

东昆仑喀雅克登大型萤石矿床地质特征与成因分析： 来自 Sm-Nd 和 U-Pb 同位素及稀土元素地球化学的制约

王宗胜¹，张连昌^{2*}，张大明¹，张勇¹，林贵¹，李文^{2,3}

1.青海省第三地质勘查院，西宁 810029；

2.中国科学院地质与地球物理研究所，岩石圈演化与环境演变全国重点实验室，北京 100029

3.中国地质大学(北京)地球科学与资源学院，北京 100083

摘要：近年来青海东昆仑萤石找矿取得了重大突破。新发现的喀雅克登萤石矿床主要矿体主要均赋存于钾长花岗岩外接触带附近，受北西西和北西向断裂构造控制，赋矿围岩为金水口群大理岩与片麻岩；矿石主要呈块状、条带状、网脉状和角砾状构造；矿物组成以萤石、方解石和石英为主。但有关萤石矿床的成矿时代及形成机制尚缺少研究。本文通过同位素年代学和稀土元素地球化学分析等方法，重点研究了成矿时代、氧化还原条件及矿床成因。结果表明萤石 Sm-Nd 同位素年龄为 402 Ma，钾长花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 404 Ma，表明二者同期形成。同时，依据萤石稀土元素球粒陨石配分型式、Ce 和 Eu 异常特征和(Y/Ho-La/Ho)与(Tb/Ca-Tb/La)图解，说明该萤石矿床为热液成因，且具有同源同期成矿流体的特征，并与钾长花岗岩存在成因联系。依据上述研究结果进一步推测成矿物质 Ca 主要来自大理岩，F 主要来自钾长花岗岩，矿床形成于伸展构造背景下含矿流体沿断裂-裂隙系统的充填-交代作用。

关键词：萤石矿床；同位素年龄；稀土元素；矿床成因；东昆仑喀雅克登

中图分类号：P611.1；P619.21 收稿日期：2025-07-14

Characteristics and Genesis Analysis of the Large Fluorite Deposit in Kaiyadeng, East Kunlun: Constraints from Sm-Nd and U-Pb isotopes and geochemistry of rare earth elements

WANG Zongsheng, ZHANG Lianchang, ZHANG Daming, ZHANG Yong, LINGui, and LI Wen. Geological

WANG Zongsheng¹, ZHANG Lianchang^{2*}, ZHANG Daming¹, ZHANG Yong¹, LIN Gui¹, LI Wen^{2,3}

1. The Third Institute of Qinghai Geological Prospecting, Xining 810029

2. State Key Laboratory of Lithospheric and Environmental Coevolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

3. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

Abstract: In recent years, significant breakthroughs have been made in the exploration of fluorite deposits in the eastern Kunlun mountains of Qinghai Province. Main fluorite ore bodies in the newly discovered Kayakedeng deposit are mainly located near the outer contact zone of the K-feldspar granite and are controlled by the NW and NNW-trending faults. The host rocks are marble and gneiss of the Jinshuikou Group. The ores are mainly in the form of blocks, bands, vein-like and brecciated structure. The mineral composition of ore mainly consist of fluorite, calcite and quartz. However, there is still a lack of research on the mineralization age and formation mechanism of the

*基金项目：青海省第三地质勘查院院自筹科研项目：东昆仑西段萤石、钨锡、稀有金属矿成矿规律研究与靶区优选(编号：SKYZC-2022-006)和古特提斯东段碰撞造山地质过程与资源效应项目(编号：SKYZC-2024-001),以及国家重点研发计划项目(编号：2022YFC2903502)资助

第一作者：王宗胜，男，1989年生，高级工程师，矿产勘探专业。E-mail: 3413864571@qq.com

**通讯作者：张连昌，男，1959年生，博士，研究员，矿床学和地球化学专业。ORCID: 0000-0003-3509-1646; E-mail: lc Zhang@mail.iggcas.ac.cn

fluorite deposit. This paper, through methods of isotopic chronology and geochemical analyses of rare earth element, focuses on studying the ore-forming age, redox conditions and the genesis of the deposit. The results show that the Sm-Nd isotopic age of fluorite is 402 Ma, and the zircon U-Pb age of K-feldspar granite is 404 Ma, indicating that they were formed simultaneously. Furthermore, based on the chondrite-normalized rare earth element distribution pattern, the abnormal characteristics of Ce and Eu elements, as well as the diagrams of (Y/Ho-La/Ho) and (Tb/Ca-Tb/La), it is demonstrated that the fluorite deposit is of hydrothermal origin and has the characteristics of a synchronous and homogenous mineralizing fluids. It is speculated that the fluorite deposit has an etiological connection with the K-feldspar granite. Based on the above research results, it can be further suggested that the main source of the Ca is from marble, and F is mainly from K-feldspar granite. The deposit was formed under the extensional tectonic background, with the ore-bearing fluids filling and substituting along the fracture-vein system.

Keywords: Fluorite deposit; Isotopic age; Rare earth elements; Genesis of deposit; Kayakedeng of eastern Kunlun

0 引言

萤石在新能源、国防、医疗等产业中具有广泛应用，是重要的战略性矿产资源，主要用于工业中制造氢氟酸以及炼钢助熔剂，随着现代工业技术和科学技术的发展，萤石还用于大功率激光装置的部件和火箭燃料等(王吉平等, 2015; Redina et al., 2020; Haschke et al., 2021; 陈军元等, 2021)。自 2016 年萤石被列入我国 24 种战略性矿产目录之后，我国西北地区萤石矿产找矿工作取得重大进展，如几年前在新疆阿尔金地区发现了卡尔恰尔、小白河沟、库木塔什、盖吉克、皮亚孜达坂等多处大-中型萤石矿床(吴益平等, 2021; 高永宝等, 2023; 李月栋等, 2026)，近期在阿尔金的东邻青海地区也发现了多处大-中型萤石矿床。这表明西北地区已成为我国最重要的萤石矿产资源基地。

在青海新发现的格尔木市喀雅克登、德令哈市牙马和格尔木市大格勒沟 3 处萤石矿床(苏慧敏等, 2023)，其勘查程度目前均处于调查评价-普查阶段，工作程度低。喀雅克登萤石矿床位于东昆仑西段祁漫塔格山的中东部，东距格尔木市大约 400 km。该萤石矿是青海省第三地质勘查院在喀雅克登地区开展矿产调查评价期间(2020~2022)，通过 1:2.5 万氟异常查证发现的，初步圈定了萤石矿(化)带 12 条和萤石矿体 25 条。至目前仅对部分矿体的资源量进行了估算，求得萤石矿石总量近 700 万吨，CaF₂ 平均品位 44.62%。初步估计，经进一步的勘探该矿床将达到大型规模。

关于喀雅克登萤石矿床前人未做专门的研究，但有关区域地质、区域岩浆活动及相关金属矿产的地质特征尚有一定程度的涉及(谌宏伟等, 2006; 苏生顺等, 2014; 张勇等, 2014, 2016; 潘彤等, 2019; 张爱奎等, 2024)。在区域成矿地质背景、成矿条件和成矿规律研究的基础上，潘彤等(2019)和张爱奎等(2024)提出了该区域矿产资源评价的主攻矿种、矿床类型和找矿方向。2022~2024 年，青海省第三地质勘查院实施的“东昆仑西段萤石、钨锡、稀有金属矿成矿规律研究与靶区优选”项目，通过对该地区地质资料的收集整理和综合分析，以及对区域内矿床和矿点的调研，初步认为中晚志留世-中泥盆世碰撞后伸展构造背景下侵入的高分异花岗岩与萤石、钨锡及稀有稀土金属矿产可能存在一定成因联系。但具体各类萤石矿床的地质特征、形成时代及其主要控制因素等，还未得到详细和深入的研究。

本文以喀雅克登萤石矿床地质特征、萤石 Sm-Nd 同位素年代学、钾长花岗岩锆石 U-Pb 年龄、有关围岩及萤石的稀土元素地球化学特征等为主要研究内容,分析了该萤石矿床的基本类型、成矿年龄、成矿物质来源、主要控矿因素及其成因,这可为区域成矿规律的总结和指导区域萤石矿产的找矿预测提供重要支撑。

1 区域地质背景

喀雅克登萤石矿床位于青藏高原东北部、东昆仑昆中岩浆弧北侧的喀雅克登塔格地区(苏生顺等, 2014; 张勇等, 2014。图 1a)。区域出露地层主要包括下元古界金水口群、蓟县系狼牙山组、奥陶系祁漫塔格群、上泥盆统牦牛山组、上石炭统缩敖苏组、下-中二叠统打柴沟组及上三叠统鄂拉山组。其中下元古界金水口群出露面积大约 100 km², 构成区域内最古老的变质结晶基底, 根据其岩石组合和分布特征, 将该套变质地层划分为片麻岩和大理岩两个岩性组。

区域断裂构造发育, 昆北断裂及昆中断裂贯穿全区, 其中昆北断裂是位于东昆仑山前的一条区域性北西西-东西向断裂, 西起祁漫塔格西南, 东经格尔木、诺木洪, 至香日德山前地带, 该断裂西端被阿尔金断裂所截。昆中断裂分布于昆中构造带的南侧, 具有明显的多期活动特征, 糜棱岩类构造岩及挤压片理发育, 发育 S-C 组构、旋转碎斑等显微组构, 该断裂早期活动可能在晚元古代就已开始, 经加里东期、海西期、印支期又发生了多期活动(殷鸿福和张克信, 1997; 刘永乐等, 2024)。

区域岩浆活动频繁, 经历了华力西期、印支期、燕山期等构造旋回, 岩石类型多样, 从基性到中酸性岩均有出露。早古生代侵入岩分布最为广泛, 主要岩性有钾长花岗岩、二长花岗岩、黑云母花岗岩、花岗闪长岩等。喀雅克登地区主要分布一杂岩体, 其出露面积约为 386 km²。该杂岩体总体呈北西西-南东东向展布, 岩石类型包括辉长岩、闪长岩、石英闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩和钾长花岗岩等。杂岩体中辉长岩锆石 U-Pb 年龄(403.3±7.2 Ma)表明东昆仑在早泥盆世已处于造山后伸展阶段(谌宏伟等, 2006), 该年龄基本限定了加里东旋回在东昆仑地区的结束时间。

区域上分布的矿产主要有铁、铅锌、铜、金、钨锡和萤石等, 其成因类型包括热液型、矽卡岩型、火山沉积-改造型和沉积型等(张勇等, 2014)。其中金水口群大理岩与早泥盆世花岗岩接触带附近形成的矽卡岩型铁、锌矿, 与早泥盆世花岗岩有关的岩浆热液型钨锡矿和热液型萤石矿是主要矿床类型。

2 矿床地质特征

2.1 矿区地层、岩浆活动与构造特征

喀雅克登萤石矿区出露地层主要为下元古界金水口群片麻岩组和大理岩组和上三叠统鄂拉山组(图1b)。金水口群片麻岩组岩性主要为二云斜长片麻岩、二云二长片麻岩、斜长角闪片麻岩及少量灰白色大理岩; 大理岩组岩性主要为灰白色大理岩、白云石大理岩及硅化大理岩。上三叠统鄂拉山组岩性主要为火山角砾岩和英安质凝灰岩。萤石矿体主要赋存于金水口群大理岩与片麻岩接触带, 大理岩为主要赋矿岩石。大理岩呈灰白色, 粒状变晶结构, 块

