

DOI: 10.12401/j.nwg.2022035

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

赵辛敏¹, 高永宝^{1,2}, 燕洲泉¹, 张江伟¹, 王博³, 金谋顺¹

(1. 自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054; 2. 中国地质调查局西安矿产资源调查中心, 陕西 西安 710100; 3. 中化地质矿山总局地质研究院, 北京 100101)

摘 要: 阿尔金卡尔恰尔一带近年来萤石找矿取得重大突破, 新发现卡尔恰尔、小白河沟、库木塔什、拉依旦北、盖吉克等多处萤石矿, 形成超大型萤石矿带。矿带内萤石矿与肉红色碱长花岗岩关系密切, 矿化主要赋存于岩体内外接触带附近, 赋矿围岩主要为阿尔金岩群中的黑云斜长片麻岩、碳酸盐岩等富钙质岩系, 矿体明显受北东向断裂构造控制, 矿石类型主要有脉状、角砾状、块状、条带状矿石, 矿物组成主要是萤石、方解石, 矿床成因类型属于热液充填型。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测试结果表明, 卡尔恰尔超大型萤石矿区与成矿有关的碱长花岗岩成岩年龄为 (455.8 ± 2) Ma, 结合区域成岩成矿年代学研究, 认为该萤石矿带形成于加里东期中—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。矿区片麻状钾长花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 (914.5 ± 4.1) Ma, 形成于新元古代早期, 与 Rodinia 超大陆汇聚事件有关。稀土元素特征显示, 卡尔恰尔、小白河沟、库木塔什 3 个矿床的萤石、方解石稀土元素配分模式均为右倾的 LREE 富集型, 具有明显的负 Eu 异常, 与成矿岩体、围岩地层十分相似, 表明萤石、方解石的稀土可能继承了岩体、地层的稀土配分模式。各矿床萤石均为热液成因, 表现出同源同期成矿流体的特征, 成矿环境为还原条件下的中低温环境。各矿区萤石 Sr-Nd 同位素组成显示成矿物质来源于地壳, 结合成矿特征初步认为 Ca 可能主要来源于岩浆热液对地层的淋滤萃取, 而 F 可能主要来源于成矿岩体碱长花岗岩。

关键词: 萤石矿床; 锆石 U-Pb 年龄; 稀土元素; Sr-Nd 同位素; 卡尔恰尔; 阿尔金

中图分类号: P595; P611

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)01-0031-17

Genesis of Kalqiaer Super-large Fluorite Zone in Altyn Tagh Area: Chronology, Rare Earth Elements and Sr-Nd Isotopes Constraints

ZHAO Xinmin¹, GAO Yongbao^{1,2}, YAN Zhouquan¹, ZHANG Jiangwei¹, WANG Bo³, JIN Moushun¹

(1. Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, MNR, Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Xi'an Center of Mineral Resources Survey, China Geological Survey, Xi'an 710100, Shaanxi, China; 3. Geology Institute of China Chemical Geology and Mine Bureau, Beijing 100101, China)

Abstract: In recent years, great breakthroughs have been made in fluorite prospecting of Altyn-Tagh which new discovery of the super-large fluorite ore belt in the Kalqiaer area. The typical fluorite ore deposits such as

收稿日期: 2022-06-17; 修回日期: 2022-10-11; 责任编辑: 姜寒冰

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目“阿尔金西段吐格曼伟晶岩型稀有金属矿床成矿机制研究”(2022JQ-268), 国家重点研发计划课题“西部锂、铍等战略性金属矿产资源成矿规律与预测评价”(2019YFC0605201), 中国地质调查局项目“西北地区铜镍稀有金属等矿产地质调查”(DD20221691)联合资助。

作者简介: 赵辛敏(1988-), 男, 工程师, 从事矿床学与区域成矿规律研究。E-mail: 835177076@qq.com。

Kalqiaer, Xiaobaihegou, Kumutashi, Layidan and Gaijike are closely related to and mainly distributed in the outer contact zones of the flesh red alkali feldspar granite. The host rocks are mainly biotite plagioclinal gneiss and carbonate rocks in Altyn rock group. Their orebodies obviously controlled by NE direction fault structure and the main ore types are veined, brecciated, massive and banded ore which major minerals are fluorite and calcite. The genesis of the deposit belongs to hydrothermal filling deposit. Zircon LA-ICP-MS dating yields concordant ages of 455.8 ± 2 Ma for the alkali feldspar granite in the Kalqiaer super-large fluorite deposit which indicating it was formed in the Middle to late Ordovician and was the product of magmatic activity in the transitional tectonic setting from the compressional to extensional regimes. Gneissic potassium feldspar granite obtains the concordant age of 914.5 ± 4.1 Ma respectively indicating it was formed in the early Neoproterozoic and related to the convergence event of the Rodinia supercontinent. The rare earth element characteristics show that the distribution pattern of rare earth in fluorite and calcite was a rightward light rare earth enrichment type, with negative Eu anomalies. The REE patterns of fluorite and calcite are similar to the ore-forming rock and ore-hosting strata, indicating a genetic relationship. Fluorite deposits in Kalqiaer area are hydrothermal origin, showing the characteristics of homologous and homochronous ore-forming fluids, and the ore-forming environment is medium-low temperature under reducing conditions. The Sr-Nd isotopic composition of fluorite in Kalqiaer area shows that the ore-forming materials are all derived from the crust. It is suggested that Ca may be mainly derived from the leaching extraction of the strata by magmatic hydrothermal, while F element may be mainly derived from alkali feldspar granite.

Keywords: fluorite deposit; zircon U-Pb dating; rare earth elements; Sr-Nd isotopes; Kalqiaer; Altyn Tagh

萤石,其主要成分是氟化钙(CaF_2),是重要的基础性、战略性非金属矿产资源。高端含氟材料在新能源、新材料、新一代信息技术和航空航天等领域的重要性日益凸显,中国、美国、日本、欧盟等国家都将其列为“战略性矿产”或“关键矿产”(陈军元等, 2021)。萤石矿在中国属于优势矿产资源,大中型萤石矿床集中于东部沿海、华中和内蒙古中东部(王吉平等, 2015)。通过近年地质工作,在中国西部新疆若羌县阿尔金地区卡尔恰尔一带萤石找矿取得重大新发现,已发现卡尔恰尔、小白河沟、库木塔什、拉依旦北、盖吉克、皮亚孜达坂等多处(超)大-中型萤石矿床,改变了中国萤石矿的分布格局,已初步形成西部最重要的萤石矿产资源基地。近年来,阿尔金高压-超高压变质带、蛇绿构造混杂岩带和岩浆岩等基础地质研究方面取得了重要进展,但与萤石矿有关的研究才刚刚起步,主要对地质特征、控矿因素、花岗岩年龄与元素地球化学特征及流体包裹体等方面做了一定研究(高永宝等, 2021; 吴益平等, 2021, 2022),总体研究程度较低。目前,卡尔恰尔超大型萤石矿区花岗岩成岩时代还未见报道,成矿流体与物质来源的研究还很薄弱,制约了矿床成因的研究和下一步找矿勘查。

稀土元素的地球化学性质具有一定特殊性,如化学性质稳定,高度均一化,不易受变质作用影响等,是

示踪成矿流体来源和反演热液成矿作用过程的有效手段之一(Lottermoser, 1992)。萤石是富稀土矿物,萤石中的 Ca^{2+} 与稀土离子半径相似,可容纳大量稀土元素,且继承了成矿热液流体中的稀土元素配分型式(Moller, 1983; Bau et al., 1992, 1995; Smith et al., 2000; 许成等, 2001; 赵省民等, 2002; 许东青等, 2009; 孙海瑞等, 2014; Sasmaz et al., 2018),在示踪成矿流体来源与演化及矿床成因机理等方面已得到广泛应用(叶锡芳等, 2014; 邹灏等, 2014, 2016; 彭强等, 2021; 许若潮等, 2022; 游超等, 2022; 张苏坤等, 2022)。笔者选择阿尔金卡尔恰尔超大型萤石矿带中的卡尔恰尔、小白河沟、库木塔什 3 处典型萤石矿床为研究对象,简要总结其成矿特征,利用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年确定卡尔恰尔矿区碱长花岗岩与片麻状钾长花岗岩的形成时代,通过萤石、方解石的稀土元素地球化学及萤石 Sr-Nd 同位素等研究,探讨成矿流体特征与成矿物质来源,为区域矿床成因研究和指导找矿提供理论依据。

1 区域地质背景

研究区位于青藏高原北部边缘,地处柴达木地块与塔里木地块接合部位,大地构造位置主要处于阿尔

金造山带(图 1a、图 1b)。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(图 1c)。新太古界—古元古界阿尔金岩群出露广泛, 总体上呈北东向展布, 该岩组岩石类型复杂, 主要为一套由变质碎屑岩、碳酸盐岩和变质火山碎屑岩组成的变质岩系, 主要岩性为黑云斜长片麻岩、斜长或二长变粒岩、石榴矽线黑云片麻岩、二长石英片岩夹石英岩、白云质大理岩、斜长角闪岩透镜体等。中元古界巴什库尔干岩群为一套云母石英片岩、片麻岩、变粒岩、长石英岩夹变质中基性火山岩、火山碎屑岩的变质岩系。中元古界蓟县纪塔昔达坂岩群可分为下部碎屑岩(木孜萨依组)和上部碳酸盐岩(金雁山组)。新元古界索尔库里群为一套轻变质的碳酸盐岩、碎屑岩夹少量火山碎屑岩地层序列。另外, 阿尔金西南缘发育由陆壳深俯冲形成的高压-超高压变质带, 岩石的原岩形成时代多为 1 000~800 Ma, 与区域广泛分布的新元古代花岗片麻岩形成时代基本相同, 均与 Rodinia 超大陆事件引发的全球性岩浆活动相关, 而变质时代集中在 504~486 Ma 之间, 代表在~500 Ma 发生陆壳深俯冲-碰撞事件(Zhang et al., 2001; 刘良等, 2007; 张建新等, 2010; Liu et al., 2012)。

区域构造活动频繁, 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。区内构造主要为断裂, 褶皱因受到岩浆侵位及断裂构造的破坏, 形态极不完整。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(图 1c)。围绕区域深大断裂广泛分布次级断裂, 主要以北东-近东西向为主。卡尔恰尔-阔什断裂呈北东东向, 东西向延伸大于 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, 卡尔恰尔超大型萤石矿、小白河沟萤石矿即与该断裂及其派生的众多次级断裂关系密切。盖吉勒断裂呈北东向, 为一南倾的逆断层, 与库木塔什、拉依旦北等萤石矿床的形成密切相关。约马克其-库兰勒格断裂总体为北东东向, 出露长约为 10 km, 在研究区与布拉克北、皮亚孜达坂等萤石矿床的形成关系密切。阿尔金南缘断裂呈北东东向横贯阿尔金南部, 长度大于几千公里, 构成阿中地块与阿南缘蛇绿混杂岩带的边界(校培喜等, 2014)。

