



引文格式: 刘忠宇, 黄玉, 余元军, 等. 西南天山巴什苏洪碱性杂岩中异性石成因及对稀有金属成矿的指示[J]. 西北地质, 2026, 59(3): 104–120. DOI: 10.12401/j.nwg.2025172

Citation: LIU Zhongyu, HUANG Yu, YU Yuanjun, et al. Genesis of Eudialyte in the Bashisuhong Alkaline complex of the Southwest Tianshan: Implications for Rare Metal Mineralization[J]. Northwestern Geology, 2026, 59(3): 104–120. DOI: 10.12401/j.nwg.2025172

西南天山巴什苏洪碱性杂岩中异性石成因及 对稀有金属成矿的指示

刘忠宇¹, 黄玉¹, 余元军², 于启龙^{1,3}, 田勇², 夏明毅²,
蒋志豪¹, 雷如雄¹, 吴昌志^{1,3,*}

(1. 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 2. 新疆维吾尔自治区地质局阿克苏大队, 新疆 阿克苏 843000; 3. 新疆自然资源与生态环境研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要: 异性石是过碱性岩中赋存锆铌和稀土元素 (Zr-Nb-REE) 的关键矿石矿物, 其矿物成分记录了岩浆起源、演化至热液活动的信息, 为评估碱性岩成矿潜力提供了重要依据。巴什苏洪杂岩体位于塔里木北缘-南天山结合带, 其中发育的霓辉正长岩脉侵入于大理岩中, 岩脉呈灰黑色-紫红色, 与大理岩接触界限呈不规则形态, 局部可见塑性流动构造, 岩脉内部常见富硅灰石围岩捕虏体, 表明其与大理岩之间存在物质交换作用。岩脉宽为 0.33~3.71 m, 延伸 30~170 m, 大体呈 EW 向展布。脉石矿物主要为条纹长石、霓辉石、硅灰石, 矿石矿物主要为异性石、磷灰石和榍石。异性石多为自形晶, 粒径为 0.1~5 mm, 内部发育平直的振荡环带, 微量元素组成受离子半径-电价控制 (Charge-and-Radius-Controlled), 为典型的岩浆成因。霓辉正长岩的微量元素组成均显示出富集 LREE、亏损 HREE 的特征, 并具有显著的 Eu、Sr 负异常, 表明其母岩浆可能与碱性玄武岩成分相当, 并经历过斜长石的结晶分异作用。当碱性岩浆侵入到大理岩中时, 大理岩对碱性岩浆的同化作用使得大量 CaO 质组分加入, 这种同化作用不仅为异性石的形成提供了关键物质, 同时 CaO 含量的增加还可提高 Cl 的溶解度、降低固相线温度, 从而促进岩浆进一步演化并实现稀有金属的超常富集。因此, 碱性岩浆与大理岩的相互作用是西南天山异性石成矿的关键机制, 两者的接触带可作为稀有金属成矿的重要找矿靶区。

关键词: 异性石; 碱性岩; 稀有金属成矿; 巴什苏洪; 西南天山

中图分类号: P581

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2026)03-0104-17

Genesis of Eudialyte in the Bashisuhong Alkaline complex of the Southwest Tianshan: Implications for Rare Metal Mineralization

LIU Zhongyu¹, HUANG Yu¹, YU Yuanjun², YU Qilong^{1,3}, TIAN Yong², XIA Mingyi²,

收稿日期: 2025-11-16; 修回日期: 2026-03-06; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 新疆维吾尔自治区重点研发项目 (2022B03015-3) 和新疆维吾尔自治区“天池英才”计划联合资助。

作者简介: 刘忠宇 (2001-), 男, 硕士研究生, 研究方向为矿物学、岩石学、矿床学。E-mail: 2023127037@chd.edu.cn。

* 通讯作者: 吴昌志 (1975-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事矿床学研究。E-mail: wucz@chd.edu.cn。

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

JIANG Zhihao¹, LEI Ruxiong¹, WU Changzhi^{1,3,*}

(1. Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering, Ministry of Education, School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Aksu Geological Party, Xinjiang Geology Bureau, Korla 843000, Xinjiang, China; 3. Xinjiang Natural Resources and Ecological Environment Research Center, Urumqi 830000, Xinjiang, China)

Abstract: Eudialyte is a critical ore mineral enriched in zirconium, niobium, and rare earth elements (Zr-Nb-REE), and often occurs in peralkaline rocks. Its composition records key information from magma genesis, evolution, to hydrothermal activities, providing important insights for evaluating the metallogenic potential of alkaline rocks. The BashisuHong complex is located in the junction zone between the Northern Tarim Basin and the South Tianshan Orogen, where aegirine-augite syenite dikes host Zr-Nb-REE mineralization. These dikes, exhibiting a gray-black to purplish-red coloration, display irregular contact boundaries with the marble and locally visible plastic flow structures. Wollastonite-rich wall-rock xenoliths are commonly observed within these dikes, indicating material exchange with the marble. The dikes are 0.33–3.71 m wide, extend 30–170 m, and are generally oriented east-west. Gangue minerals primarily consist of perthite, aegirine-augite, and wollastonite, while ore minerals are mainly eudialyte, apatite, and titanite. Eudialyte is predominantly euhedral, with grain sizes ranging from 0.1 to 5 mm, and exhibits well-developed straight oscillatory zoning. Their trace element characteristics are controlled by charge-and-radius-controlled (CHARAC) substitution mechanisms, indicating a typical magmatic origin. Both whole-rock and eudialyte samples exhibit light rare earth element (LREE) enrichment and heavy rare earth element (HREE) depletion, accompanied by significant negative Eu and Sr anomalies, indicating extensive fractional crystallization of plagioclase in the primary magma of the syenite dikes and compositionally similar to alkaline basalt. When alkaline magma intruded into marble, assimilation of the marble introduced substantial CaO components. This assimilation not only supplied critical materials for eudialyte formation but also, through increased CaO content, enhanced Cl solubility and lowered the solidus temperature, thereby facilitating further magma evolution and achieving supernormal enrichment of rare metals. Therefore, the interaction between alkaline magma and marble represents a crucial mechanism for eudialyte mineralization in the junction zone between Northern Tarim Basin and South Tianshan Orogen, making their contact zones promising targets for rare metal exploration.

Keywords: eudialyte; alkaline Rocks; rare Metal Mineralization; BashisuHong; Southwest Tianshan

碱性岩以富碱、贫铝 [$(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})>7\%$ 、 $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3>1$] 和硅不饱和为特征(曾广策等, 1996), 显著富集稀土元素(REE)和高场强元素(HFSE) (Sørensen, 1997; 袁忠信等, 1997; Woolley, 2019)。碱性岩出露范围极为有限, 但常形成大型稀有稀土金属矿床, 如格陵兰 Ilimaussaq 杂岩体中的铌-钽-铀-稀土矿床 (Shearer et al., 1994), 俄罗斯 Khibina、Lovozerro 杂岩体中的稀土矿床和内蒙古巴尔哲岩体中的铈-铌-钽-稀土矿床 (冯守忠, 1993; 吴鸣谦等, 2024) 等, 因而受到岩石学家们的广泛关注。碱性岩浆通常起源于富集岩石圈地幔, 多形成于大陆裂谷、板内或造山后伸展环境, 并与地幔柱或热点活动密切相关 (Upton et al., 1987; Marks et al., 2017)。碱性岩极端的化学组成导致其特殊的矿物组合, 尤其是富 REE 和 HFSE

的矿物。异性石作为富稀土的含锆硅酸岩矿物, 是过碱性岩的标志性副矿物之一, 也是过碱性岩中 Zr-Nb-REE 的关键载体矿物, 其成分信息可记录岩浆起源、演化至热液过程 (Wu et al., 2010; Schilling et al., 2011a; Marks et al., 2017; 邬斌等, 2018)。因此, 异性石的成分及其成因是揭示其母岩浆成因及 Zr-Nb-REE 超常富集的关键。

受塔里木二叠纪地幔柱的叠加影响, 沿塔里木北缘断裂, 西起托云, 东至尉犁, 分布有一条重要的碱性岩带 (邹天人等, 2002, 2006; 秦克章等, 2012; 刘春花等, 2014; 朱圣柱等, 2023)。该带上发育诸多大型-超大型碱性岩型稀有、稀土矿床, 如且干布拉克蛭石-REE-Fe-P 矿床 (姜常义等, 2005; 黄建华等, 2012)、波孜果尔稀有稀土 (Nb-Ta-Zr-REE-Rb) 矿床 (徐海明等, 2010,

2012; 孙政浩等, 2021; 杨富全等, 2025)、瓦吉里塔格稀有稀土(Nb-REE)矿床(杨合群, 2020)和巴什苏洪 Zr-Nb-Ta-REE 矿床等(图 1; 杨林春等, 2016; 蔡厚安等, 2022; Xie et al., 2024)。巴什苏洪碱性杂岩体位于新疆塔里木盆地西北缘、西南天山南缘的哈拉峻地区, 发育辉长岩-橄长岩、钙铁辉石正长岩、霓石石英正长岩、霓石花岗岩和辉绿岩等多种岩相。该杂岩体中已发现稀土及铌、钽、锆矿化, 矿化岩相主要为霓石石英正长岩、霓石碱性花岗岩及伴生的霓石伟晶岩(蔡厚安等, 2021; 宗兆建, 2022)。近年来, 荆德龙等(2022)在巴什苏洪杂岩体与大理岩接触带发现霓辉正长岩, 有经济价值的矿石矿物主要为异性石, 部分岩石中的异性石含量可达 30%, 全岩 ZrO_2 、 Nb_2O_5 、 Ta_2O_5 和轻稀土含量远超最低工业品位, 显示出极大成矿潜力和潜在经济价值。尽管前人已对巴什苏洪杂岩体的年代学、岩石成因和构造背景开展了大量研究并取得了一定的成果(张招崇等, 2009; 黄河, 2013; 杨林春等, 2016;

Ma et al., 2016; 王浩, 2019; 蔡厚安等, 2021, 2022; 宗兆建, 2022; Xie et al., 2024), 但仍缺乏对标志性矿物(如异性石等)的成因研究, 碱性岩中 REE 和 HFSE 的超常富集机制和异性石的成因仍未被有效约束。

笔者以位于巴什苏洪杂岩体西南部的霓辉正长岩为研究对象, 在野外地质调查基础上, 开展了详细的岩相学观察和矿物微区地球化学分析, 以期阐明异性石的矿物成因, 进而探讨碱性杂岩体的岩浆演化过程及其对 REE 和 HFSE 富集的控制作用, 为西南天山碱性杂岩体的稀有和稀土元素找矿勘查提供理论支撑。

1 区域地质背景

中亚造山带(Central Asian Orogenic Belt, CAOB)横亘于西伯利亚、东欧与塔里木-华北克拉通之间(图 1a), 是地球上规模最大的显生宙增生型造山带(Yakubchuk, 2004; 牛亚卓等, 2024; 吴妍蓉等, 2024; 杨