状和条带状构造(图2a), 矿物成分白云石占65%~80%, 石英占10%, 铁质矿物较少。近矿大理岩多具硅化、萤石化蚀变, 可见热液石英或方解石细脉穿插其中(图2b-d)。

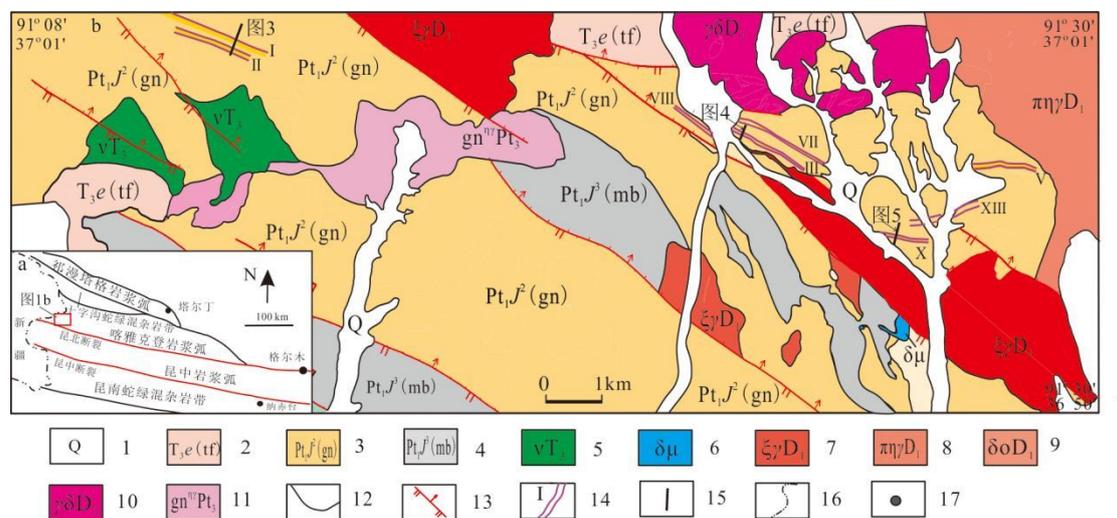


图1 东昆仑喀雅克登萤石矿床大地构造位置图(a)及地质简图(b)

Fig.1 Geotectonic location map (a) and geological sketch (b) of the Kayakedeng fluorite deposit in eastern Kunlun

1-第四系; 2-上三叠统鄂拉山组; 3-下元古界金水口群片麻岩组(含薄层大理岩); 4-下元古界金水口群大理岩组; 5-三叠纪辉长岩; 6-闪长岩; 7-早泥盆世钾长花岗岩; 8-早泥盆世二长花岗斑岩; 9-早泥盆世闪长玢岩; 10-早泥盆世花岗闪长岩; 11-新元古界片麻状花岗岩; 12-地质界线; 13-逆断层; 14-萤石矿带及其编号; 15-地质勘探线; 16-省界; 17-地名

矿区内岩浆活动发育, 可见新元古代、泥盆纪和三叠纪岩浆岩, 岩石类型复杂多样, 从基性到中酸性岩均有出露(图1b)。中酸性侵入岩在区域中西部及东部最为发育, 出露面积约占总面积的30%, 多呈岩基或岩株状产出。其中早泥盆世二长花岗岩和钾长花岗岩在矿区东部大面积出露, 早泥盆世钾长花岗岩和三叠纪辉长岩在矿区西北部和西部局部出露(图1b)。

矿区与萤石矿化最为密切的是钾长花岗岩, 该钾长花岗岩呈肉红色, 细粒块状构造, 半自形粒状结构(图2e-g)。组成岩石的主要矿物为钾长石(50%)、石英(30%)、斜长石(10%)、白云母和黑云母(5~8%), 含少量榍石、磷灰石、锆石等副矿物。钾长石呈半自形-它形板状, 均匀分布, 主要为条纹长石, 颗粒大小在0.10 mm~1.05 mm之间。石英呈它形粒状, 颗粒大小在0.05mm~0.90 mm之间, 镶嵌分布于长石颗粒间。

区内构造发育, 以北西向、北西向西向断裂构造为主, 局部发育近东西向断裂, 其中北西向西向、近东西向断裂带是矿区内萤石矿体的主要容矿构造, 带内常见构造角砾岩和矿化角砾岩(图2h-i)。

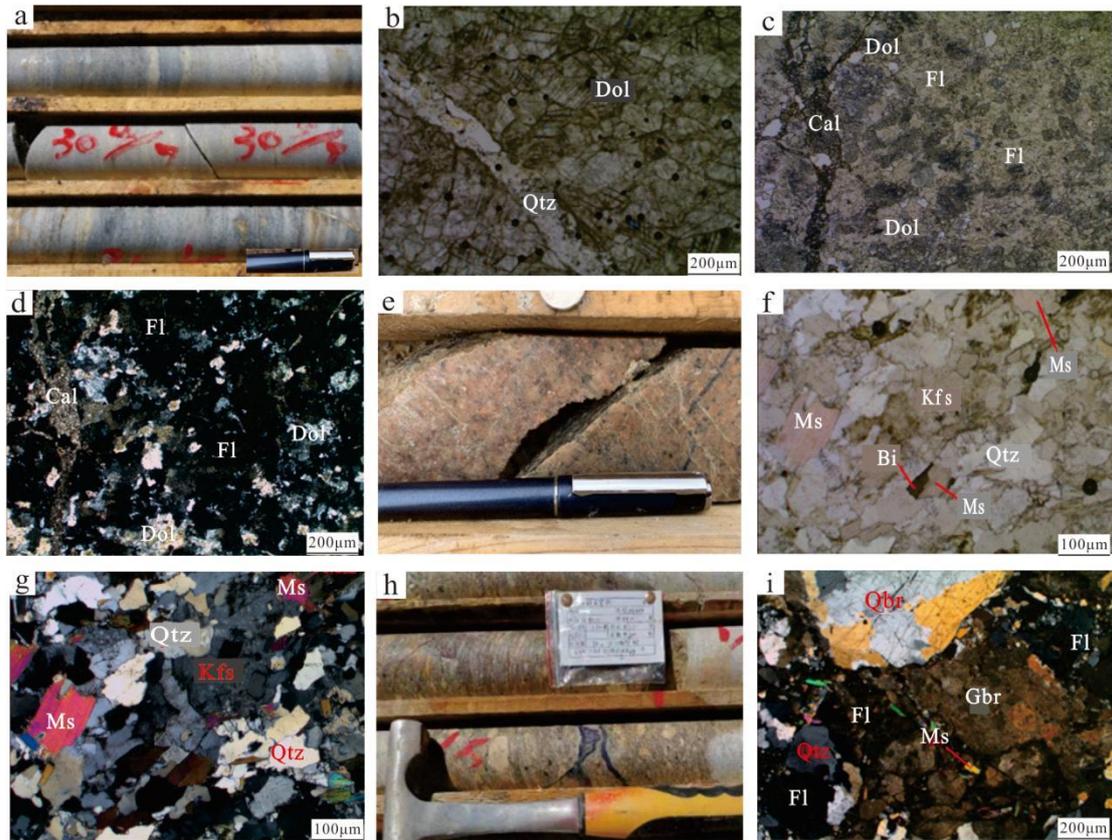


图 2 喀雅克登萤石矿区容矿围岩及其矿化特征照片

Fig.2 Photos of the host rock and its mineralization characteristics in the Kayakedeng deposit

a-白云石大理岩(钻孔岩芯); b-白云石大理岩(见石英细脉)(-); c-萤石矿化大理岩(见方解石脉)(-); d-萤石矿化白云石大理岩(+); e-钾长花岗岩(钻孔岩芯); f-钾长花岗岩(-); g-钾长花岗岩(+); h-构造角砾岩(钻孔岩芯); i-萤石矿化角砾岩(+).

(Dol-白云石; Cal-方解石; Fl-萤石; Qtz-石英; Ms-白云母; Bi-黑云母; Kfs-钾长石; Gbr-花岗岩角砾; Qbr-石英岩角砾)

2.2 矿带与矿体特征

矿区内圈出萤石矿带 12 条, 矿带一般长 200~4500 m, 宽 5~60 m, 其中北西走向的 8 条, 北西向 3 条, 近东西向 1 条。矿带主要受断裂构造控制或沿片麻岩与大理岩的接触带(近大理岩一侧)分布。已发现的萤石矿体在矿带内断续出露, 多呈似层状、脉状产出, 赋矿岩性多为大理岩, 少数产于大理岩与二云二长片麻岩接触带上(图 1b)。矿区内共圈出萤石矿体 25 条, 一般矿体长 200~1400 m, 厚度 0.71~22.59 m, 萤石矿体沿走向和倾向均呈分段富集的特征。萤石主要呈浅紫色、紫色和白色, 少量绿色, 呈块状、条带状、脉状和浸染状分布, 单工程 CaF_2 含量为 15.11%~96.59%, 矿体平均品位为 44 %。

I-II 矿带位于矿区最西段(图 1b), 其中 II-1 萤石矿体产于 II 矿带中(图 3), 呈脉状分布, 矿体走向 $105^\circ\sim 110^\circ$, 北东倾向, 倾角 $48^\circ\sim 65^\circ$ 。控制长度 1250 m, 厚度 0.88~17.70 m, 地表平均厚度 4.99 m, CaF_2 品位 20.11%~60.01 %, 平均品位 45.60 %, 控制斜深 120 m, 容矿岩性以大理岩为主。萤石常呈紫色和浅紫色, 块状、条带状和角砾状构造, 自形-半自形粒状结构, 粒度 1.00~2.00 mm, 矿石类型为石英-萤石型和方解石-萤石型。

III 矿带位于矿区中东段(图 1b), 其中 III-1 萤石矿体(图 4), 长 1350 m, 厚 0.71~11.14 m, 平均厚 3.49 m, 最大控制斜深 332 m。 CaF_2 品位 43.56%~79.88 %, 平均品位 51.79 %。含矿

岩性为白云石大理岩、二云二长片麻岩，以白云石大理岩为主，片麻岩中矿化相对较弱。萤石以紫色、深紫色和绿色为主，少量白色、浅绿色，呈块状、脉状和浸染状构造，自形-半自形粒状结构，粒度 1.00~3.00 mm，矿石类型以石英-萤石型和方解石-萤石型为主。

