–	–	0.01	–
Er	b.d.l.	0～0.01	0～0.02	0～0.01	–	–	–	0.01	0.01	0.01	–	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	–
Tm	0～0.01	b.d.l.	0～0.01	b.d.l.	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Yb	0～0.01	0～0.01	0～0.02	0～0.01	0.01	–	0.02	0.01	0.01	0.01	–	0.01	0.02	0.01	0.01	–	0.01	0.01
Lu	0～0.01	b.d.l.	0～0.01	0～0.01	–	–	–	–	–	–	0.01	–	–	–	0.01	–	–	–
Y	0.04～0.07	0.02～0.03	0.11～0.38	0.04～0.12	0.04	0.12	0.32	0.17	0.16	0.22	0.08	0.27	0.40	0.29	0.24	0.19	0.34	0.11
Th	0～0.01	b.d.l.	b.d.l.	0～0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	–	–	0.02	–	0.01	–	0.01	–	–
Total(apfu)	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
$REE^{3+}+Th^{4+}$	0.87～0.98	0.14～0.36	0.56～0.77	0.85～1.01	0.91	0.65	0.89	0.71	0.64	0.33	0.15	0.66	0.75	0.78	0.53	0.72	0.74	0.47
$Al^{3+}-3$	−1.82～−1.53	−0.67～−0.59	−1.33～−0.81	−1.79～−1.42	−1.15	−1.07	−1.08	−1.28	−1.11	−0.71	−0.75	−1.03	−1.09	−1.23	−0.91	−1.13	−1.01	−1.12
$*Fe^{3+}/(Fe^{3+}+Fe^{2+})$	0.43～0.48	0.46～0.78	0.27～0.46	0.38～0.46	0.21	0.40	0.17	0.45	0.43	0.53	0.81	0.36	0.31	0.37	0.42	0.36	0.27	0.58
LREE(apfu)	0.77～0.89	0.12～0.30	0.09～0.59	0.68～0.91	0.80	0.43	0.46	0.42	0.38	0.04	0.03	0.87	0.86	1.68	1.11	1.55	1.37	0.29
M-HREE(apfu)	0.09～0.14	0.03～0.07	0.23～0.51	0.09～0.24	0.13	0.23	0.45	0.32	0.28	0.30	0.13	3.97	3.96	3.22	3.79	3.35	3.66	0.20
$^{A}REE^{3+}+^{M}(Mg, Fe)^{2+}$(apfu)	1.26～2.16	0.39～0.53	0.69～1.64	1.24～2.15	1.02	0.85	1.47	1.07	1.38	0.49	0.40	0.87	0.86	1.68	1.11	1.55	1.37	0.96
$^{A}Ca^{2+}+^{M}(Al, Fe)^{3+}$(apfu)	2.57～3.49	4.39～4.48	3.19～4.13	2.59～3.55	3.88	3.99	3.47	3.75	3.47	4.38	4.39	3.97	3.96	3.22	3.79	3.35	3.66	3.91
Fe_{tol}	1.37～1.52	0.52～0.61	0.77～1.26	1.30～1.51	1.01	0.95	0.76	1.18	1.06	0.59	0.65	1.00	1.02	1.22	0.85	1.11	1.03	1.03

注：表中所列数值为矿物稀土元素(REE)浓度的平均值，括号内数字为分析点数量；褐帘石(allanite)和绿帘石(epidote)的化学式基于12.5个氧原子和8个阳离子，利用Yavuz et al.(2015)的WinEpclas软件计算；$*Fe^{3+}/(Fe^{3+}+Fe^{2+})=(REE^{3+}+Th^{4+})/(Al^{3+}-3)+1$，计算方法参考Poitrasson (2002)；$^{A}REE^{3+}+^{M}(Mg, Fe)^{2+}$(apfu)与$^{A}Ca^{2+}+^{M}(Al, Fe)^{3+}$(apfu)，上标A和M表示褐帘石中阳离子的占位，计算方法参考Dou et al.(2024)。“–”表示未测定；“b.d.l.”表示低于检测限。

