

二氧化铀芯块中铀含量及²³⁵U 丰度的比对分析

谢胜凯¹, 谭 靖^{1,*}, 张继龙², 赵瑞瑞³, 李 黎¹,
刘瑞萍¹, 崔 靖³, 崔建勇¹, 郭冬发¹

1. 核工业北京地质研究院, 北京 100029; 2. 国家核安保技术中心, 北京 102401;
3. 中核北方核燃料元件有限公司, 内蒙古 包头 014030

摘要: 在压水堆组件核材料二氧化铀芯块无损分析中, 铀含量和²³⁵U 丰度是两个重要的分析参数, 它能够反映核材料的状态, 而无损分析首先需要相应的标准物质, 因此准确分析铀含量和²³⁵U 丰度非常重要。为了准确测定二氧化铀芯块中铀含量和²³⁵U 丰度, 核工业北京地质研究院组织多家实验室采用电位滴定法测定铀含量, 采用热电离质谱法 (TIMS) 或多接收电感耦合等离子体质谱法 (MC-ICP-MS) 测定²³⁵U 丰度。将获得的数据采用正态检验方法进行评价, 通过统计产品与服务解决方案软件 (SPSS) 在线计算, 铀含量和²³⁵U 丰度的小样本数据统计结果 $p > 0.05$, 没有呈现出显著性, 说明该参数符合正态分布特征。评价了比对结果的不确定度, 其中二氧化铀芯块中铀质量分数平均值为 88.00% ($n=6$), 相对不确定度为 0.057%, ²³⁵U 丰度平均值为 3.2326% ($n=6$), 相对不确定度为 0.062%。通过比对分析得到了由二氧化铀芯块制造的标准压水堆组件中的铀含量及²³⁵U 丰度, 为后续压水堆无损分析方法研究提供了基础数据。

关键词: 二氧化铀; 铀含量; ²³⁵U 丰度; 不确定度评价

中图分类号: TL271.3; TL271.8

文献标志码: A

文章编号: 0253-9950(2024)06-0581-06

doi: 10.7538/hhx.2024.46.06.0581

Comparative Analysis of Uranium Content and ²³⁵U Abundance in Uranium Dioxide Pellets

XIE Sheng-kai¹, TAN Jing^{1,*}, ZHANG Ji-long², ZHAO Rui-rui³, LI Li¹,
LIU Rui-ping¹, CUI Jing³, CUI Jian-yong¹, GUO Dong-fa¹

1. Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China;

2. State Nuclear Security Technology Center, Beijing 102401, China;

3. China North Nuclear Fuel Corporation, Baotou 014030, China

Abstract: Non-destructive analysis (NDA) techniques can be used to ensure that no sensitive nuclear materials (SNM) are being lost or diverted from their defined flows and containments. Rapid measurements of SNM in feed materials, process lines, finished products, scrap and waste, and holdup in the plant are all possible with NDA techniques. With the development of nuclear industry, it has also brought huge challenges to the supervision of nuclear security and nuclear material control. The NDA of pressurized water reactor fuel assemblies is one of the important technologies for nuclear security. The establishment of

收稿日期: 2023-11-21; 修订日期: 2024-05-28

基金项目: 核技术开发项目 (测 H2402)

* 通信联系人: 谭 靖

the NDA for pressurized water reactor requires the possession of corresponding nuclear material standard materials. Therefore, it is necessary to analyze the uranium content and ^{235}U abundance accurately in the uranium dioxide pellets of standard pressurized water reactor components. China North Nuclear Fuel Corporation prepared comparison samples and conducted a uniformity test on the samples. Through F test analysis, it was deemed that the samples had good homogeneity. Beijing Research Institute of Uranium Geology(BRIUG) organizes several laboratories to determine the content of uranium in uranium dioxide by potentiometric titration, and the abundance of ^{235}U by TIMS or MC-ICP-MS methods. The samples are sent to different laboratories. Six laboratories conducted comparative analysis of uranium content and ^{235}U abundance. After summarizing and comparing the results, through online SPSS calculations, the small sample data of uranium content and ^{235}U abundance shows a p -value greater than 0.05, indicating no significant difference. This indicates that the parameter conforms to the normal distribution characteristics. The uncertainty of the comparison data results was evaluated, the uncertainty of sample measurement results refers to ISO guide 35 2017 reference materials: guidance for characterization and assessment of homogeneity and stability, which is mainly composed of three parts: stability uncertainty, homogeneity uncertainty and characterization uncertainty. The uranium content and abundance of ^{235}U in the sample have good homogeneity, and its properties will not change with time. Moreover, the uncertainty caused by the inhomogeneity of the sample has been reflected in the comparison analysis, so in this calculation, the uncertainty components arising from sample inhomogeneities and instabilities are not considered. The average value of uranium mass fraction is 88.00%($n=6$), the relative uncertainty is 0.057%, and the measured average value of ^{235}U abundance is 3.2326%($n=6$), the relative uncertainty is 0.062%. The uranium content and ^{235}U abundance in standard pressurized water reactor components made of uranium dioxide pellets were obtained through comparative analysis, providing base data for subsequent research on non-destructive analysis methods for pressurized water reactors.

