

· 方法与应用 ·

氧化钕中杂质氧化镍含量的测定及测量结果的不确定度分析

朱小龙

(宁波市计量测试研究院, 浙江 宁波 315048)

摘要: 采用电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-OES)法测定氧化钕中杂质氧化镍的含量,得到氧化镍含量为0.0027%,分析了检测过程中的各个影响因素,并对测量结果的可靠性以相对扩展不确定度表示($U_{rel} = 12%$, $k=2$)。相对不确定度分量计算结果表明,标准曲线拟合时引入的相对不确定度分量最大, $u_{rel}(c_2) = 5.639%$,其次为标准溶液配制过程中引入的相对不确定度分量 $u_{rel}(c_1) = 0.879%$ 。本文可为相关检测人员的结果不确定度分析提供参考。

关键词: 氧化钕; 氧化镍; 电感耦合等离子体发射光谱法; 不确定度

中图分类号: P574.2; O657.31

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2022)03-0668-05

Determination of nickel oxide content in neodymium oxide and its uncertainty analysis

ZHU Xiao-long

(Ningbo Institute of Measurement and Testing, Ningbo 315048, China)

Abstract: The content of nickel oxide in neodymium oxide was determined by ICP-OES method. The content of nickel oxide was 0.0027%. Various influencing factors in the detection process were analyzed. The reliability of the measurement results was expressed by relative expansion uncertainty ($U_{rel} = 12%$, $k=2$). The calculation of relative uncertainty component shows that the relative uncertainty component introduced by standard curve fitting is the largest, $u_{rel}(c_2) = 5.639%$, followed by the relative uncertainty component introduced by the preparation of standard solution, $u_{rel}(c_1) = 0.879%$. This paper can provide a reference of the result uncertainty analysis for relevant testing personnel.

Key words: neodymium oxide; nickel oxide; ICP-OES; uncertainty

烧结钕铁硼是目前世界上磁性最强的稀土永磁材料,作为稀土元素之一的钕是其中的主要成分之一。稀土矿产是我国重要的战略资源,原材料的成分配方不仅决定了其成本,也决定了最终钕铁硼产品的各项性能,因此保证原料纯度、检测其杂质含量显得尤为重要。电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-OES)是一种常见的检测方法(杨平等,

2020),但传统化学检测实验室在报告中一般只给出样品的检测结果,很少给出其结果的不确定度大小,而中国合格评定国家认可委员会(CNAS)能力认可准则明确要求化学检测领域相关人员需对结果进行不确定度评定(中国合格评定国家认可委员会,2021)。近年来,叶晓明(2012)研究了可靠性评价的各种流派和方法,翟洪稳等(2021)总结了不确定

收稿日期: 2021-07-26; 接受日期: 2022-03-10; 编辑: 郝艳丽

作者简介: 朱小龙(1988-),男,硕士,高级工程师,从事稀土磁材成分分析工作, E-mail: 3060901154@163.com。

度评定在食品领域的应用,雷晶等(2020)分析了环境监测分析方法标准中4种元素的不确定度分析及应用,更有专业人员以各自涉及的不同仪器和不同检测方法对具体项目进行了不确定度的分析和评定(康菁等,2020;唐平等,2021;张丽萍等,2021;刘芳美等,2021;李津等,2021),臧慕文等(2012)详细研究了成分分析中的数理统计及不确定度评定。另外,国家有关部门也出台了测量不确定度评定与表示的相关规范(叶德培等,2013)。本文以稀土氧化物氧化钆中氧化镍含量的检测为例,首先用ICP-OES法进行相关检测获得含量结果,其次对整个过程中的影响因素进行相对不确定度分量计量,最终合成相对扩展不确定度,希望对稀土检测行业的发展提供理论参考。

1 方法原理

氧化钆作为重要的稀土原材料,其纯度决定了其价值。实验室普遍依据GB/T 12690.5《稀土金属及其氧化物中非稀土杂质化学分析方法 第5部分:钴、锰、铅、镍、铜、锌、铝、铬、镁、镉、钒、铁量的测定》、采用ICP-OES法测定氧化钆中杂质含量,以高纯氧化钆为基体配制系列标准溶液,以基体匹配法校正基体对测定的影响,试样以硝酸溶解,在稀硝酸介质中,直接以氩等离子体光源激发进行光谱测定,最终测得氧化钆中氧化镍杂质的含量,并通过计算各影响因素的不确定度分量,合成最终相对扩展不确定度。