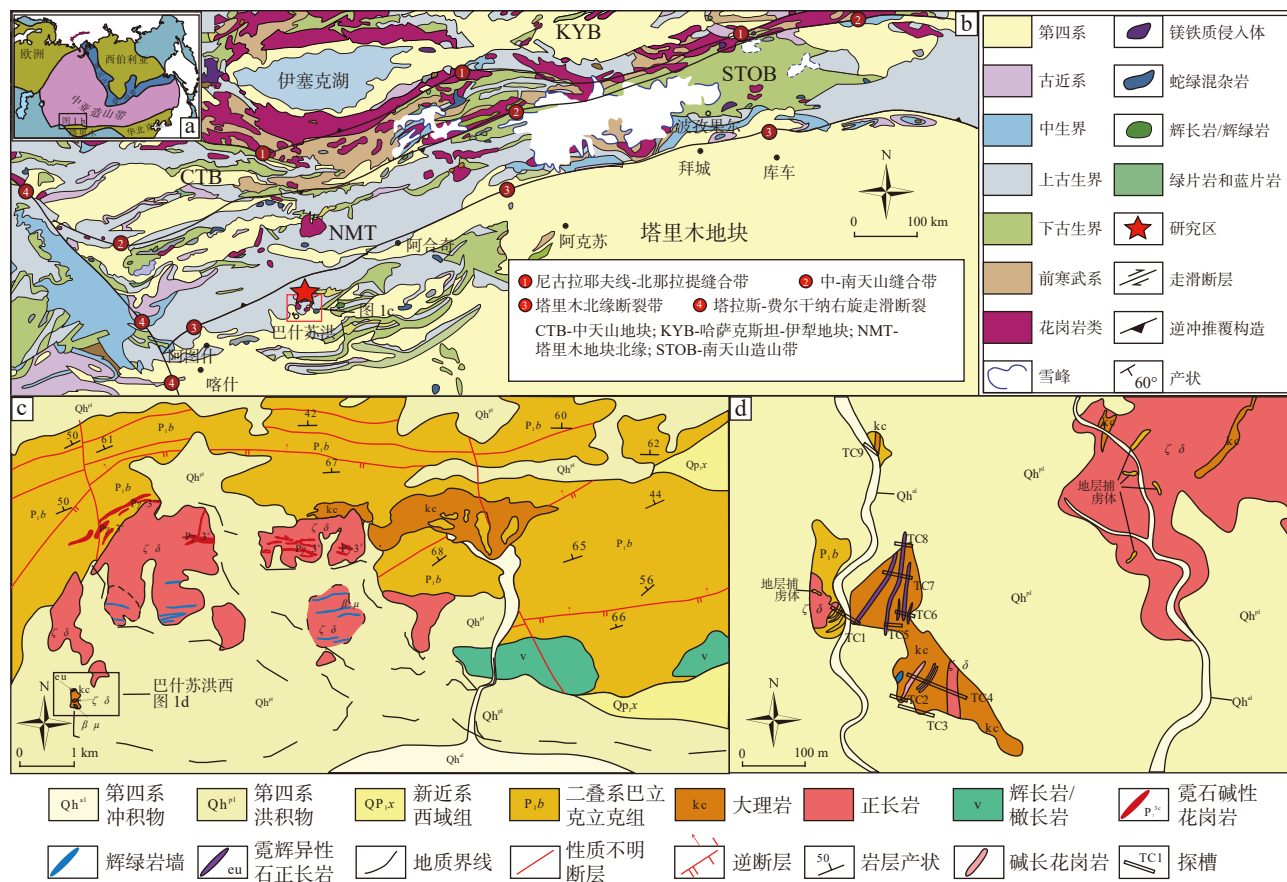


图1 中亚造山带构造位置示意图(a; 据 Yakubchuk, 2004 修改)、西南天山造山带地质图(b)、巴什苏洪矿床地质图(c; 据邹天人等, 2006; 杨林春等, 2014 修改)和巴什苏洪西南部异性石矿点地质图(d; 据荆德龙等, 2022 修改)

Fig. 1 (a) Tectonic position of the Central Asian Orogenic Belt, (b) geological map of the Southwestern Tianshan Orogenic Belt, (c) geological map of the Bashishuhong deposit, (d) geological map of the western Bashishuhong eudialyte ore occurrence

高学等, 2024)。其西南部构造单元复杂, 自北向南依次由以下5个构造单元组成, 分别是阿尔泰-准噶尔地块、中天山地块(CTB)、哈萨克斯坦-伊犁地块(KYB)、北天山造山带和南天山造山带(STOB)(图1b, Han et al., 2015; 黄河等, 2024)。该造山带由一系列微陆块、岛弧、海山、洋底高原、增生楔等地体不断向古亚洲洋南北两侧活动大陆边缘拼贴、增生而成(Şengör et al., 1993; Jahn et al., 2000; Jahn, 2004; Windley et al., 2007; Xiao et al., 2008, 2010; Han et al., 2015, 2018)。

南天山造山带是中亚造山带的重要组成部分, 其北以中-南天山缝合带与中天山地块/伊犁地块相隔, 南以塔里木北缘断裂与塔里木盆地相连, 其复杂而漫长的演化历史记录了新元古代晚期至中生代早期古亚洲洋(Paleo Asian Ocean)南部支洋盆(即南天山洋)从裂解、扩张、俯冲消减直至闭合的完整过程(Gao et al., 1998; Chen et al., 2000; Jiang et al., 2025)。南天山造山带内发育新元古代—寒武纪、奥陶纪、晚志留世—中泥盆世、晚石炭世—早二叠世以及新生代等多期岩浆事件, 其中晚石炭世—早二叠世的碱性岩浆活动颇为活跃, 形成了大量碱性侵入岩和火山岩。Xu et al. (2014)将该时期的岩浆活动大致分为3个阶段, 第一阶段以300 Ma前后的瓦吉里塔格金伯利岩为代表; 第二阶段表现为290 Ma前后的塔里木大陆溢流玄武岩; 第三阶段则以塔里木克拉通北缘280 Ma的碱性岩和巴楚-皮羌地区的镁铁质-超镁铁质杂岩为典型。其中280 Ma前后为塔里木克拉通北缘碱性岩浆活动的峰期年龄之一, 该时期形成了哈拉峻、波孜果尔、依兰里克、巴什苏洪等稀有、稀土金属矿床(邹天人等, 2002)。

2 矿床地质特征

巴什苏洪杂岩体侵位于下二叠统巴立克立克组(P_1b)碎屑岩-大理岩沉积建造。该地层以砂岩和大理岩互层为特征, 属浅海稳定台地相建造(蔡厚安等, 2021)。该杂岩体整体出露面积约为18 km², 呈EW向展布, 与区内构造线方向一致(图1c)。按岩性和侵位顺序, 该杂岩体大致可被分为4期: 第一期为辉长岩-橄长岩, 主要分布于杂岩体的东南部; 第二期为中粗粒霓石正长岩和钙铁辉石正长岩, 是杂岩体的主体部分; 第三期为中细粒碱性花岗岩及伟晶岩脉, 主要呈东西向脉体分布于第二期中粗粒霓石正长岩和钙铁

辉石正长岩之中, 其中伟晶岩脉主要产于细粒碱性花岗岩与围岩的外接触带; 第四期为细粒辉绿岩墙, 总体呈EW向侵入于杂岩体中(Ma et al., 2016; Xie et al., 2024)。本次重点研究的霓辉正长岩位于巴什苏洪杂岩体西南部, 呈岩脉侵位于大理岩中(图1d、图2a), 共圈出岩脉9条, 岩脉宽为0.33~3.71 m, 延伸为30~170 m(荆德龙等, 2022), 岩脉与大理岩的接触边界呈不规则形态, 局部可见塑性流动构造(图2a、图2b)。

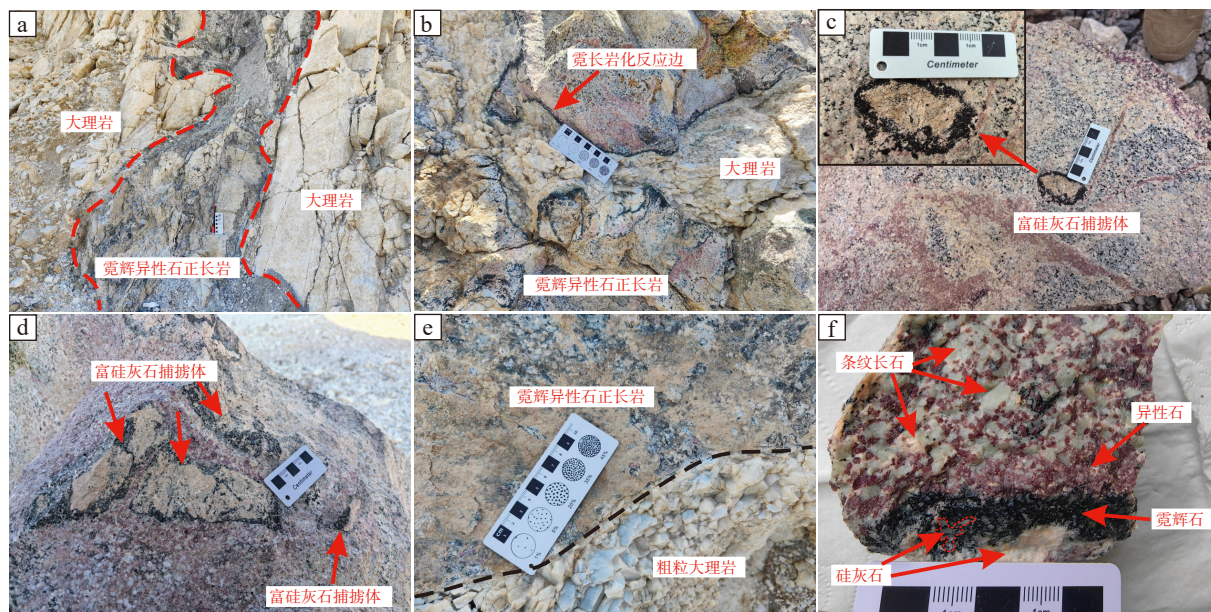
霓辉正长岩总体呈灰黑色(图2a), 中-细粒结构, 块状构造(图2b、图2c), 主要造岩矿物为霓辉石(~15%)、条纹长石(~40%)、钠长石(~5%)、异性石(~30%)、硅灰石(~10%), 另含少量石英, 副矿物为榍石、磷灰石等。由于异性石为紫红色, 故当局部异性石较为集中时岩脉整体呈紫红色(图2b、图2c)。正长岩脉与大理岩的接触带发育黑色的霓长岩化反应边, 厚度约为1~5 cm, 矿物组成以霓辉石为主(图2b、图2d)。反应边外接触带大理岩结晶粗大(图2e), 内接触带的霓辉正长岩为等粒结构, 矿物颗粒之间呈镶嵌状结构(图2f)。岩脉内部的异性石分布不均, 常呈条带状或团簇状产出, 在霓长岩化反应边附近更为富集(图2b、图2c、图2f)。接触带岩石组分复杂, 常包含富硅灰石的条带和黄褐色-灰黑色棱角状捕虏体(图2c、图2d)。捕虏体的矿物组成主要为硅灰石、霓辉石和碱性长石(图3g), 含少量榍石、磷灰石及细粒他形异性石。

3 分析方法与结果

3.1 分析方法

样品探针片及激光片制作由西安矿谱地质勘查技术有限公司完成。异性石单矿物主微量元素、背散射成像及矿物自动综合定量分析在长安大学西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室完成。

背散射成像(BSE)使用捷克TESCAN公司生产的TIMAGMS系统, 配备了TESCAN公司研发的TESCAN Essence和TESCAN TIMA软件以及由EDAX公司研发的APEX EDS软件。本研究选择解离分析的分析模式和点阵扫描的数据采集模式, 通过设定像素值获取背散射电子图像(BSE)和EDS数据, 每个点的X射线计数为1200 kcps, 像素间距为3 μm, 能谱波长为9 μm。测试在高真空模式下进行, 实验电压为25 kV, 电流为7.3 nA, 工作距离为15 mm, 光斑直径63.5 nm, 区块长



a. 巴什苏洪霓辉正长岩与大理岩野外接触关系; b. 霓辉正长岩与大理岩接触边界发育霓长岩化反应边; c. 霓辉正长岩内部异性石分布不均匀, 可见富硅灰石捕虏体; d. 霓辉正长岩中呈棱角状的富硅灰石捕虏体, 包体边缘发育霓长岩化反应边; e. 与霓辉正长岩接触部位的大理岩粒度较粗; f. 霓辉正长岩样品照片, 可见异性石在霓长岩化反应边附近更为富集

图2 巴什苏洪霓辉正长岩野外产状及矿石样品照片

Fig. 2 Field characteristics and ore sample photographs of the Bashisuhong aegirine-augite syenite

度 1 200 μm , 电流和 BSE 信号强度使用铂法拉第杯自动程序校准, EDS 信号使用 Mn 标样校准。

矿物主量元素分析在 JEOLJXA-iHP 200 F 型电子探针上完成, 加速电压 15 kV, 电子束流 10 nA, 束斑直径 1 μm 。所分析元素的 X 光谱线及相应标样如下: Si (石英)、Ti K α (金红石)、Al K α (刚玉)、Fe K α (磁铁矿)、Mn K α (合成 MnTiO_3)、Mg K α (橄榄石)、Ca K α (磷灰石)、Na K α (钠长石)、K K α (钾长石)、Zr K α (锆石)、Sr K α (天青石)、La K α ($\text{LaP}_5\text{O}_{14}$)、Ce K α ($\text{CeP}_5\text{O}_{14}$)、Nb K α (铌金属)、Cl K α (石盐)。测试数据经 ZAF 校正后分析误差小于 1%。