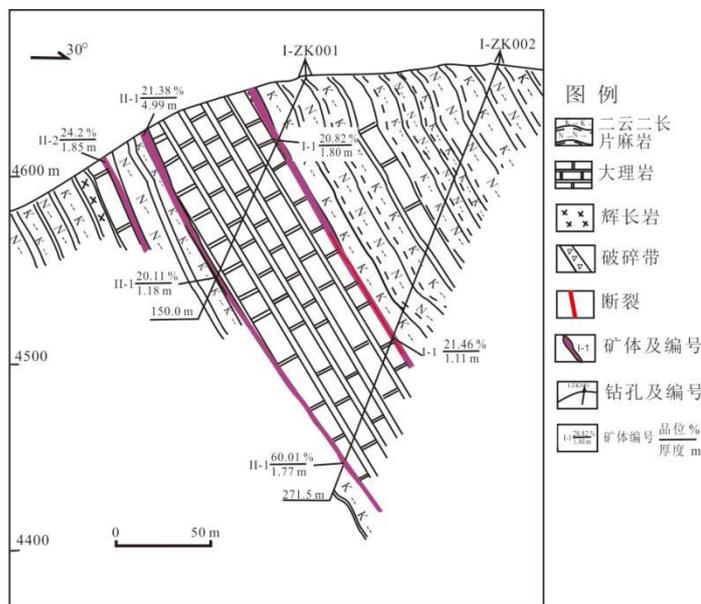


图 3 喀雅克登矿区 I-II 矿带 0 勘探线剖面图

Fig.3 Sectional map of No. 0 exploration line of I-II ore belt in the Kayakedeng deposit

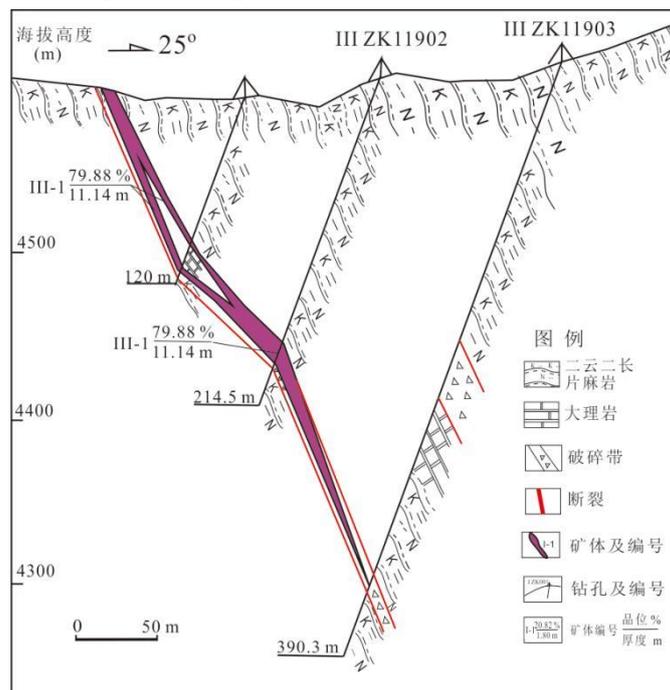


图 4 喀雅克登萤石矿区 III 矿带 119 勘探线剖面图

Fig.4 Sectional map of No. 119 exploration line of III ore belt in the Kayakedeng deposit

X矿带位于矿区东段(图1b)，其中X-1萤石矿体(图5)呈脉状分布，走向100°~105°，北东倾向，倾角30°~58°，矿体长度430 m，最大控制斜深125 m，厚度1.22~2.87 m，平均厚度 2.17m，CaF₂品位为21.96%~54.02%。该矿体赋存于金水口群大理岩与片麻岩接触带，萤石呈紫色、

浅紫色和绿色，自形-半自形粒状结构，粒度1.00~2.50 mm。萤石呈块状、团块状、条带状和脉状构造。围岩较破碎，蚀变类型主要为硅化、碳酸盐化、绿泥石化。矿石类型以石英-萤石型和方解石-萤石型为主。

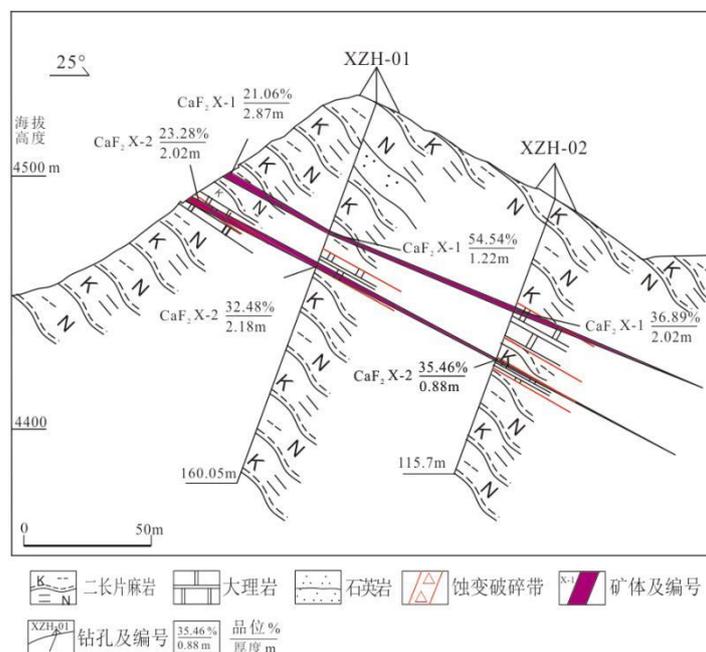


图 5 喀雅克登萤石矿区 X 矿带 0 勘探线剖面图

Fig.5 Sectional map of No. 0 exploration line of X ore belt in the Kayakedeng deposit

2.3 矿石特征

喀雅克登萤石矿床矿石中的矿物组成比较简单，以萤石、方解石和石英为主(图 6a-i)。萤石以浅紫色、紫色(图 6a)和白色为主，少量呈绿色(图 6b)和粉红色，半自形-它形粒状结构，粒径 0.50~2.50 mm(图 6c, g)；萤石与方解石、石英密切共生，二者空间上互为消长关系；萤石在显微镜下单偏光为负突起(图 6c, g)，正交为全消光(图 6e, h)，多分布于方解石、石英矿物颗粒之间。方解石是常见的脉石矿物，主要为白色，少量呈无色透明，玻璃光泽，呈不规则粒状结构，粒径为 0.20~2.00 mm(图 6f)；偏光镜下闪突起明显，部分颗粒可见双晶。石英以白色、乳白色、烟灰色为主，油脂光泽，贝壳状断口；呈不规则粒状结构，粒径为 0.30~1.50 mm，常与萤石组成条带状构造(图 6d-e)，部分呈细粒-隐晶质集合体分布(图 6e)。

萤石构造以块状(图 6a-c)和条带状(图 6d-e)为主，次为网脉状(图 6i)和角砾状(图 2i)。其中块状构造，主要组成矿物为萤石，少量方解石或石英，萤石以半自形-它形粒状结构为主，偶见立方体晶形；块状矿石以紫色-深紫色为主，品位较高， CaF_2 含量可达 75% 以上。条带状构造以 IV、V 矿带最为典型，由白色萤石与石英或方解石组成条带状，单条带宽 5~15 mm 不等， CaF_2 含量 30%~50%。网脉状构造的萤石多穿插于块状或条带状矿石及围岩中，一般发育于矿体顶底板。角砾状构造在 I 矿带、III 矿带和 IV 矿带中少量分布，常见花岗岩和石英岩角砾被晚期热液萤石、方解石和石英脉胶结(图 2h-i)。

2.4 围岩蚀变与成矿阶段

矿区内萤石矿体主要赋存于北西西向、近东西向次级断裂构造带中，矿化程度沿断裂两侧不对称分布。热液蚀变由内向外依次为硅化、萤石矿化、碳酸盐化。其中碳酸盐化和萤石

矿化最发育，部分围岩萤石矿化强烈，可构成工业矿体。地表多见黄褐、灰白色褐铁矿化和高岭土化蚀变带。

结合矿石结构构造、矿脉穿插关系及围岩蚀变特征，可将成矿过程划分为 3 个阶段：

第 1 阶段(图 6a-c)，主要是形成块状构造的萤石 (F1-I)，以紫色-深紫色为主，含少量石英或方解石，品位较高。

第 2 阶段(图 6d-e)，条带状萤石为主 (F1-II)，由白色石英或方解石与白色或浅紫色萤石组成条带状构造。

第 3 阶段(图 6i)，主要为网脉状构造的萤石 (F1-III)，萤石与方解石组成细网脉穿插分布于前期块状或条带状矿石中、或角砾状围岩中。

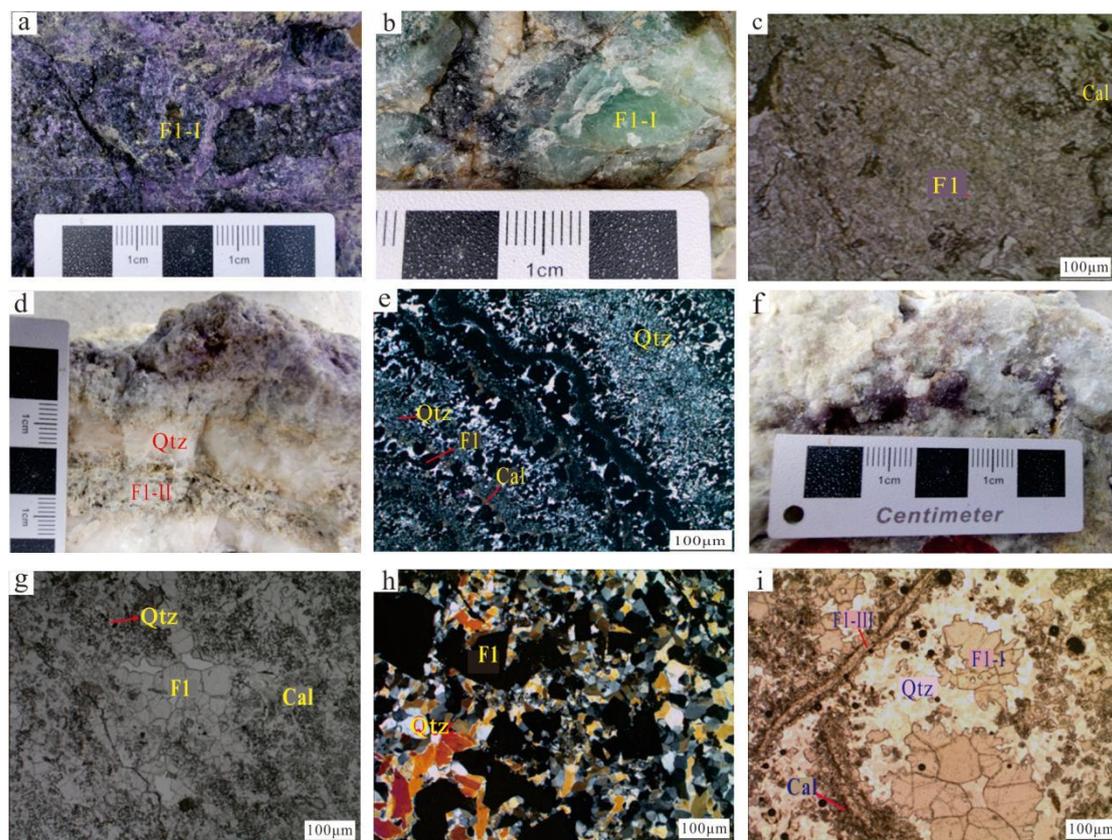


图 6 喀雅克登萤石矿床主要矿石标本及其显微照片

Fig. 6 Photos of the samples and micrograph in the Kayakedeng deposit

a-块状紫色萤石；b-块状绿色萤石；c-块状矿石显微照片(—)；d-石英与萤石组成条带状矿石；e-由石英和萤石组成的条带状矿石显微照片(+); f-方解石-萤石组成的块状矿石；g-方解石-萤石组成的块状矿石显微照片(+); h-石英-萤石矿脉显微照片(+); i-石英-萤石矿脉被后期方解石-萤石细脉穿插(—)

