

闽北羊角尾萤石矿成因： 来自稀土、微量元素地球化学的证据

金 松¹⁾, 王春连^{2)*}, 高立湧¹⁾, 张成信¹⁾, 王占兵¹⁾,
王 畅¹⁾, 孟 都¹⁾, 商朋强³⁾

1)中化地质矿山总局地质研究院, 北京 100101;

2)中国地质科学院矿产资源研究所, 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037;

3)中化地质矿山总局, 北京 100013

摘 要: 闽北浦城羊角尾萤石矿产于侏罗系梨山组火山碎屑岩中的断裂破碎带内, 对其地质矿产特征和矿石、围岩及矿区内黑云母正长花岗岩的岩石地球化学特征进行了研究。羊角尾萤石矿矿石 ΣREE 为 $65.17 \times 10^{-6} \sim 125.87 \times 10^{-6}$, 重稀土相对富集, δEu 和 δCe 无明显异常; Ni、Cd、Pb 和 As 等中低温微量元素相对地壳富集。围岩梨山组火山碎屑岩轻重稀土分馏不明显, Eu 负异常明显, Sm/Nd 值与萤石接近, 微量元素相对地壳的含量曲线趋势与萤石基本一致。黑云母正长花岗岩则显示轻稀土富集、重稀土亏损, Eu 正异常和 Ce 负异常的特征, Sm/Nd 值远小于萤石矿。结合稀土微量元素特征及矿床成因判别图解, 认为羊角尾萤石矿的主要成矿物质来源为梨山组火山碎屑岩。成矿流体在形成后经历了长期的演化, 在此过程中与围岩发生了充分的水岩反映, 使 Ca、F、REE 等重新活化, 最终在构造破碎带就位沉淀形成矿体, 矿床成因类型为中-低温热液充填型。羊角尾萤石矿的矿床成因研究表明晚侏罗世火山-沉积岩系是区域萤石矿成矿的重要物源基础, 在区域找矿工作中应重点关注。

关键词: 萤石矿; 稀土元素; 地球化学; 成矿作用; 羊角尾

中图分类号: P611.1; P619.215 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2022.031401

Evidence from REE and Trace Element Geochemistry for Genesis of Yangjiaowei Fluorite Deposit in Northern Fujian

JIN Song¹⁾, WANG Chun-lian^{2)*}, GAO Li-yong¹⁾, ZHANG Cheng-xin¹⁾, WANG Zhan-bing¹⁾,
WANG Chang¹⁾, MENG Du¹⁾, SHANG Peng-qiang³⁾

1) Geological Institute of China Chemical Geology and Mine Bureau, Beijing 100101;

2) MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources,
Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;

3) China Chemical Geology and Mine Bureau, Beijing 100013

Abstract: The Yangjiaowei fluorite deposit occurs in the fracture zone of the Jurassic Lishan Formation pyroclastic rocks in Pucheng, northern Fujian. In this study, the geological and mineral characteristics and the rock geochemistry characteristics of the ores, wall rocks, and biotite granites in the mining area are investigated. The ΣREE of fluorite ore is in the range of $65.17 \times 10^{-6} \sim 125.87 \times 10^{-6}$; HREE is relatively enriched; δEu and δCe are not obviously abnormal, and Ni, Cd, Pb, and As are relatively enriched in crustal micronutrients. The fractionation of LREE and HREE in the pyroclastic rocks of the Lishan Formation in the wall rock is not obvious; the negative Eu anomaly is obvious; Sm/Nd ratio is close to that of fluorite, and the curve of the crustal

本文由中国地质调查局地质调查项目(编号: DD20190816; DD20190606)、中化地质矿山总局化工地质科技项目(编号: ZHDK202004)和中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(编号: KK2005)联合资助。

收稿日期: 2021-12-06; 改回日期: 2022-03-01; 网络首发日期: 2022-03-16。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 金松, 男, 1988 年生。硕士, 工程师。主要从事区域矿产地质调查工作。E-mail: 732818885@qq.com。

*通讯作者: 王春连, 男, 1983 年生。博士, 研究员。主要从事矿床学方面的研究。通讯地址: 100037, 北京市西城区百万庄大街 26 号。
E-mail: wangchunlian312@163.com。

micronutrient content is largely consistent with that of fluorite. The biotite granite shows LREE enrichment, HREE depletion, positive Eu anomaly, and negative Ce anomaly, and the Sm/Nd ratio is much less than that of fluorite. According to the characteristics of REEs and micronutrients and the diagrammatic interpretation of the deposit genesis, the main source of ore-forming materials of the Yangjiaowei fluorite ore are likely the Lishan Formation pyroclastic rocks, which are not obviously related to the Late Jurassic syenite granites. The ore-forming fluid underwent a long-term evolution after its formation. In this process, the fluid and the surrounding rock had fully reflected, Ca, F, and REE were reactivated, and the ore bodies were deposited in the structural fracture zone, therefore, implying that the Yangjiaowei fluorite deposit is a mesothermal-epithermal filling deposit. The study of the ore-forming material source of the Yangjiaowei fluorite deposit indicates that the Late Jurassic volcanic-sedimentary rock series is an important material source of the regional fluorite mineralization and is worth considering in mineral explorations.

Key words: fluorite deposit; REE; geochemistry; mineralization; Yangjiaowei

萤石作为重要的战略性非金属矿产,已被我国列入关键矿产目录,在节能环保、新一代信息技术、生物、高端装备制造、新能源、新材料、新能源汽车等战略性新兴产业得到广泛应用,其战略地位不断提升,在经济社会发展中具有重要的作用(陈军元等, 2021; 张青松等, 2021; 栗克坤等, 2022; 王春连等, 2022)。闽北地区(东至南平,西至光泽,北起浦城,南至顺昌、邵武)萤石成矿地质条件良好,萤石矿产资源丰富,是全国划分出的 10 个萤石矿集区之一(王吉平等, 2015, 2018)。前人对闽北地区萤石矿的成矿规律及找矿方向开展了大量研究(林国宣, 2004; 刘磊等, 2013; 林子华, 2018; 栗克坤等, 2020),但针对单一矿床的地球化学及年代学研究较少,也在一定程度上制约了该地区的成矿模式研究及找矿理论实践。已有研究普遍认为该区成矿物质(F, Ca)的来源主要为围岩,而富含 F 的主要为黑云母花岗岩,而 Ca 来自变质岩及钙碱性火山岩,这种认识也在该地区多数萤石矿的研究中得到了验证(涂样谋等, 2004; 蔡建设, 2011; 尤阳正, 2018; 福建省闽北地质大队, 2018; 方贵聪等, 2020; 栗克坤等, 2020; 张青松等, 2021)。羊角尾大型萤石矿是闽北浦城近年来探明的一处大型萤石矿,勘探程度较高,规模较大,其地理位置处于闽北萤石矿成矿区与浙中萤石矿成矿区结合部位(王吉平等, 2015; 闫巧娟等, 2021),在区域上有代表性,又是这两个成矿区中少有的产于早侏罗世火山-沉积地层的大型萤石矿。由于闽北成矿区萤石矿大多与燕山期黑云母花岗岩关系密切(林国宣, 2004; 王吉平等, 2018; 栗克坤等, 2020),而且羊角尾矿区内及周边亦有晚侏罗世黑云母花岗岩出露,因此有学者认为黑云母花岗岩是其主要的物源基础,在关于其成矿模式的研究中也推测其下部隐伏大规模黑云母花岗岩侵入体(冯辉兴, 2020),但由于尚没有关于该矿床的稀土微量元素特征研究,也造成该矿床成因缺乏足够有力的地质资料支撑。

稀土元素、微量元素等地球化学手段在解决成

矿物质来源、成矿机制等理论问题和指导找矿实践等方面均有较大作用(赵省民等, 2002)。萤石中的稀土和微量元素特征可代表与其平衡的成矿流体的元素组成特征,是岩浆和成矿作用过程中物理化学条件、成矿流体演化及成矿物质来源示踪等方面的重要研究方法(Bau and Möller, 1992; Smith et al., 2000; Alvin et al., 2004; 金少荣等, 2018; 张苏坤等, 2020; 游超等, 2022)。本文在对羊角尾萤石矿进行矿床地质研究的基础上,试图通过研究羊角尾萤石矿区萤石、围岩及相关侵入体的稀土微量元素特征,揭示羊角尾萤石矿的成矿物质来源和成矿作用过程,为区域找矿及勘查工作提供依据。

