



邱素文, 胡晋生, 史光宇, 等. 电子探针测试独居石样品中 Ce 的 M 能级谱线对 F 的 K 能级谱线干扰研究[J]. 岩矿测试, 2025, 44(3): 384–390. DOI: [10.15898/j.ykcs.202410170217](https://doi.org/10.15898/j.ykcs.202410170217).

QIU Suwen, HU Jinsheng, SHI Guangyu, et al. Interference of the Spectral Line M_{γ} in the M Energy Level Series of Ce on the F Element K_{α} Peak in Monazite Samples[J]. Rock and Mineral Analysis, 2025, 44(3): 384–390. DOI: [10.15898/j.ykcs.202410170217](https://doi.org/10.15898/j.ykcs.202410170217).

电子探针测试独居石样品中 Ce 的 M 能级谱线对 F 的 K 能级谱线干扰研究

邱素文¹, 胡晋生², 史光宇^{3*}, 饶灿¹, 张晓峰⁴, 徐文坦⁵

(1. 浙江大学地球科学学院地球与行星物质科学研究中心, 浙江 杭州 310058;

2. 捷欧路(北京)科贸有限公司, 北京 100089;

3. 武汉上谱分析科技有限责任公司, 湖北 武汉 430205;

4. 钢铁研究总院有限公司, 北京 100081;

5. 防灾科技学院, 河北 三河 065201)

摘要: 超轻元素氟(F)的定量分析一直是电子探针(EPMA)矿物分析的难点之一, 高分辨定性分析、主量元素谱线干扰峰扣除是 F 元素准确定量分析的前提。本文以独居石样品中 F 元素(F 含量很低甚至接近 0)为研究对象, 通过与磷灰石、InP、CeAl₂、LaF₃ 标准样品的高分辨定性分析谱图比较、分析, 结果表明高含量 P 元素的 K_{α} 三阶线不会对 F 元素的 K_{α} 峰产生干扰, 但 Ce 元素的 M 能级谱线 M_{γ} 会对 F 元素的 K_{α} 峰产生干扰, Ce 元素含量高的独居石需要通过干扰峰扣除进行 F 元素的准确定量分析; 稀土元素的 M 能级谱线 M_{α} 、 M_{β} 、 M_{γ} 对超轻元素谱峰的干扰需要引起重视, 通过定性分析谱图进行必要的干扰峰修正。

关键词: 电子探针; 定性分析; 独居石; 磷灰石; 干扰峰扣除

要点:

(1) P K_{α} 三阶线对 F K_{α} 线的干扰可忽略。

(2) F K_{α} 线和 Ce M_{γ} 线严重重合, “干扰峰修正”(Interference Correction) 是有效的方法。

(3) 稀土元素的 M 能级谱线 M_{α} 、 M_{β} 、 M_{γ} 对超轻元素峰的干扰需要引起重视。

中图分类号: P575.1

文献标识码: A

独居石, 化学式 (REE, Th)PO₄, 作为一种副矿物广泛存在于变质岩、岩浆岩和沉积岩中, 是稀土资源中最重要的矿物之一^[1-2]。由于独居石富含铀、钍、铅, 其 Th-Pb 系统更稳定, 且非放射性产生的普通铅可以忽略不计等特点, 因此, 独居石是电子探针 (EPMA) 进行 U-Th-Pb 原位化学定年的理想矿物^[3-5]。

独居石的化学成分精准测定不仅能够反映其地球化学特征^[6-8], 还能进行相关的地质年代学研究。

虽然独居石的理想化学式比较简单, 但由于含多种稀土元素, 导致其化学成分极为复杂, 特别是含多种镧系元素时, 其特征峰严重重叠给独居石 EPMA 定量化学成分分析带来极大的困难。虽然前人测定了独居石中的氟(F)元素^[9], 但未对 LDEI 和 TAP 分光晶体上 F 元素的峰进行过分析和验证。鉴此, 本文通过对磷灰石、InP、CeAl₂、LaF₃ 等标准样品进行比较、分析, 发现高含量 P 元素的 K_{α} 三阶线不会对

收稿日期: 2024-10-17; 修回日期: 2025-01-31; 接受日期: 2025-02-13; 网络出版日期: 2025-02-22

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划重点项目 (92062212)