区域经历了多期次岩浆活动, 新元古代、早古生代、中生代等均有规模不等的中酸性岩浆侵入, 多沿阿尔金山呈北东向带状展布, 岩石类型复杂, 充分反映了造山带花岗岩类型丰富的特点(图 1c)。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、黑云母花岗岩、花岗闪长岩等。区域脉岩极为发育, 脉岩类型以碱长花岗岩脉、花岗伟晶岩脉为主, 呈北东-北东东走向。其中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, 受断裂控制明显, 出露宽度普遍较窄, 该脉岩与萤石矿关系密切(图 1c)。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, 脉体中矿物以长石和石英为主, 个别含矿伟晶岩脉发育有锂辉石、绿柱石、锂云母、铌钽铁矿等稀有金属矿物。

2 矿床地质特征

卡尔恰尔超大型萤石矿区出露地层主要为古元古界阿尔金岩群(Pt₄A), 为一套角闪岩相的中深变质岩系, 萤石矿化主要分布于黑云母斜长片麻岩中, 矿脉延伸方向与岩层走向基本一致。矿床位于卡尔恰尔-阔什断裂南侧, 该区域深大断裂派生的次一级断裂系统对萤石矿产分布有明显的控制作用, 断裂呈北东-近东西向展布, 沿构造裂隙大量充填萤石-方解石脉, 构成区内重要的赋矿构造。矿区岩浆岩类型主要为碱长花岗岩、片麻状钾长花岗岩, 岩体与围岩地层接触界限明显(图 2a、图 2i)。萤石矿化在空间上与碱长花岗岩关系密切, 与围岩地层接触关系较明显(图 2a~图 2c)。矿区圈出 31 条萤石矿体, 由众多萤石-方解石细脉构成, 多为复脉型矿脉, 北东-近东西向带状展布, 长度为 1 710~4 580 m, 平均厚度为 2.36~4.68 m, 最大厚度为 23.5 m, 矿体延伸稳定, 连续性好, 钻探验证矿脉有收敛增厚趋势, 沿倾向控制最大斜深 907 m。矿石中矿物成分较为简单, 主要是萤石、方解石, 少量石英(图 2d~图 2h), 萤石呈 2 阶段成矿, 早阶段萤石呈白色、淡绿色, 晚阶段萤石呈紫色、紫黑色, 可见紫色萤石矿脉穿插白色萤石矿脉, 或紫色萤石矿脉发育于白色萤石矿脉边部(图 2a、图 2c)。矿石呈巨晶-粗晶结构、自形-半自形-他形粒状结构、碎裂

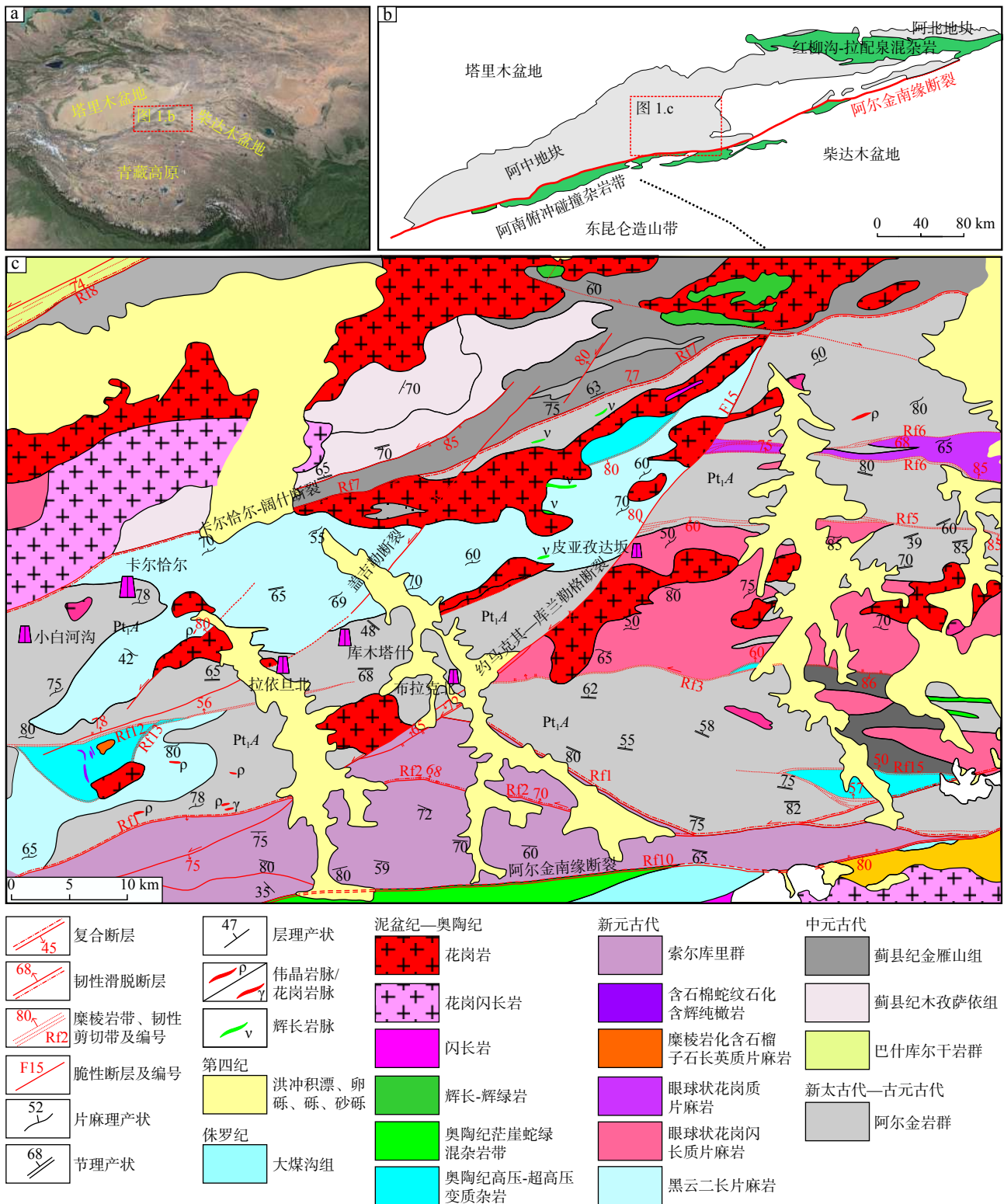
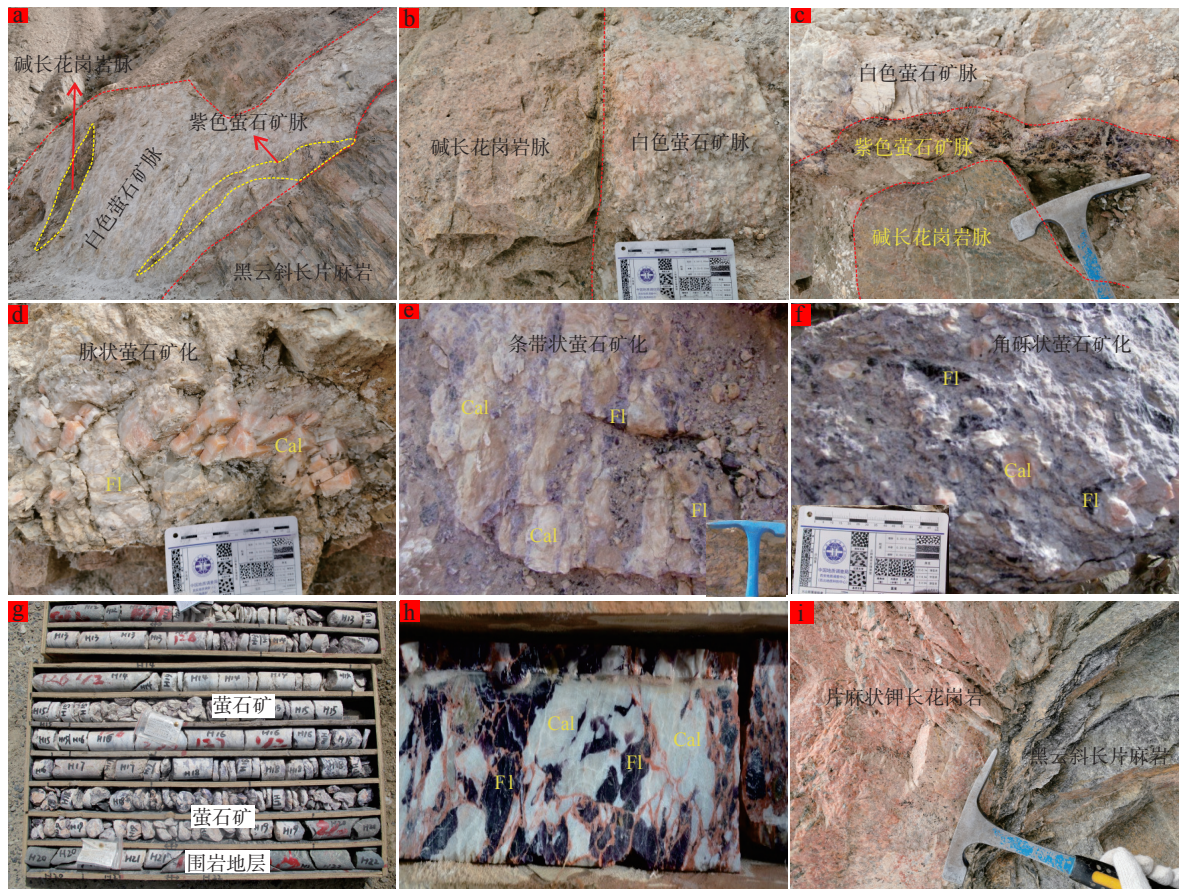


图 1 阿尔金造山带卡尔恰尔一带地质矿产图

Fig. 1 Geological and mineral map of the Kalqiaer area in Altyn Tagh

结构、糜棱结构, 矿石自然类型主要有脉状、条带状、角砾状矿石(图 2d~图 2f)。围岩蚀变主要为碳酸盐化、钾化、硅化、高岭土化、绢云母化、绿帘石化等。

矿床成因类型属于热液充填型, 矿石工业类型主要是 $\text{CaF}_2\text{--CaCO}_3$ 型, CaF_2 平均品位为 33.9%, 探明+控制+推断萤石矿石量为 6 631 万 t, 矿物量(CaF_2)为 2 249



a~c. 萤石矿化与碱长花岗岩关系密切, 与围岩界线较清晰, 紫色萤石矿脉穿插或发育于白色萤石矿脉边部; d~e. 脉状萤石矿化; f. 角砾状萤石矿化; g~h. 钻孔中萤石矿化; i. 片麻状钾长花岗岩侵入于阿尔金岩群黑云斜长片麻岩中; Cal. 方解石; Fl. 萤石

图2 卡尔恰尔超大型萤石矿床矿化特征

Fig. 2 Photos of mineralization features of Kalqiaer super-large fluorite deposit

万 t, 达超大型规模。

库木塔什萤石矿区出露地层为古元古界阿尔金岩群, 岩性主要是黑云斜长片麻岩, 其次为大理岩。矿区断裂主要呈北北东向、北东向、近东西向, 多为平移断层, 并发育韧性-脆性剪切带, 北东向及近东西向断裂控制着区内岩脉的发育和展布。矿区内出露的侵入岩主要有碱长花岗岩、片麻状钾长花岗岩, 碱长花岗岩脉与萤石矿脉关系十分密切(图 3a、图 3b), 脉岩和矿脉均受断裂控制明显。矿区共圈出 14 条萤石矿化体, 多呈北东向, 倾向北北西, 倾角为 $40^{\circ} \sim 70^{\circ}$, 地表出露长为 50~980 m, 宽为 0.3~3.6 m。矿石自然类型主要有脉状、角砾状(图 3c~图 3i), 矿石中矿物成分较为简单, 主要是萤石、方解石, 另发育较多磷灰石, 包括绿色柱状氟磷灰石和草黄色粒状铈磷灰石(图 3e)。矿石具粗晶结构、自形-半自形-他形粒状结构、碎裂结构。矿石工业类型主要为 CaF_2 - CaCO_3 型, CaF_2 平均品位为 25%。围岩蚀变较为发育,