1 地质概况

1.1 区域地质及成矿背景

研究区位于华夏板块内部的武夷隆起带北部(图 1a),属于武夷成矿带内的浦城—顺昌成矿亚带(图 1b)。区域出露的地层包括古远古界大金山组黑云斜长变粒岩、斜长角闪岩;侏罗系下统梨山组砂岩、砂砾岩夹凝灰岩;侏罗系中统漳平组细砂岩夹页岩;其中大金山组、梨山组是区域萤石矿的主要赋矿围岩地层。区域断裂构造以北东向和北西向为主,其中北东向断裂带主要活动时期为燕山期,断裂性质以压性、压扭性为主,局部为先张后压,该期断裂与区域萤石矿成矿密切相关,北西向断裂切过北东向断裂。区域岩浆岩较为发育,燕山晚期岩浆侵入活动较频繁,主要为晚侏罗世黑云母正长花岗岩和晚白垩世花岗斑岩,其中晚侏罗世黑云母花岗岩体与区域萤石矿成矿密切相关。

1.2 矿床地质特征

1.2.1 矿区地质

羊角尾萤石矿产于下侏罗统梨山组地层内,赋矿围岩岩性为凝灰质砂岩、凝灰岩及长石石英砂岩等,地层走向北东 50°左右,倾向北西,倾角 20°~40°。矿区发育 F1、F2 两条北东向断裂构造, F1 断裂

延伸约 1.5 km, 走向 NE65°~86°, 倾向北西, 局部南东, 倾角 65°~85°。F2 断裂延伸约 450 m, 走向 NE50°, 倾向 SE140°, 倾角 66°。断裂破碎带宽度一般 1~5 m, 局部地段 5~10 m, 广泛发育碎裂岩化凝灰质砂岩、碎斑岩、硅化岩。断裂面呈舒缓波状, 具有多期活动特点, 早期为压扭性, 后期具张扭性特征。矿区侵入岩主要为晚侏罗世黑云母正长花岗岩以及数条后期侵入的石英斑岩脉(图 1d)。

1.2.2 矿体及矿石特征

矿区共圈定矿体 2 条, 其中 I 号矿体规模最大, 受 F1 断裂控制, 工程控制走向长 1400 m, 斜深 560 m, 矿体走向 NE45°~87°, 倾向 315°~357°, 倾角 54°~89°, 呈脉状, 厚度 0.63~4.26 m, 有用组份 CaF_2 品位 18.93%~94.78%, 平均品位 57.25%。II 号矿体受控于 F2 断裂, 矿体走向 NE65°, 倾向 NW332°, 倾角 67°~75°, 有用组份 CaF_2 品位 19.54%~89.67%,

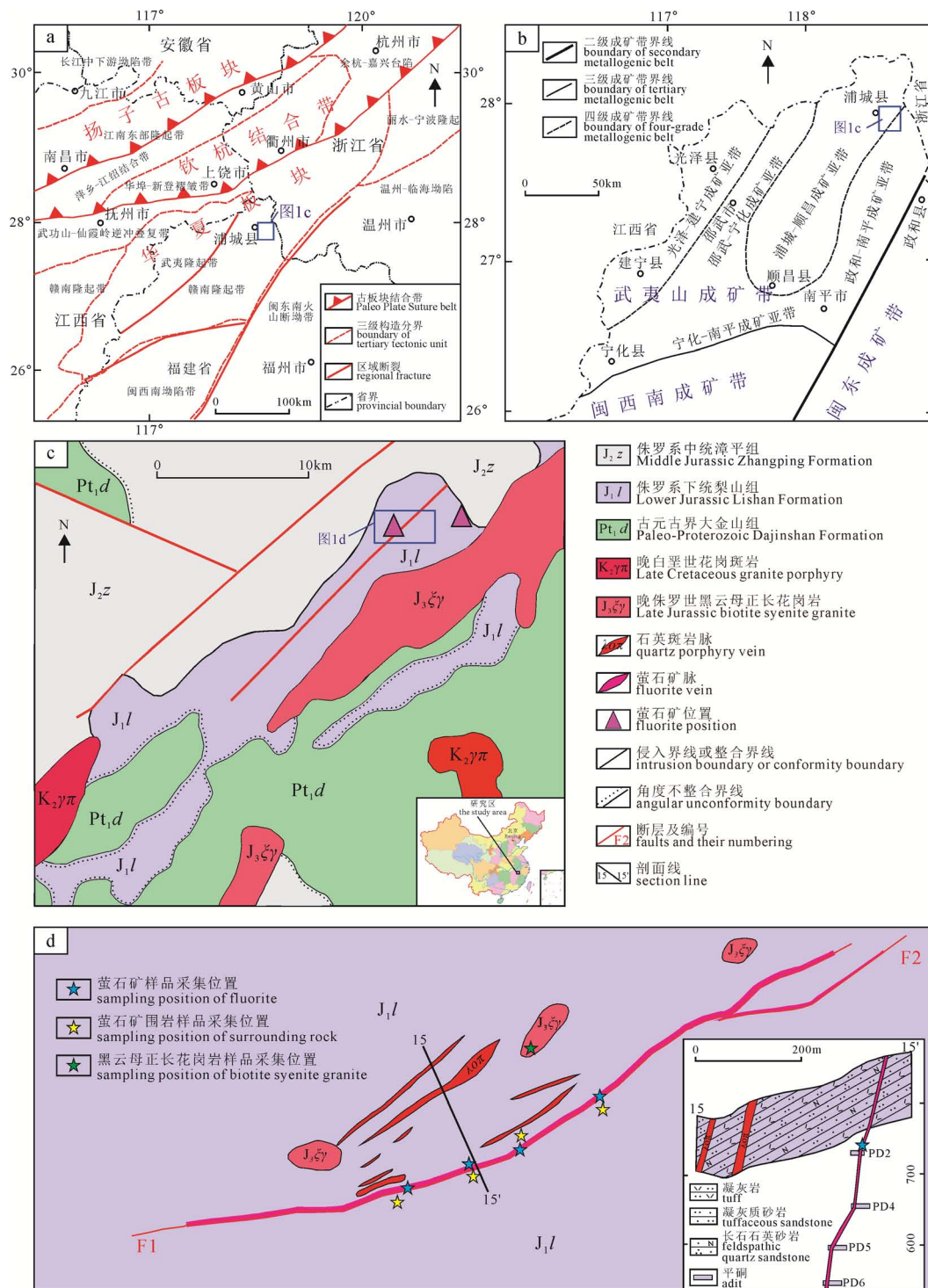


图 1 羊角尾萤石矿所处大地构造位置、成矿区带、区域地质及矿区地质简图 (图 a 据舒良树, 2012 修改; 图 b、c、d 据福建省闽北地质大队, 2016 修改)

Fig. 1 Geotectonic position, metallogenic belt, regional geological and mining geology sketch map of Yangjiaowei fluorite deposit (Fig.1a modified from SHU, 2012; Fig. 1b, c and d modified from the Northern Geological Party of Fujian, 2016)

厚度 1.09 ~ 1.77 m。矿石构造主要为块状构造(图 2a), 其次为条带状构造、角砾构造等(图 2b, c)。矿石自然类型主要为石英-萤石型, 其次为萤石-石英型、萤石型。萤石颜色多为翠绿、浅绿、无色-淡白色, 少量为淡紫色。