Key words: uranium dioxide; uranium content; ^{235}U abundance; uncertainty evaluation

根据国际原子能机构发布的《世界核电反应堆(2023年版)》报告,截止到2022年12月31日,在世界上32个国家和目前正在运行的411台核电机组中,压水堆核电站为301台,占比73.2%,是目前我国和世界上其他国家使用最广泛的核反应堆堆型。随着我国核工业的发展,我国的核燃料组件生产规模、制造工艺和产品质量均已逐渐达到国际前列,这也对核安政府监管和核材料管制工作带来了巨大的挑战。在压水堆最终的燃料组件成品验证过程中,需要确保所用燃料参数符合反应堆装换料要求的设计规定,如燃料富集度参数和铀含量,要同时能够对潜在的组件燃料“作假”等行为做出及时探测,这都需要在保持燃料组件整体结构完整的情况下开展压水堆组件的无损分析(NDA)^[1],因此NDA也是核安保的重要技术之一,而标准压水堆组件样品是成功应用NDA技术的关键。标准压水堆组件中核材料为二氧化铀芯块,因此有必要对二氧化铀芯块

中的关键参数进行准确分析,其中包括铀含量和 ^{235}U 丰度等。

铀含量分析主要分为放射分析法和化学分析法。其中放射分析铀含量的方法^[2-3]主要有 α 能谱法、 γ 能谱法和中子活化法等。化学分析铀含量的方法主要包括激光荧光法^[4]、X射线荧光光谱法(XRF)^[5]、电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)^[6]和电位滴定法^[7]等。样品中较高铀含量的测定主要采用电位滴定法和XRF法,目前各实验室一般采用电位滴定法准确测量铀含量。柳金良等^[5]报道了铈内标法在溶液法制样-X射线荧光光谱法测定八氧化三铀中铀含量的可行性研究。铀同位素丰度的分析方法主要包括能谱法^[8]、热电离质谱法(TIMs)^[9-10]、多接收电感耦合等离子体质谱法(MC-ICP-MS)^[11-12]和二次离子质谱法(SIMS)^[13]等。

本工作拟通过组织多家实验室对二氧化铀芯块中的铀含量和 ^{235}U 丰度进行比对分析,采用正

态检验和不确定度对结果进行评价, 获得的结果可为标准压水堆核燃料组件提供准确的数据参考, 为核安保 NDA 分析技术提供支撑。

1 样品的准备及比对方法

1.1 样品的制备

压水堆燃料组件的原料由二氧化铀芯块组成, 二氧化铀芯块可以制备成二氧化铀粉末样品。本次比对由核工业北京地质研究院分析测试中心组织实施, 样品选用²³⁵U 丰度为 3.25% 左右的二氧化铀芯块, 制备成粉末样品后发往不同实验室。对二氧化铀芯块进行研磨, 研磨过程需防止与其它样品沾污, 保证研磨捣罐的清洁度符合要求。将研磨后的粉末样品均分成 12 份, 每份至少 20 g, 并进行编号、装瓶, 从中取 6 份样品作均匀性检测, 每个样品测量 3 次。对于测定结果的判断参考 JJF 1343-2022^[14] 采用单因素方差分析 (F 检验法), 此法是通过组间方差和 (Q_1)、组内方差和 (Q_2) 的比较来判断各组测量值之间有无系统误差, 如果二者的比小于统计检验的临界值 (即 $F < F_{0.05}$ 临界值) 则认为样品是均匀的。均匀性检测结果列入表 1, F 检验值均小于 $F_{0.05}(5, 12) = 4.68$, 说明样品中铀含量和²³⁵U 丰度均匀分布。