主要为碳酸盐化、钾化、绢云母化、高岭土化等。矿床成因属热液充填型。

小白河沟萤石矿区出露地层为古元古界阿尔金岩群, 萤石矿化赋存在黑云斜长片麻岩中。矿区出露的侵入岩主要为碱长花岗岩, 其与萤石矿脉关系密切(图 4a~图 4b)。矿区构造以近东西向为主。矿区圈定两条萤石矿化带, 南侧矿化带长约为 2.5 km, 宽约为 0.4 km, 走向北东东; 北侧矿化带宽约 0.4 km, 长约为 1.7 km, 走向近东西。萤石矿体走向近东西, 倾向北, 倾角为 $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$, 该矿床特点是发育高品位矿石, CaF_2 品位大于 50%, 局部可达 90% 以上。矿石类型主要为块状矿石、纹层状矿石(图 4c~图 4f), 矿石中矿物主要为萤石, 局部发育方解石和少量石英; 萤石呈白色、绿色、紫色、紫黑色等。矿石具粗晶结构、自形-半自形-他形粒状结构。矿石工业类型主要是 CaF_2 型、 CaF_2 - CaCO_3 型。围岩蚀变主要为碳酸盐化、钾化、绢云母化、高岭土化等。



a~b. 萤石矿化与碱长花岗岩关系密切；c~f. 脉状萤石矿化及其矿物组成；g~i. 角砾状萤石矿化及其矿物组成；Cal. 方解石；Fl. 萤石；Ap. 磷灰石

图3 库木塔什萤石矿床矿化特征

Fig. 3 Photos of mineralization features of Kumutashi fluorite deposit



a~b. 萤石矿化与碱长花岗岩关系密切；c. 纹层状萤石矿石；d~f. 块状萤石矿石

图4 小白河沟萤石矿床矿化特征

Fig. 4 Photos of mineralization features of Xiaobaihegou fluorite deposit

3 采样及测试方法

用于锆石 U-Pb 年龄测试的样品经人工破碎后选出锆石单矿物, 制靶后进行阴极发光及透反射照相, 根据图像选测试点位并进行合理数据解释。锆石 U-Pb 测年在自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室进行。激光剥蚀系统为 GeoLas Pro, ICP-MS 为 Agilent 7700x, 每时间分析数据包括大约 40 s 的样品信号和 10 s 的空白信号, 激光剥蚀采用氦气作载气、氩气为补偿气以调节灵敏度。数据分析采用软件 Glitter 4.4 (Van Achterbergh et al., 2001) 完成, 详细测试过程和仪器参数可参考李艳广等 (2015)。锆石 U-Pb 年龄谐和图采用 Isoplot/Ex_ver 3 (Ludwig, 2003) 软件绘制。

包含萤石、方解石矿物的矿石样品经过人工破碎后在双目镜下挑纯, 挑纯出的小颗粒放入玛瑙研钵中, 充分研磨至 200 目以下呈粉末状用于稀土元素实验测试分析。测试实验在自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室完成, 萤石、方解石的稀土元素分析测试采用 ICP-MS 电感耦合等离子体质谱法, 检测下限 $n \times 10^{-13} \sim n \times 10^{-12}$, 检测误差小于 10%。

Rb-Sr、Sm-Nd 同位素组成测试在自然资源部中南矿产资源监督检测中心完成。采用热电离质谱仪 TRITON 分析 Rb、Sr、Sm、Nd 同位素组成, 同位素稀释法计算 Rb、Sr、Sm、Nd 含量及 Sr 同位素比值。Nd、Sr 同位素比值分析中质量分馏分别采用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.7219$, $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=8.37521$ 进行幂定律校正。整个分析过程用 GBW04411、GBW04419、BCR-2 和 NBS987、GSW 标准物质分别对全流程和仪器进行质量监控。NBS987 的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 测定值为 0.71028 ± 1 , GBW04411 测定值分别为 $\text{Rb}=249.8 \times 10^{-6}$ 、 $\text{Sr}=159.3 \times 10^{-6}$ 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.76005 \pm 2$, 与其推荐值在误差范围内一致。全流程 Nd、Sm、Sr、Rb 空白分别小于 9×10^{-10} g、 3×10^{-10} g、 3×10^{-9} g 和 4×10^{-10} g。

4 测试结果

4.1 锆石 U-Pb 年龄

卡尔恰尔矿区与成矿相关的碱长花岗岩样品中锆石以自形粒状为主, 粒径多为 50~150 μm , 阴极发光图像揭示大部分锆石具有清晰的岩浆韵律环带

(图 5a)。锆石 U 含量为 $233 \times 10^{-6} \sim 1095 \times 10^{-6}$, Th 含量为 $100 \times 10^{-6} \sim 462 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 0.2~0.62, 平均为 0.45, 显示出岩浆锆石的特点 (表 1) (Hoskin et al., 2000)。22 个分析点投影于谐和线上及附近, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $(455.8 \pm 2)\text{Ma}$, 代表了岩浆结晶年龄, 表明其形成于中—晚奥陶世 (图 5b)。

卡尔恰尔矿区片麻状钾长花岗岩样品中锆石以自形粒状为主, 颗粒较大, 粒径多为 60~200 μm , 阴极发光图像揭示大部分锆石具有清晰的岩浆韵律环带 (图 6a)。片麻状钾长花岗岩中锆石的 U 含量为 $90 \times 10^{-6} \sim 765 \times 10^{-6}$, Th 含量为 $24 \times 10^{-6} \sim 270 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 0.33~1.76, 平均为 0.27, 显示出岩浆锆石的特点 (表 2)。16 个分析点投影于谐和线上及附近, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $(914.5 \pm 4.1)\text{Ma}$, 代表了岩浆结晶年龄, 表明其形成于新元古代早期 (图 6b)。

4.2 稀土元素特征

卡尔恰尔矿床萤石的 ΣREE 值为 $39.4 \times 10^{-6} \sim 57.19 \times 10^{-6}$, LREE/HREE 值为 3.20~3.91, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 2.97~4.41, δEu 值为 0.39~0.42。小白河沟矿床萤石 ΣREE 值为 $44.73 \times 10^{-6} \sim 65.79 \times 10^{-6}$, LREE/HREE 值为 2.99~3.61, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 2.57~3.59, δEu 值为 0.38~0.44。库木塔什矿床萤石 ΣREE 值为 $41.5 \times 10^{-6} \sim 81.01 \times 10^{-6}$, LREE/HREE 值为 6.5~8.53, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 11.6~13.55, δEu 值为 0.46~0.55 (表 3)。

卡尔恰尔矿床方解石 ΣREE 值为 $365 \times 10^{-6} \sim 490 \times 10^{-6}$, LREE/HREE 值为 8.48~10.49, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 6.93~9.68, δEu 值为 0.4。小白河沟矿床方解石 ΣREE 值为 $451 \times 10^{-6} \sim 822 \times 10^{-6}$, LREE/HREE 值为 8.89~10.88, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 7.59~9.86, δEu 值为 0.37~0.39。库木塔什矿床方解石 ΣREE 值为 $354 \times 10^{-6} \sim 368 \times 10^{-6}$, LREE/HREE 值为 9.49~11.04, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 8.62~11.35, δEu 值为 0.35~0.38 (表 3)。

4.3 Sr-Nd 同位素

卡尔恰尔矿区 6 件萤石的 Rb 含量为 $0.03 \times 10^{-6} \sim 0.06 \times 10^{-6}$, Sr 含量为 $340 \times 10^{-6} \sim 343 \times 10^{-6}$, Sm 含量为 $1.77 \times 10^{-6} \sim 1.83 \times 10^{-6}$, Nd 含量为 $6.40 \times 10^{-6} \sim 6.82 \times 10^{-6}$, $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 值为 0.00029~0.00046, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 0.71005~0.71009, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 值为 0.1626~0.1682, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值为 0.511917~0.512040 (表 4)。

小白河沟矿区 5 件萤石的 Rb 含量为 $0.13 \times 10^{-6} \sim 0.26 \times 10^{-6}$, Sr 含量为 $264 \times 10^{-6} \sim 399 \times 10^{-6}$, Sm 含量为 $2.60 \times 10^{-6} \sim 3.94 \times 10^{-6}$, Nd 含量为 $9.36 \times 10^{-6} \sim 14.15 \times$

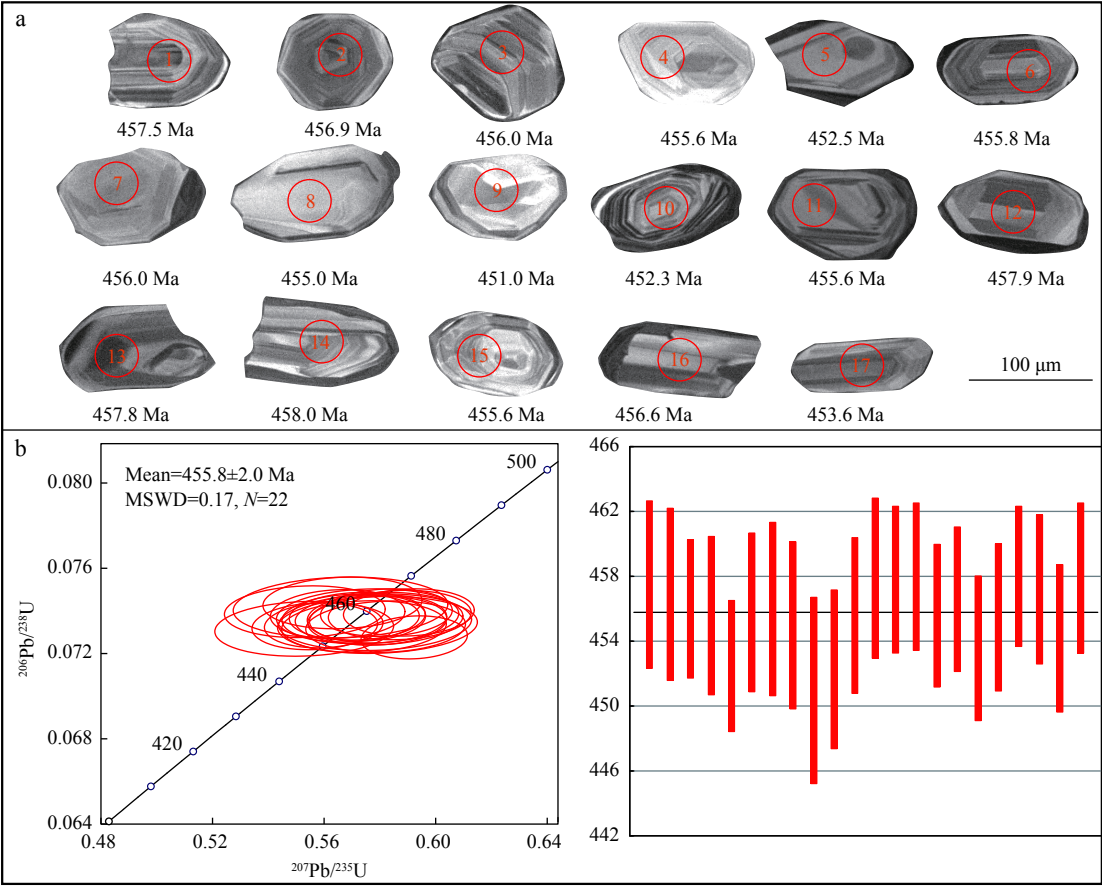


图 5 卡尔恰尔萤石矿区碱长花岗岩的锆石 CL 图(a)和 U-Pb 年龄图(b)