(Cal-方解石；F1-萤石，F1-I, F1-II 和 F1-III 分别代表第 I、II 和 III 阶段的萤石；Qtz-石英)

3 采样与分析方法

为获得主成矿阶段萤石的形成时代，本文采集了 III 和 X 号矿带中紫色-深紫色块状构造的萤石(图 6a 和 b)。Sm-Nd 同位素组成测试在中国地质调查局天津地质调查中心完成，仪器为 TRITON 热电离子质谱仪。整个分析过程用 BCR-2 标准物质分别对全流程和仪器进行

质量监控。BCR-测定值分别为 $Sm=6.559 \times 10^{-6}$ 、 $Nd=28.69 \times 10^{-6}$ 、 $^{143}Nd/^{144}Nd=0.512633 \pm 30$ 。

为了验证 Sm-Nd 等时线年龄的可靠性和论证萤石矿体与钾长花岗岩的关系，本次还采集了 III 矿带南侧的一件代表性钾长花岗岩的锆石 U-Pb 年龄样。用于锆石 U-Pb 年龄测试的样品经人工破碎后分选出锆石单矿物，制靶后进行阴极发光及透反射照相，根据 CL 图像选取测试点位后上机测试。锆石 U-Pb 测年在中国地质调查局天津地质调查中心完成，采用 193 nm ArF 准分子激光剥蚀进样系统(型号为 Resolution LR)，剥蚀束斑大小 29 μm ，剥蚀频率为 7Hz，激光能量密度为 3J/cm²；锆石 U-Pb 测试质谱检测系统为电感耦合等离子体质谱仪(型号为 Agilent 790)。锆石 U-Pb 年龄谐和图采用 Isoplot/Ex_ver 3 软件绘制(Ludwig, 2003)。

为了探讨萤石矿床的成因、萤石与围岩变质岩和花岗岩的成因联系，本文对该萤石矿床的代表性矿体、大理岩和钾长花岗岩分别采集了稀土元素分析样品。所有样品均采自钻孔岩芯，保证样品新鲜和无次生蚀变。所有样品的稀土元素分析测试在北京燕都中实测试技术有限公司完成。分析过程中首先将200目粉末样品称量，置入聚四氟乙烯溶样罐后加入HF + HNO₃溶液，在干燥箱中将高压消解罐保持在190℃温度持续72小时，后取出溶样罐使用ICP-MS上机测试。所测数据根据监控标样GSR-2显示误差小于5%，极低含量元素的分析误差小于10%。

4 分析结果

4.1 萤石 Sm-Nd 等时线年龄

采自喀雅克登萤石矿区 III 和 X 号矿带 5 件萤石样品的 Sm 含量为 $1.527 \times 10^{-6} \sim 4.185 \times 10^{-6}$ ，Nd 含量为 $2.630 \times 10^{-6} \sim 5.120 \times 10^{-6}$ ， $^{147}Sm/^{144}Nd$ 值为 0.1955~0.2843， $^{143}Nd/^{144}Nd$ 值为 0.512335~0.512565(表 1)。利用 Isoplot 软件(Ludwig, 2003)计算，萤石的 Sm-Nd 等时线年龄为 402 ± 19 Ma (MSWD=0.80) (图 7)，其中 $^{143}Nd/^{144}Nd$ 初始值为 0.511814 ± 0.00003 ，同时获得的 ϵ_{Nd} 值为-5.9。

表 1 喀雅克登矿床萤石 Sm-Nd 同位素组成

Table 1 Sm-Nd isotopic composition of fluorites from Kayakedeng deposit

样品 编号	质量分数		同位素原子比率*			
	Sm (10^{-6})	Nd (10^{-6})	$^{147}Sm/^{144}Nd$	2 σ	$^{143}Nd/^{144}Nd$	2 σ
KY1	3.243	5.120	0.2547	0.05	0.512485	0.0012
KY2	2.334	2.630	0.1955	0.05	0.512335	0.0020
KY3	1.527	4.070	0.2843	0.05	0.512565	0.0014
KY4	2.600	4.290	0.2354	0.05	0.512433	0.0018
KY5	4.185	3.270	0.2125	0.05	0.512369	0.0022

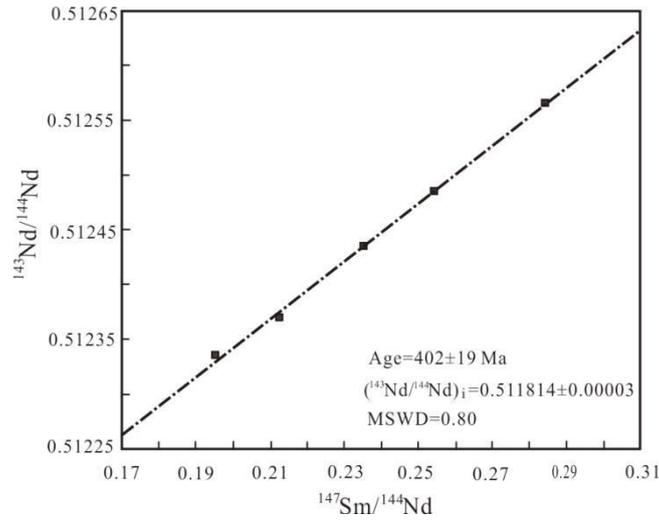


图 7 喀雅克登矿床萤石 Sm-Nd 同位素等时线年龄

Fig.7 Sm-Nd isochron age of fluorites from Kayakedeng deposit

4.2 花岗岩锆石 U-Pb 年龄

采自矿区 III 号矿带南侧钾长花岗岩样品 IKYCN-1 中的锆石均以自形-半自形粒状为主，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 8a)。锆石 U、Th 含量测试表明，样品锆石 U 含量为 80×10^{-6} ~ 558×10^{-6} ，Th 含量为 32×10^{-6} ~ 399×10^{-6} ，Th/U 值为 0.20~0.62(平均 0.45)，显示出岩浆锆石的特点(表 2)。37 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 $404.4 \pm 1.3 \text{ Ma}$ (图 8b)，代表了岩浆结晶年龄，表明其形成于早泥盆世。

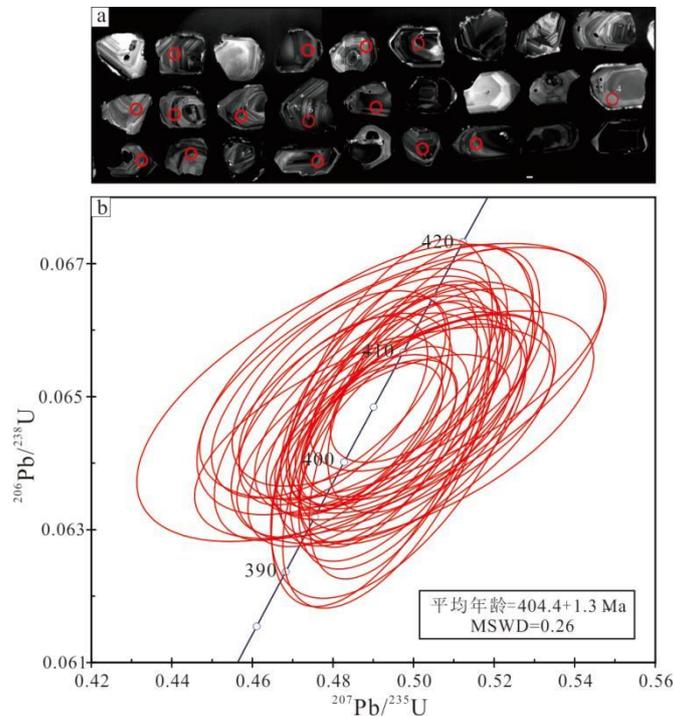


图 8 钾长花岗岩锆石 CL 图(a)和 U-Pb 同位素年龄图(b)

Fig. 8 Zircon CL images (a) and U-Pb age diagram (b) of K-feldspar granite from the Kayakedeng deposit

4.3 稀土元素分析结果

采自萤石和围岩样品的稀土元素测试结果(表 3), 表明金水口群大理岩稀土元素总量 ΣREE 值为 $(1.45\sim 13.5)\times 10^{-6}$, 轻稀土 LREE 值为 $(1.21\sim 11.1)\times 10^{-6}$, 重稀土 HREE 值为 $(0.24\sim 3.32)\times 10^{-6}$, 轻重稀土比值 LREE/HREE 为 1.74~6.78, $(\text{Eu}/\text{Eu}^*)_{\text{N}}$ 值为 0.43~0.63, $(\text{Ce}/\text{Ce}^*)_{\text{N}}$ 值为 0.80~0.96。可见金水口群大理岩具有较低的稀土总量、轻重稀土分异较明显和较明显的 Eu 负异常。钾长花岗岩稀土总量 ΣREE 值为 $(95.4\sim 202)\times 10^{-6}$, 轻稀土 LREE 值为 $(70.7\sim 167)\times 10^{-6}$, 重稀土 HREE 值为 $(22.3\sim 55.5)\times 10^{-6}$, 轻重稀土比值 LREE/HREE 为 2.19~5.22, $(\text{Eu}/\text{Eu}^*)_{\text{N}}$ 值为 0.04~0.25, $(\text{Ce}/\text{Ce}^*)_{\text{N}}$ 值为 0.88~1.12。可见该钾长花岗岩具有较高的稀土总量、轻重稀土分异不明显和明显的 Eu 负异常。

喀雅克登矿床萤石稀土元素总量 ΣREE 值为 $(3.59\sim 70.0)\times 10^{-6}$, 轻稀土 LREE 值为 $(2.31\sim 61.6)\times 10^{-6}$, 重稀土 HREE 值为 $(1.28\sim 12.1)\times 10^{-6}$, 轻重稀土比值 LREE/HREE 为 0.83~7.33。 $(\text{Eu}/\text{Eu}^*)_{\text{N}}$ 值为 0.22~0.49, $(\text{Ce}/\text{Ce}^*)_{\text{N}}$ 值为 0.88~0.98。总体看, 喀雅克登矿床萤石稀土总量介于大理岩与钾长花岗岩之间、有一定程度的轻重稀土分异和较明显的 Eu 负异常。

表 2 喀雅克登矿区钾长花岗岩(IKYCN1)锆石 U-Pb 同位素组成及年龄

Table. 2 zircon U-Pb isotopic data of K-feldspar granite (IKYCN1) in Kayakedeng deposit