(图 5)。大多数区域成分位于第一期和第三期之间或重叠第一期的范围(图 5c、图 5d)。

第三期褐帘石 SiO_2(36.05%～38.59%)、CaO(16.91%～21.07%)、Al_2O_3(22.99%～24.47%)、$Fe^{3+}/(Fe^{3+}+Fe^{2+})$(0.46～0.81)显著高于前两期，而 FeO(7.33%～9.47%)、MgO(0～0.04%)、LREE(0.87%～9.57%)、M-HREE(0.85%～7.83%)值最低(表 1，图 5c、图 5d)，其 EPMA 分析总量与第一期、第二期相差不大(图 5)。第三期褐帘石大多数成分位于第一期和第二期褐帘石成分区域之外(图 5c、图 5d)。

4　讨论

4.1　第一期褐帘石的岩浆成因

褐帘石的成因可以通过其结构和化学特征来区分(Poitrasson et al., 2002; Gieré et al., 2004; Gros et al., 2020)。一般来说，花岗质岩石中的岩浆褐帘石在 BSE 图像中呈现均匀的灰色，EPMA 分析总量相对较高，大多数>94%，且 $Fe^{3+}/(Fe^{3+}+Fe^{2+})$值为 0.30～0.56(Petrík et al., 1995; Poitrasson et al., 2002)。第一期褐帘石显示出均匀的 BSE 图像(图 3c、图 3e)，分析总量为 93.98%～96.80%，$Fe^{3+}/(Fe^{3+}+Fe^{2+})$为 0.38～0.48(表 1)。上述特征均与岩浆褐帘石特征一致。此外，第一期褐帘石的 CaO 和 Al_2O_3 含量较低、SiO_2 和 FeO 含量较高，与岩浆褐帘石的化学成分重叠(图 5a、图 5b、图 5d)，再次证明该类型褐帘石具有岩浆成因。

第一期褐帘石可能代表了岩浆结晶主阶段的产物。在岩浆结晶早期或特定演化阶段，熔体中极度富集轻稀土元素(Ce)和铁镁组分，而钙铝组分相对贫乏。较高的重元素(Ce、Fe)含量使得该区域在 BSE 图像上应呈现较亮的灰度。Si^{4+}的极度稳定表明此时矿物晶格生长环境良好，没有受到外界流体的干扰。

注意到部分第一期褐帘石颗粒发育有灰度不同的暗斑区域，可能代表岩浆房内部化学成分或物理化学条件发生突变的产物。由于稀土元素(Ce)和铁镁含量的下降，暗色区域的平均原子序数变低，在 BSE 图像上呈现肉眼可见的“暗色”，其组成为 $^{A}REE^{3+}+{}^{M}(Mg, Fe)^{2+}$(apfu)↔ $^{A}Ca^{2+}+{}^{M}(Al, Fe)^{3+}$(apfu)(图 6c)，表明这些暗斑可能是由化学替代引起的。这种成分的过渡是连续且渐变的(缓冲过渡)，表明此时岩浆系统正在发生物理化学条件转变。例如，发生岩浆混合、分离结晶，或是外部新流体(相对富 Al、Ca、LREE)开始混入，导致褐帘石晶格中的类质同象置换。这种取代过程也可能是由氧化条件诱导的(Petrík et al., 1995)，斑块中略高的 $Fe^{3+}/(Fe^{3+}+Fe^{2+})$进一步证明了这一推论(0.43～0.48; 图 5d)。

4.2　其他褐帘石的热液成因

奥依塔格岩体中第二期和第三期褐帘石的结构和化学成分与第一期褐帘石显著不同，可能具有热液成因。

(1)矿相学证据：第二期褐帘石表现出典型的富 Ca-Al-Cl 自交代热液交代结构。镜下可见第二期区域严格受控于原生褐帘石内部的微裂隙发育，并与第一期核心存在极不规则、呈锯齿状的交代接触界面。最典型的特征是第二期中广泛发育的蠕虫状显微纹理

