



引文格式: 高永宝, 陈康, 王亮, 等. 阿尔金西段库木塔什萤石矿床成因: 磷灰石 U-Pb 年龄、原位 Sr-Nd 同位素、地球化学约束[J]. 西北地质, 2024, 57(4): 1-20. DOI: 10.12401/j.nwg.2024038

Citation: GAO Yongbao, CHEN Kang, WANG Liang, et al. Genesis of Kumutashi Fluorite Deposit in the West Altyn-Tagh Orogen, NW China: Constraints from Apatite In-Situ U-Pb Dating, Sr-Nd Isotope and Chemistry[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(4): 1-20. DOI: 10.12401/j.nwg.2024038

阿尔金西段库木塔什萤石矿床成因: 磷灰石 U-Pb 年龄、原位 Sr-Nd 同位素、地球化学约束

高永宝^{1,2}, 陈康^{1,2,3}, 王亮^{1,2}, 赵辛敏⁴, 李艳广⁴, 刘明^{1,2}, 张龙^{1,2,5},
王元伟^{1,2}, 张毅^{1,2,5}, 刘基^{1,2}

(1. 中国地质调查局金矿勘查技术创新中心, 陕西 西安 710100; 2. 中国地质调查局西安矿产资源调查中心, 陕西 西安 710100; 3. 西北大学地质学系大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069; 4. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710119; 5. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 近年来, 阿尔金西段取得萤石找矿重大突破, 相继发现卡尔恰尔和库木塔什等矿床, 但成矿时代和成矿机制研究薄弱。笔者选取库木塔什矿床与萤石密切共生磷灰石为研究对象, 开展原位 U-Pb 定年、Sr-Nd 同位素及地球化学分析, 以探讨萤石矿成矿时代及矿床成因。磷灰石常呈自形-半自形结构, 表面均匀, 单偏光下近乎透明, 主要与萤石、方解石、带云母、氟碳铈矿等矿物共生。结果显示, 磷灰石 U-Pb 同位素年龄为 (448 ± 27) Ma, 成矿作用与碱长花岗岩侵入活动密切相关, 均为晚奥陶世构造-岩浆活动产物。磷灰石中 F 含量为 4.20%~5.12%, Cl 含量小于 0.02%, 极低的 Cl 含量表明出溶的流体 Cl 含量较低。磷灰石稀土元素含量较高 ($908 \times 10^{-6} \sim 2164 \times 10^{-6}$), 稀土配分曲线显示强烈 Eu 负异常和 Ce 正异常, 且与萤石、方解石、碱长花岗岩有明显的一致性, 推测与岩浆-热液阶段大量流体出溶密切相关。磷灰石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 0.70913~0.71047, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值为 0.51138~0.51153, $\varepsilon\text{Nd}(t)$ 值为 -13.3~-10.3, 表明成矿物质具有壳幔混合特征。综合研究表明, 阿尔金西段萤石成矿时代为奥陶纪, 与同期碱长花岗岩密切相关, 形成于后碰撞伸展阶段, 成矿流体来源于碱长花岗岩的熔体-流体演化, 为岩浆热液充填型矿床。

关键词: 地球化学特征; 磷灰石; 萤石矿床; 库木塔什; 阿尔金西段

中图分类号: P571; P597

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2024)04-0001-20

Genesis of Kumutashi Fluorite Deposit in the West Altyn-Tagh Orogen, NW China: Constraints from Apatite In-Situ U-Pb Dating, Sr-Nd Isotope and Chemistry

GAO Yongbao^{1,2}, CHEN Kang^{1,2,3}, WANG Liang^{1,2}, ZHAO Xinmin⁴, LI Yanguang⁴, LIU Ming^{1,2}, ZHANG Long^{1,2,5},
WANG Yuanwei^{1,2}, ZHANG Yi^{1,2,5}, LIU Ji^{1,2}

收稿日期: 2024-02-21; 修回日期: 2024-03-28; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目“阿尔金卡尔恰尔超大型萤石矿带高氟岩浆-热液演化与成矿机制研究”(2023-JC-YB-241), 中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心科技创新基金项目“阿尔金卡尔恰尔地区超大型萤石成矿带成矿流体性质研究”(KC20230011), 中国地质调查局项目“西昆仑大红柳滩-甜水海地区大型矿产资源基地综合调查”(DD20190143)、“新疆若羌县帕夏拉依格一带萤石、锂矿产调查评价”(DD20243309)、“阿尔金伊里奇曼-红柳沟地区萤石、金铜矿产调查评价”(DD20211551)联合资助。

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

- (1. Technology Innovation Center for Gold Ore Exploration, China Geological Survey, Xi'an 710100, Shaanxi, China; 2. Xi'an Center of Mineral Resources Survey, China Geological Survey, Xi'an 710100, Shaanxi, China; 3. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China; 4. Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710119, Shaanxi, China; 5. School of Earth Sciences and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: In recent years, significant breakthroughs in fluorite prospecting have been made in the western Altyn-Tagh Terrane, and Kaerqiaer, Kumutashi and other deposits have been discovered successively, however, the research on metallogenic epoch and ore-forming processes are still unclear. In this paper, the closely symbiotic apatite with fluorite were selected as the research object to carry out the main microanalysis of apatite, U-Pb dating and in situ Sr-Nd isotopic test analysis, so as to explore the metallogenic epoch and the genesis of deposit. The apatite often has a self-semi-automorphic structure with uniform surface and nearly transparent under monopolarized light, mainly symbiotic with fluorite, calcite, tainiolite, bastnaesite and other minerals. The study shows that the U-Pb isotope age of apatite microregion is (448 ± 27) Ma, and the fluorite mineralization is closely related to the invasive activity of alkali feldspar granite, all of which are the products of the late Ordovician tectonic-magmatic activity. The F content of apatite is 4.20% to 5.12%; the Cl content is less than 0.02%, and the very low Cl content indicates a low dissolved fluid Cl content. The content of rare earth elements is high ($908 \times 10^{-6} \sim 2\,164 \times 10^{-6}$), and the partition curve of rare earth shows strong Eu negative anomaly and positive Ce negative anomaly. This anomaly is obviously consistent with its associated fluorite, calcite and alkali feldspar granite, which may be closely related to the dissolution of massive fluid in the magma-hydrothermal stage. The ratio of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ of apatite is from 0.709 13 to 0.710 47, the ratio of $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ is from 0.511 38 to 0.511 53, and $\epsilon\text{Nd}(t)$ is from -13.27 to -10.26, reflecting that the ore-forming materials have the characteristics of crust-mantle mixing. Comprehensive studies show that the ore-forming age of fluorite in the western Altyn-Tagh Terrane is Ordovician, closely related to the same period alkali feldspar granite, formed in the post-collision extension stage, the ore-forming fluid may be derived from the melt-fluid evolution of alkali feldspar granite, and it is a magmatic hydrothermal filling type deposit.

Keywords: geochemical characteristics; apatite; fluorite deposit; the Kumutashi deposit; West Altyn-Tagh Orogen

磷灰石是一种常见的岩浆岩副矿物和热液矿物,其微量元素及同位素组成对结晶环境及其变化非常敏感,能够很好刻画、记录岩浆演化和热液活动叠加、交代及冷却过程,且在地质过程中具有较强的稳定性,因此常被用来示踪成岩成矿演化过程(Sha et al., 1999; Piccoli et al., 2002; Mao et al., 2016; Sun et al., 2019; Zhou et al., 2022; 谭侯铭睿等, 2022; 周敖日格勒等, 2022)。

卡尔恰尔超大型萤石成矿带位于青藏高原北缘,区内近年来发现卡尔恰尔、库木塔什、小白河沟、拉依旦北等一系列大中型萤石矿床,该萤石成矿带 CaF_2 资源量已超 3 000 万 t(高永宝等, 2023)。带内萤石矿床主要分布卡尔恰尔-阔什区域性大断裂南部,成矿作用与肉红色 A 型碱长花岗岩密切相关,萤石矿体分布于花岗岩内部及其外接触带附近,赋存于黑云母斜长片麻岩、大理岩等富钙地层中,NE 向区域性断裂及

其派生的次级断层对萤石矿具有重要控制作用(高永宝等, 2023)。前人研究表明,卡尔恰尔超大型萤石成矿带与成矿有关的碱长花岗岩形成于中—晚奥陶世,为挤压造山转变成伸展构造背景下岩浆活动的产物(吴益平等, 2021; 高永宝等, 2023);成矿流体主要为岩浆热液来源,存在大气降水的混合(吴益平等, 2022);成矿物质 Ca 元素可能主要是由岩浆热液对地层的淋滤萃取而来,而 F 元素则可能主要是岩浆活动产生的岩浆热液从地下深处携带来的,矿床类型为岩浆热液充填型矿床(高永宝等, 2023; 赵辛敏等, 2023),但对于成矿时代及成矿机制研究仍然较为薄弱。

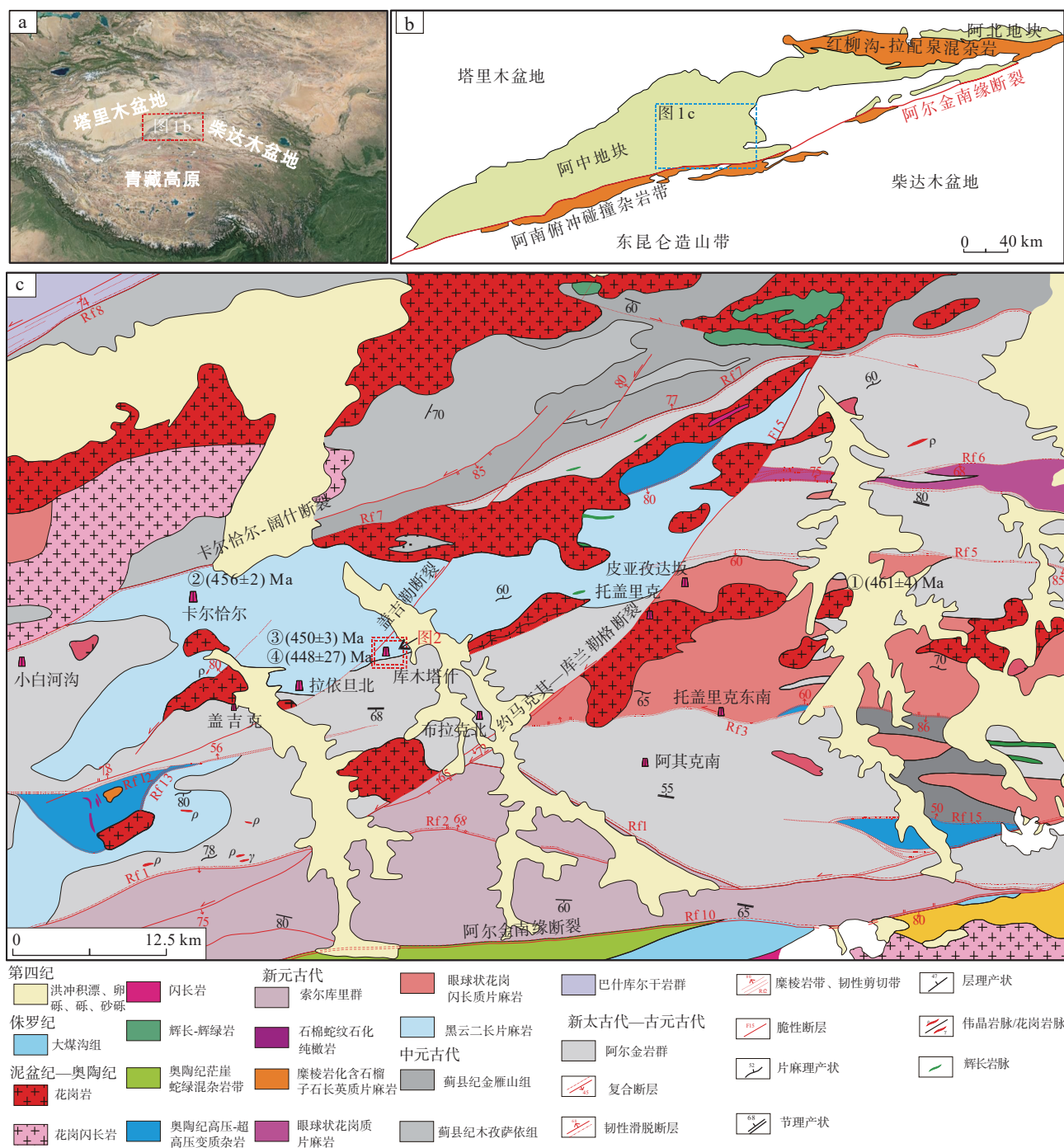
近年来,在对卡尔恰尔超大型萤石成矿带开展调查评价过程中,研究团队首次在库木塔什矿床发现与萤石共生的绿色—蓝绿色粗粒磷灰石,以自形粒状为主,颗粒较大,粒径多为 0.3~10 mm。因此,笔者选择

库木塔什萤石矿床中与萤石密切共生磷灰石为主要研究对象,在详细野外调查的基础上,对磷灰石开展矿物学、主微量元素、U-Pb 年代学、原位 Sr-Nd 同位素等测试分析,探讨磷灰石的形成机制及其地质指示意义,旨在限定库木塔什萤石矿床形成时代与成矿机制,对于丰富阿尔金西段超大型萤石矿带成矿规律研

究和指导区域找矿具有重要的理论和实践意义。

1 区域地质背景

研究区位于青藏高原北缘,大地构造位置位于阿尔金造山带(图1)。阿尔金地区经历了多期复杂的构



①. 年代学数据来源于张若愚等(2016); ②. 年代学数据来源于赵辛敏等(2023); ③. 年代学数据来源于高永宝等(2023); ④. 本文数据

图1 阿尔金西段卡尔恰尔-库木塔什超大型萤石矿带地质矿产图

Fig. 1 Geological map of the super-large Kaerqiaer-Kumutashi fluorite mineralization belt in the West Altyn-Tagh Orogen