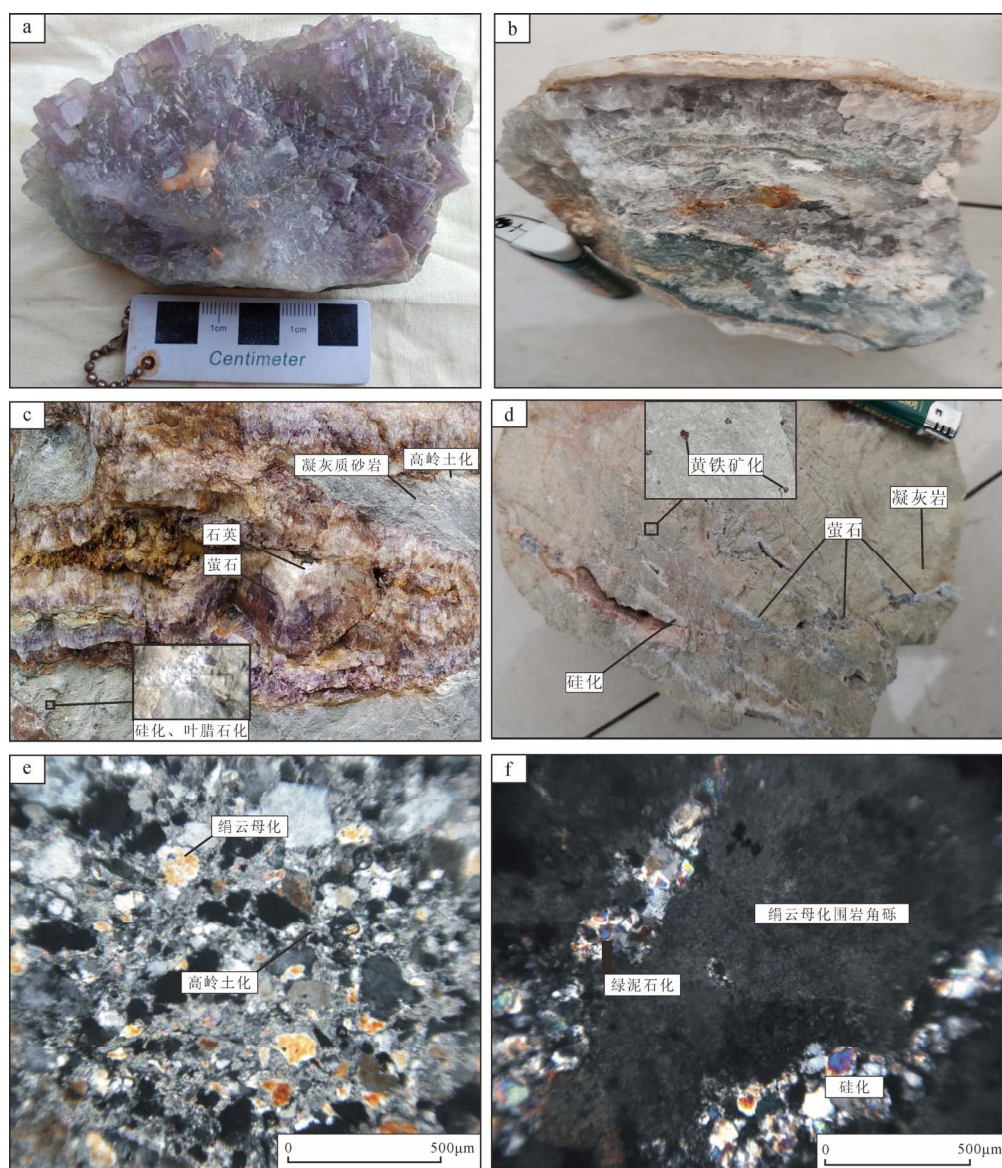
1.2.3 围岩蚀变

矿区围岩蚀变不均匀, 以断裂构造带出露位置蚀变最为强烈。蚀变类型主要有硅化、高岭土化、绿泥石化、黄铁矿化、碳酸盐化为主, 局部见叶腊石化(图 2c, d, e), 其中以硅化最为普遍(图 2f)。

2 样品采集与分析测试

本次研究对羊角尾萤石矿脉及围岩进行了

系统采样, 其中 5 件萤石矿样品采集自平硐及钻孔岩心, 2 件凝灰岩(WY-1、WY-2)、2 件凝灰质砂岩(WY-3、WY-4)及 1 件正长花岗岩(WY-6)样品采集均自矿区地表较新鲜的基岩露头, 剩余 4 件正长花岗岩样品采集自矿区东部露头较新鲜的黑云母正长花岗岩岩体中, 萤石矿围岩样品采集位置均避开了构造破碎带及矿化蚀变带, 样品重量均大于 1 kg, 样品单矿物分选及稀土、微量元素测试均在中化地质矿山总局中心实验室完成, 分选后的萤石单矿物纯度超过 99%, 测试过程中首先将样品粉碎成 200 目粉末, 微量元素和稀土元素采用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)测定, 分析精度和准确度一般优于 5%。



a—块状萤石矿石; b—条带状萤石矿石; c—角砾状、条带状萤石矿及凝灰质砂岩蚀变特征;

d—凝灰岩蚀变特征; e—凝灰质砂岩镜下蚀变特征; f—凝灰岩镜下蚀变特征。

a—block fluorite; b—banded fluorite; c—breccia fluorite, banded fluorite and alteration characteristics of tuffaceous sandstone;

d—alteration characteristics of tuff; e—microscopic alteration characteristics of tuffaceous sandstone;

f—microscopic alteration characteristics of tuff.

图 2 羊角尾萤石矿矿石及围岩蚀变特征

Fig. 2 Alteration characteristics of ores and surrounding rocks in Yangjiaowei fluorite deposit

3 测试结果

3.1 稀土元素特征

研究区萤石、围岩及黑云母正长花岗岩的稀土元素测试结果及相关特征参数见表 1。在研究稀土元素地球化学特征过程中, 将稀土元素划分为轻稀土(LREE) La ~ Nd、中稀土(MREE) Sm ~ Ho 和重稀土(HREE) Er ~ Lu+Y 三种类型(韩吟文和马振东, 2003)。

由表 1 可见, 羊角尾萤石矿萤石的 ΣREE (加 Y 的含量, 下同)为 $65.17 \times 10^{-6} \sim 125.87 \times 10^{-6}$, 均值 86.14×10^{-6} 。 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 为 0.17 ~ 0.23, 均值 0.20; $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 0.39 ~ 0.76, 均值 0.56, 重稀土富集, 轻稀土和中稀土相对亏损, 稀土元素球粒陨石标准化配分曲线整体呈左倾(图 3a)。 $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 为 0.81 ~ 1.27, 均值 1.00; $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 0.53 ~ 0.73, 均值 0.59。 Sm/Nd 为 0.44 ~ 0.56, 均值 0.51, 大于地壳岩石的平均 Sm/Nd 值(0.14 ~ 0.24)。 δEu 为 0.84 ~ 1.02, 均值 0.95; δCe 为 0.95 ~ 1.07, 均值 0.97, 表现

为微弱的 Eu 负异常和 Ce 负异常。

羊角尾萤石矿围岩梨山组凝灰质砂岩与凝灰岩的稀土元素特征类似, ΣREE $83.74 \times 10^{-6} \sim 93.52 \times 10^{-6}$, 均值 89.22×10^{-6} ; $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 为 0.93 ~ 1.15, 均值 1.03; $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 1.48 ~ 1.88, 均值 1.70, 以上参数与它们在稀土元素球粒陨石标准后配分曲线上为平坦型相符(图 3b)。 $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 为 1.58 ~ 1.83, 均值 1.71; $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 0.53 ~ 0.61, 均值 0.56; Sm/Nd 为 0.29 ~ 0.32, 均值 0.31, 略大于地壳岩石的平均 Sm/Nd 值(0.14 ~ 0.24)。 δEu 为 0.33 ~ 0.72, 均值 0.44, 具有明显的 Eu 负异常, δCe 为 0.91 ~ 0.94, 均值 0.92, 表现为 Ce 弱负异常。

矿区内黑云母正长花岗岩 ΣREE 为 $68.63 \times 10^{-6} \sim 223.47 \times 10^{-6}$, 均值 125.00×10^{-6} 。 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 为 2.55 ~ 8.55, 均值 5.40; $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 3.70 ~ 21.53, 均值 11.81。 $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 为 4.50 ~ 7.13, 均值 5.77; $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 0.49 ~ 2.49, 均值 1.45; 轻稀土富集, 中稀土和重稀土亏损, 在稀土元素球粒陨石标准化配分曲线整体呈右倾趋势(图 3b)。 Sm/Nd 为

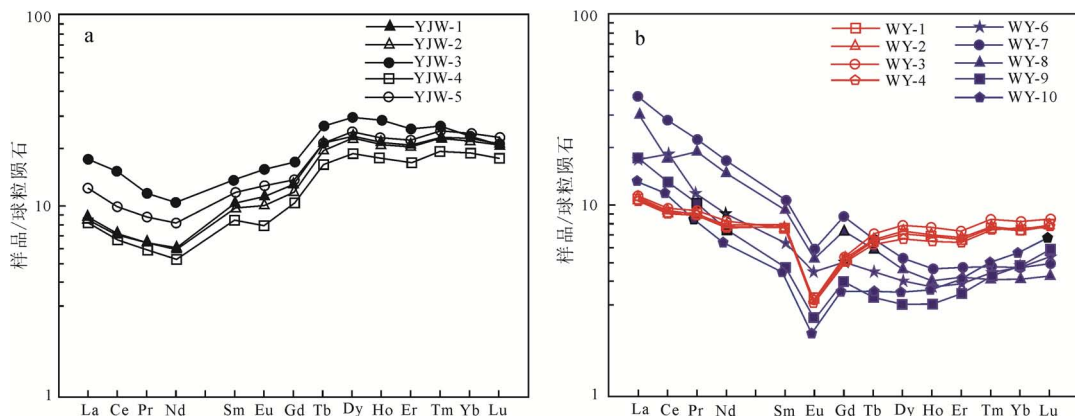


图 3 羊角尾萤石矿萤石、梨山组碎屑岩及黑云母正长花岗岩稀土元素球粒陨石标准化配分曲线 (标准化数据参照 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 3 Chondrite-normalized REE patterns of fluorite, Lishan formation clastic rocks and biotite granite in Yangjiaowei fluorite deposit (standardized data from Sun and McDonough, 1989)