Fig. 5 (a) Zircon CL images and (b) U-Pb diagram of alkali feldspar granite from the Kalqiaer fluorite deposit

表 1 卡尔恰尔萤石矿区碱长花岗岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 分析结果表

Tab. 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic data of alkali feldspar granite in Kaerqiaer fluorite deposit

测试点	Th U		Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	
	(×10 ⁻⁶)			比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	Ma	1σ	Ma	1σ	Ma	1σ
KJ01	100	343	0.29	0.056 4	0.002 1	0.573 4	0.021 0	0.073 7	0.000 9	469.0	82.6	460.2	13.5	457.5	5.1
KJ02	137	271	0.51	0.056 9	0.002 3	0.576 0	0.022 1	0.073 4	0.000 9	487.3	86.2	461.9	14.3	456.9	5.3
KJ03	223	457	0.49	0.055 3	0.001 4	0.558 0	0.013 6	0.073 3	0.000 7	422.1	55.8	450.2	8.9	456.0	4.2
KJ04	105	233	0.45	0.056 7	0.002 0	0.572 1	0.018 9	0.073 2	0.000 8	479.0	75.0	459.4	12.2	455.6	4.9
KJ05	364	1 095	0.33	0.058 8	0.001 3	0.589 6	0.012 2	0.072 7	0.000 7	561.0	47.4	470.6	7.8	452.5	4.0
KJ06	151	333	0.45	0.054 1	0.001 9	0.551 5	0.018 4	0.073 9	0.000 8	376.3	76.1	446.0	12.1	455.8	4.9
KJ07	137	282	0.49	0.059 2	0.002 4	0.597 5	0.022 9	0.073 3	0.000 9	572.9	84.2	475.6	14.6	456.0	5.3
KJ08	206	369	0.56	0.054 7	0.002 1	0.551 3	0.020 5	0.073 1	0.000 9	400.1	83.6	445.8	13.4	455.0	5.1
KJ09	143	256	0.56	0.055 2	0.002 5	0.563 9	0.024 6	0.074 1	0.001 0	420.0	97.5	454.0	16.0	451.0	5.7
KJ10	152	430	0.35	0.055 1	0.001 9	0.564 6	0.018 2	0.074 4	0.000 8	416.5	72.8	454.5	11.8	452.3	4.9
KJ11	127	277	0.46	0.057 4	0.001 9	0.579 6	0.018 4	0.073 2	0.000 8	508.1	71.3	464.2	11.8	455.6	4.8
KJ12	149	325	0.46	0.056 9	0.002 0	0.577 4	0.019 2	0.073 6	0.000 8	488.1	75.2	462.8	12.4	457.9	4.9
KJ13	164	398	0.41	0.056 9	0.001 6	0.577 1	0.015 8	0.073 6	0.000 8	487.1	62.6	462.6	10.2	457.8	4.5
KJ14	199	370	0.54	0.055 9	0.001 6	0.567 4	0.015 8	0.073 6	0.000 8	449.1	63.3	456.3	10.2	458.0	4.5
KJ15	258	678	0.38	0.055 0	0.001 5	0.555 0	0.014 4	0.073 2	0.000 7	412.1	58.9	448.3	9.4	455.6	4.4
KJ16	101	509	0.20	0.057 7	0.001 6	0.587 8	0.015 1	0.073 9	0.000 7	519.0	58.1	469.4	9.6	456.6	4.4
KJ17	168	488	0.34	0.057 0	0.001 6	0.579 9	0.015 1	0.073 9	0.000 7	489.0	59.9	464.4	9.7	453.6	4.5
KJ18	233	432	0.54	0.056 1	0.001 6	0.569 7	0.015 6	0.073 7	0.000 8	455.6	62.3	457.8	10.1	455.5	4.5
KJ19	462	797	0.58	0.056 5	0.001 4	0.572 9	0.013 6	0.073 6	0.000 7	470.2	54.9	459.9	8.8	458.0	4.3
KJ20	293	472	0.62	0.057 0	0.001 7	0.576 7	0.016 0	0.073 5	0.000 8	488.8	63.4	462.3	10.3	457.2	4.6
KJ21	170	495	0.34	0.055 3	0.001 6	0.563 0	0.015 5	0.073 8	0.000 8	425.9	62.3	453.4	10.0	454.2	4.5
KJ22	188	415	0.45	0.057 5	0.001 7	0.584 6	0.016 4	0.073 8	0.000 8	510.8	63.5	467.4	10.5	457.9	4.6

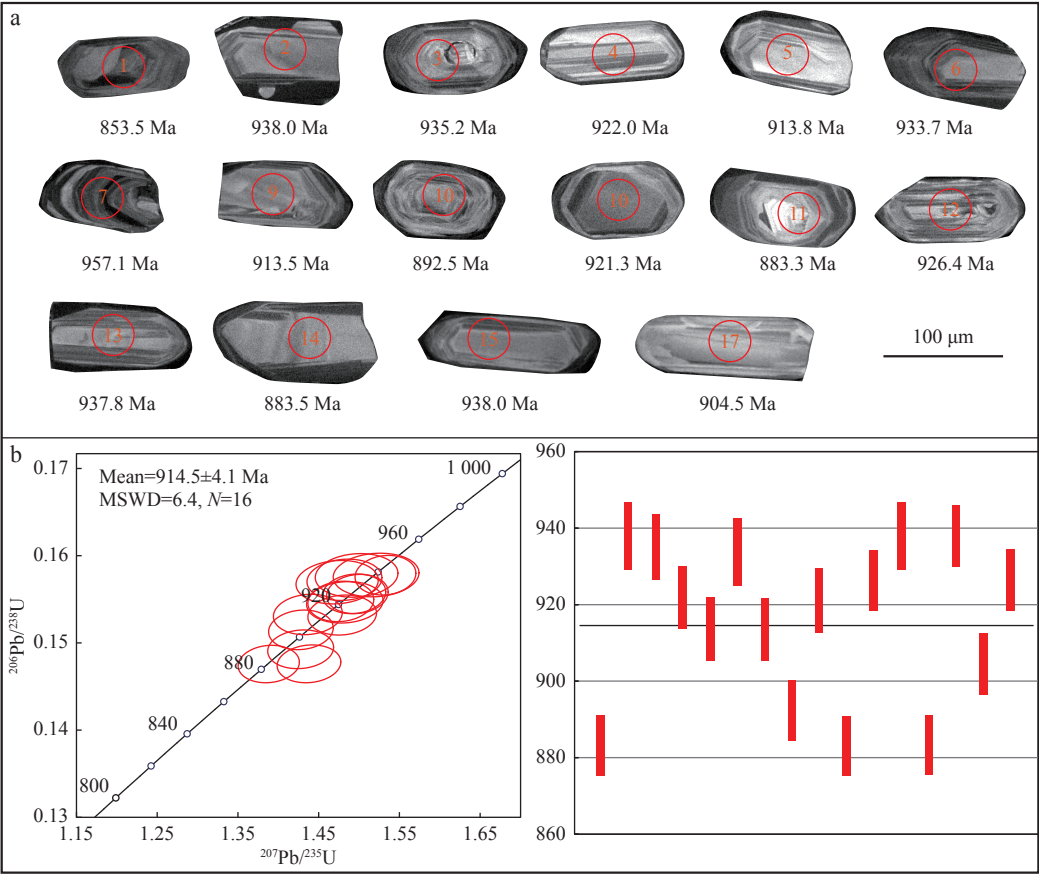


图 6 卡儿哈尔萤石矿区片麻状钾长花岗岩的锆石 CL 图(a)和 U-Pb 年龄图(b)

Fig. 6 (a) Zircon CL images and (b) U-Pb diagram of gneissic feldspar granite from the Kalqiaer fluorite deposit

表 2 卡儿哈尔萤石矿区片麻状钾长花岗岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 分析结果表

Tab. 2 LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic data of gneissic feldspar granite in Kaerqiaer fluorite deposit

测试点	Th	U	Th/U ($\times 10^{-6}$)	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
				比值	1 σ	比值	1 σ	比值	1 σ	Ma	1 σ	Ma	1 σ	Ma	1 σ
KC01	158	440	0.36	0.068 5	0.001 7	1.302 4	0.029 8	0.138 0	0.001 4	883.4	49.1	846.8	13.1	853.5	7.8
KC02	24	305	0.08	0.070 5	0.001 7	1.520 6	0.034 8	0.156 6	0.001 6	941.9	48.7	938.7	14.0	938.0	8.8
KC03	100	407	0.25	0.068 9	0.001 5	1.481 7	0.030 5	0.156 1	0.001 5	895.4	44.4	922.9	12.5	935.2	8.4
KC04	229	443	0.52	0.069 8	0.001 4	1.477 1	0.026 9	0.153 8	0.001 5	920.9	39.3	921.0	11.0	922.0	8.1
KC05	140	401	0.35	0.068 5	0.001 4	1.436 4	0.028 0	0.152 3	0.001 5	882.9	42.1	904.2	11.7	913.8	8.2
KC06	64	260	0.25	0.068 6	0.001 6	1.472 5	0.033 5	0.155 9	0.001 6	886.6	48.6	919.2	13.8	933.7	8.8
KC07	97	291	0.33	0.073 7	0.001 6	1.625 5	0.034 0	0.160 1	0.001 6	1 033.7	44.1	980.1	13.1	957.1	8.8
KC08	28	90	0.32	0.076 0	0.003 0	2.029 8	0.076 0	0.193 9	0.002 6	1 094.5	75.8	1 125.6	25.5	1 142.6	14.1
KC09	137	435	0.31	0.070 5	0.001 4	1.478 8	0.027 9	0.152 2	0.001 4	943.4	40.7	921.7	11.4	913.5	8.1
KC10	27	485	0.05	0.069 8	0.001 4	1.427 7	0.026 9	0.148 5	0.001 4	922.4	40.7	900.6	11.3	892.5	7.9
KC11	79	360	0.22	0.070 0	0.001 6	1.482 0	0.031 3	0.153 6	0.001 5	929.0	45.2	923.0	12.8	921.3	8.5
KC12	175	765	0.23	0.068 6	0.001 3	1.388 0	0.024 8	0.146 9	0.001 4	886.9	39.0	883.8	10.5	883.3	7.7
KC13	270	677	0.40	0.070 3	0.001 3	1.497 3	0.025 0	0.154 6	0.001 4	938.1	36.4	929.3	10.2	926.4	8.0
KC14	84	297	0.28	0.069 4	0.001 6	1.496 5	0.033 6	0.156 6	0.001 6	909.9	47.9	928.9	13.7	937.8	8.8
KC15	103	489	0.21	0.071 0	0.001 4	1.437 5	0.025 9	0.146 9	0.001 4	958.6	38.9	904.7	10.8	883.5	7.8
KC16	135	212	0.64	0.110 6	0.001 9	4.743 0	0.075 2	0.311 4	0.003 0	1 808.6	31.0	1 774.9	13.3	1 747.6	14.7
KC17	103	747	0.14	0.071 0	0.001 2	1.532 2	0.024 7	0.156 6	0.001 4	958.0	35.1	943.4	9.9	938.0	8.0
KC18	51	367	0.14	0.087 7	0.001 6	2.489 5	0.041 5	0.206 1	0.002 0	1 375.5	34.0	1 269.0	12.1	1 208.2	10.5
KC19	80	468	0.17	0.068 8	0.001 4	1.427 7	0.026 5	0.150 6	0.001 4	893.2	40.2	900.6	11.1	904.5	8.0
KC20	102	533	0.19	0.070 1	0.001 3	1.493 3	0.025 8	0.154 6	0.001 4	932.5	37.4	927.7	10.5	926.5	8.1