造演化过程,同时诱发了频繁、强烈、多期次的构造—岩浆活动(何元方等, 2018; 陈宁等, 2023)。区域侵入岩以新元古代、早古生代、中生代等不同规模中酸性岩浆岩为主,多沿阿尔金山呈 NE 向带状展布,岩石类型复杂(段星星等, 2023)。新元古代侵入岩以花岗质片麻岩、花岗闪长质片麻岩为主,主要出露于研究区东部。早古生代侵入岩分布最为广泛,主要岩性有碱长花岗岩、二长花岗岩、黑云花岗岩、花岗闪长岩等。区域脉岩极为发育,以碱长花岗岩脉、花岗伟晶岩脉为主,多分布于区域卡尔恰尔深大断裂两侧。花岗伟晶岩脉主要分布于卡尔恰尔深大断裂北侧,主要就位于阿尔金岩群和新元古代花岗质片麻岩中。近年来,不断取得吐格曼、瓦石峡南等伟晶岩型稀有金属找矿新突破,发育有锂辉石、锂云母、绿柱石、铌钽铁矿等稀有金属矿物(徐兴旺等, 2019; Gao et al., 2021; 王核等, 2023)。碱长花岗岩脉主要分布于卡尔恰尔深大断裂南侧,在阿尔金岩群和新元古代花岗质片麻岩中尤为发育,断裂控制明显,出露宽度多较窄,多发育萤石—方解石—带云母脉,并且伴生磷灰石等(吴益平等, 2021, 2022; 高永宝等, 2023)。

区域出露地层以元古界为主,新太古界至新元古界遭受程度不一的变形变质作用改造,以中深变质岩为主,岩性主要为黑云斜长片麻岩、斜长变粒岩、石榴矽线石黑云片麻岩、浅灰色二长石英片岩、白云质大理岩、石英岩、斜长角闪岩等;中元古界岩性主要为云母石英片岩、片麻岩、变粒岩、长石石英岩。

区域构造活动异常频繁,经历了前寒武纪多期变形变质作用的强烈改造和构造置换,以及显生宙以来多期韧性、脆性构造的相互叠加,构造形迹十分复杂(Gehrels et al., 2003; Liu et al., 2009, 2012),主要为断裂,褶皱因受到岩浆侵位及断裂构造的破坏,形态极不完整(Yu et al., 2013; Wang et al., 2013, 2014, 2016)。区域性大断裂由北至南有卡尔恰尔—阔什断裂、盖吉勒断裂、约马克其—库兰勒格断裂、阿尔金南缘断裂。围绕区域深大断裂广泛分布次级断裂,主要以 NE、近 EW 向为主,少量为 SE 向。卡尔恰尔—阔什断裂呈 NEE 向,EW 向延伸大于 70 km,呈明显带状,是一个长期活动的断裂,该断裂不仅是早期地质构造单元(阿尔金杂岩和中新元古界隆起带)之间的分界线,还对早古生代中酸性侵入岩体的分布有控制作用。库木塔什萤石矿与盖吉勒断裂及其派生的众多次级断裂关系密切,盖吉勒断裂分布于巴什瓦克—拉依旦北—

亚干布彦一带,断层切过巴什瓦克石棉矿高压超高压变质岩片、古元古界阿尔金岩群、青白口纪英云闪长质片麻岩和片麻状花岗岩、古生代二长花岗岩等,沿构造带较为发育伟晶岩脉、碱长花岗岩脉,主要为早期韧性左行走滑—斜落正断层,晚期叠加有脆性右行正断层。阿尔金南缘断裂呈 NEE 向横贯阿尔金南部,长度达数千 km,构成了阿中地块与阿南缘蛇绿混杂岩带的边界(Long et al., 2012; Xu et al., 2013)。

2 矿床地质特征

库木塔什萤石矿床出露地层为古元古界阿尔金岩群,也是重要赋矿地层。岩性主要为深灰色黑云斜长片麻岩,另有部分大理岩呈条带状出露于矿区南部,少量灰白色—灰绿色斜长变粒岩出露于矿区西南部(图 2)。矿区内发育断裂主要呈 NNE 向、NE 向、近 EW 向,多为平移断层、平移正断层,并发育韧性—脆性剪切带,NE 向、近 EW 向断裂基本控制着区内的岩脉发育和展布。矿区内出露的侵入岩主要有新元古代花岗闪长质片麻岩和脉岩。脉岩主要为碱长花岗岩脉、花岗伟晶岩脉,碱长花岗岩与萤石—方解石矿脉关系密切,脉岩和矿脉均受断裂控制明显,走向总体以 NEE、近 EW 向为主,少量 NE 走向(图 2)。

矿区内共圈出 14 条萤石矿(化)体,主要沿 NE 向展布,少量呈 NNE 走向,倾向 NNW,倾角为 $40^{\circ}\sim 70^{\circ}$,宽为 0.3~3.6 m,地表断续延伸 50~980 m 不等。矿石构造主要有脉状(图 3a)、条带状、角砾状(图 3b),局部地段为块状矿石,碱长花岗岩脉中见有萤石细脉发育。萤石具粗晶结构、自形—半自形粒状结构、他形粒状结构、碎裂结构。矿石工业类型主要为萤石—方解石型, CaF_2 平均品位为 25%。围岩蚀变较弱,主要为碳酸盐化。矿石中矿物成分简单,主要是方解石、萤石、磷灰石、带云母,另含少量石英、正长石、氟碳铈矿。萤石呈紫色,粒径为 0.10~20.00 mm,大小不一,呈他形粒状或粒状集合体,解理、裂纹发育,常包含磷灰石或沿边缘、解理交代方解石、带云母(图 3d、图 3e)。方解石粒径约为 0.50~20.00 mm,以伟晶状为主,多呈他形粒状,少呈碎裂状,方解石碎斑裂纹、机械双晶发育,散布于萤石集合体中。带云母呈褐色,粒径约为 10~50 mm,他形片状,或自形片状,颗粒常发育弯曲和扭折等显微变形现象,常被萤石、方解石交代,边缘常具暗化边(图 3f)。磷灰石呈浅绿、

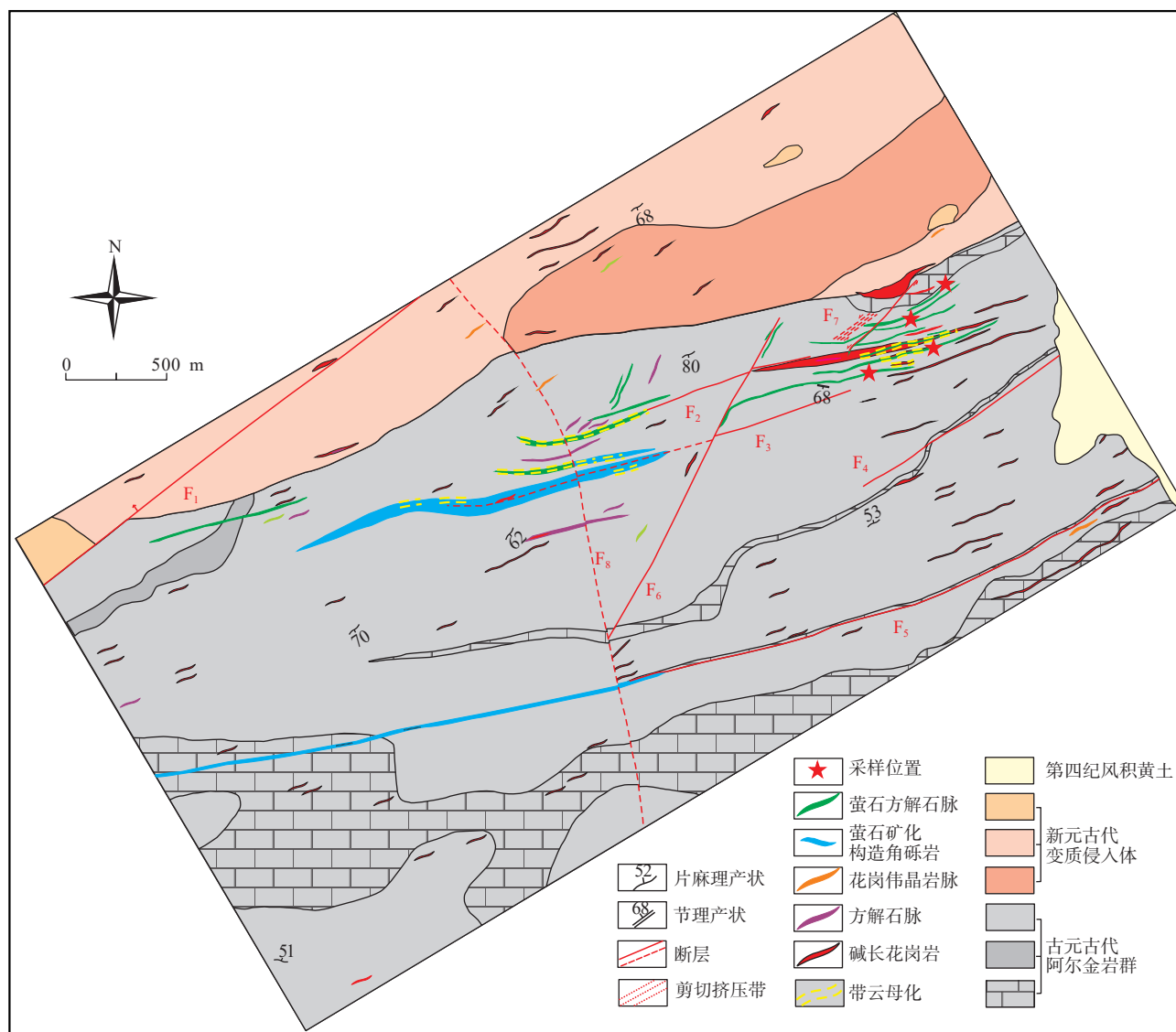


图2 库木塔什萤石矿区地质图

Fig. 2 Geological map of the Kumutashi fluorite deposit

黄绿、蓝绿等色, 玻璃光泽, 粒径约为 0.30~20.00 mm, 以伟晶为主, 主要呈带锥面的六方柱; 集合体呈粒状、致密块状、结核状; 具不完全解理, 断口不平整, 呈贝壳状, 有油脂光泽 (图 3c)。镜下观察矿物生成顺序, 磷灰石自形程度好, 应为前期结晶, 其次为包裹磷灰石的带云母, 方解石及萤石为后期结晶, 包裹磷灰石和带云母并充填进入其裂隙 (图 3)。根据观察, 矿物生成顺序大致为磷灰石、方解石、萤石、带云母。

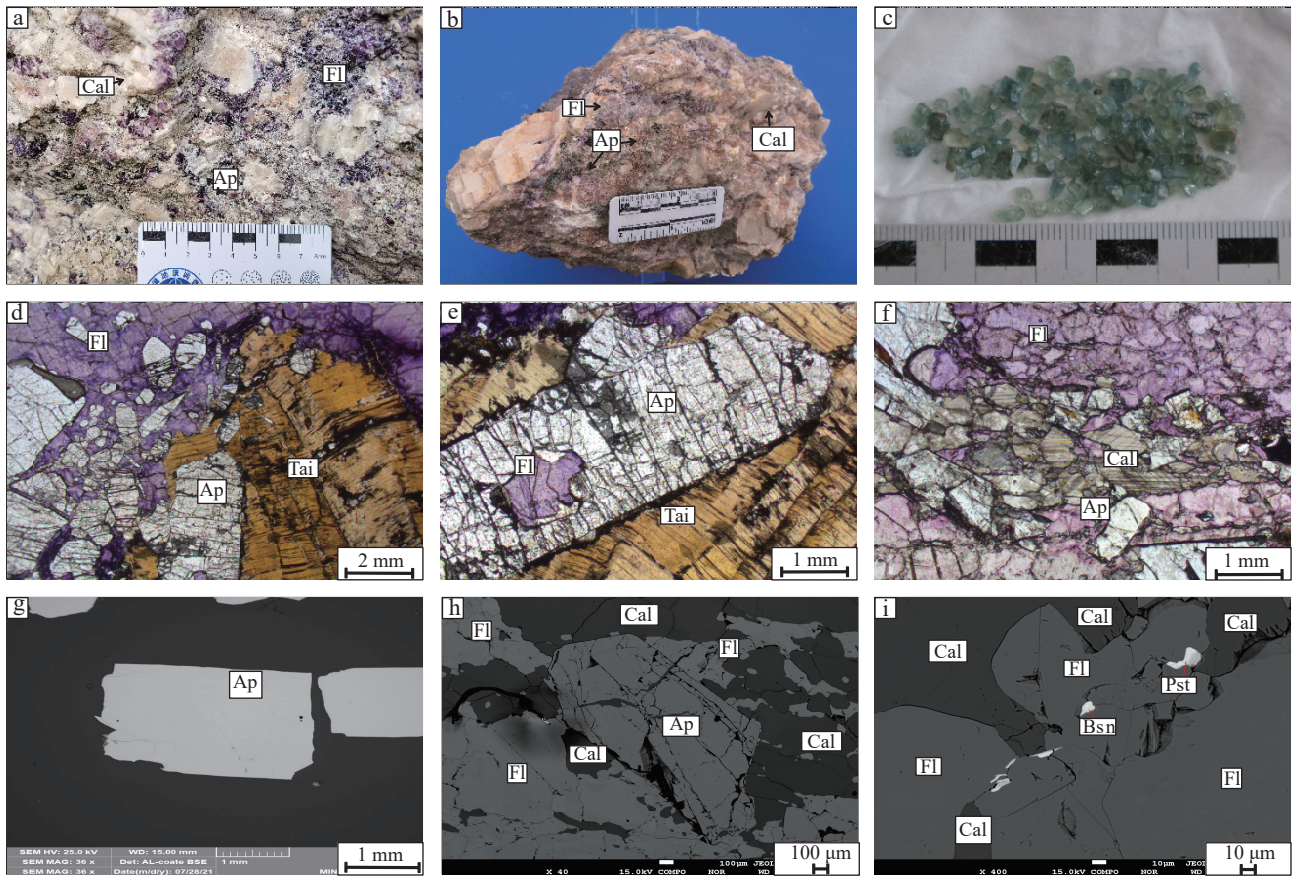
3 样品采集及分析方法

本次研究主要采集库木塔什萤石矿方解石萤石脉 (图 2), 尤其注意采集共生粗粒磷灰石样品, 并将

野外所采集的新鲜岩石样品, 磨制薄片, 同时对萤石、方解石、磷灰石单矿物分选, 以开展相关的矿物学和地球化学分析。磷灰石背散射图像 (BSE)、阴极发光图像 (CL)、电子探针 (EMPA)、激光烧蚀电感耦合等离子体质谱 (LA-ICP-MS) 测试、多接收电感耦合等离子体质谱 (MC-ICP-MS) 分析均在自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室进行。