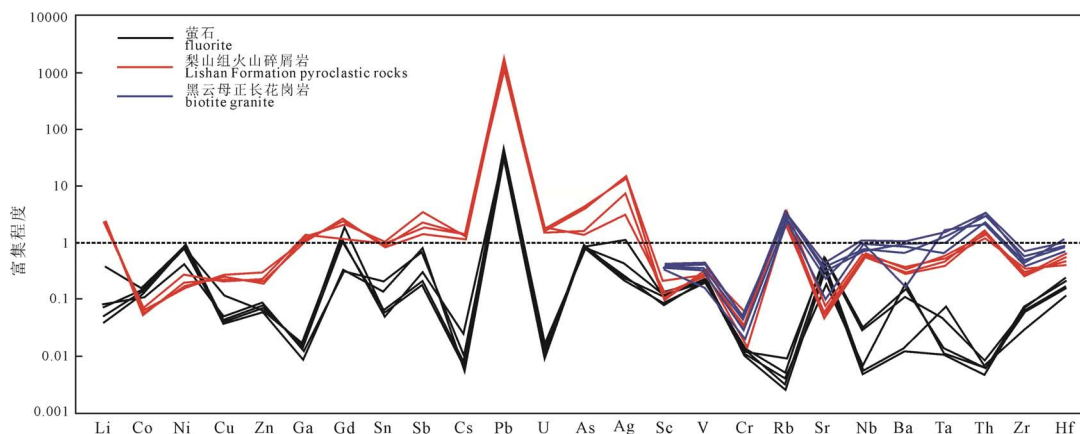


图 4 羊角尾萤石矿萤石、梨山组碎屑岩及正长花岗岩微量元素相对上地壳丰度的富集特征 (上地壳数据引自 Taylor and McLennan, 1985)

Fig. 4 Enrichment characteristics of trace elements of fluorite, Lishan Formation clastic rocks and biotite granite in Yangjiaowei fluorite deposit relative to upper crust values (upper crust data from Taylor and McLennan, 1985)

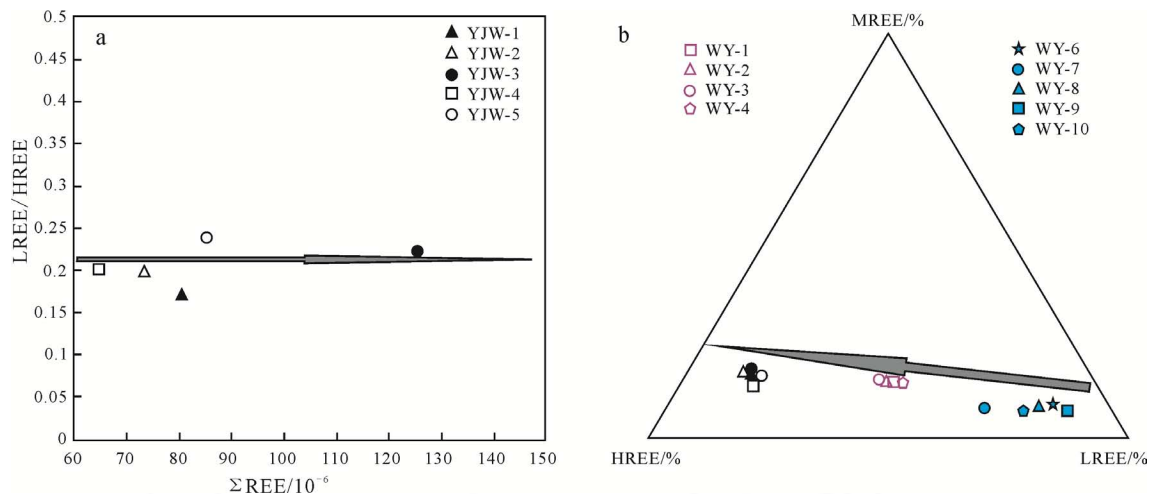


图5 羊角尾萤石矿 LREE/HREE-ΣREE 图(a)和稀土元素组成三角图(b)

Fig. 5 LREE/HREE-ΣREE diagram (a) and REE composition diagram (b) of Yangjiaowei fluorite deposit

0.16 ~ 0.19, 均值 0.18, 介于地壳岩石的平均 Sm/Nd 值(0.14 ~ 0.24)之间。 δEu 为 0.40 ~ 0.71, 均值 0.50, 具有明显的 Eu 负异常, δCe 为 0.63 ~ 1.49, 均值 1.04, 表现为 Ce 弱正异常。

3.2 微量元素特征

羊角尾萤石矿萤石、梨山组碎屑岩及黑云母正长花岗岩的微量测试结果见表 2。由表 2 可见, 萤石样品中 Sr、Pb、Cd、As、Sb 均有不同程度的富集, 而其他微量元素相对于上地壳均显示为亏损特征。Sr 含量为 81×10^{-6} ~ 182×10^{-6} , 均值 160×10^{-6} ; Pb、Cd、Ni、As、Sb 等中低温元素含量相对较高, 而 Rb、Nb、Th 等元素相对上地壳明显亏损, 在相对上地壳元素丰度的富集程度图(图 4)上也显示对应的富集或亏损特征。梨山组凝灰岩及凝灰质砂岩微量元素特征一致, 微量元素含量整体较萤石更高, 但 Cu、Pb、Zn、Cd、As、Sb 等中低温金属微量元素含量相对于上地壳的富集程度曲线与萤石的曲线趋势基本保持一致, 在 Rb、Th、Ba、Nb 等元素则显示相对富集的特征, 与萤石不同。正长花岗岩中微量元素含量及相对于上地壳富集程度方面表现的特点与梨山组火山碎屑岩基本一致。

4 讨论

4.1 成矿物质来源

4.1.1 稀土元素特征对成矿物质来源的反映

稀土元素(REE+Y)是示踪成矿流体来源和反演热液成矿作用过程的有效手段之一(Lot-termoser, 1992; 孙海瑞等, 2014; 邹灏等, 2014)。萤石作为含钙矿物, 是稀土元素的重要载体, 流体中的 REE^{3+} 常与 Ca^{2+} 发生置换进入萤石晶格内, 因而萤石 REE 特征可代表流体的 REE 特征, 进而示踪矿源层(Graf, 1977; Möller and Morteani, 1983)。成矿流体中稀土元

素的分馏是两种地质过程的结果, 一种是吸附和解附的过程, 另一种是络合的过程。如果流体中稀土元素主要是受吸附作用控制, 那么就会导致轻稀土元素的富集; 反之, 如果稀土元素主要是以络合物形式存在的(Bau, 1991; Bau and Möller, 1992)。研究区萤石表现为明显的重稀土富集特征, 且随着稀土含量的增加, 样品的轻重稀土分异程度基本保持稳定(图 5a), 说明稀土元素主要是以络合物存在, 并且暗示成矿过程中的水岩反应下流体性质无明显变化, 表明其成矿物质源稳定且单一。研究表明, 中国萤石矿床中随着成矿作用由早到晚, ΣREE 含量由多到少, 且越到晚期, 越富集重稀土。这是因为 REE 络合物的稳定性随原子量从 La 到 Lu 增加而加大, 次稳定的 REE 共价键更易于从流体中析出。在简单的氯化物溶液中, 中-重稀土元素的溶解度逐渐减低, 但随着 F 的加入后, REE-F 的稳定性从 La 到 Yb 逐渐升高(Strong et al., 1984)。因此, 研究区萤石矿应该是成矿流体长期演化的结果, 在此过程中流体不断萃取围岩中成矿物质, 造成了羊角尾萤石矿富集重稀土的特点。

在稀土元素组成三角图中(图 5b), 羊角尾萤石矿区样品表现为由黑云母正长花岗岩、梨山组火山碎屑岩到萤石矿中-重稀土显著增高的特点, 与华南地区脉状萤石矿床特点基本一致(曹俊臣, 1995), 而萤石与梨山组火山碎屑岩的稀土组成相对较为接近, 表明二者在成矿作用中关系密切。Sm 和 Nd 化学性质十分相似, 不易分离, 故 Sm/Nd 比值能较好地反映出源区的特征(刘英俊和曹励明, 1987; 栗克坤等, 2020)。羊角尾萤石矿 Sm/Nd 比值(均值 0.51)与梨山组碎屑岩 Sm/Nd 比值(均值 0.31)接近(图 6), 但明显大于黑云母正长花岗岩 Sm/Nd 比值(均值 0.18), 且萤石的 ΣREE 与梨山组碎屑岩 ΣREE 较为接近, 明显