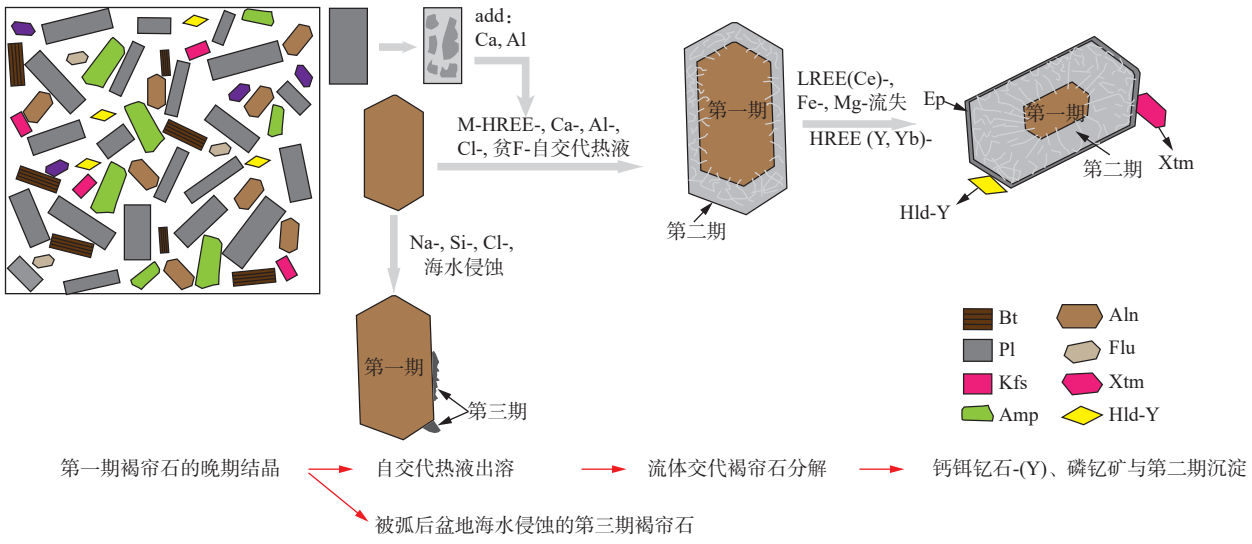


图6　奥依塔格岩体中褐帘石形成模式图

Fig. 6　Schematic diagram showing the formation of allanite in the Oytag pluton

(图 3d)。这种蠕虫状结构仅沿裂隙壁面生长,构成流体沿裂隙渗透的反应前沿。第二期区域明显继承了第一期褐帘石的结晶学方向,表明该过程遵循耦合溶解–再沉淀(CDR)机制(Putnis, 2009)。随着交代进行,第二期区域显微结构表现出显著的脆弱化与微破碎特征,暗示硅酸盐骨架已被局部破坏。第三期褐帘在空间上严格局限于第一期褐帘石颗粒的最外侧边缘,构成一圈极薄且不规则的深暗色反应边。在 BSE 图像中,第三期呈现出显著的最低灰度,且其与第二期之间呈现截然的不连续接触。这种结构特征表明,第三期并非第二期交代的延伸,可能是开放体系下外来流体(海水)引起的交代事件。