第一作者: 邱素文, 硕士, 工程师, 主要从事电子探针分析工作。E-mail: 0916268@zju.edu.cn。

通信作者: 史光宇, 硕士, 工程师, 主要从事电子探针分析工作。E-mail: 463237920@qq.com。

F 元素的 K_{α} 峰产生干扰, 而 Ce 元素的 M 能级谱线 M_{ζ} 会影响 F 元素的 K_{α} 峰。

1 实验部分

1.1 实验样品

LDE1 和 TAP 分光晶体是日本电子(JEOL)电子探针中分析 F 元素的两种分光晶体。LDE1 分光晶体的优点是分光晶体距离样品分析点较近, X 射线计数强度高, 缺点是分辨率较差, 容易受到主量元素谱线的影响。TAP 分光晶体距离分析点较远, X 射线计数强度较低, 但分辨率较高。实际分析 F 元素时, 需要将两块分光晶体结合起来进行分析。

根据 JEOL 电子探针软件内部数据库整理了 $F K_{\alpha}$ 、 $P K_{\alpha(3)}$ 三阶线 [简称 $P K_{\alpha(3)}$] 和 $Ce M_{\zeta}$ 的波长 (λ) 以及对应 LDE1 和 TAP 两种分光晶体的 L 值 (表 1)。 L 值是样品被分析点和分光晶体中心点两点间的距离, L 和波长 λ 呈线性关系。

表 1 $F K_{\alpha}$ 、 $P K_{\alpha(3)}$ 、 $Ce M_{\zeta}$ 的波长 (λ) 和 LDE1 和 TAP 两种分光晶体对应的 L 值

Table 1 The wavelength (λ) of $F K_{\alpha}$, $P K_{\alpha(3)}$, and $Ce M_{\zeta}$ and L values corresponding to LDE1 and TAP crystals.

三阶线	λ (nm)	$L = \frac{R}{d} n \lambda$ (mm)	
		LDE1	TAP
$F K_{\alpha}$	1.832	85.493	199.154
$P K_{\alpha(3)}$	$0.6158 \approx 1.832 \div 3$	86.212	200.828
$Ce M_{\zeta}$	1.835	85.633	199.48

对于样品含 F、P、Ce 等元素时, $F K_{\alpha}$ 和 $P K_{\alpha(3)}$ 、 $Ce M_{\zeta}$ 谱峰在 LDE1 分光晶体衍射中无法分开 (表 1); $F K_{\alpha}$ 和 $P K_{\alpha(3)}$ 谱峰在 TAP 分光晶体衍射中是可以分开的, 但 $F K_{\alpha}$ 和 $Ce M_{\zeta}$ 谱峰无法区分。为了进一步分析和验证上述干扰以及对 $F K_{\alpha}$ 谱峰的干扰程度, 本文选取独居石、磷灰石、InP、 $CeAl_2$ 、 LaF_3 进行定性和定量分析。

表 2 本文实验样品中 F、P、Ce 三种元素的质量浓度

Table 2 Mass concentrations of elements F, P, and Ce in the experimental samples used in this paper.

实验样品	元素 F 含量 (%)	元素 P 含量 (%)	元素 Ce 含量 (%)	化学成分特点
独居石	很少或接近 0	13.14	29.56	含 Ce、P、低 F
InP	0	21.17	0	含 P、不含 F、Ce
磷灰石	3.70	16.47	0.75	含 F、Ce、P
$CeAl_2$	0	0	72.23	含 Ce, 不含 F、P
LaF_3	29.51	0	0	含 F, 不含 Ce、P

本次研究的样品为英国 MAC 公司的标样: 独居石、InP、磷灰石、 $CeAl_2$ 、 LaF_3 (表 2)。独居石样品含有较高的 Ce 元素, F 元素含量很低或接近于 0, 是本文主要的研究对象; InP 样品不含 Ce 和 F 元素, 含较高的 P 元素, 用于验证 P 元素谱线对 F 元素峰位的干扰情况; 磷灰石样品用于观察 P、Ce 对于 F 元素的干扰情况; $CeAl_2$ 样品中 Ce 元素的含量比较高, 但不含 F 和 P 元素, 用于验证 Ce 元素谱线对 F 元素峰位的干扰情况; LaF_3 化学成分中含 F 元素, 不含 P 和 Ce 元素, 用于案例分析稀土元素的谱线对轻元素的干扰。

