

doi:10.12029/gc20220816002

# 内蒙古东七一山萤石矿微量、稀土元素特征及对成矿物质来源的指示

刘天航<sup>1</sup>, 高永宝<sup>1</sup>, 刘家军<sup>2</sup>, 魏立勇<sup>1</sup>, 唐卫东<sup>1</sup>, 李宗会<sup>3</sup>, 何佳乐<sup>1</sup>, 李嘉伟<sup>1</sup>

(1. 中国地质调查局西安矿产资源调查中心, 陕西 西安 710000; 2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 3. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710000)

**摘要:**【研究目的】东七一山萤石矿是北山成矿带东段与碱长花岗岩有关的超大型萤石矿, 矿体主要赋存在碱长花岗岩、大理岩及安山岩中, 受北东向、近北向断裂构造控制。【研究方法】本文在对东七一山萤石矿床地质特征研究基础上, 开展矿床萤石和围岩的稀土、微量元素地球化学特征研究。【研究结果】结果显示, 萤石微量元素曲线变化趋势一致且相对地壳明显富集 Bi、Cd 和 Mo 等高温元素, 表明这些萤石样品具有高温成矿及同源性特征。萤石与碱长花岗岩具有相似的稀土元素地球化学特征, 10 件萤石样品的 Y/Ho 比值范围为 21.02~28.52; La/Ho 比值为 3.58~15.23; 样品均落在 Tb/La-Tb/Ca 图解的热液成因区; 萤石的 Sm/Nd 比值为 0.26~0.42, 碱长花岗岩的 Sm/Nd 比值为 0.30~0.33;  $\delta\text{Eu}$  值为 0.60~0.64, 平均值为 0.62, 表现为显著的负异常;  $\delta\text{Ce}$  值为 0.89~0.94, 平均值为 0.91, 显示弱的负异常。【结论】结合矿床地质特征, 认为东七一山萤石矿床为中高温岩浆热液脉状萤石矿床, 属于区内与碱长花岗岩有关的钨锡稀有萤石成矿系统的产物, 成矿流体以岩浆热液为主, 成矿物质 F 主要来源于深部碱长花岗岩大岩体, Ca 主要来源于大理岩地层。

**关键词:** 萤石矿; 微量元素; 稀土元素; 成矿物质来源; 地质调查工程; 东七一山; 内蒙古

**创新点:** 通过开展萤石和围岩的稀土、微量元素地球化学特征研究, 结合矿床地质特征认为东七一山萤石矿为中高温岩浆热液脉状萤石矿床, 属于区内与碱长花岗岩有关的钨锡稀有萤石成矿系统的产物。

## Characteristics of trace and rare earth elements in Dongqiyishan fluorite deposit, Inner Mongolia: Indication of ore-forming material sources

LIU Tianhang<sup>1</sup>, GAO Yongbao<sup>1</sup>, LIU Jiajun<sup>2</sup>, WEI Liyong<sup>1</sup>, TANG Weidong<sup>1</sup>, LI Zonghui<sup>3</sup>, HE Jiale<sup>1</sup>, LI Jiawei<sup>1</sup>

(1. Xi'an Center of Mineral Resources Survey, China Geological Survey, Xi'an 710000, Shaanxi, China; 2. School of Earth Sciences, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 3. Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710000, Shaanxi, China)

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

**[Objective]** The Dongqiyishan fluorite deposit is a super-large fluorite deposit, which is related to alkali feldspar granite in the eastern part of the Beishan metallogenic belt. The orebodies are hosted in alkali feldspar granite, griotte and andesite, which are controlled by the rupture and fracture zones near SN or NE dipping. **[Methods]** On the basis of studying the geological characteristics of Dongqiyishan fluorite deposit, carry out the studies of rare

**基金项目:** 陕西省自然科学基金基础研究计划(2023-JC-QN-0362)、中国地质调查局地质调查项目(ZD20220305)联合资助。

**作者简介:** 刘天航, 男, 1989 年生, 工程师, 从事矿产地质调查及矿床地球化学研究工作; Email: [412407885@qq.com](mailto:412407885@qq.com)。

earth and trace elements geochemistry of fluorite and wall rocks in the fluorite deposit. **[Results]** The results show that the trace elements curves in fluorites are consistent, and obviously enriched in high-temperature elements such as Bi, Cd and Mo relative to the crust values, indicating that these fluorite samples have the characteristics of high temperature mineralization and homology. Fluorites and alkali feldspar granites have similar geochemical characteristics of rare earth. The Y/Ho ratios of 10 fluorite samples are ranging from 21.02 to 28.52, the La/Ho ratios ranging from 3.58 to 15.23. The samples all falling into the hydrothermal region of Tb/La-Tb/Ca diagram, except one close to the sedimentary. The Sm/Nd ratios of fluorites ranging from 0.26 to 0.42, and the Sm/Nd ratios of alkali feldspar granites ranging from 0.26 to 0.42. The  $\delta\text{Eu}$  vaule ranging from 0.6 to 0.64, and the  $\delta\text{Ce}$  vaule ranging from 0.89 to 0.94. **[Conclusions]** Combined with the geological characteristics of the deposit, It is considered the genetic type of the deposit is medium-high temperature magmatic hydrothermal filled type, which belongs to the tungsten-tin-rare -fluorite metallogenic system related to alkali feldspar granite in the area. The ore-forming fluid of Dongqiyishan fluorite deposit is mainly magmatic hydrothermal. The ore-forming material F mainly comes from the deep alkali feldspar granite body, and the Ca mainly comes from the marble strata.

**Key words:** fluorite deposit; trace elements; rare earth elements; ore-forming material source; mineral investigation engineering; Dongqiyishan; Inner Mogolia

**Highlights:** The geochemical characteristics of rare earth and trace elements in fluorite and surrounding rock of the deposit were studied. Combined with the geological characteristics of the deposit, it is considered that the Dongqiyishan fluorite deposit is a medium-high temperature magmatic hydrothermal vein fluorite deposit, which belongs to the product of tungsten-tin rare fluorite metallogenic system related to alkali feldspar granite in the area.

**About the first author:** LIU Tianhang, male, born in 1989, engineer, mainly engaged in mineral geological survey and ore deposit geochemistry study; Email: [412407885@qq.com](mailto:412407885@qq.com).

**Fund support:** Supported by the natural science basic research program of Shaanxi Province (2023-JC-QN-0362) and the project of China Geological Survey (No.ZD20220305).

## 1 引言

萤石又称氟石，其成分主要为  $\text{CaF}_2$ ，在所有矿物中其氟含量最高，因此作为传统氟化工产业中氟元素的主要来源，被广泛应用于航天、军工、制冷、防腐、医药、灭火、电子、机械和原子能等领域，更与新兴产业 5G 材料、新能源、新一代信息技术、新能源汽车等密切相关（刘艳飞等，2019；李敬等，2019；赵鹏等，2020；许海等，2021；陈军元等，2021；戴开明等，2021）。自 2010 年以来，欧盟、美国及中国相继将萤石列为“关键矿产”，显示出萤石的重要性（汪灵，2019；王自国等，2020），因此，亟需加大对萤石矿的基础研究及找矿工作。

近年来，在北山成矿带东段东七一山一鼎新一带萤石找矿工作取得较大突破，除已知的与碱长花岗岩关系密切的东七一山超大型萤石矿外，相继新发现与中酸性侵入岩及火山岩有关的金蟾岭、豆角梁、黑石山东、花石头山、巴豆乌兰南等中—小型萤石矿床（点），显示该区萤石找矿潜力巨大。前人对北山成矿带东段蛇绿岩、花岗岩及与花岗岩有关的钨矿成矿时代及成矿动力学的研究取得重要进展，通过精确的锆石年代学和岩石成因研究对区域构造演化历史、钨矿成矿时代及成矿动力学过程等进行了约束（郑国荣等，2012；侯叶青等，2012；丁嘉鑫等，2015；廖云峰等，2016；赵鹏斌等，2019；李敏等，2019）。王勇（2009）和吕博（2011）通过对东七一山碱长花岗岩的研究，获得其 Rb-Sr 等时线年龄为  $(128.2 \pm 1.1) \text{ Ma}$ ，认为碱长花岗岩是在燕山晚期由区域钾长花岗岩浆在壳层挤压-拉伸环境中分异演化形成的，Li、Rb、Be、Nb-Ta、W、Sn 等是在岩浆逐步上侵、分异演化过程中在挥发分“挟持”下富集成工业矿体，而萤石是在酸性岩浆充分分异、钙质和挥发份充分得到富集的情况下产生的。

萤石中微量和稀土元素含量特征和相关参数能够为示踪成矿物质来源、揭示成矿流体性质与演化及反演热液成矿作用过程提供重要信息 (Möller et al., 1976; Bau and Möller, 1992; Smit et al., 2000; 曹俊臣, 1995; 孙海瑞等, 2014; 金少荣等, 2018)。东七一山萤石矿是北山成矿带东段与碱长花岗岩有关的超大型萤石矿, 在区域上具有代表性。赵省民等(2002)通过对矿石和围岩的稀土元素地球化学分析, 认为东七一山萤石矿为岩浆热液成因。聂凤军等(2002)获得萤石 Sm-Nd 等时线年龄为(511±5) Ma, 认为东七一山萤石矿是加里东期构造-岩浆活动的产物, 显然这与碱长花岗岩约束的燕山晚期存在较大分歧。通过本次野外调查及室内研究, 发现碱长花岗岩中可见浸染状萤石, 因此, 东七一山碱长花岗岩可能为萤石矿的成矿岩体。尽管前人对该矿床做了一定的研究, 但是关于萤石矿的地球化学特征、成矿物质来源及成因的研究还论述的不够, 需开展进一步的研究工作。本文在对东七一山萤石矿床地质特征研究的基础上, 通过对矿石和围岩的微量、稀土元素地球化学特征分析, 探讨萤石矿床成矿物质来源及成因, 从而为区域上萤石矿床找矿工作提供借鉴。