(2)地球化学证据:第二期和第三期褐帘石主量元素组成偏离第一期岩浆褐帘石和 Dou et al.(2024)圈定的岩浆褐帘石端元(阴影)区域(图 5)。在 SiO_2 与 CaO 图解(图 5a)中,第二期褐帘石的 SiO_2 与 CaO 数据点呈现出一条从岩浆端元阴影区向外斜向延伸的带状趋势,数据点与阴影区存在小部分的重叠;而第三期褐帘石的 SiO_2 与 CaO 则完全脱离阴影区,跃升至图版边缘,形成独立的独立端元区域。在 Al_2O_3 与 EPMA 分析总量图解(图 5b)中,第二期的 Al_2O_3 分布跨度较宽,数据点较为分散,部分落点仍在岩浆端元阴影区的边缘;而第三期的 Al_2O_3 集中在最大值区间,且在总量稳定的前提下完全远离了阴影区。在 $^{A}Ca^{2+}+^{M}(Al, Fe)^{3+}$ (apfu) 与 $^{A}REE^{3+}+^{M}(Mg, Fe)^{2+}$ (apfu)阳离子替代图解(图 5c)中,第二期呈现出从阴影区向外连续且明显的线性拖尾变化,其轨迹紧密贴合并穿插于岩浆褐帘石的端元边界;而第三期则直接跳跃至 $^{A}Ca^{2+}+^{M}(Al, Fe)^{3+}$ (apfu)的最高值区域,且 $^{A}REE^{3+}+^{M}(Mg, Fe)^{2+}$ (apfu)降至极低值,完全脱离了阴影区所在的演化轨迹。在 FeO 与 $Fe^{3+}/(Fe^{3+}+Fe^{2+})$ 比值图解(图 5d)中,第二期的 $Fe^{3+}/(Fe^{3+}+Fe^{2+})$ 数据点与阴影区存在交集,多集中在中低比值区;而第三期的 $Fe^{3+}/(Fe^{3+}+Fe^{2+})$ 比值则跃升至高值区,且 FeO 降至较低值,在空间上完全独立于岩浆端元阴影区之外。

综上所述,第二期褐帘石在 4 个图解中的数据点均与 Dou et al.(2024)的岩浆端元存在空间上的部分重叠或紧密毗邻,反映了与岩浆端元间具有成分上的继承关系;而第三期在四幅图解中均完全偏离了岩浆端元区域,在成分空间中呈现出显著的不连续性与跳跃式变化。这种与岩浆端元的位置差异,明确指示了两期均为热液交代成因,且第二期代表了局部、不均一的交代过程,第三期则代表了成分极端、彻底改造的流体事件。两期与 Dou et al.(2024) 岩浆端元空间位置的异同,直观约束了奥依塔格岩体褐帘石经历了不同性质热液流体的多期叠加改造。

4.3 稀土元素运移规律

文中矿物共生组合与稀土分异特征为探讨改造奥依塔格岩体岩浆褐帘石流体的性质提供了直接的矿物学和地球化学证据。实验岩石学表明 Cl 是热液中 REE 迁移的重要络合剂,且 REE-Cl 络合物的稳定性随稀土元素原子数的增加而降低(Migdisov et al., 2009)。从第一期到第二期褐帘石的热液交代过程中伴随着 LREE 的亏损和 M-HREE 的富集,表明热液可能具有富 Cl 特征。此外,岩相学发现的蠕虫状交代结构与华南花岗岩型稀土矿床中岩浆热液成因的褐帘石特征一致(Dou et al., 2024),表明本研究中形成第二期褐帘石的交代流体为富 Cl 的岩浆热液。在这种流体体系中,Cl^-虽然具有一定的络合能力,但由于流体内部极度缺乏 F^-,且整体体系富集造岩组分(Ca、Al、Si),导致其稀土搬运机制发生了显著改变。在第二期热液沿裂隙渗入并引发褐帘石发生耦合溶解–再沉淀(CDR)的过程中,被释放出来的 LREE(如 Ce)由于在贫 F 的 Cl 络合物中稳定性强,最终随流体向外扩散流失;相反,离子半径较小的 HREE(如 Y、Yb)在此类贫 F、富 Ca-Si 的流体中溶解度极低,被迫原位滞留。随着流体中 Ca、Si、B 组分的持续富集,这些 HREE 在紧邻的基质中达到强烈过饱和,最终以独立矿物相(钙铒钇石–(Y)及磷钇矿)的形式结晶沉淀。