表 3 卡尔恰尔(KE)、小白河沟(XB)、库木塔什(KM)矿床的萤石、方解石稀土元素组成表(10^{-6})

Tab. 3 Rare earth element data of fluorites and calcites from the Kaerqiaer, Xiaobaihegou and Kumutashi deposit

矿物	样号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE	LREE	HREE	LREE/HREE	(La/Yb) _N	δEu	δCe
萤石	KE-1	6.04	12.9	1.85	8.61	2.28	0.32	2.40	0.39	2.32	0.46	1.21	0.19	1.11	0.16	31.5	40.24	32.00	8.24	3.88	3.90	0.42	0.94
	KE-2	6.40	12.2	1.86	8.31	2.29	0.32	2.34	0.38	2.28	0.46	1.18	0.18	1.04	0.16	32.0	39.40	31.38	8.02	3.91	4.41	0.42	0.86
	KE-3	8.64	18.0	2.72	11.9	3.18	0.46	3.63	0.58	3.38	0.70	1.85	0.27	1.65	0.23	47.6	57.19	44.90	12.29	3.65	3.76	0.41	0.90
	KE-4	5.76	12.9	1.92	9.40	2.78	0.37	2.96	0.51	2.89	0.58	1.58	0.23	1.39	0.21	47.3	43.48	33.13	10.35	3.20	2.97	0.39	0.95
	XB-1	6.40	14.1	2.12	9.38	2.62	0.40	2.88	0.47	2.71	0.55	1.44	0.20	1.28	0.18	38.3	44.73	35.02	9.71	3.61	3.59	0.44	0.93
	XB-2	7.81	18.8	2.98	15.0	4.26	0.57	4.80	0.78	4.56	0.93	2.42	0.36	2.20	0.32	68.6	65.79	49.42	16.37	3.02	2.55	0.38	0.96
	XB-3	6.63	14.7	2.39	11.5	3.57	0.45	3.66	0.61	3.63	0.78	2.02	0.30	1.85	0.26	59.5	52.35	39.24	13.11	2.99	2.57	0.38	0.90
	KM-1	16.5	32.7	4.21	11.7	2.89	0.51	2.71	0.44	2.37	0.46	1.19	0.16	1.02	0.15	31.1	81.01	72.51	8.50	8.53	11.6	0.55	0.94
方解石	KM-2	10.2	15.4	1.80	6.67	1.64	0.26	1.80	0.30	1.64	0.30	0.78	0.10	0.54	0.07	31.5	41.50	35.97	5.53	6.50	13.55	0.46	0.81
	KE-1	69.9	165	18.4	66.6	11.8	1.41	8.89	1.48	8.02	1.61	4.75	0.85	5.44	0.87	40.5	365.02	333.11	31.91	10.44	9.22	0.40	1.10
	KE-2	77.7	180	20.7	74.6	13.7	1.62	10.3	1.77	8.53	1.78	5.13	0.85	5.76	0.98	46.6	403.42	368.32	35.10	10.49	9.68	0.40	1.08
	KE-3	83.5	213	25.1	96.8	18.1	2.15	13.9	2.52	13.5	2.67	7.74	1.34	8.64	1.44	73.7	490.40	438.65	51.75	8.48	6.93	0.40	1.13
	XB-1	103	245	28.5	98.8	18.5	2.26	15.8	2.60	13.2	2.80	8.31	1.48	9.74	1.58	70.5	551.57	496.06	55.51	8.94	7.59	0.39	1.09
	XB-2	158	378	43.3	144	26.5	2.94	20.0	3.41	17.2	3.47	9.91	1.72	11.5	1.95	91.7	821.90	752.74	69.16	10.88	9.86	0.37	1.10
	XB-3	80.1	202	22.8	83.3	15.4	1.82	12.3	2.21	10.8	2.26	6.97	1.26	8.42	1.39	64.4	451.03	405.42	45.61	8.89	6.82	0.39	1.14
	KM-1	68.5	162	18.3	66.8	13.0	1.46	9.77	1.62	9.12	1.73	5.07	0.85	5.70	0.92	45.8	364.84	330.06	34.78	9.49	8.62	0.38	1.10
	KM-2	74.7	160	18.9	64.3	12.6	1.28	8.87	1.59	7.70	1.51	4.21	0.72	4.72	0.72	37.2	361.82	331.78	30.04	11.04	11.35	0.35	1.02
	KM-3	69.5	158	17.8	62.2	12.0	1.33	9.01	1.65	8.76	1.70	4.83	0.83	5.66	0.94	43.0	354.21	320.83	33.38	9.61	8.81	0.38	1.07
	KM-4	75.1	163	19.9	65.2	12.4	1.31	9.17	1.56	7.65	1.54	4.29	0.74	4.88	0.76	40.8	367.50	336.91	30.59	11.01	11.04	0.36	1.01

表 4 卡尔恰尔(KE)、小白河沟(XB)、库木塔什(KM)矿床的萤石 Sr-Nd 同位素组成表

Tab. 4 Sr-Nd isotopic composition of fluorites from Kaerqiaer, Xiaobaihegou and Kumutashi deposit

样号	Rb/ 10^{-6}	Sr/ 10^{-6}	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	Sm/ 10^{-6}	Nd/ 10^{-6}	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$
KE-1	0.05	343	0.000 39	0.710 05	1.77	6.55	0.163 3	0.511 987
KE-2	0.03	340	0.000 29	0.710 05	1.83	6.82	0.162 6	0.511 917
KE-3	0.04	342	0.000 36	0.710 07	1.79	6.48	0.167 2	0.511 932
KE-4	0.05	342	0.000 41	0.710 08	1.83	6.71	0.165 5	0.511 975
KE-5	0.06	342	0.000 46	0.710 09	1.78	6.40	0.168 2	0.512 040
KE-6	0.05	343	0.000 46	0.710 04	1.80	6.49	0.167 8	0.512 036
XB-1	0.26	264	0.002 87	0.710 25	2.62	9.36	0.169 6	0.511 930
XB-2	0.13	293	0.001 31	0.710 15	2.60	9.45	0.166 4	0.511 919
XB-3	0.18	368	0.001 45	0.710 25	3.26	11.88	0.165 9	0.512 039
XB-4	0.16	399	0.001 18	0.710 23	2.98	10.68	0.168 8	0.512 062
XB-5	0.21	375	0.001 61	0.710 36	3.94	14.15	0.168 4	0.512 061
KM-1	1.30	199	0.018 78	0.709 50	1.32	3.90	0.204 4	0.512 071
KM-2	0.02	261	0.000 25	0.709 52	1.29	3.88	0.200 2	0.512 061
KM-3	0.02	208	0.000 29	0.709 55	1.32	3.94	0.202 4	0.512 044

10^{-6} , $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 值为 $0.001\,18\sim0.002\,87$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 $0.710\,15\sim0.710\,36$, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 值为 $0.165\,9\sim0.169\,6$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值为 $0.511\,919\sim0.512\,062$ (表 4)。

库木塔什矿区 3 件萤石的 Rb 含量为 $0.02\times 10^{-6}\sim1.3\times 10^{-6}$, Sr 含量为 $199\times 10^{-6}\sim261\times 10^{-6}$, Sm 含量为 $1.29\times 10^{-6}\sim1.32\times 10^{-6}$, Nd 含量为 $3.88\times 10^{-6}\sim3.94\times 10^{-6}$, $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 值为 $0.000\,25\sim0.018\,78$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 $0.709\,50\sim0.709\,55$, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 值为 $0.200\,2\sim0.204\,4$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值为 $0.512\,044\sim0.512\,071$ (表 4)。

5 讨论

5.1 成岩时代与构造背景

本次研究工作对阿尔恰尔超大型萤石矿区碱长花岗岩进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年, 获得成岩年龄为 $(455.8\pm 2)\text{Ma}$, 表明其形成于中—晚奥陶世。一般岩浆热液型萤石矿的成矿时代稍晚于成矿岩体形成时代, 卡尔恰尔一带各萤石矿区均见发育有肉红色碱长花岗岩脉体, 萤石矿化主要赋存于岩体内外接触带附近, 常见萤石-方解石细脉穿插于碱长花岗岩脉体中, 碱长花岗岩因强烈热液活动而发育碳酸盐化、萤石化、硅化、绢云母化等矿化蚀变。同时库木塔什萤石矿的研究显示, 该矿区碱长花岗岩体属高氟岩体 [$w(\text{F}) > 0.1\%$], 成岩年龄为 $(450\pm 2.7)\text{Ma}$ (高永宝等, 2021), 与萤石共生的磷灰石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 $(448\pm 27)\text{Ma}$ (待见刊), 均表明该区碱长花岗岩与萤石成矿具有密切的时空、成因关系。

区域上, 阿尔金西南缘发育大规模早古生代岩浆岩, 均为阿中地块与柴达木地块之间洋-陆转换过程中岩浆活动的产物(曹玉亭等, 2010; 孙吉明等, 2012; 杨文强等, 2012; 郭金城等, 2014; 徐旭明等, 2014; 董洪凯等, 2014; 康磊等, 2016; 过磊等, 2019)。区域超高压变质岩研究表明, 峰期变质时代集中于 $504\sim 486\text{Ma}$, 退变质作用时代为 $\sim 450\text{Ma}$ (Zhang et al., 2001; 刘良等, 2007; Liu et al., 2012)。卡尔恰尔周边邻近的花岗岩研究显示, 帕夏拉依档沟一带二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 $(460\pm 4)\text{Ma}$ 、正长花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 $(455\pm 3.6)\text{Ma}$, 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 $(451\pm 4)\text{Ma}$, 形成于伸展构造背景(王立社等, 2016), 而镁铁-超镁铁质侵入体