表 1 样品均匀性测量结果

Table 1 Determination results of sample uniformity

	平均值	Q_1	Q_2	F	$s_r/\%$
w(U)	88.05%	0.0085	0.0104	1.95	0.038
²³⁵ U 丰度	3.2623%	0.0001	0.0002	1.48	0.112

注: s_r 为均匀性检测结果的相对标准偏差, $n=6$

1.2 铀含量的分析方法

铀含量由国家核安保技术中心、中核北方核燃料元件有限公司、核工业北京地质研究院、中国原子能科学研究院、核工业北京化工冶金研究院和核工业二四〇研究所等单位采用电位滴定法测量。电位滴定法测量铀含量的基本原理为: 在浓磷酸溶液中用过量的硫酸亚铁将铀(VI)还原成铀(IV), 以钼(VI)作催化剂, 用硝酸氧化过量的亚铁离子, 氨基磺酸除去氧化过程中生成的氮氧化物, 用重铬酸钾氧化滴定到电位终点来测定铀(IV), 硫酸钒的存在可以加速重铬酸钾与铀(IV)的反应^[15]。与此法类似, 其它相关铀产品中滴定铀含

量的方法主要有二氧化铀粉末和芯块中铀的测定^[16], 铀产品中铀含量的测定, 铁(II)还原/重铬酸钾氧化滴定法等^[17-19]。王岚等^[20]采用 Davies-Gray 电位滴定原理对传统电位滴定法进行了改进, 在滴定过程中可弥补传统电位滴定的不足, 样品的使用量只需 25~50 mg, 滴定只需一种浓度的重铬酸钾溶液, 滴定过程全部以称重计算; 温度控制要求不高, 在室温 23~31℃ 即可顺利完成滴定。由于样品使用量为毫克级, 对重铬酸钾的用量也较小; 且无需使用全自动电位滴定仪, 其重复性相对标准偏差可小于 0.1% ($n=12$)。

1.3 ²³⁵U 同位素丰度的测定方法

²³⁵U 同位素丰度由国家核安保技术中心、中核北方核燃料元件有限公司、核工业北京地质研究院、中国原子能科学研究院、中国计量科学研究院等单位测量。针对铀同位素丰度的精确测量, 目前主要方法为 TIMS 或 MC-ICP-MS。上述方法需要先将样品进行分离纯化, 首先称取 50.0 mg 左右二氧化铀粉末样品于含有几滴去离子水的聚四氟乙烯溶样罐中, 加入 2 mL 的亚沸蒸馏硝酸, 加热蒸至近干后, 再用 0.5 mL 5 mol/L HNO₃ 溶解, 用移液器提取样品溶液约 0.3 mL, 加入萃淋树脂分离柱。用 7 mL 5 mol/L HNO₃ 淋洗杂质, 在分离柱中加入超纯水后, 分离柱中磷酸三丁酯萃淋树脂的酸度降低, 硝酸铀酰被水解, 中性配位化合物被破坏, 树脂上吸附的铀被洗脱下来, 该过程可少量多次加入超纯水, 定量回收解析液。

TIMS 测量铀同位素采用双带灯丝结构, 样品装载在其中一个铯带上作为蒸发带, 另一个铯带作电离带。双带之间的距离约为 1 mm, 灯丝电流均为独立控制。采用 MC-ICP-MS 测量铀同位素丰度时, 由于法拉第杯和电子倍增器的工作原理不一致, 需要对各个检测器进行增益校正, 同时需要优化仪器参数并调整好峰位置。测量过程中采用标准物质对测量结果进行校准。

2 二氧化铀芯块比对结果及讨论

2.1 二氧化铀芯块中铀含量和²³⁵U 丰度结果

不同实验室测量的铀含量和²³⁵U 丰度结果列入表 2、3。由表 2 可知: 铀质量分数 ($w(U)$) 在 87.94%~88.07%, 6 家实验室结果的平均值为 88.00%, 精密度范围为 0.009%~0.060%。采用 TIMS 或 MC-ICP-MS 分析²³⁵U 丰度, ²³⁵U 丰度一般