2 检测方法

2.1 试剂和仪器

试剂有超纯水(一级水,电阻率 $18.2\text{ M}\Omega\cdot\text{cm}$, 25°C)、氩气(林德气体,纯度 $>99.999\%$)、硝酸(国药集团,优级纯)、高纯氧化钆(江阴加华, 99.999%)和镍标准溶液(钢铁研究总院, $1\ 000\text{ mg/L}$),仪器有容量瓶(申玻)、移液枪(赛默飞)、ME104电子天平(梅特勒托利多)、ULTIMA2电感耦合等离子体发射光谱仪(日本HORIBA)。

2.2 仪器工作条件

电感耦合等离子体发射光谱仪工作功率为 $1\ 000\text{ W}$,雾化气流量 0.90 L/min ,等离子气流量 12.4 L/min ,护套气流量 0.2 L/min ,护套气压强

0.28 MPa ,辅助气流量 0 L/min ,元素镍(Ni)的分析波长 232.504 nm 。

2.3 试料

将 99.999% 的高纯氧化钆于 950°C 灼烧 1 h ,置于干燥器中,冷却至室温。称取 $10.000\ 0\text{ g}$ 样品,精确至 $0.000\ 1\text{ g}$,置于 500 mL 烧杯中,加 50 mL 硝酸(1+1),低温加热至溶解完全,冷却至室温,移入 100 mL 容量瓶中用水稀释至刻度并混匀,制得 100 mg/mL 的氧化钆基体溶液。

将氧化钆试样于 105°C 烘干 1 h ,置于干燥器中,冷却至室温,立即称取 1.0 g 氧化钆试样,精确至 $0.000\ 1\text{ g}$ 。用 10 mL 硝酸(1+1)低温加热至溶解完全,冷却后,用水定容至 100 mL 并混匀,制得氧化钆待测样品消解液。

2.4 标准溶液的配制

将氧化钆基体溶液和镍标准溶液按表1分别移入6个 100 mL 容量瓶中,并加入 10 mL 硝酸(1+1),以水稀释至刻度并混匀,制得6瓶标准溶液。

表1 标准溶液配制表 $c/(\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1})$

Table 1 The preparation of standard solution

标液标号	氧化钆	镍
1	10 000	0.00
2	10 000	0.10
3	10 000	0.20
4	10 000	0.50
5	10 000	1.00
6	10 000	1.50

依次进样6瓶标准溶液,仪器自动拟合一条以信号响应强度为纵坐标、标准溶液镍含量为横坐标的标准工作曲线。

3 测量结果及其不确定度分析

将 1 g 待测氧化钆样品的消解液进行光谱分析,根据标准工作曲线上的信号强度(I)可得溶液中的镍含量(c),通过换算可得样品中氧化镍的质量分数(w)为 $0.002\ 7\%$ 。测量结果的不确定度分析与评价如下。

3.1 测量模型

氧化钆试样中杂质氧化镍含量的质量分数按下式计算:

$$w = 10^{-6} cV/km \times 100\% \quad (1)$$

式中, w 为氧化镍质量分数(%), c 为试样消解液浓度($\mu\text{g}/\text{mL}$), m 为试样质量(g), V 为试样定容体积(mL), k 为单质与氧化物换算系数(0.785 8)。

3.2 不确定度来源

通过分析检测过程, 其结果的测量不确定度来自测量结果重复性的相对不确定度、标准溶液配制过程中产生的相对不确定度、标准曲线拟合产生的相对不确定度、定容时产生的相对不确定度、试样称量时产生的相对不确定度和单质与氧化物换算系数 k 引入的相对不确定度这 6 个方面。