3.1 主、微量元素分析

磷灰石主量元素测定使用电子探针型号为日本 JOEL 公司生产的 JXA-8230, 测试条件为加速电压 15 kV, 束流 20 nA, 束斑直径为 1~5 μm , 单元素数据采集时间 30 s, 平均检出限为 0.02%。采用标样: 磷灰石 (Ca 和 P)、萤石 (F)、方钠石 (Cl)、钠长石 (Na 和 Si)、辉



a. 萤石方解石脉; b. 方解石萤石矿石(共生磷灰石); c. 磷灰石单矿物; d. 自形柱状磷灰石被包含于带云母、萤石中(单偏光); e. 萤石交代磷灰石(单偏光); f. 萤石交代方解石、磷灰石(单偏光); g. 磷灰石阴极发光(CL)图像; h. 磷灰石与萤石、方解石共生(背散射); i. 氟碳铈矿与萤石、方解石共生(背散射); Ap. 磷灰石; Bsn. 氟碳铈矿; Tai. 带云母; Cal. 方解石; Fl. 萤石; Pst. 氟碳铈矿

图3 库木塔什萤石矿区磷灰石野外及镜下特征

Fig. 3 Characteristics of apatite from the Kumutashi fluorite deposit

石(Mn、Fe 和 Mg),应用 ZAF 进行校正。F、Cl、Na 的峰位和背景测量时间分别为 10 s 和 5 s,其他元素的峰位和背景测量时间为 20 s 和 10 s。

原位 LA-ICP-MS 矿物成分分析使用的激光剥蚀系统为 Geo Las Pro, ICP-MS 型号为 Agilent 7700X。激光剥蚀过程中采用氦气作载气、氩气为补偿气以调节灵敏度,二者在进入 ICP 之前通过一个 T 型接头混合。每个时间分辨分析数据包括大约 10 s 的空白信号、40 s 的样品信号和 10 s 的吹扫信号。输出激光能量 6 J/cm^2 ,测试使用频率 7 Hz,束斑直径 $24 \mu\text{m}$ 。对分析数据的离线处理,包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及同位素比值计算,均采用软件 Iolite 4 完成。微量元素含量利用参考标样 NIST610 玻璃作为外标、Si 作内标的方法进行定量计算。NIST610 玻璃中元素含量推荐值引自 Geo ReM 数据库(<http://georem.mpch-mainz.gwdg.de/>)。

3.2 原位 U-Pb 年代学分析

测试的磷灰石样品经人工破碎后分选出单矿物,在双目镜下挑选透明、晶形完好的颗粒,粘于环氧树脂表面,固化后打磨抛光至露出一个光洁平面,然后进行透、反射和阴极发光照像。LA-ICP-MS 微区 U-Pb 年龄测定采用德国 Coherent 公司生产的 Geolas Pro 型 ArF 准分子激光剥蚀系统(LA)和美国 Agilent 公司生产的 7700x 型四级杆等离子质谱仪(ICP-MS)联合构成的激光剥蚀等离子体质谱仪分析系统(LA-ICP-MS)。激光剥蚀过程中采用氦气作载气、氩气为补偿气以调节灵敏度。激光束斑直径为 $30 \mu\text{m}$,激光剥蚀深度为 $20 \sim 40 \mu\text{m}$ 。采用 Glitter(ver4.0, Macquarie University)程序对同位素比值及元素含量进行计算,采用 LAM-ICPMS Common Lead Correction(ver3.15)对其进行普通铅校正,年龄计算及谐和图绘制采用 Isoplot(ver3.0)完成(Ludwig, 2003)。

3.3 原位 Sr-Nd 同位素分析

磷灰石原位 Sr-Nd 同位素分析采用 Thermo Scientific 生产的 Neptune 型多接收器等离子体质谱仪(MC-ICP-MS)上完成, 该仪器配备 193 nm ArF 准分子激光剥蚀系统。在进行原位 Sr 同位素组成的样品分析之前, 收集 40 s 的固定背景强度, 然后用能量密度为 10 J/cm^2 , 束斑直径为 $90 \mu\text{m}$, 脉冲频率为 8 Hz 的激光剥蚀磷灰石颗粒 60 s。烧蚀的磷灰石气溶胶由氦气携带, 然后与氮气混合后进入等离子体。重复分析内部 Apatite 1 和标准磷灰石 Slyudyanka 得到的 Sr 同位素比值为: Apatite 1 ($n=22$) 的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.711\,521 \pm 52(2\sigma)$, 磷灰石 Slyudyanka ($n=21$) 的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.707\,886 \pm 74(2\sigma)$ ($n=21$)。基于使用 TIMS 和溶液 MC-ICPMS 方法获得的公认标准 Apatite 1 的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.711\,370 \pm 31(2\sigma)$, 磷灰石 Slyudyanka 的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.707\,683 \pm 25(2\sigma)$ 。本次实验获得的标准样品的 Sr 同位素值在公认的 Sr 同位素组成范围内。

对磷灰石颗粒在分析的 Sr 同位素的位置上测量原位 Nd 同位素组成。采用能量密度为 15 J/cm^2 , 束斑直径为 $120 \mu\text{m}$, 6 Hz 的激光脉冲剥蚀磷灰石颗粒 60 s。在激光分析之前, 使用 JNdi-1 标准溶液对 Neptune 型 MC-ICP MS 进行调整和优化, 以获得最大灵敏度。在分析期间, 采用 McFarlane 等(2007)的方法进行 ^{144}Sm 对 ^{144}Nd 的评估和校正, 修正 Sm 同位素丰度($^{147}\text{Sm}/^{149}\text{Sm}=1.086\,80$ 和 $^{144}\text{Sm}/^{149}\text{Sm}=0.223\,32$)。本次标准实验结果

落入基于 TIMS 和溶液 MC-ICPMS 的综合分析获得的 Nd 同位素组成范围内。

4 测试结果

4.1 矿物学特征

库木塔什矿床方解石萤石脉中的磷灰石以粗粒自形状产出, 与萤石、方解石、带云母等密切共生, 主要呈绿色-蓝绿色, 长柱状-短柱状, 玻璃光泽(图 3a~图 3h)。BSE 图像显示, 磷灰石表面较为干净透明, 包裹体不发育, 裂纹发育。同时, 部分样品中还发育氟碳铈矿和氟碳钙铈矿(图 3h、图 3i)。

4.2 主量元素组成特征

磷灰石的主量元素结果见表 1, 不同样品中的磷灰石未观察到明显的成分变化, 磷灰石颗粒成分均一, 均未见震荡分带(图 3g、图 3h)。 P_2O_5 含量为 40.3%~41.3%, 平均值为 40.8%; CaO 含量为 55.5%~56.2%, 均值为 55.7%; SiO_2 含量低, 为 0%~0.27%, 均值 0.18%; FeO、MnO 含量低, 其中 FeO 为 0%~0.07%, 均值为 0.04%; MnO 含量为 0%~0.09%, 均值为 0.04%; Na_2O 含量为 0.17%~0.45%, 平均值为 0.25%; SrO 含量为 0.06%~0.19%, 均值为 0.11%; F 含量高, 为 4.20%~5.12%, 均值为 4.61%; Cl 含量低, 为 0.01%~0.02%, 均值为 0.01%; F/Cl 值高, 为 194~745, 均值为 436。

表 1 库木塔什萤石矿区磷灰石主量元素含量(%)

Tab. 1 Major elements composition (%) of apatite from the Kumutashi fluorite deposit

样号	F	SiO_2	P_2O_5	Na_2O	SrO	FeO	MnO	CaO	Cl	BaO	Total	F/Cl
01	4.47	0.15	40.7	0.25	0.12	/	0.06	55.7	0.01	0.16	99.7	745
02	4.39	0.07	41.3	0.23	0.13	0.05	0.04	55.7	0.01	0.10	100	399
03	4.48	0.14	40.4	0.25	0.08	0.03	0.04	56.1	0.02	0.05	99.7	213
04	4.86	0.14	40.6	0.23	0.19	/	0.02	55.7	0.01	0.10	99.8	374
05	4.60	/	41.3	0.45	0.08	0.02	0.01	55.5	0.01	0.01	100	418
06	5.12	0.15	40.6	0.29	0.13	0.04	/	55.5	0.01	/	99.7	639
07	4.59	0.27	40.3	0.22	0.06	0.06	/	55.9	0.01	0.08	99.5	656
08	4.66	0.15	41.1	0.17	0.14	0.03	/	55.5	0.02	/	99.8	194
09	5.04	0.22	41.2	0.27	0.07	/	0.04	55.6	0.01	/	100	630
10	4.20	0.26	41.2	0.21	0.10	0.07	0.09	56.2	0.02	/	101	200
11	4.30	0.22	40.5	0.22	0.09	0.05	0.03	56.0	0.01	0.04	99.6	330

注: “/” 表示含量低于检测限。

4.3 LA-ICP-MS 微量元素分析

库木塔什萤石矿区磷灰石、方解石微量元素与稀

土元素测试结果见表 2。磷灰石稀土含量高, ΣREE 值为 $908 \times 10^{-6} \sim 2\,165 \times 10^{-6}$, 均值为 $1\,429 \times 10^{-6}$; 轻稀土

表 2 库木塔什萤石矿区磷灰石、方解石微量元素与稀土元素表(10^{-6})Tab. 2 Trace element and rare earth element compositions (10^{-6}) of apatite and calcite from the Kumutashi fluorite deposit

样品号	Ap-01	Ap-02	Ap-03	Ap-04	Ap-05	Ap-06	Ap-07	Ap-08	Ap-09	Cal-01	Cal-02	Cal-03	Cal-04
矿物	磷灰石	磷灰石	磷灰石	磷灰石	磷灰石	磷灰石	磷灰石	磷灰石	磷灰石	方解石	方解石	方解石	方解石
Sc	0.26	0.16	0.2	0.22	0.15	0.17	0.2	0.14	0.12	0.36	0.37	0.42	0.28
V	65.3	65.9	68.9	92.5	103	95.1	97	93.1	94.7	0.07	0.13	0.16	0.10
Mn	130	118	287	126	135	111	104	104	111	1 158	1 187	1 187	1 182
Fe	248	216	232	203	198	181	182	178	172	1 535	1 530	1 541	1 537
Co	0.06	0.03	0.27	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.07	0.08	0.09	0.09
Ga	0.29	0.22	1	0.17	0.13	0.16	0.1	0.13	0.11	0.42	0.34	0.23	0.22
Rb	0	0.01	0	0.03	0	0.04	0.03	0	0.02	0.00	0.00	0.01	0.46
Sr	834	888	891	810	708	713	715	699	676	1 218	1 228	1 235	1 221
Y	103	124	118	85	58.1	74.4	78.1	75.4	57.4	36.6	36.8	36.2	35.0
Sn	0.25	0.17	0.22	0.2	0.13	0.12	0.23	0.15	0.13	0.06	0.09	0.02	0.08
Cs	0	0.03	0.01	0.02	0.01	0.01	0	0.01	0	0.00	0.01	0.10	0.08
Ba	3.51	4	32.3	3.6	2.53	3.33	2.99	2.77	2.47	12.8	7.66	6.25	5.70
La	309	366	343	223	159	194	209	205	150	34.3	41.1	14.1	9.87
Ce	892	1 016	949	625	453	540	570	561	428	102	113	57.4	46.5
Pr	110	125	119	77.7	57.3	68.2	70.6	70	52.8	13.5	13.4	8.95	7.4
Nd	394	450	434	270	205	241	250	243	189	50	50.2	37.7	33.5
Sm	68.7	78.7	75.3	48.2	35	42.3	43.6	41.7	32.9	10.1	10.5	9	8.75
Eu	6.63	7.72	7.44	5.01	4.07	4.29	4.56	4.43	3.54	1.05	1.07	1	1.02
Gd	45.4	53.2	52.3	32.3	23.7	28	29.4	28	22.6	7.65	7.99	8.23	7.19
Tb	5.55	6.39	6.19	3.99	2.94	3.59	3.6	3.53	2.91	1.13	1.17	1.09	1.1
Dy	27.7	32.5	30.8	21.5	14.9	18.4	18.7	18.1	14.1	6.95	6.78	6.93	6.56
Ho	4.35	5.22	4.98	3.49	2.48	2.91	3.02	2.94	2.45	1.4	1.42	1.35	1.32
Er	11	12.8	12.2	8.34	6.21	7.66	7.81	7.49	5.93	4.08	4.19	4.07	4.17
Tm	1.23	1.56	1.43	1.04	0.75	0.92	0.94	0.96	0.69	0.62	0.59	0.6	0.58
Yb	6.88	8.32	7.32	5.59	3.96	4.62	4.84	4.95	3.74	4.33	4.27	4.31	4.2
Lu	0.77	0.96	0.94	0.68	0.52	0.65	0.58	0.6	0.42	0.69	0.6	0.67	0.66
W	0.05	0.06	0.33	0.06	0.03	0.05	0.02	0.04	0.02	0.00	0.00	0.01	0.01
Bi	5.19	5.08	5.65	4.56	3.5	3.76	3.4	3.56	2.95	0.05	0.16	0.05	0.07
Th	184	184	213	327	260	281	243	243	221	0.00	0.00	0.00	0.00
U	25.7	24.3	27.5	31.7	18.4	22.4	17.1	17.2	15.2	0.00	0.00	0.00	0.00
ΣREE	1883	2 165	2043	1 325	968	1 157	1 217	1 191	908	238	256	155	133
LREE	1 780	2044	1927	1 249	913	1 090	1 148	1 124	856	211	229	128	107
HREE	103	121	116	76.9	55.5	66.7	68.9	66.5	52.8	26.8	27	27.2	25.8
LREE/HREE	17.3	16.9	16.6	16.2	16.5	16.3	16.7	16.9	16.2	7.87	8.48	4.7	4.16
(La/Y) _N	32.2	31.6	33.6	28.7	28.8	30.2	31	29.7	28.7	5.67	6.91	2.35	1.69
δEu	0.34	0.34	0.34	0.37	0.41	0.36	0.37	0.37	0.38	0.35	0.34	0.35	0.38
δCe	1.18	1.16	1.15	1.16	1.16	1.15	1.15	1.14	1.18	1.17	1.17	1.22	1.27

