廖敏和. 离子色谱法测定水中锂离子的不确定度评定[J]. 净水技术, 2024, 43(8): 70-75, 95.

LIAO M H. Evaluation of uncertainty in determination of lithium ions in water by ion chromatography [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(8): 70-75, 95.

离子色谱法测定水中锂离子的不确定度评定

廖敏和^{1,2,*}

(1. 国家城市供水水质监测网合肥监测站, 安徽合肥 230011; 2. 合肥供水集团有限公司, 安徽合肥 230011)

摘要 离子色谱法作为水中锂离子的检测方法之一, 测量结果的准确性受多种因素的影响, 为了减少误差同时提高检测准确度, 评定离子色谱法测定锂离子的不确定度尤为重要。研究围绕水中锂离子测定的准确性, 从 4 个方面系统地进行了不确定度评估: 重复性测量、标准溶液的配制过程、标准曲线的线性回归分析以及离子色谱仪器。依据既定的标准, 独立计算了各分量的不确定度, 通过计算得出总体的合成不确定度、扩展不确定度指标。结果表明, 经由该方法所获得的水中锂离子浓度的合成相对标准不确定度为 0.009 3, 而相应的扩展不确定度为 0.019 mg/L。其中对合成相对标准不确定度影响最大的两个不确定度分量为标准溶液的配制过程及离子色谱仪器。

关键词 不确定度 扩展不确定度 锂离子 评定 离子色谱法

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-0177(2024)08-0070-07

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.08.010

Evaluation of Uncertainty in Determination of Lithium Ions in Water by Ion Chromatography

LIAO Minhe^{1,2,*}

(1. Hefei Monitoring Station of National Urban Water Quality Monitoring Network, Hefei 230011, China;

2. Hefei Water Supply Group Co., Ltd., Hefei 230011, China)

Abstract Ion chromatography is one of the detection methods for lithium ions in water, the accuracy of the measurement results is affected by many factors. In order to reduce the error and improve the detection accuracy, it is particularly important to evaluate the uncertainty of ion chromatography for the determination of lithium ions. In this study, the accuracy of lithium ion determination in water was systematically evaluated from four aspects: repeatability measurement, standard solution configuration process, linear regression analysis of standard curve, and ion chromatography instrument. According to the established standard, the uncertainty of each component was calculated independently, and the overall composite uncertainty and extended uncertainty index were obtained through calculation. The results showed that the synthetic relative standard uncertainty of the lithium ion concentration in water obtained by this method was 0.009 3, and the corresponding extended uncertainty was 0.019 mg/L. And the two uncertainty components that have the greatest influence on the synthetic relative standard uncertainty were the preparation process of standard solution and the ion chromatography instrument.

Keywords uncertainty extended uncertainty lithium ion evaluation ion chromatography

锂是一种银白色金属, 作为碱金属一族的成员, 其拥有质量轻盈、密度较低等显著特性。在当今日新月异的新能源与储能技术发展的背景下, 锂元素已深深融入人类日常生活之中。随着不断攀升的锂需求态势, 全球范围内的锂矿开采活动正经历前所

未有的加速, 越来越多富含锂元素的废水经由冶炼排放、地表径流等途径, 渗透至自然水域, 导致水环境中锂浓度的升高^[1]。根据美国环境保护局的调查^[2]显示, 当锂的每日参考暴露剂量大于 2 $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{d})$ 就会对人的身体健康产生不利影响, 如引起中枢神经系统、内分泌和肾脏系统中毒, 甚至肾脏衰竭^[3]。因此, 准确快速地检测水中锂离子的含量尤为重要。

离子色谱分析技术, 作为一种常用的锂离子测

[收稿日期] 2024-05-11

[通信作者] 廖敏和(1995—), 男, 硕士, 研究方向为水环境监测, E-mail: 444620997@qq.com。

定手段,具有卓越的分辨能力、高度的检测灵敏性和迅速的分析效能^[4]。然而,在使用离子色谱法测定锂离子的过程中,测量结果的准确性也会受到多种因素的影响。测量重复性是影响试验检测结果的关键参数之一,对锂离子进行多次重复测量有助于检测结果的稳定性和一致性,测量重复性对于异常数据的识别和处理也至关重要^[5]。在使用离子色谱法检测水中锂离子的过程中,锂离子标准溶液的配制是试验中不可缺少的一部分,标准溶液的浓度能够直接影响试验结果的准确性,特别是在标准溶液稀释时,浓度既不能过高也不能过低,否则会造成测量结果灵敏度降低,进一步引起偏差^[6]。另外,标准溶液的准确配制与标准曲线的线性回归分析之间存在着密切的内在联系,标准溶液配制中出现的误差可能会进一步在标准曲线的线性回归分析中叠加,导致测量不确定度进一步增大。离子色谱仪作为锂离子的试验检测仪器,其检测灵敏度还可能受运行环境状况的改变而波动,诸如温度波动、湿度变化及电磁干扰等因素均能对设备性能产生影响。总之,水中锂离子定量分析过程中,测量重复性、标准溶液配制、标准曲线的线性回归,以及离子色谱仪器的稳定性,均为不可忽视的关键影响要素。