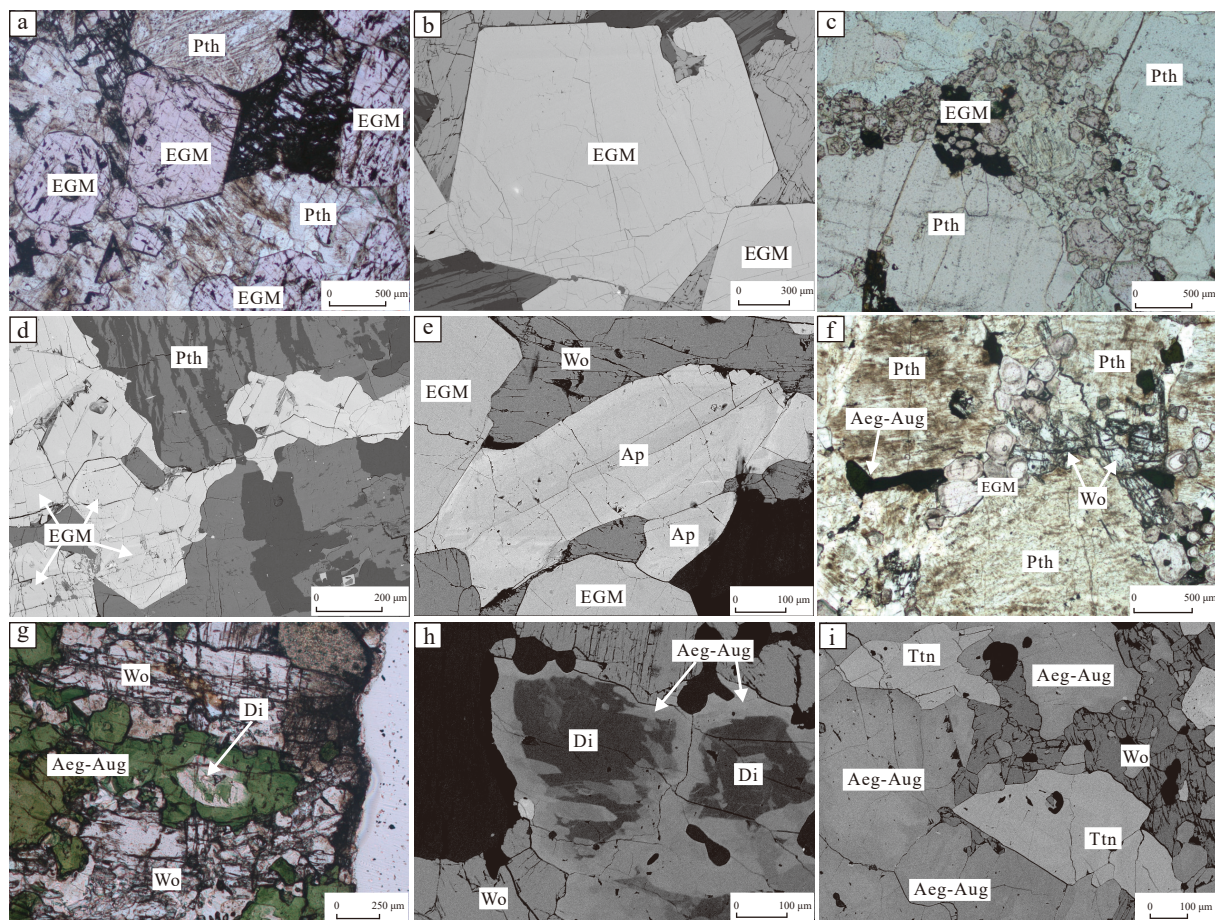
矿物原位微区微量元素分析采用 Photon Machines 193 nm 气态准分子激光剥蚀系统耦合 Agilent 7 700 多接收等离子体质谱仪, 设定激光束斑直径为 35 μm , 能量密度为 5.9 J/cm^2 , 剥蚀频率为 10 Hz。信号采集包括 15 s 空白背景和 40 s 样品剥蚀时间。以 NIST SRM 610 和 612 作为主要外标和次级外标。分析所得数据采用 ICPMSData Cal 12.2 软件进行处理。

3.2 分析结果

3.2.1 岩相学分析

霓辉正长岩中, 主要矿物为异性石 (~35%), 条纹长石 (~30%), 霓辉石 (~15%), 硅灰石 (~15%), 另含

少量石英、磷灰石、榍石、方解石、石英等矿物。异性石多呈自形粒状晶体 (图 3a、图 3b), 晶面平直无蚀变痕迹, BSE 图像较条纹长石、霓辉石、硅灰石等造岩矿物明亮, 显示出平直的振荡环带结构 (图 3b)。根据结晶习性可将异性石划分为早晚两阶段: ①早期者晶体粗大 (>1 mm), 自形程度良好, 与条纹长石、硅灰石、霓辉石共生, 且条纹长石、霓辉石等矿物边缘受异性石晶形控制, 表明早期异性石结晶时间早于条纹长石、霓辉石等矿物, 结晶时熔体空间充裕、物质供应充足 (图 3a); ②晚期者粒径较小 (<1 mm), 呈自形-半自形粒状充填于条纹长石、硅灰石和早期异性石晶体间隙 (图 3c、图 3f), 发育更为显著的环带结构, 孔隙发育 (图 3d), 指示受限的结晶环境。磷灰石为自形-半自形, 表面裂隙发育, BSE 和 CL 图像可见明显振荡环带 (图 3e), 主要呈充填状分布于硅灰石晶体间隙, 偶见被异性石包裹。霓辉石呈草绿-深绿色, 具典型辉石式解理, 主要分布于霓辉正长岩和大理岩之间的霓长岩化接触带上以及霓辉正长岩内部, 其中分布于霓长岩化带上的霓辉石晶体较为粗大, 多呈半自形晶体, 霓辉正长岩内的霓辉石呈填隙状分布于异性石、条纹长石等晶体间隙 (图 3c、图 3f)。条纹长石为自形-半自形板状 (0.1~5 mm), 属钾长石为主导的正条纹长



a. 巴什苏洪霓辉正长岩中早期的自形异性石, 单偏光; b. 背散射(BSE)图像中具振荡环带结构的异性石; c. 晚期细粒填隙状异性石, 单偏光; d. 晚期孔隙发育的半自形填隙状异性石, BSE 图像; e. 具环带结构的填隙状磷灰石, BSE 图像; f. 呈填隙状的硅灰石、霓辉石及晚期异性石分布于条纹长石晶体间隙, 单偏光; g. 富硅灰石捕掳体中以透辉石为核霓辉石为边的环带状辉石矿物, 单偏光; h. 富硅灰石捕掳体中以透辉石与霓辉石之间清晰的明暗界限, BSE 图像; i. 半自形榴石, BSE 图像; EGM. 异性石; Pth. 条纹长石; Wo. 硅灰石; Di. 透辉石; Aeg-Aug. 霓辉石; Ttn. 榴石; Ap. 磷灰石

图3 巴什苏洪霓辉正长岩中矿物显微结构及背散射(BSE)图像

Fig. 3 Mineral microtexture and backscattered electrons(BSE) images of ore samples from western Bashisuhong deposit

石(图 3a、图 3f), 常包裹有异性石, 表明条纹长石结晶顺序应介于早期和晚期异性石之间。硅灰石呈他形充填于其他各矿物间隙(图 3e、图 3f)。榴石呈半自形晶体, 边缘形状不规则, 在 BSE 图像中较为明亮, 隐约可见环带结构(图 3i)。

在富硅灰石捕掳体中, 主要矿物为硅灰石(~70%), 霓辉石(~20%), 碱性长石(~5%), 及少量的异性石、榴石、磷灰石、方解石等。所有矿物粒度均较细(<0.5mm), 霓辉石颜色不均匀, 常形成核部透明、向边缘绿色渐浓的环带结构, 其中核部成分接近透辉石端元(图 3g、图 3h)。

3.2.2 异性石成分

两期异性石的 CaO 含量为 15.05%~17.02%, Na₂O

含量为 6.72%~8.97%, Na/Ca(molar)值为 0.72~1.02, 均属富 Ca 的负异性石(表 1)。二者具有相似的 Mn/Fe 值(早期异性石为 0.02~0.05, 晚期异性石为 0.02~0.06)。与早期异性石相比, 晚期异性石具有较低的 Na₂O、Cl 含量和 Na/Ca(molar)值, 而 Mn/Fe 值则相对较高。异性石族矿物的理想化学式可简写为 Na₁₂Ca₆Fe₃Zr₃[Si₃O₉]₂[Si₉O₂₄(OH)₃]₂, 基于阳离子法 Si=24 计算晶体化学式(表 2; Johnsen et al., 1999; Pfaff et al., 2010; Mikhailova et al., 2020)。

异性石整体富集轻稀土元素而亏损重稀土元素, 在球粒陨石标准化配分模式图中呈平缓右倾型, 铕负异常显著($\delta\text{Eu}=0.03$)(图 4a), 其中早期异性石稀土元素总量($2.576 \times 10^{-6} \sim 3.766 \times 10^{-6}$)较晚期($2.296 \times 10^{-6} \sim$

表 1 巴什苏洪矿床异性石电子探针分析结果

Tab. 1 The Electron Probe Micro-Analysis (EPMA) results of eudialyte from the Bashisuhong deposit

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
阶段	早期	早期	早期	早期	早期	早期	早期	早期	早期	早期	早期	早期
Nb ₂ O ₅	0.41	0.55	0.36	0.34	0.22	0.44	0.17	0.36	0.21	0.46	0.77	0.45
SiO ₂	52.83	52.25	52.91	52.62	53.00	53.09	53.03	53.07	52.90	52.41	51.97	52.21
TiO ₂	0.83	0.42	0.90	1.07	0.83	0.83	1.02	0.82	0.89	0.85	0.66	0.83
ZrO ₂	11.31	10.49	10.90	10.87	11.02	11.41	11.22	11.19	11.86	10.45	10.77	11.38
La ₂ O ₃	0.00	0.08	0.00	0.05	0.00	0.05	0.00	0.00	0.05	0.00	0.16	0.07
Ce ₂ O ₃	0.23	0.12	0.13	0.07	0.13	0.15	0.00	0.14	0.07	0.12	0.05	0.15
Al ₂ O ₃	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.00	0.02
FeO	6.44	6.15	6.46	5.92	6.49	6.33	6.57	6.33	6.12	6.07	6.41	6.61
MnO	0.14	0.24	0.13	0.22	0.20	0.13	0.23	0.14	0.18	0.27	0.35	0.14
MgO	0.01	0.02	0.03	0.03	0.00	0.01	0.03	0.00	0.03	0.02	0.03	0.02
CaO	15.79	16.00	15.82	16.26	15.96	15.91	16.04	15.98	16.20	16.41	16.63	16.47
SrO	0.11	0.13	0.14	0.08	0.11	0.06	0.06	0.18	0.21	0.29	0.17	0.20
Na ₂ O	8.00	7.13	7.38	8.16	7.69	8.27	8.38	8.15	7.31	8.50	7.97	8.13
K ₂ O	0.63	0.60	0.56	0.65	0.57	0.60	0.58	0.65	0.66	0.64	0.64	0.66
Cl	1.75	1.85	1.81	1.74	1.82	1.86	1.75	1.85	1.78	1.86	1.78	1.76
Total	98.09	95.65	97.12	97.71	97.71	98.76	98.75	98.51	98.08	97.95	98.11	99.02
A.p.f.u.												
Nb	0.030	0.041	0.027	0.025	0.016	0.032	0.012	0.026	0.015	0.034	0.057	0.032
Si	8.498	8.586	8.558	8.481	8.537	8.489	8.471	8.504	8.501	8.462	8.410	8.385
Ti	0.100	0.052	0.109	0.130	0.100	0.099	0.122	0.098	0.108	0.103	0.080	0.100
Zr	0.887	0.841	0.860	0.855	0.865	0.889	0.874	0.874	0.929	0.823	0.850	0.891
La	0.000	0.005	0.000	0.003	0.000	0.003	0.000	0.000	0.003	0.000	0.010	0.004
Ce	0.014	0.007	0.008	0.004	0.008	0.009	0.000	0.009	0.004	0.007	0.003	0.009
Al	0.002	0.002	0.000	0.002	0.000	0.002	0.002	0.004	0.004	0.002	0.001	0.004
Fe	0.867	0.845	0.874	0.798	0.874	0.847	0.878	0.849	0.823	0.820	0.867	0.887
Mn	0.019	0.034	0.018	0.030	0.028	0.017	0.030	0.020	0.025	0.037	0.048	0.019
Mg	0.003	0.006	0.007	0.008	0.000	0.002	0.007	0.001	0.007	0.004	0.008	0.005
Ca	2.721	2.816	2.742	2.809	2.755	2.726	2.746	2.744	2.790	2.839	2.884	2.835
Sr	0.011	0.012	0.013	0.008	0.011	0.005	0.005	0.016	0.020	0.027	0.016	0.018
Na	2.495	2.271	2.314	2.550	2.402	2.565	2.596	2.532	2.277	2.662	2.502	2.532
K	0.130	0.126	0.116	0.133	0.117	0.122	0.118	0.133	0.136	0.131	0.133	0.136
Cl	0.468	0.504	0.487	0.467	0.488	0.493	0.466	0.492	0.474	0.499	0.478	0.469
Nb ₂ O ₅	0.45	0.67	0.24	0.61	0.29	0.22	0.36	0.20	0.39	0.31	0.28	0.84
SiO ₂	51.57	49.96	51.72	50.55	51.57	51.57	51.31	51.93	51.49	51.79	52.16	50.76
TiO ₂	0.74	0.47	1.21	0.59	0.70	1.64	0.61	1.13	1.07	1.23	0.91	0.68
ZrO ₂	11.03	10.75	11.32	10.64	11.41	10.70	11.17	10.48	10.19	10.00	10.81	11.04
La ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.08	0.07	0.13	0.00	0.07	0.00	0.02	0.00	0.11