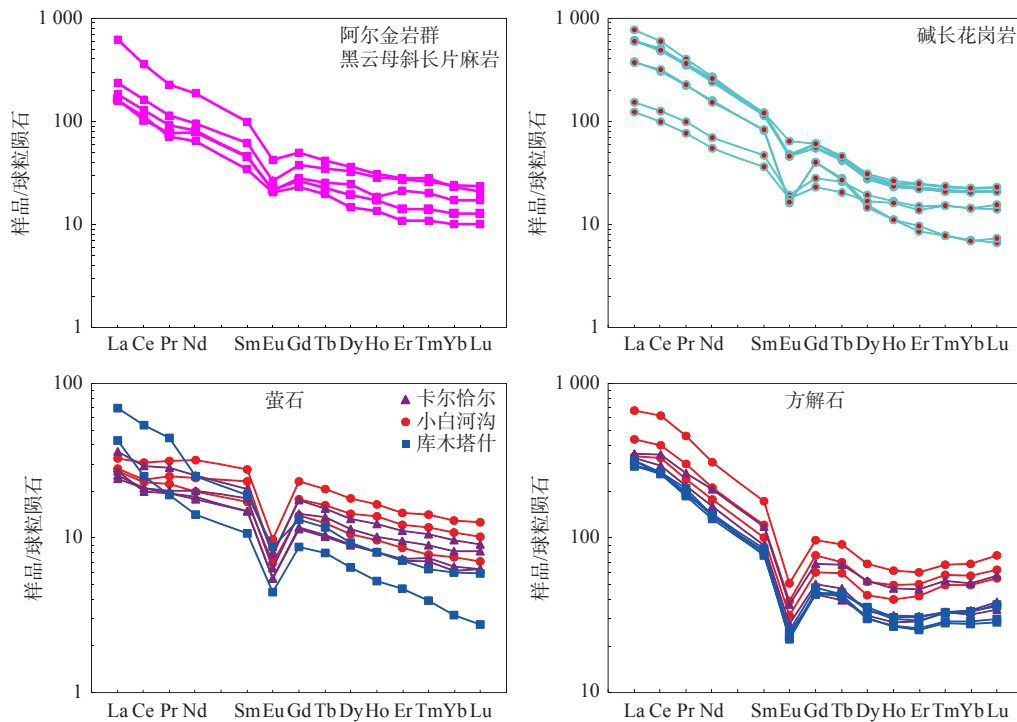
(465Ma)暗示此时碰撞造山已转入伸展阶段(马中平等, 2011)。上述研究均表明, 中—晚奥陶世阿中地块和柴达木地块由挤压造山转变成伸展构造背景, 卡尔恰尔超大型萤石矿带正是该时期岩浆活动的产物。另外, 区域上发育大规模形成于早—中奥陶世碰撞造山阶段的伟晶岩脉群, 如吐格曼锂铍稀有金属矿床的成矿黑云母二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 $475\sim 482\text{Ma}$, 含矿伟晶岩脉中铌钽铁矿 U-Pb 年龄为 $(472\pm 8)\text{Ma}$ 、锡石 U-Pb 年龄为 $(468\pm 8.7)\text{Ma}$ (徐兴旺等, 2019; 李杭等, 2020; Gao et al., 2021)。综上, 早古生代加里东期是区域萤石矿、铍铍稀有金属矿的重要成矿期, 萤石成矿稍晚于铍铍稀有金属矿。

卡尔恰尔超大型萤石矿区片麻状钾长花岗岩获得 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 $(914.5\pm 4.1)\text{Ma}$, 表明其形成于新元古代早期。区域上, 阿尔金西南缘已发现多处新元古代花岗(片麻)岩, 可能与 $\sim 900\text{Ma}$ Rodinia 超大陆事件引发的全球性岩浆活动相关, 在空间分布上自西向东有江孜勒萨依、库如克萨依、清水泉、肖鲁布拉克、亚干布阳等地区花岗(片麻)岩呈带状分布, 构成了一条与 Rodinia 超大陆汇聚相关的花岗岩带, 正是这次构造事件使阿中地块和柴达木地块固结, 该类同碰撞型花岗质片麻岩年龄大多为 $870\sim 945\text{Ma}$ (王超等, 2006; 校培喜等, 2014; 朱小辉等, 2014; 王立社等, 2015; 李琦等, 2018; 马拓等, 2018; PAK Sang Wan, 2019; 曾忠诚, 2020), 卡尔恰尔萤石矿区的片麻状钾长花岗岩即为 Rodinia 超大陆汇聚引发的岩浆活动的产物。

5.2 成矿流体特征

卡尔恰尔、小白河沟、库木塔什矿床萤石、方解石稀土元素特征表明, 萤石、方解石的稀土元素配分曲线特征与碱长花岗岩、地层变质杂岩(黑云斜长片麻岩)较相似, 均表现为右倾的 LREE 富集型, 具有明显的负 Eu 异常特征(图 7), 表明萤石、方解石的稀土可能继承了岩体、地层的稀土配分模式。相比较, 库木塔什矿区的萤石矿物具有更高的轻重稀土分馏程度。研究表明, 萤石形成过程中 REE 含量的分布与结晶作用所处阶段有关, 一般结晶早阶段的萤石富集 LREE, 而结晶晚阶段萤石富集 HREE(Moller et al., 1983; Schonenberger et al., 2008), 卡尔恰尔、小白河沟、库木塔什矿床中萤石均表现为明显的 LREE 富集型, 可知其均形成于结晶作用的早阶段。

Moller 等(1976)在全球 150 多个萤石矿床研究



碱长花岗岩与黑云母斜长片麻岩数据引自高永宝等(2021)与吴益平等(2021)

图7 卡尔恰尔一带萤石矿床的稀土元素配分模式图

Fig. 7 Normalized REE patterns of fluorite deposits from the Kaerqiaer area

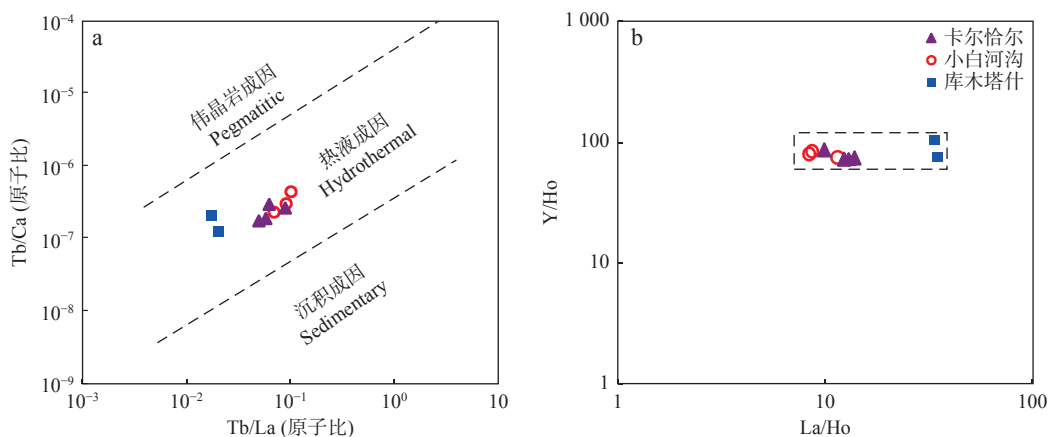
基础上提出 $Tb/La-Tb/Ca$ 双变量关系图解,用以判别萤石的成因类型, Tb/La 原子数比值可反映成矿流体中稀土元素的分馏程度, Tb/Ca 原子数比值可代表萤石结晶时的化学环境,具成因指示意义;卡尔恰尔、小白河沟、库木塔什矿床的萤石样品点均落在热液成因区域(图 8a),表明该区萤石矿均为岩浆热液作用的产物。Y、Ho 元素由于半径、电价相近,具有相似的地球化学性质,故 Y/Ho 值常作为一种重要参数来示踪成矿流体作用过程(Deng et al., 2014; Graupner et al., 2015; Mondillo et al., 2016),在富含 F 的成矿流体体系中, Y 相对于 Ho 元素含量会较富集,两者比值一般大于 28(Veksler et al., 2005)。Bau 等(1995)在研究欧洲数个萤石矿床后提出 $La/Ho-Y/Ho$ 关系图,可有效判别成矿流体来源,同源同期结晶的萤石 Y/Ho 值不变而在图上表现为直线,而不同来源的萤石 Y/Ho 值变化较大。卡尔恰尔、小白河沟、库木塔什矿床萤石样品在 $La/Ho-Y/Ho$ 图中呈水平直线展布(图 8b),且萤石样品 Y/Ho 值(68~105)均远大于 28,表明该区萤石矿为同源同期流体成矿,成矿流体是具有相同物化性质的富含 F 的成矿流体。前已述及,不同矿区萤石、方解石的稀土元素配分模式具有一致

性,同样是同源同期流体的反映。同时,图 8 中可看出卡尔恰尔、小白河沟矿床的萤石矿物 Tb/La 、 La/Ho 值相近,且与库木塔什矿床有明显区别,表明同处于卡尔恰尔断裂的卡尔恰尔、小白河沟矿床萤石的稀土分馏程度相近,而处于盖吉勒断裂的库木塔什萤石矿具有相对更高的轻重稀土分馏程度,可能反映同一成矿流体体系下不同断裂处分布的萤石矿床成矿环境略有差异。

δEu 特征能记录成矿流体的氧化还原条件及温度,还原条件下形成的萤石因 Eu^{2+} 具较大离子半径而有利于取代 Ca^{2+} 进入到晶格中,导致 Eu^{2+} 与稀土体系分离而形成 Eu 负异常,氧化条件下形成的萤石通常呈 Eu 正异常(Bau et al., 1992)。同时强烈的 Eu 负异常指示沉淀时成矿流体处于中低温环境($<250^{\circ}C$),而当温度超过 $250^{\circ}C$ 时则表现出正 Eu 异常(Bau et al., 1992)。卡尔恰尔、小白河沟、库木塔什矿床中萤石、方解石的 $\delta Eu < 0$,表示沉淀时成矿流体处于还原条件下中低温环境。

5.3 成矿物质来源

在反映成矿物质来源的 $La/Yb-\Sigma REE$ 关系图中(图 9a),不同矿区的萤石样品均落在沉积岩、钙质泥



计算 Tb/Ca 原子数比采用 CaF_2 中 Ca 的理论值 (51.332 8%)

图 8 卡尔恰尔一带萤石 Tb/Ca-Tb/La 图与 La/Ho-Y/Ho 图(底图据 Moller et al., 1976; Bau et al., 1995)

Fig. 8 Tb/Ca-Tb/La and La/Ho-Y/Ho diagram of fluorite from the Kaerqiaer area

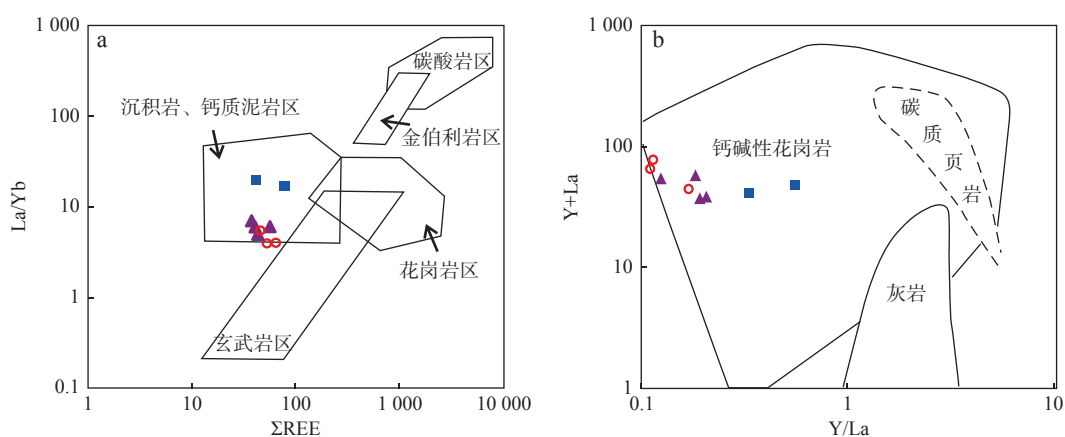


图 9 卡尔恰尔一带萤石的 La/Yb-ΣREE 与 (Y+La)-Y/La 图解(底图据 Allegre et al., 1978)