量化被测量值分散特性的核心指标即为测量不确定度,该参数直接体现了测量结果的信赖程度。具体来说,测量不确定度旨在估算被测量的真实值可能涵盖的区间,从而为衡量测量结果的精确性提供依据^[7-8]。在环境保护监测方面,当检测数值逼近阈值标准时,不确定度的严谨评估对于验证检测结论的准确性起到了决定性的导向作用^[9]。

参考《测量不确定度评定与表示》(JJF 1059.1—2012)^[7]、《测量不确定度评定和表示》(GB/T 27418—2017)^[8]等资料可知,不确定度产生的根源广泛且多样,不仅限于以下方面:被测量概念界定的不充分、实现被测量复现的测量程序不尽完美、样品选取未能充分代表整体、环境参数测量与调控的不严密、人为解读仪器读数时的偏差、测量工具自身计量性能的限制,以及在一致条件下对被测量多次观测结果的自然波动等。因此,本文从测量重复性、标准溶液配制、标准曲线的线性回归分析、离子色谱仪器4个方面出发,计算其相应的不确定度、扩展不确定度,探讨运用离子色谱法测定水中锂离子含量不确定度因素的影响,为提升锂离子检测结果的准确

性提供参照基础。

1 材料与方法

1.1 试剂与仪器

在试验中选用 10 mL 单刻度移液管及 100 mL 单刻度容量瓶作为基本试验器材,试验用水则是通过普力菲尔超纯水机系统制备的超纯水(18.25 MΩ·cm)。锂的标准溶液来源于中国计量科学研究院,标号为 GBW(E) 080547,质量浓度为 100 μg/mL。锂离子的定量分析依托于 DIONEX 品牌的 ICS-1600 型离子色谱仪实施,采用了 20 mmol/L 的甲烷磺酸作为淋洗液,淋洗速率维持在 1.00 mL/min,样品注入体积为 25 μL,同时设置抑制器电流强度为 59 mA。离子色谱仪配备的是 CS12A 型号的分离柱,柱温保持在 30 ℃,以确保分析的高效与精准。

1.2 标准曲线制作

精确吸取质量浓度为 100 μg/mL 的锂标准溶液 10 mL,转移至 100 mL 的单标线容量瓶内,借助超纯水稀释并定容至刻度线,从而制得 10 mg/L 的锂标准工作液。随后,分别精确量取 0.00、0.50、1.00、2.50、5.00、10.00、20.00 mL 此标准工作液,置入一套新的 100 mL 容量瓶中,再次使用超纯水稀释至刻度,完成质量浓度为 0.000、0.050、0.100、0.250、0.500、1.000、2.000 mg/L 的锂离子标准系列溶液的配制工作。将配制好的锂离子标准系列溶液按照浓度梯度依次进样,样品通过进样管路进入色谱柱,在甲烷磺酸淋洗液的淋洗下,根据离子之间对离子交换树脂的亲合力不同进行分离,依次随流动相流至抑制器和检测器,工作站通过接收检测器连续检测流出组分的电导率信号绘制出色谱图。以锂离子浓度为横坐标,仪器相应峰面积为纵坐标,绘制校准曲线。

1.3 分析方法和数学模型

本研究参照《水质 可溶性阳离子(Li⁺、Na⁺、NH₄⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺)的测定 离子色谱法》(HJ 812—2016)测定水体中锂离子的浓度,并依据《常用玻璃量器检定规程》(JJG 196—2006)^[10]和《测量不确定度评定与表示》(JJF 1059.1—2012)^[7]等现行标准要求进行不确定度的计算。参照《环境监测分析方法标准制订技术导则》(HJ 168—2020)对于方法检出限的确定方法,配制样品质量浓度为

0.010 mg/L 的锂离子标准溶液进行 7 次平行测定,通过计算得出标准偏差 (S) = 0.001, 方法检出限 (MDL) = $3.143S$ = 0.003 mg/L。

利用最小二乘法原理对方程进行线性回归分析,以处理锂离子标准系列的测量数据,所得线性拟合模型表达式为 $y = a + bx$, 样品浓度计算如式(1)。

$$x = \frac{y - a}{b} \quad (1)$$

其中: x ——溶液中锂离子的质量浓度,mg/L;
 y ——仪器检测产生的响应峰面积, $\mu\text{S}\cdot\text{min}$;
 a ——该线性关系的纵轴截距;
 b ——直线的斜率。

1.4 不确定度来源

根据《测量不确定度评定与表示》(JJF 1059.1—2012)^[7]、《测量不确定度评定和表示》(GB/T 27418—2017)^[8]等资料,不确定度分为 A 类不确定度和 B 类不确定度,结合以上试验方案及数学模型,将不确定度的来源主要分为样品重复测定(A 类不确定度)、标准溶液稀释(B 类不确定度)、标准曲线的线性回归(B 类不确定度)以及离子色谱仪产生的不确定度(B 类不确定度)4 个方面^[11]。