续表 1

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Ce ₂ O ₃	0.09	0.39	0.27	0.17	0.18	0.28	0.15	0.05	0.22	0.19	0.21	0.40
Al ₂ O ₃	0.01	0.02	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.00	0.02	0.00
FeO	6.39	6.25	6.78	5.85	5.87	5.42	5.98	5.81	5.86	6.32	6.26	5.98
MnO	0.27	0.31	0.26	0.35	0.32	0.28	0.32	0.18	0.14	0.21	0.26	0.27
MgO	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.04
CaO	14.97	15.46	14.70	16.51	16.75	16.82	16.64	16.84	16.86	16.74	16.81	17.02
SrO	0.04	0.09	0.14	0.27	0.01	0.23	0.11	0.10	0.11	0.14	0.13	0.15
Na ₂ O	7.68	7.90	7.13	7.26	6.98	7.03	6.83	7.02	6.76	6.91	6.90	8.05
K ₂ O	0.55	0.63	0.56	0.67	0.63	0.58	0.68	0.66	0.67	0.62	0.67	0.68
Cl	1.77	1.71	1.85	1.68	1.69	1.72	1.64	1.63	1.70	1.64	1.66	1.68
Total	95.26	94.29	95.76	94.88	96.23	96.32	95.49	96.25	95.12	96.30	96.99	97.75
A.p.f.u.												
Nb	0.033	0.051	0.018	0.046	0.021	0.017	0.027	0.015	0.029	0.023	0.021	0.062
Si	8.531	8.420	8.519	8.441	8.466	8.439	8.478	8.492	8.507	8.478	8.487	8.306
Ti	0.093	0.060	0.150	0.074	0.087	0.201	0.076	0.139	0.133	0.151	0.111	0.083
Zr	0.890	0.883	0.909	0.867	0.913	0.853	0.900	0.836	0.821	0.798	0.858	0.881
La	0.000	0.000	0.000	0.005	0.004	0.008	0.000	0.004	0.000	0.001	0.000	0.007
Ce	0.006	0.024	0.016	0.010	0.011	0.017	0.009	0.003	0.013	0.012	0.013	0.024
Al	0.001	0.004	0.000	0.004	0.000	0.000	0.001	0.003	0.003	0.001	0.004	0.000
Fe	0.884	0.881	0.934	0.817	0.806	0.742	0.827	0.795	0.809	0.866	0.852	0.819
Mn	0.038	0.044	0.036	0.049	0.044	0.039	0.044	0.025	0.020	0.029	0.036	0.038
Mg	0.000	0.004	0.001	0.000	0.002	0.001	0.001	0.005	0.001	0.003	0.004	0.009
Ca	2.653	2.791	2.595	2.954	2.947	2.948	2.946	2.950	2.985	2.936	2.930	2.984
Sr	0.004	0.009	0.013	0.026	0.001	0.022	0.011	0.009	0.010	0.014	0.012	0.015
Na	2.462	2.581	2.275	2.351	2.222	2.231	2.187	2.225	2.166	2.193	2.177	2.554
K	0.117	0.136	0.118	0.142	0.132	0.122	0.143	0.138	0.140	0.130	0.139	0.141
Cl	0.486	0.478	0.506	0.465	0.461	0.469	0.450	0.443	0.467	0.446	0.450	0.457

注: 主量元素含量为%。

3.345×10^{-6})略高(表 2)。在微量元素-原始地幔标准化图解中, 两个阶段异性石均显示出 Nb、Ta、Zr、Hf、Th、U 正异常及 Ba、Sr、P、Ti 负异常(图 4b)。从核部到边部, 微量元素大致表现出 Mn/Fe 值升高, Σ REE 上升, $(La/Yb)_N$ 值升高, Zr/Hf 值降低, Nb/Ta 值升高的规律性变化(表 3; 图 5)。

4 讨论

4.1 异性石成因

异性石是高度演化过碱性岩的特征矿物, 其成因

类型主要有岩浆、热液及变质重结晶 3 类(Mitchell et al., 2006; 郭斌等, 2018; Atanasova et al., 2020)。变质重结晶成因的异性石通常表现出 LREE 亏损、HREE 富集的特征, 且 Y/Ho、Nb/Ta、Zr/Hf 值显著偏离 CHARAC 范围(Atanasova et al., 2020)。然而, 巴什苏洪异性石呈 LREE 富集、HREE 亏损的右倾型配分模式, 且 Y/Ho、Nb/Ta、Zr/Hf 值均符合 CHARAC 范围(图 6), 因此可排除其变质重结晶成因。巴什苏洪霓辉正长岩与大理岩接触带广泛发育霓长岩化反应边, 且异性石在反应边附近显著聚集, 暗示霓长岩化作用可能促进了异性石结晶, 但其究竟发生于岩浆期还是

表 2 异性石晶体化学式计算结果

Tab. 2 Eudialyte crystal-chemical formula calculation results

点号	异性石的晶体化学式
1	(Na _{7.047} , K _{0.365})(Ca _{7.686} , Ce _{0.038})(Fe _{2.447} , Mn _{0.054})(Zr _{2.506} , Ti _{0.284} , Nb _{0.084})[Si ₃ O ₉] ₂ [Si ₉ O ₂₄ (OH) ₃] ₂
2	(Na _{6.350} , K _{0.352})(Ca _{7.875} , La _{0.014} , Ce _{0.020})(Fe _{2.363} , Mn _{0.093})(Zr _{2.350} , Ti _{0.145} , Nb _{0.114})[Si ₃ O ₉] ₂ [Si ₉ O ₂₄ (OH) ₃] ₂
3	(Na _{6.491} , K _{0.324})(Ca _{7.689} , Ce _{0.022})(Fe _{2.451} , Mn _{0.050})(Zr _{2.411} , Ti _{0.307} , Nb _{0.074})[Si ₃ O ₉] ₂ [Si ₉ O ₂₄ (OH) ₃] ₂
4	(Na _{7.217} , K _{0.378})(Ca _{7.946} , La _{0.008} , Ce _{0.012})(Fe _{2.258} , Mn _{0.085})(Zr _{2.418} , Ti _{0.367} , Nb _{0.070})[Si ₃ O ₉] ₂ [Si ₉ O ₂₄ (OH) ₃] ₂
5	(Na _{6.752} , K _{0.329})(Ca _{7.744} , Ce _{0.022})(Fe _{2.458} , Mn _{0.077})(Zr _{2.434} , Ti _{0.283} , Nb _{0.045})[Si ₃ O ₉] ₂ [Si ₉ O ₂₄ (OH) ₃] ₂
6	(Na _{7.249} , K _{0.346})(Ca _{7.707} , La _{0.008} , Ce _{0.025})(Fe _{2.393} , Mn _{0.050})(Zr _{2.515} , Ti _{0.282} , Nb _{0.090})[Si ₃ O ₉] ₂ [Si ₉ O ₂₄ (OH) ₃] ₂
7	(Na _{7.354} , K _{0.335})(Ca _{7.778} , Fe _{2.487} , Mn _{0.088})(Zr _{2.476} , Ti _{0.347} , Nb _{0.035})[Si ₃ O ₉] ₂ [Si ₉ O ₂₄ (OH) ₃] ₂
8	(Na _{7.147} , K _{0.375})(Ca _{7.743} , Ce _{0.023})(Fe _{2.394} , Mn _{0.054})(Zr _{2.468} , Ti _{0.279} , Nb _{0.074})[Si ₃ O ₉] ₂ [Si ₉ O ₂₄ (OH) ₃] ₂
9	(Na _{6.431} , K _{0.382})(Ca _{7.875} , La _{0.008} , Ce _{0.012})(Fe _{2.322} , Mn _{0.069})(Zr _{2.624} , Ti _{0.304} , Nb _{0.043})[Si ₃ O ₉] ₂ [Si ₉ O ₂₄ (OH) ₃] ₂
10	(Na _{7.547} , K _{0.374})(Ca _{8.052} , Ce _{0.020})(Fe _{2.325} , Mn _{0.105})(Zr _{2.334} , Ti _{0.293} , Nb _{0.095})[Si ₃ O ₉] ₂ [Si ₉ O ₂₄ (OH) ₃] ₂
11	(Na _{7.137} , K _{0.377})(Ca _{8.229} , La _{0.027} , Ce _{0.008})(Fe _{2.476} , Mn _{0.137})(Zr _{2.425} , Ti _{0.229} , Nb _{0.161})[Si ₃ O ₉] ₂ [Si ₉ O ₂₄ (OH) ₃] ₂
12	(Na _{7.247} , K _{0.387})(Ca _{8.112} , La _{0.012} , Ce _{0.025})(Fe _{2.541} , Mn _{0.055})(Zr _{2.551} , Ti _{0.287} , Nb _{0.094})[Si ₃ O ₉] ₂ [Si ₉ O ₂₄ (OH) ₃] ₂
78	(Na _{6.930} , K _{0.327})(Ca _{7.465} , Ce _{0.015})(Fe _{2.487} , Mn _{0.106})(Zr _{2.503} , Ti _{0.259} , Nb _{0.095})[Si ₃ O ₉] ₂ [Si ₉ O ₂₄ (OH) ₃] ₂
79	(Na _{7.359} , K _{0.386})(Ca _{7.958} , Ce _{0.069})(Fe _{2.511} , Mn _{0.126})(Zr _{2.518} , Ti _{0.170} , Nb _{0.146})[Si ₃ O ₉] ₂ [Si ₉ O ₂₄ (OH) ₃] ₂
80	(Na _{6.415} , K _{0.332})(Ca _{7.309} , Ce _{0.046})(Fe _{2.631} , Mn _{0.102})(Zr _{2.562} , Ti _{0.422} , Nb _{0.050})[Si ₃ O ₉] ₂ [Si ₉ O ₂₄ (OH) ₃] ₂
81	(Na _{6.684} , K _{0.406})(Ca _{8.399} , La _{0.014} , Ce _{0.030})(Fe _{2.323} , Mn _{0.141})(Zr _{2.464} , Ti _{0.211} , Nb _{0.131})[Si ₃ O ₉] ₂ [Si ₉ O ₂₄ (OH) ₃] ₂
82	(Na _{6.299} , K _{0.374})(Ca _{8.353} , La _{0.012} , Ce _{0.031})(Fe _{2.285} , Mn _{0.126})(Zr _{2.590} , Ti _{0.245} , Nb _{0.061})[Si ₃ O ₉] ₂ [Si ₉ O ₂₄ (OH) ₃] ₂
83	(Na _{6.344} , K _{0.344})(Ca _{8.388} , La _{0.022} , Ce _{0.048})(Fe _{2.110} , Mn _{0.110})(Zr _{2.428} , Ti _{0.574} , Nb _{0.046})[Si ₃ O ₉] ₂ [Si ₉ O ₂₄ (OH) ₃] ₂
84	(Na _{6.195} , K _{0.406})(Ca _{8.340} , Ce _{0.026})(Fe _{2.339} , Mn _{0.127})(Zr _{2.548} , Ti _{0.215} , Nb _{0.076})[Si ₃ O ₉] ₂ [Si ₉ O ₂₄ (OH) ₃] ₂
85	(Na _{6.291} , K _{0.389})(Ca _{8.339} , La _{0.008} , Ce _{0.042})(Fe _{2.246} , Mn _{0.070})(Zr _{2.362} , Ti _{0.393} , Nb _{0.042})[Si ₃ O ₉] ₂ [Si ₉ O ₂₄ (OH) ₃] ₂
86	(Na _{6.110} , K _{0.398})(Ca _{8.421} , Ce _{0.038})(Fe _{2.284} , Mn _{0.055})(Zr _{2.316} , Ti _{0.375} , Nb _{0.082})[Si ₃ O ₉] ₂ [Si ₉ O ₂₄ (OH) ₃] ₂
87	(Na _{6.209} , K _{0.367})(Ca _{8.312} , La _{0.003} , Ce _{0.032})(Fe _{2.449} , Mn _{0.082})(Zr _{2.260} , Ti _{0.429} , Nb _{0.065})[Si ₃ O ₉] ₂ [Si ₉ O ₂₄ (OH) ₃] ₂
88	(Na _{6.156} , K _{0.393})(Ca _{8.288} , Ce _{0.035})(Fe _{2.409} , Mn _{0.101})(Zr _{2.426} , Ti _{0.315} , Nb _{0.058})[Si ₃ O ₉] ₂ [Si ₉ O ₂₄ (OH) ₃] ₂
89	(Na _{7.380} , K _{0.410})(Ca _{8.623} , La _{0.019} , Ce _{0.069})(Fe _{2.365} , Mn _{0.108})(Zr _{2.546} , Ti _{0.242} , Nb _{0.180})[Si ₃ O ₉] ₂ [Si ₉ O ₂₄ (OH) ₃] ₂

