

doi: 10.12029/gc20210515001

高永宝, 赵辛敏, 王博, 张江伟, 金谋顺, 杨生飞, 燕洲泉, 滕家欣, 赵慧博, 朝银银. 2023. 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, 50(3): 704–729.

Gao Yongbao, Zhao Xinmin, Wang Bo, Zhang Jiangwei, Jin Moushun, Yang Shengfei, Yan Zhouquan, Teng Jiaxin, Zhao Huiibo, Chao Yinyin. 2023. 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, 50(3): 704–729(in Chinese with English abstract).

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

高永宝^{1,2}, 赵辛敏², 王博³, 张江伟², 金谋顺², 杨生飞¹,
燕洲泉², 滕家欣², 赵慧博², 朝银银¹

(1. 中国地质调查局西安矿产资源调查中心, 陕西 西安 710100; 2. 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; 3. 中化地质矿山总局地质研究院, 北京 100101)

摘要:【研究目的】阿尔金西段近年来萤石找矿取得重大突破, 新发现卡尔恰尔、库木塔什、小白河沟、布拉克北等矿床(点), 已达超大型规模, 初步形成西部重要的萤石大型资源基地。有关萤石成矿机制的研究非常薄弱, 本文选择区内的典型矿床开展研究, 以期揭示阿尔金西段超大型萤石成矿带矿床地质、控矿因素与找矿远景, 深化矿床成因研究并指导区域找矿。【研究方法】本文在详尽野外调查的基础上, 利用 LA-ICP-MS 锆石定年、岩石地球化学和 Hf 同位素分析, 探讨成岩成矿时代、控矿碱长花岗岩成因及萤石成矿机制, 总结区内控矿要素和找矿标志, 通过地质、地球化学和遥感等数据进行成矿预测, 分析区域找矿远景。【研究结果】研究发现, 区内萤石成矿与碱长花岗岩密切相关, 矿体明显受控于北东向及次级北东东、东西向断裂构造, 赋矿地层主要为阿尔金岩群斜长片麻岩和大理岩, 矿石类型主要有块状、脉状、角砾状矿石, 矿物组成主要为萤石、方解石、少量石英及磷灰石, 早期萤石呈白色, 晚期萤石呈紫色, 伴生含锂的带云母, 属于岩浆热液充填型脉状萤石矿床。库木塔什萤石矿区控矿碱长花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 (450.0 ± 2.7) Ma, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 $-5.33 \sim +6.45$, 二阶段模式年龄 (T_{DM2}) 为 1020~1767 Ma, 具有钾玄质、准铝质、高分异特点, 具有富 F、高 ΣREE 特征, 明显富集大离子亲石元素 Rb、Th、U、La、Ce、Nd、Zr、Hf 等, 强烈亏损 Ta、Nb、Sr、P、Ti 等, 属于 A 型花岗岩, 与奥陶纪造山后伸展背景下壳幔岩浆混合作用密切相关。【结论】区域广泛分布的高氟碱长花岗岩对于萤石-锡-稀有-稀土成矿十分有利。矿带萤石控矿要素主要为碱长花岗岩+北东向断裂及次级构造系+阿尔金岩群富钙地层, 叠加“F 化探异常+碳酸根离子异常”等重要找矿标志, 成矿预测显示具有巨大的萤石找矿潜力, 北东向与东西向构造系、碳酸根离子异常、F 化探异常等套合区域具有较大找矿远景。

关键词: 萤石矿床; 岩浆热液充填型; 地质特征; 找矿远景; 卡尔恰尔—库木塔什; 超大型萤石矿带; 阿尔金西段; 矿产勘查工程

创 新 点: (1) 查明阿尔金西段超大型萤石矿带地质特征、矿床类型及成矿机制; (2) 获得区内控矿高氟碱长花岗岩的成岩时代并分析成因; (3) 归纳总结区域控矿要素和找矿标志, 圈定阿尔金西段卡尔恰尔—库木塔什地区萤石找矿远景区

中图分类号: P611; P612

文献标志码: A

文章编号: 1000-3657(2023)03-0704-26

收稿日期: 2021-05-15; 改回日期: 2021-09-12

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划一面上项目(2023-JC-YB-241)、第二次青藏高原综合科学考察研究专题(2019QZKK0806)、国家重点研发计划课题(2019YFC0605201)、中国地质调查局项目(DD20160004, DD20190143, DD20211551)共同资助。

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

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

GAO Yongbao^{1,2}, ZHAO Xinmin², WANG Bo³, ZHANG Jiangwei², JIN Moushun²,
YANG Shengfei¹, YAN Zhouquan², TENG Jiixin², ZHAO Huibo², CHAO Yinyin¹

(1. Xi'an Center of Mineral Resources Survey, China Geological Survey, Xi'an 710100, Shaanxi, China; 2. 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; 3. Geology Institute of China Chemical Geology and Mine Bureau, Beijing 100101, China)

Abstract: This paper is the result of mineral exploration engineering.

[Objective] Significant breakthroughs have recently been made in fluorite prospecting in the western part of the Altyn–Tagh Orogen in NW China. The newly discovered super–large mineralized belt, which includes the Kaerqiaer, Kumutashi, Xiaobaihegou and North Bulake deposits, is an important fluorite resource base. Research on the genesis of fluorite mineralization is lacking. This paper selects typical deposits in the area for research, to reveal the geological characteristics, ore–controlling factors and prospecting potentials of the super–large fluorite mineralization belt in the West Altyn–Tagh Orogen, thus increasing our knowledge of the genesis and improving regional prospecting for the mineralization. **[Methods]** Based on detailed field investigation, this paper uses LA–ICP–MS zircon dating, geochemistry and Hf isotope analysis to define: (1) The age of rock formation and mineralization; (2) The genesis of ore–controlling alkali–feldspar granite and fluorite mineralization; (3) Summarises the ore–controlling elements and prospecting characteristics of the area; (4) Conducts mineralisation prediction through geological, geochemical and remote sensing data; (5) Analyses the prospectivity of the region. **[Results]** The fluorite mineralization is of hydrothermal origin closely related to alkali feldspar granites, and is controlled largely by NE–trending faults and, to a lesser extent, NEE– and E–trending faults. The host rocks are plagioclase gneiss and carbonate rocks in Altyn Group. The main types of ore include massive, vein and breccia containing early white and later purple fluorite, calcite and minor amounts of quartz, apatite and tainiolite. The alkali feldspar granite at the Kumutashi fluorite deposit has a zircon U–Pb age of (450.0 ± 2.7) Ma, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values ranges from -5.33 to $+6.45$, and $T_{\text{DM}2}$ age between 1767 Ma and 1020 Ma. The geochemical data also shows that the alkali feldspar granite is potassic, metaluminous, high differentiated and genetically related with F–rich rocks. The granite is enriched in Rb, Th, U, La, Ce, Nd, Zr and Hf, depleted in Ta, Nb, Sr, P, and Ti, and has a high ΣREE content. These characteristics are indicative of A–type granites emplaced during the Late Ordovician and derived from a mixed crustal and mantle magma during post–orogenic extension. **[Conclusions]** The widely distributed alkali feldspar granite with high F and ΣREE contents have high prospectivity for fluorite, tin, rare metals, and REE. Thus, the combination of alkali granites, NE–trending faults, and carbonates in the Altyn Group are consisted prospective for large fluorite deposits.

Keywords: fluorite deposit; magmatic hydrothermal filling vein type; geological characteristics; prospecting potential; Kaerqiaer–Kumutashi; super–large fluorite mineralization belt; West Altyn–Tagh Orogen; mineral exploration engineering

Highlights: (1) Identify the overall geological characteristics of the super–large fluorite mineralization belt in the West Altyn–Tagh Orogen; (2) Obtain the age and attribute characteristics of the ore–controlling high–F alkali–feldspar granite in the region; (3) Summarize the regional ore–controlling elements and prospecting vectors, and delineate the fluorite prospectivity in the Kaerqiaer–Kumutashi area of the western part of the orogen.

About the first author: GAO Yongbao, male, born in 1982, Ph.D., researcher, engaged in the study of regional mineralization and mineral deposit; E–mail: gaoyongbao2006@126.com.

Fund support: Supported by Shaanxi Provincial Natural Science Basic Research Program–General Project (No.2023–JC–YB–241), the Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research (No.2019QZKK0806), National Key R & D Plan (No.2019YFC0605201) and the projects of China Geological Survey (No.DD20160004, No.DD20190143, No.DD20211551).

1 引 言

萤石,其主要成分是氟化钙(CaF_2),高端含氟材料在新一代信息技术、新能源、新材料、新医药和航空航天等领域的重要性日益凸显,已被列入中国关键矿产目录(李敬等,2019)。中国萤石矿分布广泛,大中型萤石矿集中分布于中国东部沿海、华中和内蒙古中东部,燕山期是主要形成时期,以热液充填型、热液改造型矿床为主,与石英、方解石等密切共生;伴生型萤石矿与稀土、钨锡、重晶石等密切伴生,品位较低(王吉平等,2014,2015; Han et al., 2020)。近年来,新疆阿尔金西段卡尔恰尔—库木塔什一带萤石找矿取得重大突破,已发现卡尔恰尔、库木塔什、布拉克北、小白河沟、皮亚孜达坂等多处大一中型萤石矿床(点),已达超大型规模,找矿潜力巨大。近年来,对阿尔金西段高压—超高压变质带、蛇绿构造混杂岩带和岩浆岩的研究取得了重要进展,通过精确年代学和岩石成因研究对构造演化时限及历史进行了约束^①(Liu et al., 2012; Wang et al., 2013; 康磊等, 2016; 吴才来等, 2016; 曾忠诚等, 2020; 高栋等, 2022),但与花岗岩有关的成矿作用研究较少,与萤石成矿相关研究基本空白。

本文选择阿尔金西段新发现的卡尔恰尔、库木塔什、布拉克北、小白河沟等萤石矿床(点)为对象,总结其矿床地质特征,利用LA-ICP-MS 锆石定年确定与成矿关系密切的岩浆岩形成时代,通过岩石地球化学及Hf同位素等研究,探讨岩石成因及萤石形成机制,并总结区内控矿要素和找矿标志,通过地质、地球化学和遥感等数据进行成矿预测,分析区域找矿远景,对于矿床成因研究和指导区域找矿具有重要的理论和实践意义。

2 区域地质背景

研究区位于青藏高原北缘,大地构造位置处于阿尔金造山带西段(图1a、b)。区域出露地层以元古界为主,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)。太古代—古元古代阿尔金岩群出露广泛,总体上呈北东向展布,岩石类型复杂,主要为变质碎屑岩、碳酸盐岩和变质火山碎屑岩组成的变质岩系,岩性主要为黑云斜长片麻岩、斜长或二长变粒岩、石榴矽线石黑

云片麻岩、二长石英片岩夹白云质大理岩等。中元古代巴什库尔干岩群为云母石英片岩、片麻岩、变粒岩、长石石英岩夹变质中基性火山岩、火山碎屑岩组成的变质岩系。中元古代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)。木孜萨依组主要为灰—深灰色绢云石英千枚岩、铁钠闪石绢云千枚岩,灰黑色含炭质绢云千枚岩、劈理化变质砂岩和灰白色劈理化结晶灰岩;金雁山组主要为灰色条带状薄—巨厚层灰岩、大理岩、白云岩,夹少量碎屑岩。新元古代索尔库里群为一套浅变质碳酸盐岩、碎屑岩夹少量火山碎屑岩。侏罗纪大煤沟组仅在南部小面积出露,为一套湖相碎屑岩。

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,原岩形成时代多为1000~800 Ma(刘良等,2007),与区域广泛分布的新元古代花岗质片麻岩形成时代基本相同,与Rodinia超大陆事件引发的全球性岩浆活动相关,而变质时代介于504~486 Ma(刘良等,2007; 张建新等,2010; Liu et al., 2012),与阿尔金造山带西南缘~500 Ma时期的陆壳深俯冲—碰撞密切相关。区域南部分布茫崖蛇绿混杂带,经历了多期变形、变质作用改造,呈大小不等的构造岩片或透镜体,主要包括蛇绿岩、蛇绿岩上覆岩系(包括浅变质的凝灰岩、千枚岩、变质细砂岩、硅质岩和碳酸盐岩)及元古代外来片麻岩、片岩等^②。

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初(脆)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、约马克其一库兰勒格断裂、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,少量为南东向。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,宏观上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、小白河沟矿点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、皮亚孜达坂、盖吉克等矿床的形成密切相关。约马克其一库兰勒格断裂

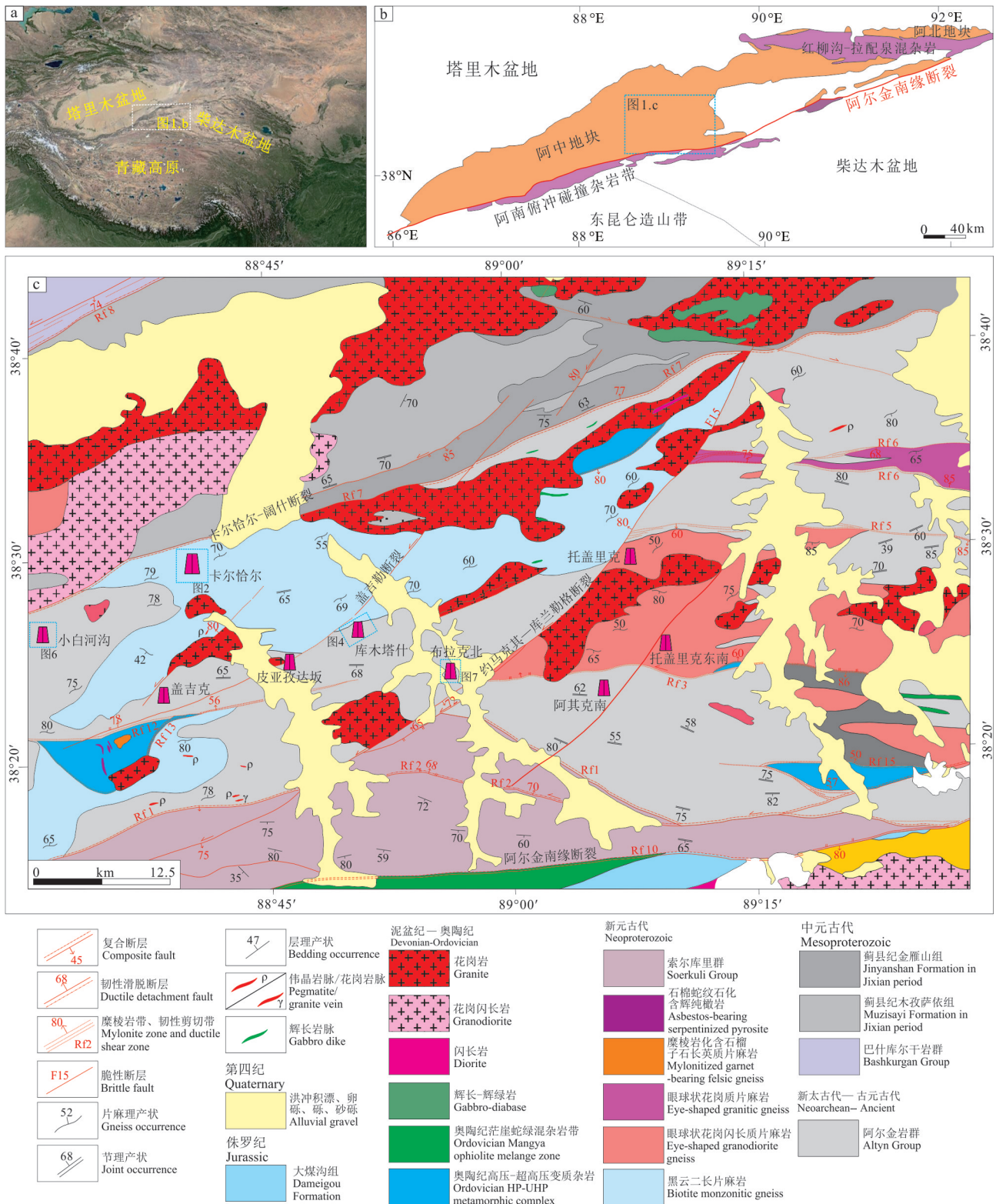


图1 阿尔金西段卡尔恰尔—库木塔什超大型萤石矿带地质矿产图

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

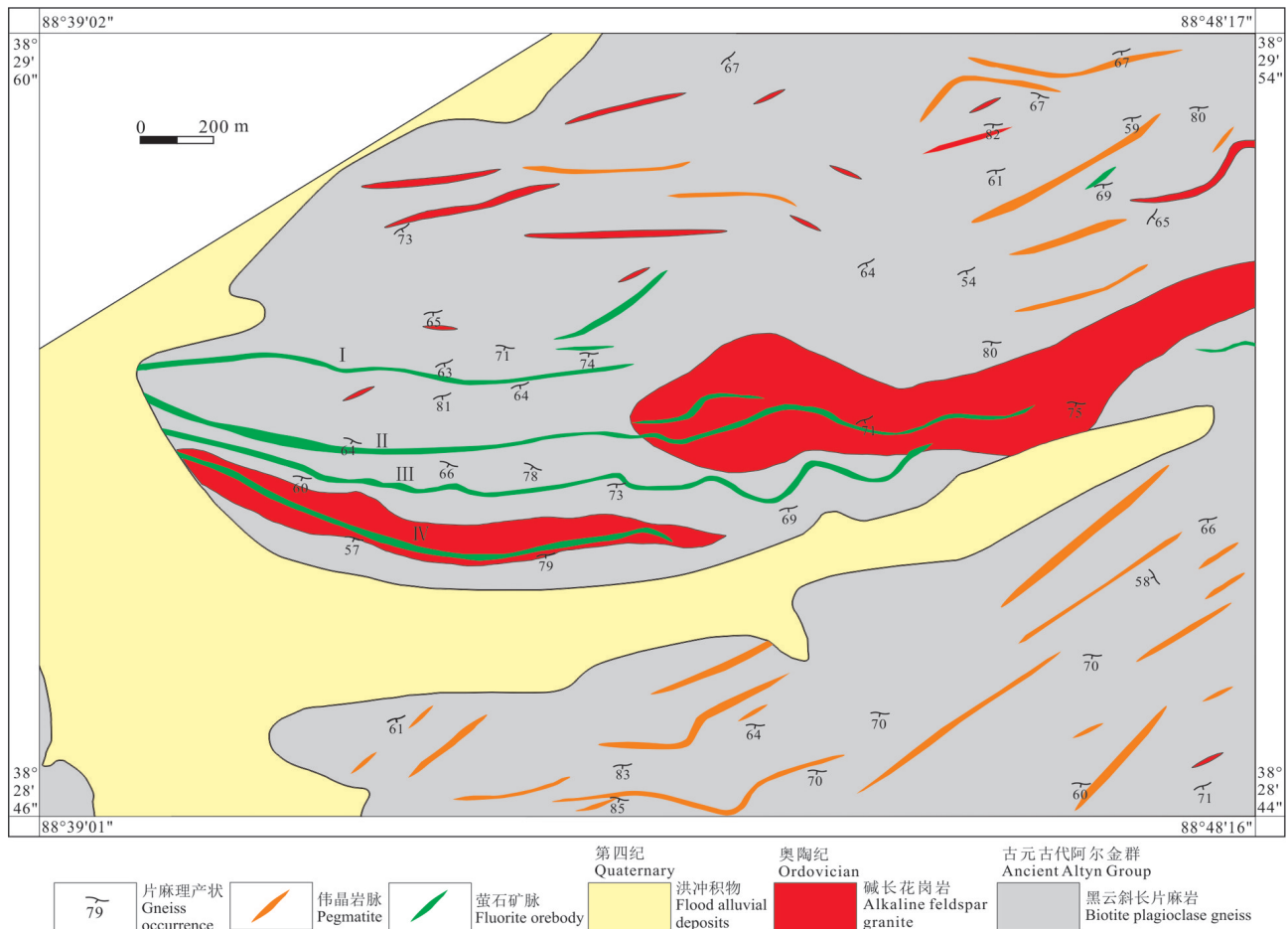


图2 卡尔恰尔萤石矿地质图

Fig.2 Geological map of the Kaerqiaer fluorite deposit

总体为北东东向,出露长约 10 km,东段表现为中阿尔金地块和南阿尔金地块的分界线,在研究区与布拉克北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,长大于几千千米,构成了阿中地块与阿南缘蛇绿混杂岩带的边界(校培喜,2003)。