表 1 羊角尾萤石、梨山组火山碎屑岩及黑云母正长花岗岩稀土元素测试结果及相关参数(10^{-6})
Table 1 Analytical results of REE (10^{-6}) and characteristic parameters of fluorite, Lishan Formation clastic rocks and biotite granite in Yangjiaowei fluorite deposit

编号	YW-1	YW-2	YW-3	YW-4	YW-5	YW-1	YW-2	YW-3	YW-4	YW-6	YW-7	YW-8	YW-9	YW-10
岩性	无色萤石	绿色萤石	绿色萤石	无色萤石	无色萤石	凝灰岩	凝灰岩	凝灰岩	凝灰质砂岩	黑云母正长花岗岩				
La	2.01	2.09	4.20	1.96	2.96	8.19	8.82	8.19	8.59	16.89	52.53	39.09	17.25	11.63
Ce	4.30	4.38	9.41	4.07	6.10	16.64	18.08	17.36	17.39	47.84	90.06	45.10	29.24	24.08
Pr	0.61	0.61	1.12	0.56	0.84	2.46	2.71	2.49	2.53	3.67	10.07	7.87	3.12	2.32
Nd	2.86	2.81	4.92	2.49	3.82	10.12	11.14	10.33	10.16	12.57	33.30	26.64	9.45	7.46
Sm	1.60	1.51	2.14	1.30	1.83	3.15	3.26	3.35	3.04	2.42	5.39	4.43	1.56	1.44
Eu	0.65	0.59	0.91	0.46	0.75	0.32	0.67	0.31	0.32	0.55	0.83	0.69	0.23	0.18
Gd	2.64	2.45	3.50	2.13	2.84	2.37	2.49	2.57	2.31	2.33	5.27	4.10	1.61	1.35
Tb	0.81	0.73	0.99	0.62	0.80	0.61	0.63	0.70	0.57	0.35	0.63	0.54	0.23	0.25
Dy	6.14	5.83	7.49	4.80	5.97	4.80	4.95	5.57	4.40	2.04	3.06	2.51	1.34	1.67
Ho	1.29	1.19	1.59	1.02	1.24	1.01	1.03	1.19	0.93	0.41	0.57	0.46	0.30	0.38
Er	3.65	3.39	4.21	2.84	3.48	2.79	2.89	3.24	2.63	1.27	1.69	1.42	1.06	1.33
Tm	0.63	0.59	0.67	0.50	0.58	0.54	0.53	0.62	0.53	0.24	0.26	0.21	0.22	0.28
Yb	4.04	3.81	3.97	3.25	3.74	3.50	3.37	3.97	3.46	1.75	1.75	1.40	1.79	2.26
Lu	0.58	0.54	0.53	0.45	0.53	0.55	0.55	0.63	0.56	0.31	0.28	0.22	0.36	0.44
Y	48.90	42.80	80.20	38.70	50.00	30.06	31.42	33.00	26.32	12.16	17.77	14.42	11.22	13.56
ΣREE	80.73	73.38	125.87	65.17	85.53	87.10	92.53	93.52	83.74	104.80	223.47	149.11	78.98	68.63
LREE	9.78	9.89	19.64	9.09	13.72	37.40	40.75	38.36	38.68	80.97	185.96	118.70	59.06	45.50
MREE	13.13	12.31	16.62	10.34	13.43	12.27	13.03	13.68	11.56	8.11	15.75	12.73	5.26	5.27
HREE	57.82	51.18	89.61	45.74	58.38	37.43	38.76	41.47	33.50	15.73	21.76	17.68	14.66	17.86
LREE/HREE	0.17	0.19	0.22	0.20	0.23	1.00	1.05	0.93	1.15	5.15	8.55	6.71	4.03	2.55
La _N /Yb _N	0.36	0.39	0.76	0.43	0.57	1.68	1.88	1.48	1.78	6.94	21.53	19.98	6.90	3.70
δEu	0.97	0.94	1.02	0.84	1.00	0.36	0.72	0.33	0.37	0.71	0.47	0.50	0.44	0.40
δCe	0.95	0.95	1.07	0.95	0.95	0.91	0.91	0.94	0.91	1.49	0.96	0.63	0.98	1.14
Sm/Nd	0.56	0.54	0.44	0.52	0.48	0.31	0.29	0.32	0.30	0.19	0.16	0.17	0.17	0.19
La _N /Sm _N	0.81	0.89	1.27	0.97	1.04	1.68	1.75	1.58	1.83	4.50	6.29	5.69	7.14	5.23
Gd _N /Yb _N	0.54	0.53	0.73	0.54	0.63	0.56	0.61	0.53	0.55	1.11	2.49	2.42	0.74	0.49

表 2 研究区萤石、梨山组碎屑岩及黑云母正长花岗岩微量元素测试结果/ 10^{-6}
Table 2 Trace element contents of fluorite, Lishan Formation clastic rocks and biotite granite in Yangjiaowei fluorite deposit/ 10^{-6}

编号 岩性	YJW-1	YJW-2	YJW-3	YJW-4	YJW-5	WY-1	WY-2	WY-3	WY-4	WY-6	WY-7	WY-8	WY-9	WY-10
	无色萤石	绿色萤石	绿色萤石	无色萤石	无色萤石	凝灰岩	凝灰岩	凝灰岩	凝灰质砂岩	黑云母正长花岗岩				
Li	1.54	1.06	7.97	0.87	1.45	50.00	48.35	48.59	53.31					
Be	0.83	0.67	0.58	0.52	0.52	3.43	3.40	3.74	3.83					
Sc	1.58	1.25	1.10	0.98	1.06	1.29	1.61	1.37	1.57	4.73	4.37	2.74	4.31	3.57
V	15.14	12.36	16.95	14.37	15.41	13.20	19.04	11.87	13.32	25.47	21.99	11.75	11.88	9.80
Cr	4.31	4.15	4.33	3.76	4.24	7.98	10.27	5.37	7.35	21.75	15.67	7.86	4.49	7.54
Co	1.54	1.53	1.58	1.44	1.53	0.74	1.06	0.64	0.74					
Ni	16.81	17.85	17.63	17.15	18.19	7.27	8.60	3.45	5.30					
Cu	1.31	1.11	2.95	1.07	1.16	5.47	5.79	6.13	5.03					
Zn	5.50	4.88	4.83	4.50	4.74	15.15	21.71	15.14	16.77					
Ga	0.21	0.14	0.31	0.16	0.22	18.57	22.18	23.60	23.86					
Rb	0.62	0.37	1.03	0.30	0.46	288.85	332.20	359.35	366.05	289.58	293.60	268.84	350.23	256.37
Sr	181.06	182.11	80.91	180.27	174.77	33.47	53.93	19.32	21.34	96.30	172.10	152.90	60.99	37.72
Nb	0.75	0.71	0.16	0.13	0.16	13.29	13.11	14.19	15.39	21.14	27.08	17.58	22.85	24.27
Mo	0.95	0.50	9.11	0.25	0.31	36.81	19.82	27.84	15.74					
Cd	0.03	0.03	0.15	0.11	0.11	0.25	0.19	0.20	0.12					
In	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.04	0.05	0.05					
Sn	1.17	0.75	0.29	0.33	0.39	4.87	5.06	6.15	5.51					
Sb	0.13	0.15	0.06	0.04	0.04	0.30	0.44	0.73	0.38					
Cs	0.04	0.03	0.09	0.02	0.03	4.87	5.43	5.45	5.49					
Ba	64.53	9.17	82.43	7.29	8.79	168.25	538.75	179.20	193.40	371.50	609.68	336.12	102.74	91.95
Ta	0.11	0.16	0.03	0.02	0.03	0.84	1.05	1.09	1.38	2.74	3.47	2.19	2.25	3.65
Pb	0.72	0.62	0.84	0.65	0.82	26.47	27.11	37.29	35.22					
Th	0.09	0.06	0.06	0.05	0.07	15.13	13.28	16.82	16.80	35.58	36.37	30.72	30.27	23.43
U	0.04	0.05	0.05	0.03	0.05	5.16	5.10	5.62	5.78					
Zr	12.45	14.10	6.12	11.95	11.65	55.90	59.26	57.62	63.03	115.90	144.40	102.70	99.14	65.61
Hf	1.00	1.06	0.66	1.44	0.92	2.62	2.74	2.90	2.95	6.58	5.57	4.06	5.04	3.93
As	1.34	1.29	1.24	1.12	1.07	6.22	2.55	7.04	2.07					
Ag	0.02	0.01	0.06	0.01	0.01	0.70	0.39	0.72	0.15					