样品号	含量(10^{-6})		比值	同位素比值						年龄(Ma)					
	Th	U		Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$
IKYCN1.01	399	500	0.80	0.0550	0.0023	0.4975	0.0110	0.0650	0.0007	413	93	410	7	406	4
IKYCN1.02	164	247	0.66	0.0552	0.0029	0.4902	0.0182	0.0645	0.0007	419	117	405	12	403	4
IKYCN1.03	143	255	0.56	0.0547	0.0010	0.4864	0.0085	0.0644	0.0004	398	36	402	6	402	3
IKYCN1.04	68	108	0.63	0.0546	0.0020	0.4885	0.0138	0.0647	0.0007	394	83	404	9	404	5
IKYCN1.05	190	558	0.34	0.0558	0.0008	0.4965	0.0092	0.0645	0.0009	443	30	409	6	403	5
IKYCN1.06	73	241	0.30	0.0537	0.0025	0.4789	0.0119	0.0650	0.0006	367	104	397	8	406	4
IKYCN1.07	80	137	0.58	0.0551	0.0032	0.4973	0.0206	0.0654	0.0008	417	131	410	14	408	5
IKYCN1.08	104	199	0.52	0.0546	0.0012	0.4847	0.0106	0.0642	0.0006	398	53	401	7	401	4
IKYCN1.09	52	96	0.54	0.0544	0.0020	0.4892	0.0133	0.0651	0.0007	387	81	404	9	407	4
IKYCN1.10	122	235	0.52	0.0535	0.0010	0.4801	0.0096	0.0648	0.0006	350	43	398	7	405	4
IKYCN1.11	377	296	1.27	0.0550	0.0018	0.4932	0.0105	0.0641	0.0009	409	69	407	7	401	6
IKYCN1.12	53	120	0.44	0.0563	0.0013	0.4997	0.0115	0.0644	0.0007	465	56	412	8	403	4
IKYCN1.13	76	178	0.43	0.0561	0.0026	0.5005	0.0181	0.0645	0.0007	454	110	412	12	403	4
IKYCN1.14	58	118	0.49	0.0561	0.0011	0.5050	0.0107	0.0652	0.0008	457	44	415	7	407	5
IKYCN1.15	75	171	0.44	0.0553	0.0011	0.4904	0.0096	0.0643	0.0006	433	38	405	7	401	4
IKYCN1.16	116	196	0.59	0.0553	0.0019	0.4941	0.0122	0.0644	0.0005	433	76	408	8	402	3
IKYCN1.17	126	362	0.35	0.0549	0.0009	0.4900	0.0085	0.0645	0.0004	409	42	405	6	403	3
IKYCN1.18	66	169	0.39	0.0559	0.0012	0.4998	0.0110	0.0648	0.0005	456	48	412	7	405	3
IKYCN1.19	59	135	0.43	0.0551	0.0012	0.4961	0.0111	0.0652	0.0008	417	48	409	8	407	5
IKYCN1.20	275	470	0.59	0.0551	0.0008	0.4936	0.0091	0.0647	0.0008	417	36	407	6	404	5
IKYCN1.21	147	335	0.44	0.0544	0.0008	0.4880	0.0086	0.0649	0.0007	387	35	404	6	405	4
IKYCN1.22	95	226	0.42	0.0536	0.0020	0.4801	0.0121	0.0645	0.0007	367	53	398	8	403	4
IKYCN1.23	125	328	0.38	0.0555	0.0010	0.4958	0.0108	0.0646	0.0009	432	41	409	7	404	5
IKYCN1.24	46	103	0.40	0.0542	0.0015	0.4879	0.0135	0.0653	0.0007	389	61	403	9	408	4
IKYCN1.25	32	80	0.39	0.0544	0.0031	0.4893	0.0237	0.0651	0.0009	391	126	404	16	406	6
IKYCN1.26	182	567	0.32	0.0550	0.0008	0.4922	0.0112	0.0646	0.0011	413	33	406	8	404	7

IKYCN1.27	173	341	0.51	0.0559	0.0015	0.4998	0.0116	0.0646	0.0007	456	59	412	8	404	4
IKYCN1.28	132	287	0.46	0.0540	0.0020	0.4853	0.0089	0.0646	0.0006	372	83	402	6	403	3
IKYCN1.29	196	515	0.38	0.0555	0.0009	0.4962	0.0101	0.0644	0.0008	435	40	409	7	402	5
IKYCN1.30	51	175	0.29	0.0555	0.0013	0.4993	0.0126	0.0650	0.0007	432	47	411	9	406	4
IKYCN1.31	44	120	0.37	0.0562	0.0014	0.5030	0.0126	0.0648	0.0006	461	25	414	9	405	3
IKYCN1.32	132	331	0.40	0.0555	0.0014	0.5016	0.0091	0.0652	0.0005	432	56	413	6	407	3
IKYCN1.33	79	165	0.48	0.0559	0.0014	0.5006	0.0142	0.0645	0.0007	450	54	412	10	403	4
IKYCN1.34	99	134	0.74	0.0559	0.0014	0.5033	0.0118	0.0653	0.0006	450	56	414	8	407	3
IKYCN1.35	73	138	0.53	0.0545	0.0016	0.4887	0.0115	0.0647	0.0006	391	67	404	8	404	4
IKYCN1.36	210	370	0.58	0.0552	0.0015	0.4971	0.0133	0.0646	0.0011	420	59	410	9	404	7
IKYCN1.37	73	180	0.41	0.0534	0.0029	0.4880	0.0171	0.0653	0.0008	343	122	404	12	408	5

备注: (1)表中所列误差均为 1σ ; (2)1-37 号点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值 $404.4\pm 1.3\text{ Ma}$.

表 3 喀雅克登矿床大理岩、萤石及钾长花岗岩稀土元素组成 (10^{-6})

Table.3 Rare earth element data of fluorites, marble and K-feldspar granite from the Kayakedeng deposit

样品	样号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE	LREE/HREE	δCe	δEu	
大理岩	KB02	0.32	0.51	0.07	0.25	0.05	0.01	0.05	0.01	0.06	0.01	0.03	0.01	0.06	0.01	0.41	1.45	5.04	0.80	0.60	
	KB03	1.04	2.37	0.35	1.42	0.51	0.10	0.69	0.18	1.09	0.20	0.48	0.09	0.52	0.07	8.61	9.11	1.74	0.96	0.52	
	KB04	0.48	0.81	0.09	0.37	0.07	0.01	0.07	0.01	0.07	0.01	0.04	0.01	0.05	0.01	0.55	2.10	6.78	0.89	0.43	
	KB05	0.43	0.65	0.08	0.32	0.07	0.01	0.07	0.01	0.08	0.01	0.03	0.01	0.05	0.01	0.64	1.83	5.82	0.80	0.43	
	KB07	2.61	4.63	0.58	2.48	0.62	0.13	0.64	0.13	0.76	0.13	0.34	0.05	0.35	0.04	5.32	13.49	4.53	0.88	0.63	
	KB08	1.49	2.71	0.34	1.28	0.24	0.05	0.24	0.05	0.28	0.06	0.16	0.03	0.16	0.02	2.57	7.11	6.11	0.90	0.63	
	KB09	1.82	3.39	0.44	1.81	0.36	0.06	0.35	0.06	0.39	0.07	0.21	0.03	0.18	0.03	3.00	9.20	5.97	0.90	0.51	
	萤石	KB12	0.72	1.78	0.34	1.72	0.90	0.06	0.70	0.21	1.28	0.18	0.40	0.07	0.44	0.05	8.65	8.85	1.66	0.88	0.22
		KB13	1.21	2.94	0.49	2.55	1.02	0.22	2.00	0.66	4.09	0.54	1.30	0.20	1.20	0.13	30.1	18.6	0.83	0.94	0.46
KB14		2.67	5.56	0.76	2.78	0.98	0.13	0.96	0.29	1.96	0.32	0.85	0.17	1.08	0.15	10.9	18.7	2.23	0.94	0.40	
KB15		0.45	0.94	0.15	0.54	0.21	0.02	0.21	0.07	0.48	0.08	0.19	0.03	0.19	0.03	3.03	3.59	1.80	0.88	0.29	
KB16		5.94	11.45	1.47	5.28	1.82	0.14	1.86	0.45	2.22	0.32	0.67	0.10	0.52	0.07	17.0	32.3	4.20	0.92	0.23	
KB17		5.04	11.92	1.75	6.42	1.98	0.17	2.67	0.84	4.75	0.62	1.44	0.23	1.38	0.17	18.7	39.4	2.25	0.98	0.23	
KB18		3.26	6.90	0.93	3.76	1.29	0.20	1.18	0.33	2.23	0.41	1.23	0.24	1.62	0.21	12.0	23.8	2.19	0.96	0.49	
KB19		1.22	3.07	0.48	2.00	0.72	0.11	0.74	0.23	1.66	0.30	0.90	0.18	1.24	0.17	7.13	13.0	1.40	0.98	0.46	
KB20		14.32	27.35	3.53	12.94	3.17	0.30	2.30	0.56	2.83	0.47	1.07	0.14	0.93	0.11	24.6	70.0	7.33	0.92	0.32	
钾长花岗岩		KB29	15.14	29.79	4.44	16.61	4.33	0.35	4.15	1.08	7.74	1.53	4.27	0.77	4.61	0.57	51.5	95.4	2.86	0.88	0.25
	KB31	16.96	40.59	5.88	23.83	6.70	0.09	6.37	1.53	11.00	1.94	5.62	1.09	6.78	0.91	71.2	129	2.67	0.99	0.04	
	KB32	19.53	47.17	6.49	22.98	6.13	0.33	5.14	1.27	7.83	1.27	3.12	0.55	2.75	0.35	43.3	125	4.61	1.02	0.17	
	KB33	26.96	67.00	7.75	32.17	7.94	0.14	7.28	1.72	12.19	2.29	6.69	1.19	7.25	0.98	77.2	181	3.59	1.12	0.06	
	KB34	22.12	52.39	7.54	30.32	9.09	0.09	9.54	2.50	16.41	3.24	9.22	1.68	11.46	1.42	111	177	2.19	0.99	0.03	
	KB35	28.08	67.76	7.64	30.70	6.73	0.16	5.97	1.26	7.62	1.45	4.21	0.78	5.07	0.66	47.3	168	5.22	1.11	0.08	
	KB36	32.84	79.22	9.12	37.51	8.19	0.16	7.11	1.55	10.37	1.82	5.34	1.04	6.60	0.87	64.0	202	4.81	1.10	0.06	
	KB37	23.68	54.16	7.12	26.92	6.31	0.14	5.49	1.18	7.30	1.42	4.12	0.76	5.03	0.65	50.8	144	4.56	1.01	0.07	
KB38	25.09	60.21	7.77	30.12	7.55	0.14	7.15	1.70	12.14	2.38	6.81	1.16	7.36	0.99	81.6	171	3.30	1.05	0.06		

注: 稀土元素球粒隕石标准化采用 Sun and McDonough (1989)

$$\delta\text{Eu} = 2\text{Eu}_N / (\text{Sm}_N + \text{Gd}_N), \quad \delta\text{Ce} = 2\text{Ce}_N / (\text{La}_N + \text{Pr}_N)$$