1.2 实验条件

定性分析在浙江大学地球科学学院地球与行星物质科学研究中心完成, 仪器为 JEOL 的 JXA-iHP200F 场发射电子探针。 $CeAl_2$ 、 LaF_3 的验证实验在钢铁研究总院高纳公司和防灾科技学院完成, 实验设备分别为 JEOL JXA-8530F 场发射电子探针和 JXA-8230 钨灯丝电子探针, 测试条件为加速电压 15kV, 束流 30nA, 步长 30 μ m, 驻留时间 2000ms。分光晶体采用 LDE1 和 TAP。

独居石定量分析在武汉上谱分析科技有限责任公司完成, 仪器为 JEOL JXA-8230 钨灯丝电子探针, 测试条件为加速电压 15kV, 束流 10nA, 束斑 5 μ m, 数据校正采用 ZAF 校正方法进行修正 (表 3)。

2 结果与讨论

2.1 TAP 和 LDE1 分光晶体干扰分析

分别使用 TAP 和 LDE1 分光晶体对独居石、磷灰石、InP 样品进行 F 元素附近的高分辨定性分析 (图 1 和图 2)。

TAP 分光晶体的定性分析谱图中 (图 1), 磷灰石的 $P K_{\alpha(3)}$ 和 $F K_{\alpha}$ 谱峰完全分开; InP 样品中没有 F 元素, 相应的谱图在 F 元素的峰位却有小凸起, 为 P 元素的卫星峰; 独居石谱线中 F 元素峰位处凸起除了是 $F K_{\alpha}$ 峰位, 还有 $Ce M_{\zeta}$ 谱峰、P 元素的卫星

表 3 独居石定量分析条件

Table 3 Quantitative analysis conditions of monazite.

元素	分光晶体	峰位计数时间 (s)	背景计数时间 (s)	标准样品	标准样品来源	谱线
U	PETJ	10	5	沥青铀矿	国家标准物质	M_{α}
Th	PETJ	10	5	Th	SPI	M_{α}
Ca	PETJ	10	5	磷灰石	SPI	K_{α}
La	PETJ	10	5	独居石	SPI	L_{α}
Ce	PETJ	10	5	独居石	SPI	L_{α}
Si	TAP	10	5	石英	SPI	K_{α}
Gd	LIFH	10	5	Gd	SPI	L_{β}
Dy	LIFH	10	5	独居石	SPI	L_{α}
Sm	LIFH	10	5	独居石	SPI	L_{α}
Pr	LIFH	10	5	PrF_3	SPI	L_{β}
Nd	LIFH	10	5	独居石	SPI	L_{α}
F	LDE1	10	5	磷灰石	SPI	K_{α}
Pb	PETH	10	5	方铅矿	SPI	M_{α}
P	PETH	10	5	磷灰石	SPI	K_{α}
Y	PETH	10	5	Y	SPI	L_{α}

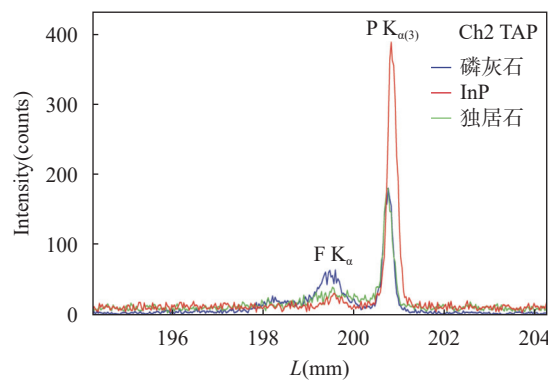


图1 独居石、InP 和磷灰石标准样品的 TAP 分光晶体定性分析谱图

Fig. 1 Qualitative analysis spectra of monazite, InP, and apatite standard samples using TAP crystal.

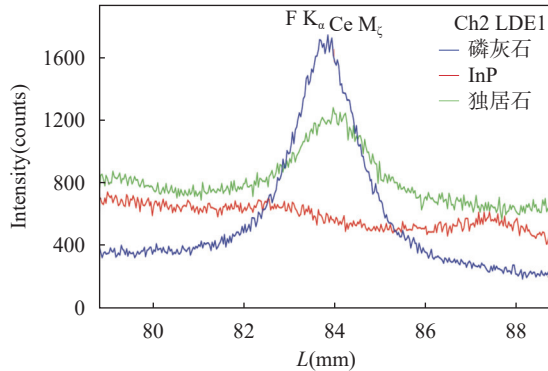


图2 独居石、InP 和磷灰石标准样品的 LDE1 分光晶体定性分析谱图

Fig. 2 Qualitative analysis spectra of monazite, InP, and apatite standard samples using LDE1 crystal.