注意到第三期褐帘石结构较为均一,未表现出明显的蠕虫结构,同时地球化学成分有别于第二期褐帘石,指示形成其的热液显著不同于第二期褐帘石的岩浆热液。第一期褐帘石在交代形成第三期褐帘石发生 LREE 的强烈亏损,其程度显著强于岩浆热液阶段(图 4a),而 M-HREE 含量变化不明显(图 3e)。这种稀土分异过程表明流体应该具有富 Cl 特征。此外,第三期褐帘石伴生的钠长石化蚀变表明流体具有富 Na 特征。奥依塔格岩体形成于弧后伸展背景,同时代地层的熔岩发育有枕状构造(计文化等, 2018),指示海相环境。基于此,笔者提出第三期褐帘石可能形成于海水蚀变过程。

基于上述讨论,笔者构建了奥依塔格岩体中多期褐帘石的形成模式图(图 6)。第一期褐帘石为低钾花岗质岩浆结晶形成的富含 LREE 的岩浆褐帘石;第二期褐帘石由原生岩浆褐帘石在深部富 Ca-Al-Cl、贫 F 的岩浆热液流体交代形成,伴随 LREE 的迁出和

HREE 原位沉淀形成独立的钙铌钇石–(Y)和磷钇矿; 第三期褐帘石代表了弧后盆地背景下海水等外部富 Na 流体沿开放断裂交代, 导致原生褐帘石边缘溶解并形成极度贫 REE、富 Ca-Al 的最终蚀变产物。

文中进一步将奥依塔格岩体褐帘石的形成–改造过程与 Dou et al.(2024)提出的华南离子吸附型稀土矿床模式进行对比, 可以发现二者在岩浆和岩浆热液阶段中稀土元素迁移规律相似, 而在表生过程存在显著差异。奥依塔格和在华南离子吸附型稀土矿床基岩的岩浆阶段均形成富 LREE 褐帘石, 随后在岩浆热液作用下发生 LREE 的迁出和 M-LREE 矿物的形成。然而, 由于表生流体的差异, 奥依塔格和华南离子吸附型稀土矿床基岩随后表现出不同的稀土元素分异规律。华南离子吸附型稀土矿床形成于地表环境中, 富 F 流体破坏原生褐帘石等富稀土矿物, 导致 M-HREE 迁出及富 LREE 矿物(如 synchysite-(Ce))的原位沉淀, 富 LREE 矿物进一步溶解释放 LREE, 后者吸附在粘土矿物上形成矿化(Dou et al., 2024)。相反, 以海水为主导的蚀变作用导致奥依塔格岩体持续释放 LREE, 不能有效形成以 synchysite-(Ce)为主的富 LREE 矿物, 制约了区域离子吸附型稀土成矿潜力。

5　结论

(1)在西昆仑奥依塔格岩体中识别出 3 期不同成因的褐帘石: 第一期代表富 LREE 的原生岩浆褐帘石; 第二期褐帘石是由富 Ca-Al-Cl、贫 F 的岩浆热液沿裂隙自交代引发的耦合溶解–再沉淀产物; 第三期褐帘石是弧后盆地背景下富 Cl、富 Na 海水沿开放裂隙侵入、水岩反应的产物。

(2)两类热液改造作用均伴随 LREE 的持续丢失, 不同于华南离子吸附型稀土成矿过程, 表明区域此类型成矿潜力有限。

利益冲突声明(Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References):

丁明朋, 汤好书, 陈衍景, 等. 西昆仑塔什库尔干叶里克铁矿成因: 矿床地质与磁铁矿 LA-ICP-MS 原位分析约束[J]. 地球科学, 2018, 43(9): 3169−3185.

DING Mingpeng, TANG Haoshu, CHEN Yanjing, et al. Genesis of the Erik Iron Ore Deposit in the Taxkorgan Area of the West Kunlun, Xinjiang: Constraints from Ore Deposit Geology and In Situ LA-ICP-MS Analysis of Magnetite[J]. Earth Science, 2018, 43(9): 3169−3185.

豆敬兆, 王焰, 谭伟, 等. 南岭地区离子吸附型稀土矿床基岩的稀土元素预富集机制探讨[J]. 大地构造与成矿学, 2024, 48(2): 200−212.