热液期, 仍需进一步厘定。该霓长岩化反应边厚度较薄、形态规则, 不发育分支脉体。岩脉内部矿物呈粒状镶嵌结构, 未见典型交代结构或热液矿物。异性石

呈完好的自形晶, 发育典型的岩脉振荡环带, 并与条纹长石、霓辉石等矿物平衡共生, 且常作为包裹体被包裹于条纹长石中。此外, 异性石稀土配分模式与全

表 3 巴什苏洪矿床异性石的 LA-ICP-MS 微量元素(10⁻⁶)分析结果

Tab. 3 LA-ICP-MS trace element (10⁻⁶) analysis results of eudialyte from the BashisuHong deposit

序号	1-01	1-02	1-03	1-04	1-05	1-06	4-7	4-8	4-9	5-10
阶段	早期	早期	早期	早期	早期	早期	晚期	晚期	晚期	晚期
Li	28.0	22.9	32.5	31.6	26.8	40.0	20.4	14.9	21.7	18.1
P	53.7	42.5	61.0	96.7	37.9	0.0	21.9	30.2	31.0	40.3
K	6 314.8	5 567.2	5 911.2	5 880.5	5 896.2	5 752.2	6 062.4	5 584.1	5 152.8	5 518.8
Sc	49.9	48.1	47.3	47.6	47.2	47.5	48.7	48.2	46.9	47.8
Ti	6 610.0	6 921.4	7 645.8	7 444.3	6 615.1	7 287.5	6 007.6	6 404.2	5 513.2	5 712.4
Zn	96.3	101.8	95.4	92.8	91.7	88.1	64.1	58.8	65.9	64.9

续表 3

序号	1-01	1-02	1-03	1-04	1-05	1-06	4-7	4-8	4-9	5-10
Ga	4.0	3.7	3.8	3.3	3.6	3.6	3.4	2.8	3.0	4.0
Rb	84.7	73.6	73.8	70.9	66.9	70.4	85.9	95.1	86.6	82.1
Sr	935.4	895.5	880.5	873.2	873.3	858.5	956.6	892.6	864.4	936.8
Y	1 269.9	1 149.3	1 097.0	1 108.5	1 171.9	1 159.3	1 316.5	1 438.9	1 346.2	1 059.7
Nb	3 361.3	3 542.6	2 847.9	2 360.1	2 370.5	2 022.8	3 110.5	2 058.6	2 166.7	3 691.1
Mo	46.6	49.0	48.9	44.4	44.4	41.9	39.9	35.2	39.7	45.8
Sn	363.5	349.6	388.6	358.7	293.5	324.9	425.7	404.1	311.9	443.7
Cs	84.5	71.5	71.7	72.2	69.0	70.5	85.9	81.8	74.9	81.4
Ba	123.4	115.3	109.7	108.3	112.4	108.1	199.5	172.4	167.3	206.1
La	481.4	452.3	400.1	384.7	364.4	359.2	468.3	375.3	376.9	459.8
Ce	1 035.4	959.7	890.9	869.8	826.2	823.7	947.9	756.2	758.6	880.4
Pr	119.2	112.4	105.7	104.3	100.6	101.6	105.0	85.2	84.3	94.4
Nd	500.0	478.0	472.3	467.2	453.8	449.0	420.4	345.0	345.9	358.6
Sm	131.6	126.8	123.4	124.6	119.4	122.2	110.9	94.8	95.2	85.2
Eu	4.8	4.5	4.3	4.5	4.4	4.3	4.1	3.1	3.2	2.8
Gd	164.7	155.2	144.4	141.7	140.6	139.8	147.4	132.9	142.7	112.0
Tb	33.1	29.5	27.1	26.9	26.8	26.9	29.8	28.3	29.3	22.4
Dy	231.0	197.8	183.6	184.3	188.7	184.2	214.5	210.7	207.6	161.9
Ho	50.8	43.7	40.8	42.0	44.3	43.3	49.7	49.4	46.0	37.7
Er	152.8	129.1	123.0	128.8	131.5	130.9	152.2	151.7	138.2	117.9
Tm	23.4	20.0	18.9	19.5	21.0	20.7	23.3	23.5	21.3	19.1
Yb	164.3	137.4	138.5	146.3	151.3	147.4	167.5	165.1	150.4	141.1
Lu	23.7	20.5	21.3	22.2	22.6	22.4	24.5	23.8	21.3	22.1
Hf	2 409.6	2 024.4	1 863.5	1 914.8	1 925.8	1 863.1	2 228.2	2 024.1	2 081.2	2 079.3
Ta	313.8	291.7	227.2	210.1	211.1	201.3	330.1	257.3	270.2	311.9
Th	140.6	16.2	11.6	10.9	8.7	9.2	263.2	223.8	131.5	279.1
U	38.4	30.6	28.0	25.2	19.4	21.5	146.6	90.0	21.8	146.5
ΣREE	3 116.2	2 866.8	2 694.3	2 666.7	2 595.6	2 575.5	2 865.3	2 444.8	2 420.8	2 515.4
Eu*	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
(La/Yb) _N	2.1	2.4	2.1	1.9	1.7	1.8	2.0	1.6	1.8	2.3
LREE/HREE	2.7	2.9	2.9	2.8	2.6	2.6	2.5	2.1	2.2	3.0
Li	21.3	11.3	27.9	22.7	37.3	35.2	31.4	41.5	42.9	34.0
P	53.3	67.8	67.2	40.4	14.7	75.6	78.9	0.0	50.3	52.9
K	5 900.4	6 173.4	6 290.0	6 373.1	5 219.2	5 368.5	5 509.9	5 649.2	5 769.3	5 523.9
Sc	46.4	46.8	46.4	44.9	47.7	47.5	46.7	44.2	47.3	47.8
Ti	6 341.7	8 136.8	10 150	11 300	6 785.1	8 056.6	9 523.4	13 037.5	8 624.7	6 798.6
Zn	97.2	84.4	78.5	78.8	61.8	81.2	84.8	86.7	92.8	107.8
Ga	5.1	4.7	4.2	4.0	4.8	4.9	4.8	4.5	4.8	5.2
Rb	86.0	92.6	100.1	97.1	77.8	82.2	90.4	91.9	95.5	97.9

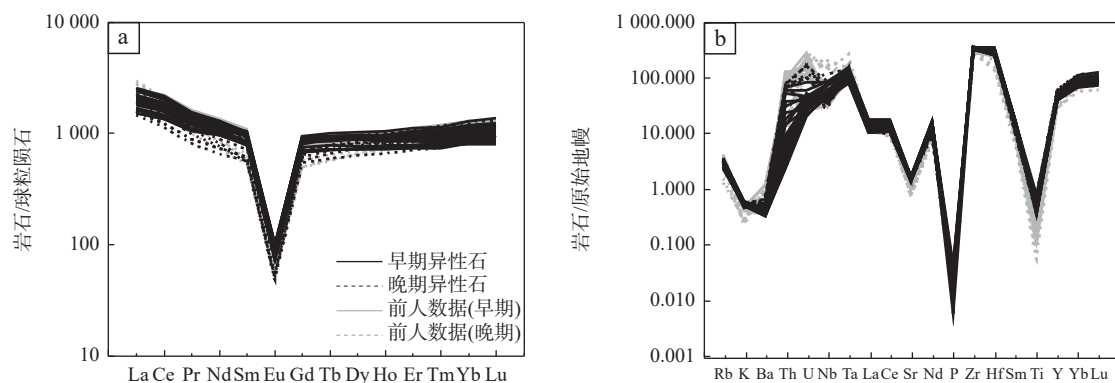
续表 3

序号	1-01	1-02	1-03	1-04	1-05	1-06	4-7	4-8	4-9	5-10
Sr	929.4	895.5	843.9	831.9	985.2	978.3	961.5	904.0	960.3	996.0
Y	1 346.7	1 465.6	1 530.8	1 579.6	1 229.0	1 285.8	1 407.9	1 551.0	1 347.1	1 359.5
Nb	3 435.5	2 274.2	1 180.3	1 314.4	2 620.9	2 627.4	1 929.1	1 593.2	2 541.6	3 760.1
Mo	45.0	31.9	22.8	23.7	35.2	36.2	31.1	30.4	35.4	52.6
Sn	387.6	498.8	614.5	690.9	341.8	427.6	551.1	760.5	459.8	449.1
Cs	87.0	90.1	95.8	93.7	99.6	93.9	99.0	100.5	101.2	98.8
Ba	169.2	161.9	152.4	150.6	176.5	165.7	156.7	138.8	150.5	160.6
La	535.9	459.8	398.1	401.8	510.4	493.4	446.6	425.4	503.9	602.5
Ce	1 164.4	1 011.5	895.7	901.9	1 127.5	1 094.9	1 014.2	976.5	1 125.4	1 308.0
Pr	130.1	118.5	108.4	109.3	131.5	130.2	122.9	120.8	131.3	147.0
Nd	531.0	507.9	477.4	475.8	557.8	552.0	539.2	530.4	565.6	602.2
Sm	140.8	138.1	135.9	133.6	152.4	155.5	154.6	155.0	154.0	154.7
Eu	4.9	4.9	4.9	4.8	5.4	5.7	5.6	5.6	5.8	5.8
Gd	171.9	177.1	173.1	173.2	184.7	190.8	188.4	196.1	187.6	187.7
Tb	32.7	34.0	34.0	34.4	34.5	35.6	34.9	37.9	35.2	35.3
Dy	221.5	239.4	237.4	246.6	228.9	239.2	244.2	263.3	246.4	242.5
Ho	50.5	54.7	56.2	57.7	50.1	53.0	54.8	59.8	53.6	53.3
Er	151.3	163.4	174.3	181.9	147.4	155.5	167.7	186.2	160.0	158.5
Tm	23.4	25.9	28.4	30.0	22.6	23.7	26.5	29.5	25.4	24.1
Yb	163.3	186.2	207.8	219.3	157.9	172.6	193.2	222.3	183.3	165.7
Lu	23.9	27.5	30.4	32.6	23.7	26.7	30.2	35.2	28.4	24.6
Hf	2 198.5	2 194.0	1 982.4	1 881.6	2 369.1	2 267.4	2 130.8	2 016.1	2 208.2	2 294.2
Ta	337.3	348.5	337.6	356.6	283.8	307.1	264.7	264.3	297.4	327.6
Th	237.0	271.6	213.3	224.2	117.2	34.3	16.6	21.7	25.0	251.3
U	104.2	148.8	36.2	35.4	45.3	32.9	38.4	50.1	38.1	81.0
ΣREE	3 345.5	3 148.8	2 962.0	3 003.0	3 334.7	3 328.8	3 222.8	3 244.2	3 405.9	3 711.9
Eu*	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
(La/Yb) _N	2.4	1.8	1.4	1.3	2.3	2.1	1.7	1.4	2.0	2.6
LREE/HREE	3.0	2.5	2.2	2.1	2.9	2.7	2.4	2.2	2.7	3.2