区域经历了多期造山作用,伴随强烈、多期次的构造-岩浆活动。新元古代、早古生代、中生代中酸性侵入岩分布广泛,规模不等,呈北东向带状展布,岩石类型复杂(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,主要岩性有二长花岗岩、黑云母二长花岗岩、花岗闪长岩等;脉岩极为发育,以碱长花岗岩脉、花岗伟晶岩脉为主,多分布于区域构造两侧,呈北东—北东东走向(图 2)。碱长花岗岩脉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,与萤石(带云母)成矿关系十分密切(图 3a、b)。

3 典型矿床地质特征

卡尔恰尔萤石矿床于 2015 年发现,截至 2020 年底,经商业性勘查,已达超大型规模。2019 年起,中国地质调查局在该区部署了矿产地质调查工作,相继发现了库木塔什、小白河沟、布拉克北等萤石矿床(点),同时新疆地勘基金投入发现了皮亚孜达坂、盖吉克等萤石矿床。

3.1 卡尔恰尔萤石矿

该矿床位于若羌县东南部卡尔恰尔西南约 25 km 处。矿区出露地层主要为古元古界阿尔金岩群,主要岩性为黑云斜长片麻岩,岩层片麻理产状呈南倾,倾角多在 60°~70°。矿床位于卡尔恰尔—阔什断裂旁侧,其派生的次一级断裂系统对岩浆活动、

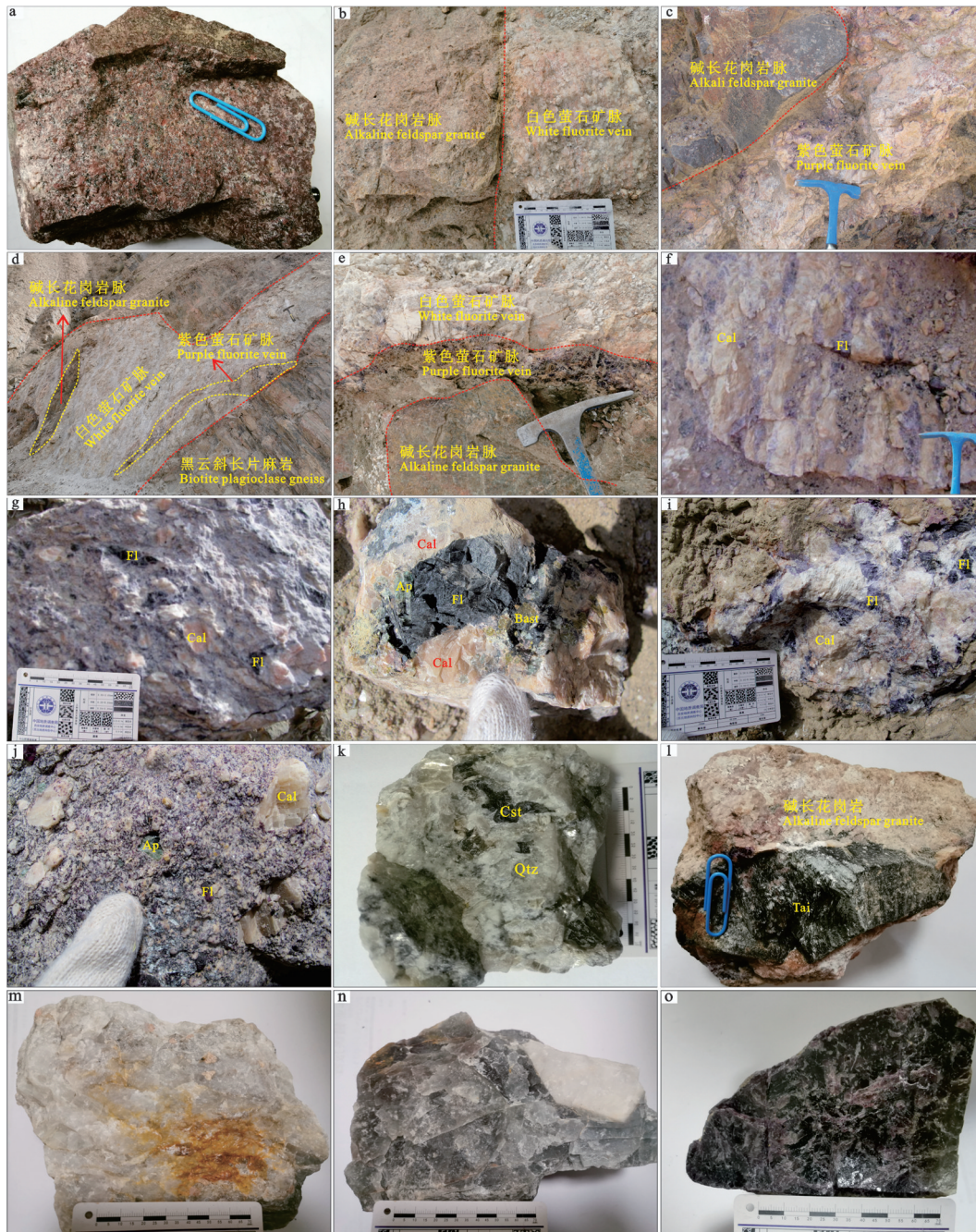


图3 卡尔恰尔—库木塔什一带萤石矿化特征

a—碱长花岗岩(库木塔什);b—萤石矿脉与碱长花岗岩脉关系密切(卡尔恰尔);c—萤石矿脉与碱长花岗岩脉关系密切(库木塔什);d、e—白色萤石矿脉形成早于紫色萤石矿脉(卡尔恰尔);f—脉状萤石矿化(库木塔什);g—角砾状萤石矿化(库木塔什);h—萤石、方解石、磷灰石、氟碳铈矿密切共生(库木塔什);i、j—萤石、方解石、磷灰石密切共生(库木塔什);k—云英岩型锡矿(库木塔什东北);l—伴生含锂带云母(库木塔什);m、n、o—块状萤石富矿(小白河沟);Cal—方解石;Fl—萤石;Ap—磷灰石;Cst—锡石;Qtz—石英;Tai—带云母;Bast—氟碳铈矿

Fig.3 Mineralization characteristics of the Kaerqiaer—Kumutashi fluorite mineralization belt

a—Alkali feldspar granite in Kumutashi; b—Fluorite vein closely related to alkali feldspar granite in Kaerqiaer; c—Fluorite vein closely related to alkali feldspar granite in Kumutashi; d, e—White fluorite veins formed earlier than purple fluorite veins in Kaerqiaer; f—Vein-shaped fluorite in Kumutashi; g—Brecciated fluorite in Kumutashi; h—Fluorite, calcite, apatite and bastnaesite close symbiosis in Kumutashi; i, j—Fluorite, calcite, and apatite close symbiosis in Kumutashi; k—Greisenization tin mineralisation in northeast Kumutashi; l—Tainiolite associated with alkali feldspar granite in Kumutashi; m, n, o—Massive fluorite ores in Xiaobaihegou; Cal—Calcite; Fl—Fluorite; Ap—Apatite; Cst—Cassiterite; Qtz—Quartz; Tai—Tainiolite; Bast—Bastnaesite

变质作用及相关矿体分布有明显的控制作用。成矿前断层以北东向断裂构造为主,其次为北东东向断裂;成矿期断层分布在矿区中部,是重要的控矿构造,总体呈近东西向展布,不规则帚状分布,西部发散,往东裂隙系统逐渐收敛,沿构造裂隙充填大量萤石-方解石脉。矿区发育碱长花岗岩脉和长英质伟晶岩脉(图2)。萤石矿化在空间上与碱长花岗岩关系十分密切(图3b),与围岩地层接触关系较截然(图3d)。

矿带目前近6000 m,沿走向出露较为稳定,圈定具工业价值的地表矿脉13条,多为复脉型矿脉,具有分支复合膨胀收缩特点,控制矿体最厚23.5 m、最深900余米,厚度和品位基本稳定。矿脉地表延伸稳定,倾向北东—北—北西,以缓倾斜矿脉为主,可划分4组矿带。I矿带为一复合矿脉,以北部断层为界,脉带长度2000多米,西段为缓倾矿脉,东段矿脉变陡,矿脉地表延伸稳定,膨胀收缩变化明显,并在主矿脉南侧大量出现分支矿脉,具有往西发散向东收敛分布特点。II矿带分布在矿区中北部,属单脉—复合矿脉,脉带长度2500多米,局部矿脉上部矿段呈孤立的剥蚀“残留体”,受地形影响矿脉东部往南延伸厚度变薄,并逐渐尖灭。III矿带分布在矿区中南部,属单脉—复合矿脉,脉带长度2500多米,具有往西发散向东收敛的分布特点。IV矿带分布在矿区南部断层北侧,脉带长度1300多米,地表延续性较好,由众多萤石-方解石细脉构成,钻探验证矿脉有收敛增厚趋势。

矿石中矿物成分简单,主要是方解石、萤石,少量石英,极少量黄铁矿、黄铜矿和方铅矿;萤石呈两期成矿,早期萤石呈白色、淡绿色,晚期萤石呈淡紫色、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3d、e);矿石具巨晶—粗晶结构、自形—半自形粒状结构、他形粒状结构、碎裂结构,矿石构造有脉状、条带状、角砾状及块状等。围岩蚀变较弱,主要为碳酸盐化。矿石工业类型主要是 CaF_2 - CaCO_3 型,少量 SiO_2 - CaF_2 - CaCO_3 型, CaF_2 平均品位33.9%,探明+控制+推断萤石矿石量6000余万t,矿物量(CaF_2)2200余万t,达超大型规模(据中国地质学会2020年度“十大地质找矿成果”公开资料)。

3.2 库木塔什萤石矿

库木塔什萤石矿区出露地层为古元古界阿尔

金岩群,分布面积约12 km²,为重要赋矿地层,主要为深灰色黑云斜长片麻岩,大理岩呈条带状出露于矿区南部,灰白色—灰绿色斜长变粒岩少量出露于矿区西南部(图4)。矿区断裂主要呈北北东向、北东向、近东西向,多为平移断层、平移正断层,并发育韧性—脆性剪切带,北东向、近东西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(图3c),脉岩和矿脉均受断裂控制明显,走向总体以北东东—近东西向为主,少量北东走向。

矿区共圈出14条萤石矿(化)体,多呈北东向,少量呈北北东走向,倾向北北西,倾角40°~70°,宽0.3~3.6 m,露头长50~980 m。选取具有代表性的矿体特征简述如下(图4): I号矿体赋存于萤石构造角砾岩带内,角砾以方解石为主,呈北东向延伸,地表断续出露长约540 m,宽0.5~4.0 m,厚3.36 m, CaF_2 平均品位23.4%。II号矿体赋存于萤石-方解石脉中,呈北东向延伸,地表断续出露长约790 m,宽0.4~3.0 m,厚2.14 m, CaF_2 平均品位26.8%;萤石-方解石脉赋存于碱长花岗岩脉、黑云斜长片麻岩中。III号矿体赋存于萤石-方解石脉中,呈北东向延伸,地表断续出露长约480 m,宽0.3~2.0 m,厚2.0 m, CaF_2 平均品位23.1%,地表出露较窄,深部逐渐增大。IV号矿体赋存于含萤石构造角砾岩带内,呈北东东向延伸,被近南北向断裂错动,断续出露长约680 m,宽0.5~2.0 m,厚2.52 m, CaF_2 平均品位25%。V号矿体赋存于萤石构造角砾岩带内,构造角砾岩带两侧见有碱长花岗岩脉发育,呈北东东向延伸,地表控制长约1.5 km,宽0.3~30 m, CaF_2 平均品位25.4%。

矿石自然类型有脉状(图3f)、条带状、角砾状(图3g),局部地段为块状矿石,碱长花岗岩脉中见有萤石细脉发育。矿石中矿物成分简单,主要是方解石、萤石、磷灰石,少量氟碳铈矿、石英(图3h、i、j)。萤石呈白色、淡绿色、淡紫色、紫色、紫黑色,其中白色萤石形成早于紫色萤石(图5);矿石具粗晶结构、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 CaF_2 - CaCO_3 型, CaF_2 平均品位为25%。围岩蚀变较弱,主要为碳酸盐化。在碱

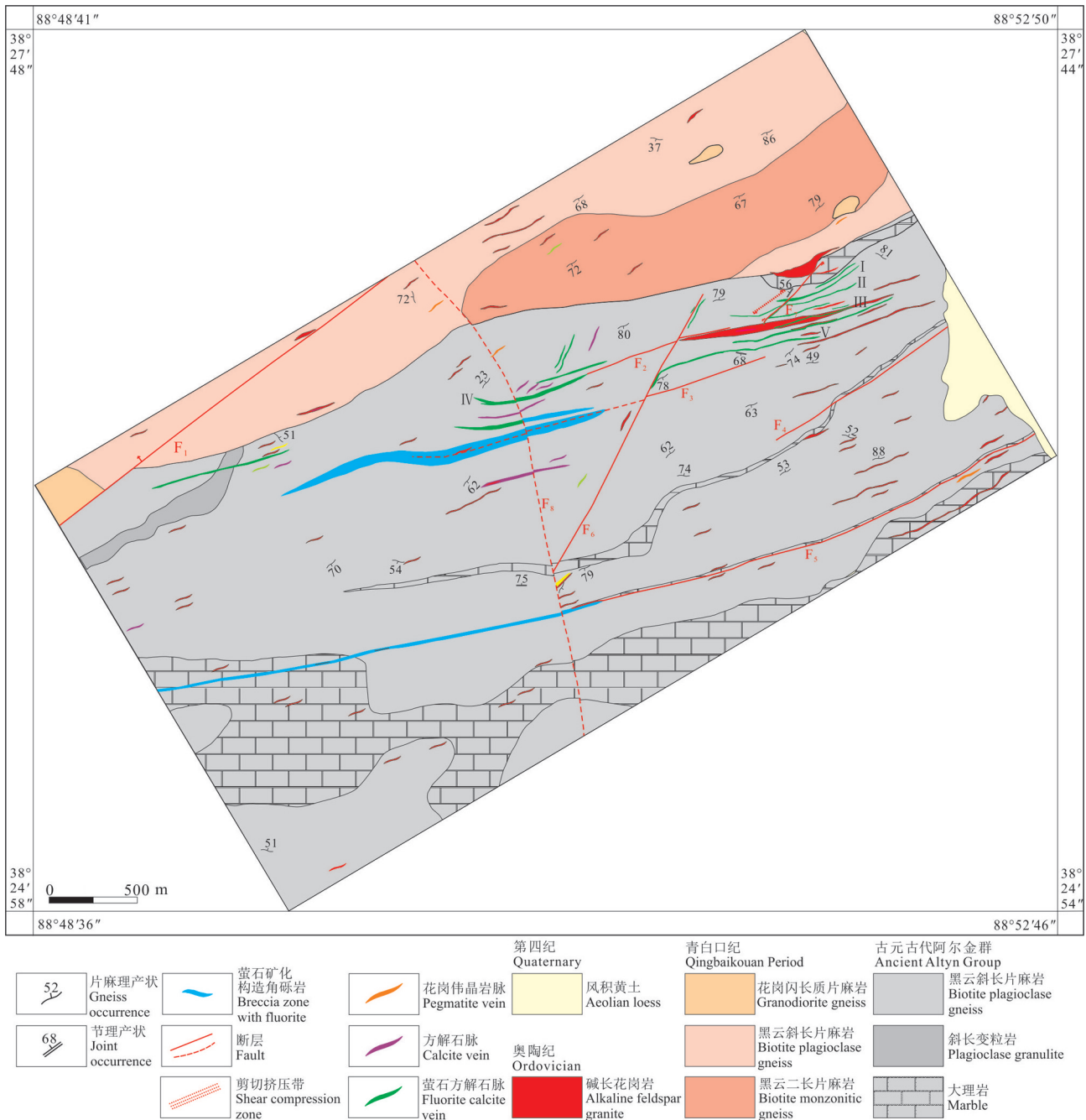


图4 库木塔什萤石矿区地质图
Fig.4 Geological map of the Kumutashi fluorite deposit

长花岗岩与地层接触带附近见有云英岩型锡矿化(图3k),锡矿石主要呈黑色半自形—他形晶赋存于含石榴石白云母花岗岩脉。在碱长花岗岩中还发育含锂带云母(图31),呈棕黑色鳞片状集合体赋存于岩体中,一般3~10 cm²,全分析结果显示Li元素含量达6300×10⁻⁶以上,原位LA-ICP-MS分析结果显示Li