5 讨论

5.1 成矿时代

由于 Sm 和 Nd 的化学性质非常接近, ^{147}Sm 衰变形成的子体 ^{143}Nd 易于保留在矿物矿物晶格中; 同时 Sm-Nd 同位素系统易于封闭, 抵御风化和蚀变作用的能力强。因此 Sm-Nd 同位素体系是一种潜在的、有效的定年手段。Chesley et al.(1991)最先利用 Sm-Nd 同位素体系直接测定萤石的形成年龄, Galindo et al.(1994)对西班牙中央山脉华力西期花岗岩中 Sierra del Guadarrama 萤石和重晶石矿脉也开展了 Sm-Nd 同位素测年(145 ± 18 Ma), 之后 Galindo et al.(1997)、Munoz et al. (2005)、Pei et al. (2017)和 Zou et al.(2017)等先后成功开展了萤石-重晶石矿床的 Sm-Nd 同位素测年实验。本文利用 5 件块状萤石样品(主成矿阶段)的分析结果在 Sm-Nd 同位素体系中的投点显示很好的线性关系(图 8b), 表示其 Sm-Nd 同位素等时线年龄为 402 ± 19 Ma; 且 MSWD 为 0.80, 表明为一条较高质量的等时线年龄。该等时线年龄代表喀雅克登矿床萤石的成矿时代为 402 Ma, 这与矿区内钾长花岗岩的侵入时代 (404.4 ± 1.3 Ma)非常接近, 而该钾长花岗岩具有高分异和高氟的地球化学的特征, 且与萤石矿体具有密切的空间关系, 故认为喀雅克登矿区的萤石矿体与钾长花岗岩具有一定的成因联系。

5.2 成矿物质来源与成矿环境

萤石为含钙矿物, 萤石中的 Ca^{2+} 与稀土元素(REE)离子半径相似, 稀土元素常以类质同象方式替代其中的 Ca^{2+} (Möller and Morteani, 1983; Bau and Dulski, 1995; Smith et al., 2000)。同时, 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(Lottermoser, 1992)。因此, 开展萤石矿物的稀土元素地球化学研究, 对于分析成矿物质来源和矿床成因均具有重要的科学意义。

从喀雅克登矿床萤石、下元古界金水口群大理岩和早泥盆世钾长花岗岩的稀土元素球粒陨石配分曲线(图 9a-c)来看, 大理岩具有较低的轻稀土总量、轻重稀土分异较明显和较明显的 Eu 负异常, 而钾长花岗岩具有较高的稀土总量、轻重稀土分异不明显和明显的 Eu 负异常, 表现为“海鸥式”的稀土配分模式。喀雅克登矿床萤石稀土元素球粒陨石配分中的 $(\text{Nd}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 、 δEu 和 δCe 值(表 3)均介于大理岩与钾长花岗岩之间, 反映萤石的物质来源可能与钾长花岗岩和大理岩均有一定关系。

喀雅克登矿区钾长花岗岩稀土元素 Eu 的强烈亏损指示源区部分熔融过程中发生了斜长石和钾长石的分离结晶(李婷等, 2018)。稀土元素球粒陨石标准化显示特征的“海鸥式”配分模型(图 9c), 反映了典型的 A 型花岗岩的地球化学特征, 这与人(谌宏伟等, 2006; 李婷等, 2018)关于该类花岗岩形成于造山后伸展阶段的认识是一致的。

Bau and Möller (1992)认为稀土元素均以较稳定的+3 价存在, 但 Ce 和 Eu 元素易受外界环境的影响而变价成为 Ce^{4+} 和 Eu^{2+} , 因此 Ce 和 Eu 可用来反映环境的氧化还原条件。在还原条件下, Eu^{3+} 被还原为 Eu^{2+} , 由于 Eu^{2+} 离子半径(1.33 \AA)大于 Ca^{2+} (1.2 \AA), 难以进入萤石晶格中置换出 Ca^{2+} , 促使 Eu 相对于其他稀土元素具有明显亏损(曹俊臣, 1995)。在氧化条件下, Ce^{3+} 被氧化为 Ce^{4+} , Ce^{4+} 的溶解度较小, 导致从流体中沉淀的矿物具有明显的 Ce 负异常(Bau et al., 1992)。喀雅克登矿区萤石 δCe 为 0.88~0.98(表 3), 显示弱负异常或无异常。

通常认为具有明显 Eu 负异常，而 Ce 无异常或具有弱负异常的萤石是在较还原环境中形成的。喀雅克登萤石矿 δEu 值介于 0.22~0.49 之间(表 3)，均显示明显的负 Eu 异常，指示该矿床萤石沉淀时成矿流体为还原环境。总体看，萤石 δEu 和 δCe 变化范围较小，具有较好的均一性，反映所有萤石矿脉的成矿流体具有一致的来源；同时与矿区花岗岩体的 δEu 值(0.04~0.25)和 δCe 值(0.88~1.12)、大理岩的 δEu 值(0.43~0.63)和 δCe 值(0.80~0.96)相近，反映成矿物质来源与花岗岩和大理岩关系密切。Bau and Möller (1992)认为强烈的 Eu 负异常指示沉淀时成矿流体处于中低温环境(<250 °C)，而当温度超过 250 °C 时则表现出正 Eu 异常。喀雅克登矿床中萤石的 $\delta\text{Eu}<0.49$ ，表示沉淀时成矿流体处于还原条件下中低温环境。

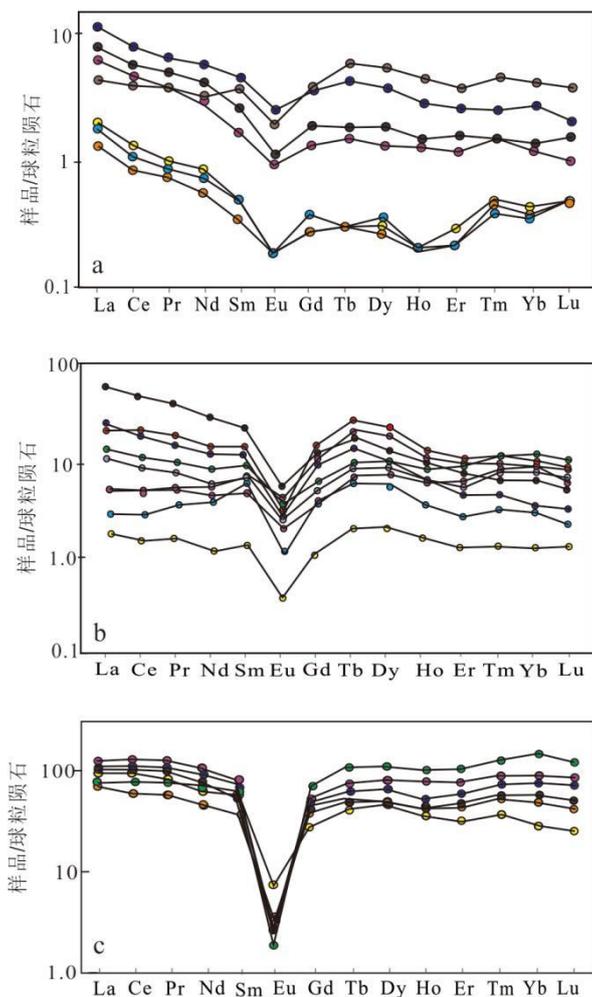


图 9 喀雅克登矿区大理岩、萤石和钾长花岗岩稀土元素配分图解

(稀土元素球粒陨石标准化采用 Sun and McDonough (1989))

a-大理岩；b-萤石；c-钾长花岗岩

Fig.9 Normalized REE patterns of fluorite, marble and K-feldspar granite from the Kayakedeng deposit

Veksler et al. (2005) 认为 Y、Ho 具有相似的原子半径与电子价位，地球化学性质相似，Y/Ho 值可作为示踪流体过程的重要参数；富 F 体系中 Y 元素含量较 Ho 元素相对富集，一般 Y/Ho 比值大于 28。喀雅克登萤石矿中 Y/Ho 比值介于 24~56 之间(平均值 40)，反映为富 F 体现。Bau and Möller (1992) 和 Bau and Dulski (1995) 在研究了英国和德国数个矿床中萤石 Y 元素与其它 REE 的关系后，总结出了 Y/Ho-La/Ho 相关图解，并指出 Y、Ho 的分馏现象并不取决于

流体来源，而是取决于流体的组成及其物理化学性质。同源同期形成的萤石中La/Ho与Y/Ho之间具有相关性，其比值趋近于一条直线，大体呈水平分布；同源非同期形成的萤石La/Ho与Y/Ho呈负相关。采自喀雅克登萤石矿区不同矿体或不同部位的9件萤石样品，Y/Ho比值介于24~56之间，La/Ho比值介于2.2~30之间。在Y/Ho-La/Ho相关图解(图10a)中近水平沿同一条线分布，指示该矿床的成矿流体来源可能为具有相同性质的富F流体，且为同期成矿。

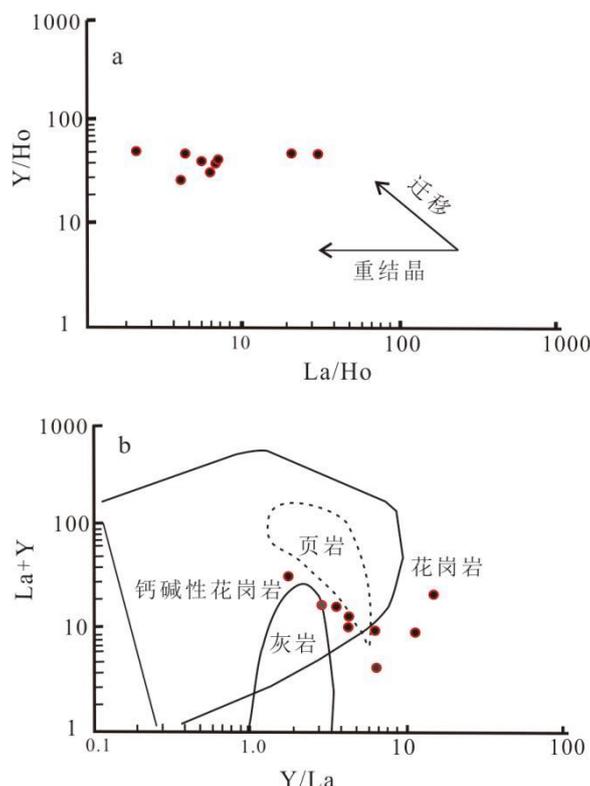


图 10 喀雅克登萤石的 Y/Ho-La/Ho 图解 (a, 底图据文献 Bau and Möller,1992; Bau and Dulski,1995) 和(La+Y)-Y/La 图解(b, 原图引自文献 Barbieri et al., 1983) (表中数据来源于表 3)

Fig.10 La/Ho-Y/Ho and (La+Y) -Y/La diagram of fluorite from the Kayakedeng deposit

La和Y元素的地球化学性质与轻稀土元素(LREE)和重稀土元素(HREE)的相关习性具有相似性。Barbieri (1983)曾应用(La+Y)-Y/La关系图分析萤石矿床成矿物质来源与花岗岩、沉积石灰岩和页岩的关系，其中Y/La比值(横坐标)可用于指示稀土元素的分馏程度，Y+La值(纵坐标)可大致反映稀土元素含量。本文萤石样品均落在(La+Y)-Y/La关系图(图10b)中的钙碱性花岗岩与花岗岩过渡区，说明喀雅克登萤石矿体在成因上与钾长花岗岩的侵入有密切关系。同时，本矿区钾长花岗岩F元素丰度为0.12%~0.53%(另文发表)，属高氟岩体 [$w(F) > 0.1\%$]，可为萤石成矿提供氟物质。变质岩中的大理岩呈“薄层”和“透镜状”分布于岩体外接触带，部分大理岩构成萤石矿体的容矿岩石，推测大理岩是萤石Ca质的主要来源。