## 2 区域地质概况

研究区位于哈萨克斯坦和塔里木板块拼接部位的北山板块东缘早山古陆块内, 属东西向复式向斜轴部的斜山—东七一山向斜 (聂凤军等, 2002)。该区出露的地层主要为早志留系安山质凝灰岩、砂质板岩、安山岩、英安岩及大理岩。区内北东向、近南北向、近东西向及北西向断裂构造发育, 其中北东向和近南北向张性构造是萤石矿最为有利的成矿构造。长期受构造运动影响, 区内花岗岩分布广泛, 主要呈北西西、近东西向带状分布, 与花岗岩有关的矿产有钨、锡、铷、铯、铌、钽、萤石等。与萤石矿成矿相关的岩体主要有碱长花岗岩、二长花岗岩、黑云二长花岗岩、正长花岗岩等 (图 1)。研究区控矿岩体主要为碱长花岗岩, 呈北东、北东东向产出, 微观上根据矿物粒度可分为碱长花岗斑岩和似斑状碱长花岗岩; 宏观上看, 碱长花岗斑岩主要分布在在外侧, 似斑状碱长花岗岩主要在中部, 且以后者居多 (王勇等, 2009)。与碱长花岗岩有关的矿产主要有铷 (锂)、铍、铌-钽、钨锡及萤石, 其中铷 (以类质同象分布在钾长石和云母中)、锂 (以类质同象分布在锂云母和铁锂云母中)、铌-钽 (分布在金红石、铌铁矿-钽铁矿、细晶石和烧绿石) 矿产主要分布在碱长花岗岩中; 铍以石英脉形式分布在碱长花岗岩内外接触带; 钨锡主要以石英脉形式分布在碱长花岗岩及其外接触带围岩中; 萤石主要分布在碱长花岗岩、大理岩和安山岩中 (王勇等, 2009; 张善明等, 2014)。

## 3 矿床地质特征

### 3.1 矿体地质特征

矿区共划分为4个矿段, 圈定萤石矿体200多个, 以 I、II、III矿段规模较大 (图1)。

I 矿段: 矿体以南北向的矿体为主 (图2b), 呈脉状产出。矿体一般长一百至二百米, 厚几十厘米, 较大的矿体有8个。其中8号矿体规模最大, 长约570 m, 走向近南北, 倾向西, 上陡下缓, 平均倾角60°; 平均厚度3.46 m, 深部有变厚的趋势, CaF<sub>2</sub>品位为91.72%,

II 矿段: 矿体以南北向和北东向 (图2a) 为主, 北西向的矿脉极不发育 (图1)。矿体形态复杂, 呈脉状、网脉状、囊状。矿体一般长几十米至一百多米, 厚几十厘米至十几米, 较大的矿体12个。其中, 10号矿体规模最大, 长376 m, 其走向、倾向与8号矿体相同, 平均倾角58°; 平均厚度0.91 m, 向下厚度变薄。

III 矿段: 矿体以南北向和北东向为主, 北西向的矿脉极不发育 (图1)。矿体形态复杂, 呈脉状、网脉状、囊状、扁豆状。矿体一般长几十米至一百多米, 厚几十厘米至十几米。CaF<sub>2</sub>含量一般在70%左右。

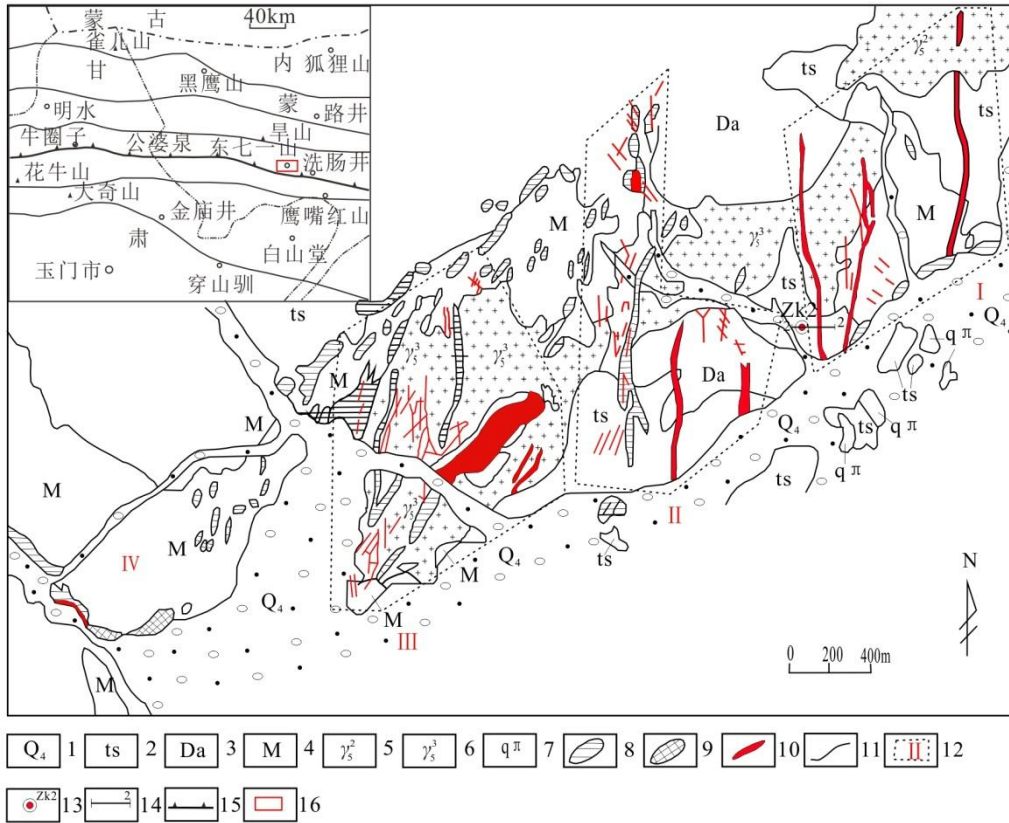


图1 东七一山萤石矿床地质简图（据甘肃省地质局第四地质队，1975；王勇等，2009 修改）

1—冲洪积砂砾岩；2—安山质凝灰岩、砂质板岩；3—安山岩、英安岩；4—大理岩；5—钾长花岗岩；6—碱长花岗岩；7—石英斑岩脉；8—含萤石石髓脉；9—石髓矿化脉；10—萤石矿脉；11—地质界线；12—矿段及编号；13—钻孔及编号；14—勘探线及编号；15—缝合带；16—研究区

Fig.1 Simplified geological map of Dongqiyishan fluorite deposit (modified from The Fourth Geological Team of Gansu Geological Survey, 1975; Wang et al., 2009)

1-Alluvial sand conglomerate; 2-Andesite tuff and sand slate; 3-Andesite and dacite; 4-Marble; 5-Moyite; 6-Alkali feldspar granite; 7-Quartz porphyry vein; 8-Fluorite-containing chalcedony vein; 9-Mineralized vein of chalcedony; 10-Fluorite vein; 11-Geological boundary; 12-Ore block and its serial number; 13-Drill hole and sti serial number; 14-Exploration line and its serial number; 15-Suture zone; 16-Rwsearch area

### 3.2 矿石特征

矿石矿物以萤石（图2j）为主，脉石矿物为石髓（图2j）、石英（图2j）、方解石（图2k）等。根据矿石矿物和脉石矿物组合关系可分为萤石型（图2e、f、g、i）、石英（石髓）-萤石型（图2h、j）、萤石-石英（石髓）（2d）型和方解石-萤石型（图2k）4种矿石类型。萤石颜色多样，主要见紫色（图2g、h）、紫黑色（图2e、2j）、绿色（图2d）及无色（图2f）等，其中，紫色—紫黑色主要赋存在大理岩及安山岩中，绿色及无色萤石主要赋存在碱长花岗岩中。萤石以自形一半自形粒状结构为主，可见条带状构造（图2f）、块状构造（图2e）、晶洞构造（图2g）、同心圆构造、角砾状构造（图2h）、皮壳状构造及晶簇状构造（图2i）等。