元素含量达5200×10⁻⁶以上(待发表)。

3.3 小白河沟萤石矿

小白河沟萤石矿位于巴什瓦克石棉矿西北一带,区内出露地层为古元古界阿尔金岩群,主要为灰—灰黑色黑云斜长片麻岩,为主要赋矿地层(图6)。矿区出露的侵入岩为脉岩,主要为肉红色碱长

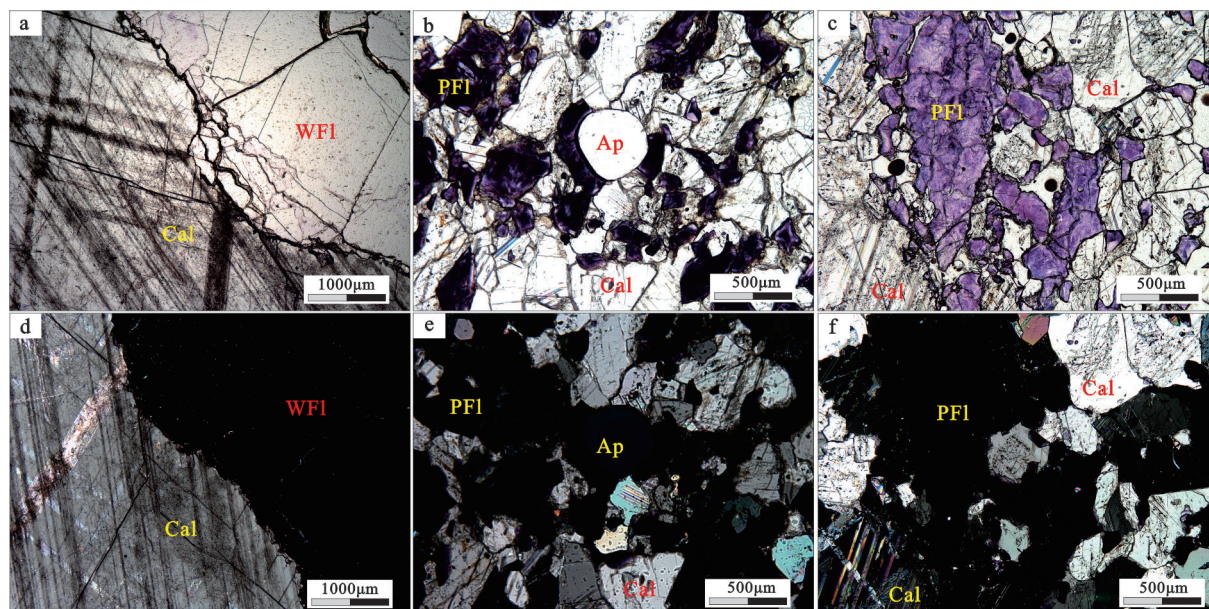


图5 库木塔什矿床萤石矿化特征(a-c—单偏光,d-f—正交偏光)

Cal—方解石;WFI—白色萤石;PFI—紫色萤石;Ap—磷灰石

Fig. 5 Microphotographs of mineralization characteristics in the Kumutashi fluorite deposit(a-c—Single polarized light, d-f—Orthogonal polarized light)

Cal—Calcite; WFI—White fluorite; PFI—Purple fluorite; Ap—Apatite

花岗岩脉、石英脉等。其中,碱长花岗岩脉与萤石—方解石矿脉关系密切。区内构造以近东西向为主,沿构造裂隙充填了各类脉岩。

矿区圈定了两条萤石矿化带(图6)。矿区南侧矿化带长约2.5 km,宽约0.4 km,走向北东东,共圈定出含萤石矿化碱长花岗岩脉7条,圈定萤石矿化脉3条。矿区北侧矿化带宽约0.4 km,长约1.7 km,走向近东西,圈定萤石方解石矿化脉1条,萤石矿体1条;萤石矿体走向近东西,倾向北,倾角在30°~40°,长约1.6 km,宽1~4 m,CaF₂品位在50%以上,带云母较发育。目前仍在进行调查评价工作,外围和深部仍具有较大找矿潜力。

矿石自然类型主要为块状矿石(图3 m、n、o)。矿石中矿物主要为萤石、带云母,局部发育方解石和少量石英;萤石呈白色、淡绿色、绿色、淡紫色、紫色、紫黑色。矿石具粗晶结构、自形一半自形粒状结构、他形粒状结构。矿石工业类型主要是CaF₂型、CaF₂-CaCO₃型和少量SiO₂-CaF₂型。围岩蚀变较弱,碱长花岗岩脉中见有萤石细脉发育。

3.4 布拉克北萤石矿点

该矿点位于若羌县东南部科热克布拉克北,出

露地层主要为古元古界阿尔金岩群和少量第四系全新统风积黄土、冲洪积砂。断裂较为发育,主要发育于阿尔金岩群中,主要呈北东向、北西向,为平移断层、平移正断层,发育韧性-脆性剪切带(图7)。侵入岩分布于矿区南部,主要为肉红色碱长花岗岩、灰白色二长花岗岩,侵入阿尔金岩群。脉岩较为发育,多呈北东向、北西向、近南北向,岩性主要为碱长花岗岩脉、花岗伟晶岩脉,断续出露于地表,多呈裂隙贯入为主,局部呈“X”形。脉体受后期构造影响,局部揉皱、变形明显。

布拉克北萤石矿共圈出1条萤石矿化构造角砾岩带和1条萤石-方解石脉,走向呈北东、北北东向。萤石构造角砾岩带呈近北东东向延伸,地表断续出露长约540 m,宽3~5 m;萤石方解石脉呈南北向延伸,地表断续出露长约230 m,宽0.2~0.5 m。矿石中矿物主要为方解石、萤石,少量石英;萤石呈白色、淡绿色、淡紫色、紫色、紫黑色。矿石具粗晶结构、自形一半自形粒状等结构,矿石构造主要有角砾状、条带状、局部地段为块状。矿石工业类型主要是CaF₂-CaCO₃型,少量SiO₂-CaF₂-CaCO₃型,CaF₂平均品位31.9%。围岩蚀变较弱,主要为碳酸盐化。

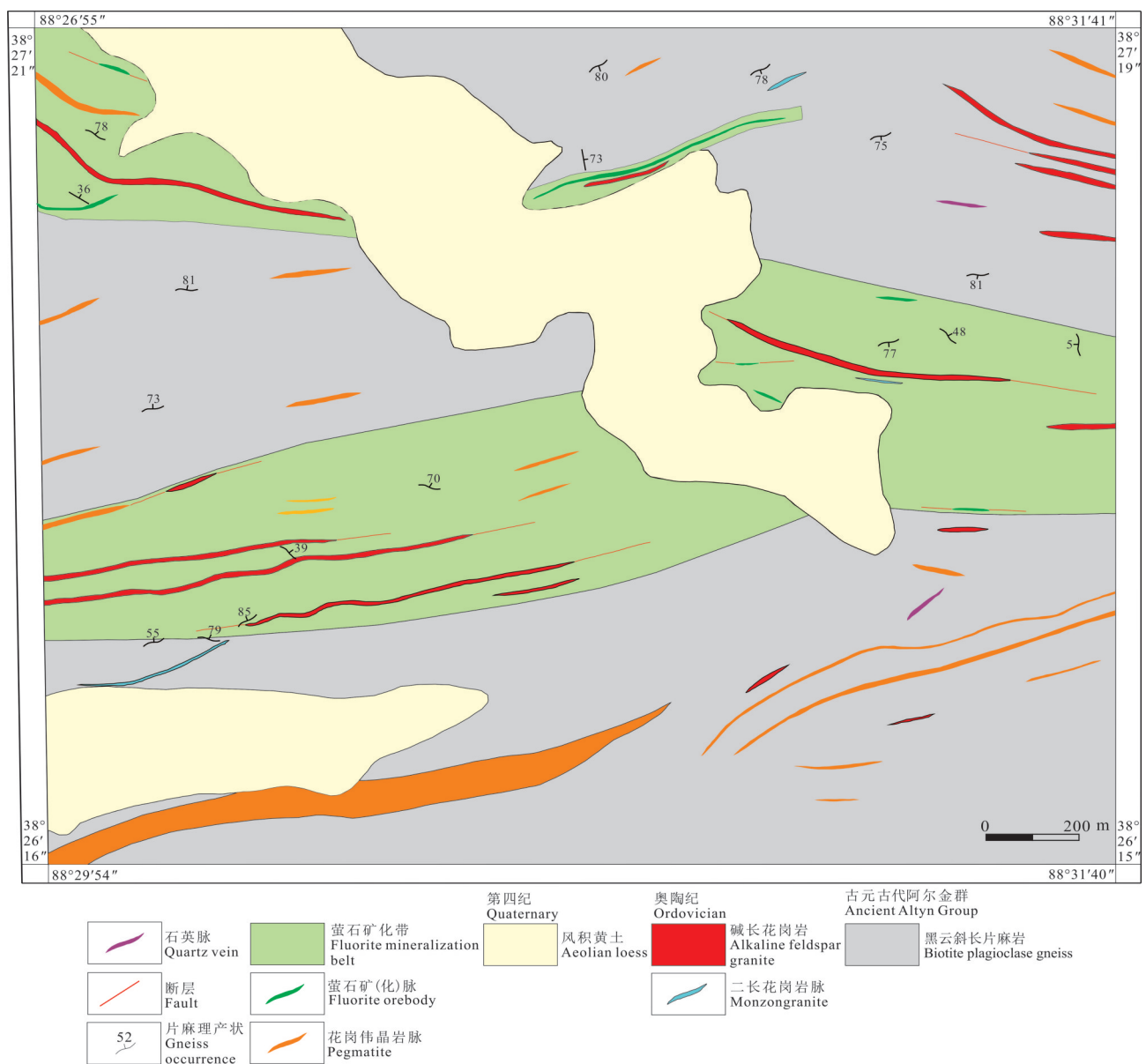


图6 小白河沟萤石矿地质图
Fig.6 Geological map of the Xiaobaihegou fluorite deposit

4 采样及测试方法

4.1 样品采集

本文选取库木塔什萤石矿区控矿碱长花岗岩样品用于锆石U-Pb、Hf同位素和岩石地球化学测试。碱长花岗岩具半自形柱状—他形粒状结构,块状构造,主要由碱性长石(30%~40%)、钠长石(25%~35%)、石英(约20%)、黑云母(约5%)等组成,副矿物为榍石(约5%)、金属矿物(约3%)(图8)。碱性长石种属为微斜长石、条纹长石两类,微斜长石发

育格子律双晶,条纹长石发育正条纹结构,多呈半自形柱状—他形粒状,粒径0.2~5.2 mm;钠长石多呈半自形板状,粒径0.2~3.2 mm,钠长石聚片双晶律常见,常出现净边结构,钠长石次生蚀变明显,普遍产生绢云母化;石英呈细小粒状,粒径一般小于1.5 mm;黑云母呈较自形片状,粒径0.2~1.6 mm;副矿物榍石含量较高,呈楔状、柱状、粒状,正高突起,高级白干涉色,粒径0.15~1.2 mm;金属矿物呈粒状,粒径0.1~0.4 mm。斜长石电子探针测试结果(表1)显示,斜长石牌号An<2,均属于接近Ab端元、组分非常纯

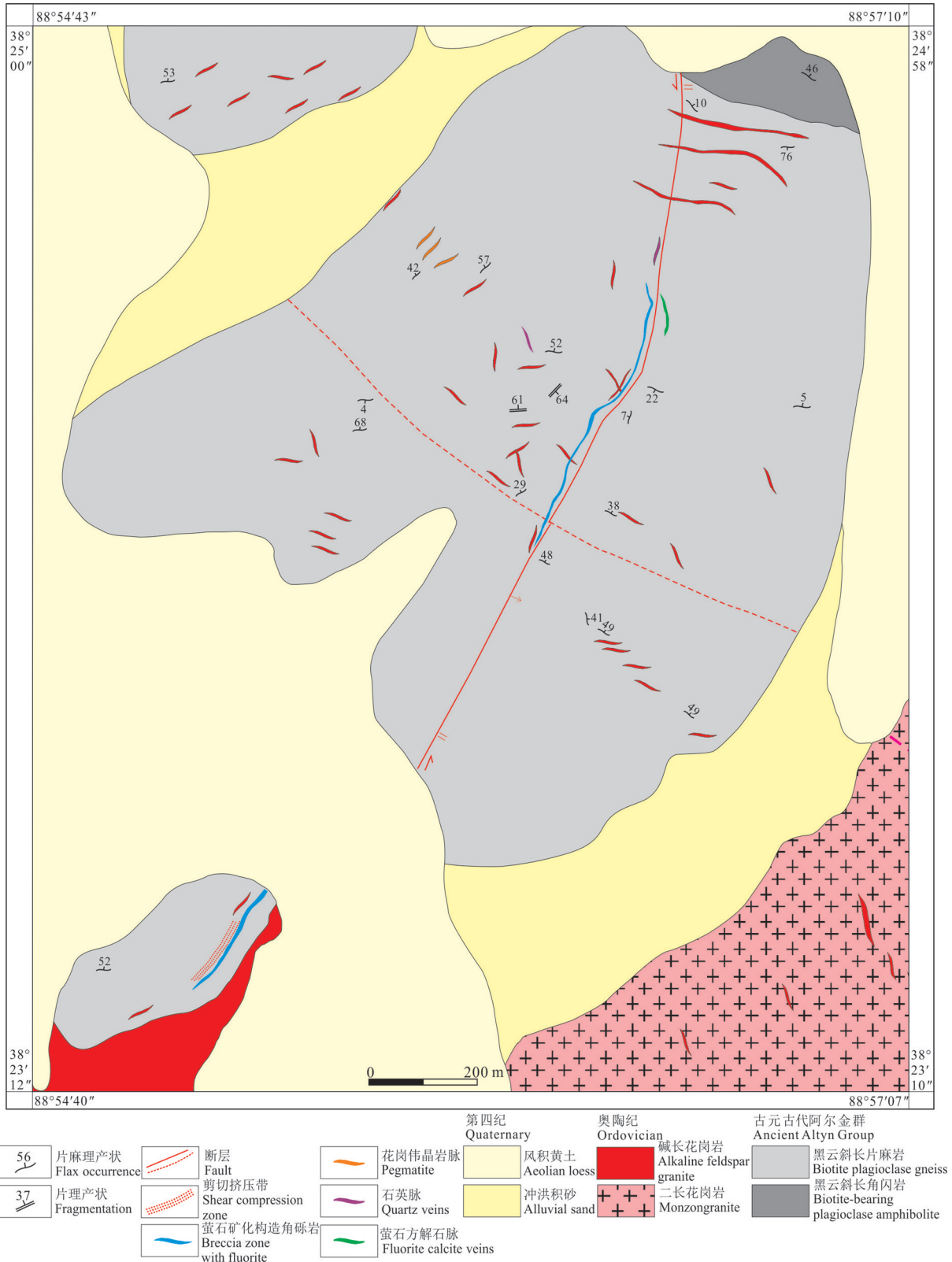


图7 布拉克北萤石矿点地质图
Fig.7 Geological map of the North Bulake fluorite deposit

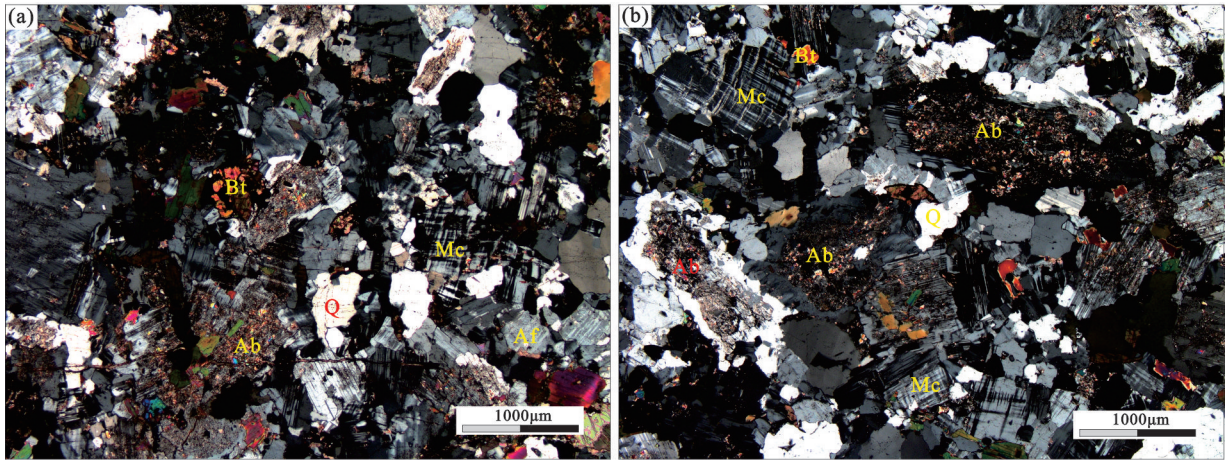


图8 库木塔什萤石矿区碱长花岗岩镜下显微图片

Af—碱性长石;Mc—微斜长石;Ab—钠长石;Bt—黑云母;Q—石英

Fig.8 Microscopic photos of the alkali feldspar granite in the Kumutashi fluorite deposit