峰贡献 (图 1)。可得出: $F K_{\alpha}$ 和 $P K_{\alpha(3)}$ 谱峰在 TAP 分光晶体衍射中可以区分, 但 $F K_{\alpha}$ 和 $Ce M_{\zeta}$ 谱峰无法分开。

LDE1 分光晶体的定性分析谱图中 (图 2), 对于 InP 样品, 在 $F K_{\alpha}$ 峰位处完全是背景信号; 独居石和磷灰石样品中, $Ce M_{\zeta}$ 和 $F K_{\alpha}$ 谱峰完全重合, $P K_{\alpha(3)}$ 和 $F K_{\alpha}$ 谱峰则是分开的。可得出: $F K_{\alpha}$ 谱峰在 LDE1 分光晶体衍射中不会受到 $P K_{\alpha(3)}$ 谱线影响。 $Ce M_{\zeta}$ 和 $F K_{\alpha}$ 谱峰在 LDE1 分光晶体衍射中无法分开。

2.2 Ce 元素对 F 元素谱线干扰

选择不含 F 元素, Ce 元素含量高的样品 $CeAl_2$, 使用 LDE1 分光晶体进行高分辨定性分析, 观察 Ce 元素的 M 能级谱线 (M_{α} 、 M_{β} 、 M_{ζ}) 的峰型以及相对强度关系 (图 3)。由于 $CeAl_2$ 中不含 F 元素, 所以图

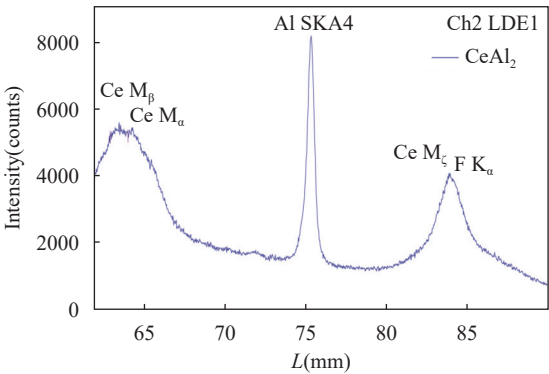


图3 $CeAl_2$ 样品的 LDE1 分光晶体定性分析谱图

Fig. 3 Qualitative analysis spectra of $CeAl_2$ sample using LDE1 crystal.