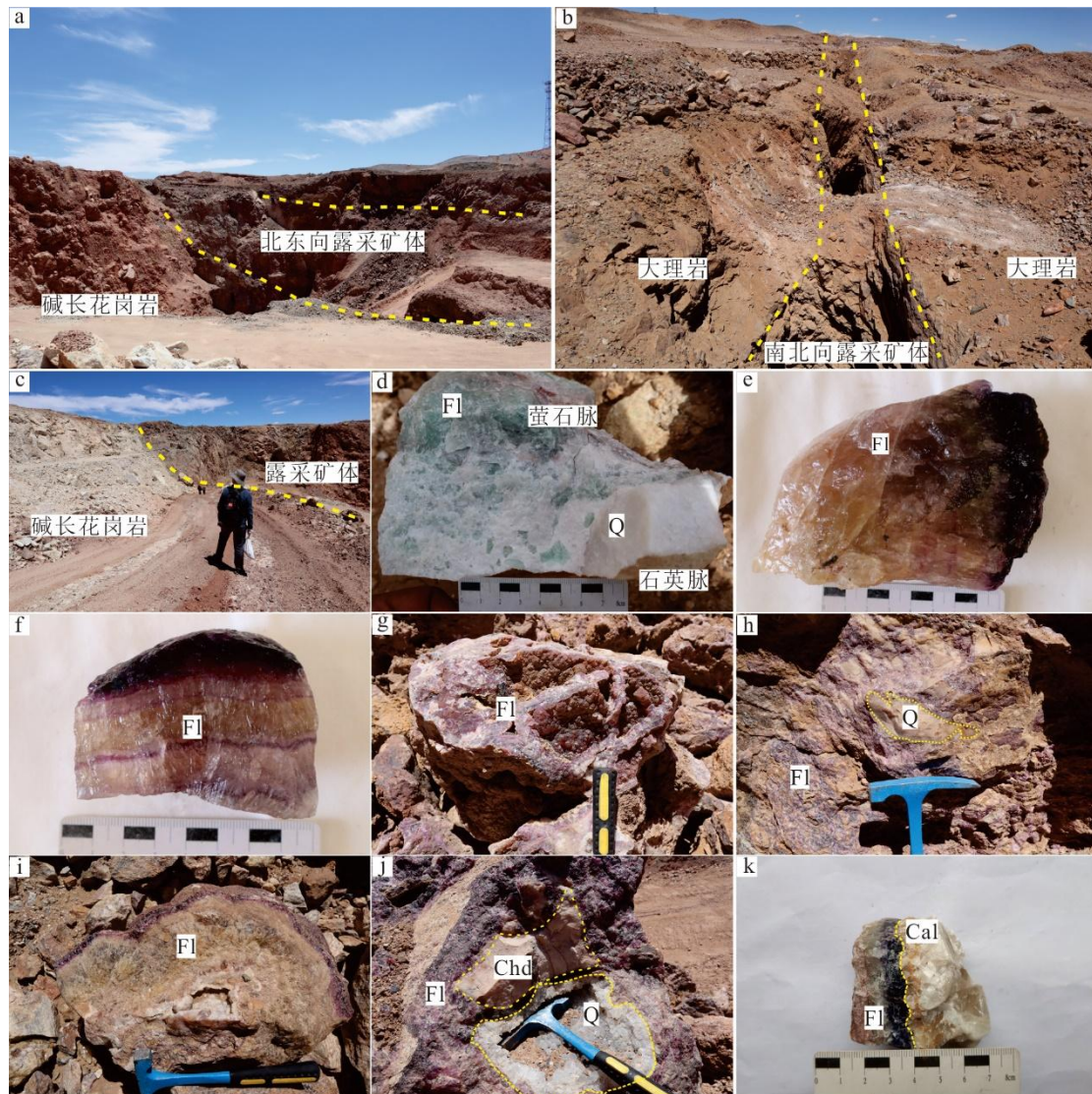


图 2 东七一山萤石矿矿体及矿石结构特征

a, c—碱长花岗岩中矿体；b—大理岩中矿体；d—萤石-石英型；e, f, g, i—萤石型；h, j—石英-萤石型；k—方解石-萤石型；Fl—萤石；Chd—石髓；Q—石英；Cal—方解石

Fig.2 Orebody and ore fabric characteristics of Dongqiyishan fluorite deposit

a, c-Orebody in alkali feldspar granite； b-Orebody in marble； d-Quartz-fluorite type； e, f, g, i-Fluorite type； h, j-Fluorite-quartz type； k-Fluorite-calcite type； Fl-Fluorite； Chd-Chalcedony； Q-Quartz； Cal-Calcite

### 3.3 围岩蚀变

萤石矿多赋存在断裂破碎带中，与围岩界线明显，赋矿围岩以碱长花岗岩、大理岩及安山岩为主，野外碱长花岗岩中可见浸染状萤石（图3e、f）。围岩蚀变有硅化、高岭土化、绿帘石化、褐铁矿化、锰矿化（图3d）、碳酸岩化等。蚀变带的宽度与矿体厚度成正比，一般脉状矿体两侧蚀变带宽1 m左右，扁豆状、囊状矿体两侧蚀变带宽度达十几米，靠近矿体蚀变变强。当围岩为中酸性火山岩或花岗岩时，主要发生硅化、高岭土化和绿帘石化（图3a）；当围岩为大理岩时，主要发生碳酸盐化（图3c）。其中与萤石矿化密切的蚀变为硅化和碳酸盐化，硅化主要为石英和石髓（图3b），白色—浅肉红色，细粒—隐晶质结构，多呈团块状、脉状发育；碳酸盐化主要为方解石，白色、黑色、肉红色，中粗粒结构，多呈团块状、脉状产、溶洞状产出。

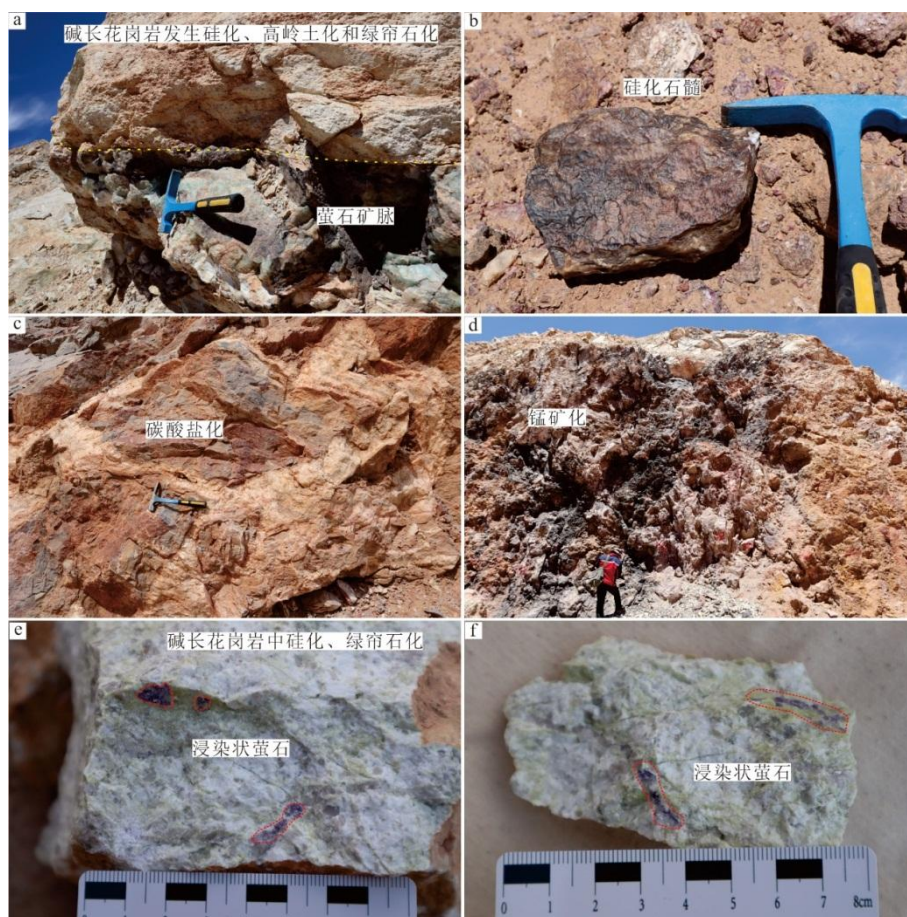


图3 东七一山萤石矿床围岩蚀变照片

a—硅化、高岭土化和绿帘石化；b—硅化石髓；c—碳酸盐化；d—锰矿化；e, f—硅化、萤石矿化

Fig.3 Field photos showing wallrock alteration of Dongqiyishan fluorite deposit

a-silicification, kaolinization and epidotization; b-the chalcedony of silicification; c-carbonnation; d-manganese mineralization; e, f-silicification and fluotite mineralization

## 4 样品采集与分析

本次研究10件样品主要采自II、III矿段近南北向及北东向萤石矿体，能够代表矿床矿石特征。萤石颜色以紫色和无色为主，样品特征见表1。矿石样品单矿物分选在北京科荟测试技术有限公司完成，萤石单矿物纯度大于99%。萤石单矿物的微量和稀土元素分析在北京核工业研究院分析测试研究中心完成，分析方法为ICP-MS，测试仪器为NexION300D 等离子体质谱仪，实验温度20.1℃，实验相对湿度19%，测试方法和依据为GB/T 14506.30-2010《硅酸盐岩石化学分析方法第30部分：44个元素量测定》。

表1 东七一山萤石矿床样品特征一览表

Table 1. The feature of samples selected from the Dongqiyishan fluorite deposit

| 样品位置      | 样品编号     | 样品特征                | 目标矿物  |
|-----------|----------|---------------------|-------|
| II矿段南北向矿体 | KMDQY1-1 | 中—细粒半自形紫色—无色条带状萤石矿  | 无色萤石  |
|           | KMDQY1-2 | 中—细粒半自形深紫色—无色块状萤石   | 无色萤石  |
|           | KMDQY1-3 | 中—细粒半自形深紫色—无色块状萤石   | 无色萤石  |
|           | KMDQY1-4 | 中细粒半自形—自形深紫色—无色块状萤石 | 无色萤石  |
|           | KMDQY1-5 | 中细粒半自形浅紫色—无色块状萤石    | 浅紫色萤石 |
| III矿段北东向  | KMDQY2-1 | 深紫色细粒萤石与浅肉红色石髓共生    | 深紫色萤石 |

|    |          |                   |       |
|----|----------|-------------------|-------|
| 矿体 | KMDQY2-2 | 深紫色细粒萤石与浅肉红色石髓共生  | 深紫色萤石 |
|    | KMDQY2-3 | 深紫色细粒萤石与浅肉红色石髓共生  | 深紫色萤石 |
|    | KMDQY2-4 | 深紫色细粒萤石与浅肉红色石髓共生  | 深紫色萤石 |
|    | KMDQY2-5 | 浅紫色中-细粒萤石与乳白色石髓共生 | 浅紫色萤石 |

## 5 结果

### 5.1 微量元素地球化学特征

矿床萤石样品的微量元素分析结果见表 2。所有萤石样品中微量元素仅 Cd、Co、Ni、Sr、Zn 含量相对较高，Cd 的含量为  $0.19 \times 10^{-6} \sim 1.8 \times 10^{-6}$ ，平均  $1.53 \times 10^{-6}$ ；Co 的含量为  $1.58 \times 10^{-6} \sim 1.81 \times 10^{-6}$ ，平均  $1.70 \times 10^{-6}$ ；Ni 的含量为  $28.1 \times 10^{-6} \sim 35.1 \times 10^{-6}$ ，平均  $32.2 \times 10^{-6}$ ；Sr 的含量为  $108 \times 10^{-6} \sim 151 \times 10^{-6}$ ，平均  $121.5 \times 10^{-6}$ ；Zn 的含量为  $1.21 \times 10^{-6} \sim 4.34 \times 10^{-6}$ ，平均  $2.53 \times 10^{-6}$ ；其他微量元素的含量均较低。