Af—Alkaline feldspar; Mc—Microcline; Ab—Albite; Bt—Biotite; Q—Quartz

净的钠长石,其斜长石类矿物几乎全部由钠长石组成。岩体中主要造岩矿物长石均为碱性长石,其应属于碱长花岗岩(Le Maitre, 1989)。

4.2 测试方法

锆石U—Pb年代学测试样品较新鲜,经人工破碎后按照常规方法分选出锆石单矿物,在双目镜下

表1 库木塔什萤石矿区碱长花岗岩中斜长石电子探针成分分析结果

Table 1 Electron microprobe analyzed results of plagioclase of the alkali feldspar granite in the Kumutashi fluorite deposit

| 样号 | KY-1 | KY-2 | KY-3 | KY-4 | KY-5 | KY-6 | KY-7 | KY-8 | KY-9 | KY-10 | KY-11 | KY-12 | KY-13 | KY-14 | KY-15 | KY-16 |
|--------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| SiO ₂ | 70.5 | 68.1 | 68.8 | 68.4 | 68.9 | 69.1 | 68.9 | 68.7 | 68.7 | 67.4 | 68.4 | 68.0 | 68.3 | 68.2 | 70.1 | 68.0 |
| Al ₂ O ₃ | 19.5 | 19.3 | 19.5 | 19.3 | 19.2 | 19.0 | 19.1 | 19.2 | 19.4 | 19.2 | 19.5 | 19.3 | 19.9 | 19.6 | 19.7 | 19.3 |
| Na ₂ O | 11.6 | 11.4 | 12.0 | 11.5 | 11.7 | 11.8 | 10.9 | 11.5 | 11.8 | 11.3 | 11.8 | 11.5 | 10.3 | 11.4 | 11.8 | 11.5 |
| MgO | 0.01 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.04 | 0.00 | 0.02 | 0.02 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.02 | 0.04 | 0.00 | 0.01 |
| FeO | 0.14 | 0.15 | 0.06 | 0.22 | 0.11 | 0.16 | 0.23 | 0.12 | 0.08 | 0.07 | 0.05 | 0.08 | 0.05 | 0.06 | 0.09 | 0.08 |
| MnO | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| TiO ₂ | 0.18 | 0.00 | 0.09 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.05 | 0.00 | 0.05 | 0.11 | 0.00 | 0.00 |
| CaO | 0.10 | 0.15 | 0.06 | 0.08 | 0.07 | 0.05 | 0.13 | 0.25 | 0.11 | 0.23 | 0.06 | 0.20 | 0.11 | 0.04 | 0.10 | 0.20 |
| K ₂ O | 0.05 | 0.09 | 0.07 | 0.12 | 0.11 | 0.17 | 0.12 | 0.14 | 0.08 | 0.12 | 0.07 | 0.08 | 0.10 | 0.07 | 0.06 | 0.08 |
| P ₂ O ₅ | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.00 | 0.04 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 |
| Total | 102 | 99.1 | 100 | 99.6 | 100 | 100 | 99.4 | 99.9 | 100 | 98.3 | 99.9 | 99.1 | 98.8 | 99.5 | 101 | 99.1 |
| Si | 3.02 | 3.00 | 3.00 | 3.00 | 3.01 | 3.01 | 3.02 | 3.00 | 3.00 | 3.00 | 2.99 | 3.00 | 3.00 | 2.99 | 3.00 | 3.00 |
| Al | 0.98 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.99 | 0.98 | 0.99 | 0.99 | 1.00 | 1.00 | 1.01 | 1.00 | 1.03 | 1.01 | 1.00 | 1.00 |
| Ca | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.01 |
| Na | 0.96 | 0.97 | 1.01 | 0.98 | 0.99 | 1.00 | 0.93 | 0.97 | 0.99 | 0.98 | 1.00 | 0.98 | 0.88 | 0.97 | 0.98 | 0.98 |
| K | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| An | 0.47 | 0.72 | 0.26 | 0.36 | 0.34 | 0.24 | 0.63 | 1.16 | 0.52 | 1.11 | 0.29 | 0.93 | 0.60 | 0.17 | 0.47 | 0.93 |
| Ab | 99.3 | 98.8 | 99.4 | 99.0 | 99.1 | 98.8 | 98.7 | 98.1 | 99.0 | 98.2 | 99.3 | 98.6 | 98.8 | 99.5 | 99.2 | 98.6 |
| Or | 0.28 | 0.51 | 0.38 | 0.65 | 0.60 | 0.95 | 0.70 | 0.78 | 0.44 | 0.66 | 0.40 | 0.43 | 0.60 | 0.37 | 0.34 | 0.43 |

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(CL)照相,结合图像选择适宜的测试点位及进行合理的数据解释。

锆石U-Pb同位素定年在自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室完成。激光剥蚀系统为GeoLas Pro, ICP-MS为Agilent 7700x,详细仪器参数和测试过程可参考李艳广等(2015),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U-Th-Pb同位素比值和年龄计算)采用软件Glitter 4.4 (Van Achterbergh et al., 2001)完成,采用锆石标准91500作外标进行同位素分馏校正。对于与分析时间有关的U-Th-Pb同位素比值漂移,利用91500的变化采用线性内插的方式进行了校正。锆石样品的U-Pb年龄谐和图绘制和年龄权重平均计算均采用Isoplot/Ex_ver 3 (Ludwig, 2003)完成。

锆石原位微区Hf同位素测试在自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室利用Neptune型多接收等离子体质谱仪和Geolas Pro型激光剥蚀系统联用的方法完成,详细测试流程可参照侯可军等(2007)。测试束斑直径为32 μm ,所有测试位置与U-Pb定年点位相同或靠近。每分析10个样品测点分析一次锆石标准GJ-1作为监控,本次实验GJ-1的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值介于0.281990~0.282070。

岩石地球化学样品采集新鲜的控矿碱长花岗岩,室内将其细碎至200目,在自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室进行主、微量元素分析。主量元素的测定采用X-荧光光谱(型号:Axios 4.0kW)法完成,分析准确度和精度优于2%~5%;微量元素的测定采用等离子体质谱法(X-series)完成,相对标准偏差小于5%。

5 锆石U-Pb年龄、Hf同位素、地球化学特征

5.1 锆石U-Pb年龄

控矿碱长花岗岩锆石U-Pb同位素分析结果见表2。碱长花岗岩样品中锆石以自形粒状为主,颗粒较大,粒径多为60~150 μm 。阴极发光图像(图9)揭示大部分锆石具有清晰的岩浆韵律环带;锆石的U含量为 180×10^{-6} ~ 1350×10^{-6} , Th含量为 138×10^{-6} ~

878×10^{-6} , Th/U比值介于0.33~1.76,平均0.65,显示岩浆锆石特点(Hoskin and Black, 2000)。24个分析点投影于谐和线上或谐和线附近,具有非常一致的年龄,变化于 (445.5 ± 5.3) ~ (457.4 ± 5.9) Ma, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 (450.0 ± 2.7) Ma (MSWD=0.4) (图10),代表了岩浆结晶年龄,表明其形成于晚奥陶世。

5.2 锆石Hf同位素

Hf同位素分析结果显示,大部分锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值小于0.0025(表3),表明锆石在形成后具有较低的放射性成因Hf积累,因而可以用初始 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值代表锆石形成时的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值。考虑到碱长花岗岩中锆石的 f_{LuHf} 值介于-0.99~-0.93,明显小于镁铁质地壳的 f_{LuHf} 值(-0.34, Amelin et al., 2000)和硅铝质地壳的 f_{LuHf} 值(-0.72, Vervoort et al., 1996),故二阶段模式年龄更能反映其源区物质从亏损地幔被抽取的时间(或其源区物质在地壳的平均存留年龄)。碱长花岗岩中锆石初始 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值介于0.282343~0.282695, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为-5.33~6.45,二阶段模式年龄(T_{DM2})为1020~1767 Ma。

5.3 岩石地球化学特征

5.3.1 主量元素

控矿碱长花岗岩的主微量元素分析结果见表4,具有以下特征:(1)岩石的 SiO_2 含量分布较为集中(64.3%~65.2%),略低于Whalen et al. (1987)总结的世界典型A型花岗岩 SiO_2 含量的平均值(73.8%);(2)富碱且相对富钾, $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ 含量介于10.3%~10.7%, K_2O 含量为5.87%~6.42%, Na_2O 含量为4.28%~4.47%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值介于1.31~1.50,高于世界(1.18)及中国(1.06)花岗岩平均值,在 SiO_2 - K_2O 图解上(图11a)落在钾玄岩区域;(3)富铝, Al_2O_3 含量为15.1%~15.3%,较高于Lachlan褶皱带 Al_2O_3 含量(11.8%~13.8%) (King et al., 1997),铝饱和指数A/CNK为0.85~0.88,在A/CNK-A/NK图解上(图11b)落在准铝质区域;(4)富铁, FeO^{T} 含量为2.95%~3.45%,与高分异I型花岗岩较低的 FeO^{T} 含量(<1%)相区别(王强等,2000);(5)分异指数较高,DI=87.4~89.5,反映岩体经历了较高分异演化;(6)岩体最显著的特点是F含量0.24%~0.28%,属高氟岩体($w(\text{F})>0.1\%$)。

5.3.2 微量元素

碱长花岗岩的 ΣREE 非常高(643×10^{-6} ~ $774\times$

表2 库木塔什矿区碱长花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 分析结果

Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic data of the alkali feldspar granite in the Kumutashi fluorite deposit

| 测试点 | Pb | 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 | |
|--------|-----|-----|------|------|--------------------------------------|--------|-------------------------------------|--------|-------------------------------------|--------|--------------------------------------|------|-------------------------------------|------|-------------------------------------|-----|
| | | | | | 比值 | 1σ | 比值 | 1σ | 比值 | 1σ | Ma | 1σ | Ma | 1σ | Ma | 1σ |
| KM1-1 | 109 | 357 | 865 | 0.41 | 0.0551 | 0.0016 | 0.5572 | 0.0156 | 0.0733 | 0.0009 | 417.5 | 61.0 | 449.7 | 10.2 | 456.0 | 5.4 |
| KM1-2 | 55 | 181 | 258 | 0.70 | 0.0559 | 0.0020 | 0.5666 | 0.0202 | 0.0735 | 0.0010 | 447.5 | 78.2 | 455.8 | 13.1 | 457.4 | 5.9 |
| KM1-3 | 90 | 294 | 606 | 0.49 | 0.0547 | 0.0015 | 0.5512 | 0.0154 | 0.0731 | 0.0009 | 400.1 | 60.7 | 445.8 | 10.1 | 454.7 | 5.4 |
| KM1-4 | 85 | 281 | 751 | 0.37 | 0.0568 | 0.0017 | 0.5664 | 0.0164 | 0.0723 | 0.0009 | 483.8 | 63.9 | 455.7 | 10.6 | 450.6 | 5.4 |
| KM1-5 | 200 | 660 | 375 | 1.76 | 0.0549 | 0.0015 | 0.5487 | 0.0152 | 0.0725 | 0.0009 | 408.4 | 60.3 | 444.2 | 9.9 | 451.1 | 5.4 |
| KM1-6 | 63 | 206 | 338 | 0.61 | 0.0779 | 0.0024 | 0.5870 | 0.0538 | 0.0733 | 0.0010 | 444.4 | 59.8 | 589.5 | 13.5 | 455.9 | 5.8 |
| KM1-7 | 203 | 664 | 506 | 1.31 | 0.0559 | 0.0012 | 0.5528 | 0.0123 | 0.0717 | 0.0008 | 449.7 | 48.4 | 446.8 | 8.1 | 446.2 | 5.1 |
| KM1-8 | 143 | 471 | 948 | 0.50 | 0.0546 | 0.0013 | 0.5429 | 0.0133 | 0.0722 | 0.0009 | 395.2 | 53.7 | 440.4 | 8.8 | 449.1 | 5.2 |
| KM1-9 | 86 | 283 | 478 | 0.59 | 0.0596 | 0.0017 | 0.5923 | 0.0170 | 0.0721 | 0.0009 | 587.5 | 61.6 | 472.3 | 10.8 | 450.2 | 5.4 |
| KM1-11 | 171 | 563 | 1217 | 0.46 | 0.0595 | 0.0016 | 0.5841 | 0.0159 | 0.0713 | 0.0009 | 584.3 | 58.6 | 467.1 | 10.2 | 445.7 | 5.3 |
| KM1-12 | 116 | 379 | 669 | 0.57 | 0.0699 | 0.0019 | 0.5983 | 0.0187 | 0.0725 | 0.0009 | 924.8 | 54.7 | 537.7 | 11.2 | 451.1 | 5.5 |
| KM1-13 | 89 | 289 | 766 | 0.38 | 0.0700 | 0.0021 | 0.5918 | 0.0202 | 0.0717 | 0.0009 | 927.2 | 59.5 | 533.9 | 12.1 | 446.5 | 5.6 |
| KM1-14 | 254 | 878 | 600 | 1.46 | 0.0556 | 0.0015 | 0.5482 | 0.0150 | 0.0716 | 0.0009 | 435.1 | 59.7 | 443.8 | 9.8 | 445.5 | 5.3 |
| KM1-15 | 120 | 412 | 739 | 0.56 | 0.0549 | 0.0018 | 0.5399 | 0.0179 | 0.0714 | 0.0009 | 406.7 | 72.7 | 438.4 | 11.8 | 446.0 | 5.6 |
| KM1-16 | 107 | 366 | 573 | 0.64 | 0.0543 | 0.0019 | 0.5414 | 0.0191 | 0.0723 | 0.0010 | 384.3 | 77.6 | 439.3 | 12.6 | 450.8 | 5.8 |
| KM1-17 | 109 | 357 | 736 | 0.49 | 0.0567 | 0.0022 | 0.5566 | 0.0217 | 0.0712 | 0.0010 | 480.2 | 85.8 | 449.3 | 14.1 | 445.2 | 6.0 |
| KM1-19 | 73 | 236 | 373 | 0.63 | 0.0568 | 0.0020 | 0.5626 | 0.0193 | 0.0719 | 0.0010 | 481.5 | 75.5 | 453.2 | 12.5 | 447.6 | 5.7 |
| KM1-20 | 41 | 138 | 180 | 0.77 | 0.0553 | 0.0026 | 0.5507 | 0.0254 | 0.0722 | 0.0011 | 424.2 | 71.1 | 445.5 | 16.6 | 449.6 | 6.5 |
| KM1-21 | 117 | 383 | 548 | 0.70 | 0.0549 | 0.0016 | 0.5482 | 0.0156 | 0.0725 | 0.0009 | 406.0 | 62.0 | 443.8 | 10.2 | 451.2 | 5.4 |
| KM1-22 | 185 | 604 | 1217 | 0.50 | 0.0557 | 0.0013 | 0.5592 | 0.0127 | 0.0728 | 0.0009 | 439.7 | 49.4 | 451.0 | 8.3 | 453.2 | 5.1 |
| KM1-24 | 122 | 399 | 1196 | 0.33 | 0.0595 | 0.0017 | 0.5880 | 0.0163 | 0.0717 | 0.0009 | 484.7 | 59.5 | 469.6 | 10.4 | 448.4 | 5.3 |
| KM1-25 | 199 | 695 | 1350 | 0.51 | 0.0554 | 0.0014 | 0.5480 | 0.0135 | 0.0718 | 0.0009 | 427.1 | 53.7 | 443.7 | 8.8 | 446.9 | 5.1 |
| KM1-27 | 62 | 202 | 449 | 0.45 | 0.0551 | 0.0018 | 0.5453 | 0.0180 | 0.0718 | 0.0009 | 417.3 | 72.2 | 441.9 | 11.8 | 446.7 | 5.6 |
| KM1-30 | 94 | 303 | 664 | 0.46 | 0.0563 | 0.0015 | 0.5702 | 0.0152 | 0.0734 | 0.0009 | 464.6 | 58.9 | 458.1 | 9.8 | 456.8 | 5.4 |

10⁻⁶), 高于中国 A 型花岗岩的平均值(219×10⁻⁶), 远高于中国 I 型(115×10⁻⁶)和 S 型(173×10⁻⁶)花岗岩的

平均值(吴锁平等, 2007), 轻重稀土分异明显, 轻稀土富集, 重稀土相对亏损(LREE/HREE 为 19.0~

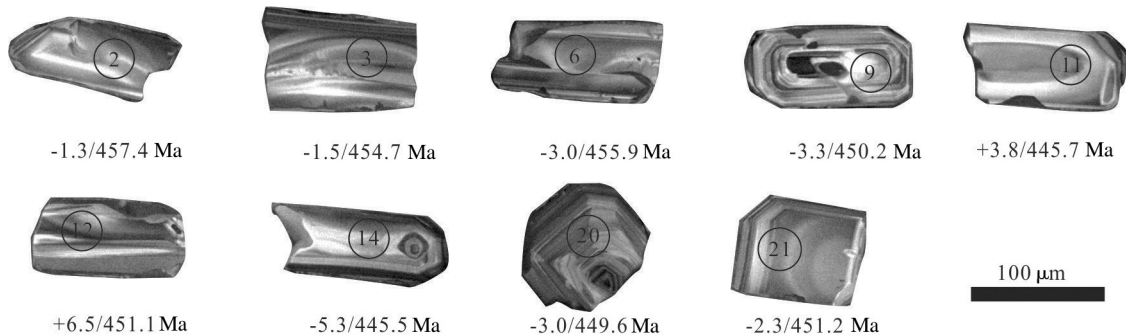


图9 库木塔什萤石矿区碱长花岗岩的锆石 CL 图像(图中数字表示: ε_{Hf}(t)值/年龄)