表2 铀含量滴定结果

Table 2 Titration results of uranium content

No.	铀质量分数/%						平均值	精密度/%
	1	2	3	4	5	6		
S1	88.04	88.02	88.05	88.01	88.04	88.01	88.03	0.020
S2	87.91	87.94	87.95	87.95	87.95	87.96	87.94	0.019
S3	87.96	88.00	87.99	87.93	87.91	87.94	87.96	0.040
S4	87.99	88.05	88.05	87.94	88.00	88.09	88.02	0.060
S5	87.97	87.97	87.96	87.98	87.98	87.97	87.97	0.009
S6	88.08	88.08	88.07	88.08	88.06	88.06	88.07	0.011

表3 ^{235}U 丰度测量结果Table 3 Determination results of ^{235}U abundance

No.	^{235}U 丰度/%						平均值	精密度/%
	1	2	3	4	5	6		
S-1	3.2329	3.2340	3.2325	3.2334	3.2333	3.2327	3.2331	0.017
S-2	3.2330	3.2312	3.2351	3.2336	3.2348	3.2346	3.2337	0.045
S-3	3.2322	3.2328	3.2316	3.2319	3.2325	3.2322	3.2322	0.013
S-4	3.2290	3.2277	3.2317	3.2279	3.2301	3.2265	3.2288	0.058
S-5	3.2355	3.2340	3.2343	3.2349	3.2329	3.2335	3.2342	0.029
S-6	3.2355	3.2318	3.2319	3.2326	3.2361	3.2350	3.2338	0.060

指核燃料中 ^{235}U 的质量分数,质谱测量获得的是 ^{235}U 和 ^{238}U 原子比,因此质谱仪的测量结果需要转换计算后才能得到 ^{235}U 丰度。由表3可知: ^{235}U 丰度范围为3.228%~3.2342%,6家实验室结果的平均值为3.2326%,精密度范围为0.013%~0.060%。

2.2 数据的正态检验

二氧化铀粉末样品比对单位为6家,测试数据量少,选用夏皮罗-威尔克(Shapiro-Wilk)法进行检验。将测试数据按由小到大的顺序排列,计算统计量(式(1))。

$$W = \left\{ \sum_{K=1}^n a_K [x_{n+1-K} - x_K] \right\}^2 / \sum_{K=1}^n (x_K - \bar{x})^2 \quad (1)$$

式中: W 为夏皮罗-威尔克检验的统计量; K 的取值,对于测量次数 n 是偶数时则为 $1 \sim n/2$,对于测量次数是奇数时则为 $(n-1)/2$; a_K 是与 n 及 K 有关的列表值; x 为变量。该统计量的判据是:当 $W > W(n, p)$ 时(p 为与分布的 p 分位数相联系的概率),则接受测定数据为正态分布,置信概率取95%;当 W 值介于置信概率95%和99%的列表值之间时,视为近似正态分布; W 值大于置信概率99%的列表值时视为偏态分布。

数据通过统计产品与服务解决方案软件(SPSS)进行在线计算分析。

正态检验研究定量数据分析是否具有正态分布特质:第一,判断统计值是否呈现出显著性($p < 0.05$ 或 0.01);第二,如果呈现出显著性,则说明该项不具有正态分布特质,如果需要对比不同组别数据差异性,可考虑使用非参数检验;第三,如果没有呈现出显著性($p > 0.05$),说明该项具有正态分布特质;第四,正态检验要求严格很难满足,如果峰度绝对值小于10并且偏度绝对值小于3,则说明数据虽然不是绝对正态,但基本可接受为正态分布。所有测试数据组均满足正态检验的要求,数据组呈正态分布,正态分布的统计数据列入表4和表5。从表4、5可以看出,各组样品的铀含量和 ^{235}U 丰度全部具备正态分布特质。

2.3 比对数据结果及不确定度

在进行数据评价时,当数据集为正态分布或近似正态分布时,以算术平均值为最佳估计值;当数据集属偏态分布时,以中位值为最佳估计值。二氧化铀粉末样品的铀含量和 ^{235}U 丰度测试数据均属于正态分布,因此,以算术平均值作为最佳估计值。