### 5.2 稀土元素地球化学特征

东七一山萤石矿床萤石和围岩碱长花岗岩的稀土元素分析结果及特征参数见表 3。除了一件无色萤石样品（KMDQY1-1） $\Sigma\text{REE}$  含量（不含 Y）小于  $5 \times 10^{-6}$ ，且 HREE 相对富集；其余萤石样品  $\Sigma\text{REE}$  含量介于  $33.22 \times 10^{-6} \sim 44.37 \times 10^{-6}$ ，平均  $40.56 \times 10^{-6}$ ，LREE 相对富集。LREE/HREE 比值主要介于 3.06~3.78， $\text{La}_N/\text{Yb}_N$  比值主要介于 1.45~2.42，表明轻、重稀土未发生明显分馏，标准配分曲线比较平缓且没有明显的差异（图 4）。所有萤石样品的  $\delta\text{Eu}$  介于 0.60~0.64，平均 0.62，负异常特征显著，而  $\delta\text{Ce}$  介于 0.89~0.94，平均 0.91，异常特征不明显。东七一山萤石矿床萤石稀土元素特与我国南岭地区萤石矿床明显不同（方贵聪等，2020）。碱长花岗岩样品的  $\Sigma\text{REE}$  含量介于  $64.55 \times 10^{-6} \sim 84.64 \times 10^{-6}$ ，平均  $72.95 \times 10^{-6}$ 。LREE/HREE 比值主要介于 3.12~3.66， $\text{La}_N/\text{Yb}_N$  比值主要介于 1.06~1.93，显示轻、重稀土未发生明显分馏，标准配分曲线比较平缓。 $\delta\text{Eu}$  介于 0.99~1.00，平均 1.00，无明显异常，而  $\delta\text{Ce}$  介于 1.43~2.84，平均 1.97，正异常特征明显。总体上，萤石除了具 Eu 负异常，稍小的  $\Sigma\text{REE}$  含量，其稀土标准配分曲线与碱长花岗岩具有极高的一致性。

表 2 东七一山萤石矿床萤石微量元素测试结果 (wB/10<sup>-6</sup>)

Table 2. Trace element contents of fluorites from the Dongqi yishan fluorite deposit

| 样品 | KMDQY1-1 | KMDQY1-2 | KMDQY1-3 | KMDQY1-4 | KMDQY1-5 | KMDQY2-1 | KMDQY2-2 | KMDQY2-3 | KMDQY2-4 | KMDQY2-5 | 地壳平均  |
|----|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-------|
| Li | 0.106    | 0.163    | 0.722    | 1.44     | 0.817    | 1.34     | 0.336    | 0.823    | 1.28     | 1.33     | 21    |
| Ba | 0.602    | 0.629    | 0.511    | 0.499    | 0.512    | 0.671    | 0.88     | 0.256    | 0.429    | 0.345    | 390   |
| Be | 2.03     | 0.542    | 0.154    | 0.136    | 0.131    | 0.083    | 0.092    | 0.087    | 0.111    | 0.115    | 1.3   |
| Bi | 0.004    | 0.06     | 0.011    | 0.009    | 0.032    | 0.008    | 0.01     | 0.004    | 0.005    | 0.007    | 0.004 |
| Cd | 0.192    | 1.28     | 1.57     | 1.7      | 1.77     | 1.75     | 1.78     | 1.8      | 1.76     | 1.72     | 0.2   |
| Co | 1.58     | 1.58     | 1.71     | 1.69     | 1.77     | 1.63     | 1.8      | 1.74     | 1.81     | 1.71     | 25    |
| Cr | 0.498    | 1.24     | 1.44     | 0.996    | 0.759    | 1.03     | 0.975    | 0.872    | 0.827    | 0.814    | 110   |
| Cs | 0.173    | 0.056    | 0.046    | 0.051    | 0.05     | 0.065    | 0.019    | 0.042    | 0.064    | 0.052    | 1.4   |
| Cu | 0.102    | 0.3      | 0.201    | 0.086    | 0.582    | 0.1      | 0.236    | 0.091    | 0.305    | 0.207    | 63    |
| Ga | 0.006    | 0.048    | 0.062    | 0.054    | 0.075    | 0.079    | 0.062    | 0.058    | 0.063    | 0.143    | 18    |
| Mo | 0.082    | 0.118    | 0.038    | 0.374    | 1.78     | 0.077    | 0.599    | 0.027    | 0.037    | 0.411    | 1.3   |
| Ni | 28.1     | 29.7     | 32       | 32       | 32.2     | 32.4     | 34.7     | 34.5     | 35.1     | 31.3     | 89    |
| Pb | 0.16     | 0.353    | 0.328    | 0.181    | 0.35     | 0.195    | 0.548    | 0.181    | 1.75     | 0.166    | 12    |
| Rb | 0.144    | 0.104    | 0.087    | 0.089    | 0.19     | 0.103    | 0.083    | 0.077    | 0.09     | 0.095    | 78    |
| Sb | 0.013    | 0.029    | 0.588    | 0.025    | 0.037    | 0.047    | 0.044    | 0.042    | 0.044    | 0.032    | 0.6   |
| Sc | 0.16     | 0.103    | 0.11     | 0.148    | 0.16     | 0.096    | 0.117    | 0.11     | 0.138    | 0.113    | 18    |
| Sr | 151      | 120      | 111      | 139      | 124      | 113      | 117      | 115      | 117      | 108      | 480   |
| Th | 0.031    | 0.102    | 0.115    | 0.142    | 0.159    | 0.123    | 0.293    | 0.126    | 0.137    | 0.113    | 5.8   |
| Tl | 0.009    | 0.028    | 0.018    | 0.008    | 0.02     | 0.008    | 0.02     | 0.031    | 0.014    | 0.009    | 0.4   |
| U  | 0.182    | 0.132    | 0.177    | 0.072    | 0.118    | 0.065    | 0.126    | 0.07     | 0.046    | 0.047    | 1.7   |
| V  | 0.13     | 0.178    | 0.174    | 0.146    | 0.144    | 0.151    | 0.212    | 0.224    | 0.168    | 0.126    | 140   |
| W  | 0.353    | 0.266    | 0.261    | 0.281    | 0.331    | 0.256    | 0.491    | 0.246    | 0.28     | 0.278    | 1.1   |
| Zn | 1.4      | 1.21     | 1.51     | 2.51     | 4.34     | 1.51     | 5.9      | 2.49     | 2.42     | 2.01     | 94    |



注：地壳数据引自文献（黎彤，1976）。

表 3 东七一山萤石矿床萤石稀土元素测试结果 (wB/10<sup>-6</sup>)

Table 3. Analytical results of REE in fluorites from the Dongqiyishan fluorite deposit

| 样品编号                             | KMDQY1-1 | KMDQY1-2 | KMDQY1-3 | KMDQY1-4 | KMDQY1-5 | KMDQY2-1 | KMDQY2-2 | KMDQY2-3 | KMDQY2-4 | KMDQY2-5 | DQ15-1 | DQ15-3 | DQ15-4 |
|----------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------|--------|--------|
| 样品名称                             | 萤石       | 萤石       | 萤石       | 萤石       | 萤石       | 萤石       | 萤石       | 萤石       | 萤石       | 萤石       | 碱长花岗岩  | 碱长花岗岩  | 碱长花岗岩  |
| La                               | 0.39     | 5.61     | 6.93     | 6.02     | 6.86     | 6.54     | 7.58     | 7.02     | 7.17     | 6.15     | 11.20  | 7.57   | 5.41   |
| Ce                               | 0.89     | 11.10    | 13.70    | 11.80    | 13.60    | 13.40    | 14.70    | 13.80    | 13.70    | 12.30    | 36.80  | 30.40  | 35.40  |
| Pr                               | 0.13     | 1.47     | 1.84     | 1.58     | 1.78     | 1.79     | 1.94     | 1.81     | 1.83     | 1.64     | 3.39   | 2.61   | 1.64   |
| Nd                               | 0.53     | 5.88     | 7.24     | 6.62     | 7.55     | 7.47     | 8.09     | 7.65     | 7.61     | 6.87     | 11.60  | 9.23   | 5.60   |
| Sm                               | 0.22     | 1.55     | 1.95     | 1.91     | 2.13     | 2.08     | 2.11     | 2.08     | 1.98     | 1.97     | 3.48   | 2.96   | 1.82   |
| Eu                               | 0.04     | 0.29     | 0.36     | 0.36     | 0.42     | 0.40     | 0.40     | 0.41     | 0.39     | 0.40     | 0.00   | 0.00   | 0.00   |
| Gd                               | 0.19     | 1.28     | 1.57     | 1.70     | 1.77     | 1.75     | 1.78     | 1.80     | 1.76     | 1.72     | 3.67   | 3.18   | 2.36   |
| Tb                               | 0.06     | 0.30     | 0.36     | 0.44     | 0.43     | 0.39     | 0.41     | 0.41     | 0.41     | 0.40     | 0.74   | 0.64   | 0.55   |
| Dy                               | 0.49     | 1.94     | 2.28     | 2.94     | 2.83     | 2.56     | 2.53     | 2.54     | 2.59     | 2.57     | 4.76   | 4.47   | 3.87   |
| Ho                               | 0.11     | 0.39     | 0.46     | 0.62     | 0.57     | 0.50     | 0.51     | 0.52     | 0.53     | 0.53     | 0.94   | 0.93   | 0.81   |
| Er                               | 0.33     | 1.17     | 1.34     | 1.86     | 1.73     | 1.50     | 1.53     | 1.53     | 1.59     | 1.48     | 3.07   | 2.97   | 2.69   |
| Tm                               | 0.08     | 0.25     | 0.28     | 0.40     | 0.37     | 0.32     | 0.31     | 0.33     | 0.34     | 0.31     | 0.53   | 0.50   | 0.47   |
| Yb                               | 0.60     | 1.75     | 1.93     | 2.80     | 2.54     | 2.11     | 2.19     | 2.16     | 2.24     | 2.21     | 3.92   | 3.67   | 3.43   |
| Lu                               | 0.10     | 0.23     | 0.25     | 0.37     | 0.33     | 0.28     | 0.30     | 0.28     | 0.29     | 0.29     | 0.54   | 0.53   | 0.50   |
| Y                                | 3.08     | 9.54     | 10.70    | 14.70    | 13.60    | 11.30    | 11.50    | 11.50    | 12.10    | 11.10    | 21.70  | 20.60  | 20.20  |
| ΣREE                             | 4.16     | 33.22    | 40.49    | 39.42    | 42.90    | 41.10    | 44.37    | 42.33    | 42.42    | 38.83    | 84.64  | 69.66  | 64.55  |
| LREE                             | 2.20     | 25.90    | 32.02    | 28.29    | 32.34    | 31.68    | 34.82    | 32.77    | 32.68    | 29.33    | 66.47  | 52.77  | 49.87  |
| HREE                             | 1.96     | 7.31     | 8.47     | 11.13    | 10.56    | 9.42     | 9.55     | 9.56     | 9.74     | 9.51     | 18.17  | 16.89  | 14.68  |
| LREE/HREE                        | 1.12     | 3.54     | 3.78     | 2.54     | 3.06     | 3.36     | 3.65     | 3.43     | 3.36     | 3.09     | 3.66   | 3.12   | 3.40   |
| La <sub>N</sub> /Yb <sub>N</sub> | 0.43     | 2.16     | 2.42     | 1.45     | 1.82     | 2.09     | 2.33     | 2.19     | 2.16     | 1.88     | 1.93   | 1.39   | 1.06   |
| δEu                              | 0.60     | 0.61     | 0.61     | 0.60     | 0.64     | 0.63     | 0.62     | 0.63     | 0.63     | 0.64     | 0.99   | 0.99   | 1.00   |