Fig.9 Zircon CL images of the alkali feldspar granite in the Kumutashi fluorite deposit (the numbers in the figure indicate the ε_{Hf}(t) value/age)

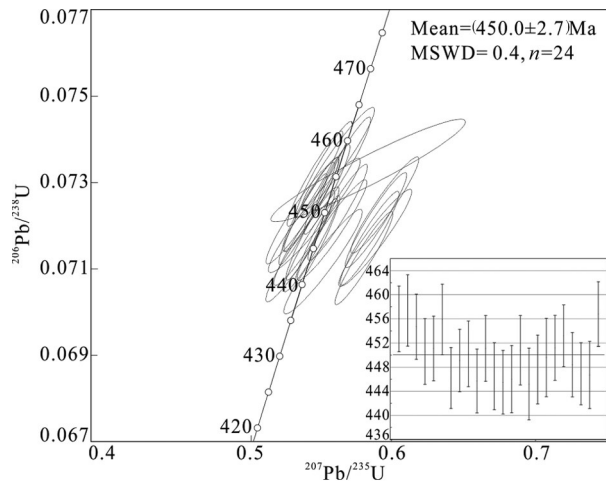


图10 库木塔什萤石矿碱长花岗岩的锆石U-Pb谐和图
Fig.10 Zircon U-Pb concordia diagram of the alkali feldspar granite in the Kumutashi fluorite deposit

23.6, $(La/Yb)_N=26.1\sim 37.5$), 具有较明显的Eu负异常 ($\delta Eu=0.51\sim 0.71$), 在稀土元素球粒陨石标准化配分

图上呈明显右倾型(图12a)。在原始地幔标准化微量元素蛛网图上(图12b), 岩石相对于原始地幔明显富集Rb、Th、U、La、Ce、Nd、Zr、Hf等, 强烈亏损Ta、Nb、Sr、P、Ti等。

6 讨论

6.1 成岩成矿时代

对库木塔什矿区碱长花岗岩LA-ICP-MS锆石U-Pb定年获得成岩年龄为 (450.0 ± 2.7) Ma, 野外调查发现萤石成矿与碱长花岗岩脉具有明显的成生关系, 萤石矿脉在空间上均发育于碱长花岗岩脉内裂隙或附近破碎带。研究表明, 一般岩浆热液型萤石矿的成矿年龄稍晚于成矿岩体形成时代(方贵聪, 2020), 暗示库木塔什萤石矿可能形成略晚于晚奥陶世碱长花岗岩。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,

表3 库木塔什萤石矿区碱长花岗岩锆石Hf同位素分析结果

Table 3 Zircon Hf isotope data of the alkali feldspar granite in the Kumutashi fluorite deposit

| 测点号 | $^{176}Yb/^{177}Hf$ | $^{176}Lu/^{177}Hf$ | $^{176}Hf/^{177}Hf$ | 2σ | $(^{176}Hf/^{177}Hf)_i$ | $\epsilon_{Hf}(t)$ | T_{DM1}/Ma | T_{DM2}/Ma | f_{LwHf} |
|--------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------|-------------------------|--------------------|--------------|--------------|------------|
| KM1-1 | 0.106203 | 0.002180 | 0.282623 | 0.000044 | 0.28260 | 3.98 | 920 | 1177 | -0.93 |
| KM1-2 | 0.044915 | 0.000963 | 0.282464 | 0.000034 | 0.28246 | -1.27 | 1113 | 1510 | -0.97 |
| KM1-3 | 0.067684 | 0.001450 | 0.282462 | 0.000035 | 0.28245 | -1.48 | 1130 | 1523 | -0.96 |
| KM1-4 | 0.110703 | 0.002316 | 0.282688 | 0.000045 | 0.28267 | 6.25 | 828 | 1033 | -0.93 |
| KM1-5 | 0.051371 | 0.001128 | 0.282483 | 0.000035 | 0.28247 | -0.63 | 1090 | 1470 | -0.97 |
| KM1-6 | 0.035146 | 0.000771 | 0.282413 | 0.000031 | 0.28241 | -3.02 | 1178 | 1621 | -0.98 |
| KM1-7 | 0.069432 | 0.001531 | 0.282618 | 0.000055 | 0.28261 | 4.02 | 910 | 1174 | -0.95 |
| KM1-8 | 0.101914 | 0.002143 | 0.282613 | 0.000039 | 0.28259 | 3.63 | 934 | 1199 | -0.94 |
| KM1-9 | 0.043868 | 0.000948 | 0.282407 | 0.000030 | 0.28240 | -3.29 | 1192 | 1638 | -0.97 |
| KM1-11 | 0.103486 | 0.002188 | 0.282616 | 0.000047 | 0.28260 | 3.75 | 929 | 1192 | -0.93 |
| KM1-12 | 0.119041 | 0.002466 | 0.282695 | 0.000042 | 0.28267 | 6.45 | 821 | 1020 | -0.93 |
| KM1-13 | 0.105863 | 0.002250 | 0.282632 | 0.000046 | 0.28261 | 4.27 | 908 | 1158 | -0.93 |
| KM1-14 | 0.006575 | 0.000225 | 0.282343 | 0.000029 | 0.28234 | -5.33 | 1257 | 1767 | -0.99 |
| KM1-15 | 0.087548 | 0.001861 | 0.282520 | 0.000044 | 0.28250 | 0.45 | 1059 | 1401 | -0.94 |
| KM1-16 | 0.046099 | 0.001040 | 0.282415 | 0.000037 | 0.28241 | -3.02 | 1183 | 1621 | -0.97 |
| KM1-17 | 0.107286 | 0.002276 | 0.282493 | 0.000039 | 0.28247 | -0.63 | 1110 | 1470 | -0.93 |
| KM1-19 | 0.067853 | 0.001436 | 0.282402 | 0.000035 | 0.28239 | -3.61 | 1215 | 1658 | -0.96 |
| KM1-20 | 0.041671 | 0.000937 | 0.282416 | 0.000036 | 0.28241 | -2.96 | 1179 | 1617 | -0.97 |
| KM1-21 | 0.045470 | 0.001063 | 0.282437 | 0.000042 | 0.28243 | -2.27 | 1154 | 1573 | -0.97 |
| KM1-22 | 0.104211 | 0.002242 | 0.282614 | 0.000043 | 0.28259 | 3.64 | 934 | 1198 | -0.93 |
| KM1-24 | 0.104890 | 0.002239 | 0.282690 | 0.000043 | 0.28267 | 6.33 | 824 | 1028 | -0.93 |
| KM1-25 | 0.107540 | 0.002292 | 0.282604 | 0.000041 | 0.28258 | 3.28 | 950 | 1221 | -0.93 |
| KM1-27 | 0.074851 | 0.001648 | 0.282486 | 0.000038 | 0.28247 | -0.71 | 1102 | 1475 | -0.95 |
| KM1-30 | 0.084095 | 0.001845 | 0.282592 | 0.000040 | 0.28258 | 2.98 | 956 | 1240 | -0.94 |

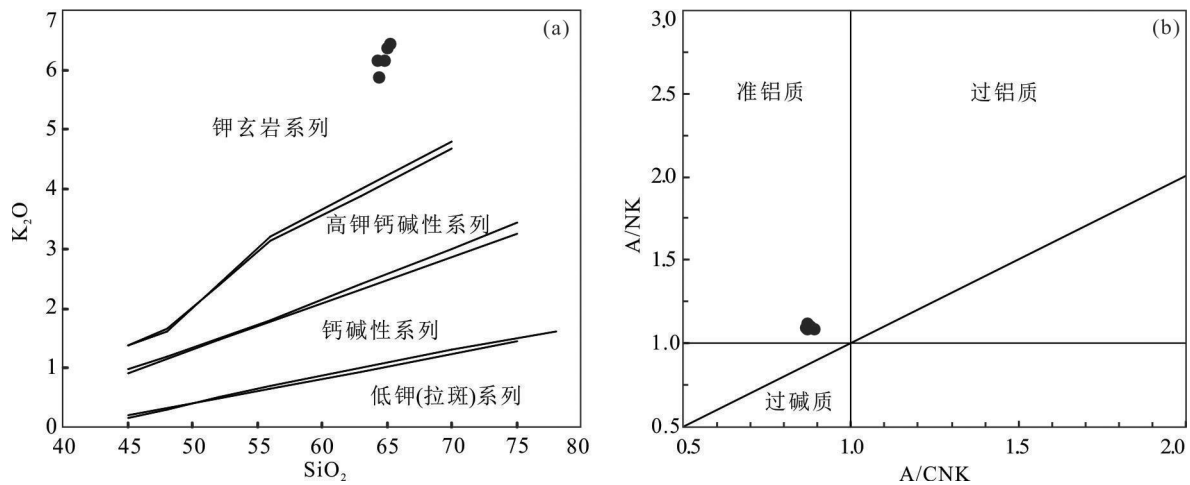


图11 库木塔什萤石矿区碱长花岗岩的SiO₂-K₂O(a)和A/CNK-A/NK(b)图解(据Rickwood, 1989)
Fig.11 SiO₂-K₂O(a) and A/CNK-A/NK (b) diagrams of the alkali feldspar granite in the Kumutashi fluorite deposit (after Rickwood, 1989)

2010;杨文强等,2012;董洪凯等,2014;康磊等,2016;张若愚等,2016;王立社等,2016)。同时,区域上卡尔恰尔—阔什断裂以西发育大规模伟晶岩脉群,已发现吐格曼—拜什、塔什达坂等多处伟晶岩型锂铍矿,吐格曼含矿花岗伟晶岩锆石U-Pb年龄为(460±4) Ma(徐兴旺等,2019),与成矿有关的黑云母二长花岗岩成岩年龄形成于475~482 Ma,含矿伟晶岩中铌钽铁矿U-Pb年龄为(472±6) Ma(Gao et al., 2021),表明阿尔金西段存在与早古生代岩浆活动密切相关的锂铍、萤石成矿作用,萤石成矿略晚于锂铍等稀有金属成矿。

中国萤石矿床成矿时代主要集中于燕山期,其次是华力西期。据统计,探明的萤石矿资源中,形成于燕山期的占91%,如南岭、内蒙古、浙江等萤石矿聚集区(李长江等,1992;曹华文等,2013;邹灏等,2014;刘道荣,2017;方贵聪等,2020;朱江等,2020;夏冬等,2021);形成于华力西期的占7%左右(王吉平等,2015)。阿尔金西段卡尔恰尔—库木塔什超大型萤石矿带的发现,表明早古生代可能是中国西部萤石矿的重要成矿期。

6.2 控矿碱长花岗岩成因

库木塔什矿区碱长花岗岩的Zr+Nb+Ce+Y含量

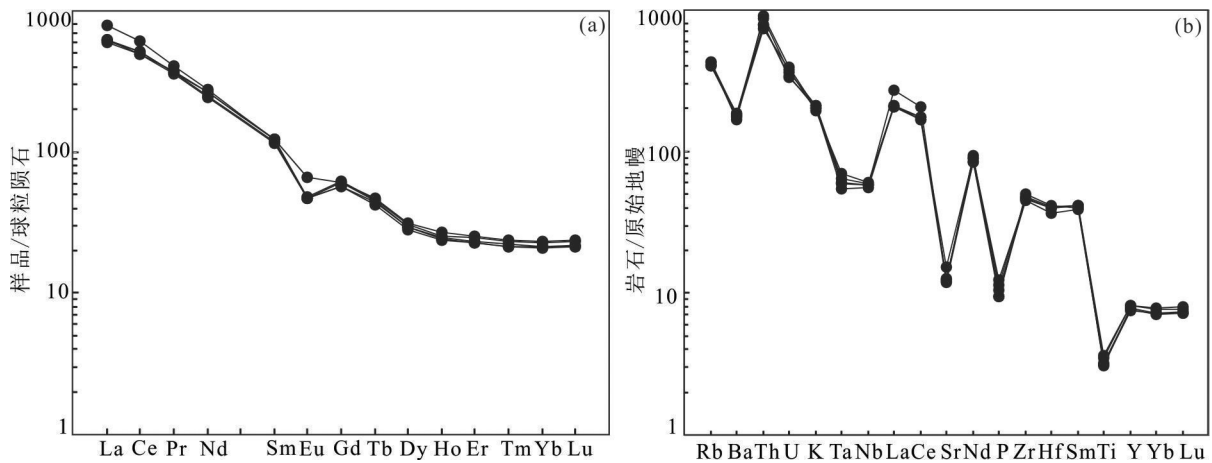


图12 库木塔什矿区碱长花岗岩稀土元素配分(a)和微量元素蛛网(b)图解(据Sun and McDonough, 1989)
Fig.12 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized multi-element diagrams (b) of the alkali feldspar granite in the Kumutashi fluorite deposit (after Sun and McDonough, 1989)

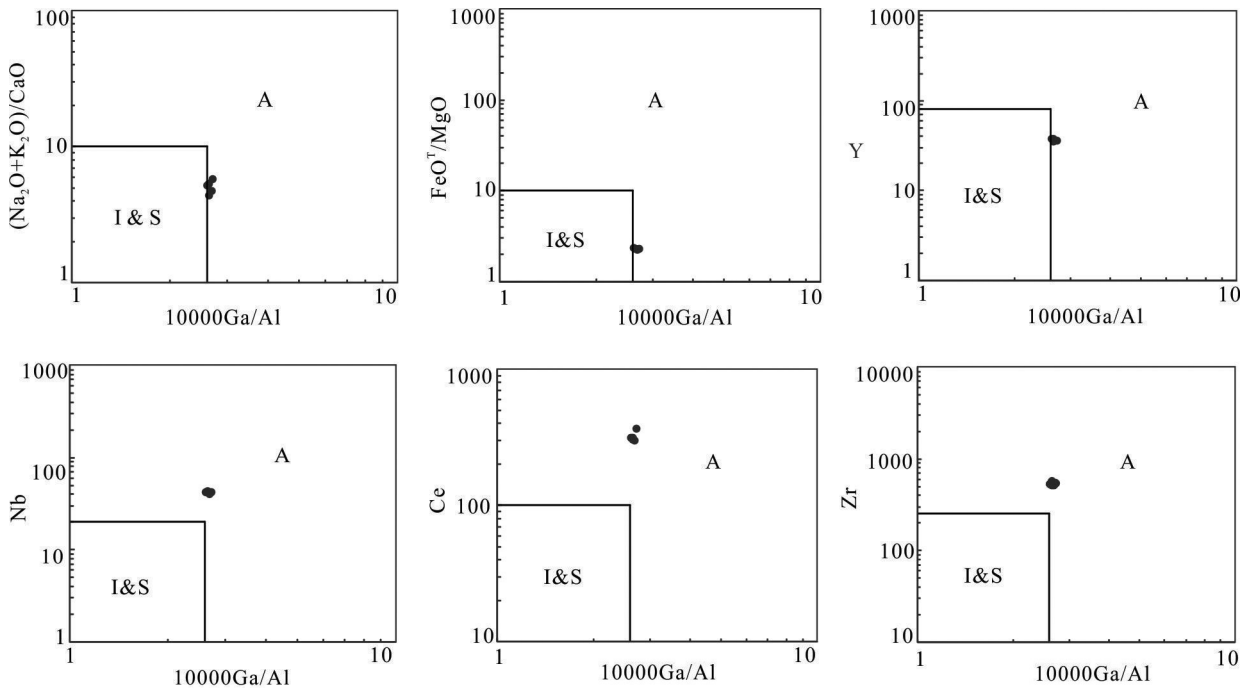


图 13 库木塔什萤石矿区碱长花岗岩的成因类型判别图(据 Whalen et al., 1987)

Fig.13 Diagrams of distinguishing petrogenetic types of the alkali feldspar granite in the Kumutashi fluorite deposit (after Whalen et al., 1987)

平均为 930×10^{-6} , 其中 Zr 含量平均为 533×10^{-6} , 接近世界典型 A 型花岗岩 Zr 含量 (平均 528×10^{-6} , Whalen et al., 1987), 明显高于澳大利亚 Lachlen 褶皱带未分异的铝质 A 型花岗岩和分异的 I 型花岗岩 Zr 含量平均值 (分别为 301×10^{-6} 和 116×10^{-6} , King et al., 1997)。岩石 $10^4 \text{Ga}/\text{Al}$ 值为 2.61~2.72, 均高于 A 型花岗岩的下限值 (2.6)。在 Whalen et al. (1987) 提出的以 $10^4 \text{Ga}/\text{Al}$ 为基础的多种判别图中, 均落在 A 型花岗岩范围 (图 13)。碱长花岗岩中锆石饱和温度介于 $852 \sim 865^\circ\text{C}$ (表 4), 明显高于一般的 S 型花岗岩 (平均 764°C) 和 I 型花岗岩 (平均 781°C), 接近澳大利亚 Lachlen 褶皱带典型 A 型花岗岩锆石饱和温度 $840 \sim 900^\circ\text{C}$ (King et al., 1997)。因此, 与萤石成矿有关碱长花岗岩脉为典型的 A 型花岗岩。

碱长花岗岩中锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 $-5.33 \sim +6.45$, 变化范围较大, 其不均一性可能为幔源和壳源两种端元之间相互作用的结果 (Bolhar et al., 2008); 二阶段模式年龄 (T_{DM2}) 为 $1020 \sim 1767 \text{Ma}$, 在 $t-^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 和 $t-\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 图解中 (图 14), 样品均落在球粒陨石演化线附近及以下的下地壳范围, 因此碱长花岗岩可能是由深部幔源岩浆与其诱发的地壳物质部分熔融形成的长英