Fig. 9 La/Yb-ΣREE and (Y+La)-Y/La diagram of fluorite from the Kaerqiaer area

岩区及其附近,说明成矿物质可能一部分来自围岩。在(Y+La)-Y/La 关系图(图 9b)中,样品均落在钙碱性花岗岩区域内,说明萤石矿在成因上确实与花岗岩的侵入有密切关系。显然,元素图解不仅展示了围岩地层对成矿物质的影响,还显示了岩浆热液对成矿作用的影响,且该区成矿碱长花岗岩体属高氟岩体 [$w(\text{F}) > 0.1\%$],可为萤石成矿提供氟物质,萤石赋矿地层具有一定选择性,主要为阿尔金岩群中的黑云斜长片麻岩、碳酸盐岩等富钙质岩系。因此,初步认为成矿主要物质之一的 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 元素则可能主要来源于成矿岩体碱长花岗岩。

萤石一般具有较低的 Rb 含量和较高的 Sr 含量,此次 Sr、Nd 同位素测试结果显示,卡尔恰尔一带萤石

具有较低的 Rb/Sr 值,使得萤石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 组成可以直接代表成矿流体的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值。卡尔恰尔矿区萤石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 0.710 05~0.710 09,小白河沟矿区萤石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 0.710 15~0.710 36,库木塔什矿区萤石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 0.709 50~0.709 55,可看出各矿区成矿流体的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值基本一致,反映了成矿流体中 Sr 可能同源。卡尔恰尔矿区萤石的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值为 0.511 917~0.512 040,小白河沟矿区萤石的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值为 0.511 919~0.512 062,库木塔什矿区萤石的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值为 0.512 044~0.512 071,均介于上、下地壳 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值 (0.500 71~0.512 12) 之间。在 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 图解中(图 10),萤石样品点均落于上、下地壳之间区域,说明萤石成矿物质来源于地壳。

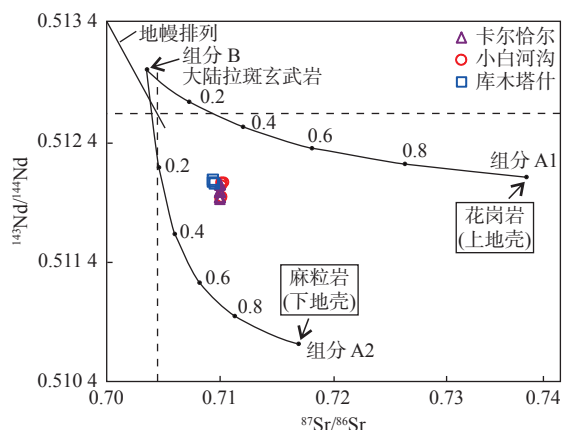


图 10 卡尔恰尔一带萤石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}-^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 图解

Fig. 10 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}-^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ diagram of fluorite from the Kaerqiaer area

6 结论

(1)阿尔金卡尔恰尔超大型萤石矿带成矿与碱长花岗岩关系密切,萤石矿化主要赋存于岩体内外接触带附近,赋矿围岩主要为阿尔金岩群中的黑云斜长片麻岩、碳酸盐岩等富钙质岩系,矿体明显受北东向断裂构造控制,矿石类型主要有脉状、角砾状、块状、条带状矿石,矿物组成主要是萤石、方解石。

(2)卡尔恰尔超大型萤石矿区与成矿有关的碱长花岗岩成岩年龄为 $(455.8\pm 2)\text{Ma}$,结合前人研究,认为该萤石矿带形成于加里东期中—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。矿区片麻状钾长花岗岩成岩年龄为 $(914.5\pm 4.1)\text{Ma}$,形成于新元古代早期,与 Rodinia 超大陆汇聚事件有关。

(3)稀土元素特征显示,卡尔恰尔、小白河沟、库木塔什 3 个矿床的萤石、方解石稀土元素配分模式均为右倾的 LREE 富集型,具有明显负 Eu 异常,与成矿岩体、围岩地层十分相似,表明萤石、方解石的稀土可能继承了岩体、地层的稀土配分模式。各矿床萤石均为热液成因,表现出同源同期成矿流体的特征,成矿环境为还原条件下的中低温环境。

(4)各矿区萤石 Sr-Nd 同位素组成显示成矿物质来源于地壳,结合成矿特征,初步认为 Ca 可能主要来自于岩浆热液对地层的淋滤萃取,而 F 可能主要来源于成矿岩体碱长花岗岩。

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.

陈军元,刘艳飞,颜玲亚,等.石墨、萤石等战略非金属矿产发展趋势研究[J].地球学报,2021,42(2):287-296.

CHEN Junyuan, LIU Yanfei, YAN Lingya, et al. Research on Development Trend of Strategic Nonmetallic Minerals such as Graphite and Fluorite[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2021, 42(2): 287-296.

董洪凯,郭金城,陈海燕,等.新疆阿尔金地区长沙沟一带奥陶纪侵入岩及其演化特征[J].西北地质,2014,47(4):73-87.

DONG Hongkai, GUO Jincheng, CHEN Haiyan, et al. Evolution Characteristics of Ordovician Intrusive Rock in Changshagou of Altyn Region[J]. Northwestern Geology, 2014, 47(4): 73-87.

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/OL].中国地质,2021.

GAO Yongbao, ZHAO Xinmin, WANG Bo, et al. Ore deposit geology, Geochemical characteristics of ore controlling granite and Prospecting Potential of Superlarge Fluorite Ore Belt in the Kaerqiaer-Kumutash Area, West Altyn-Tagh[J/OL]. Geology in China, 2021.

郭金城,徐旭明,陈海燕,等.新疆阿尔金长沙沟超镁铁质岩锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J].西北地质,2014,47(4):170-177.

GUO Jincheng, XU Xuming, CHEN Haiyan, et al. Zircon U-Pb Age and Geological Implications of Ultramafic Rocks in Changshagou, Altun Area, Xinjiang Province[J]. Northwestern Geology, 2014, 47(4): 170-177.

过磊,李建星,郭琳,等.南阿尔金茫崖碱长花岗岩锆石 U-Pb 定年及岩石成因研究[J].西北地质,2019,52(1):1-13.

GUO Lei, LI Jianxing, GUO Lin, et al. Zircon U-Pb Dating and Petrogenesis of Alkali-feldspar Granite in Mangnai Area, South Altun, NW China[J]. Northwestern Geology, 2019, 52(1): 1-13.

康磊,校培喜,高晓峰,等.阿尔金南缘早古生代岩浆作用及碰撞造山过程[J].地质学报,2016,90(10):2527-2550.

KANG Lei, XIAO Peixi, GAO Xiaofeng, et al. Early Paleozoic Magmatism and Collision Orogenic Process of the South Altyn[J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90(10): 2527-2550.