Möller et al. (1976) 基于大量萤石样品统计分析提出 Tb/Ca-Tb/La 图解，将萤石的成因划分为伟晶岩气成型、热液型和沉积型成因。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。喀雅克登

矿床萤石样品点均落在热液成因区域(图 11)，表明该区萤石矿均为热液作用的产物。

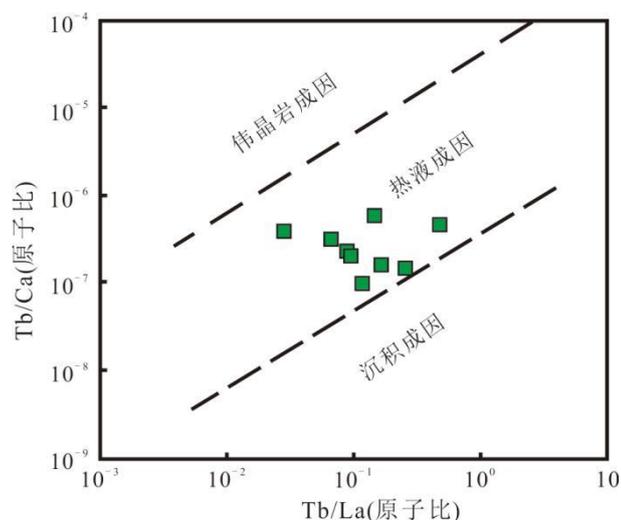


图 11 喀雅克登萤石矿床 Tb/La–Tb/Ca (原子比) 双变量关系图解(底图据文献 Möller et al., 1976)

Fig. 11 Tb/Ca–Tb/La diagram of fluorite from the Kayakedeng deposit

本文在获得喀雅克登矿区萤石 Sm-Nd 等时线年龄的同时，还得到 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 初始值为 0.511814 (ϵ_{Nd} 值为 -5.9)，该值与上地壳 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值(0.51212)比较接近，同时与矿区钾长花岗岩锆石 ϵ_{Hf} 值(-4.9 ~ -0.2，另文发表)具有一致性，均说明萤石矿床的成矿物质来源于上地壳。

5.3 矿床类型及控矿因素

我国学者先后从不同角度对萤石矿床进行过总结和类型划分(曹俊臣, 1987; 王吉平等, 2014; 黄国成等, 2015; 金少荣等, 2018)。目前最为流行的方案是根据矿床成因和赋矿岩石类型将中国萤石矿床划分为 3 类(曹俊臣, 1987): (1)产于酸-中酸性岩浆岩及其接触带中的矿床; (2)产于火山岩及次火山岩中的矿床; (3)产于碳酸盐岩或其它沉积岩、火山沉积岩中的矿床。也有按照形成萤石矿床的热液类型划分为(金少荣等, 2018; 刘道荣和商朋强, 2023): (1)岩浆期后热液; (2)火山-次火山热液; (3)热卤水。而国外学者一般按照成因类型划分为伟晶岩型、热液型和沉积型(Möller, 1976)。东昆仑喀雅克登大型萤石矿床为新近发现，按照矿床地质、矿石结构和构造，及 Tb/Ca–Tb/La 地球化学图解，本文认为该矿床成因类型应为与酸性-中酸性岩浆活动有关的热液型矿床。

目前喀雅克登矿区探测的萤石矿体多赋存于金水口群大理岩与片麻岩接触带附近，或片麻岩中的大理岩夹层(图 1b，图 3-5)，且大理岩是主要的赋矿岩石。大理岩出露较厚地段热液蚀变强烈，萤石矿体具有厚度大、品位高的特点。可见，金水口群大理岩是控制萤石矿体的重要因素之一。同时萤石矿体均分布于北西西向、近东西向断裂蚀变带中，含矿断裂产状一般较陡、构造角砾岩和热液蚀变发育，矿带及矿体严格受断裂构造系统控制。部分萤石矿体沿片麻岩与大理岩之间的层间断裂带分布，矿化角砾岩和石英及方解石细脉发育，反映控矿断裂具有多次活动的特征。

5.4 成因分析

目前认为萤石的沉淀主要有3种机制(Richardson and Holland, 1979; Deng et al., 2014; Zou et al., 2021): ①富 F 和 Ca 的成矿流体随温度、压力发生变化; ②富 F 流体与富 Ca 流体的混合作用或沸腾作用; ③富 F 流体与含 Ca 质岩石发生水/岩相互作用。在热液成矿过程中, 流体的沸腾作用通常是由于压力突变引起的(Wilkins, 1986; Veksler et al., 2005)。喀雅克登萤石矿床矿物流体包裹体分析及氢氧同位素测试表明, 该矿床具有中低温低盐度的特征, 成矿流体主要由大气降水和少量岩浆水组成(另文发表), 推测成矿过程中流体的温度和压力变化不大, 减压沸腾作用不明显; 而硅化、萤石矿化和碳酸盐化等热液蚀变强烈, 因此推测成矿流体在通过断裂向上运移时与围岩发生水岩相互作用是矿石沉淀的主要因素; 同时矿区出露的大理岩和白云石大理岩、区域韧性剪切带及其断裂-裂隙构造系统为萤石矿的形成创造了有利的 Ca 质来源和构造条件, 早泥盆世钾长花岗岩的侵入为成矿提供了热动力学条件和 F 的来源。

据上述研究成果, 推测喀雅克登萤石矿床的成矿机制和成矿过程如下(图 12): 早泥盆世钾长花岗岩沿区域断裂侵入, 岩浆期后热液沿着断裂通道上升与下降的大气降水结合, 在其运移过程中不断萃取交代花岗岩中 F 和大理岩围岩中 Ca 元素, 构成含矿流体; 含矿流体在沿断裂-裂隙系统上升过程中与围岩发生水岩相互作用, 在北西西向、近东西向次级断裂及金水口群片麻岩与大理岩接触带中充填-交代形成方解石或石英-萤石矿脉。富矿流体首先在扩容空间形成块状或透镜状富矿体, 随着构造-流体的多次活动进一步形成网脉状和角砾状矿化。

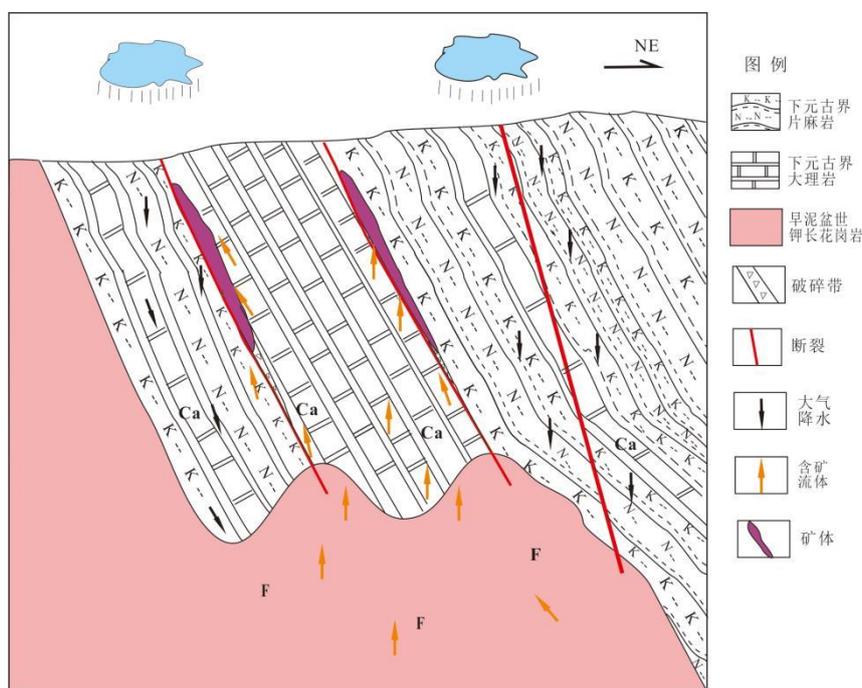


图 12 喀雅克登萤石矿床成矿模式

Fig.12 The ore-forming model of the Kayakedeng fluorite deposit

6 结论

(1) 喀雅克登萤石矿床工业矿体主要受下元古界金水口群大理岩与片麻岩之间的断裂构造控制,矿体呈热液脉状;容矿岩石主要为大理岩,少量是片麻岩和早泥盆世钾长花岗岩。矿石类型主要为石英-萤石脉、方解石-萤石脉型。

(2) 萤石 Sm-Nd 同位素年龄为 402 Ma, 与钾长花岗岩锆石 U-Pb 同位素年龄 (404 Ma) 基本一致,反映成矿发生在早泥盆世;萤石 ϵ_{Nd} 值为 -5.9 , 推测成矿物质主要来源于上地壳。

(3) 喀雅克登矿床萤石稀土元素总量、 δEu 和 δCe 异常特征、及稀土配分型式介于大理岩与钾长花岗岩之间,反映成矿物质来源与大理岩和钾长花岗岩均有一定关系。推测钾长花岗岩期后热液沿着断裂通道上升与下降的大气降水结合,在其运移过程中不断萃取花岗岩中的 F 和大理岩中的 Ca 质形成含矿流体;含矿流体在上升过程中与围岩发生强烈的水岩反应,在次级断裂-裂隙系统中充填-交代形成方解石-萤石脉和石英-萤石脉。

致谢: 本文研究工作得到青海自然资源厅、青海地矿局和青海省第三地质勘查院鼎力支持。萤石 Sm-Nd 同位素和锆石 U-Pb 分析在中国地质调查局天津地质调查中心实验室完成,岩石和矿石的稀土元素分析测试在北京燕都中实测试技术有限公司完成;评审专家对本文提出了建设性的修改意见。在此一并表示衷心的感谢。

References

- Barbieri, M., Tolomeo, L., Vot, T., et al., 1983. Yttrium, Lanthanum and Manganese Geochemistry in Fluorite Deposits from Sardinia (Italy). *Chemical Geology*, 40: 43-50
- Bau, M., Dulski, P., 1995. Comparative Study of Yttrium and Rare-Earth Element Behaviors in Fluorite-rich Hydrothermal Fluids. *Contributions Mineralogy Petrology*, 119: 213-223
- Bau, M. and Möller, P., 1992. Rare Earth Element Fractionation in Metamorphogenic Hydrothermal Calcite, Magnesite and Siderite. *Mineralogy and Petrology*, 45: 231-246
- Cao, J. C., 1987. The Classification and Mineralization Regularity of Fluorite Deposit in China. *Geology and Exploration*, 3: 12-17 (in Chinese with English abstract).
- Chen, J.Y., Liu, Y.F., Yan, L.Y., 2021. Research on the Development Trends of Strategic Non-metallic Minerals such as Graphite and Fluorite. *Acta Geologica Sinica*, 42 (2): 287-296. (in Chinese with English abstract).
- Chen, H.W., Luo, Z.H., Mo, X.X., et al., 2006. SHRIMP Ages of Kayakedengtage Complex in the East Kunlun Mountains and Their Geological Implications. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 25 (1): 25-32(in Chinese with English abstract)
- Chesley, J.T., Halliday, A.N., Scrivener, R.C., 1991. Samarium-Neodymium Direct Dating of Fluorite Mineralization. *Science*, 252: 949-951.
- Deng, X.H., Chen, Y.J., Yao, J.M., et al., 2014. Fluorite REE-Y (REY) Geochemistry of the ca. 850Ma Tumen Molybdenite-Fluorite Deposit, Eastern Qinling, China: Constraints on Ore Genesis. *Ore Geology Reviews*, 63: 532-543.
- Galindo, C., Pankhurst, R.J., Casquet, C., 1997. Age, Sr- and Nd- Isotope Systematics and Origin of two Fluorite Lodes, Sierras Pampeanas, Aegentina. *International Geology Reviews*, 39: 948-954.
- Galindo, C., Tornos, F., Darbyshire, D.P.F., et al., 1994. The Age and Origin of the Barite-Fluorite (Pb-Zn) Veins of the Sierra del Guadarrama (Spanish Central System, Spain): a Radiogenic (Nd, Sr) and Stable Isotope Study. *Chemical Geology*, 112 (3-4): 351-364.