DOU Jingzhao, WANG Yan, TAN Wei, et al. Mechanism of REE Enrichment in Granitic Bedrocks of the Ion-adsorption REE Deposits in the Nanling Mountain Range, South China[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2024, 48(2): 200−212.

丁坤, 梁婷, 周义, 等. 西昆仑大红柳滩黑云母二长花岗岩岩石成因: 来自锆石 U-Pb 年龄及 Li-Hf 同位素的证据[J]. 西北地质, 2020, 53(1): 24−34.

DING Kun, LIANG Ting, Zhou Yi, et al. Petrogenesis of Dahongliutan Biotite Monzogranite in Western Kunlun Orogen: Evidence from Zircon U-Pb Age and Li-Hf Isotope[J]. Northwestern Geology, 2020, 53(1): 24−34.

方爱民, 李继亮, 刘小汉, 等. 新疆西昆仑库地混杂带中基性火山岩构造环境分析[J]. 岩石学报, 2003, 19(3): 409−417.

FANG Aimin, LI Jiliang, LIU Xiaohan, et al. Tectonie settings of the basic igneousrocks in the Kudi ophiolite zone of West Kunlun Mountains, Xingjiang Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 2003, 19(3): 409−417.

冯雨周, 陈华勇, 肖兵, 等. 褐帘石稀土活化对离子吸附型稀土矿床成矿的指示[J]. 科学通报, 2023, 68(10): 1217−1229.

FENG Yuzhou, CHEN Huayong, XIAO Bing, et al. REE remobilization of allanite: Implications for the formation of ion-adsorption REE deposits, South China[J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(10): 1217−1229.

计文化, 陈守建, 李荣社, 等. 西昆仑奥依塔格石炭-二叠纪岩浆岩: 弧后盆地的产物?[J]. 岩石学报, 2018, 34(8): 2393−2409.

JI Wenhua, CHEN Shoujian, LI Rongshe, et al. Carboniferous-Permian magmatic rocks in the Oytag area, West Kunlun: Products of back-arc basin?[J]. Acta Petrologica Sinica, 2018, 34(8): 2393−2409.

李光来, 龙伟康, 罗武平, 等. 江西相山下家岭稀土矿风化球体中褐帘石的精细矿物学研究及其成矿指示意义[J]. 岩石学报, 2022, 38(7): 2067−2079.

LI Guanglai, LONG Weikang, LUO Wuping, et al. A detailed research on allanite in weathered sphere from the Xiajialing REE deposit in Xiangshan, Jiangxi, and its metallogenic significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 2022, 38(7): 2067−2079.

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.

李荣社, 计文化, 杨永成, 等.《昆仑山及邻区地质图》简介 [C]. 第五届全国地质制图与 GIS 学术讨论会论文集, 2007: 294.

潘裕生. 西昆仑山构造特征与演化[J]. 地质科学, 1990, (3): 224−232.

PAN Yusheng. Kunlun Mountain Region tectonic features and evolution of the weternKunlun Mountain[J]. Chinese Journal of Geology, 1990, (3): 224−232.

肖文交, 侯泉林, 李继亮, 等. 西昆仑大地构造相解剖及其多岛增生过程[J]. 中国科学 (D 辑: 地球科学), 2000, (S1): 22−28.

XIAO Wenjiao, HOU Quanlin, LI Jiliang, et al. Tectonic facies and the archipelago-accretion process of the West Kunlun[J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2000, (S1): 22−28.

徐进鸿, 张正伟, 吴承泉, 等. 西昆仑早古生代花岗岩类成因: 岩石地球化学、年代学与 Sr-Nd-Hf 同位素证据 [C]. 第九届全国成矿理论与找矿方法学术讨论会论文摘要集, 2019: 303−304.

许志琴, 戚学祥, 杨经绥, 等. 西昆仑康西瓦韧性走滑剪切带的两类剪切指向、形成时限及其构造意义[J]. 地质通报, 2007, 26(10): 1252−1261.