岩稀土元素特征一致(Xie et al., 2024),这些野外产状、岩相学观察和地球化学证据共同表明研究区两期异性石均为岩浆成因。

异性石作为过碱性岩的标志性矿物,通常为碱性玄武质或霞石质基性岩浆经极端结晶分异作用的产物(Elburg et al., 2017; Marks et al., 2017; Braunger et al., 2020)。源于碱性玄武质的岩浆因早期斜长石大量分离结晶,常显示显著的 Eu 和 Sr 负异常;而霞石质岩浆体系因缺乏斜长石的分离结晶,一般不具有此类异常(Schilling et al., 2011b; Marks et al., 2017)。巴什苏洪霓辉正长岩具有显著的 Eu、Sr 负异常,指示其母岩浆可能为碱性玄武质岩浆(Marks et al., 2011; Estrade et al., 2014; Marks et al., 2017; Xie et al., 2024),并经历了以斜长石为代表的大规模分离结晶作用,导致 Zr、Nb 和 REE 在残余熔体中的富集(Xie et al., 2024),为岩浆后期异性石的大量结晶提供了最基本的物质基础。

除了 Zr 含量达到饱和以外,异性石结晶还需同时满足过碱性熔体具高 Cl、低 F 含量以及达到临界过冷度的条件(Giehl et al., 2014; Simpson et al., 2025)。霓长岩化过程中的物质交换使得大量的 Ca 加入岩浆,



前人数据引自 Xie et al., (2024)

图4 异性石的稀土元素-球粒陨石标准化模式图(a)和微量元素-原始地幔标准化蛛网图(b)

Fig. 4 (a) Chondrite-normalized REE and (b) mantle-normalized immobile trace element patterns of eudialyte samples from aegirine syenite

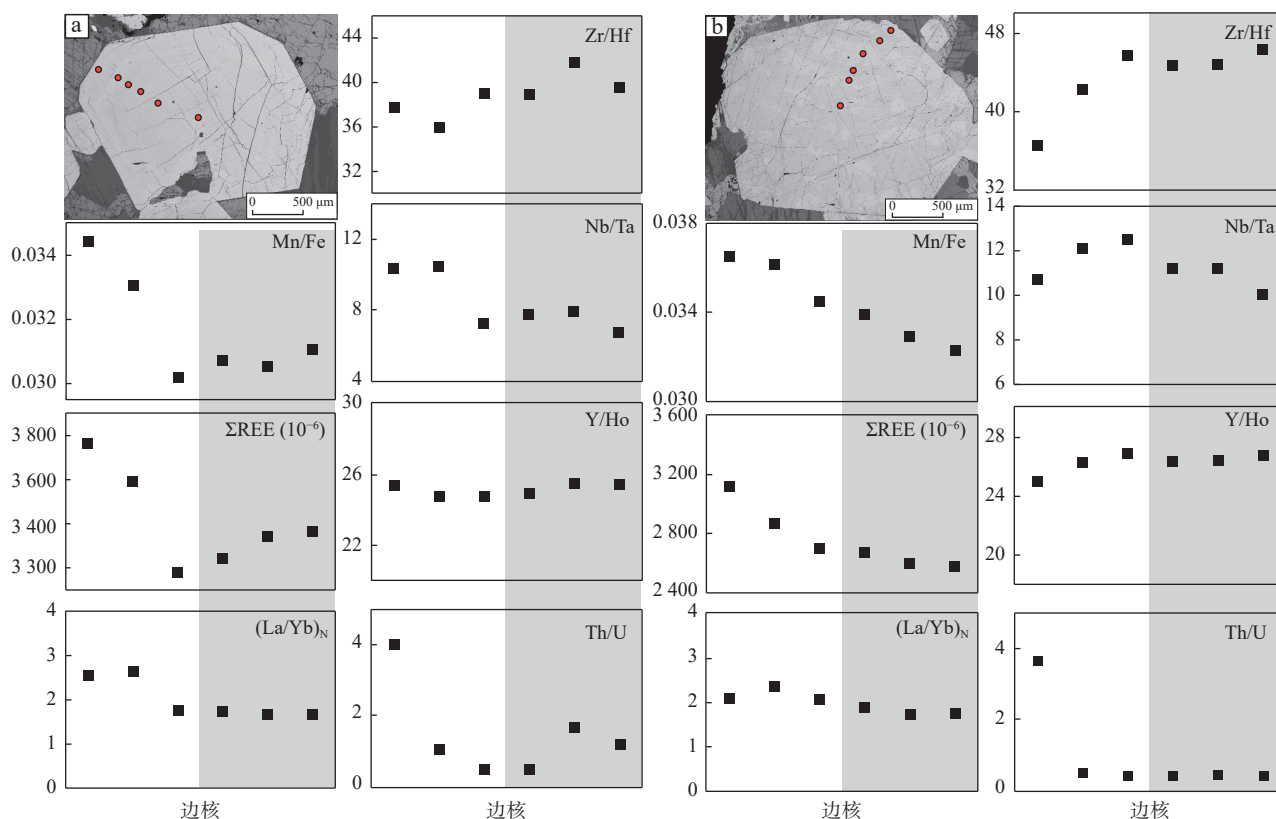


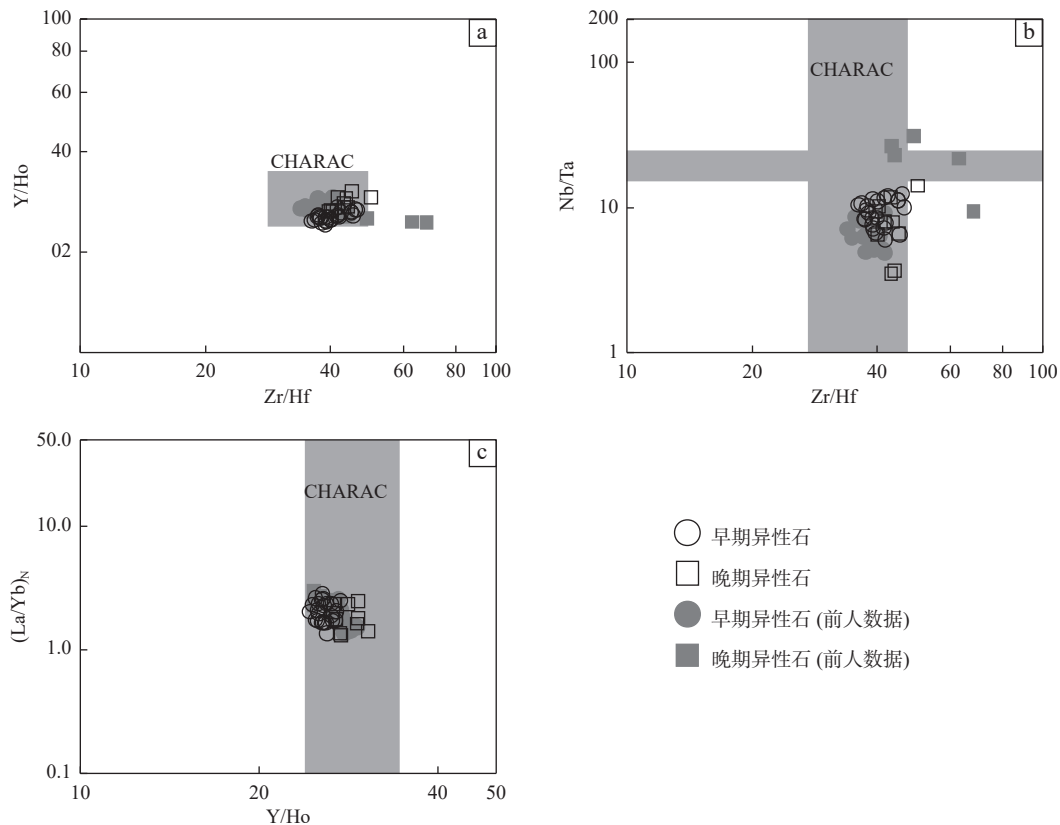
图5 早期异性石颗粒由核到边的 LA-ICP-MS 微量元素成分变化示意图

Fig. 5 Diagram of core-to-rim compositional variation in early-stage eudialyte as revealed by EPMA

可有效提高熔体中 Cl 的溶解度, 并降低固相线、延长结晶分异时间, HFSE 和 REE 得以进一步富集 (Estrade et al., 2018)。霓辉正长岩中未见萤石矿物, 表明岩浆体系中 F 含量较低。岩脉侵位围岩所产生的冷却效应使熔体进入临界过冷状态, 直接触发 Zr 等 HFSE 以独立矿物(异性石)形式大量结晶, 而不是以类质同象形式分散于硅酸盐矿物中 (Simpson et al., 2025)。霓辉

石、碱性长石等富碱矿物的结晶消耗了熔体中的碱质、钙质组分, 显著降低了 HFSE、REE 在熔体中的溶解度, 共同促进了异性石的结晶。

早期结晶的异性石形成时熔体中 Fe 含量较高而 Mn 含量较低, 导致其 Mn/Fe 值整体偏低 (0.01~0.06); 随着透辉石、霓辉石等富 Fe 矿物的晶出, 熔体中 Fe 含量逐渐降低。由于体系中缺乏主要富 Mn 矿



前人数据引自 Xie et al., (2024)

图6 异性石的 Y/Ho vs. Zr/Hf 关系图(a)、Nb/Ta vs. Zr/Hf 关系图(b)、 $(La/Yb)_N$ vs. Y/Ho 关系图(c)

Fig. 6 (a) Y/Ho versus Zr/Hf, (b) Nb/Ta versus Zr/Hf and (c) $(La/Yb)_N$ versus Y/Ho content diagrams in eudialyte

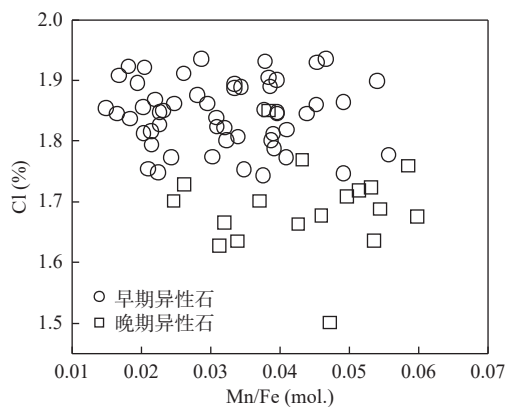
物相, Mn 在残余熔体中相对富集, 导致晚期异性石的 Mn/Fe 值整体呈上升趋势。需要说明的是, 两期异性石的 Mn/Fe 值存在一定重叠, 表明仅依靠 Mn/Fe 值难以独立判别异性石的结晶时序, 需结合 Cl 含量进行综合判断(图 7)。早期异性石整体具有更高的 Cl 含量

(1.70%~1.95%), 而晚期异性石的 Cl 含量相对较低(1.50%~1.75%), 显示出随岩浆演化 Cl 含量逐渐降低的趋势(图 7)。这一特征与成因机制高度吻合: 早期异性石结晶时, 熔体中 Cl 含量较高, 且早期异性石对 Cl 的显著消耗, 导致晚期熔体中 Cl 含量下降; 晚期熔体中 Fe 被富 Fe 矿物大量带走, 使得异性石的 Mn/Fe 值整体升高。

综上所述, 巴什苏洪地区两期异性石均为岩浆成因, 其形成与碱性玄武质母岩浆的极端结晶分异、霓长岩化作用的物质交换以及围岩冷却触发的临界过冷条件密切相关; 而 Mn/Fe 值与 Cl 含量的协同变化, 不仅记录了岩浆演化过程中 Fe、Cl 等元素的分异行为, 也为厘定异性石的结晶时序提供了关键地球化学约束。

4.2 对稀有金属成矿的指示意义

塔里木大火成岩省第三阶段的碱性岩浆活动众多, 沿塔里木盆地北缘、南天山造山带南缘呈带状分布, 形成了一条碱性岩带(刘楚雄等, 2004; 邹天人等, 2006; Chen et al., 2023; Wu et al., 2024; Yuan et al., 2024; Jiang et al., 2025)。哈拉峻地区位于该碱性岩带的西端,



前人数据引自 Xie et al., (2024)