不确定度是测量结果的基本组成部分,是样品量值的置信区间,二氧化铀粉末样品的测量结

表4 铀含量的正态检验分析结果

Table 4 Results of normality test for uranium content

No.	w(U)/%	标准差	偏度	峰度	Shapiro-Wilk检验	
					统计量W值	p
S1	88.03	0.02	0.026	-2.367	0.869	0.223
S2	87.94	0.02	-1.188	1.713	0.921	0.513
S3	87.96	0.04	0.167	-1.557	0.951	0.748
S4	88.02	0.05	-0.377	-0.684	0.945	0.696
S5	87.97	0.01	-0.313	-0.104	0.866	0.212
S6	88.07	0.01	-0.827	-0.932	0.897	0.356
	(88.00)	(0.05)	(0.373)	(-1.358)	0.940	0.655

注: n=6; 括号内数据为平均值

表5 ²³⁵U丰度的正态检验分析结果

Table 5 Results of normality test for abundance of ²³⁵U

No.	²³⁵ U丰度 平均值/%	标准差	偏度	峰度	Shapiro-Wilk检验	
					统计量W值	p
S-1	3.233 1	0.002 4	-0.740	0.687	0.897	0.359
S-2	3.233 7	0.002 4	-1.297	1.800	0.873	0.240
S-3	3.232 2	0.001 5	0.916	-1.246	0.831	0.109
S-4	3.228 8	0.002 4	-1.516	2.916	0.872	0.234
S-5	3.234 2	0.002 1	-0.240	0.466	0.975	0.924
S-6	3.233 8	0.003 1	-1.811	3.683	0.808	0.069
	(3.232 6)	(0.002 0)	(-1.855)	(3.549)	0.788	0.051

注: n=6; 括号内数据为平均值

果可以作为压水堆标准组件的参考值, 在NDA分析中作标准物质。对不确定度进行适度的计算是标准物质研制的重要环节, 对其应用十分重要。样品测量结果的不确定度主要由于其稳定性不确定度、均匀性不确定度和定值不确定度(标准不确定度)三部分构成, 这三部分不确定度的合成不确定度为标准物质的总不确定度^[21-23]。样品铀含量和丰度的均匀性良好, 其性质不会随着时间变化而变化, 并且由于样品的不均匀性引起的不确定度在比对分析中已有所体现, 因此此次计算中未考虑样品不均匀性和不稳定性产生的不确定度分量。

二氧化铀粉末样品由多个实验室使用不同方法协同进行分析。测量值经正态分布检验分析, 表明各组数据均呈正态分布。因此, 以算术平均值作为最佳估计值, 由式(2)、(3)计算扩展不确定度(U)。不确定度的修约采用只进不舍的方法。二氧化铀芯块粉末样品的不确定度计算结果列入表6。

$$u_d = s / \sqrt{N} \quad (2)$$

$$U = k \times u_c, \quad u_c \approx u_d \quad (3)$$

其中: u_d 为定值的标准不确定度; u_c 为合成不确定度; U 为扩展不确定度; 包含因子 k 为 $t_{0.05(v)}$ 对应的置信水平, $k=2$; s 为标准偏差; N 为样本数。

表6 二氧化铀芯块粉末铀含量和²³⁵U丰度的不确定度

Table 6 Uncertainty of uranium content and ²³⁵U abundance in uranium dioxide pellet powder

	平均值	标准偏差	u_d	u_c	U	相对不确定度
w(U)	88.00%	0.05%	0.021%	0.021%	0.05%	0.057%
²³⁵ U丰度	3.2326%	0.002 0%	0.0008%	0.0008%	0.002%	0.062%

注: n=6, k=2

3 结论

为了对标准压水堆组件的原料二氧化铀芯块中铀含量和²³⁵U丰度进行准确的分析, 通过将二氧化铀芯块破碎后制备了二氧化铀粉末样品(样品的均匀性和稳定性良好), 分发至多家实验室进行比对分析。实验室采用电位滴定法分析铀含量, 采用TIMS与MC-ICP-MS分析²³⁵U丰度。

通过对多家实验室比对结果进行统计, 铀质量分数在87.94%~88.07%, 6家实验室的铀质量分数平均值为88.00%, 精密度为0.009%~0.060%。²³⁵U丰度为3.2288%~3.2342%, 6家实验室结果的平均值为3.2326%, 精密度为0.013%~0.060%。

对比对结果进行了正态检验, 所有数据符合正态分布, 对结果进行了不确定度评价, 铀质量分数平均值为88.00%(n=6), 相对不确定度为0.057%。²³⁵U丰度的平均值为3.2326%(n=6), 相对不确定度为0.062%。

比对结果可作为标准压水堆组件二氧化铀芯块中铀含量和²³⁵U芯块的参考值, 为NDA分析压水堆标准组件提供基础数据, 也可为核安保提供技术支持。

参考文献:

[1] 王兴尧.NDA核标准样品研制中质量控制的一些关键技术研究[D].北京:中国原子能科学研究院,2001.