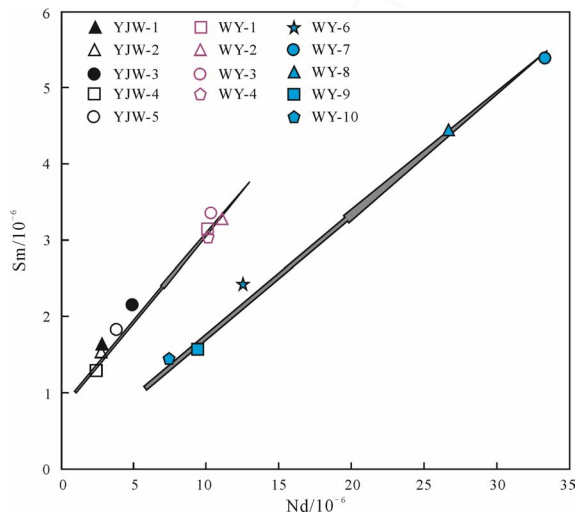


图 6 羊角尾萤石矿萤石及围岩 Sm-Nd 图

Fig. 6 Sm-Nd diagram of the fluorite and surrounding rock in Yangjiaowei fluorite deposit

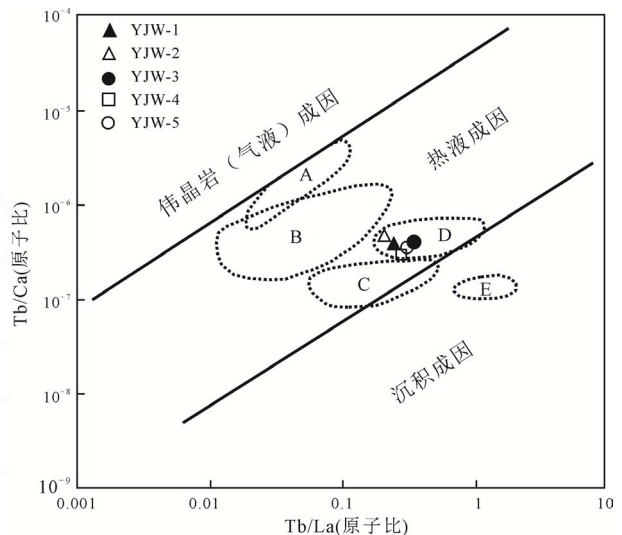
低于正长花岗岩 Σ REE, 上述稀土元素特征显示羊角尾萤石矿的成矿与围岩梨山组火山碎屑岩关系较为密切。浦城一带其他产于火山岩、变质岩及花岗岩中的萤石显示轻重稀土分馏明显, 轻稀土元素相对富集, 且存在明显负 Eu 异常(朱利岗等, 2021), 与研究区产于梨山组碎屑岩中的萤石矿的稀土元素特征明显不同, 这可能是成矿流体长期演化过程中对下侏罗统梨山组碎屑岩进行淋滤和萃取的结果, 因此梨山组火山碎屑岩应该是研究区萤石矿的成矿物质直接来源。

4.1.2 微量元素特征对成矿物质来源的反映

羊角尾萤石矿床矿物组合十分简单, 主要为萤石和石英, 未见有明显的金属硫化物及其他脉石矿物, 因此, 萤石中的微量元素特征能代表成矿流体中的元素地球化学信息。梨山组凝灰岩及凝灰质砂岩和萤石矿微量元素特征一致, 显示可能为同源产物。但梨山组火山碎屑岩微量元素含量整体较萤石更高, 萤石矿微量元素中 Ni、Cd、Pb 和 As 等中低温金属微量元素有一定程度富集或基本相当于地壳平均含量, 相对于上地壳的富集程度曲线趋势与梨山组火山碎屑岩基本保持一致, 这表明成矿流体形成或演化过程中富集了这些元素。梨山组火山岩碎屑岩中 Rb、Th、Ba、Nb 等元素显示相对富集的特征可能是由于上述大离子亲石元素的地球化学性质和行为与 Ca 和 F 不同, 不易进入萤石晶格而表现出亏损(刘英俊和曹励明, 1987)。因此, 羊角尾萤石矿的微量元素特征与梨山组火山碎屑岩基本一致, 显示了萤石成矿物源与围岩的密切关系。

4.2 矿床成因及成矿作用过程

Möller et al.(1976)曾根据全球 150 多个萤石样品测试数据设计了 Tb/Ca(同化作用程度)-Tb/La(稀土



A—产于火山岩和次火山岩中的矿床; B—产于岩浆岩及其接触带的矿床; C—产于白云岩和大理岩中的矿床; D—产于火山沉积岩中的矿床; E—产于灰岩中的矿床。

A—deposits occurring in volcanic and subvolcanic rocks;
B—deposits occurring in magmatic rocks and their contact zones;
C—deposits occurring in dolomite and marble;
D—deposits occurring in volcanic sedimentary rocks;
E—deposits occurring in limestone

图 7 羊角尾萤石矿成因判别图解

(据 Möller et al., 1976; 曹俊臣, 1995 修编)

Fig.7 Genetic Recognition Diagrams of Yangjiaowei fluorite deposit(modified from Möller et al., 1976; CAO, 1995)

分馏程度)原子比关系图用于判别萤石矿的成因, 本文结合曹俊臣(1995)关于华南地区脉状萤石矿床的研究成果运用该图解判别羊角尾萤石矿成因。在图 7 中, 羊角尾萤石矿均投图于热液成因区内的火山沉积岩区内, 也佐证了前文中萤石矿形成与梨山组碎屑岩关系密切的结论。

Eu 和 Ce 是变价元素, 对外界氧化还原条件的反应很灵敏, 二者价态变化能很好地反映成矿流体的氧化还原条件(王中刚等, 1989)。研究区萤石表现为微弱的 Eu 负异常和 Ce 负异常, 异常不明显, 反映萤石矿形成环境不属于完全封闭的还原环境(王中刚等, 1989), 因此矿床可能形成于深度相对较浅的部位。在羊角尾萤石矿微量元素富集 Ni、Cd、Pb 和 As 等中低温金属元素的特点指示了说明萤石矿的形成温度为中-低温。

李长江等认为中国东南部有两类萤石矿的成矿模式, 轻稀土富集型萤石的形成主要与晚白垩世地热水循环淋滤萃取作用有关, 成矿物质来源于下伏的基底变质岩或花岗岩体。重稀土富集型萤石则主要是晚白垩世大气降水经浅部循环淋滤萃取作用形成, 且成矿物质来自于矿体的直接围岩(李长江和蒋叙良, 1991)。羊角尾萤石矿稀土元素特征显示重稀土富集, 成矿热液经历了长期演化, Eu 异常不明显指示了地壳浅部形成环境, 微量元素显示中低温元

素的富集特点,上述地球化学特征指示其成矿模式应属于第二类。成矿热液形成后经历了长期的演化,在此过程中通过淋滤矿源层与围岩发生了充分的水岩反映,使Ca、F、REE等重新活化,最终形成成矿流体最终在构造运动和地层温压梯度的驱动下,于构造破碎带就位沉淀形成矿体,为中-低温热液充填型矿床。

4.3 对区域找矿方向的指示

多年以来针对闽北地区的萤石矿成矿规律研究成果显示燕山期花岗岩和古元古代变质岩应该为萤石矿氟(F)的主要来源,但不能忽视的是闽北萤石矿成矿区与浙中萤石矿成矿区结合部位近年来发现了多处产于晚侏罗世一早白垩世火山-沉积地层中的大中型萤石工业矿床。前人的区域地质研究工作表明,浦城一带的大面积连片分布的晚侏罗世火山-沉积岩系中普遍含有富氟矿物(黑云母、白云母、长石、角闪石等),氟同时也以气液包裹体形式存在于富氟矿物中,侏罗系下统梨山组的F地球化学背景值相对较高。已有研究表明梨山组碎屑岩的主要物源成分之一是古元古界大金山岩组变质岩(许中杰等, 2018),其原岩为一套中基性火山沉积建造,F含量在0.01%~0.185%不等,最高达0.471%,氟含量总体偏高(福建省闽北地质大队, 1985),而闽北地区梨山组火山碎屑岩中必然也继承了大金山岩组的高F含量特征,结合前文针对羊角尾萤石矿的成矿物质来源研究,认为闽北地区广泛分布的晚侏罗世火山-沉积岩系同样是重要的萤石矿物源基础,与燕山期花岗岩、麻源岩群变质岩一起构成了区域萤石矿成矿的三重物源结构,今后在该地区的找矿工作中应重点关注。