图7 异性石 Mn/Fe 值与 Cl (%) 关系图

Fig. 7 Mn/Fe ratio versus Cl (%) content diagram in Eudialyte

至少发育8个大小不一的碱性花岗岩,包括塔木、克兹尔托、霍什布拉克、喀拉多维、古尔拉勒、哈拉峻岩体、巴什苏洪杂岩体等。这些岩体多含霓石、霓辉石、钠铁闪石等碱性暗色矿物,属典型的A型花岗岩(邹天人等, 2002; 童英等, 2010; 杨林春等, 2016; 宗兆建, 2022; Chen et al., 2023; Wu et al., 2024; Jiang et al., 2025)。此外, 这些岩体与碱性岩带上的其他岩体一致, 常发育一定程度的稀有和稀土矿化, 虽然大多储量可观, 但品位通常较低, 开采难度大, 经济价值不显著(邹天人等, 2002, 2006; 秦克章等, 2012; 刘春花等, 2014; 朱圣柱等, 2023)。巴什苏洪霓辉正长岩显示出稀有稀土金属元素的高度富集, 其中矿石矿物异性石产于碱性岩与大理岩的接触带上, Zr、Nb、La、Ce、Y含量远高于最低工业品位, 具有极大开发价值和经济潜力。

精细年代学研究揭示, 巴什苏洪杂岩体的岩浆活动时代主要集中于早二叠世末期(约270~280 Ma), 与区域上二叠世塔里木大火成岩省第三阶段的岩浆事件一致, 指示其成因与区域上其他碱性岩浆活动具有相关性(杨林春等, 2016; Ma et al., 2016; 宗兆建, 2022; Xie et al., 2024)。碱性岩通常为富集的幔源岩浆经低程度部分熔融、在低压高温的条件下经极端的分离结晶形成的, 并侵位于浅地表环境(Marks et al., 2017)。由碱性玄武质岩浆极度分异产生地过碱性岩, 由于斜长石、单斜辉石等富Ca矿物的分离结晶, 往往富碱而贫Ca。然而, 巴什苏洪霓辉正长岩具有很高且变化范围较大的CaO含量(1.03%~13.65%; Xie et al., 2024), 显著高于巴什苏洪其他岩性。研究区异性石聚集区仅见于岩体与大理岩接触部位, 表明过碱性岩中的异性石成因与大理岩密切相关。此外, 岩脉内富硅灰石捕虏体和霓长岩化反应边的存在(图2), 也表明碱性岩浆-大理岩之间存在广泛而强烈的物质交代作用。巴什苏洪异性石中具有较高的Cl含量, 说明在霓长岩化过程中, 在正长岩与大理岩接触带, 碱性岩浆中的Si向大理岩迁移, 而大理岩中的Ca向碱性岩浆中活化, Ca的加入提高了岩浆中Cl的溶解度, 并降低固相线、延长结晶分异时间, HFSE得以进一步超常富集; 随后在降温过程中, 发生Zr的饱和并最终形成以异性石为代表地过碱性岩矿物组合(Estrade et al., 2014, 2018)。

近期, 该碱性岩带上如波孜果尔和依兰里克等碱性岩与大理岩的接触部位同样发现有异性石的矿化现象, 表明碱性岩与大理岩的共同作用可能是稀有稀

土金属元素超常富集的关键, 指示碱性岩与大理岩的接触带可能为异性石成矿的有利部位。

5 结论

(1) 异性石的产状、主量元素和微量元素组分特征揭示巴什苏洪霓辉正长岩中的异性石为岩浆成因, 成母岩岩浆为与碱性玄武岩相当, 并经历了斜长石的高程度分离结晶作用。

(2) 巴什苏洪霓辉正长岩具有显著高的CaO含量, 并含有大量富钙矿物(透辉石、霓辉石、富钙异性石等), 区别于其他过碱性岩。通过观察其特殊的产出位置、与大理岩的接触关系、正长岩中包含的富硅灰石大理岩捕虏体, 以及异性石中高的Cl含量, 认为碱性岩浆同化大理岩中的富CaO物质提高了Cl的溶解度、并进一步富集HFSE、REE, 是形成异性石的关键机制。

(3) 塔里木-南天山接合带发育大量二叠纪碱性岩, 并已在依兰里克和波孜果尔岩体与大理岩接触带发现了异性石矿化, 表明碱性岩与大理岩的接触带是锆等稀有元素成矿的有利部位, 应在今后的勘查过程中加以注意。

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):

- 蔡厚安, 李顺庭, 刘增仁, 等. 新疆巴什苏洪稀有矿床碱性杂岩体地球化学特征及地质意义[J]. 矿产与地质, 2021, 35(4): 670-679.
- CAI Houan, LI Shunting, LIU Zengren, et al., Geochemical characteristics and geological significance of alkaline complex in Bashisu hong rare deposit, Xinjiang[J]. Mineral, Resources and Geology, 2021, 35(4): 670-679.
- 蔡厚安, 杨自安, 王艳丽, 等. 新疆哈拉峻地区碱性岩地质特征及稀有稀土矿找矿远景[J]. 矿产勘查, 2022, 13(Z1): 229-237.
- CAI Houan, YANG Zian, WANG Yanli, et al. Geological characteristics of alkaline rocks and prospecting prospect of REE deposits in Halajun area, Atushi City, Xinjiang, China[J]. Mineral Exploration, 2022, 13(Z1): 229-237.
- 冯守忠. 巴尔哲碱性花岗岩稀有稀土矿床地质特征及成因探讨

- [J]. 矿产与地质, 1993, (1): 43-48.
- FENG Shouzhong. Geological characteristic and ore genesis of rare metal and rare-earth ore deposit in Baerze alkalic granite, Inner Mongolia[J]. Mineral Resources and Geolog, 1993, (1): 43-48.
- 黄河. 中国南天山地区古生代花岗岩与区域地质演化[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013.
- HUANG He. Paleozoic granitoids in the Chinese South Tianshan and its implications for geological evolution of the region[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2013.
- 黄河, 王涛, 童英, 等. 中国西天山古生代岩浆岩时空架构、源区特征及构造背景[J]. 西北地质, 2024, 57(6): 25-43.
- HUANG He, WANG Tao, TONG Ying, et al. Spatial and Temporal Framework, Evolution of Magma Sources, and Tectonic Settings of Paleozoic Magmatic Rocks in West Tianshan, China[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(6): 25-43.
- 黄建华, 吴昌志, 雷如雄, 等. 新疆且干布拉克超大型蛭石矿床的成因与成矿模式[J]. 矿床地质, 2012, 31(2): 359-368.
- HUANG Jianhua, WU Changzhi, LEI Ruxiong, et al. Genesis and ore-forming model of Qieganbulak superlarge vermiculite deposit in Xinjiang[J]. Mineral Deposits, 2012, 31(2): 359-368.
- 姜常义, 卢登蓉, 白开寅, 等. 大陆岩石圈地幔交代作用的产物——且干布拉克蛭石矿床[J]. 岩石学报, 2005, 21(1): 203-212.
- JIANG Changyi, LU Dengrong, BAI Kaiyan, et al. Metasomatism products of continental lithosphere mantle-roseite deposits, Qieganbulake[J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21(1): 203-212.
- 荆德龙, 赵民, 贺永康, 等. 新疆琼皮阡-喀牧马一带 1:5 万矿产地质调查报告[R]. 西安: 中国地质调查局西安地质调查中心, 2022.
- 刘春花, 吴才来, 郜源红, 等. 南天山拜城县波孜果尔 A 型花岗岩类锆石 U-Pb 定年及其 Lu-Hf 同位素组成[J]. 岩石学报, 2014, 30(6): 1595-1614.
- LIU Chunhua, WU Cailai, GAO Yuanhong, et al. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating and Lu-Hf isotopic system of A-type granitoids in South Tianshan, Baicheng County, Xinjiang[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(6): 1595-1614.
- 刘楚雄, 许保良, 邹天人, 等. 塔里木北缘及邻区海西期碱性岩岩石化学特征及其大地构造意义[J]. 新疆地质, 2004, 22(1): 43-49.
- LIU Chuxiong, XU Baoliang, ZOU Tianren, et al. Petrochemistry and tectonic significance of Hercynian alkaline rocks along the northern margin of the Tarim platform and its adjacent area[J]. Xinjiang Geology, 2004, 22(1): 43-49.
- 秦克章, 唐冬梅, 苏本勋, 等. 北疆二叠纪镁铁-超镁铁岩铜、镍矿床的构造背景、岩体类型、基本特征、相对剥蚀程度、含矿性评价标志及成矿潜力分析[J]. 西北地质, 2012, 45(4): 83-116.
- QIN Kezhang, TANG Dongmei, SU Benxun, et al. The tectonic setting, style, basic feature, relative erosion degree, ore-bearing evaluation sign, potential analysis of mineralization of Cu-Ni-bearing Permian mafic-ultramafic complexes, Northern Xinjiang[J]. Northwestern Geology, 2012, 45(4): 83-116.
- 牛亚卓, 史冀忠, 赵国春, 等. 中亚造山带南缘晚石炭世—早二叠世碳酸盐岩台地的建立和消亡[J]. 西北地质, 2024, 57(6): 95-112.
- NIU Yazhuo, SHI Jizhong, ZHAO Guochun, et al. Formation and Demise of Late Carboniferous to Early Permian Carbonate Platforms on the Southern Margin of the Central Asian Orogenic Belt[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(6): 95-112.
- 孙政浩, 秦克章, 毛亚晶, 等. 塔里木北缘波孜果尔碱性(花岗)岩铌-钽-锆-铷-稀土矿床钠铁闪石、霓石特征及意义[J]. 岩石学报, 2021, 37(12): 3687-3716.
- SUN Zhenghao, QIN Kezhang, MAO Yajing, et al. Characteristics and significance of aegirine and arfvedsonite in Boziguoer Nb-Ta-Zr-Rb-REE deposit related to alkaline granite, Xinjiang[J]. Acta Petrologica Sinica, 2021, 37(12): 3687-3716.
- 童英, 王涛, 洪大卫, 等. 北疆及邻区石炭-二叠纪花岗岩时空分布特征及其构造意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2010, 29(6): 619-641.
- TONG Ying, WANG Tao, HONG Dawei, et al. Spatial and temporal distribution of the Carboniferous-Permian granitoids in northern Xinjiang and its adjacent areas, and its tectonic significance[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2010, 29(6): 619-641.
- 王浩. 新疆阿图什巴什苏洪碱性岩副矿物特征及其找矿指示意义[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.
- WANG Hao. Characteristics and Significance for Prospecting of Accessory Minerals in the Bashisuhong Alkaline Rocks, Atushi, Xinjiang[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2019.
- 邬斌, 王汝成, 刘晓东, 等. 辽宁赛马碱性岩体异性石化学成分特征及其蚀变组合对碱性岩浆-热液演化的指示意义[J]. 岩石学报, 2018, 34(6): 1741-1757.
- WU Bin, WANG Rucheng, LIU Xiaodong, et al. Chemical composition and alteration assemblages of eudialyte in the Saima alkaline complex, Liaoning Province, and its implication for alkaline magmatic-hydrothermal evolution[J]. Acta Petrologica Sinica, 2018, 34(6): 1741-1757.
- 吴鸣谦, 马甲栋, 邓军, 等. 巴尔哲铅-铋-铍-稀土矿床成矿精细过程研究[J]. 岩石学报, 2024, 40(6): 1817-1836.
- WU Mingqian, MA Jiadong, DENG Jun, et al. A study of the fine Zr-Nb-Be-REE mineralizing processes of the Baerzhe deposit, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2024, 40(6): 1817-1836.
- 吴妍蓉, 周海, 赵国春, 等. 中亚造山带南缘蒙古地区石炭纪—二叠纪岩浆活动及其构造意义[J]. 西北地质, 2024, 57(3): 11-28.
- WU Yanrong, ZHOU Hai, ZHAO Guochun, et al. Carboniferous-Permian Magmatism of Southern Mongolia, Central Asian Orogenic Belt and Its Tectonic Implications[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(3): 11-28.
- 杨富全, 谷高中, 张忠利, 等. 新疆中亚造山带稀有金属矿地质特征及时空分布规律[J]. 西北地质, 2025, 58(4): 250-269.
- YANG Fuquan, GU Gaozhong, ZHANG Zhongli, et al. A Review of Geological Characteristics and Time-Space Distribution of Rare Metal Deposits in the Central Asian Orogenic Belt, Xinjiang[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(4): 250-269.
- 徐海明, 方景玲, 王军, 等. 新疆波孜果尔铌钽矿床地质特征