3.3 测量结果重复性的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(w)$

由电感耦合等离子体发射光谱仪重复测量 10 次待测样品的消解液, 氧化镍含量的测试结果为 0.002 69%、0.002 72%、0.002 74%、0.002 68%、0.002 73%、0.002 67%、0.002 72%、0.002 71%、0.002 70%、0.002 69%, 平均值为 0.002 7%, 10 次测量的标准偏差(S)为 2.27×10^{-7} 。

实际测量时, 在重复性条件下连续测量 3 次, 以该 3 次测量算术平均值为测量结果, $n=3$, 其相对不确定度为:

$$u_{\text{rel}}(w) = (S/\sqrt{n})/w = 0.485\% \quad (2)$$

3.4 标准溶液配制过程中的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(c_1)$

3.4.1 标准溶液的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(c_{11})$

标准溶液的相对不确定度是电感耦合等离子体发射光谱仪的误差来源之一, 直接影响测量结果的准确度。标准溶液的不确定度通常由标准溶液证书给出, 钢铁研究总院标准溶液证书上给出的标准值为 $1\ 000\ \mu\text{g}/\text{mL}$, 扩展不确定度为 $U=4\ \mu\text{g}/\text{mL}$, 包含因子 $k=2$, 所以其相对不确定度为:

$$u_{\text{rel}}(c_{11}) = 4/(2 \times 1\ 000) \times 100\% = 0.2\% \quad (3)$$

3.4.2 标准储备液配制的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(c_{12})$

使用 1 mL 的移液枪($V=0.002\ \text{mL}$, $k=2$) 移取 1.0 mL 的标准溶液于 100 mL 的容量瓶($V=0.04\ \text{mL}$, $k=2$) 中, 用超纯水定容至刻度, 得到 $10\ \mu\text{g}/\text{mL}$ 的标准溶液, 其相对不确定度为:

$$u_{\text{rel}}(c_{12}) = \sqrt{[0.002/(2 \times 1.0)]^2 + [0.04/(2 \times 100)]^2} \times 100\% = 0.102\% \quad (4)$$

3.4.3 标准工作溶液稀释配制的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(c_{13})$

使用 5 mL 的移液枪($V=0.017\ \text{mL}$, $k=2$) 分别移取 1.0、2.0、5.0、10 和 15 mL 的 $10\ \mu\text{g}/\text{mL}$ 的标准溶液于 100 mL 的容量瓶($V=0.04\ \text{mL}$, $k=2$) 中, 配

合基体溶液, 用超纯水定容至刻度, 得到浓度为 0.1、0.2、0.5、1.0 和 1.5 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的标准溶液, 其相对不确定度分别为:

$$u_{\text{rel}}(0.1\ \mu\text{g}/\text{mL}) = \{ [0.017/(2 \times 1.0)]^2 + [0.04/(2 \times 100)]^2 \}^{0.5} \times 100\% = 0.85\%$$

$$u_{\text{rel}}(0.2\ \mu\text{g}/\text{mL}) = \{ [0.017/(2 \times 2.0)]^2 + [0.04/(2 \times 100)]^2 \}^{0.5} \times 100\% = 0.43\%$$

$$u_{\text{rel}}(0.5\ \mu\text{g}/\text{mL}) = \{ [0.017/(2 \times 5.0)]^2 + [0.04/(2 \times 100)]^2 \}^{0.5} \times 100\% = 0.17\%$$

$$u_{\text{rel}}(1.0\ \mu\text{g}/\text{mL}) = \{ [2 \times [0.017/(2 \times 5.0)]^2 + [0.04/(2 \times 100)]^2 \}^{0.5} \times 100\% = 0.24\%$$

$$u_{\text{rel}}(1.5\ \mu\text{g}/\text{mL}) = \{ [3 \times [0.017/(2 \times 5.0)]^2 + [0.04/(2 \times 100)]^2 \}^{0.5} \times 100\% = 0.30\% \quad (5)$$

通过计算可知相对不确定度较大的为 0.1 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的标准溶液, 取其值 $u_{\text{rel}}(c_{13})$ 为 0.85%。

3.4.4 标准溶液配制过程中的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(c_1)$

标准溶液配制过程中引入的相对不确定度为:

$$u_{\text{rel}}(c_1) = \sqrt{u_{\text{rel}}(c_{11})^2 + u_{\text{rel}}(c_{12})^2 + u_{\text{rel}}(c_{13})^2} = 0.879\% \quad (6)$$