质岩浆混合而成。

6.3 成矿机制

综上, 阿尔金西段卡尔恰尔—库木塔什超大型萤石矿带矿体明显受控于断裂构造, 矿物组成主要为萤石、方解石、少量石英和磷灰石, 属于岩浆热液充填型脉状萤石矿床。与萤石成矿关系密切的花岗岩中长石均为碱性长石 (钾长石、钠长石), 钠长石 $\text{An} < 2$, 属于碱长花岗岩。目前查明与碱长花岗岩有关的矿产主要有钨、锡、铋、钽及萤石等, 如南岭地区的众多钨锡矿床 (共伴生萤石矿) (祝新友等, 2012; 傅其斌等, 2013; 王艳丽等, 2013; 袁莹等, 2014)、内蒙古七一山铋钨锡矿 (吕博等, 2011; 王勇等, 2011)、新疆霍什布拉克钨锡矿 (黄河等, 2010)、澳大利亚 Tasmania 矽卡岩型锡钨矿等 (Sun and Higgins, 1996; Walshe et al., 2011)。同时, 研究表明与萤石有关花岗岩的岩浆来源主要为地壳, 可能有少量幔源物质参与 (方贵聪等, 2014), 并且通常与萤石有关的花岗岩具有高氟特征, 中国南岭、浙西等地区萤石矿床成矿岩体 F 含量 $> 0.1\%$ (刘道荣, 2017)。库木塔什萤石矿区碱长花岗岩 F 含量为 $0.24\% \sim 0.28\%$, 属高氟岩体, 岩体中较高的 F 等挥发

表4 库木塔什矿区碱长花岗岩主量(%)、微量和稀土元素(10^{-6})组成Table 4 Compositions of major elements (%), trace elements and rare earth elements (10^{-6}) of the alkali feldspar granite in the Kumutashi fluorite deposit

| 样品号 | KMTC1-1 | KMTC1-2 | KMTC1-3 | KMTC1-4 | KMTC1-5 |
|-------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| SiO ₂ | 65.1 | 64.2 | 65.2 | 64.8 | 64.4 |
| Al ₂ O ₃ | 15.2 | 15.3 | 15.3 | 15.1 | 15.3 |
| Fe ₂ O ₃ | 2.26 | 3.24 | 2.54 | 2.53 | 2.83 |
| FeO | 0.92 | 0.50 | 0.70 | 0.75 | 0.85 |
| CaO | 2.00 | 2.05 | 1.86 | 2.21 | 2.37 |
| MgO | 1.29 | 1.47 | 1.31 | 1.36 | 1.47 |
| K ₂ O | 6.36 | 6.14 | 6.42 | 6.16 | 5.87 |
| Na ₂ O | 4.35 | 4.42 | 4.28 | 4.35 | 4.47 |
| TiO ₂ | 0.69 | 0.76 | 0.68 | 0.7 | 0.79 |
| P ₂ O ₅ | 0.21 | 0.25 | 0.21 | 0.23 | 0.27 |
| MnO | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.05 | 0.05 |
| F | 0.24 | 0.27 | 0.25 | 0.28 | 0.25 |
| LOI | 1.28 | 1.34 | 1.18 | 1.53 | 1.15 |
| TOTAL | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| K ₂ O+ Na ₂ O | 10.7 | 10.6 | 10.7 | 10.5 | 10.3 |
| K ₂ O/ Na ₂ O | 1.46 | 1.39 | 1.50 | 1.42 | 1.31 |
| A/CNK | 0.86 | 0.87 | 0.88 | 0.85 | 0.85 |
| 分异指数(DI) | 89.5 | 88.4 | 89.5 | 88.7 | 87.4 |
| Cu | 6.11 | 4.92 | 5.26 | 5.94 | 7.73 |
| Pb | 22.1 | 18.1 | 20.4 | 19.8 | 22.3 |
| Zn | 46.9 | 53.3 | 46.2 | 48.7 | 53.9 |
| Li | 65.0 | 73.2 | 63.4 | 66.5 | 66.7 |
| Rb | 255 | 271 | 272 | 258 | 261 |
| Cs | 9.27 | 10.5 | 9.36 | 9.11 | 9.48 |
| W | 1.21 | 1.08 | 1.24 | 1.06 | 1.09 |
| Mo | 0.83 | 1.07 | 0.81 | 0.88 | 1.08 |
| Bi | 0.16 | 0.17 | 0.16 | 0.15 | 0.22 |
| Sr | 268 | 266 | 261 | 255 | 325 |
| Ba | 1260 | 1170 | 1290 | 1310 | 1220 |
| Nb | 42.1 | 41.8 | 41.8 | 39.7 | 43.4 |
| Ta | 2.66 | 2.44 | 2.51 | 2.27 | 2.86 |
| Zr | 565 | 526 | 542 | 514 | 519 |
| Hf | 13.0 | 12.3 | 12.7 | 11.5 | 12.3 |
| Be | 3.45 | 3.13 | 3.44 | 2.99 | 3.37 |
| Ga | 21.3 | 21.1 | 22.0 | 21.5 | 21.4 |
| Sn | 4.17 | 4.34 | 4.28 | 4.12 | 4.62 |
| U | 7.11 | 8.39 | 7.72 | 7.23 | 7.91 |
| Th | 67.0 | 77.6 | 74.0 | 67.2 | 63.2 |
| La | 146 | 143 | 187 | 147 | 142 |
| Ce | 312 | 315 | 368 | 298 | 302 |
| Pr | 34.4 | 34.5 | 38.6 | 33.5 | 35.1 |
| Nd | 116 | 122 | 128 | 114 | 123 |
| Sm | 17.8 | 18.7 | 18.6 | 17.6 | 18.7 |
| Eu | 2.71 | 2.79 | 2.72 | 2.70 | 3.79 |
| Gd | 11.5 | 12.7 | 12.5 | 11.6 | 12.5 |
| Tb | 1.57 | 1.70 | 1.68 | 1.63 | 1.73 |
| Dy | 7.10 | 7.71 | 7.44 | 7.35 | 7.95 |
| Ho | 1.33 | 1.43 | 1.38 | 1.35 | 1.52 |
| Er | 3.70 | 4.09 | 3.82 | 3.71 | 4.16 |
| Tm | 0.54 | 0.59 | 0.56 | 0.54 | 0.60 |
| Yb | 3.59 | 3.84 | 3.58 | 3.55 | 3.91 |
| Lu | 0.54 | 0.58 | 0.55 | 0.54 | 0.60 |
| Y | 34.8 | 37.8 | 36.1 | 35.6 | 37.5 |
| ΣREE | 659 | 669 | 774 | 643 | 658 |
| LREE | 629 | 636 | 743 | 613 | 625 |
| HREE | 29.9 | 32.6 | 31.5 | 30.3 | 33.0 |
| LREE/HREE | 21.1 | 19.5 | 23.6 | 20.2 | 19.0 |
| La _N /Yb _N | 29.2 | 26.7 | 37.5 | 29.7 | 26.1 |
| δEu | 0.54 | 0.52 | 0.51 | 0.54 | 0.71 |
| T _{Zr} /°C | 865 | 857 | 864 | 852 | 852 |

份含量不仅有利于形成萤石矿,也有利于钨、锡、铋、铊、稀土等元素的迁移和富集。前人还将含锡钨铋铊等矿化花岗岩称之为Li-F花岗岩、BELIF花岗岩(毛景文,1997;王联魁和黄智龙,2000)。一些有关花岗岩体系中元素配分行为的实验表明,F、Li、Be、Nb、Ta、W、Sn等元素的流体/熔体配分系数都小于1,在分离结晶过程中,均倾向于进入熔体相,其中F在花岗质熔体中的溶解度可高达6.8%~8.0%,随着熔体F含量的增加,上述亲石元素的溶解度亦随之增大(Webster et al., 1989; Keppler and Wyllite, 1991; Keppler, 1993; Bhalla et al., 2004)。国内外众多钨、锡、铋、铊、稀土等多金属矿床中大量伴生萤石矿的地质现象支持了这一观点(Sato, 1980; 侯增谦等, 2008; 方贵聪等, 2020; 周旭林和秦雅静, 2020)。目前,在卡尔恰尔—库木塔什地区碱长花岗岩体及其与地层接触带附近已发现有云英岩型锡矿化及含锂带云母(图3k,l);与萤石成矿关系密切的碱长花岗岩ΣREE非常高,特别是La、Ce、Nb、Y等,萤石矿石中还发育氟碳铈矿(图3h),表明该区仍具有稀土稀有元素成矿潜力。因此,卡尔恰尔—库木塔什一带广泛分布的高氟碱长花岗岩,对于萤石—锡—稀有—稀土成矿均十分有利。

实验岩石学研究表明,与钨锡、稀有金属及萤石等成矿与岩浆体系高度富集挥发份(H₂O、F、Li)有关,其深度演化常出现液态不混溶分异(Keppler and Wyllite, 1991; Veksler and Thomas, 2002; Badanina et al., 2004; Dolejs and Baker, 2007; Costi et al., 2009),这种不混溶作用在富Li-F花岗岩浆中很容易发生,在南岭很多钨锡多金属矿床的花岗岩中都存在这种岩浆液态分异现象(祝新友等,2012)。早古生代,阿尔金西南缘为构造—岩浆活动活跃时期,蛇绿构造混杂岩带、高压—超高压变质岩和大规模岩浆岩十分发育,区域上代表板片断离的高压—超高压岩石的退变质时代为~450 Ma(Liu et al., 2012),同时代发育酸性和基性—超基性“双峰式”岩浆岩(曹玉亭等,2010;马中平等,2011;王立社等,2016),阿尔金南缘吐拉牧场东A型花岗岩形成于424 Ma(吴锁平等,2007),均表明该时期区域处于造山后伸展拉张环境。可见,卡尔恰尔—库木塔什萤石矿可能形成于伸展构造体制时期。萤石成矿过程代表了一个复杂的地球化学演化过程,前人已有大量探索(Zou et

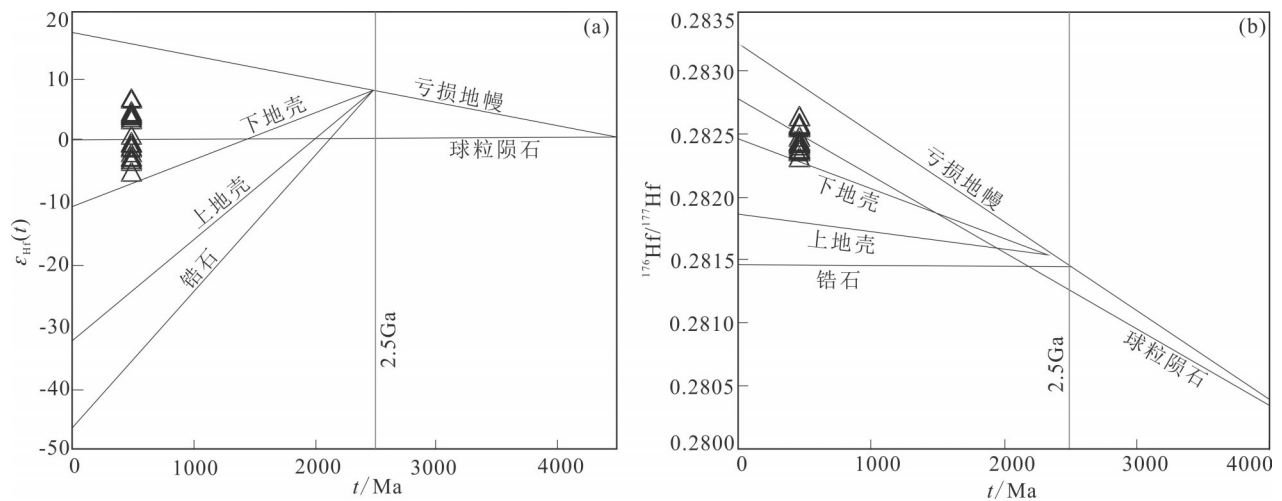


图 14 库木塔什萤石矿区碱长花岗岩中锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ - t (a)和 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ - t (b)图解(据 Griffin et al., 2004)

Fig.14 (a) $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ vs t and (b) $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ vs t (after Griffin et al., 2004) diagrams of the alkali feldspar granite in the Kumutashi fluorite deposit

al., 2016, 2017, 2020)。根据阿尔金萤石矿带成矿地质背景、矿床地质特征等,将成矿过程概述如下:卡尔恰尔地区晚奥陶世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,在上侵定位过程中又经历了高度分异演化,成矿元素和挥发份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。随后成矿流体可能经历了液态不混溶分异,F元素发挥重要作用,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,促进成矿元素的迁移。随着热液体系物理化学条件(酸碱性、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,便与围岩作用而发生碳酸盐化,致使含F络合物的分解和 F^- 、 Ca^{2+} 等离子的产生,继而 F^- 、 Ca^{2+} 离子结合形成 CaF_2 (早期白色萤石矿)而沉淀充填于区内北东向及次级东西向等有利的构造中。之后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^- 、 Ca^{2+} 等离子的产生,形成穿插于早期白色萤石矿脉中或边部的晚期紫色等萤石矿脉。

6.4 区域找矿远景

6.4.1 找矿标志

地层标志:矿带萤石矿化主要分布在阿尔金岩群斜长片麻岩和大理岩等富钙岩石中,为萤石矿化提供了极其重要的物源基础,是间接的地层找矿标志。

构造标志:许多萤石矿床实例表明,在一个矿床或矿区内,总有一个方向的含矿断裂含矿最佳,该断裂往往成为矿区的主要控矿断裂(曹俊臣, 1994)。卡尔恰尔—库木塔什一带萤石矿床在空间上紧依卡尔恰尔—阔什等北东向区域性深大断裂分布,北东向区域性断裂及其派生的近东西向等次级断层对萤石成矿具有重要的控制作用,提供了含矿热液运移通道和赋存空间,是区内萤石的重要控矿和容矿构造。

岩浆岩标志:矿带萤石矿体与晚奥陶世碱长花岗岩脉具有密切的时空关系,控矿岩体富含F、Nb、REE等挥发组分,F含量达0.24%~0.28%,为萤石矿床的形成提供了F等物质来源。该高氟碱长花岗岩体是寻找萤石矿的重要岩浆岩标志。

矿化蚀变标志:萤石矿体主要赋存于碱长花岗岩内及外接触带的裂隙或破碎带内,总体上蚀变较弱,呈现出中低温热液的特征,见有碳酸盐化等,特别是方解石与萤石矿化密切大量共生,碳酸根离子异常等是寻找萤石矿的重要标志。

地球化学标志:区域内F单元素异常与萤石矿

表5 卡尔恰尔—库木塔什一带萤石成矿要素表

Table 5 Metallogenic features of fluorite deposits in the Kaerqiaer—Kumutashi mineralization belt

| 区域成矿要素 | | 描述内容 | 要素分类 |
|--------|--------|---|------|
| 特征描述 | | 岩浆热液充填型脉状萤石矿床 | |
| 地质环境 | 大地构造位置 | 阿尔金造山带(Ⅱ-1),阿中地块(Ⅱ-1-2) | 重要 |
| | 成矿环境 | 卡尔恰尔—阔什等区域深大断裂及次级北东、东西向断裂构造 | 重要 |
| | 成矿时代 | 奥陶纪 | 重要 |
| | 构造背景 | 伸展拉张构造背景 | 重要 |
| 矿床特征 | 矿体形态 | 脉状、透镜状、条带状 | 重要 |
| | 赋矿围岩 | 黑云母斜长片麻岩、大理岩等 | 重要 |
| | 矿石类型 | 块状矿石、脉状矿石、角砾状矿石 | 次要 |
| | 矿物组合 | 矿石矿物:萤石、带云母;脉石矿物:方解石、石英、磷灰石 | 重要 |
| | 结构构造 | 结构:自形一半自形中粗粒结构、他形粒状结构 | 次要 |
| | | 构造:致密块状、脉状、角砾状构造 | |
| | 蚀变特征 | 碳酸盐化 | 重要 |
| | 成矿岩体特征 | 碱长花岗岩脉,富F、高 Σ REE,属A型花岗岩,由壳幔混合作用形成 | 重要 |
| | 控矿条件 | 矿体主要赋存于阿尔金岩群富钙岩层 | 必要 |
| | | 矿体明显受北东向区域断裂及次级北东、东西向断裂构造控制 矿化与高氟碱长花岗岩脉具有密切时空及成因关系 | 必要 |

床套合良好,库木塔什、布拉克北萤石矿均位于F异常内,卡尔恰尔萤石矿位于F异常周边。F化探异常是寻找萤石矿的重要地球化学标志。

遥感标志:碱长花岗岩脉在遥感影像上色调为肉红色,呈北东向条带状展布,周边围岩为黄色、蓝褐色色调,两者差异明显,据此可确定碱长花岗岩分布位置;断层在影像上呈线性分布,地貌一般为负地形,水系经过断层处一般出现直角拐弯,断层两侧影像上的色调一般差异明显,据此可确定断层分布位置;采用Landsat8遥感影像的B1、B5、B6、B7波段进行主成分变换,变换后的PC4主分量反映了碳酸根离子的信息,采用阈值分割的方法对PC4主分量提取确定碳酸根离子异常位置。利用遥感高分影像解译识别“碱长花岗岩脉+断裂+碳酸根离子异常”,叠加F化探异常,可快速圈定萤石找矿有利区。

根据区域地质背景,结合卡尔恰尔、库木塔什等典型萤石矿床成矿特征,初步总结区域萤石成矿要素(表5)。

6.4.2 区域找矿预测

由于阿尔金成矿带为高寒深切地区,以遥感为核心的找矿预测技术方法可综合圈定萤石找矿

重点区。以库木塔什萤石矿为例,其矿化主要以萤石-方解石脉产出,空间上与碱长花岗岩关系十分紧密,受北东向、北北东向断裂构造控制。碱长花岗岩脉在影像上色调为肉红色,遥感解译断层与萤石-方解石脉空间位置套合,碳酸根离子异常位于矿体南北两侧,综合解译结果与实际发现矿体具有一定吻合度(图15)。