XU Zhiqin, QI Xuexiang, YANG Jingsui, et al. Senses and timings of two kinds of shear in the Kangxiwar strike-slip shear zone, West Kunlun, and their tectonic significance[J]. Geological Bulletin of China, 2007, 26(10): 1252−1261.

袁超, 孙敏, 肖文交, 等. 原特提斯的消减极性: 西昆仑 128 公里岩体的启示[J]. 岩石学报, 2003, 19(3): 399−408.

YUAN Chao, SUN Min, XIAO Wenjiao, et al. Subduction polarity of the prototethys: insights from the Yirba pluton of the western Kunlun range, NW China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2003, 19(3): 399−408.

张传林, 于海峰, 叶海敏, 等. 塔里木西部奥依塔克斜长花岗岩: 年龄、地球化学特征、成岩作用及其构造意义[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2006, (10): 881−893.

ZHANG Chuanlin, YU Haifeng, YE Haimin, et al. Aoyitake plagioclase granite in western Tarim: Age, geochemical characteristics, petrogenesis and tectonic implications[J]. Science in China (Series D): Earth Sciences, 2006, (10): 881−893.

张传林, 陆松年, 于海锋, 等. 青藏高原北缘西昆仑造山带构造演化: 来自锆石 SHRIMP 及 LA-ICP-MS 测年的证据[J]. 中国科学 (D 辑: 地球科学), 2007, (2): 145−154.

ZHANG Chuanlin, LU Songnian, YU Haifeng, et al. Tectonic evolution of the West Kunlun orogenic belt on the northern margin of the Qinghai-Tibet Plateau: Evidence from zircon SHRIMP and LA-ICP-MS dating[J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2007, (2): 145−154.

Chen T W, Zhou M. Ages and compositions of primary and secondary allanite from the Lala Fe-Cu deposit, SW China: implications for multiple episodes of hydrothermal events[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2014, 168(2): 1−20.

Dou J Z, Wang C Y, Tan W, et al. Mobilization of rare earth elements during allanite-fluid interaction: Insights into formation of regolith-hosted rare earth element deposits in South China[J]. Mineralium Deposita, 2024, 59: 1661−1678.

Gieré R, Sorensen S S. Allanite and Other REE-Rich Epidote-Group Minerals[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2004, 56(1): 431−493.

Gros K, Słaby E, Jokubauskas P, et al. Allanite Geochemical Response to Hydrothermal Alteration by Alkaline, Low-Temperature Fluids[J]. Minerals, 2020, 10(5): 392.

Migdisov A A, Williams-Jones A E, Wagner T. An experimental study of the solubility and speciation of the Rare Earth Elements (III) in fluoride-and chloride-bearing aqueous solutions at temperatures up to 300 C[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2009, 73(23): 7087−7109.

Petrík I, Broska I, Lipka J, et al. Granitoid allanite-(Ce) substitution relations, redox conditions and REE distributions (on an example of I-type granitoids, Western Carpathians, Slovakia)[J]. Geologica Carpathica, 1995, 46(2): 79−94.

Poitrasson F. In situ investigations of allanite hydrothermal alteration: examples from calc-alkaline and anorogenic granites of Corsica (southeast France)[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2002, 142: 485−500.

Putnis A. Mineral Replacement Reactions[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2009, 70(1): 87−124.

Wang Y J, Zhu W G, Huang H Q, et al. Revisiting the origin of the Carboniferous Oytag pluton in West Kunlun orogenic belt, northwest China[J]. Lithos, 2022, 430−431.

Whitney D L and Evans B W. Abbreviations for names of rock forming minerals[J]. American Mineralogist, 2010, 95(1): 185−187.

Yavuz F, Kumral M, Karakaya N, et al. A Windows program for chlorite calculation and classification[J]. Computers and Geosciences, 2015, 81101−113.

Yu B, Wang Y, Wei Y, et al. Zircon textural and elemental evidence for the thermal state of the Carboniferous Oytag pluton in the West Kunlun Orogenic Belt, northwest China[J]. Acta Geochimica, 2026, 45: 639−651.