3.5 标准曲线拟合的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(c_2)$

以 6 瓶系列标准溶液依次进样, 每瓶溶液取 3 次有效数据, 测定得到相应光谱强度, 结果如表 2 所示。

表 2 标准溶液浓度与光谱强度

Table 2 Concentration of standard solution and its spectral intensity

标液浓度 $c_i/(\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1})$	光谱强度 I_i/cps			平均值/ cps
	1 次	2 次	3 次	
0.0	10 653.45	10 964.38	11 024.27	10 880.70
0.1	32 583.72	33 469.48	31 286.57	32 446.59
0.2	55 256.33	53 453.62	56 334.61	55 014.85
0.5	120 346.34	126 522.27	124 315.23	123 727.95
1.0	227 658.24	235 425.46	246 524.83	236 536.18
1.5	355 324.64	334 253.28	345 268.29	344 948.74

根据以上数据, 以最小二乘法拟合直线方程: $I = 223\ 697.77\ c + 108\ 92.06$, 得到 $a = 108\ 92.06$, $b = 223\ 697.77$, $R^2 = 0.999\ 91$ 。由标准溶液线性拟合引入的相对不确定度计算如下:

$$u_{\text{rel}}(c_2) = S_R/b \sqrt{1/P + 1/n + (c-\bar{c})^2 / \sum_{i=1}^n (c_i - \bar{c})^2} / c \times 100\% \quad (7)$$

$$S_R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [I_i - (a + bc_i)]^2}{(n-2)}} \quad (8)$$

式中, n 为标准曲线的溶液测量次数, $n=6 \times 3=18$; I_i 为实测光谱强度值; c_i 为 6 个标准溶液的浓度值; P 为待测样品测量次数 3; c 为待测样品实测溶液浓度 ($0.268 \mu\text{g}/\text{mL}$); \bar{c} 为标准曲线溶液平均浓度 ($0.550 \mu\text{g}/\text{mL}$); S_R 为工作曲线的标准偏差。

把前面的相应数据代入公式计算可得: $S_R = 5.317.29$, $u_{\text{rel}}(c_2) = 5.639\%$ 。

3.6 定容时产生的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(V)$

参考 JJG196《常用玻璃量器检定规程》(杜书利等, 2007)可知, A 级 100 mL 容量瓶的最大允许误差为 $\Delta = \pm 0.10 \text{ mL}$, 符合三角分布, $k = \sqrt{6}$, 其允许误差引起的不确定度为:

$$u(V_1) = 0.10 \text{ mL} / \sqrt{6} = 0.04 \text{ mL} \quad (9)$$

根据检定规程要求, 检定或校准容量瓶是在 20°C 条件下进行的, 而实际实验操作条件为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$, 水的膨胀系数为 $2.1 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$, 因此产生的体积变化为 $\Delta V = \pm (100 \times 2 \times 2.1 \times 10^{-4}) \text{ mL} = \pm 0.042 \text{ mL}$, 符合均匀分布, $k = \sqrt{3}$, 其不确定度为:

$$u(V_2) = 0.042 \text{ mL} / \sqrt{3} = 0.025 \text{ mL} \quad (10)$$

所以定容时产生的相对不确定度为:

$$u_{\text{rel}}(V) = \sqrt{u(V_1)^2 + u(V_2)^2} / 100 = \sqrt{0.04^2 + 0.025^2} / 100 = 0.047\% \quad (11)$$

3.7 试样称量时的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(m)$

用万分之一的电子天平称量样品, 称样量为 1.0 g , 天平的检定不确定度为 0.2 mg , 变动性小于 0.2 mg , 包含因子 $k=2$, 所以:

$$u_{\text{rel}}(m) = \sqrt{(0.2/2)^2 + 0.2^2} / 1000 = 0.22 / 1000 \approx 0.022\% \quad (12)$$