中程序标识的“F K_α”谱峰实际上是Ce M_ε谱线的贡献,其左侧的峰为Ce M_α+Ce M_β,可以看出二者的强度相对接近,比例近似于1:1。

使用LDE1分光晶体分析Ce元素含量高的样品时,其Ce M_ε和F K_α谱峰完全重合,并且程序会作为F K_α峰位标出。

对LaF₃样品进行定性分析(图4),可以看出

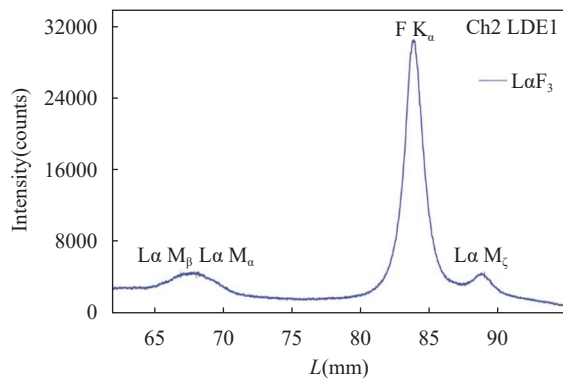


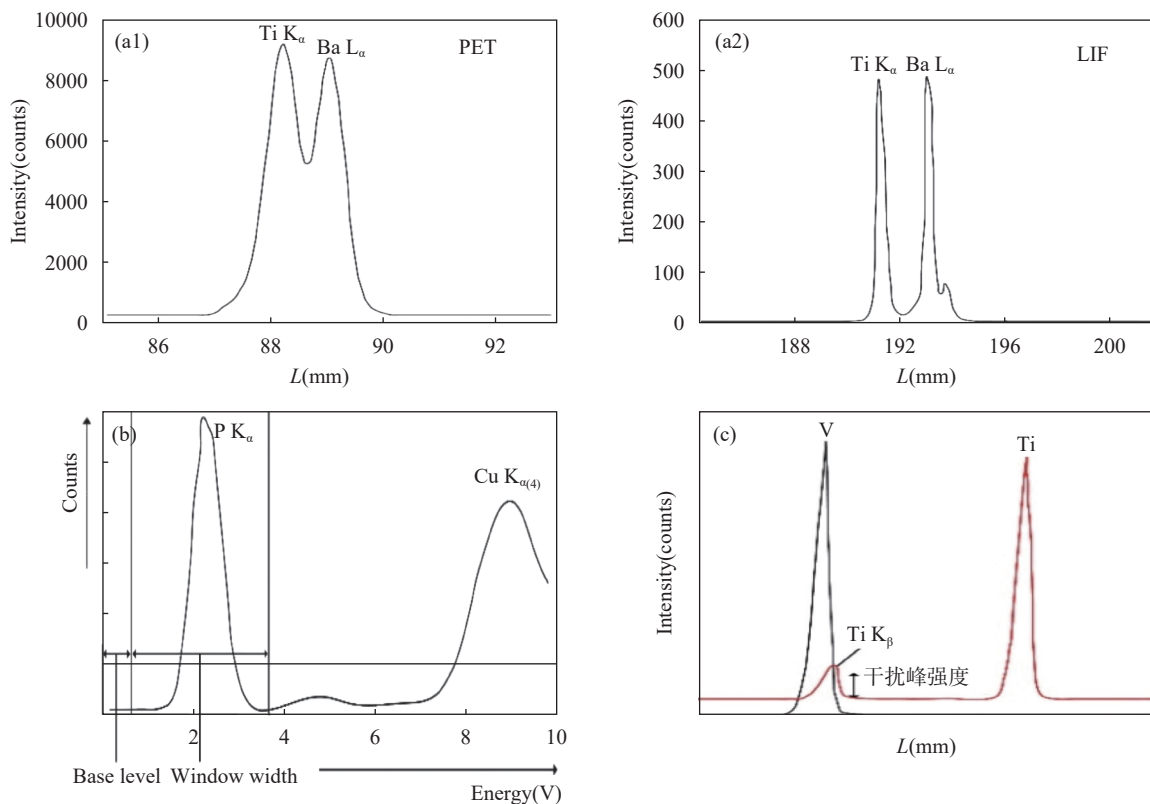
图4 LaF₃标准样品的LDE1分光晶体定性分析谱图

Fig. 4 Qualitative analysis spectrogram of LaF₃ standard sample using LDE1 crystal.

La M_ε和F K_α谱峰是分开的,La M_α和La M_β谱峰相对强度也是近似1:1,从侧面印证了本文对Ce M_ε的分析。通常稀土元素的L能级谱线强度相对较高,M能级谱线则相对较弱,容易被忽视。事实上,M_ε谱峰的强度并不低,它与M_α的强度相当,当稀土元素的含量较高时,其M能级谱线M_α、M_β、M_ε峰都可能对轻元素的谱峰造成干扰。

2.3 Ce元素谱线对F元素峰位干扰修正分析

当测试元素的特征X射线波长与一种或多种基体元素的特征X射线谱线接近或重合时,就会产生干扰峰,它可能成为定量分析中误差的来源,为了得到更准确的元素定量分析结果,避免谱线干扰的常规方法有^[10-14]:①选择合适的分光晶体,元素在分光晶体上的L值越大,谱图分辨率越高,计数强度越低,峰背比(P/B)越高(图5中a1),L值小,则反之(图5中a2)。通常L值应尽量选择在分光晶体移动范围的中间值;②通过改变测试元素的X射线线系谱线来避免干扰;③脉冲高度分析器(PHA)和干扰峰修正(Interference Correction),PHA用于区分具有不同能量但是高阶线和一阶线重合的谱线,通过调



(a1)、(a2) 分光晶体PET和LIF对BaTiO₃谱线的辨析能力差别示意图; (b) PHA功能示意图; (c) 干扰峰修正功能示意图。

图5 避免谱线干扰的常规方法示意图(引自JEOL公司内部培训资料)

Fig. 5 Conventional methods for avoiding spectral line interference: (a1), (a2) The difference of the PET and LIF crystals in the spectral lines of BaTiO₃; (b) The function of PHA; (c) The interference correction function.