续表 2

样品号	Cal-05	Cal-06	Cal-07	Cal-08	Cal-09	Cal-10	Cal-11	Cal-12	Cal-13	Cal-14	Cal-15	Cal-16	Cal-17
矿物	方解石	方解石	方解石	方解石	方解石	方解石	方解石	方解石	方解石	方解石	方解石	方解石	方解石
Sc	0.47	0.36	0.37	0.44	0.34	0.45	0.32	0.56	0.19	0.47	0.59	0.50	0.70
V	0.07	0.14	0.06	0.03	0.03	0.20	0.06	0.00	0.01	0.13	1.79	0.18	0.20
Mn	1 176	1 192	1 372	1 469	1 423	1 493	1 389	1 376	1 058	1 775	1 800	2 497	3 858
Fe	1 556	1 549	2 695	3 668	2 559	4 443	2 475	2 466	1 169	1 885	2 636	2 506	3 710
Co	0.01	0.12	0.11	0.12	0.12	0.08	0.09	0.12	0.07	0.09	0.21	0.09	0.14
Ga	0.28	0.38	0.25	0.24	0.33	0.14	0.21	1.17	0.44	0.52	0.15	0.93	1.42
Rb	0.39	0.10	0.22	0.04	0.04	0.23	0.13	0.12	0.04	0.02	0.42	0.14	0.25
Sr	1 187	1 211	1 110	1 117	1 125	1 028	1 146	1 165	1 047	1 423	1 049	2015	3 011
Y	36.0	35.2	40.3	38.4	40.0	50.6	43.0	42.4	30.4	40.0	47.0	61.9	99.8
Sn	0.06	0.05	0.05	0.05	0.07	0.06	0.06	0.03	0.06	0.10	0.21	0.09	0.26
Cs	0.14	0.02	0.08	0.02	0.04	0.10	0.06	0.03	0.01	0.02	0.10	0.07	0.08
Ba	4.58	7.62	4.55	6.28	6.90	4.92	6.75	24.0	12.7	15.3	9.05	24.3	40.9
La	13.4	30.6	28.5	29.3	43	12.9	99.4	94.6	44.5	29.4	29.9	83.8	259
Ce	46.7	104	75.7	87.5	97.8	44.7	255	254	104	93.9	71.2	198	539
Pr	6.74	12.9	9.65	11.3	11.7	7.29	29.2	29.2	12.2	12.6	11.3	23.8	57.7
Nd	29.2	49.8	41.8	43.9	43.4	33.6	103	100	42.7	48.2	45.3	85	192
Sm	8.66	9.87	9.49	9.21	9.56	10.2	16.3	14.8	8.75	10.7	10.4	17	29.7
Eu	0.98	1.09	1.13	1.13	1.05	1.18	1.42	1.39	0.86	1.25	1.11	1.68	3.29
Gd	6.6	8.04	8.38	8.47	8.45	9.8	10.2	10.1	6.49	8.26	8.62	13	21.1
Tb	1.14	1.08	1.28	1.24	1.25	1.5	1.39	1.24	0.92	1.25	1.24	1.77	3.03
Dy	6.63	6.53	7.72	7.68	7.84	9.91	8.18	8.16	5.28	7.3	7.96	11.7	17.4
Ho	1.35	1.34	1.58	1.46	1.52	1.92	1.65	1.62	1.14	1.34	1.62	2.18	3.73
Er	4.17	4.02	4.83	4.83	4.84	5.62	5.23	4.93	3.42	4.61	5	6.71	10.9
Tm	0.61	0.62	0.75	0.68	0.69	0.79	0.75	0.71	0.47	0.66	0.85	0.99	1.49
Yb	4.05	4.23	5.09	4.81	5	5.66	5.24	5.19	3.25	4.73	5.51	6.63	11.8
Lu	0.67	0.63	0.79	0.74	0.82	0.78	0.91	0.82	0.51	0.75	0.9	1.09	1.67
W	0.03	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.39	0.00	0.01
Bi	0.04	0.04	0.02	0.02	0.03	0.02	0.01	0.00	0.11	0.18	0.40	0.29	0.38
Th	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.31	0.14	0.11	0.35	0.70
U	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.02	0.04	0.37	0.02	0.60
ΣREE	131	235	197	212	237	146	538	527	235	225	201	453	1 152
LREE	106	209	166	182	207	110	504	494	213	196	169	409	1 081
HREE	25.2	26.5	30.4	29.9	30.4	36	33.5	32.8	21.5	28.9	31.7	44	71.1
LREE/HREE	4.19	7.87	5.47	6.1	6.79	3.05	15.1	15.1	9.93	6.78	5.33	9.29	15.2
(La/Yb) _N	2.37	5.19	4.01	4.37	6.16	1.63	13.6	13.1	9.83	4.45	3.88	9.06	15.7
δEu	0.38	0.36	0.38	0.38	0.35	0.36	0.31	0.33	0.34	0.39	0.35	0.33	0.38
δCe	1.2	1.29	1.12	1.18	1.05	1.11	1.15	1.18	1.08	1.2	0.95	1.07	1.04

注: $\delta\text{Eu}=\text{Eu}_N/(\text{Sm}_N\times\text{Gd}_N)^{1/2}$; $\delta\text{Ce}=\text{Ce}_N/(\text{La}_N\times\text{Pr}_N)^{1/2}$ 。

(LREE)含量尤其高, LREE/HREE 值为 16.2~17.3, 均值为 16.6; $(La/Yb)_N$ 值为 28.7~33.6, 均值为 30.5; δEu 值为 0.34~0.41, 均值为 0.36; δCe 值为 1.14~1.18, 均值为 1.16。方解石 ΣREE 值为 $131 \times 10^{-6} \sim 1152 \times 10^{-6}$, 均值为 310×10^{-6} , 相对于磷灰石, 稀土含量较低; LREE/HREE 值为 4.16~15.2, 均值为 7.97; $(La/Yb)_N$ 值为 1.69~15.7, 均值为 6.47; δEu 值为 0.31~0.39, 均值为 0.36; δCe 值为 0.95~1.29, 均值为 1.14。

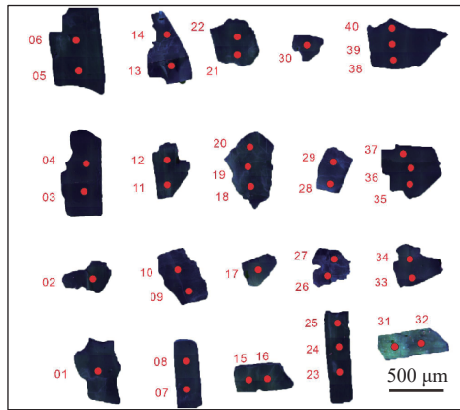


图4 磷灰石的 CL 图像和 U-Pb 谐和图

Fig. 4 Apatite CL images and U-Pb diagram from the Kumutashi fluorite deposit

4.5 磷灰石 Sr-Nd 同位素

库木塔什矿区磷灰石的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值为 0.709 13~0.710 47, $^{143}Nd/^{144}Nd$ 值为 0.511 38~0.511 53, $\epsilon Nd(t)$ 值为 -13.3~-10.3(表 4)。

5 讨论

5.1 成岩成矿时代

卡尔恰尔萤石矿带发育大规模岩浆岩, 主要为碱长花岗岩与片麻状花岗岩。年代学研究表明, 卡尔恰尔超大型萤石矿区碱长花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 (456 ± 2) Ma, 片麻状钾长花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 (915 ± 4) Ma(赵辛敏等, 2023)。周边地区花岗岩研究显示, 帕夏拉依档沟一带二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 (460 ± 4) Ma、正长花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 (455 ± 4) Ma, 形成于挤压体制向拉张体制转换的构造环境(张若愚等, 2016, 2018), 清水泉一带花岗质岩石锆石 U-Pb 年龄为 (451 ± 4) Ma, 形成于伸展构造背景(王立社等, 2016)。同时, 区域上发育大规模形成于早—中奥陶世碰撞造山阶段的伟晶岩脉群, 如吐格曼锂铍稀

4.4 磷灰石 U-Pb 定年

在阴极发光图像(CL)(图 4)中磷灰石表现出相对均一的特征, 没有明显的分带。磷灰石颗粒的 U 含量为 $36 \times 10^{-6} \sim 120 \times 10^{-6}$, 具有较高的 U 含量, 确保了所测试磷灰石颗粒具有较高含量的放射性成因 Pb, 能获取可靠的磷灰石结晶年龄。测试结果显示, 剔除部分离散点数据后, 磷灰石 30 个测试点在谐和图上年龄为 (448 ± 27) Ma(图 4, 表 3), 表明萤石矿形成时代为晚奥陶世。

有金属矿床的成矿黑云母二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 475~482 Ma, 含矿伟晶岩脉中铌钽铁矿 U-Pb 年龄为 (472 ± 8) Ma、锡石 U-Pb 年龄为 (468 ± 9) Ma(徐兴旺等, 2019; 李杭等, 2020; Gao et al., 2021)。

库木塔什萤石矿区磷灰石 U-Pb 等时线年龄结果为 (448 ± 27) Ma, 代表了冷却至其 U-Pb 体系封闭温度的时间。同时, 库木塔什萤石矿区与成矿相关的碱长花岗岩属于高氟岩体 [$w(F) > 0.1\%$], 锆石 U-Pb 加权平均年龄为 (450 ± 3) Ma(高永宝等, 2023), 磷灰石、碱长花岗岩的形成时期基本一致, 表明库木塔什萤石矿区萤石成矿作用与碱长花岗岩侵入活动密切相关, 均为晚奥陶世构造-岩浆活动的产物。

5.2 岩浆-流体演化特征

库木塔什萤石矿区磷灰石、萤石、方解石、带云母均呈粗粒至伟晶状, 磷灰石呈粗粒自形-半自形产出, 与萤石、方解石、带云母、氟碳铈矿等矿物共生, 颜色主要为绿色、灰绿色、蓝绿色、蓝色。镜下观察显示, 磷灰石表面干净, 颗粒完整, 未发育复杂的成分环带, 说明没有发生复杂的热液演化过程, 符合典型岩浆磷灰石的特征(谭侯铭睿等, 2022)。磷灰石地球