5 结论

(1)浦城羊角尾萤石矿产于下侏罗统梨山组火山碎屑岩区发育的构造破碎带内,萤石的稀土微量元素特征与梨山组火山碎屑岩较为接近,明显不同于黑云母正长花岗岩,指示其成矿物质来源为侏罗系下统梨山组火山碎屑岩。

(2)羊角尾萤石矿稀土元素特征显示重稀土富集, Eu异常不明显指示了地壳浅部的非还原环境,微量元素显示中低温元素的富集特点,表明羊角尾萤石矿成矿流体形成后在长期演化过程中淋滤矿源层,与围岩发生了充分的水岩反映,使Ca、F、REE等重新活化,最终在构造破碎带就位沉淀形成矿体,为中-低温热液充填型矿床。

(3)羊角尾萤石矿物源及成因的判别表明晚侏罗世火山-沉积岩系是区域萤石矿成矿的重要物源基础,闽北地区尤其是浦城一带侏罗系火山-沉积地层广泛

分布,在今后该地区的找矿工作中还应关注侏罗系火山-沉积岩层中萤石矿的找矿工作。

致谢: 野外调查、室内研究及分析测试工作得到了中化地质矿山总局地质研究院萤石矿产资源调查评价科技创新团队和中化地质矿山总局中心实验室的大力支持,福建省闽北地质大队同行为论文提供了宝贵的基础地质资料,审稿专家提出的建设性建议使论文得以完善,在此一并表示衷心的感谢!

Acknowledgements:

This study was supported by China Geological Survey (Nos. DD20190816 and DD20190606), China Chemical Geology and Mine Bureau (No. ZHDK202004), and Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund (No. KK2005).

参考文献:

- 蔡建设. 2011. 福建浦城龙堂寺萤石矿地质特征及成因探讨[J]. 福建地质, 30(4): 301-306.
- 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, 24(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(2): 287-296.
- 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.
- 冯辉兴. 2020. 福建浦城羊角尾萤石矿地质特征及成矿模式探讨[J]. 能源与环境, (3): 22-23, 41.
- 福建省闽北地质大队. 1985. 福建省闽北地区前寒武纪变质岩系研究报告[R]. 邵武: 福建省闽北地质大队.
- 福建省闽北地质大队. 2016. 福建省浦城县羊角尾矿区萤石矿勘探报告[R]. 邵武: 福建省闽北地质大队.
- 福建省闽北地质大队. 2018. 闽北地区萤石矿成矿地质特征及找矿靶区优选研究报告[R]. 邵武: 福建省闽北地质大队.
- 韩吟文, 马振东. 2003. 地球化学[M]. 北京: 地质出版社: 46-49.
- 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(6): 684-692.
- 李长江, 蒋叙良. 1991. 中国东南部两类萤石矿床的成矿模式[J]. 地质学报, (3): 263-274.
- 栗克坤, 商朋强, 韩志坤, 王春连, 焦森, 王桂香, 袁昌盛, 张青松, 刘增政, 闫晓博, 范亚洲, 蒋济勇, 靳乾峰. 2022. 闽北邵武地区萤石矿综合信息找矿方法研究[J]. 地球学报, 43(3): 404-410.
- 栗克坤, 王春连, 陈新立, 王桂香, 商朋强, 张青松, 刘增政, 韩志坤, 闫晓博, 蒋济勇. 2020. 福建邵武地区萤石矿微量、稀土元素特征及对成矿物质指示[J/OL]. 中国地质: 1-15[2021-05-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20200616.1107.010.html>.
- 林国宣. 2004. 闽西北地区萤石矿成矿地质规律及找矿方向[J]. 化工矿产地质, 26(3): 155-161.
- 林子华. 2018. 福建省萤石矿成矿地质特征[J]. 化工矿产地质, 40(3): 162-165.
- 刘磊, 林国宣, 谢晓亮. 2013. 武夷成矿带闽西北部萤石矿床地质特征及成矿启示[J]. 中国矿业, 22(S1): 139-142, 200.

- 刘英俊, 曹励明. 1987. 元素地球化学导论[M]. 北京: 地质出版社: 194-205.
- 舒良树. 2012. 华南构造演化的基本特征[J]. 地质通报, 31(7): 1035-1053.
- 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.
- 涂样谋, 傅树超, 陈兴高. 2004. 福建三明地区萤石矿地质特征及成矿预测[J]. 福建地质, 23(2): 67-72.
- 王春连, 王九一, 游超, 余小灿, 刘殿鹤, 颜开, 刘思晗, 薛燕, 刘延亭, 刘雪, 尹传凯. 2022. 战略性非金属矿产厘定、关键应用和供需形势研究[J]. 地球学报, 43(3): 267-278.
- 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.
- 王吉平, 朱敬宾, 李敬, 商朋强, 熊先孝, 高永璋, 张浩, 张杨, 祁才吉, 朱颜农. 2018. 中国萤石矿预测评价模型与资源潜力分析[J]. 地学前缘, 25 (3): 172-178.
- 王中刚, 于学元, 赵振华. 1989. 稀土元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社: 88-93.
- 许中杰, 王嘹亮, 蓝艺植, 程日辉. 2018. 华南闽西南早侏罗世梨山组碎屑锆石 U-Pb 定年及地质意义[J]. 地球科学, 43(S1): 209-224.
- 闫巧娟, 张文高, 陈正乐, 王晓虎, 徐正华, 刘 勋, 丁志磊, 王波. 2021. 浙西北湖安地区花岗岩剥露程度及其对萤石矿找矿的启示——来自于磷灰石裂变径迹的证据[J]. 地球学报, 42(5): 651-662.
- 尤阳正. 2018. 福建浦城黎外萤石矿地质特征及成因探讨[J]. 福建地质, 37(3): 220-226.
- 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(3): 359-370.
- 张青松, 王春连, 栗克坤, 刘增政, 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.
- 张苏坤, 刘耀文, 汪江河, 冯绍平, 常嘉毅, 张争辉, 毛宁. 2020. 熊耳山上宫金矿稀土元素特征及对金矿物质来源的指示意义[J]. 地球学报, 41(6): 938-948.
- 赵省民, 聂凤军, 江思宏, 白大明. 2002. 内蒙古东七—山萤石矿床的稀土元素地球化学特征及成因[J]. 矿床地质, 21(3): 311-317.
- 朱利岗, 金松, 王春连, 商朋强, 高立湧, 王占兵. 2021. 福建浦城地区萤石矿床围岩和矿石地球化学特征及成因[J]. 岩石矿物学杂志, 40(5): 923-938.
- 邹灏, 方乙, 陈合毛, 肖广, 徐旗章. 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.
- the Longtangsi fluorite deposit in Pucheng County, Fujian Province[J]. *Geology of Fujian*, 30(4): 301-306(in Chinese with English abstract).
- CAO Jun-chen. 1995. REE geochemical characteristics of epithermal vein fluorite deposits in South China[J]. *Geochimica*, 24(3): 225-234(in Chinese with English abstract).
- CHEN Jun-yuan, LIU Yan-fei, YAN Ling-ya, GAO Shu-xue, OUYANG You-he, LONG Tao. 2021. Research on development trend of strategic nonmetallic minerals such as graphite and fluorite[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 42(2): 287-296(in Chinese with English abstract).
- FANG Gui-cong, WANG Deng-hong, CHEN Yu-chuan, HUANG Fan, WANG Yan, WU Jia-xu, HU Shi-fu. 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).
- FENG Hui-xing. 2020. Geological characteristics and metallogenic model of Yangjiaowei fluorite deposit in Pucheng County, Fujian Province[J]. *Energy and Environment*, (3): 22-23, 41(in Chinese).
- GRAF J L. 1977. Rare earth elements as hydrothermal tracers during the formation of massive sulfide deposits in volcanic rocks[J]. *Economic Geology*, 72(4): 527-548.
- HAN Yin-wen, MA Zhen-dong. 2003. *Geochemistry*[M]. Beijing: Geological Publishing House: 46-49(in Chinese).
- JIN Shao-rong, CHEN Jun, DAI De-rong, YANG De-zhi, ZHOU Jia-xi, HE Xiao-hu. 2018. Geochemical characteristics of trace elements and REE in the Gaoling fluorite deposit, Southwest Guizhou, China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 38(6): 684-692(in Chinese with English abstract).
- LI Chang-jiang, JIANG Xu-liang. 1991. The minerogenetic model of two types of fluorite deposits in Southeastern China[J]. *Acta Geologica Sinica*, (3): 263-274(in Chinese with English abstract).
- LI Ke-kun, SHANG Peng-qiang, HAN Zhi-kun, WANG Chun-lian, JIAO Sen, WANG Gui-xiang, YUAN Chang-sheng, ZHANG Qing-song, LIU Zeng-zheng, YAN Xiao-bo, FAN Ya-zhou, JIANG Ji-yong, JIN Qian-feng. 2022. Comprehensive Information Prospecting Method for Fluorite Deposits in Shaowu Area, Northern Fujian Province[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 43(3): 404-410(in Chinese with English abstract).
- LI Ke-kun, WANG Chun-lian, CHEN Xin-li, WANG Gui-xiang, SHANG Peng-qiang, ZHANG Qing-song, LIU Zeng-zheng, HAN Zhi-kun, YAN Xiao-bo, JIANG Ji-yong. 2020. Characteristics of trace and rare earth elements and direction for ore-forming materials in Shaowu area, Fujian Province[J]. *Geology in China*, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20200616.1107.010.html>(in Chinese with English abstract).
- LIN Guo-xuan. 2004. Metallogenic regularities and prospecting direction of fluorite deposit in northwest Fujian[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 26(3): 155-161(in Chinese with English abstract).
- LIN Zi-hua. 2018. Metallogenic geological characteristics of fluorite deposits in Fujian Province[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 40(3): 162-165(in Chinese with English abstract).
- LIU Lei, LIN Guo-xuan, XIE Xiao-liang. 2013. Geological characteristics of fluorite deposits, western Fujian, Wuyi metallogenic belt and their implication for mineralization[J]. *China Mining Magazine*, 22(S1): 139-142, 200(in Chinese with English abstract).
- LIU Ying-jun, CAO Li-ming. 1987. *Element Geochemistry Intro-*