3.8 单质与氧化物换算系数 k 引入的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(k)$

镍的相对原子质量为 $58.6934(2)$, 氧的相对原子质量为 $15.9994(3)$ 。

$$u(\text{NiO}) = \sqrt{u(\text{Ni})^2 + u(\text{O})^2} = 0.00036 \quad (13)$$

$$u_{\text{rel}}(k) = \sqrt{u_{\text{rel}}(\text{Ni})^2 + u_{\text{rel}}(\text{NiO})^2} = \sqrt{(0.0002/58.6934)^2 + (0.00036/74.6928)^2} = 5.9 \times 10^{-7} \quad (14)$$

换算系数 k 引入的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(k)$ 很小, 可忽略不计。

3.9 确定度的合成

综合以上所有不确定度的影响因素, 各影响分

量结果分别为: 测量结果重复性的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(w) = 0.485\%$, 标准溶液配制过程中的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(c_1) = 0.879\%$, 标准曲线拟合的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(c_2) = 5.639\%$, 定容时的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(V) = 0.047\%$, 试样称量时的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(m) = 0.022\%$, 换算系数 k 的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(k)$ 忽略不计。

因此, 氧化钕中杂质氧化镍含量的检测结果的相对合成不确定度为:

$$u_{\text{rel}} = \sqrt{u_{\text{rel}}(w)^2 + u_{\text{rel}}(c_1)^2 + u_{\text{rel}}(c_2)^2 + u_{\text{rel}}(m)^2 + u_{\text{rel}}(V)^2} = \sqrt{(0.485\%)^2 + (0.879\%)^2 + (5.639\%)^2 + (0.047\%)^2 + (0.022\%)^2} = 5.7\% \quad (15)$$

包含因子 k 取 2, 包含概率 $p = 95\%$, 所以最终的相对扩展不确定度:

$$U_{\text{rel}} = k u_{\text{rel}} = 12\% \quad (16)$$

4 结论

本文采用 ICP-OES 法测定氧化钕中杂质氧化镍的含量, 以基体匹配法测得氧化镍含量为 0.0027% , 其测量结果的相对扩展不确定度为 ($U_{\text{rel}} = 12\%$, $k=2$)。通过分析整个检测过程中的影响因素, 总结出 6 个相对不确定度分量, 其中以标准曲线拟合时引入的相对不确定度分量最大 $u_{\text{rel}}(c_2) = 5.639\%$, 其次为标准溶液配制过程中引入的相对不确定度分量 $u_{\text{rel}}(c_1) = 0.879\%$ 。各相对不确定度分量的计算, 可以为稀土矿石原料检测领域结果的不确定度分析提供参考依据。因此, 在实际操作中首先要根据待测样品浓度含量调整标准溶液浓度点, 以降低工作曲线跨度来提高线性, 同时增加检测次数, 可减小标准曲线拟合的不确定度分量; 其次要选择低浓度标准溶液以减少标准溶液配制时的稀释次数, 以此减小标准溶液配制过程中的相对不确定度分量。

References

- CNAS-CL01-A002:2020. 2021. Guidance on the Application of Testing and Calibration Laboratories Competence Accreditation Criteria in the Field of Chemical Testing[S]. Beijing: China National Accreditation Service for Conformity Assessment (in Chinese).
- Du Shuli, Zhang Zhiqing, Xie Junyan, et al. 2007. JJG 196-2006. Working