| 样品编号              | KMDQY1-1 | KMDQY1-2 | KMDQY1-3 | KMDQY1-4 | KMDQY1-5 | KMDQY2-1 | KMDQY2-2 | KMDQY2-3 | KMDQY2-4 | KMDQY2-5 | DQ15-1           | DQ15-3 | DQ15-4 |
|-------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|------------------|--------|--------|
| 样品名称              | 萤石       | 萤石       | 萤石       | 萤石       | 萤石       | 萤石       | 萤石       | 萤石       | 萤石       | 萤石       | 碱长花岗岩            | 碱长花岗岩  | 碱长花岗岩  |
| $\delta\text{Ce}$ | 0.94     | 0.91     | 0.91     | 0.90     | 0.92     | 0.93     | 0.90     | 0.91     | 0.89     | 0.91     | 1.43             | 1.64   | 2.84   |
| La/Ho             | 3.58     | 14.42    | 15.23    | 9.69     | 12.06    | 12.98    | 15.01    | 13.53    | 13.53    | 11.65    |                  |        |        |
| Y/Ho              | 28.52    | 24.52    | 23.52    | 23.67    | 23.90    | 22.42    | 22.77    | 22.16    | 22.83    | 21.02    |                  |        |        |
| n(Tb)/n(La)       | 0.16     | 0.05     | 0.05     | 0.07     | 0.06     | 0.06     | 0.05     | 0.06     | 0.06     | 0.06     |                  |        |        |
| n(Tb)/n(Ca)       | 1.19     | 5.86     | 7.05     | 8.51     | 8.43     | 7.64     | 7.91     | 7.91     | 7.89     | 7.69     |                  |        |        |
| 数据来源              | 本次研究     |          |          |          |          |          |          |          |          |          | 引自文献 (吕博等, 2011) |        |        |

注: 计算 Tb/Ca 原子数比时,  $n(\text{Ca})$ 采用  $\text{CaF}_2$  中 Ca 的理论值 (51.3328%)。

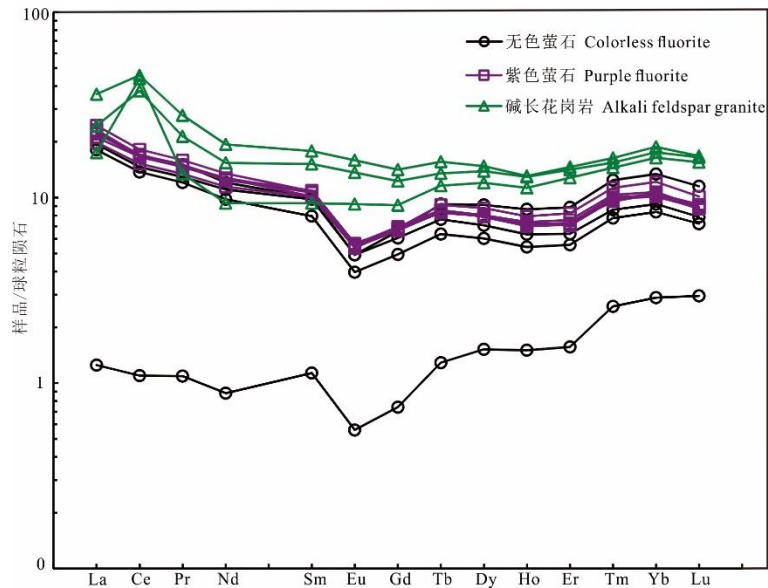


图 4 东七一山萤石矿床萤石和碱长花岗岩稀土元素球粒陨石标准化配分模式图 (球粒陨石据 Boynton WV, 1984)

Fig.4 Chondrite-normalized REE patterns for fluorites and alkali feldspar granites from the Dongqiyishan fluorite deposit

## 6 讨论

### 6.1 微量元素

东七一山萤石矿床矿石矿物组成简单, 主要为萤石、石髓、石英和方解石, 不含硫化物。因此, 萤石的微量元素特征可以代表成矿流体中的元素地球化学信息 (金少荣等, 2018)。在相对地壳元素平均丰度的富集程度图 (图 5) 上, 仅见 Bi、Cd 和 Mo 等高温元素具有一定程度富集 (黄建国等, 2012), 其余元素均不同程度亏损, 且 Ba、Cr、Cu、Ga、Rb、V 明显亏损。这表明形成萤石矿床的流体中本来就富集这些高温元素。区域上, 东七一山萤石矿床位于北山成矿带之公婆泉—东七一山成矿亚带, 带内主要有公婆泉斑岩型铜矿、东七一山铷 (锂)、铍、铌-钽、钨、锡矿床 (王勇等, 2009; 张善明等, 2014), 它们共同组成北山成矿带中部中高温成矿亚带。因此, 萤石中这些高温元素的富集, 进而表明东七一山萤石矿床属于与碱长花岗岩有关的钨锡稀有萤石成矿系统的产物 (王勇等, 2009; 高永宝等, 2021)。萤石中其它微量元素的亏损, 可能是因为以下 3 个因素 (金少荣等, 2018; 张遵遵等, 2018): ①原始成矿流体中这些元素含量相对较低, 演化过程中没有过多的外来元素加入; ②富集在其他矿物或矿床中; ③不易进入萤石晶格。东七一山地区不仅形成超大型萤石矿床和中型钨锡矿床, 同时也有与碱长花岗岩有关的铷 (锂)、铍、铌-钽工业矿体形成。因此, 前两个因素可能是萤石中这些微量元素的亏损的主要原因。此外, 萤石样品微量元素富集和亏损特征一致, 显示这些样品具有同源性。不同矿段不同矿体中不同颜色的萤石微量元素组成特征没有明显差异 (表 2 和图 5), 结合野外南北向和北东向矿体未见明显切割关系, 表明东七一山萤石矿床南北向和北东向矿体可能为一期成矿事件。

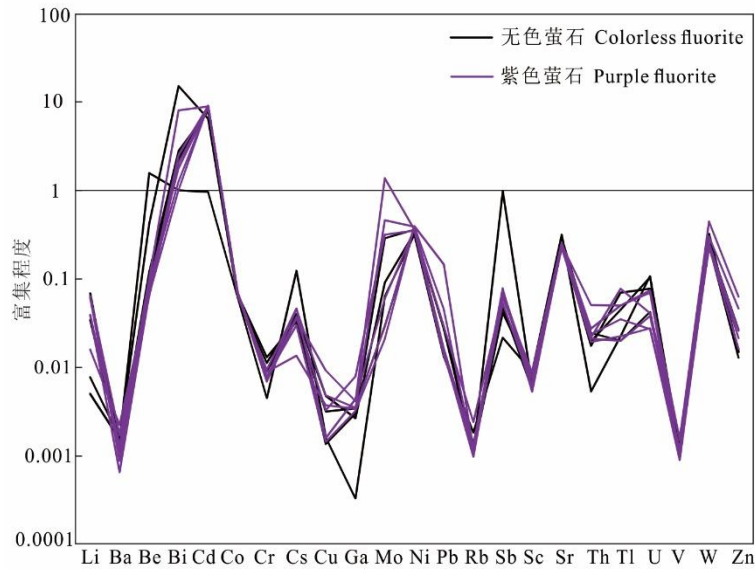


图 5 东七一山萤石矿床萤石中微量元素相对地壳平均丰度的富集特征（地壳平均数据引自黎彤，1976）

Fig.5 Enrichment characteristics of trace elements in fluorites from the Dongqi-yishan fluorite deposit relative to crust abundance

## 6.2 稀土元素

稀土元素作为地质地球化学过程中的示踪剂，能够反映物理化学条件变化、成矿流体运移、演化以及流体的水岩反应等成矿作用过程，在示踪岩浆来源演化和成矿作用等方面起着非常有效的作用(Bau and Dulski, 1995; Bau 1996; Bau and Möller, 1992; Schwinn and Markl, 2005; 赵省民等, 2002; 邹灏等, 2014; 张青松等, 2021; 游超等, 2022)。由于萤石矿物中  $\text{Ca}^{2+}$  与  $\text{REE}^{3+}$  半径接近， $\text{REE}^{3+}$  常以类质同象的方式进入并保存在萤石晶格中，而不同地质环境下发育的萤石差异较大，因此研究萤石稀土元素具有重大的地质意义 (Mondillo et al., 2016; Souissi et al., 2010; Möller et al., 1976; 董文超等, 2020; 宋开瑞, 2019)。