整脉冲高度分析器的下限和宽度, 过滤掉干扰信号(图 5b)。而干扰峰修正则是通过校正因子实现干扰峰扣除(图 5c)。

通过本文定性分析(图 1、图 2)可知, F 元素在 TAP 分光晶体的 L 值为 199.154mm, 在 LDE1 分光晶体的 L 值为 85.493mm, Ce M_{ζ} 和 F K_{α} 谱峰在 TAP 和 LDE1 分光晶体衍射中均无法分开。如果不能完全排除独居石中没有 F 元素, 暂时假设 F 元素存在, 且微量, 因此选择使用计数强度高的 LDE1 分光晶体测试 F 元素, 考虑到 Ce M_{ζ} 谱线和 F K_{α} 谱线均为一阶线, 能量相同, 脉冲高度分析仪 (PHA) 的作用有限, 所以本文采用干扰峰修正方法, 具体步骤如下。

第一步, 选择含 F 元素但不含 Ce 元素的标样(萤石), 使用 LDE1 分光晶体在萤石上进行 F 元素寻峰, 确定 F K_{α} 的准确峰位: $L_{\text{F K}_{\alpha}}$;

第二步, 选择含 Ce 元素但不含 F 元素的标样(CeAl_2), 使用 LDE1 分光晶体在 CeAl_2 上, 测量 Ce M_{ζ} 峰在 $L_{\text{F K}_{\alpha}}$ 位置处扣除其背景后的单位时间、单位束流下的计数值: $N_{\text{Ce M}_{\zeta}/\text{F K}_{\alpha}}^{\text{STD}}$ 。同时, 选择 PET 分光晶体测量 Ce L_{α} 峰在其最大值峰位处扣除其背景后的单位时间、单位束流下的计数值: $N_{\text{Ce L}_{\alpha}}^{\text{STD}}$ 。这样, 即可得到比值(Ratio): $\text{Ratio} = N_{\text{Ce M}_{\zeta}/\text{F K}_{\alpha}}^{\text{STD}}/N_{\text{Ce L}_{\alpha}}^{\text{STD}}$;

第三步, 测量待测样品在 $L_{\text{F K}_{\alpha}}$ 位置处扣除其背景后的单位时间、单位束流下的计数值: $N_{\text{F K}_{\alpha}}^{\text{Unk}}$, 同时选择 PET 分光晶体测量 Ce L_{α} 峰在其最大值峰位处扣除其背景后的单位时间、单位束流下的计数值: $N_{\text{Ce L}_{\alpha}}^{\text{Unk}}$ 。F 元素的净计数 $N_{\text{F K}_{\alpha}}^{\text{Unk}}$ (Net) 的表达式如下:

$$N_{\text{F K}_{\alpha}}^{\text{Unk}}(\text{Net}) = N_{\text{F K}_{\alpha}}^{\text{Unk}} - \text{Ratio} \times N_{\text{Ce L}_{\alpha}}^{\text{Unk}} = N_{\text{F K}_{\alpha}}^{\text{Unk}} - N_{\text{Ce M}_{\zeta}/\text{F K}_{\alpha}}^{\text{STD}}/N_{\text{Ce L}_{\alpha}}^{\text{STD}} \times N_{\text{Ce L}_{\alpha}}^{\text{Unk}}$$

JEOL 电子探针自带软件 Interference Correction 模块可以按照上述原理自动计算出 Ratio 值, 在进行定量分析时扣除干扰峰的影响。

2.4 定量分析结果

本文对独居石进行了定量分析(表 4)。 Ce_2O_3 的含量为 24.87%, 扣除 Ce M_{ζ} 对 F K_{α} 谱峰干扰前, F 元素测得的结果为 0.55%, 通过干扰峰修正后, F 元素的结果为 0.01%。因此, 在分析独居石中的 F 元素时, 应该注意 Ce M_{ζ} 谱峰对其干扰的问题, 这样才能

得到较为准确的分析结果。

表 4 扣除 Ce M_{ζ} 峰对 F K_{α} 的干扰前后的独居石定量分析结果

Table 4 Quantitative analysis results of monazite before and after removing the interference of Ce M_{ζ} peak on F K_{α} .

元素 Element	扣除 Ce 干扰前含量		扣除 Ce 干扰后含量	
	Mass(%)	Cation	Mass(%)	Cation
P_2O_5	26.84	5.53	26.85	5.53
Ce_2O_3	24.85	2.21	24.87	2.21
ThO_2	11.98	0.66	11.98	0.66
Nd_2O_3	11.03	0.96	11.03	0.96
La_2O_3	9.72	0.87	9.71	0.87
Sm_2O_3	3.31	0.28	3.31	0.28
Pr_2O_3	2.82	0.25	2.81	0.25
Gd_2O_3	2.59	0.21	2.59	0.21
Y_2O_3	2.09	0.27	2.09	0.27
SiO_2	1.8	0.44	1.8	0.44
Dy_2O_3	0.91	0.07	0.91	0.07
CaO	0.89	0.23	0.89	0.23
F	0.55	0.42	0.01	0.01
=O	-0.23	—	-0.01	—
UO_2	0.52	0.03	0.52	0.03
PbO	0.30	0.02	0.30	0.02
Total	99.96	12.44	99.66	12.04