- Glass Container[S]. Beijing: China Metrology Press(in Chinese).
- Kang Jing, Wang Jingzhong, Wei Feng, *et al.* 2020. Evaluation of uncertainty in determination of barium in lanthanum and cerium oxide by ICP-MS[J]. *Chinese Rare Earths*, 41(6): 82~88(in Chinese).
- Lei Jing, Zhang Yu, Wu Yafeng, *et al.* 2020. Measurement uncertainty and applicability in conformity assessment of Co, Cr, Mo, Ti for 6 environmental monitoring analytical method standards[J]. *Environmental Monitoring in China*, 36(6): 150~160(in Chinese).
- Li Jin, Tang Suohan, Ma Jianxiong, *et al.* 2021. The preparation of reference material for Fe isotope measurement of magnetite samples [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 40(3): 535~541(in Chinese with English abstract).
- Liu Fangmei, Shen Xianfeng, Lai Qiuxiang, *et al.* 2021. Evaluation of uncertainty in the determination of copper content in anode copper by iodometry method[J]. *China Nonferrous Metallurgy*, 50(1): 70~75(in Chinese).
- Tang Ping and Chen Gengliang. 2021. Uncertainty evaluation of total sulfur content determination results by two methods[J]. *Chemical Engineering of Oil and Gas*, 50(1): 114~118(in Chinese).
- Yang Ping, Deng Chuandong, Zeng Cheng, *et al.* 2020. Determination of 12 impurity elements in mixed materials of uranium, niobium and zirconium by inductively coupled plasma optical emission spectrometry[J]. *Journal of Analytical Science*, 36(4): 553~558(in Chinese with English abstract).
- Ye Depei, Zhao Feng, Shi Changyan, *et al.* 2013. JJF 1059.1-2012. Evaluation and expression of uncertainty in measurement[S]. Beijing: China Quality Inspection Press(in Chinese).
- Ye Xiaoming. 2012. Current situation and schools of measurement reliability theory[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, (S1): 159~161(in Chinese).
- Zang Muwen and Ke Ruihua. 2012. Summary of Mathematical Statistics and Uncertainty Evaluation in Component Analysis[M]. Beijing: China Quality Inspection Press(in Chinese).
- Zhai Hongwen, Fan Sufang, Wang Juan, *et al.* 2021. Recent progress in measurement uncertainty and its application in food inspection and detection[J]. *Food Science*, 42(5): 314~320.
- Zhang Liping, Wang Jiurong, Xu Liwei, *et al.* 2021. Evaluation and expression of measurement uncertainty in determination of total potassium in soil by inductively coupled plasma optical emission spectrometry[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, (2): 343~347(in Chinese).

附中文参考文献

- CNAS-CL01-A002:2020. 2021. 检测和校准实验室能力认可准则在化学检测领域的应用说明[S]. 北京: 中国合格评定国家认可委员会.
- 杜书利, 张志清, 谢军燕, 等. 2007. JJG 196-2006. 常用玻璃量器检定规程[S]. 北京: 中国计量出版社.
- 康 菁, 王静中, 魏 峰, 等. 2020. ICP-MS 法测定镧钪氧化物中钡结果的不确定度评定[J]. *稀土*, 41(6): 82~88.
- 雷 晶, 张 虞, 武亚凤, 等. 2020. 6 项环境监测分析方法标准中钴、铬、铜、钛的不确定度分析及其在达标判定中的应用[J]. *中国环境监测*, 36(6): 150~160.
- 李 津, 唐索寒, 马健雄, 等. 2021. 磁铁矿铁同位素标准物质的研制[J]. *岩石矿物学杂志*, 40(3): 535~541.
- 刘芳美, 沈显峰, 赖秋祥, 等. 2021. 碘量法测定阳极铜中铜含量的不确定度评定[J]. *中国有色冶金*, 50(1): 70~75.
- 唐 平, 陈赓良. 2021. 两种方法测定总硫含量结果的不确定度评定[J]. *石油与天然气化工*, 50(1): 114~118.
- 杨 平, 邓传东, 曾 诚, 等. 2020. 电感耦合等离子体发射光谱法测定铀钍铋混合材料中 12 种杂质元素含量[J]. *分析科学学报*, 36(4): 553~558.
- 叶德培, 赵 峰, 施昌彦, 等. 2013. JJF 1059.1-2012. 测量不确定度评定与表示[S]. 北京: 中国质检出版社.
- 叶晓明. 2012. 测量可靠性理论的现状与流派[J]. *测绘通报*, (S1): 159~161.
- 臧慕文, 柯瑞华. 2012. 成分分析中的数理统计及不确定度评定概要[M]. 北京: 中国质检出版社.
- 翟洪稳, 范素芳, 王 娟, 等. 2021. 测量不确定度在食品检验中的应用及进展[J]. *食品科学*, 42(5): 314~320.
- 张丽萍, 王久荣, 许丽卫, 等. 2021. 电感耦合等离子体发射光谱法测定土壤全钾不确定度的评定与表示[J]. *中国土壤与肥料*, (2): 343~347.