- Gao, Y.B., Zhao, X.M., Wang, B., 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. *Geology in China*, 50 (3): 704-729 (in Chinese with English abstract).
- Haschke, S., Gutzmer, J., Ueberwasser, C.C., et al., 2021. The Niederschlag Fluorite-(Barite) Deposit, Erzgebirge/Germany: A Fluid Inclusion and Trace Element Study. *Mineralium Deposita*. 56 (6): 1071-1986.
- Huang, G.H., Zhang, Y.S., Chen, H.Y., 2015. Research on the Regional Metallogenic Regularity and Prospecting Direction of Fluorite Deposits in Zhejiang Province. *Mineral Deposits*, 34 (6): 1209-1222 (in Chinese with English abstract).
- Jin, S.R., Chen, J., Dai, R., 2018. Geochemical Characteristics of Trace and Rare Earth Elements in the Gaoling Fluorite Deposit, Southwest Guizhou Province. *Acta Mineralogica Sinica*, 38 (6): 684-692 (in Chinese with English abstract).
- Li, T, Li, M., Hu, C.B., et al., 2018. Zircon U-Pb Geochronology, Geochemistry and Its Geological Implications of Intrusions in Aquesun Area from Qimentag, East Kunlun, China. *Earth Science*, 43(12): 4350-4363 (in Chinese with English abstract).
- Liu, D.R., Shang, P.Q., 2023. Classification and REE Geochemical Characteristics of Fluorite Deposits in China. *Geology and Exploration*, 59 (2): 211-222 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y.L., Zhang, A.K., Zhang, J.P., 2024. Tectonic Setting and Metallogenic Regulation of Sedimentary Manganese Deposits of east Kunlun, Qinghai Province, *Earth Science*, 49(12): 4278-4302 (in Chinese with English abstract).
- Lottermoser, B.G., 1992. Rare Earth Elements and Hydrothermal Ore-Formation Processes. *Ore Geology Reviews*, 7: 25-41.
- Ludwig, K.R., 2003. User's manual for Isoplot 3. 00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication, (4):1-70.
- Möller, P., Morteani, G., 1983. 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. Theophrastus, Athens, 747-791.
- Möller, P., Parekh, P.P., Schenider, H.J., 1976. The Application of Tb/Ca-Tb/La Abundance Ratios to Problems of Fluor-Spar Genesis. *Mineralium Deposita*, 11: 111-116
- Munoz, M., Premo, W., Couriault, R.P., 2005. Sm-Nd Dating of Fluorite from the Worldclass Montroc Fluorite Deposit, Southern Massif Central, France. *Mineralium Deposita*, 39 (8): 970-975.
- Pan, T., Wang, B.Z., Zhang A.K. 2019. Mineralization Series and Prospecting Prediction along the North-South Ranges of the Qaidam Basin. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1-174 (in Chinese with English abstract).
- Pei, Q., Zhang, S., Santosh, M., et al., 2017. Geochronology, geochemistry, fluid inclusion and C, O and Hf isotope compositions of the Shuitou fluorite deposit, Inner Mongolia, China. *Ore Geology Reviews*, 83: 174-190.
- Redina, A.A., Nikolenko, A.M., Doroshkevich, A.G., et al., 2020. Conditions for the Crystallization of Fluorite in the Mushgai-Khudag Complex (southern Mongolia): Evidence from Trace Element Geochemistry and Fluid Inclusions]. *Gechemistry*, 80(4): 125666

- Richardson, C.K. and Holland, H.D., 1979. Fluorite Deposition in Hydrothermal Systems. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 43 (8): 1327-1336.
- Smith, M.P., Henderson, P., Campbell, L.S., 2000. Fractionation of the REE During Hydrothermal Processes: Constraints from the Bayan Obo Fe-REE-Nb Deposit, Inner Mongolia, China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64 (18): 3141-3160.
- Su Huimin, Che Yuying, Yin Yanliang, et al., 2023. Present Situation and Research Direction of Strategic Critical Mineral Exploration: Taking Qinghai Province as an Example. *Earth Science*, 48(4): 1543-1550(in Chinese with English abstract).
- Su, S.S., Wu, Z.S., Shu, X.F., 2014. Geological Characteristics and Prospecting Indicators of the Kayaqandong Multimetallic Deposit in Qinghai Province. *Geology and Exploration*, 50(1): 37-47(in Chinese with English abstract).
- Sun, S.S., McDonough, W.F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. Geological Society London Special Publications, 42: 313-345.
- Veksler, I.V., Dorfman, A.M., Kamenetsky, M., et al., 2005. 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. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(11): 2847-2860.
- Wang, J.P., Shang, P.Q., Xong, X.X., et al., 2014. The Classification of Fluorite Deposits in China. *Geology in China*, 2(41): 316-325 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J.P., Shang, P.Q., Xong, X.X., et al., 2014. The Classification of Fluorite Deposits in China. *Geology in China*, 2(41): 316-325 (in Chinese with English abstract).
- Wilkins, R.W.T., 1986. The Mechanisms of Stretching and Leaking of Fluid Inclusions in Fluorite. *Economic Geology*, 1986, 81 (4): 1003-1008.
- Wu, Y.P., Zhang, L.C., Yuan, P., et al., 2021. Geological Characteristics and Genesis of the Super-large Kalqiar Fluorite Deposit in Altyn Area of Xinjiang, China. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 43 (2): 962-977 (in Chinese with English abstract).
- Yin, H.F., Zhan, K.X., 1997. Characteristics of the Eastern Kunlun Orogenic Belt. *Earth Science*, 22(4): 3-6 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, A.K., Yuan, W.M., Liu, G.L., et al., 2024. Metallogenic Regularities and Mineralization Laws and Exploration Directions of Strategic Metallic Minerals Around the Qaidam Basin. *Geoscience Frontiers*, 31 (3): 260-283 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y., Li, H.H., Li, Q.L., et al., 2014. Analysis of Geological Characteristics and Prospecting Potential of the Kayakendondo Metal Deposit. *Journal of Qinghai University (Natural Science Edition)*, 2014, 32 (1): 42-48 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y., Liu, G.Y., Yu, Z.H., et al., 2016. Discussion on genesis of Kayakedeng zinc polymetallic deposit in the eastern Kunlun mountain area. *Mineral Exploration*, 7 (2): 267-274 (in Chinese with English abstract).
- Zou, H., Li, M., Santosh, M. et al., 2021. Fault-Controlled Carbonate-Hosted Barite-Fluorite Mineral Systems: The Shuanghe Deposit, Yangtze Block, South China. *Gondwana Research*, 101: 26-43.
- Zou, H., Fang, Y., Zhang, S.T., et al., 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. *Geological Journal*, 52 (3): 470-488.

中文参考文献

- 曹俊臣, 1987. 中国萤石矿床分类及其成矿规律. 地质与勘探, 12 (3): 12-17.
- 陈军元, 刘艳飞, 颜玲亚, 等, 2021. 石墨、萤石等战略非金属矿产发展趋势研究. 地球学报, 42 (2): 287-296.
- 谌宏伟, 罗照华, 莫宣学, 等, 2006. 东昆仑喀雅克登塔格杂岩体的 SHRIMP 年龄及其地质意义. 岩石矿物学杂志, 25 (1): 25-32.
- 高永宝, 赵辛敏, 王博, 等, 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. 中国地质, 50 (3): 704-729.
- 黄国成, 张永山, 程海艳, 2015. 浙江省萤石矿床区域成矿规律与找矿方向研究. 矿床地质, 34 (6): 1209-1222.
- 金少荣, 陈军, 代德荣, 等, 2018. 黔西南高岭萤石矿床微量和稀土元素地球化学特征. 矿物学报, 38 (6): 684-692.
- 李婷, 李猛, 胡朝斌, 等, 2018. 东昆仑祁漫塔格阿确墩地区侵入岩 U-Pb 年代学、地球化学及其地质意义. 地球科学, 43(12): 4350-4363.
- 李月栋, 刘崑国, 阿卜力米提·艾白, 等, 2026. 阿尔金盖吉克超大型萤石矿床的发现及其找矿意义. 地球科学, 51(3): 待刊)
- 刘道荣, 商朋强, 2023. 中国萤石矿床分类及稀土元素地球化学特征. 地质与勘探, 59 (2): 211-222.
- 刘永乐, 张爱奎, 张建平, 等, 2024. 青海东昆仑沉积型锰矿构造背景与成矿规律, 地球科学, 49 (12): 4278-4302.
- 潘彤, 王秉璋, 张爱奎, 2019. 柴达木盆地南北缘成矿系列及找矿预测. 武汉: 中国地质大学出版社, 1-174.
- 苏慧敏, 车玉滢, 尹燕梁, 等, 2023. 战略性关键矿产勘查现状与对策: 以青海省为例. 地球科学, 48 (4): 1543-1550.
- 苏生顺, 吴正寿, 舒晓峰, 等, 2014. 青海喀雅克登铁多金属矿床地质特征及找矿标志. 地质与勘探, 50(1): 37-47.
- 王吉平, 商朋强, 熊先孝, 等, 2015. 中国萤石矿床成矿规律. 中国地质, 42 (1): 18-32.
- 王吉平, 商朋强, 熊先孝, 等, 2014. 中国萤石矿床分类. 中国地质, 41 (2): 315-325.
- 吴益平, 张连昌, 袁波, 等, 2021. 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. 地球科学与环境学报, 43 (2): 962-977.
- 殷鸿福, 张克信, 1997. 东昆仑造山带的一些特点. 地球科学, 22 (4): 39-342.
- 张爱奎, 袁万明, 刘光莲, 等, 2024. 柴达木盆地周缘战略性金属矿产成矿规律与勘查方向. 地学前缘, 31 (3): 260-283.
- 张勇, 刘国燕, 喻忠鸿, 等, 2016. 东昆仑喀雅克登锌多金属矿床成因探讨. 矿产勘查, 7(2): 267-274.
- 张勇, 李恒恒, 李青林, 等, 2014. 喀雅克登多金属矿床地质特征及找矿前景分析. 青海大学学报(自然科学版), 32 (1): 42-48.