对卡尔恰尔—库木塔什一带通过遥感解译碱长花岗岩脉、断层、碳酸根离子异常,叠加区域1:25万F化探异常资料,结合断层性质、地层中大理岩分布等地质因素,对区域进行成矿预测(图16)。结果显示,区域断裂构造发育,以北东向、北东东向及东西向为主,已发现的萤石矿和F化探异常均位于北东向、东西向断裂两侧或北东向断裂与东西向断裂的交汇部位,沿断裂系周边仍有大量碳酸根离子异常。区域萤石矿在北东向与东西向构造系、碳酸根离子异常、F化探异常等套合区域具有较大找矿远景(图16)。

7 结论

(1)阿尔金西段卡尔恰尔—库木塔什超大型矿带萤石成矿与碱长花岗岩脉关系密切,矿体明显受

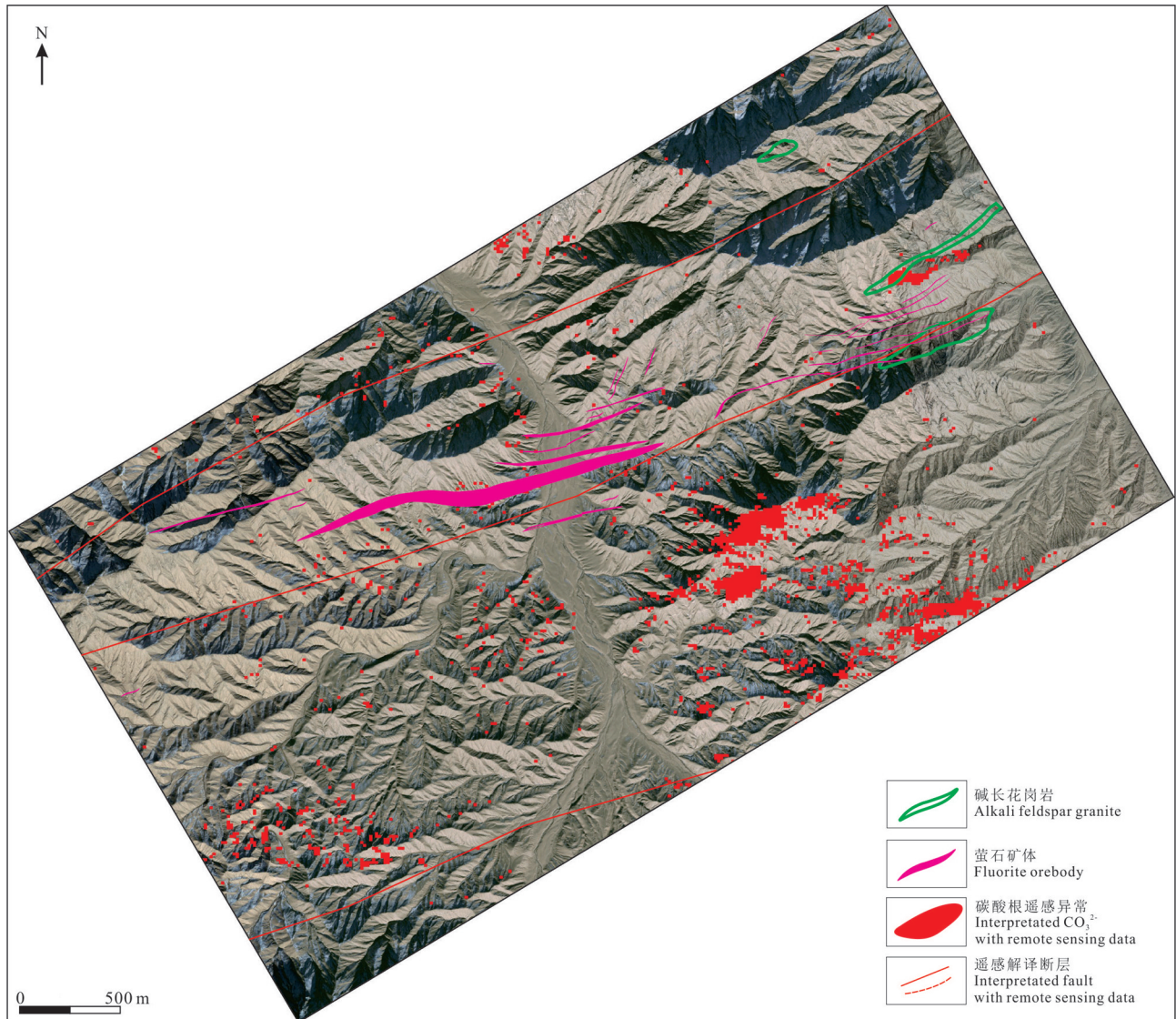


图15 库木塔什萤石矿遥感综合解译图

Fig.15 The comprehensive interpretation map of remote sensing in the Kumutashi fluorite deposit

控于北东向及次级北东东、东西向断裂构造；赋矿地层主要为阿尔金岩群斜长片麻岩和大理岩。矿石类型主要有块状、脉状、角砾状矿石，主要由萤石、方解石、少量石英及磷灰石组成，早期萤石呈白色，晚期萤石呈紫色，发育含锂带云母，属于岩浆热液充填型脉状萤石矿床。

(2)控矿碱长花岗岩锆石U-Pb年龄为(450.0±2.7) Ma, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为-5.33~+6.45, 二阶段模式年龄($T_{\text{DM}2}$)为1020~1767 Ma, 具有钾玄质、准铝质、高分异特点, 具有富F、高 ΣREE 特征, 明显富集大离子亲石元素 Rb、Th、U、La、Ce、Nd、Zr、Hf等, 强烈亏损

Ta、Nb、Sr、P、Ti等, 属于A型花岗岩, 与奥陶纪造山后伸展背景下壳幔岩浆混合作用密切相关。区域广泛分布的高氟碱长花岗岩对于萤石-锡-稀有-稀土成矿十分有利。

(3)矿带萤石矿床控矿要素为“碱长花岗岩+北东向断裂及次级构造系+阿尔金岩群富钙地层”, 叠加套合“F化探异常+碳酸根离子异常”等重要找矿标志, 区域成矿预测显示具有巨大的萤石找矿潜力, 北东向与东西向构造系、碳酸根离子异常、F化探异常等套合区域具有较大找矿远景。

致谢: 锆石U-Pb年龄及Hf同位素测试分析得

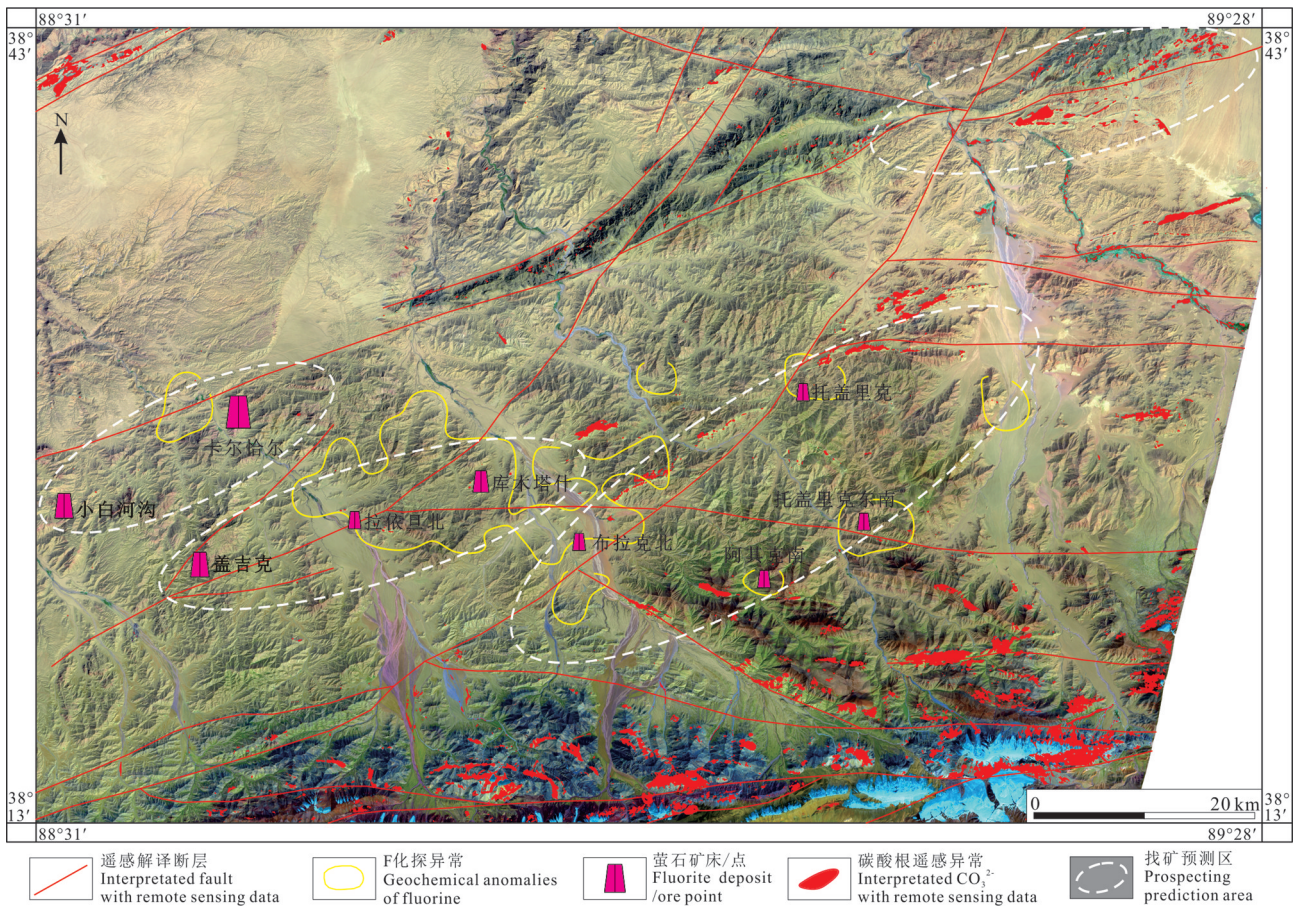


图16 阿尔金西段卡尔恰尔—库木塔什萤石矿找矿预测图
 Fig.16 Prospecting map of fluorite deposits in the Kaerqiaer-Kumutashi belt, West Altyn-Tagh Orogen

到自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室李艳广高级工程师、靳梦琪工程师的热心帮助,文稿修改过程中审稿专家提出了宝贵的修改意见,在此一并表示感谢!

注释

①校培喜,高晓峰,康磊,谢从瑞,董增产,过磊,奚仁刚,杨再超,胡云绪. 2013. 西昆仑—阿尔金成矿带基础地质综合研究[R]. 西安:中国地质调查局西安地质调查中心.

References

Amelin Y, Lee D C, Halliday A N. 2000. Early-middle Archean crustal evolution deduced from Lu-Hf and U-Pb isotopic studies of single zircon grains[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64: 4205-4225.
 Badanina E V, Veksler I V, Thomas R, Syrtsso L F, Trumbull R B. 2004. Magmatic evolution of Li-F, rare-metal granites: A case study of melt inclusions in the Khangilay complex, Eastern Transbaikalia (Russia)[J]. *Chemical Geology*, 210: 113-133.

Bhalla P, Holtz F, Linnen R L, Behrens H. 2004. Solubility of cassiterite in evolved granitic melts: Effect of T, f_{O_2} , and additional volatiles[J]. *Lithos*, 80: 387-400.
 Bolhar R, Weaver S D, Whitehouse M J, Palin J M, Woodhead J D, Colea J W. 2008. Sources and evolution of arc magmas inferred from coupled O and Hf isotope systematics of plutonic zircons from the Cretaceous Separation Point Suite (New Zealand) [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 268: 312-324.
 Cao Huawen, Zhang Shouting, Zou Hao, Fang Yi, Zhang Peng, Wang Guangkai. 2013. ESR dating of quartz from LinXi fluorite deposits, Inner Mongolia and its geological implications[J]. *Geoscience*, 27 (4): 888-895 (in Chinese with English abstract).
 Cao Junchen. 1994. Geological feature and mineralization of fluorite deposit related to granite in China[J]. *Geology and Exploration*, 30 (5): 1-13 (in Chinese with English abstract).
 Cao Yuting, Liu Liang, Wang Chao, Yang Wenqiang, Zhu Xiaohui. 2010. Geochemical, zircon U-Pb dating and Hf isotope compositions studies for Tatelekebulake granite in south Altyn Tagh[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(11): 3259-3271 (in Chinese with English abstract).

- Costi H T, Agnol R Dall', Pichavant M, Ramo O T. 2009. The peralkaline tin-mineralized Madera cryolite albite-rich granite of Pitinga, Amazonian craton, Brazil: Petrography, mineralogy and crystallization processes[J]. *Canadian Mineralogist*, 47: 1301-1327.
- Dolejs D, Baker D R. 2007. Liquidus equilibria in the system $K_2O-Na_2O-Al_2O_3-SiO_2-F_2O-H_2O$ to 100 MPa: I. silicate-fluoride liquid immiscibility in anhydrous system[J]. *Journal of Petrology*, 48: 785-806.
- Dong Hongkai, Guo Jincheng, Chen Haiyan, Ti Zhenhai, Liu Guang, Liu Silin, Xue Pengyuan, Xing Weiwei. 2014. Evolution characteristics of Ordovician intrusive rock in Changshagou of Altun Region[J]. *Northwestern Geology*, 47(4): 73-87 (in Chinese with English abstract).
- Fang Guicong, Wang Denghong, Chen Yuchuan, Huang Fan, Wang Yan, Wu Jiayu, Hu Shifu. 2020. Metallogenic regularities and genesis of the fluorite deposits in Nanling region[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(1): 161-178 (in Chinese with English abstract).
- Fang Guicong, Wang Denghong, Chen Zhenyu. 2014. Metallogenetic specialization of the fluorite-bearing granites in the northern part of the eastern Nanling Region[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 38(2): 312-324 (in Chinese with English abstract).
- Fu Qibin, Zhu Xinyou, Chen Xiyin, Zhao Jingjing, Wang Yanli. 2013. Characteristics of Alkali feldspar granite in Kafang Sn-Cu deposit, Gejiu, Yunnan Province, China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 33(1): 63-67 (in Chinese with English abstract).
- Gao Dong, Wu Cailai, Gao Yuanhong, Wu Di, Zheng Kun, Xu Nan, Chen Hongjie. 2022. Genesis of the Yusupualeke Tagh granitic pluton in the South Altun and its implications for the Early Paleozoic regional tectonic evolution[J]. *Geology in China*, 49(5): 1636-1655 (in Chinese with English abstract).
- Gao Yongbao, Zhao Xinmin, Leon Bagas, Wang Yalei, Jin Moushun, Zhang Jiangwei, Lu Lin, Gao Yijie, Yan Zhouquan, Teng Jiabin, Yang Zhiquan. 2021. Newly discovered Ordovician Li-Be deposits at Tugeman in the Altyn-Tagh Orogen, NW China[J]. *Ore Geology Reviews*, 139(2): 104515.
- Griffin W L, Belousova E A, Shee S R. 2004. Archean crustal evolution in the northern Yilgarn Craton: U-Pb and Hf-isotope evidence from detrital zircons[J]. *Precambrian Research*, 131: 231-282.
- Han Beibei, Shang Pengqiang, Gao Yongzhang, Jiao Sen, Yao Chaomei, Zou Hao, Li Min, Wang Liang, Zheng Houyi. 2020. Fluorite deposits in China: Geological features, metallogenic regularity, and research progress[J]. *China Geology*, 3: 473-489.
- Hoskin P W O, Black L P. 2000. Metamorphic zircon formation by solidstate recrystallization of protolith igneous zircon[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 18: 423-439.
- Hou Kejun, Li Yanhe, Zou Tianren, Qu Xiaoming, Shi Yuruo, Xie Guiqing. 2007. Laser ablation-MC-ICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2595-2604 (in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian, Tian Shihong, Xie Yuling, Yuan Zhongxin, Yang Zhusen. 2008. Mianning-Dechang Himalayan REE belt associated with carbonatite-alkalic complex in eastern Indo-Asian collision zone, southwest China: Geological characteristics of REE deposits and a possible metallogenic model[J]. *Mineral Deposits*, 27(2): 145-176 (in Chinese with English abstract).
- Huang He, Zhang Zhaochong, Zhang Shu, Zhang Dongyang. 2010. Petrology and geochemistry of the Huoshibulake alkali feldspar granite pluton in Southwest Tianshan Mountains, Xinjiang: Implications for petrogenesis, tectonic setting and mineralization[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(6): 707-718 (in Chinese with English abstract).
- Kang Lei, Xiao Peixi, Gao Xiaofeng, Xi Rengang, Yang Zaichao. 2016. Early Paleozoic magmatism and collision orogenic process of the South Altyn[J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(10): 2527-2550 (in Chinese with English abstract).
- Keppeler H, Wyllite P J. 1991. Partitioning of Cu, Sn, Mo, W, U and Th between melt and aqueous fluid in the system haplogranite H_2O-HCl and haplogranite- H_2O-HF [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 109: 139-150.
- Keppeler H. 1993. Influence of fluorine on the enrichment of high field strength trace elements in granitic rocks[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 114: 479-488.
- King P L, White A J R, Chappell B W, Allen C M. 1997. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan Fold Belt, Southeastern Australia[J]. *Journal of Petrology*, 38(3): 371-391.
- Le Maitre R W. 1989. A Classification of Igneous Rocks and glossary of Terms[M]. Oxford: Blackwell, 1-193.
- Li Changjiang, Xu Butai, Jiang Xuliang, Hu Yonghe. 1992. Time interval between the formation of host rock and the mineralization in some hydrothermal deposits of Southeast China with a discussion on some related problems[J]. *Mineral Deposits*, 11(2): 105-112 (in Chinese with English abstract).
- Li Jing, Zhang Shouting, Shang Pengqiang, Zhao Yu. 2019. Present situation and analysis of strategic value of fluorite resource[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 39(6): 62-68 (in Chinese with English abstract).
- Li Yanguang, Wang Shuangshuang, Liu Minwu, Meng En, Wei