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 Zhiqian, 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.
- 李琦, 曾忠诚, 陈宁, 等. 阿尔金造山带青白口纪亚干布阳片麻岩年龄、地球化学特征及其地质意义[J]. *地质通报*, 2018, 37(4): 642–654.
- LI Qi, ZENG Zhongcheng, CHEN Ning, et al. Zircon U-Pb ages, geochemical characteristics and geo-logical significance of Yaganbuyang gneiss in Qingbaikou period along the Altun orogenic belt[J]. *Geological Bulletin of China*, 2018, 37(4): 642–654.
- 李艳广, 汪双双, 刘民武, 等. 斜锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年方法及应用[J]. *地质学报*, 2015, 89(12): 2400–2418.
- LI Yanguang, WANG Shuangshuang, LIU Minwu, et al. U-Pb Dating Study of Baddeleyite by LA-ICP-MS: Technique and Application[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89(12): 2400–2418.
- 刘良, 张安达, 陈丹玲, 等. 阿尔金江孜勒萨依榴辉岩和围岩锆石 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 Jianggalesayi area, Altyn Tagh[J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(1): 98–107.
- 马拓, 刘良, 盖永升, 等. 南阿尔金尤努斯萨依花岗质高压麻粒岩的发现及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2018, 34(12): 3643–3657.
- MA Tuo, LIU Liang, GAI YongSheng, et al. Discovery of the high pressure granitic granulite in South Altyn and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2018, 34(12): 3643–3657.
- 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.
- 彭强, 江小均, 李超, 等. 云南个旧西凹蚀花岗岩型铜-锡多金属矿床萤石地球化学特征及其地质意义[J]. *矿床地质*, 2021, 40(6): 1182–1198.
- PENG Qiang, JIANG Xiaojun, LI Chao, et al. Geochemical characteristics of fluorites from the Xi'ao altered granite type Cu-Sn polymetallic deposit in Gejiu, Yunnan Province and their geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 2021, 40(6): 1182–1198.
- PAK Sang Wan, 马拓, 盖永升, 等. 南阿尔金尤努斯萨依高压花岗质片麻岩原岩的形成时代与地球化学特征: 对南阿尔金陆壳深俯冲板片属性的进一步限定[J]. *西北地质*, 2019, 52(4): 76–97.
- PAK Sang Wan, MA Tuo, GAI Yongsheng, et al. Geochronology and Geochemical Characteristics of the Protolith Rock of Younisay High Pressure Granitic Gneiss: a Further Study on the Properties of Continental Crust Subduction Plate in South Altyn Tagh[J]. *Northwestern Geology*, 2019, 52(4): 76–97.
- 孙海瑞, 黄智龙, 周家喜, 等. 热液矿床中萤石的稀土元素地球化学及其指示意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 2014, 33(1): 185–193.
- SUN Hairui, HUANG Zhilong, ZHOU Jiaxi, et al. Rare earth elements geochemistry of fluorite in hydrothermal deposits and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 2014, 33(1): 185–193.
- 孙吉明, 马中平, 唐卓, 等. 阿尔金南缘鱼目泉岩浆混合花岗岩 LA-ICP-MS 测年与构造意义[J]. *地质学报*, 2012, 86(2): 247–257.
- SUN Jiming, MA Zhongping, TANG Zhuo, et al. The LA-ICP-MS Zircon Dating and Tectonic Significance of the Yumuquan Magma Mixing Granite, Southern Altyn Tagh[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(2): 247–257.
- 王超, 刘良, 车自成, 等. 阿尔金南缘榴辉岩带中花岗片麻岩的时代及构造环境探讨[J]. *高校地质学报*, 2006, 12(1): 74–82.
- WANG Chao, LIU Liang, CHE Zicheng, et al. U-Pb geochronology and tectonic setting of the granitic gneiss in Jianggalesayi eclogite belt, the Southern edge of Altyn Tagh[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2006, 12(1): 74–82.
- 王吉平, 商朋强, 熊先孝, 等. 中国萤石矿床成矿规律[J]. *中国地质*, 2015, 42(1): 18–32.
- WANG Jiping, SHANG Pengqiang, XIONG Xianxiao, et al. Metallogenic regularities of fluorite deposits in China[J]. *Geology in China*, 2015, 42(1): 18–32.
- 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(123): 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. Isotopic age and genesis of plagiogranite from Qingshuiquan area in the middle of South Altyn Tagh[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2016, 32(123): 759–774.
- 王立社, 张巍, 段星星, 等. 阿尔金环形山花岗片麻岩同位素年龄及成因研究[J]. *岩石学报*, 2015, 31(1): 119–132.
- WANG Lishe, ZHANG Wei, DUAN Xingxing, et al. Isotopic age and genesis of the monzogranitic gneiss at the Huanxingshan in middle Altyn Tagh[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 31(1): 119–132.
- 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.
- 校培喜, 高晓峰, 胡云绪. 西昆仑—阿尔金成矿带基础地质综合研究[M]. 北京: 地质出版社, 2014.
- XIAO Peixi, GAO Xiaofeng, HU Yunxu. Comprehensive Research of Basic Geology for Western Kunlun-Altyn Tagh Metallogenic Zone[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2014.
- 许成, 黄智龙, 漆亮, 等. 四川牦牛坪稀土矿床成矿流体来源与演化初探—萤石稀土地球化学的证据[J]. 地质与勘探, 2001, 5: 24–28.
- XU Cheng, HUANG Zhilong, QI Liang, et al. Source and evolution of ore-forming fluids of Maoniuping rare-earth deposit—Evidence from REE geochemistry of fluorites[J]. Geology and Prospecting, 2001, 5: 24–28.
- 许东青, 聂凤军, 钱明平, 等. 苏莫查干敖包超大型萤石矿床的稀土元素地球化学特征及其成因意义[J]. 矿床地质, 2009, 28(1): 29–41.
- XU Dongqing, NIE Fengjun, QIAN Mingping, et al. REE geochemistry and genesis of Sumochagan Obo superlarge fluorite deposit[J]. Mineral Deposits, 2009, 28(1): 29–41.
- 许若潮, 龙训荣, 刘飏等. 湘南界牌岭锡多金属矿床萤石 LA-ICP-MS 微量元素地球化学特征及意义[J]. 矿床地质, 2022, 41(1): 158–173.
- XU Ruochao, LONG Xunrong, LIU Biao, et al. LA-ICP-MS trace element analysis of fluorite and implications in Jiepailling tin-polymetallic deposit from South of Hunan Province[J]. Mineral Deposits, 2022, 41(1): 158–173.
- 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.
- 徐旭明, 郭金城, 陈海燕, 等. 新疆阿尔金长沙沟一带奥陶纪辉长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地球化学特征[J]. 西北地质, 2014, 47(4): 156–162.
- XU Xuming, GUO Jincheng, CHEN Haiyan, et al. SHRIMP Zircon U-Pb Age and Geochemical Characteristics of Ordovician Gabbro from Altyn, Xinjiang Province[J]. North Western Geology, 2014, 47(4): 156–162.
- 杨文强, 刘良, 丁海波, 等. 南阿尔金迪木那里克花岗岩地球化学、锆石 U-Pb 年代学与 Hf 同位素特征及其构造地质意义[J]. 岩石学报, 2012, 128(12): 4139–4150.
- YANG Wenqiang, LIU Liang, DING Haibo, et al. Geochemistry, Geochronology and Zircon Hf Isotopes of the Dimunlike Granite in South Altyn Tagh and Its Geological Significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 128(12): 4139–4150.
- 叶锡芳. 浙江萤石矿床成矿规律与成矿模式[J]. 西北地质, 2014, 47(1): 208–220.
- YE Xifang. Mineralization and Metallogenic Model of Fluorite Deposits in the Zhejiang Area[J]. North Western Geology, 2014, 47(1): 208–220.
- 游超, 王春连, 刘殿鹤, 等. 江西宁都坎田萤石矿床稀土元素地球化学特征及其指示意义[J]. 地球学报, 2022, 43(3): 359–370.
- YOU Chao, WANG Lianchun, LIU Dianhe, et al. REE geochemistry of fluorite from Kantian fluorite deposit and its geological implications in Ningdu Area, Jiangxi Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2022, 43(3): 359–370.
- 曾忠诚, 洪增林, 刘芳晓, 等. 阿尔金造山带青白口纪片麻状花岗岩的厘定及对 Rodinia 超大陆汇聚时限的制约[J]. 中国地质, 2020, 47(3): 569–589.
- ZENG Zhongcheng, HONG Zenglin, LIU Fangxiao, et al. Confirmation of gneissic granite of Qingbaikou period and its constraint on the timing of the Rodinia supercontinent on the Altyn orogenic belt[J]. Geology in China, 2020, 47(3): 569–589.
- 张建新, 孟繁聪, 于胜尧. 两条不同类型的 HP/LT 和 UHP 变质带对祁连山-阿尔金早古生代造山作用的制约[J]. 岩石学报, 2010, 26(7): 1967–1992.
- ZHANG Jianxin, MENG Fancong, YU Shengyao. Two contrasting HP/LT and UHP metamorphic belts: Constraint on Early Paleozoic orogeny in Qilian-Altyn orogen[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(7): 1967–1992.
- 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): 546–558.
- 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): 546–558.
- 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.
- 张苏坤, 王辉, 冯绍平, 等. 河南省栾川县杨山萤石矿成矿作用: 来自氢氧同位素和元素地球化学的约束[J]. 西北地质, 2022, 55(2): 209–216.
- ZHANG Sukun, WANG Hui, FENG Shaoping, et al. Mineralization

- of Yangshan Fluorite Deposit in Luanchuan County, Henan Province: Constraints from H-O Isotopes and Element Geochemistry[J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(2): 209–216.
- 赵省民, 聂凤军, 江思宏, 等. 内蒙古东七—山萤石矿床的稀土元素地球化学特征及成因[J]. *矿床地质*, 2002, 21(3): 311–317.
- ZHAO Xingmin, NIE Fengjun, JIANG Sihong, et al. REE Geochemistry and Genesis of Dongqi-yishan Fluorite Deposit, Inner Mongolia[J]. *Mineral Deposits*, 2002, 21(3): 311–317.
- 朱小辉, 曹玉亭, 刘良, 等. 阿尔金淡水泉花岗质高压麻粒岩 PT 演化及年代学研究[J]. *岩石学报*, 2014, 30(12): 3717–3728.
- ZHU Xiaohui, CAO Yuting, LIU Liang, et al. P-T path and geochronology of high pressure granitic granulite from Danshuiquan area in Altyn Tagh[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(12): 3717–3728.
- 邹灏, 淡永, 张寿庭. 重庆东南部彭水地区重晶石-萤石矿床的成矿物质来源探讨: 地球化学证据[J]. *大地构造与成矿学*, 2016, 4(1): 71–85.
- ZOU Hao, DAN Yong, ZHANG Shouting. Geochemical Evidence for Sources of Ore-forming Material of Barite-Fluorite Deposits in Pengshui Area, Southeast Chongqing[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2016, 4(1): 71–85.
- 邹灏, 方乙, 陈合毛, 等. 浙江天台盆地陈萤石矿稀土元素地球化学特征及成因[J]. *中国地质*, 2014, 41(4): 1375–1386.
- ZOU Hao, FANG Yi, CHEN Hemao, et al. REE geochemistry and genesis of the Xiachen fluorite deposit in Tiantai basin, Zhejiang Province[J]. *Geology in China*, 2014, 41(4): 1375–1386.
- Allegre C J, and Minster J F. Quantitative models of trace element behaviour in magmatic processes[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1978, 38: 1–25.
- Bau M, and Dulski P. Comparative study of yttrium and rare-earth element behaviors in fluorite-rich hydrothermal fluids[J]. *Contributions Mineralogy Petrology*, 1995, 119: 213–223.
- Bau M, and Moller P. Rare earth element fractionation in metamorphogenic hydrothermal calcite, magnesite and siderite[J]. *Mineralogy and Petrology*, 1992, 45(3): 231–246.
- DENG X H, CHEN Y J, YAO J M, et al. Fluorite REE-Y (REY) geochemistry of the ca. 850Ma Tumen molybdenite-fluorite deposit, eastern Qinling, China: Constraints on ore genesis[J]. *Ore Geology Reviews*, 2014, 63: 532–543.
- Gao Y B, ZHAO X M, Leon Bagas, et al. Newly Discovered Ordovician Li-Be Deposit at Tugeman in the Altyn-Tagh Orogen, NW China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2021, 139: 1–15.
- Graupner T, Muhlbach C, Schwarz-Schampera U, et al. Mineralogy of high-field-strength elements(Y, Nb, REE) in the world-class Vergenoeg fluorite deposit, South Africa[J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 64: 583–601.
- Hoskin P W O, Black L P. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2000, 18: 423–439.
- 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 Altyn, NW China[J]. *Lithos*, 2012, 136–139: 10–26.
- Lottermoser B G. Rare earth elements and hydrothermal ore formation processes[J]. *Ore Geology Reviews*, 1992, 7: 25–41.
- 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.
- Moller P, Morteani G. On the geochemical fractionation of rare-earth elements during the formation of Ca-minerals and its application to problems of the genesis of ore deposits. In: Augusthitis SS(ed.). The Significance of Trace Elements in Solving Petrogenetic Problems and Controversies[J]. Theophrastus, Athens, 1983: 747–791.
- Moller P, Parekh P P, Schneider H J. The application of Tb/Ca-Tb/La abundance ratios to problems of fluor-spar genesis[J]. *Mineralium Deposita*, 1976, 11: 111–116.
- Mondillo N, Boni M, Balassone G, et al. Rare earth elements (REE) - Minerals in the Silius fluorite vein system (Sardinia, Italy)[J]. *Ore Geology Reviews*, 2016, 74: 211–224.
- Sasmaz A, Kryuchenko N, Zhovinsky E, et al. Major, trace and rare earth element (REE) geochemistry of different colored fluorites in the Bobrynets region, Ukraine[J]. *Ore Geology Reviews*, 2018, 102: 338–350.
- Schonenberger J, Köhler J, Markl G. REE systematics of fluorides, calcite and siderite in peralkaline plutonic rocks from the Gardar Province, South Greenland[J]. *Chemical Geology*, 2008, 247(1–2): 16–35.
- Smith M P, Henderson P, Campbell L S. Fractionation of the REE during hydrothermal processes: Constraints from the Bayan Obo Fe-REE-Nb deposit, Inner Mongolia, China[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64(18): 3141–3160.
- Van Achtebergh E, Ryan C G, Jackson S E, et al. Data reduction software for LA-ICP-MS. In: Sylvester, P. J. (Ed.), Laser-Ablation-ICPMS in the Earth Sciences. Principles and Applications[J]. Mineralogical Society of Canada (Short Course Series), 2001, 29: 239–243.
- Veksler I V, Dorfman A M, Kamenetsky M, et al. Partitioning of lanthanides and Y between immiscible silicate and fluoride melts, fluorite and cryolite and the origin of the lanthanide tetrad effect in igneous rocks[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, 69(11): 2847–2860.
- Zhang J X, Zhang Z M, Xu Z Q, et al. Petrology and geochronology of eclogites from the Western segment of the Altyn Tagh, northwestern China[J]. *Lithos*, 2001, 56(2–3): 187–206.