表 3 库木塔什矿区磷灰石 LA-ICP-MS U-Pb 分析结果

Tab. 3 LA-ICP-MS apatite U-Pb isotopic data from the Kumutashi fluorite deposit

测点号	元素含量 (10^{-6})			同位素比值									
	U	Th	U/Th	$n(^{238}\text{U})/$ $n(^{206}\text{Pb})$	2σ	$n(^{207}\text{Pb})/$ $n(^{206}\text{Pb})$	2σ	$n(^{207}\text{Pb})/$ $n(^{235}\text{U})$	2σ	$n(^{206}\text{Pb})/$ $n(^{238}\text{U})$	2σ	$n(^{208}\text{Pb})/$ $n(^{232}\text{Th})$	2σ
01	31.2	220	0.32	3.89	0.053 0	0.404 4	0.006 9	14.16	0.199 6	0.257 2	0.003 5	0.330 4	0.009 4
02	36.7	258	0.31	4.47	0.052 4	0.383 5	0.003 7	11.57	0.233 6	0.223 9	0.002 6	0.273 5	0.006 4
03	44.3	284	0.34	4.89	0.057 2	0.381 7	0.004 2	10.53	0.198 2	0.204 5	0.002 4	0.274 0	0.006 4
04	47.3	300	0.31	5.11	0.082 1	0.362 2	0.004 7	9.54	0.192 3	0.195 7	0.003 1	0.244 3	0.005 1
05	29.7	202	0.16	3.70	0.065 6	0.406 0	0.006 5	15.23	0.296 0	0.270 2	0.004 8	0.317 1	0.008 3
06	29.9	212	0.16	3.44	0.046 3	0.417 1	0.004 7	16.10	0.219 1	0.290 7	0.003 9	0.326 9	0.008 5
07	29.1	198	0.16	3.47	0.045 3	0.413 4	0.005 4	15.83	0.235 7	0.288 3	0.003 8	0.332 8	0.006 9
08	30.8	214	0.16	3.65	0.049 3	0.411 9	0.005 1	15.01	0.213 9	0.274 3	0.003 7	0.320 7	0.008 3
09	32.0	225	0.15	3.69	0.043 0	0.413 4	0.005 0	15.01	0.208 6	0.270 9	0.003 2	0.313 1	0.009 6
10	31.8	217	0.16	3.69	0.054 9	0.420 7	0.005 5	15.25	0.220 4	0.271 1	0.004 0	0.324 5	0.007 3
11	36.7	255	0.16	4.06	0.076 6	0.400 8	0.006 1	13.24	0.178 5	0.246 0	0.004 6	0.291 2	0.007 7
12	35.8	247	0.16	4.03	0.070 0	0.406 3	0.006 2	13.56	0.216 4	0.248 0	0.004 3	0.289 4	0.008 4
13	35.1	240	0.16	4.03	0.056 9	0.409 8	0.006 8	13.71	0.186 3	0.248 2	0.003 5	0.295 0	0.008 7
14	36.3	250	0.16	4.05	0.072 5	0.412 3	0.006 4	13.68	0.237 1	0.246 8	0.004 4	0.288 0	0.008 3
15	54.4	331	0.26	5.83	0.134 3	0.334 4	0.005 0	7.48	0.213 3	0.171 5	0.004 0	0.234 4	0.006 0
16	57.3	345	0.25	5.72	0.090 5	0.344 2	0.006 0	7.77	0.116 4	0.174 8	0.002 8	0.241 7	0.006 3
17	51.6	323	0.35	6.29	0.133 4	0.277 5	0.004 0	5.95	0.133 9	0.159 1	0.003 4	0.233 6	0.006 8
18	52.4	322	0.34	6.20	0.161 0	0.281 1	0.005 8	6.09	0.167 4	0.161 2	0.004 2	0.232 0	0.007 8
19	53.0	329	0.29	5.92	0.179 6	0.307 0	0.005 0	6.76	0.217 4	0.168 8	0.005 1	0.235 3	0.008 1
20	55.3	339	0.23	5.43	0.073 0	0.364 5	0.004 9	8.58	0.144 4	0.184 2	0.002 5	0.248 4	0.007 3
21	53.7	328	0.27	5.78	0.140 2	0.322 8	0.005 7	7.21	0.193 1	0.173 1	0.004 2	0.243 3	0.008 3
22	48.8	309	0.39	6.32	0.108 6	0.258 7	0.003 8	5.61	0.108 1	0.158 2	0.002 7	0.232 5	0.007 1
23	50.6	319	0.37	6.24	0.120 6	0.264 6	0.004 0	5.80	0.121 6	0.160 4	0.003 1	0.231 5	0.006 4
24	56.2	347	0.21	5.19	0.100 3	0.387 3	0.005 8	9.57	0.159 2	0.192 8	0.003 7	0.253 3	0.005 6
25	42.9	308	0.27	4.16	0.068 0	0.500 4	0.007 0	16.28	0.283 0	0.240 4	0.003 9	0.292 6	0.007 2
26	50.1	358	0.23	5.07	0.082 6	0.390 5	0.005 4	10.31	0.120 8	0.197 4	0.003 2	0.244 4	0.005 6
27	36.4	289	0.27	4.08	0.048 8	0.488 2	0.004 9	15.99	0.231 7	0.244 8	0.002 9	0.295 2	0.006 2
28	37.1	362	0.27	6.03	0.098 3	0.256 7	0.004 4	5.95	0.104 0	0.165 8	0.002 7	0.183 7	0.005 8
29	29.9	235	0.26	3.70	0.055 0	0.526 7	0.007 5	18.96	0.339 3	0.270 2	0.004 0	0.315 7	0.007 2
30	43.8	457	0.17	4.80	0.059 8	0.394 8	0.005 4	10.93	0.138 0	0.208 4	0.002 6	0.205 3	0.004 7
31	43.5	256	0.41	5.34	0.070 5	0.273 1	0.003 4	6.79	0.094 8	0.187 3	0.002 5	0.288 0	0.006 6
32	59.1	332	0.44	7.78	0.100 7	0.211 3	0.002 6	3.62	0.045 0	0.128 6	0.001 7	0.206 1	0.005 9
33	74.5	493	0.34	8.32	0.093 0	0.196 0	0.002 5	3.36	0.069 1	0.120 1	0.001 3	0.166 9	0.003 8
34	47.2	280	0.28	5.83	0.094 5	0.257 0	0.003 6	6.07	0.098 5	0.171 6	0.002 8	0.237 4	0.007 5
35	48.6	285	0.42	6.75	0.091 0	0.225 1	0.003 4	4.42	0.057 9	0.148 2	0.002 0	0.220 8	0.004 8
36	65.1	384	0.34	7.11	0.075 9	0.216 5	0.002 5	4.31	0.059 1	0.140 7	0.001 5	0.206 2	0.004 4
37	39.3	340	0.22	6.55	0.095 9	0.226 4	0.003 3	4.90	0.082 6	0.152 7	0.002 2	0.173 6	0.003 7
38	63.5	328	0.49	8.18	0.094 8	0.184 7	0.002 7	3.09	0.040 9	0.122 3	0.001 4	0.206 1	0.005 2
39	52.4	336	0.39	7.99	0.120 0	0.187 5	0.002 3	3.23	0.040 8	0.125 1	0.001 9	0.192 1	0.004 2
40	51.6	340	0.38	7.97	0.112 7	0.180 4	0.002 5	3.13	0.040 4	0.125 5	0.001 8	0.186 7	0.005 1

表 4 库木塔什磷灰石原位 Sr-Nd 同位素分析结果

Tab. 4 Sr and Nd isotopic results from the Kumutashi fluorite deposit

样号	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	εNd(t)
01	0.000 058	0.709 33	0.103 90	0.511 49	-11.1
02	0.000 004	0.709 73	0.104 54	0.511 51	-10.6
03	0.000 058	0.709 43	0.102 73	0.511 51	-10.7
04	0.000 058	0.709 47	0.099 28	0.511 41	-12.7
05	0.000 058	0.709 60	0.105 04	0.511 43	-12.1
06	0.000 058	0.709 48	0.102 59	0.511 40	-12.8
07	0.000 058	0.710 47	0.104 82	0.511 49	-11.1
08	0.000 058	0.709 38	0.104 11	0.511 51	-10.7
09	0.000 040	0.709 49	0.102 02	0.511 53	-10.3
10	0.000 014	0.709 65	0.103 94	0.511 52	-10.4
11	0.000 111	0.709 16	0.107 24	0.511 45	-11.8
12	0.000 014	0.709 28	0.104 26	0.511 38	-13.3
13	0.000 144	0.709 13	0.104 44	0.511 45	-11.9
14	0.000 140	0.709 21	0.102 45	0.511 38	-13.2
15	0.000 015	0.709 15	0.103 71	0.511 49	-11.0

化学特征具高 Si 低 Fe、Mn 的特征,在 SiO₂-MnO 投图中,样品均落在岩浆磷灰石区域(图 5),表明库木塔什矿区磷灰石均为岩浆结晶阶段形成的磷灰石。

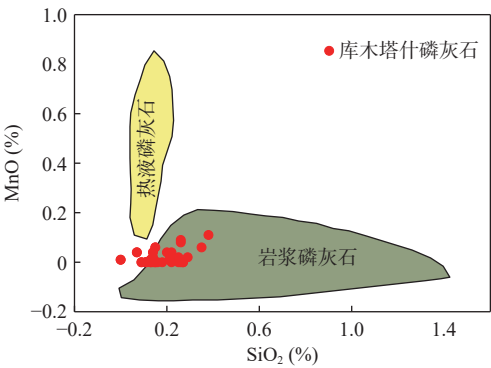


图5 库木塔什萤石矿区磷灰石 SiO₂-MnO 图解
(据 Zhao et al., 2020)

Fig. 5 SiO₂-MnO diagram of apatite from the Kumutashi fluorite deposit

磷灰石结构中可以容纳 F-Cl-OH, 且具有较强的抗蚀变能力,在高温下(>500 ℃)进入磷灰石的卤素一般不易受到后期热液交代的影响(Hovis et al., 2010),故其卤族元素可以用于衡量岩浆-热液系统的成矿能力、甄别流体来源以及反演岩浆熔体中挥发分含量(赵振华, 2010; Parat et al., 2011; Chelle-Michou et al., 2017; Richards et al., 2017)。Cl在岩浆和热液系统中

扮演了多数金属元素的络阴离子的角色,通常高 Cl 的岩浆和热液体系具有更强的成矿能力,磷灰石中 Cl 含量受结晶岩浆中 Cl 浓度和水含量变化的影响(Treloar et al., 1996; Webster et al., 1999)。实验研究表明, F 很容易保留在熔体相中,而 Cl 优先进入富含 H₂O 的流体相(Webster et al., 2002; Mathez et al., 2005),磷灰石中 F 和 F/Cl 值能够反映岩浆源区特征并区分成矿类型(Cao et al., 2012; Ding et al., 2015; Bao et al., 2016; Liu et al., 2021; 邢凯等, 2021)。Brehler 等(1974)指出由于 Cl 在水溶液中的高溶解度,其在风化过程中很容易从母岩中移除,而 F 不易流失,所以地壳重熔形成的岩体经常表现出富 F 贫 Cl 的特征,并反映到岩体中磷灰石 F 和 Cl 组成上。因此,幔源岩石及镁铁质岩石中的磷灰石 F/Cl 值较低,而花岗质岩石尤其是 S 型花岗岩中的磷灰石 F/Cl 值较高。库木塔什矿区磷灰石均表现为富 F、贫 Cl, F/Cl 值高(均值为 436)的特征,表明其与花岗质岩浆作用密切相关。

由于 REE、Sr、U、Th 等微量元素在岩浆演化中的地球化学行为受不同矿物结晶的控制,磷灰石中微量元素的丰度在很大程度上取决于岩浆系统中磷灰石结晶的时间(Prowatke et al., 2006; Hughes et al., 2015)。由野外观察、元素地球化学以及相关年代学测试结果显示,库木塔什萤石矿床中磷灰石为前期形

成, 属于岩浆阶段产物; 而萤石、方解石其次形成, 为热液阶段产物; 最后形成带云母, 为热液阶段产物。因此, 在岩浆-热液演化过程中, 磷灰石代表了初始岩浆成分, 磷灰石的化学成分, 如 Eu、Ce、Ga 等含量, 对岩浆氧化非常敏感 (Belousova et al., 2002; Miles et al., 2014; Mao et al., 2016)。成矿过程中地幔流体可引起岩浆熔体中的部分微量元素含量发生改变, 如大离子亲石元素发生明显富集, 且普遍具有高 Sr/Y 值特征 (孙丰月等, 1995; 喻学惠, 1995)。因此, 镁铁质岩石和碱性岩中的磷灰石具有高 Sr 含量和 Sr/Mn 值, I 型花

岗岩中 Sr/Mn 值则接近 1, 而 S 型和 A 型花岗岩中磷灰石具有高 Mn 含量、低 Sr/Mn 值。因此, Sr-Y、Sr-Mn、Y-(Eu/Eu*) 和 (Ce/Yb)_N-REE 判别图解可用于区分花岗岩、花岗伟晶岩、辉绿岩和镁铁质岩石等常见岩浆岩中磷灰石母岩类型 (Belousova et al., 2001, 2002)。库木塔什矿区磷灰石具有高 Sr 含量和 Sr/Mn 比值, 符合过铝质花岗岩的特征。对库木塔什萤石矿区的磷灰石进行 Sr 和 Y 判别图解和 Sr 和 Mn 判别图解分析, 大部分点落入花岗岩区域内, 也印证了磷灰石的形成与花岗质岩浆侵入有关 (图 6)。

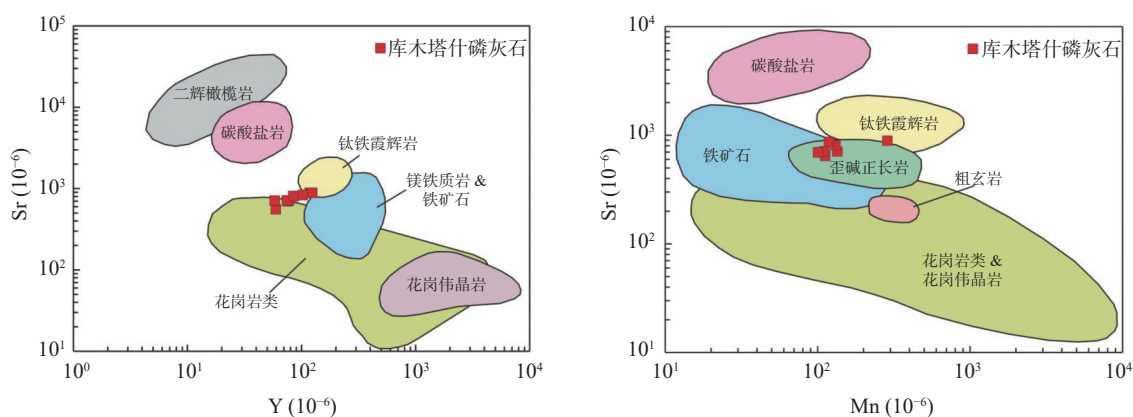


图6 库木塔什萤石矿床中磷灰石 Sr-Y 与 Sr-Mn 图解

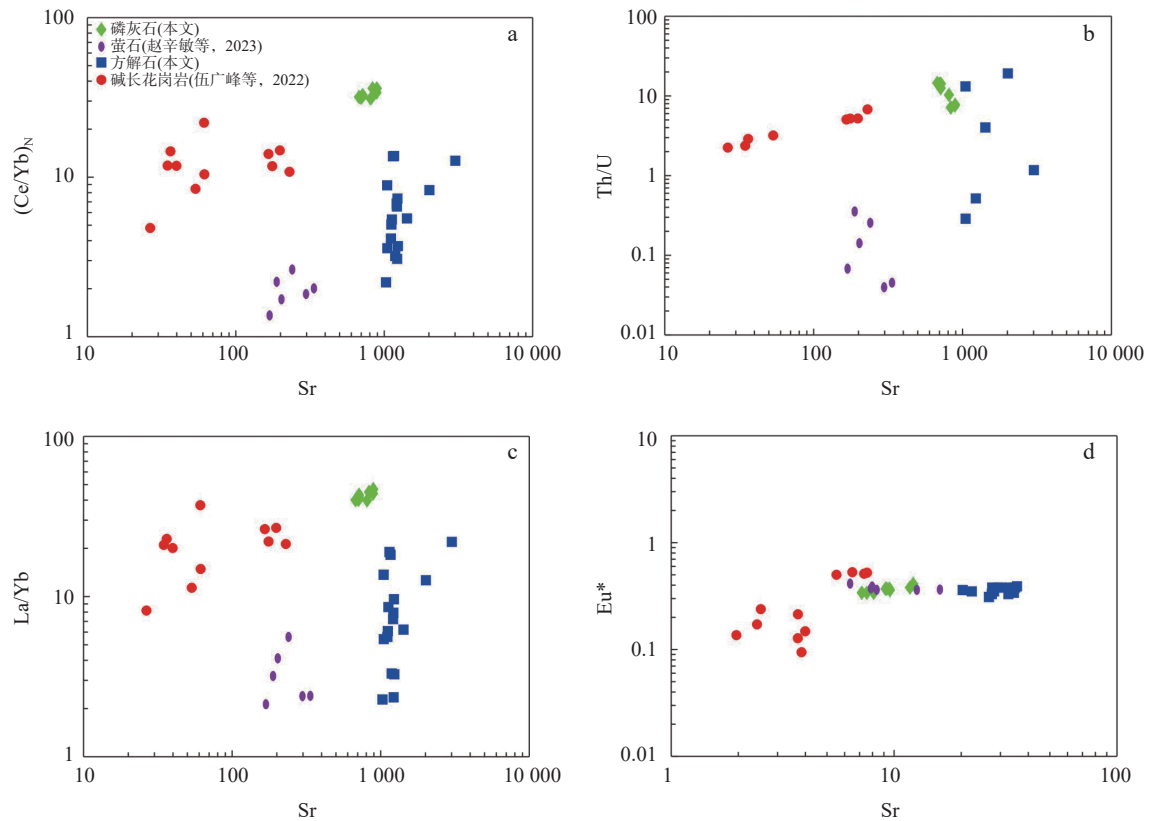
Fig. 6 Sr-Y and Sr-Mn diagrams of apatite from the Kumutashi fluorite deposit