### 6.2.1 稀土元素特征

由图 4 和表 3 可知，除了晚阶段重结晶作用形成的一件萤石样品，其余萤石稀土元素配分模式变化趋势基本一致，且与碱长花岗岩稀土元素配分曲线形态较为相似，说明二者具有密切的成因关系，东七一山萤石矿中萤石的成矿物质来源是相同的，且萤石和碱长花岗岩的物源具有相似性。由于 Sm 和 Nd 具有极为相似的化学性质且不易分离，所以 Sm/Nd 比值能够较好的反应源区特征(刘英俊, 1987)。东七一山萤石矿床萤石的 Sm/Nd 比值为 0.26~0.42，均值为 0.29；碱长花岗岩的 Sm/Nd 比值为 0.30~0.33，均值为 0.32，从萤石和碱长花岗岩的 Sm/Nd 比值看其相差不大，表明该萤石矿床的成矿物质可能与碱长花岗岩有关。

### 6.2.2 La/Ho-Y/Ho 关系图

Bau 和 Dulski (1995) 通过对德国和英国大量萤石矿床中萤石的 Y 和 REE 元素特征对比研究，认为：①在萤石沉淀过程中，Y 和 REE 密切相关，热液脉状萤石的非球粒陨石 Y/Ho 比值可高达 200；②相同物源条件下形成的萤石中 Y、La 和 Ho 三种元素存在一定的相关性；③Y-Ho 分馏现象与流体来源无关，而是取决于流体组成及物理化学性质。同期同流体来源形成的萤石中 Y/Ho、La/Ho 两者之间的比值相似且趋近一直线；非同期同流体来源结晶的萤石 Y/Ho、La/Ho 值呈负相关；而重结晶的萤石中 Y/Ho 变化较小，La/Ho 变化范围较宽(张遵遵等, 2018; 代晓光等, 2021)。东七一山萤石矿床 10 件萤石样品的 Y/Ho 比值变化很小，其范围为 21.02~28.52；La/Ho 比值为 3.58~15.23。在 La/Ho-Y/Ho 关系图解中呈近水平分布(图 6)，表明形成这些萤石的成矿流体为同期同源流体。其中一件无色萤石的 La/Ho 比值为 3.58，该萤石样品可能是同期较晚阶段成矿作用下的重结晶产物，萤石的稀土元素球粒陨

石标准化配分模式图也可说明这一结论。

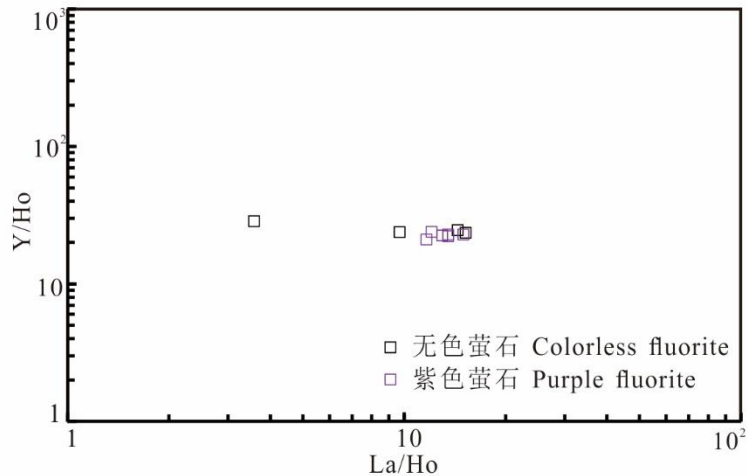


图 6 东七一山萤石矿床萤石的 La/Ho-Y/Ho 图解 (底图据 Bau 和 Dulski, 1995)

Fig.6 La/Ho-Y/Ho diagram of fluorite from the Dongqiyishan fluorite deposit (Base map after Bau and Dulski, 1995 )

### 6.2.3 Tb/La-Tb/Ca 关系图

Tb/La-Tb/Ca 图解不仅被应用于萤石矿床成因类型判别, 也被应用于萤石作为副矿物的其他金属矿床成因类型判定, 包括热液成因、伟晶岩(气液)成因、和沉积成因。该图解能够判断成矿流体与围岩是否发生水岩反应, 其中 Tb/Ca 比值的变化反映成矿流体对围岩 Ca 的混染作用和稀土元素在流体中的吸附作用, Tb/La 比值的变化反映稀土元素的分馏作用及萤石形成的先后顺序 (Moller et al., 1976; 许东青等, 2009; 黄鸿新等, 2018; 董文超等, 2020)。东七一山萤石矿床萤石样品均落在 Tb/La-Tb/Ca 图解的热液成因区 (图 7), 有一件无色萤石样品落在靠近沉积成因区域, 初步表明东七一山萤石矿床是热液成因的产物, 且指示成矿流体与围岩发生了一定程度的水岩反应。

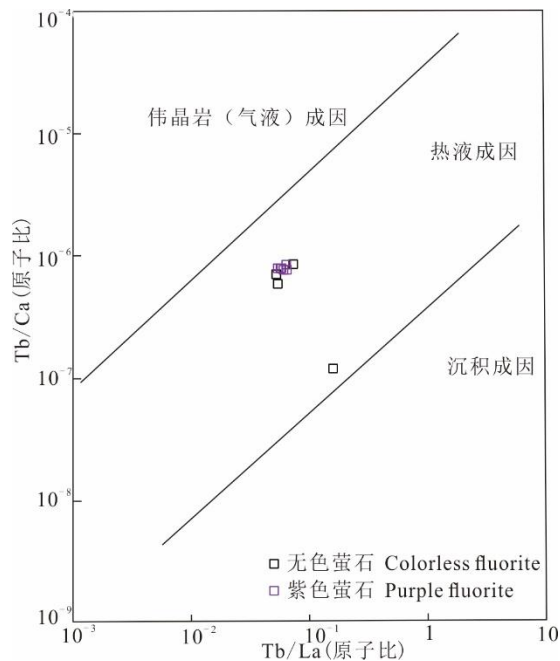


图 7 东七一山萤石矿床萤石的 Tb/La-Tb/Ca 图解 (底图据 Moller et al., 1976)

Fig.7 Tb/La-Tb/Ca diagram of fluorite from the Dongqiyishan fluorite deposit (Base map after Moller et al.,

### 6.2.4 $\delta\text{Eu}$ 和 $\delta\text{Ce}$

Eu 和 Ce 异常可以指示萤石成矿流体温度和氧化还原条件, 在成矿流体中,  $\text{Eu}^{3+}/\text{Eu}^{2+}$  的氧化还原电位主要受温度控制 (Williams et al., 2000; Schwinn and Markl, 2005)。成矿流体结晶沉淀时, 结晶温度介于 200~250°C, 且处于还原环境时常形成 Eu 负异常; 当成矿流体处于碱性、氧化环境中时,  $\text{Eu}^{2+}$  被氧化成  $\text{Eu}^{3+}$ , 才会进入矿物晶格形成 Eu 正异常 (曹华文等, 2014)。 $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$  的氧化还原电位受酸碱度和氧逸度控制, 酸碱度占主导地位 (Elderfield and Sholkovitz, 1987; 张遵遵等, 2018)。在氧逸度较高的条件下, 矿物在成矿流体中沉淀时易形成 Ce 负异常 (曹华文等, 2014)。东七一山萤石矿床萤石的  $\delta\text{Eu}$  值为 0.60~0.64, 平均值为 0.62, 表现为显著的负异常, 萤石明显的 Eu 负异常指示其成矿流体为较低温的还原环境;  $\delta\text{Ce}$  值为 0.89~0.94, 平均值为 0.91, 显示弱的负异常, Ce 弱的负异常指示成矿流体为弱氧化环境。本区碱长花岗岩的  $\delta\text{Ce}$  值为 1.43~2.84, 平均值为 1.97, 显示为正异常。萤石的 Ce 异常与 Eu 异常矛盾, 且与区内碱长花岗岩 Ce 异常矛盾, 说明成矿流体本身存在 Ce 亏损, 从而形成萤石显示 Ce 弱的负异常。

### 6.3 成矿物质来源

萤石主要由 F 和 Ca 组成, 成矿有就地取材特征 (曹俊臣, 1995)。前人研究认为, Ca 元素一般来自赋矿围岩, F 元素通常来自地壳深部, 由中酸性岩浆岩携带而来 (Weidner and Martin., 1987; Joaquin et al., 1985; 赵省民等, 2002; 傅树超, 2003; 许东青等, 2009; 刘道荣, 2017; 方贵聪等, 2020)。结合野外萤石矿体与碱长花岗岩关系、碱长花岗岩中浸染状萤石以及微量、稀土元素地球化学特征, 认为东七一山萤石矿床成矿流体以岩浆热液为主, 成矿物质 F 主要来源于深部碱长花岗岩大岩体, Ca 主要来源于大理岩地层。矿床成因类型为中高温岩浆热液脉状萤石矿床。

## 7 结论

(1) 东七一山萤石矿床不同矿体中不同颜色的萤石微量元素曲线变化趋势一致且富集 Bi、Cd 和 Mo 等高温元素, 显示这些样品具有同源性, 属于区内与碱长花岗岩有关的钨锡稀有萤石成矿系统的产物。

(2) 萤石与碱长花岗岩具有相似的稀土元素地球化学特征, 结合  $\text{La}/\text{Ho}-\text{Y}/\text{Ho}$ 、 $\text{Tb}/\text{La}-\text{Tb}/\text{Ca}$ 、 $\delta\text{Eu}$ 、 $\delta\text{Ce}$ 、 $\text{Sm}/\text{Nd}$  及矿床地质等特征, 认为东七一山萤石矿床为中高温岩浆热液脉状萤石矿床, 成矿流体以岩浆热液为主, 成矿物质 F 主要来源于深部碱长花岗岩大岩体, Ca 主要来源于大理岩地层。