- [J]. 矿床地质, 2010, 29(S1): 309–310.
- XU Haiming, FANG Jingling, WANG Jun, et al. Geological characteristics of Boziguoer Niobium-tantalum deposit in Xinjiang[J]. Mineral Deposits, 2010, 29(S1): 309–310.
- 徐海明, 邹天人, 方景玲, 等. 新疆波孜果尔铌钽矿成矿床时代及成因研究[J]. 矿床地质, 2012, 31(S1): 625–626.
- XU Haiming, ZOU Tianren, FANG Jingling, et al. Age and genesis of Boziguoer Niobium-tantalite deposit in Xinjiang[J]. Mineral Deposits, 2012, 31(S1): 625–626.
- 杨合群. 新疆瓦吉里塔格岩漿型钒钛磁铁矿[J]. 西北地质, 2020, 53(4): 129.
- YANG Hequn. Magmatic Vanadium-Titanium Magnetite Deposit in Wajilitag, Xinjiang[J]. Northwestern Geology, 2020, 53(4): 129.
- 杨高学, 刘晓宇, 朱钊, 等. 中亚造山带西准噶尔地区达尔布特蛇绿岩研究进展与展望[J]. 西北地质, 2024, 57(3): 1–10.
- YANG Gaoxue, LIU Xiaoyu, ZHU Zhao, et al. Progress and Prospect of the Darbut Ophiolite in West Junggar, Central Asian Orogenic Belt[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(3): 1–10.
- 杨林春, 葛鹏, 徐国虎, 等. 新疆维吾尔自治区阿克塔拉幅、库铁热克幅、哈拉峻幅、库鲁木都克村幅、托斯莫幅 1: 5 万区域地质调查报告[R]. 乌鲁木齐: 新疆维吾尔自治区地质调查院, 2014.
- 杨林春, 郑清连, 郑勇, 等. 西南天山巴什索贡岩体岩石地球化学特征及地质意义[J]. 新疆地质, 2016, 34(1): 93–99.
- YANG Linchun, ZHENG Qinglian, ZHENG Yong, et al. The Geochemical characteristics and geological significance of Bashisuogong pluton in Southwest Tianshan[J]. Xinjiang Geology, 2016, 34(1): 93–99.
- 袁忠信, 白鸽. 中国碱性侵入岩的空间分布及有关金属矿床[J]. 地质与勘探, 1997, 33(1): 42–48.
- YUAN Zhongxin, BAI Ge. Distribution of alkaline intrusive rocks and related metallic ore deposits of China[J]. Geology and Prospecting, 1997, 33(1): 42–48.
- 曾广策, 邱家骧. 碱性岩的概念及其分类命名综述[J]. 地质科技情报, 1996, 15(1): 31–37.
- ZENG Guangce, QIU Jiaxiang. Conception of alkaline rocks and their nomenclature[J]. Geological Science and Technology Information, 1996, 15(1): 31–37.
- 张招崇, 董书云, 黄河, 等. 西南天山二叠纪中酸性侵入岩的地质学和地球化学: 岩石成因和构造背景[J]. 地质通报, 2009, 28(12): 1827–1839.
- ZHANG Zhaochong, DONG Shuyun, HUANG He, et al. Geology and geochemistry of the Permian intermediate-acid intrusions in the southwestern Tianshan, Xinjiang, China: implications for petrogenesis and tectonics[J]. Geological Bulletin of China, 2009, 28(12): 1827–1839.
- 朱圣柱, 黄小龙, 于洋, 等. 塔里木大火成岩省碱性岩漿活动与稀有金属成矿作用[J]. 大地构造与成矿学, 2023, 47(3): 631–660.
- ZHU Shengzhu, HUANG Xiaolong, YU Yang, et al. Alkaline Magmatism and Associated Rare-metal Mineralization in the Tarim Large Igneous Province[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2023, 47(3): 631–660.
- 宗兆建. 西南天山西段碱性岩漿作用与稀土稀有金属矿化富集[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2022.
- ZONG Zhaojian. Alkaline magmatism and REE-RE mineralization in western segment of southwestern Tianshan[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2022.
- 邹天人, 李庆昌. 中国新疆稀有及稀土金属矿床[M]. 北京: 地质出版社, 2006.
- 邹天人, 徐珏, 陈伟十, 等. 塔里木盆地北缘碱性岩型稀有稀土矿床[J]. 矿床地质, 2002, 21(S1): 845–848.
- ZOU Tianren, XU Jue, CHEN Weishi, et al. Rare and rare earth mineral deposits related to alkaline rocks on northern margin of Tarim Basin, Xinjiang, China[J]. Mineral Deposits, 2002, 21(S1): 845–848.
- Atanasova P, Marks M A W, Frenzel M, et al. Fractionation of geochemical twins (Zr/Hf, Nb/Ta and Y/Ho) and HREE-enrichment during magmatic and metamorphic processes in peralkaline nepheline syenites from Norra Kärr (Sweden)[J]. Lithos, 2020, 372–373: 105667.
- Braunger S, Marks M A W, Wenzel T, et al. Do carbonatites and alkaline rocks reflect variable redox conditions in their upper mantle source?[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2020, 533: 116041.
- Chen T C, Ling M X, Liu Y L, et al. Zircon U–Pb geochronology, Hf–O isotopes and whole-rock geochemistry of A-type granitoids in Halajun, South Tianshan, NW China: Implications for subdivision, petrogenesis and tectonic settings[J]. Lithos, 2023, 456: 107333.
- Chen Z H, Burchfiel B C, Liu Y, et al. Global Positioning System measurements from eastern Tibet and their implications for India/Eurasia intercontinental deformation[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2000, 105(B7): 16215–16227.
- Elburg M A, Cawthorn R G. Source and evolution of the alkaline Pilanesberg Complex, South Africa[J]. Chemical Geology, 2017, 455: 148–165.
- Estrade G, Salvi S, Béziat D, et al. REE and HFSE mineralization in peralkaline granites of the Ambohimirahavavy alkaline complex, Ampasindava peninsula, Madagascar[J]. Journal of African Earth Sciences, 2014, 94: 141–155.
- Estrade G, Salvi S, Béziat D. Crystallization and destabilization of eudialyte-group minerals in peralkaline granite and pegmatite: a case study from the Ambohimirahavavy complex, Madagascar[J]. Mineralogical Magazine, 2018, 82(2): 375–399.
- Gao S, Luo T C, Zhang B R, et al. Chemical composition of the continental crust as revealed by studies in East China[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1998, 62(11): 1959–1975.
- Giehl C, Marks M A W, Nowak M. An experimental study on the influence of fluorine and chlorine on phase relations in peralkaline phonolitic melts[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2014, 167(3): 977.
- Han C, Xiao W, Su B, et al. Ages and tectonic implications of the mafic–ultramafic–carbonatite intrusive rocks and associated Cu–Ni, Fe–P and apatite-vermiculite deposits from the Qurugtagh

- district, NW China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2018, 95: 1106–1122.
- Han Y, Zhao G, Sun M, et al. Paleozoic accretionary orogenesis in the Paleo - Asian Ocean: Insights from detrital zircons from Silurian to Carboniferous strata at the northwestern margin of the Tarim Craton[J]. *Tectonics*, 2015, 34(2): 334–351.
- Jahn B, Wu F, Chen B. Granitoids of the Central Asian Orogenic Belt and continental growth in the Phanerozoic[J]. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 2000, 91(1–2): 181–193.
- Jahn B. The Central Asian Orogenic Belt and growth of the continental crust in the Phanerozoic[J]. *Geological Society Special Publication*, 2004, 226(1): 73–100.
- Jiang Z H, Lei R X, Wu S B, et al. Timing of closure of the South Tianshan Ocean: Evidence from a stitching pluton in the Western Tianshan, NW China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2025, 293: 106751.
- Johnsen O, Grice J D. The crystal chemistry of the eudialyte group[J]. *The Canadian Mineralogist*, 1999, 37(4): 865–891.
- Ma Y, Zhang Z, Huang H, et al. Petrogenesis of the Bashisuogong bimodal igneous complex in southwest Tianshan Mountains, China: implications for the Tarim Large Igneous Province[J]. *Lithos*, 2016, 264: 509–523.
- Marks M A W, Hettmann K, Schilling J, et al. The mineralogical diversity of alkaline igneous rocks: critical factors for the transition from miaskitic to agpaitic phase assemblages[J]. *Journal of Petrology*, 2011, 52(3): 439–455.
- Marks M A W, Markl G. A global review on agpaitic rocks[J]. *Earth-Science Reviews*, 2017, 173: 229–258.
- Mikhailova J A, Pakhomovsky Y A, Panikarovskii T L, et al. Eudialyte Group Minerals from the Lovozero Alkaline Massif, Russia: Occurrence, Chemical Composition, and Petrogenetic Significance[J]. *Minerals*, 2020, 10(12): 1070.
- Mitchell R H, Liferovich R P. Subsolvus deuteric/hydrothermal alteration of eudialyte in lujavrite from the Pilansberg alkaline complex, South Africa[J]. *Lithos*, 2006, 91(1–4): 352–372.
- Pfaff K, Wenzel T, Schilling J, et al. A fast and easy-to-use approach to cation site assignment for eudialyte-group minerals[J]. *Neues Jahrbuch Fur Mineralogie-Abhandlungen*, 2010, 187(1): 69.
- Schilling J, Marks M A W, Wenzel T, et al. The magmatic to hydrothermal evolution of the intrusive Mont Saint-Hilaire complex: insights into the late-stage evolution of peralkaline rocks[J]. *Journal of Petrology*, 2011a, 52(11): 2147–2185.
- Schilling J, Wu F Y, McCammon C, et al. The compositional variability of eudialyte-group minerals[J]. *Mineralogical Magazine*, 2011b, 75(1): 87–115.
- Şengör A M C, Natal'in B A, Burtman V S. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia[J]. *Nature*, 1993, 364(6435): 299–307.
- Shearer C K, Larsen L M. Sector-zoned aegirine from the Ilimaussaq alkaline intrusion, South Greenland: Implications for trace-element behavior in pyroxene[J]. *American Mineralogist*, 1994, 79(3–4): 340–352.
- Simpson B, Ubide T, Spandler C. Drivers of critical metal enrichment in peralkaline magmas recorded by clinopyroxene zoning [J]. *Communications Earth & Environment*, 2025, 6(1): 89.
- Sørensen H. The agpaitic rocks-an overview[J]. *Mineralogical Magazine*, 1997, 61(407): 485–498.
- Upton B G J, Fitton J G, Macintyre R M. The Glas Eilean lavas: evidence of a Lower Permian volcano-tectonic basin between Islay and Jura, Inner Hebrides[J]. *Earth and Environmental Science Transactions of The Royal Society of Edinburgh*, 1987, 77(4): 289–293.
- Windley B F, Alexeev D, Xiao W, et al. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Journal of the Geological Society*, 2007, 164(1): 31–47.
- Woolley A R. Alkaline rocks and carbonatites of the world, Part 4: Antarctica, Asia and Europe (excluding the former USSR), Australasia and Oceanic Islands[C]. *Geological Society of London*, 2019.
- Wu F Y, Yang Y H, Marks M A W, et al. In situ U–Pb, Sr, Nd and Hf isotopic analysis of eudialyte by LA-(MC)-ICP-MS[J]. *Chemical Geology*, 2010, 273(1–2): 8–34.
- 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 HfO isotopes of zircon[J]. *Lithos*, 2024, 482: 107705.
- Xiao W, Han C, Yuan C, et al. Middle Cambrian to Permian subduction-related accretionary orogenesis of Northern Xinjiang, NW China: implications for the tectonic evolution of central Asia[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 32(2–4): 102–117.
- Xiao W, Huang B, Han C, et al. A review of the western part of the Altaids: a key to understanding the architecture of accretionary orogens[J]. *Gondwana Research*, 2010, 18(2–3): 253–273.
- Xie M C, Han C, Fan H, et al. Petrogenesis of the eudialyte-bearing syenite and indication for Nb–Zr–REE mineralization in Bashisuogong, Northwest China[J]. *Lithos*, 2024, 474: 107596.
- Xu Y G, Wei X, Luo Z Y, et al. The Early Permian Tarim Large Igneous Province: main characteristics and a plume incubation model[J]. *Lithos*, 2014, 204: 20–35.
- Yakubchuk A. Architecture and mineral deposit settings of the Altaid orogenic collage: a revised model[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2004, 23(5): 761–779.
- Yuan H D, Lei R X, Brzozowski M J, et al. Multi-stage magmatic–hydrothermal evolution of nepheline pegmatite: Insights from the mineralogy and geochronology of a zircon megacryst from the Yilanlike nepheline pegmatite, South Tianshan[J]. *Ore Geology Reviews*, 2024, 172: 106188.