幔源岩石中磷灰石强烈富集轻稀土元素, (Ce/Yb)_N > 50, 花岗质岩石中磷灰石的 (Ce/Yb)_N 通常小于 15~25, 而在一些过铝质花岗岩及花岗伟晶岩中, 该比值则接近 1 (邢凯等, 2021; 谭侯铭睿等, 2022)。库木塔什萤石矿区的磷灰石 (Ce/Yb)_N 值为 31~36 (图 7a), 表明该区域磷灰石具壳幔混合成因特征。Sr 与 Th/U 有一定的负相关性, S 型花岗岩中的 Th/U 明显小于 1, 而其他岩性的该比值通常大于 1, 库木塔什萤石矿区磷灰石 Th/U 值为 7~14 (图 7b), 说明库木塔什矿区磷灰石与矿区广泛发育与成矿有关的 A 型碱长花岗岩密切相关 (高永宝等, 2023)。库木塔什萤石矿区磷灰石 La/Yb 值为 39~4 (图 7c), Sr 与 La/Yb 有一定的正相关性; Sr/Y 值为 8~12, Eu* 值为 0.34~0.41, Sr/Y 与 Eu* 有一定的正相关性, 随着岩浆分异程度的增加, 磷灰石的 Sr/Y 值逐渐降低、Eu* 值也逐渐降低 (图 7d)。

磷灰石中的 Eu 和 Ce 具有相反的分配特征, 所以对于判别磷灰石的形成环境具有重要的意义。Eu 和 Ce 具有两个离子价态, 分别为 Eu³⁺/Eu²⁺、Ce³⁺/Ce⁴⁺, Eu³⁺ 和 Ce³⁺ 具有与 Ca²⁺ 更相近的离子半径, 通过替换磷

灰石结构中的 Ca²⁺ 而掺入磷灰石的结构 (Cao et al., 2012)。在高氧逸度环境下, 熔体中存在较多的 Eu³⁺ 和较少的 Ce³⁺, 形成的磷灰石将表现出 Ce 轻微正异常到负异常和 Eu 中等负异常到正异常。反之, 形成于还原环境下的磷灰石, 将表现出 Ce 正异常和强烈 Eu 负异常 (Macdonald et al., 2013)。库木塔什矿区磷灰石表现出强烈 Eu 负异常和中等的 Ce 正异常, 可能形成于还原环境。测试结果显示, 库木塔什矿区碱长花岗岩、萤石、方解石稀土元素配分曲线特征较相似, 说明碱长花岗岩、磷灰石、萤石、方解石具有重要的成因及演化联系 (图 8)。

库木塔什矿区磷灰石与萤石共生产出, 表明与成矿有关母岩浆中富含 F, 富氟花岗岩具高度结晶分异和丰富流体的特征, 表明磷灰石是在挥发-过饱和阶段形成的 (Qu et al., 2019)。花岗岩从岩体边缘向内部分离结晶, 稀有金属元素、助熔剂 (如 P 和 F) 等在石英和长石的初始结晶过程中被排出, 这些不相容元素向残余熔体中富集 (Thomas et al., 2000; London et al., 2012), 并且花岗岩在相对封闭的岩浆-热液体系中经



a. $(\text{Ce/Yb})_N$ 和 Sr 元素含量 (10^{-6}) 投图; b. Th/U 和 Sr 元素含量 (10^{-6}) 投图; c. La/Yb 和 Sr 元素含量投图; d. Eu^* 和 Sr/Y 投图

图7 库木塔什萤石矿区岩体与不同矿物地球化学协变图

Fig. 7 Comparison of geochemical characteristics of apatite from the Kumutashi fluorite deposit

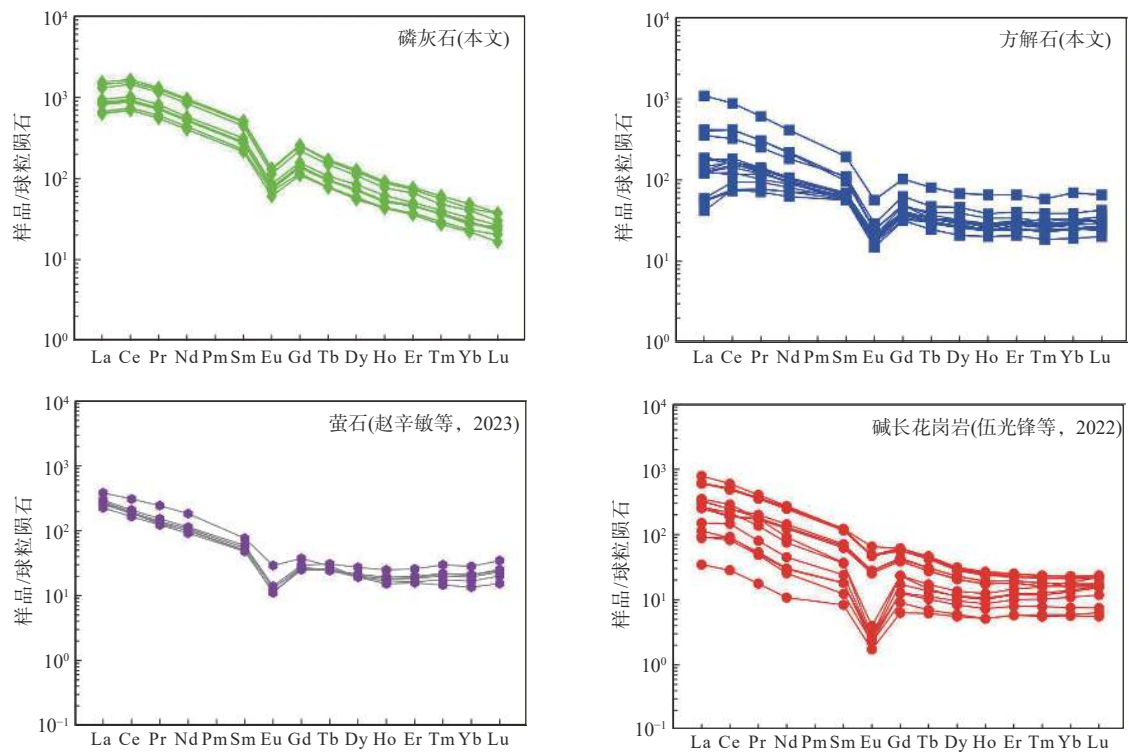


图8 库木塔什矿区岩体及不同矿物稀土元素配分模式图

Fig. 8 Distribution of the rare-earth elements from the Kumutashi fluorite deposit

历了广泛的晶体-流体相互作用, 导致成矿元素的淋滤和再沉淀(Fan et al., 2020)。例如, 早期含 F 矿物在岩浆-热液阶段溶解向热液中释放 F, 导致热液中 F 含量的升高, 在热液中 F 以化合物或络合物形式迁移, REEs 通常与 F 形成稳定的络合物, 相比流体, REE+F 会优先分布在熔体中(Teiber et al., 2014; Chen et al., 2014), 这能解释库木塔什萤石矿床中的磷灰石中有较高的 ΣREE 值($908 \times 10^{-6} \sim 2165 \times 10^{-6}$), 同时熔体中较高的 F 为萤石的形成提供了重要的元素来源。

磷灰石 Sr-Nd 同位素组成有助于更加深入理解矿床成因和成矿过程(Amelin et al., 2000; Liu et al., 2021)。磷灰石中 Sr 的含量较高(可达几百到数千个 10^{-6}), 而 Rb 在磷灰石和花岗质熔体中分配系数为 0.0013 (Prowatke et al., 2006), 这意味着磷灰石中 Rb 的含量极低(通常小于 1×10^{-6}), 基本可以忽略(Creaser et al., 1992; Ramos et al., 2004; Yang et al., 2014)。因此, 磷灰石中的 Sr 同位素组成基本不受 Rb 衰变的影响, 能够反映原始岩浆/热液特征。一般认为, 岩浆磷灰石 Sr-Nd 同位素比值的异常多是热液交代作用的结果(Naylor et al., 1970)。Xing 等(2020)发现, 遭受过热液蚀变的磷灰石 Sr-Nd 同位素组成明显有别于未蚀变的岩浆磷灰石, 反映了流体交代作用对同位素比值的重置。Farver 等(1989)指出, 从固相线快速冷却且未受流体干扰的磷灰石能保存初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值。库木塔什矿床磷灰石原位 Sr-Nd 同位素表明, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 $0.70913 \sim 0.71047$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值为 $0.51138 \sim 0.51153$, $\varepsilon\text{Nd}(t)$ 值为 $-13.3 \sim -10.3$, 均表明具有壳幔混合的成因特征(图 9), 这与矿区 A 型碱长花岗岩的研究结论基本一致(高永宝等, 2023)。

5.3 成矿机制

大量的年代学研究表明, 阿尔金南缘高压-超高压岩石原岩形成时代为 $1000 \sim 750$ Ma(李杭, 2022), 变质时代为 $519 \sim 486$ Ma(Zhang et al., 2001; 刘良等, 2007), 退变质时代为 ~ 450 Ma(Liu et al., 2012), 代表了深俯冲陆壳的折返时间, 同时大量幔源溶体开始上涌, 地壳物质受热发生部分熔融而形成大量花岗质岩石(Yu et al., 2019)。沿阿尔金造山带南缘存在的陆壳深俯冲型高压-超高压变质岩带(~ 500 Ma)(刘亚非等, 2016)是原特提斯洋壳俯冲、陆壳深俯冲及其后的折返作用的产物(许志琴等, 2010), 陆壳深俯冲/折返事件发生在约 450 Ma(刘良等, 2015)。库木塔什地区周边邻近的花岗岩, 如阿尔金西段瓦石峡二长花岗岩

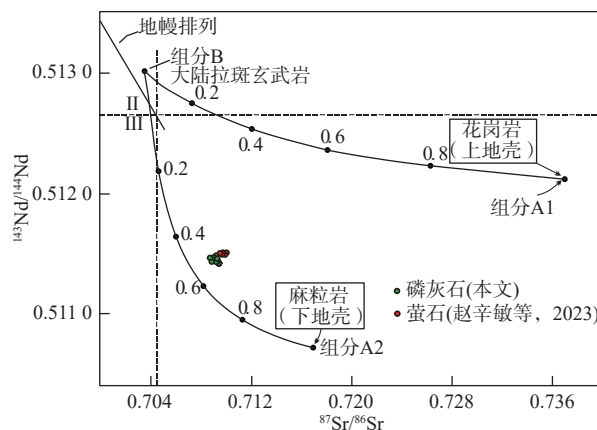


图9 库木塔什萤石矿区 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 图解

Fig. 9 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ diagram from the Kumutashi fluorite deposit

形成于 (462 ± 2) Ma(曹玉亭等, 2010)、长沙沟镁铁质-超镁铁质岩体形成于 (467 ± 1) Ma(马中平等, 2011), 塔特勒克布拉片麻状花岗岩形成于 (451 ± 2) Ma(康磊等, 2013); 帕夏拉依档二长花岗岩形成于 (460 ± 4) Ma(张若愚等, 2016)等, 相关岩体锆石 U-Pb 年龄大多为 $467 \sim 446$ Ma, 均是阿尔金南缘后碰撞伸展背景下的岩浆响应。据此推测, 库木塔什萤石矿床形成于 $450 \sim 448$ Ma, 为阿中地块与阿南地块的后碰撞伸展阶段岩浆-热液活动的产物(图 10)。

库木塔什矿区磷灰石与碱长花岗岩、方解石、萤石具有明显的成因关系, 表明萤石成矿流体可能来源于来自碱长花岗岩浆演化。库木塔什萤石矿床 H-O 同位素研究表明, $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ 值为 $-58.1\text{‰} \sim -71.9\text{‰}$, 平均值为 -66.4‰ ; $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值为 $-3.5\text{‰} \sim 2.8\text{‰}$, 均值为 -1.6‰ , 成矿流体主要为岩浆热液和大气降水混合流体; 包裹体研究表明成矿早阶段为中高温、中低盐度流体, 均一温度为 $225 \sim 411$ $^{\circ}\text{C}$, 晚阶段由于大气降水加入, 为中低温、低盐度流体, 温度降低为 $117 \sim 291$ $^{\circ}\text{C}$ (张毅等, 待发表)。因此, 推测库木塔什地区因强烈的拉张作用使幔源岩浆底侵上涌并与地壳发生壳幔混合, 形成 A 型花岗质岩浆并沿区域性深大断裂上升侵位至浅部地壳, 在上侵过程中又经历了高度分异演化, 成矿元素和挥发分等在岩浆热液中高度富集。富含 F 的岩浆热液沿构造裂隙运移过程中, 持续作用于阿尔金岩群黑云斜长片麻岩、大理岩等富 Ca 地层, 并将其中 Ca、Mg、Na 等元素不断活化、萃取出来, 形成含 F 成矿热液。随后成矿流体经历了液态不混溶分异, F 元素一方面可作为液态不混溶作用的催化剂, 另一方面与成矿元素结合形成络合物, 促进成矿元素