注: “—”无此数据。

3 结论

使用 TAP 和 LDE1 分光晶体对独居石、磷灰石、 InP 、 CeAl_2 、 LaF_3 等样品进行了定性和定量分析, 得到如下认识。

(1) F K_{α} 和 $\text{P K}_{\alpha(3)}$ 谱峰在 TAP 分光晶体衍射中可以分开; 理论上, F K_{α} 、 $\text{P K}_{\alpha(3)}$ 和 Ce M_{ζ} 谱峰在 LDE1 分光晶体衍射中无法分开, 但本文实验证明, $\text{P K}_{\alpha(3)}$ 对 F K_{α} 谱峰的干扰可忽略。

(2) F K_{α} 和 Ce M_{ζ} 谱峰严重重合, 因此对于同时含有 Ce 和 F 元素的样品, 在进行 F 元素测试时需要考虑 Ce M_{ζ} 谱线的干扰因素, 并进行“干扰峰修正”。

(3) 稀土元素的 L 能级谱线强度相对较高, 但 M 能级谱线强度也不低, 可能会给超轻元素的分析造成干扰, 需给予重视。

Interference of the Spectral Line M_{ζ} in the M Energy Level Series of Ce on the F Element K_{α} Peak in Monazite Samples

QIU Suwen¹, HU Jinsheng², SHI Guangyu^{3*}, RAO Can¹, ZHANG Xiaofeng⁴, XU Wentan⁵

(1. Research Center for Earth and Planetary Material Sciences, School of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

2. JEOL (BEIJING) Co., Ltd., Beijing 100089, China;

3. Wuhan Sample Solution Analytical Technology Co., Ltd., Wuhan 430205, China;

4. Central Iron and Steel Research Institute Co., Ltd., Beijing 100081, China;

5. School of Earth Sciences, Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, China)

HIGHLIGHTS

- (1) The interference of the third-order line of P K_{α} to the F K_{α} line can be ignored.
- (2) The F K_{α} line and the Ce M_{ζ} line are seriously overlapped, and “Interference Correction” is an effective method.
- (3) The interference of the M-level spectral lines (including M_{α} , M_{β} , M_{ζ}) of rare earth elements on the peak of ultra-light elements needs to be taken seriously

ABSTRACT: Quantitative analysis of the ultra-light element fluorine (F) has always been one of the difficulties in electron probe microanalysis (EPMA). High-resolution qualitative analysis and proper subtraction of spectral interferences from major elements are prerequisites for accurate F quantification. This study focuses on F in monazite samples with very low F content or even close to 0. Through comparison and analysis of high-resolution qualitative analysis spectra with apatite, InP, CeAl₂, and LaF₃ samples, it is found that the third-order line of high-content P K_{α} does not interfere with the F K_{α} peak, but the spectral line M_{ζ} of the M energy level series of Ce interferes with the F K_{α} peak. Monazite with high Ce content needs accurate quantitative analysis of F through interference peak subtraction. The interference of the M-level spectral lines (including M_{α} , M_{β} , M_{ζ}) of rare earth elements on ultra-light element peaks needs to be taken seriously, and the necessary interference correction should be made through qualitative analysis of the spectra.

KEY WORDS: electron probe microanalysis; qualitative analysis; monazite; apatite; interference peak subtraction

参考文献

- [1] 吕华华, 石学法, 杨刚, 等. 大洋沉积物中独居石的矿物成分[J]. 矿物学报, 2015(35): 775.
Lyu H H, Shi X F, Yang G, et al. Mineral composition of monazite in oceanic sediments[J]. Journal of Mineralogy, 2015(35): 775.
- [2] 张苏江, 张立伟, 张彦文, 等. 国内外稀土矿产资源及其分布概述[J]. 无机盐工业, 2020, 52(1): 9–16.
Zhang S J, Zhang L W, Zhang Y W, et al. Summarize on rare earth mineral resources and their distribution at home and abroad[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2020, 52(1): 9–16.
- [3] Chen N S, Sun M, Wang Q Y, et al. EMP chemical ages of monazites from central zone of the eastern Kunlun Orogen: Records of multi-tectonometamorphic events[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(16): 2252–2263.
- [4] Suzuki K, Adachi M. Precambrian provenance and Silurian metamorphism of the Tsubonosawa paragneiss in the South Kitakami terrane, Northeast Japan, revealed by the chemical Th-U-total Pb isochron ages of monazite, zircon and xenotime[J]. Geochemical Journal, 2008, 25(5): 357–376.
- [5] 周剑雄, 陈振宇, 芮宗瑶. 独居石的电子探针钍-铀-铅化学测年[J]. 岩矿测试, 2002, 21(4): 241–246.
Zhou J X, Chen Z Y, Rui Z Y. Th-U-Pb chemical dating of monazite by electron probe[J]. Rock and Mineral