## References

- Bau M, Möller P. 1992. Rare Earth Element Fractionation in Metamorphogenic Hydrothermal Calcite, Magnesite and Siderite[J]. *Mineralogy & Petrology*, 45: 231-246.
- Bau Michael, Dulski Peter. 1995. Comparative Study of Yttrium and Rare-Earth Element Behaviours in Fluorine-Rich Hydrothermal Fluids[J]. *Contrib Mineral Petrol*, 119(2): 213-223.
- Bau Michael. 1996. Controls On the Fractionation of Isovalent Trace Elements in Magmatic and Aqueous Systems: Evidence From Y/Ho, Zr/Hf, and Lanthanide Tetrad Effect[J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 123(3): 323-333.
- Boynnton W V. 1984. Cosmochemistry of the Rare Earth Elements: Meteorite Studies[J]. *Developments in Geochemistry*, 63-114.
- Cao Huawen, Zhang Shouting, Gao Yongzhang, Ma Ying, Zeng Zhaofa, Gao Feng, Zou Hao. 2014. REE geochemistry of fluorite from Linxi fluorite deposit and its geological implications, Inner Mongolia Autonomous Region. *Geochimica*, 43(02): 131-140(in Chinese with English abstract).
- Cao Junchen. 1995. Ree Geochemica characteristics of Epithermal Vien Fluorite Deposits In South China[J]. *Geochimica*, (3): 225-234(in Chinese with English abstract).
- Chen Junyuan, Liu Yanfei, Yan Lingya, Gao Shuxue, OuYang Youhe, Long Tao. 2021. Research on Development Trend of Strategic Nonmetallic Minerals such as Graphite and Fluorite[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 42(02): 287-296(in Chinese with English abstract).
- Dai Kaiming, Che Zhangbo, Wang Fuliang. 2021. Suggestions on exploration, development and utilization management of fluorite resources[J]. *China Mining Magazine*, 30(09): 32-35(in Chinese with English abstract).
- Dai Xiaoguang, Shang Pengqiang, Zhang Chengxin, Liang Zhongpeng, Wang Jinpeng, Li Jian, Yang Haibo, Nie Xinpeng. 2021. Geochemical characteristics and genesis of the Zhaosugou fluorite deposit, northern Hebei Province[J]. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 40(01): 27-38(in Chinese with English abstract).
- Ding Jiabin, Han Chunming, Xiao Wenjiao, Wang Zhongmei, Yang Xiaomei. 2015. Geochemistry and U-Pb geochronology of tungsten deposit of Huaniushan island arc in the Beishan Orogenic Belt, and its geodynamic background. *Acta Petrologica Sinica*, 31(2): 594-616(Chinese with English abstract).
- Dong Wenchao, Pang Xucheng, Si Yuanyuan, Liang Zhen, Li Wenming. 2020. REE Geological Characteristics of Checun Fluorite Deposit in Song County, Henan Province[J]. *Journal Of The Chinese Society Of Rare Earths*, 38(05): 706-714(in Chinese with English abstract).
- Elderfield H, Sholkovitz, ER. 1987. Rare Earth Elements in the Pore Waters of Reducing Nearshore Sediments[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 82(3-4): 280-288.
- Fang Guicong, Wang Denghong, Chen Yuchuan, Huang Fan, Wang Yan, Wu Jiaxu, Hu Shifu. 2020. Metallogenic regularities and genesis of the fluorite deposits in Nanling region[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(01): 161-178(in Chinese with English abstract).
- Fu Shuchao. 2003. On Geologic Characteristics of Nanzhou Fluorite Deposit in Shunchang, Fujian Province[J]. *Geology of Fujian*, 22(2): 53-61(in Chinese with English abstract).
- Gao Yongbao, Zhao Xinmin, Wang Bo, Zhang Jiangwei, Jin Moushun, Yang Shengfei, Yan Zhouquan, Teng Jiabin, Zhao Huibo, Chao Yinyin. 2021. Geological characteristics of fluorite deposits and ore-controlling granites, and prospecting potential of the super-large Kaerqiaer-Kumutashi fluorite mineralization belt in West Altyn-Tagh, China[J]. *Geology in China*.
- Hou Qingye, Wang Zhong, Liu Jinbao, Wang Jin, Li Dapeng. 2012. Geochemistry Characteristics and SHRIMP Dating of Yueyashan Ophiolite in Beishan Orogen[J]. *Geoscience*, 26(05): 1008-1018(in Chinese with English abstract).

- English abstract).
- Huang Hongxin, Luo Ping, Chang Simin, Zhang Jun, Wang Chenghui. 2018. Characteristics of rare earth elements and the source of mineralization of fluorite deposit in Huangbi, Jiangxi Province[J]. *Mineral Resources And Geology*, 32(4): 641-654(in Chinese with English abstract).
- Huang Jianguo, Li Hujie, Li Wenjie, Dong Lei. 2012. Trace Element Characteristics of Fluorite and Its Sm-Nd Isotopic Dating in Getang Gold Deposit, Guizhou Province[J]. *Advances In Earth Science*, 27(10): 1087-1093(in Chinese with English abstract).
- Jin Shaorong, Chen Jun, Dai Derong, Yang Dezhi, Zhou Jiayi, He Xiaohu. 2018. Geochemical Characteristics of Trace Elements and REE in the Gaoling Fluorite Deposit, Southwest Guizhou, China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 38(06): 684-692(in Chinese with English abstract).
- Joaquin, Ruiz, Stephen, Kesler E, Lois, Jones M. 1985. Strontium isotope geochemistry of fluorite mineralization associated with fluorine-rich igneous rocks from the Sierra Madre Occidental, Mexico; possible exploration significance[J]. *Economic Geology*, 80(1): 33-42.
- 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(06): 62-68(in Chinese with English abstract).
- Li Min, Xin Houtian, Ren Bangfang, Ren Yunwei, Zhang Kuo, Duan Xiaolong, Niu Wenchao, Duan Lianfeng. 2019. Petrogenesis and Tectonic Significance of the Late Palaeozoic Granitoids in Hazhu Area, Inner Mongolia[J]. *Earth Science*, 44(01): 328-343(in Chinese with English abstract).
- Li Tong. 1976. Chemical Element Abundances In The Earth And It's Major Shells[J]. *Geochemical*, 3(1): 167-174 (in Chinese with English abstract).
- Liao Yunfeng, Hu Xinzhuo, Cheng Haifeng, Xu Xuming. 2016. Petrological and petrochemical characteristics and geological significance of Yueyashan ophiolite. *Geological Bulletin of China*, 35(08): 1243-1254(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 Yanfei, Yan Lingya, Liu Qunyi Gao Shuxue, Du Yilun, Sun Jixiu. 2019. Evaluation study on the important non-metallic minerals in China and suggestions for key exploration[J]. *China Mining Magazine*, 28(10): 85-91(in Chinese with English abstract).
- Liu Yingjun. 1987. Introduction to elemental geochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House, 194-205(in Chinese with English abstract).
- Lu Bo, Yang Yueqing, Meng Guixiang, Yan Jiayong, Zhao Jinhua, Wang Shouguang, Jia Linglong, Peng Runmin. 2011. Geochemical characteristics and petrogenesis of Dongqiyishan alkali feldspar granite, Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 30(03): 543-552(in Chinese with English abstract).
- Möller P, Parekh P P, Schneider H J. 1976. The Application of Tb/Ca-Tb/La Abundance Ratios to Problems of Fluorspar Genesis[J]. *Mmineralium Deposita*, 11: 111-116.
- Mondillo N, Boni M, Balassone G, Spoleto S, Stellato F, Marino A, Santoro L, Spratt J. 2016. Rare Earth Elements (REE)-Minerals in the Silius Fluorite Vein System (Sardinia, Italy)[J]. *Ore Geology Reviews*, 2016, 74: 211-224.
- Nie Fengjun, Jiang Sihong, Liu Yan. 2002. Sm-Nd Isotopic Dating of Fluorite Separates from Dongqishan Fluorite Deposit, Alxa, Western Inner Mongolia[J]. *Mineral Deposits*, 21(1): 10-15(in Chinese with English abstract).
- Schwinn G, Markl G. 2005. REE Systematics in Hydrothermal Fluorite[J]. *Chemical Geology*, 216(3-4): 225-248.
- 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.[J]. *Geochimica Et*