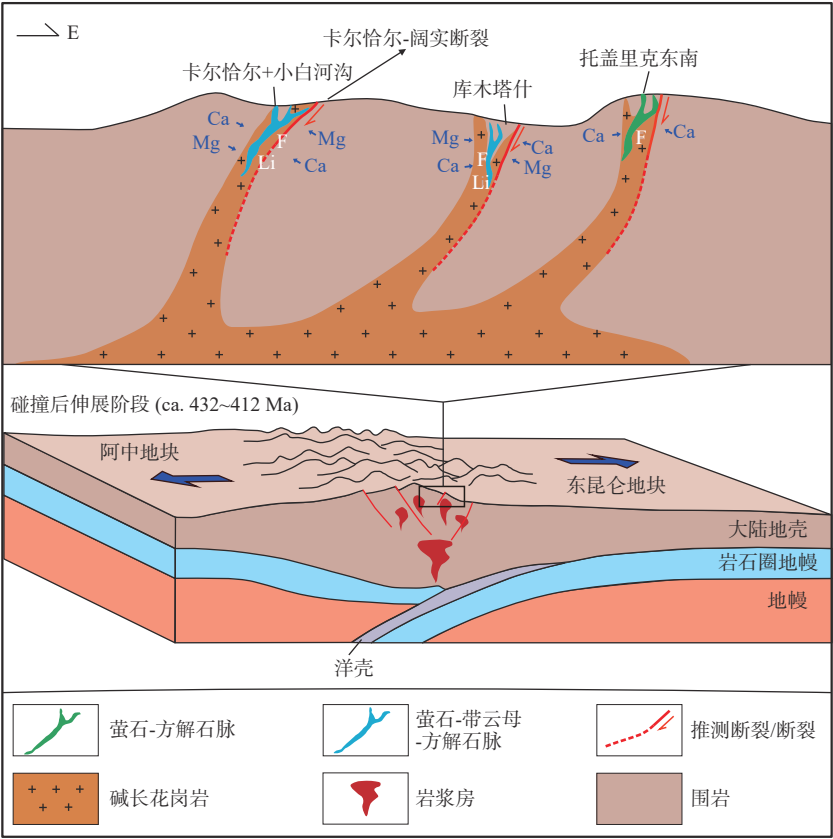


图10 卡尔恰尔超大型萤石矿带区域成矿模式图

Fig. 10 Regional metallogenic model of Kaerqiaer Super-large Fluorite Zone

的迁移。随着热液体系物理化学条件(酸碱性和氧化还原、pH 值等)发生改变,含矿流体运移到适合的容矿环境时,与围岩作用而发生碳酸盐化,致使含 F 络合物的分解和 F⁻、Ca²⁺等离子产生,继而 F⁻、Ca²⁺离子结合形成 CaF₂ 而沉淀充填于有利的构造裂隙中。最终,岩浆期后含矿热液继续沿构造裂隙上升并与断裂和裂隙下渗的大气降水混合,引起流体体系物理化学场的改变,又使大量 F 络合物的分解和 F⁻、Ca²⁺等离子的产生,形成萤石矿脉。

6 结论

(1)库木塔什萤石矿区磷灰石微区原位 U-Pb 同位素年龄为(448±27) Ma,与矿区碱长花岗岩(450±3 Ma)的形成时代基本一致,表明库木塔什矿区成岩成矿时代集中于晚奥陶世,形成于后碰撞伸展阶段。

(2)库木塔什萤石矿区磷灰石富 F、贫 Cl, F/Cl 值较高,为 194~745,均值为 436,为岩浆结晶阶段形成;磷灰石⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值为 0.709 13~0.710 47, ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 值为 0.511 32~0.511 571, εNd(t) 值为 -13.3~-10.3,反映

其形成与壳幔混合花岗质岩浆作用密切相关。

(3)库木塔什萤石矿区磷灰石具有高 Sr 含量和 Sr/Mn 值, (Ce/Yb)_N 值为 31~36, Th/U 值为 7~14, Sr/Y 值为 8~12, 稀土元素表现为右倾的光滑曲线、具强烈 Eu 负异常的配分模式,且与矿区萤石、方解石、碱长花岗岩有明显的相关性,可能与岩浆-热液阶段大量流体出溶密切相关,成矿流体主要来源于岩浆热液,矿床类型属岩浆热液充填型萤石矿床。

参考文献(References):

曹玉亭,刘良,王超,等.阿尔金南缘塔特勒克布拉克花岗岩的地球化学特征、锆石 U-Pb 定年及 Hf 同位素组成[J].岩石学报,2010,26(11):3259-3271.

CAO Yuting, LIU Liang, WANG Chao, et al. Geochemical, Zircon U-Pb Dating and Hf Isotope Compositions Studies for Tatelekebulake Granite in South Altyn Tagh[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(11): 3259-3271.

陈宁,曾忠诚,赵端昌,等.阿尔金造山带南缘晚奥陶世碱性辉长岩成因及其大地构造意义[J].西北地质,2023,56(4):91-102.

- CHEN Ning, ZENG Zhongcheng, ZHAO Duanchang, et al. Petrogenesis and Tectonic Implications of Late Ordovician Alkaline Gabbro in the South Altyn Orogenic Belt[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(4): 91–102.
- 高永宝, 赵辛敏, 王博, 等. 阿尔金西段卡尔恰尔-库木塔什超大型萤石矿带矿床地质、控矿花岗岩特征及找矿远景[J]. *中国地质*, 2023, 50(3): 704–729.
- GAO Yongbao, ZHAO Xinmin, WANG Bo, et al. Geological characteristics, associated granites and the prospecting potential of the super-large Kaerqiaer-Kumutashi fluorite mineralization belt in the West Altyn-Tagh Orogen, NW China[J]. *Geology in China*, 2023, 50(3): 704–729.
- 段星星, 张越, 袁彦伟, 等. 阿尔金南缘清水泉堆晶岩年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. *西北地质*, 2023, 56(4): 103–115.
- DUAN Xingxing, ZHANG Yue, YUAN Yanwei, et al. Geochronology, Geochemistry and Geological Significance of Cumulates in Qingshuiquan Region, South Altyn Tagh[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(4): 103–115.
- 何元方, 张振凯, 高峰, 等. 阿尔金索尔库里地区石英闪长玢岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义[J]. *西北地质*, 2018, 51(3): 38–52.
- HE Yuanfang, ZHANG Zhenkai, GAO Feng, et al. Zircon U-Pb Ages and Geochemical Characteristics of Quartz Diorite Porphyrite from Suoerkuli Area in Altyn Tagh and their Geological Significance[J]. *Northwestern Geology*, 2018, 51(3): 38–52.
- 康磊, 刘良, 曹玉亭, 等. 阿尔金南缘塔特勒克布拉克复式花岗岩体东段片麻状花岗岩的地球化学特征、锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2013, 29(9): 3039–3048.
- KANG Lei, LIU Liang, CAO Yuting, et al. Geochemistry, zircon U-Pb age and its geological significance of the gneissic granite from the eastern segment of the Tatelekebulake composite granite in the south Altyn Tagh[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(9): 3039–3048.
- 李杭, 洪涛, 杨智全, 等. 稀有金属花岗伟晶岩锆石、锡石与钽铌铁矿 U-Pb 和白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测年对比研究-以阿尔金中段吐格曼北锂铍矿床为例[J]. *岩石学报*, 2020, 36(9): 2869–2892.
- LI Hang, HONG Tao, YANG Zhiquan, et al. Comparative studying on zircon, cassiterite and coltan U-Pb dating and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of muscovite rare-metal granitic pegmatites: A case study of the northern Tugeman lithium-beryllium deposit in the middle of Altyn Tagh[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2020, 36(9): 2869–2892.
- 李杭, 洪涛, 杨智全, 等. 阿尔金中段吐格曼北花岗伟晶岩型锂铍矿床多阶段岩浆-成矿作用[J]. *岩石学报*, 2022, 38(10): 3085–3103.
- LI Hang, HONG Tao, YANG Zhiquan, et al. Multi-stage magmatism-mineralization and tectonic setting of the North Tugeman granitic pegmatite lithium-beryllium deposit in the middle of Altyn Tagh[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2022, 38(10): 3085–3103.
- 刘良, 张安达, 陈丹玲, 等. 阿尔金江孜勒萨石榴辉岩和围岩锆石 LA-ICP-MS 微区原位定年及其地质意义[J]. *地学前缘*, 2007, 14(1): 98–107.
- LIU Liang, ZHANG Anda, CHEN Danling, et al. Implication based on LA-ICP-MS ages of eclogite and its country rock from Jiang galesayi area, Altyn Tagh[J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(1): 98–107.
- 刘良, 康磊, 曹玉亭, 等. 南阿尔金早古生代俯冲碰撞过程中的花岗岩岩浆作用[J]. *中国科学: 地球科学*, 2015, 58(8): 1513–1522.
- LIU Liang, KANG Lei, CAO Yuting, et al. Early Paleozoic granitic magmatism related to the processes from subduction to collision in South Altyn, NW China[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2015, 58(8): 1513–1522.
- 刘亚非, 王立社, 魏小燕, 等. 应用电子微探针-扫描电镜-拉曼光谱-电子背散射衍射研究一种未知 Ti-Zr-U 氧化物的矿物学特征[J]. *岩矿测试*, 2016, 35(1): 48–55.
- LIU Yafei, WANG Lishe, WEI Xiaoyan, et al. Study on the mineralogical properties of an unknown Ti-Zr-U oxide using EPMA, SEM, Raman Spectroscopy and EBSD techniques[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2016, 35(1): 48–55.
- 马中平, 李向民, 徐学义, 等. 南阿尔金山清水泉镁铁-超镁铁质侵入体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素定年及其意义[J]. *中国地质*, 2011, 38(4): 1071–1078.
- MA Zhongping, LI Xiangmin, XU Xueyi, et al. Zircon LA-ICP-MS U-Pb isotopic dating for Qingshuiquan layered mafic ultramafic intrusion southern Altun orogen, in northwestern China and its implication[J]. *Geology in China*, 2011, 38(4): 1071–1078.
- 孙丰月, 石淮立. 试论幔源 C-H-O 流体与大陆板内某些地质作用[J]. *地学前缘*, 1995, 2(1–2): 167–174.
- SUN Fengyue, SHI Zhunli. On the mantle-derived C-H-O fluid system and its significance to some geologic processes within continental plate[J]. *Earth Science Frontiers*, 1995, 2(1–2): 167–174.
- 谭侯铭睿, 黄小文, 漆亮, 等. 磷灰石化学组成研究进展: 成岩成矿过程示踪及对矿产勘查的指示[J]. *岩石学报*, 2022, 38(10): 3067–3084.
- TAN Houminrui, HUANG Xiaowen, QI Liang, et al. Research progress on chemical composition of apatite: Application in petrogenesis, ore genesis and mineral exploration[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2022, 38(10): 3067–3084.
- 王核, 马华东, 张嵩, 等. 新疆阿尔金地区黄龙岭超大型伟晶岩型锂矿床的发现及找矿意义[J]. *岩石学报*, 2023, 39(11): 3307–3318.
- WANG He, MA Huadong, ZHANG Song, et al. Discovery of the