- [Analysis](#), 2002, 21(4): 241–246.
- [6] 张龙, 陈振宇, 汪方跃, 等. 电子探针技术研究粤北龙华山岩体中独居石蚀变晕圈的结构与成分特征[J]. [岩矿测试](#), 2022, 41(2): 174–184.
- Zhang L, Chen Z Y, Wang F Y, et al. Application of electron probe microanalyzer to study the textures and compositions of alteration coronas of monazite from the Longhuashan granite, northern Guangdong Province[J]. [Rock and Mineral Analysis](#), 2022, 41(2): 174–184.
- [7] 杨世平, 杨细华, 李安邦, 等. 电子探针技术研究大别造山带富硫独居石地球化学特征及稀土矿化成因[J]. [岩矿测试](#), 2022, 41(4): 541–553.
- Yang S P, Yang X H, Li A B, et al. Study on geochemical characteristics and REE mineralization of S-enriched monazite in the Dabie orogenic belt by electron probe microanalysis[J]. [Rock and Mineral Analysis](#), 2022, 41(4): 541–553.
- [8] 陈益平, 潘家永, 胡凯, 等. 贵州遵义镍-钼富集层中独居石的发现及成因意义[J]. [岩石矿物学杂志](#), 2007, 26(4): 340–344.
- Chen Y P, Pan J Y, Hu K, et al. Discovery of monazite in the Ni-Mo sulfide layer of Zunyi, Guizhou Province, and its genetic significance[J]. [Acta Petrologica et Mineralogica](#), 2007, 26(4): 340–344.
- [9] 胡欢, 王汝成, 谢磊, 等. 基于大罗兰圆 ($R=140\text{mm}$) 大分光晶体的 SPI 独居石标样化学成分精准测定[J]. [高校地质学报](#), 2021, 27(3): 317–326.
- Hu H, Wang R C, Xie L, et al. High precision analysis of chemical composition of SPI monazite standard on large spectrometer of 140mm Rowland circle[J]. [Geological Journal of China Universities](#), 2021, 27(3): 317–326.
- [10] 张晓峰, 胡晋生, 李明, 等. ZAF 定量碳元素时 K 因子测量的要点解析[J]. [冶金分析](#), 2024, 44(9): 72–76.
- Zhang X F, Hu J S, Li M, et al. Analysis on key points for K factor measurement during quantification of carbon by ZAF[J]. [Metallurgical Analysis](#), 2024, 44(9): 72–76.
- [11] 王娟, 陈意, 毛骞, 等. 金红石微量元素电子探针分析[J]. [岩石学报](#), 2017, 33(6): 1934–1946.
- Wang J, Chen Y, Mao Q, et al. Electron microprobe trace element analysis of rutile[J]. [Acta Petrologica Sinica](#), 2017, 33(6): 1934–1946.
- [12] 李小型. 电子探针微量元素分析的一些思考[J]. [高校地质学报](#), 2021, 27(3): 306–316.
- Li X L. Several perspectives on microprobe trace elements analysis[J]. [Geological Journal of China Universities](#), 2021, 27(3): 306–316.
- [13] 张文兰, 胡欢, 刘鹏, 等. 重稀土-钒-铝硅酸盐矿物电子探针定量分析[J]. [岩矿测试](#), 2022, 41(5): 754–763.
- Zhang W L, Hu H, Liu P, et al. Electron probe quantitative analysis of HREE-V-aluminosilicate minerals[J]. [Rock and Mineral Analysis](#), 2022, 41(5): 754–763.
- [14] Schulz B, Krause J, Dörr W. A protocol for electron probe microanalysis (EPMA) of monazite for chemical Th-U-Pb age dating[J]. [Minerals](#), 2024, 14(8): 817.