- Cosmochimica Acta, 64: 3141-3160.
- Song Kairui. 2019. Metallogenic relationship and prospecting significance between fluorite deposits and lead-zinc-silver polymetallic deposits in the Linxi area, Inner Mongolia[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 1-129(Chinese with English abstract).
- Souissi F, Souissi R, Dandurand J L. 2010. The Mississippi Valley-type Fluorite Ore at Jebel Stah (Zaghuan District, North-Eastern Tunisia): Contribution of REE and Sr Isotope Geochemistries to the Genetic Model[J]. Ore Geology Reviews, 2010, 37(1): 15-30.
- Sun Hairui, Huang Zhilong, Zhou Jiayi, Leng Chengbiao, Gan Ting. 2014. Rare earth elements geochemistry of fluorite in hydrothermal deposits and its geological significance[J]. Acta Petrologica Et Mineralogica, 33(1): 185-193(in Chinese with English abstract).
- Wang Ling. 2019. Considerations on Strategic Non-metallic Mineral Resources[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 39(06): 1-7(in Chinese with English abstract).
- Wang Yong, Lu Qingtian, Meng Guixiang, Yan Jiayong, Yang Yueqing, Zhao Jinhua. 2009. Alkali Feldspar Granite of Dongqiyishan Inner Mongolia and Its Metallogenesis[J]. Acta Geologica Sinica, 83(10): 1505-1514(in Chinese with English abstract).
- Wang Ziguo, Zhu Peiyuan. 2020. Strategic layout of fluorite mine in state-owned enterprises[J]. China Mining Magazine, 29(06):8-11(in Chinese with English abstract).
- Weidner JR, Martin RF. 1987. Phase equilibria of a fluorine-rich leucogranite from the St. Austell pluton, Cornwall[J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 51(6): 1591-1597.
- Williams-Jones AE, Samson IM, Olivo, GR. 2000. The Genesis of Hydrothermal Fluorite-REE Deposits in the Gallinas Mountains, New Mexico[J]. Economic Geology, 95: 327-341.
- Xu Dongqing. 2009. Geological Setting, features and Origin of the Sumochagan Obo Super-large Fluorite Mineralized District[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 1-160(Chinese with English abstract).
- Xu Hai, Liu Haitao, Jia Yuanqin, Wang Guoliang. 2021. Reflection on the Development of Fluorite Industry in China[J]. Sichuan Nonferrous Metals, (03): 2-5(in Chinese with English abstract).
- You Chao, Wang Chunlian, Liu Dianhe et al. 2022. REE Geochemistry of Fluorite from Kantian Fluorite Deposit and Its Geological Implications in Ningdu Area, Jiangxi Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 43(03): 359-370(in Chinese with English abstract).
- Zhang Qingsong, Wang Chunlian, Li Kekun, Liu Zengzheng, Feng Xiaohui, Yan Xiaobo, Han Zhikun, Jiang Jiyong, Jiang Jianlang. 2021. Discussion on structural alteration, rock geochemistry characteristics and genesis of Daping fluorite deposit in northern Fujian[J]. Acta Petrologica Et Mineralogica, 40(6) : 1131-1140 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Shanming, Wang Tingyuan, Zhang Hua, Zhang Zhiguo, Yang Rui, Fan Lixin. 2014. Oregon-trolling factors and geological features of the W-Sn polymetallic ore deposits in East Qiyi Shan, Inner Mongolia[J]. Geology and Exploration, 50(6): 1038-1049(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zunzun, Gong Yinjie, Chen Libo, Huang Congjun, Gan Jinmu. 2018. Geochemical evidence of the source of ore-forming materials from Dazhuyuan fluorite deposit in northeastern Guizhou[J]. Geochimica, 47(03): 295-305(in Chinese with English abstract).
- Zhao Peng, Zheng Houyi, Zhang Xin, Wang Fan, Wang Yinglin. 2020. Resource actualities and demand countermeasures of fluorite in China[J]. Geology of Chemical Minerals, 42(02): 178-183(in Chinese with English abstract).
- Zhao Pengbin, Li Weicheng, Luo Qianzhou, Peng Hailian, Li Yi, Li Wujie, Zhang Shuanhou. 2019. Formation Age and Tectonic Environment of Yingzuihongshan Granite in Beishan, Inner Mongolia[J]. Northwestern

- Geology, 52(04): 1-13(in Chinese with English abstract).
- Zhao Shengmin, Nie Fengjun, Jiang Sihong, Bai Daming. 2002. REE Geochemistry and Genesis of Dongqiyishan Fluorite Deposit, Inner Mongolia[J]. Mineral Deposits, 21(3): 311-317(in Chinese with English abstract).
- Zheng Rongguo, Wu Tairan, Zhang Wen, Feng Jicheng. 2012. Geochemical Characteristics and Tectonic Setting and of the Yueyashan-Xichangji ing Ophiolite in the Beishan Area[J]. Acta Geologica Sinica, 86(6): 961-971(in Chinese with English abstract).
- Zou Hao, Fang Yi, Chen Hemaio, 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, 高永璋, 马莹, 曾昭法, 高峰, 邹灏. 2014. 内蒙古林西萤石矿床稀土元素地球化学特征及其指示意义[J]. 地球化学, 43(02): 131-140.
- 曹俊臣. 1995. 华南低温热液脉状萤石矿床稀土元素地球化学特征[J]. 地球化学, (3): 225-234.
- 陈军元, 刘艳飞, 颜玲亚, 高树学, 欧阳友和, 龙涛. 2021. 石墨、萤石等战略非金属矿产发展趋势研究[J]. 地球学报, 42(02): 287-296.
- 代晓光, 商朋强, 张成信, 梁中朋, 王锦鹏, 李健, 杨海波, 聂新明. 2021. 冀北招素沟萤石矿地球化学特征及矿床成因探讨[J]. 岩石矿物学杂志, 40(01): 27-38.
- 戴开明, 车长波, 王福良. 2021. 萤石资源勘查开发利用管理的建议[J]. 中国矿业, 30(09): 32-35.
- 丁嘉鑫, 韩春明, 肖文交, 王忠梅, 杨晓梅. 2015. 北山造山带花牛山岛弧东段钨矿床成矿时代和成矿动力学过程[J]. 岩石学报, 31(2): 594-616.
- 董文超, 庞绪成, 司媛媛, 梁贞, 李文明. 2020. 河南嵩县车村萤石矿床稀土元素特征及地质意义[J]. 中国稀土学报, 38(05): 706-714.
- 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(01): 161-178.
- 傅树超. 2003. 试述福建顺昌南舟萤石矿地质特征[J]. 福建地质, 22(2): 53-61.
- 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. 2021. 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. 网络首发.
- 侯青叶, 王忠, 刘金宝, 王瑾, 李大鹏. 2012. 北山月牙山蛇绿岩地球化学特征及 Shrimp 定年[J]. 现代地质, 26(05): 1008-1018.
- 黄鸿新, 罗平, 常斯敏, 张君, 王成辉. 2018. 江西篁碧萤石矿床萤石稀土元素特征与成矿物质来源探讨[J]. 矿产与地质, 2018, 32(4): 641-654.
- 黄建国, 李虎杰, 李文杰, 董磊. 2012. 贵州戈塘金矿萤石微量元素特征及钐—钷测年[J]. 地球科学进展, 27(10): 1087-1093.
- 金少荣, 陈军, 代德荣, 杨德智, 周家喜, 何小虎. 2018. 黔西南高岭萤石矿床微量和稀土元素地球化学特征[J]. 矿物学报, 38(06): 684-692.
- 黎彤. 1976. 化学元素的地球丰度[J]. 地球化学, 3(1): 167-174.
- 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(06): 62-68.
- 李敏, 辛后田, 任邦方, 任云伟, 张阔, 段霄龙, 牛文超, 段连峰. 2019. 内蒙古哈珠地区晚古生代花岗岩类成因及其构造意义[J]. 地球科学, 44(01): 328-343.
- 廖雪峰, 胡新苗, 程海峰, 徐旭明. 2016. 内蒙古月牙山蛇绿岩的岩石学、地球化学特征及其地质意义[J]. 地质通报, 35(08): 1243-1254.
- 刘道荣. 2017. 浙西北地区萤石矿床成因及找矿方向[J]. 地质与勘探, 53(5): 947-959.
- 刘艳飞, 颜玲亚, 柳群义, 高树学, 杜轶伦, 孙即秀. 2019. 我国重要非金属矿产评价研究及重点勘查建议[J].

- 中国矿业, 28(10): 85-91.
- 刘英俊. 1987. 元素地球化学导论[M]. 北京: 地质出版社, 194-205.
- 吕博, 杨岳清, 孟贵祥, 严加勇, 赵金花, 王守光, 贾玲珑, 彭润民. 2011. 内蒙古东七一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(03): 543-552.
- 聂凤军, 江思宏, 刘妍. 2022. 阿拉善东七一山大型萤石矿床萤石钇-铈同位素年龄及地质意义[J]. 矿床地质, 21(1): 10-15.
- 宋开瑞. 2019. 内蒙古林西地区萤石矿与银多金属矿成矿关系及找矿意义[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 1-129.
- 孙海瑞, 黄智龙, 周家喜, 冷成彪, 甘婷. 2014. 热液矿床中萤石的稀土元素地球化学及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 33(1): 185-193.
- 汪灵. 2019. 战略性非金属矿产的思考[J]. 矿产保护与利用, 39(06): 1-7.
- 王勇, 吕庆田, 孟贵祥, 严加勇, 杨岳清, 赵金花. 2009. 内蒙东七一山碱长花岗岩及其成矿作用[J]. 地质学报, 83(10): 1505-1514.
- 王自国, 朱培元. 2020. 中央企业萤石矿战略布局思考[J]. 中国矿业, 29(06): 8-11.
- 许东青. 2009. 内蒙古苏莫查干敖包超大型萤石矿化区形成环境、地质特征及成矿机理研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 1-160.
- 许海, 刘海涛, 贾元琴, 王国梁. 2021. 关于中国萤石矿产业发展的思考[J]. 四川有色金属, (03): 2-5.
- 游超, 王春连, 刘殿鹤, 余小灿, 颜开, 刘思晗, 周博文. 2022. 江西宁都坎田萤石矿床稀土元素地球化学特征及其指示意义[J]. 地球学报, 43(03): 359-370.
- 张青松, 王春连, 栗克坤, 刘增正, 冯校辉, 闫晓博, 韩志坤, 蒋济勇, 江建浪. 2021. 闽北大坪萤石矿构造蚀变、岩石地球化学特征与矿床成因探讨[J]. 岩石矿物学杂志, 40(6): 1131-1140.
- 张善明, 王庭院, 张华, 张志国, 杨锐, 范立新. 2014. 内蒙古东七一山钨锡多金属矿成矿特征与控矿因素分析[J]. 地质与勘探, 50(6): 1038-1049.
- 张遵遵, 龚银杰, 陈立波, 黄从俊, 甘金木. 2018. 黔东北沿河大竹园萤石矿床成矿物质来源探讨: 地球化学制约[J]. 地球化学, 47(03): 295-305.
- 赵鹏, 郑厚义, 张新, 王帆, 王英林. 2020. 中国萤石产业资源现状及发展建议[J]. 化工矿产地质, 42(02): 178-183.
- 赵鹏彬, 李维成, 罗乾周, 彭海练, 李毅, 李武杰, 张拴厚. 2019. 内蒙北山鹰嘴红山花岗岩体形成时代及构造环境分析[J]. 西北地质, 52(04): 1-13.
- 赵省民, 聂凤军, 江思宏, 白大明. 2002. 内蒙古东七一山萤石矿床的稀土元素地球化学特征及成因[J]. 矿床地质, 21(3): 311-317.
- 郑荣国, 吴泰然, 张文, 冯继承. 2012. 北山地区月牙山-洗肠井蛇绿岩的地球化学特征及形成环境[J]. 地质学报, 86(6): 961-971.
- 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.