- [2] 武宝利,战景明,杨凯,等.铀的分析方法研究进展[J].冶金分析,2021,41(1):47-54.
- [3] 赵刚,丁丁,黄艳,等.电位滴定-中子活化法联合测定铀钼合金中铀[J].化学分析计量,2021,30(5):42-45.
- [4] 黄聪,董传江,王力,等.激光荧光法测定土壤中铀的不确定度评定[J].铀矿地质,2020,36(1):52-58,72.
- [5] 柳金良,宋茂生,张鑫,等.镱内标法在溶液法制样-X射线荧光光谱法测定天然铀产品(U_3O_8)中铀的可行性研究[J].理化检验-化学分册,2021,57(9):824-829.
- [6] 郭冬发,刘瑞萍,曾远,等.磁式电感耦合等离子体质谱仪及其在核地质分析中的典型应用[J].质谱学报,2021,42(5):585-597.
- [7] 吴青龙,卞敏,李英秋,等.电位滴定法测定基准 U_3O_8 中铀的不确定度评定[J].核化学与放射化学,2015,37(2):84-88.
- [8] 杜旭红,游国强,郑建国,等. γ 能谱法测量核材料铀富集度应用研究[J].核电子学与探测技术,2021,41(1):6-11.
- [9] 徐常昆,陈彦,李力力.真空渗碳铼带用于痕量铀同位素比的测量[J].质谱学报,2019,40(5):460-466.
- [10] 张继龙,黎春,王岚,等.热电离质谱法测定国际比对氧化铀芯块中的铀同位素比值[J].铀矿地质,2019,35(1):38-43.
- [11] 金曼谷,焦亚诺,刘玥,等.MC-ICP-MS 铀同位素的高精度法拉第杯静态分析[J].科学通报,2022,67(22):2651-2661.
- [12] Murugan R, Veerasamy N, Zhao Y, et al. Precise measurement of uranium isotope ratios in Fukushima soils using multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry(MC-ICP-MS)[J]. *Int J Mass Spectrom*, 2021, 467: 116623.
- [13] 胡睿轩,沈彦,李力力,等.毛发中铀的二次离子质谱分析研究[J].同位素,2021,34(1):30-37.
- [14] 国家市场监督管理总局.JJF 1343—2022 标准物质的定值及均匀性、稳定性评估[S].北京:中国标准出版社,2022.
- [15] EJ/T 277—1986 高纯八氧化三铀中铀的精密测定硫酸亚铁还原/重铬酸钾电位滴定法[S].北京:中华人民共和国核工业部,1986.
- [16] 国家技术监督局.GB/T 11841-1989 二氧化铀粉末和芯块中铀的测定 硫酸亚铁还原-重铬酸钾氧化滴定法[S].北京:中国标准出版社,1989.
- [17] 国家国防科技工业局.EJ/T 1235—2008 铀产品中铀含量的测定铁(II)还原/重铬酸钾氧化滴定法[S].北京:中国标准出版社,2008.
- [18] 国家国防科技工业局.EJ/T 20164—2018 后处理三氧化铀粉末中铀含量测定 自动电位滴定法[S].北京:中国标准出版社,2018.
- [19] American Society for Testing and Materials(ASTM). ASTM C1267-17 Standard test method for uranium by iron(II) reduction in phosphoric acid followed by chromium(VI) titration in the presence of vanadium[S]. USA: American Society for Testing and Materials, 2017.
- [20] 王岚,黎春,张继龙,等.基于 Davies-Gray 电位滴定法精密测定 25~50 mg 铀含量[J].核化学与放射化学,2019,41(6):573-577.
- [21] 田川,黎春,王岚,等.氧化还原电位滴定法测量铀含量的不确定度评定[J].核化学与放射化学,2023,45(4):332-340.
- [22] 刘妹.中国地质标准物质研制进展[J].岩矿测试,2023,42(3):445-463.
- [23] 袁建,王亚平,许春雪,等.地下水中神形态标准物质研制[J].岩矿测试,2012,31(2):331-337.