- Huanglongling giant lithium pegmatite deposit in Altyn Tagh, Xinjiang, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2023, 39(11): 3307–3318.
- 王立社, 杨鹏飞, 段星星, 等. 阿尔金南缘中段清水泉斜长花岗岩同位素年龄及成因研究[J]. *岩石学报*, 2016, 32(3): 759–774.
- WANG Lishe, YANG Pengfei, DUAN Xingxing, et al. Isotopic age and genesis of plagiogranite from Qingshuiquan area in the middle of South Altyn Tagh[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2016, 32(3): 759–774.
- 吴益平, 张连昌, 袁波, 等. 新疆阿尔金地区卡尔恰尔超大型萤石矿床地质特征及成因[J]. *地球科学与环境学报*, 2021, 43(6): 962–977.
- WU Yiping, ZHANG Lianchang, YUAN Bo, et al. Geological Characteristics and Genesis of the Super-large Kalqiar Fluorite Deposit in Altyn Tagh Area of Xinjiang, China[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2021, 43(6): 962–977.
- 吴益平, 张连昌, 周月斌, 等. 阿尔金卡尔恰尔超大型萤石矿床成矿流体特征及形成机制探讨[J]. *地质科学*, 2022, 57(2): 495–509.
- WU Yiping, ZHANG Lianchang, ZHOU Yuebin, et al. Study on fluid characteristic and metallogenic mechanism of the super-large Kalqiaer fluorite deposit in Altyn Tagh area[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2022, 57(2): 495–509.
- 邢凯, 舒启海. 磷灰石在矿床学研究中的应用[J]. *矿床地质*, 2021, 40(02): 189–205.
- XING Kai, SHU QiHai. Applications of apatite in study of ore deposits: A review[J]. *Mineral Deposits*, 2021, 40(02): 189–205.
- 徐兴旺, 李杭, 石福品, 等. 阿尔金中段吐格曼地区花岗伟晶岩型稀有金属成矿特征与找矿预测[J]. *岩石学报*, 2019, 35(11): 3303–3316.
- XU Xingwang, LI Hang, SHI Fupin, et al. Metallogenic characteristics and prospecting of granitic pegmatite-type rare metal deposits in the Tugeman area, middle part of Altyn Tagh[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2019, 35(11): 3303–3316.
- 许志琴, 杨经绥, 嵇少丞, 等. 中国大陆构造及动力学若干问题的认识[J]. *地质学报*, 2010, 84(1): 1–29.
- XU Zhiqin, YANG Jingsui, JI Shaocheng, et al. On the Continental Tectonics and Dynamics of China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2010, 84(1): 1–29.
- 赵辛敏, 高永宝, 燕洲泉, 等. 阿尔金卡尔恰尔超大型萤石矿带成因: 来自年代学、稀土元素和 Sr-Nd 同位素的约束[J]. *西北地质*, 2023, 56(1): 31–47.
- ZHAO Xinmin, GAO Yongbao, YAN Zhouquan, et al. Genesis of Kalqiaer Super-large Fluorite Zone in Altyn Tagh Area: Chronology, Rare Earth Elements and Sr-Nd Isotopes Constraints[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(1): 31–47.
- 赵振华. 副矿物微量元素地球化学特征在成岩成矿作用研究中的应用[J]. *地学前缘*, 2010, 17(1): 267–286.
- ZHAO Zhenhua. Trace element geochemistry of accessory minerals and its applications in petrogenesis and metallogenesis[J]. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(1): 267–286.
- 喻学惠. 地幔交代作用: 研究进展、问题及对策[J]. *地球科学进展*, 1995, 10(4): 330–335.
- YU Xuehui. Mantle metasomatism: progresses, problems and countermeasure[J]. *Advance in Earth Sciences*, 1995, 10(4): 330–335.
- 张若愚, 曾忠诚, 朱伟鹏, 等. 阿尔金造山带帕夏拉依档岩体锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及地质意义[J]. *地质论评*, 2016, 62(5): 1283–1299.
- ZHANG Ruoyu, ZENG Zhongcheng, ZHU Weipeng, et al. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating, Geochemical Features and Their Geological Implications of Paxialayidang Plutons on the Southern Margin of Altyn Tagh[J]. *Geological Review*, 2016, 62(5): 1283–1299.
- 张若愚, 曾忠诚, 陈宁, 等. 阿尔金造山带南缘中-晚奥陶世正长花岗岩的发现及其地质意义[J]. *地质通报*, 2018, 37(4): 545–558.
- ZHANG Ruoyu, ZENG Zhongcheng, CHEN Ning, et al. The discovery of Middle-Late Ordovician syenogranite on the southern margin of Altyn orogenic belt and its geological significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 2018, 37(4): 545–558.
- 周敖日格勒, 王英, 唐菊兴, 等. 冈底斯斑岩铜矿带东段早中新世剥蚀作用及对渐新世—中新世斑岩矿床时空分布的影响[J]. *西北地质*, 2022, 55(3): 286–296.
- ZHOU Aorigele, WANG Ying, TANG Juxing, et al. Early Miocene Exhumation History in the Eastern Gangdese Porphyry Copper Belt and Its Influence on the Spatiotemporal Distribution of Oligocene-Miocene Porphyry Deposits[J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(3): 286–296.
- Amelin Y, Valeev O. Nd-Pb-Sr isotope systematics of crustal assimilation in the Voisey's Bay and Mushuau intrusions, Labrador, Canada[J]. *Economic Geology*, 2000, 95(4): 815–830.
- Bao B, Webster J D, Zhang D H, et al. Compositions of biotite, amphibole, apatite and silicate melt inclusions from the Tongchang mine, Dexing porphyry deposit, SE China: Implications for the behavior of halogens in mineralized porphyry systems[J]. *Ore Geology Reviews*, 2016, 79: 443–462.
- Belousova E A, Walters S, Griffin W L, et al. Trace element signatures of apatites in granitoids from the Mt Isa Inlier, northwestern Queensland[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 2001, 48(4): 603–619.
- Belousova E A, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. Apatite as an indicator mineral for mineral exploration: trace-element composition and their relationship to host rock type[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2002, 76(1): 45–69.

- Cao M J, Li G M, Qin K Z, et al. Major and trace element characteristics of apatites in granitoids from central Kazakhstan: Implications for petrogenesis and mineralization[J]. *Resource Geology*, 2012, 62(1): 63–83.
- Brehler B. Chlorine[J]. *Handbook of Geochemistry*, 1974, 2: 17A–17O.
- Chelle-Michou C, Chiaradia M. Amphibole and apatite in-sights into the evolution and mass balance of Cl and S in magmas associated with porphyry copper deposits[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2017, 172: 105.
- Chen B, Ma X, Wang Z, et al. Origin of the fluorine-rich highly differentiated granites from the Qianlishan composite plutons (South China) and implications for polymetallic mineralization [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 93: 301–314.
- Creaser R A, Gray C M. Preserved initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ in apatite from altered felsic igneous rocks: A case study from the Middle Proterozoic of South Australia[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1992, 56(7): 2789–2795.
- Ding T, Ma D S, Lu J J, et al. Apatite in granitoids related to polymetallic mineral deposits in southeastern Hunan Province Shihang zone, China: Implications for petrogenesis and metallogenesis[J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 69: 104–117.
- Fan J J, Tang G J, Wei G J, et al. Lithium isotope fractionation during fluid exsolution: Implications for Li mineralization of the Bailongshan pegmatites in the West Kunlun, NW Tibet[J]. *Lithos*, 2020, 352–353: 105236.
- Farver J R, Giletti B J. Oxygen and strontium diffusion kinetics in apatite and potential applications to thermal history determinations[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1989, 53(7): 1621–1631.
- Gao Y B, Zhao X M, Bagas L, et al. Newly discovered Ordovician Li-Be deposits at Tugeman in the Altyn-Tagh Orogen, NW China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2021, 139: 104515.
- Gehrels G E, Yin A, Wang X F. Magmatic history of the northeastern Tibetan Plateau[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(B9): 1–14.
- Hovis G L, Harlov D E. Solution calorimetric investigation of fluor-chlorapatite crystalline solutions[J]. *American Mineralogist*, 2010, 95(7): 946–952.
- Hughes J M, Rakovan J. Structurally Robust, Chemically Diverse: Apatite and Apatite Supergroup Minerals[J]. *Elements*, 2015, 11(3): 165–170.
- Liu L, Wang C, Chen D L, et al. Petrology And geochronology of HP-UHP rocks from the South Altyn Tagh, northwestern China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 35(3–4): 232–244.
- Liu L, Wang C, Cao Y T, et al. Geochronology of multi-stage metamorphic events: constraints on episodic zircon growth from the UHP eclogite in the South Altun, NW China[J]. *Lithos*, 2012, 136–139: 10–26.
- Liu M Y, Zhou M F, Su S G, et al. Contrasting Geochemistry of Apatite from Pperidotites and Ssulfide Oores of the Jinchuan Ni-Cu Ssulfide Ddeposit, NW China[J]. *Economic Geology*, 2021, 116(5): 1073–1092.
- Long X P, Sun M, Yuan C, et al. Zircon REE patterns and geochemical characteristics of Paleoproterozoic anatectic granite in the northern Tarim Craton, NW China: implications for the reconstruction of the Columbia supercontinent[J]. *Precambrian Research*, 2012(222–223): 474–487.
- London D, Kontak D J. Granitic pegmatites: Scientific wonders and economic bonanzas[J]. *Elements*, 2012, 8(4): 257–261.
- Ludwig, K R. User's manual for Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[J]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2003(4): 1–70.
- Macdonald R, Bagiński B, Dzierzanowski P, et al. Apatite-supergroup minerals in UK Palaeogene granites: Composition and relationship to host-rock composition[J]. *European Journal of Mineralogy*, 2013, 25(3): 461–471.
- Mathez E A, Webster J D. Partitioning behavior of chlorine and fluorine in the system apatite-silicate melt-fluid[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, 69(5): 1275–1286.
- Mao M, Rukhlov A S, Rowins S M, et al. Apatite trace element compositions: A robust new tool for mineral exploration[J]. *Economic Geology*, 2016, 111: 1187–1222.
- McFarlane C R M, McCulloch M T. Coupling of in-situ Sm-Nd systematics and U-Pb dating of monazite and allanite with applications to crustal evolution studies[J]. *Chemical Geology*, 2007, 245(1–2): 45–60.
- Miles A J, Graham C M, Hawkesworth C J, et al. Apatite: A new redox proxy for silicic magmas?[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014, 132: 101–119.
- Naylor R S, Steiger R H, Wasserburg G J. U-Th-Pb and Rb-Sr systematics in 2700×106 year old plutons from the southern Wind River Range, Wyoming[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1970, 34(11): 1133–1159.
- Parat F, Holtz F, Klügel A. S-rich apatite-hosted glass inclusions in xenoliths from La Palma: constraints on the volatile partitioning in evolved alkaline magmas[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2011, 162: 463–478.
- Piccoli P M, Candela P A. Apatite in igneous systems[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2002, 48(1): 255–292.
- Prowatke S, Klemme S. Trace element partitioning between apatite and silicate melts[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, 70(17): 4513–4527.
- Qu P, Li N B, Niu H C, et al. Zircon and apatite as tools to monitor the evolution of fractionated I-type granites from the central

- Great Xing'an Range, NE China[J]. *Lithos*, 2019, 348: 105207.
- Ramos F C, Wolff J A, Tollstrup D L. Measuring $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ variations in minerals and groundmass from basalts using LA-MC-ICP-MS[J]. *Chemical Geology*, 2004, 211(1-2): 135-158.
- Richards J P, López G P, Zhu J J, et al. Contrasting Tectonic Settings and Sulfur Contents of Magmas Associated with Cretaceous Porphyry $\text{Cu} \pm \text{Mo} \pm \text{Au}$ and Intrusion-Related Iron Oxide Cu-Au Deposits in Northern Chile[J]. *Economic Geology*, 2017, 122(2): 295-318.
- Sha L K, Chappell B W. Apatite chemical composition, determined by electron microprobe and laser-ablation inductively coupled plasma mass spectrometry, as a probe into granite petrogenesis[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(22): 3861-3881.
- Sun S J, Yang X Y, Wang G J, et al. In situ elemental and Sr-O isotopic studies on apatite from the Xu-Huai intrusion at the southern margin of the North China Craton: implications for petrogenesis and metallogeny[J]. *Chemical Geology*, 2019, 510: 200-214.
- Teiber H, Marks M A W, Wenzel T, et al. The distribution of halogens(F, Cl, Br)in granitoid rocks[J]. *Chemical Geology*, 2014, 374: 92-109.
- Thomas R, Webster J D. Strong tin enrichment in a pegmatite forming melt[J]. *Mineralium Deposita*, 2000, 35(6): 570-582.
- Treloar P J, Colley H. Variations in F and Cl contents in apatites from magnetite-apatite ores in northern Chile, and their ore-genetic implications[J]. *Mineralogical Magazine*, 1996, 60(2): 285-301.
- Wang C, Liu L, Yang W Q, et al. Provenance and ages of the Altyn complex in Altyn Tagh: Implications for the Early Neoproterozoic evolution of northwestern China[J]. *Precambrian Research*, 2013, 230: 193-208.
- Wang C, Liu L, Xiao P X, et al. Geochemical and geochronologic constraints for Paleozoic magmatism related to the orogenic collapse in the Qimantagh-South Altyn region, northwestern China[J]. *Lithos*, 2014, 202-203: 1-20.
- Wang C, Peng P, Wang X P, et al. Nature of three Proterozoic (1 680 Ma, 1 230 Ma and 775 Ma) mafic dyke swarms in North China: Implications for tectonic evolution and paleogeographic reconstruction[J]. *Precambrian Research*, 2016, 285: 109-126.
- Webster J D, Kinzler R J, Mathez E A. Chloride and water solubility in basalt and andesite melts and implications for magmatic degassing[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(5): 729-738.
- Webster J D, Vivo B D. Experimental and modeled solubilities of chlorine in aluminosilicate melts, consequences of magma evolution, and implications for exsolution of hydrous chloride melt at Mt. Somma-Vesuvius[J]. *American Mineralogist*, 2002, 87(8-9): 1046-1061.
- Xing K, Shu Q H, Lentz D R, et al. Zircon and apatite geochemical constraints on the formation of the Huojihe porphyry Mo deposit in the Lesser Xing'an Range, NE China[J]. *American Mineralogist*, 2020, 105(3): 382-396.
- Xu Z Q, He B Z, Zhang C L, et al. Tectonic framework and crustal evolution of the Precambrian basement of the Tarim Block in NW China: New geochronological evidence from deep drilling samples[J]. *Precambrian Research*, 2013, 235: 150-162.
- Yang Y H, Wu F Y, Yang J H, et al. Sr and Nd isotopic compositions of apatite reference materials used in U-Th-Pb geochronology[J]. *Chemical Geology*, 2014, 385(14): 35-55.
- Yu S Y, Zhang J X, Del Real P G, et al. The Grenvillian orogeny in the Altun-Qilian-North Qaidam mountain belts of northern Tibet Plateau: constraints from geochemical and zircon U-Pb age and Hf isotopic study of magmatic rocks[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 73: 372-395.
- Zhang J X, Zhang Z M, Xu Z Q, et al. Petrology and geochronology of eclogites from the Western segment of the Altyn Tagh, north western China[J]. *Lithos*, 2001, 56(2-3): 187-206.
- Yu J, Zheng D, Pang J, et al. Miocene range growth along the Altyn Tagh Fault: Insights from apatite fission track and (U-Th)/He thermochronometry in the western Danghenan Shan, China[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2019, 124(8): 9433-9453.
- Zhao J X, Qin K Z, Evans N J, et al. Volatile components and magma-metal sources at the Sharang porphyry Mo deposit, Tibet[J]. *Ore Geology Reviews*, 2020, 126: 103779.
- Zhou R J, Wen G, Li J W, et al. Apatite chemistry as a petrogenetic-metallogenic indicator for skarn ore-related granitoids: an example from the Daye Fe-Cu-(Au-Mo-W) district, Eastern China[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2022, 177: 23.