- Xiaoyan, Zhao Huibo, Jin Mengqi. 2015. U–Pb dating study of Baddeleyite by LA–ICP–MS: Technique and application[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(12): 2400–2418 (in Chinese with English abstract).
- Liu Daorong. 2017. Genesis of fluorite deposits and prospecting direction in Northwestern Zhejiang Province[J]. *Geology and Exploration*, 53(5): 947–959 (in Chinese with English abstract).
- Liu L, Wang C, Cao Y T, Chen D L, Kang L, Yang W Q, Zhu X H. 2012. Geochronology of multi-stage metamorphic events: Constraints on episodic zircon growth from the UHP eclogite in the South Altyn, NW China[J]. *Lithos*, 136–139: 10–26.
- Liu Liang, Zhang Anda, Chen Danling, Yang Jiayi, Luo Jinhai, Wang Chao. 2007. Implications based on LA–ICP–MS zircon U–Pb ages of eclogite and its country rock from Jianggalesayi area, Altyn Tagh. *Earth Science Frontiers*, 14(1): 98–107 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2003. User's manual for Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[J]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 4: 1–70.
- Lü Bo, Yang Yueqing, Meng Guixiang, Yan Jiayong. 2011. Geochemical characteristics and petrogenesis of Dongqiyishan alkali feldspar granite, Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30(3): 543–552 (in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen. 1997. Metallogenic speciality of super giant polymetallic tungsten deposit: Taking the Shizhuyuan deposit as an example[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 32(3): 351–363 (in Chinese with English abstract).
- Ma Zhongping, Li Xiangmin, Xu Xueyi, Sun Jiming, Tang Zhuo, Du Tao. 2011. Zircon LA–ICP–MS U–Pb isotopic dating for Qingshuiquan layered mafic–ultramafic intrusion southern Altyn orogen, in northwestern China and its implication[J]. *Geology in China*, 38(4): 1071–1078 (in Chinese with English abstract).
- Rickwood P C. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides major and minor elements[J]. *Lithos*, 22: 247–263.
- Sato K. 1980. Distribution of fluorite deposits in Japanese islands[J]. *Mineralium Deposita*, 15: 327–334.
- Sun S S, Higgins N C. 1996. Neodymium and strontium isotope study of the Blue Tier Batholith, NE Tasmania, and its bearing on the origin of tin-bearing alkali feldspar granites[J]. *Ore Geology Reviews*, 10(3/6): 339–365.
- Sun W D, McDonough W.F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society London Special Publications*, 42(1): 313–345.
- Van Acherbergh E, Ryan C G, Jackson S E, Griffin W L. 2001. 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), 29: 239–243.
- Veksler I V, Thomas R. 2002. An experimental study of B-, P- and F-rich synthetic granite pegmatite at 0.1 and 0.2 GPa[J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 143: 673–683.
- Vervoot J D, Pachelts P J, Gehrels G E, Nutman A P. 1996. Constraints on early Earth differentiation from hafnium and neodymium isotopes[J]. *Nature*, 379: 624–627.
- Walshe J L, Solomon M, Whitford D J, Sun S S, Foden J D. 2011. The role of the mantle in the genesis of tin deposits and tin provinces of eastern Australia[J]. *Economic Geology*, 106: 297–305.
- Wang C, Liu L, Yang W Q, Cao Y T, Kang L, Chen S F, Li R S, He S P. 2013. Provenance and ages of the Altyn complex in Altyn Tagh: Implications for the Early Neoproterozoic evolution of northwestern China[J]. *Precambrian Research*, 230: 193–208.
- Wang Jiping, Shang Pengqiang, Xiong Xianxiao, Yang Huiyan, Tang Yao. 2014. The classification of fluorite deposits in China[J]. *Geology in China*, 41(2): 315–325 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jiping, Shang Pengqiang, Xiong Xianxiao, Yang Huiyan, Tang Yao. 2015. Metallogenic regularities of fluorite deposits in China[J]. *Geology in China*, 42(1): 18–32 (in Chinese with English abstract).
- Wang Liankui, Huang Zhilong. 2000. *Liquid Separation and Experiment of Li–F Granite*[M]. Beijing: Science Press, 1–290 (in Chinese).
- Wang Lishe, Yang Pengfei, Duan Xingxing, Long Xiaoping, Sun Jiming. 2016. Isotopic age and genesis of plagiogranite from Qingshuiquan area in the middle of South Altyn Tagh[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(3): 759–774 (in Chinese with English abstract).
- Wang Qiang, Zhao Zhenhua, Xiong Xiaolin. 2000. The Ascertainment of Late–Yanshanian A-type Granite in Tongbai–Dabie Orogenic Belt[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 19(4): 297–306 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yanli, Zhu Xinyou, Liu Zhigang, Fu Qibin. 2013. The characteristics of alkali feldspar granite in Limu W–Sn deposit, Guangxi Province[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 29(1): 12–18 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yong, Lü Qingtian, Meng Guixiang, Yang Yueqing, Zhao Jinhua. 2011. Alkali feldspar granite and its metallogenesis of Dongqiyishan, Inner Mongolia Autonomous Region[J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(10): 1505–1514 (in Chinese with English abstract).

- Webster J D, Holloway J R, Heric R L. 1989. Partitioning of lithophile trace elements between H_2O and $H_2O + CO_2$ fluids and topaz rhyolite melt[J]. *Economic Geology*, 84: 116–134.
- Whalen J B, Currie K L and Chappell B W. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407–419.
- Wu Cailai, Lei Min, Wu Di, Zhang Xin, Chen Hongjie, Li Tianxiao. 2016. Zircon U–Pb dating of Paleozoic granites from South Altun and response of the magmatic activity to the tectonic evolution of the Altun orogenic belt[J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(9): 2276–2315 (in Chinese with English abstract).
- Wu Suoping, Wang Meiying, Qi Kaijing. 2007. Present situation of researches on A type granites: A review[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(1): 57–66 (in Chinese with English abstract).
- Xia Dong, Chen Gang, Wang Junliang, Liu Yang, Luo Zhaohua, Liu Ya'nan, Cao Jiangyu, Zheng Jiaying, Sun Yaofeng. 2021. Discovery of several high-grade fluorite ore occurrences in the northern metallogenic belt of Beishan[J]. *Geology in China*, 48(3): 968–969 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Peixi. 2003. The geological features of ophiolite tectonic mixite belt from Qingshuiquan to Mangnai in the middle section of Altyn Tagh[J]. *Northwestern Geology*, 36(2): 20–30 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xingwang, Li Hang, Shi Fupin, Yao Fojun, Chen Jianzhong, Yang Zhiqian, Hong Tao, Ke Qiang. 2019. Metallogenic characteristics and prospecting of granitic pegmatite-type rare metal deposits in the Tugeman area, middle part of Altyn Tagh[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(11): 3303–3316 (in Chinese with English abstract).
- Yang Wenqiang, Liu Liang, Ding Haibo, Xiao Peixi, Cao Yuting, Kang Lei. 2012. Geochemistry, geochronology and zircon Hf isotopes of the Dimunalike granite in South Altyn Tagn and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(12): 4139–4150 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Ying, Zhu Xinyou, Li Shunting, Cheng Xiyin. 2014. Delineation and signification of the alkali feldspar granite in Taoxikeng tungsten deposit, southern Jiangxi[J]. *Mineral Exploration*, 5(5): 767–772 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Zhongcheng, Hong Zenglin, Liu Fangxiao, Bian Xiaowei, Li Qi, Gao Feng, He Yuanfang, Jian Kunkun. 2020. Confirmation of gneissic granite of Qingbaikou period and its constraint on the timing of the Rodinia supercontinent on the Altun orogenic belt[J]. *Geology in China*, 47(3): 569–589 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jianxin, Meng Fancong, Yu Shengyao. 2010. Two contrasting HP/LT and UHP metamorphic belts: constraint on Early Paleozoic orogeny in Qilian–Altun orogen[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(7): 1967–1992 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Ruoyu, Zeng Zhongcheng, Zhu Weipeng, Chen Ning, Zhao Jianglin, Li Qi, Wang Qinwei, Rao Jingwen. 2016. 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*, 62(5): 1283–1299 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Xulin, Qin Yajing. 2020. Geological characteristics and genesis of Jiepailing fluorite deposit in Yizhang County of Hunnan[J]. *Mineral Resources and Geology*, 34(1): 33–40 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Jiang, Peng Sanguo, Liu Jinming. 2020. The discovery of fluorite ore spots in the contact zone of Cretaceous Lingshan granitic batholith in the western Dabie orogenic belt[J]. *Geology in China*, 47(2): 550–551 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Xinyou, Wang Jingbin, Wang Yanli, Cheng Xiyin, He Peng, Fu Qibin, Li Shunting. 2012. Characteristics of alkali feldspar granite in tungsten (tin) deposits of Nanling region[J]. *Geology in China*, 39(2): 359–381 (in Chinese with English abstract).
- Zou H, Fang Y, Zhang S T, Zhang Q. 2017. The source of Fengjia and Langxi barite–fluorite deposits in southeastern Sichuan, China: Evidence from rare earth elements and S, Sr, and Sm–Nd isotopic data[J]. *Geological Journal*, 52(3): 470–488.
- Zou H, Li M, Leon B, Li Y, Fang Y, Cao H W, Jiang X W, Chen H F. 2020. Fluid composition and evolution of the Langxi Ba–F deposit, Yangtze Block, China: New insight from LA–ICP–MS study of individual fluid inclusion[J]. *Ore Geology Reviews*, 10: 89–96.
- Zou H, Zhang S T, Chen A Q, Fang Y, Zeng Z F. 2016. Hydrothermal fluid sources of the Fengjia barite–fluorite deposit in Southeast Sichuan, China: Evidence from fluid inclusions and hydrogen and oxygen isotopes[J]. *Resource Geology*, 66(1): 24–36.
- Zou Hao, Fang Yi, Chen Hemao, Xiao Guang, Xu Zhanzhang. 2014. REE geochemistry and genesis of the Xiachen fluorite deposit in Tiantai basin, Zhejiang Province[J]. *Geology in China*, 41(4): 1375–1386 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 曹华文, 张寿庭, 邹灏, 方乙, 张鹏, 王光凯. 2013. 内蒙古林西萤石矿床石英 ESR 年龄及其地质意义[J]. *现代地质*, 27(4): 888–895.
- 曹俊臣. 1994. 中国与花岗岩有关的萤石矿床地质特征及成矿作用[J]. *地质与勘探*, 30(5): 1–13.
- 曹玉亭, 刘良, 王超, 杨文强, 朱小辉. 2010. 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*, 26(11): 3259–3271.
- 曾忠诚, 洪增林, 刘芳晓, 边小卫, 李琦, 高峰, 何元方, 菅坤坤. 2020. 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*, 47(3): 569–589.
- 董洪凯, 郭金城, 陈海燕, 提振海, 刘广, 刘思林, 薛鹏远, 邢伟伟. 2014. 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, 47(4): 73-87.
- 方贵聪, 王登红, 陈毓川, 黄凡, 王岩, 吴家旭, 胡世辅. 2020. 南岭萤石矿床成矿规律及成因[J]. 地质学报, 94(1): 161-178.
- 方贵聪, 王登红, 陈振宇, 陈郑辉, 赵正, 郭娜欣. 2014. 南岭东段北部花岗岩的萤石成矿专属性研究[J]. 大地构造与成矿学, 38(2): 312-324.
- 傅其斌, 祝新友, 程细音, 赵晶晶, 王艳丽. 2013. 云南个旧卡房锡-铜矿床碱长花岗岩厘定及意义[J]. 矿物学报, 33(1): 63-67.
- 高栋, 吴才来, 郜源红, 吴迪, 郑坤, 徐楠, 陈红杰. 2022. 南阿尔金玉苏普阿勒克塔格花岗岩体成因及其对区域早古生代构造演化的启示[J]. 中国地质, 49(5): 1636-1655.
- 侯可军, 李延河, 邹天人, 曲晓明, 石玉若, 谢桂青. 2007. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用[J]. 岩石学报, 23(10): 2595-2604.
- 侯增谦, 田世洪, 谢玉玲, 袁忠信, 杨竹森. 2008. 川西冕宁—德昌喜马拉雅期稀土元素成矿带矿床地质特征与区域成矿模型[J]. 矿床地质, 27(2): 145-177.
- 黄河, 张招崇, 张舒, 张东阳. 2010. 新疆西南天山霍什布拉克碱长花岗岩体岩石学及地球化学特征[J]. 岩石矿物学杂志, 29(6): 707-718.
- 康磊, 校培喜, 高晓峰, 奚仁刚, 杨再朝. 2016. 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, 90(10): 2527-2550.
- 李长江, 徐步台, 蒋叙良, 胡永和. 1992. 中国东南部某些热液矿床的成岩成矿时差序列及有关问题讨论[J]. 矿床地质, 11(2): 105-112.
- 李敬, 张寿庭, 商朋强, 赵玉. 2019. 萤石资源现状及战略性价值分析[J]. 矿产保护与利用, 39(6): 62-68.
- 李艳广, 汪双双, 刘民武, 孟恩, 魏小燕, 赵慧博, 靳梦琪. 2015. 斜锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年方法及应用[J]. 地质学报, 89(12): 2400-2418.
- 刘道荣. 2017. 浙西北地区萤石矿床成因及找矿方向[J]. 地质勘探, 53(5): 947-959.
- 刘良, 张安达, 陈丹玲, 杨家喜, 罗金海, 王超. 2007. 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, 14(1): 98-107.
- 吕博, 杨岳清, 孟贵祥, 严加永. 2011. 内蒙古东七—山碱长花岗岩的地球化学特征和成因[J]. 岩石矿物学杂志, 30(3): 543-552.
- 马中平, 李向民, 徐学义, 孙吉明, 唐卓, 杜涛. 2011. 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, 38(4): 1071-1078.
- 毛景文. 1997. 超大型钨多金属矿床成矿特殊性——以湖南柿竹园矿床为例[J]. 地质科学, 32(3): 351-363.
- 王吉平, 商朋强, 熊先孝, 杨辉艳, 唐尧. 2014. 中国萤石矿床分类[J]. 中国地质, 41(2): 315-325.
- 王吉平, 商朋强, 熊先孝, 杨辉艳, 唐尧. 2015. 中国萤石矿床成矿规律[J]. 中国地质, 42(1): 18-32.
- 王立社, 杨鹏飞, 段星星, 龙小平, 孙吉明. 2016. 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, 32(123): 759-774.
- 王联魁, 黄智龙. 2000. Li-F 花岗岩液态分离与实验[M]. 北京: 科学出版社, 1-290.
- 王强, 赵振华, 熊小林. 2000. 桐柏—大别造山带燕山晚期 A 型花岗岩的厘定[J]. 岩石矿物学杂志, 19(4): 297-306.
- 王艳丽, 祝新友, 刘志刚, 傅其斌. 2013. 广西栗木钨锡稀有金属矿床碱长花岗岩的厘定[J]. 华南地质与矿产, 29(1): 12-18.
- 王勇, 吕庆田, 孟贵祥, 严加永, 杨岳清, 赵金花. 2011. 内蒙东七—山碱长花岗岩及其成矿作用[J]. 地质学报, 83(10): 1505-1514.
- 吴才来, 雷敏, 吴迪, 张昕, 陈红杰, 李天啸. 2016. 南阿尔金古生代花岗岩 U-Pb 定年及岩浆活动对造山带构造演化的响应[J]. 地质学报, 90(9): 2276-2315.
- 吴镇平, 王梅英, 戚开静. 2007. A 型花岗岩研究现状及其综述[J]. 岩石矿物学杂志, 26(1): 57-66.
- 夏冬, 陈刚, 王君良, 刘洋, 罗照华, 刘亚楠, 曹江宇, 郑加行, 孙耀锋. 2021. 北山北部成矿带发现多处特富级萤石矿点[J]. 中国地质, 48(3): 968-969.
- 校培喜. 2003. 阿尔金山中段清水泉—茫崖蛇绿构造混杂岩带地质特征[J]. 西北地质, 36(2): 20-30.
- 徐兴旺, 李杭, 石福品, 姚佛军, 陈建中, 杨智全, 洪涛, 柯强. 2019. 阿尔金中段吐格曼地区花岗岩伟晶岩型稀有金属成矿特征与找矿预测[J]. 岩石学报, 35(11): 3303-3316.
- 杨文强, 刘良, 丁海波, 校培喜, 曹玉亭, 康磊. 2012. 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, 128(12): 4139-4150.
- 袁莹, 祝新友, 李顺庭, 程细音. 2014. 赣南淘锡坑钨矿碱长花岗岩厘定及意义[J]. 矿产勘查, 5(5): 767-772.
- 曾忠诚, 洪增林, 刘芳晓, 边小卫, 李琦, 高峰, 何元方, 菅坤坤. 2020. 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, 47(3): 569-589.
- 张建新, 孟繁聪, 于胜尧. 2010. 两条不同类型的 HP/LT 和 UHP 变质带对祁连—阿尔金早古生代造山作用的制约[J]. 岩石学报, 26(7): 1967-1992.
- 张若愚, 曾忠诚, 朱伟鹏, 陈宁, 赵江林, 李琦, 王秦伟, 饶静文. 2016. 阿尔金造山带帕夏拉依岩体锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及地质意义[J]. 地质论评, 62(5): 1283-1499.
- 周旭林, 秦雅静. 2020. 湖南宜章县界牌岭矿区萤石矿地质特征及矿床成因分析[J]. 矿产与地质, 34(1): 33-40.
- 朱江, 彭三国, 刘锦明. 2020. 西大别地区白垩纪灵山花岗岩基外围发现萤石矿点[J]. 中国地质, 47(2): 550-551.
- 祝新友, 王京彬, 王艳丽, 程细音, 何鹏, 傅其斌, 李顺庭. 2012. 南岭锡钨多金属矿区碱长花岗岩的厘定及其意义[J]. 中国地质, 39(2): 359-381.
- 邹灏, 方乙, 陈合毛, 肖广, 徐旃章. 2014. 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, 41(4): 1375-1386.