References:

- ALVIN M P, DUNPHY J M, GROVES D I. 2004. Nature and genesis of a carbonatite-associated fluorite deposit at Speewah, East Kimberle region, Western Australia[J]. *Mineralogy and Petrology*, 80(3-4): 127-153.
- BAU M, MÖLLER P. 1992. Rare earth element fractionation in metamorphogenic hydrothermal calcite, magnesite and siderite[J]. *Mineralogy and Petrology*, 45:231-246.
- BAU M. 1991. Rare-earth element mobility during hydrothermal and metamorphic fluid-rock interaction and the significance of the oxidation state of europium[J]. *Chemical Geology*, 93(3-4): 219-230.
- CAI Jian-she. 2011. On the geologic characteristics and genesis of

- duction[M]. Beijing: Geological Publishing House: 194-205(in Chinese).
- LOTTERMOSER B G. 1992. Rare earth elements and hydrothermal ore formation processes[J]. *Ore Geology Reviews*, 7(1): 25-41.
- MÖLLER P, PAREKH P P, SCHNEIDER H J. 1976. The application of Tb/Ca-Tb/La abundance ratios to problems of fluor-spar genesis[J]. *Mineralium Deposita*, 11(1): 111-116.
- 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[C]//AUGUSTITHIS S S. The significance of trace elements in solving petrogenetic problems and controversies. Athens: Theophrastus Publications.
- SHU Liang-shu. 2012. An analysis of principal features of tectonic evolution in South China Block[J]. *Geological Bulletin of China*, 31(7): 1035-1053(in Chinese with English abstract).
- 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(18): 3141-3160.
- STRONG D F, FRYER B J, KERRICH R. 1984. Genesis of the St. Lawrence fluor-spar deposits as indicated by fluid inclusion, rare earth element, and isotopic data[J]. *Economic Geology*, 79(5): 1142-1158.
- SUN Hai-rui, HUANG Zhi-long, ZHOU Jia-xi, LENG Cheng-biao, 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).
- SUN S S, 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.
- TAYLOR S R, MCLENNAN S M. 1985. The continental crust: its composition and evolution[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications: 1-312.
- The Northern Geological Party of Fujian. 1985. Study on the Precambrian metamorphic strata in northern Fujian[R]. Shaowu: The Northern Geological Party of Fujian(in Chinese).
- The Northern Geological Party of Fujian. 2016. Exploration report of Yangjiaowei fluorite deposit in Pucheng, Fujian[R]. Shaowu: The Northern Geological Party of Fujian(in Chinese).
- The Northern Geological Party of Fujian. 2018. Study on metallogenic geological characteristics and prospecting target optimization of fluorite deposit in northern Fujian[R]. Shaowu: The Northern Geological Party of Fujian(in Chinese).
- TU Yang-mou, FU Shu-chao, CHEN Xing-gao. 2004. Geologic characteristics and metallogenic prolepsis of fluorite ores in Sanming Area of Fujian Province[J]. *Geology of Fujian*, 23(2): 67-72(in Chinese with English abstract).
- WANG Chun-lian, WANG Jiu-yi, YOU Chao, YU Xiao-can, LIU Dian-he, YAN Kai, LIU Si-han, XUE Yan, LIU Yan-ting, LIU Xue, YIN Chuan-kai. 2022. A Study on Strategic Non-metallic Mineral Definition, Key Applications, and Supply and Demand Situation[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 43(3): 267-278(in Chinese with English abstract).
- WANG Ji-ping, SHANG Peng-qiang, XIONG Xian-xiao, YANG Hui-yan, TANG Rao. 2015. Metallogenic regularities of fluorite deposits in China[J]. *Geology in China*, 42(1): 18-32(in Chinese with English abstract).
- WANG Ji-ping, ZHU Jing-bin, LI Jing, SHANG Peng-qiang, XIONG Xian-xiao, GAO Yong-zhang, ZHANG Hao, ZHANG Yang, QI Cai-ji, ZHU Yan-nong. 2018. Prediction model and resource potential assessment of fluorite deposits in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 25(3): 172-178(in Chinese with English abstract).
- WANG Zhong-gang, YU Xue-yuan, ZHAO Zhen-hua. 1989. REE Chemistry[M]. Beijing: Science Press: 88-93(in Chinese with English abstract).
- XU Zhong-jie, WANG Liao-liang, LAN Yi-zhi, CHENG Ri-hui. 2018. Detrital zircon U-Pb dating and its geological significance of Early Jurassic Lishan Formation in Southwestern Fujian of South China[J]. *Earth Science*, 43(S1): 209-224(in Chinese with English abstract).
- YAN Qiao-juan, ZHANG Wen-gao, CHEN Zheng-le, WANG Xiao-hu, XU Zheng-hua, LIU Xun, DING Zhi-lei, WANG Bo. 2021. Granite denudation degree and its implications for fluorite prospecting in Hu'an Area, Northwest Zhejiang Province: Evidence from apatite fission track thermochronology[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 42(5): 651-662(in Chinese with English abstract).
- YOU Chao, WANG Chun-lian, LIU Dian-he, YU Xiao-can, YAN Kai, LIU Si-han, ZHOU Bo-wen. 2022. REE Geochemistry of Fluorite from Kantian Fluorite Deposit and Its Geological Implications in Ningdu Area, Jiangxi Province[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 43(3): 359-370(in Chinese with English abstract).
- YOU Yang-zheng. 2018. Geological characteristics and origin of Lichu fluorite deposit in Pucheng County, Fujian Province[J]. *Geology of Fujian*, 37(3): 220-226(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Qing-song, WANG Chun-lian, LI Ke-kun, LIU Zeng-zheng, FENG Xiao-hui, YAN Xiao-bo, HAN Zhi-kun, JIANG Ji-yong, JIANG Jian-lang. 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 Su-kun, LIU Yao-wen, WANG Jiang-he, FENG Shao-ping, CHANG Jia-yi, ZHANG Zheng-hui, MAO Ning. 2020. The implications of REE characteristics for gold sources of the Shangong gold deposit in Xionger Mountain[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 41(6): 938-948(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Xing-min, NIE Feng-jun, JIANG Si-hong, BAI Da-ming. 2002. REE geochemistry and genesis of Dongqi-yishan fluorite deposit, Inner Mongolia[J]. *Mineral Deposits*, 21(3): 311-317(in Chinese with English abstract).
- ZHU Li-gang, JIN Song, WANG Chun-lian, SHANG Peng-qiang, GAO Li-yong, WANG Zhan-bing. 2021. Geochemistry characteristic and genesis of surrounding rock and ore in Pucheng fluorite deposits district, Fujian Province[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 40(5): 923-938(in Chinese with English abstract).
- ZOU Hao, FANG Yi, CHEN He-mao, XIAO Guang, XU Zhan-zhang. 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).