2 结果与讨论

2.1 测量不确定度 A 类评定

针对未知浓度的样品实施了 6 次的重复测量。随后,基于这 6 组数据,计算了其平均值与标准偏差,详尽的测量与统计结果已汇总于表 1 中。

表 1 未知浓度样品锂离子测定结果

Tab. 1 Results of Lithium Ion Determination for Samples of Unknown Concentration

项目		数值/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
测定值(ρ)	$n=1$	1.009
	$n=2$	1.005
	$n=3$	1.007
	$n=4$	1.004
	$n=5$	1.013
	$n=6$	1.006
平均值($\bar{\rho}$)		1.007
标准偏差(S)		0.003 3

重复性测量引入的标准不确定度计算如式(2)。相对标准不确定度计算如式(3)。

$$u(\text{重}) = \frac{S}{\sqrt{n}} = \frac{0.003 3}{\sqrt{6}} = 0.001 3 \quad (2)$$

$$u_{\text{rel}}(\text{重}) = \frac{u(\text{重})}{\bar{\rho}} = \frac{0.001 3}{1.007} = 0.001 3 \quad (3)$$

2.2 测量不确定度 B 类评定

2.2.1 标准溶液引入的不确定度

选取了标准质量浓度为 100 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的锂离子标准样本,其伴随的相对扩展不确定度经评定为 1.0% (以 $k=2$ 为置信因子)。遵循 B 类评定途径,并依据正态分布假设下的 $k=2$ 准则进行计算,该标准物质的相对不确定度可通过式(4)予以明确表述。

$$u_{\text{rel}}(\text{标}) = \frac{1.0\%}{2} = 0.005 0 \quad (4)$$

2.2.2 使用 10 mL 单标线吸量管引入的不确定度

参考《常用玻璃量器检定规程》(JJG 196—2006)^[10],可得 10 mL A 级单标线吸量管所容许的最大误差界限为 ± 0.020 mL。遵循三角分布原则,并设定 k 值,利用 B 类评定方法计算后,该 10 mL 单标线吸量管的容量不确定度可依据式(5)。

$$u_1(\text{吸}10) = \frac{0.020}{\sqrt{6}} = 0.008 2 \quad (5)$$

为了计算吸量管重复性测量引入的标准不确定度,于恒定的温度环境下,对同一规格的 10 mL 单刻度移液管累计进行了 10 次称量试验,对准确吸量至刻度线处液体质量进行记录并换算为对应体积,计算结果如表 2 所示,标准偏差为 0.001 6。

表 2 10 mL 单标线吸量管称量试验结果

Tab. 2 Weighing Experimental Results of 10 mL Single-Line Pipette

序号	容量/mL
1	9.986 5
2	9.990 3
3	9.987 5
4	9.989 0
5	9.986 4
6	9.985 8
7	9.989 2
8	9.988 7
9	9.985 9
10	9.987 7

则 10 mL 单标线吸量管的测量重复性不确定度表示如式(6)。

$$u_2(\text{吸 } 10) = \frac{S}{\sqrt{n}} = \frac{0.0016}{\sqrt{10}} = 0.0005 \quad (6)$$

为保证测量精度,试验环境的温度被严格调控在(20±2)℃。鉴于水的已知体积膨胀系数为 2.1×10^{-4} ,依据均匀分布的假设条件,并遵照B类评定程序,推导出因环境温度波动而引入的标准不确定度,其数学表达形式如式(7)。

$$u_3(\text{吸 } 10) = \frac{2 \times 10 \times 2.1 \times 10^{-4}}{\sqrt{3}} = 0.0024 \quad (7)$$

根据以上3项计算结果,10 mL单标线吸量管引入的相对标准不确定度合成如式(8)。

$$u_{\text{rel}}(\text{吸 } 10) = \sqrt{\left[\frac{u_1(\text{吸 } 10)}{10}\right]^2 + \left[\frac{u_2(\text{吸 } 10)}{10}\right]^2 + \left[\frac{u_3(\text{吸 } 10)}{10}\right]^2} = 0.0009 \quad (8)$$

2.2.3 使用100 mL容量瓶引入的不确定度

参考《常用玻璃量器检定规程》(JJG 196—2006)^[10],得知100 mL A级容量瓶的容许误差界限为±0.10 mL。基于三角分布原理,设定 $k=\sqrt{6}$,运用B类评定模式,100 mL容量瓶的容量不确定性依据式(9)予以计算明确。

$$u_1(\text{容 } 100) = \frac{0.10}{\sqrt{6}} = 0.0408 \quad (9)$$

为了计算容量瓶重复性测量引入的标准不确定度,在相同温度条件下对100 mL容量瓶进行10次称量试验,对准确定容后的液体质量进行记录并换算为对应体积,结果分别为99.974 2、99.969 7、

99.978 0、99.976 6、99.974 6、99.978 1、99.974 4、99.976 9、99.975 3、99.978 9,最终求得标准偏差 $S=0.0027$ 。100 mL容量瓶的测量重复性不确定度的计算如式(10)。

$$u_2(\text{容 } 100) = \frac{S}{\sqrt{n}} = \frac{0.0027}{\sqrt{10}} = 0.0009 \quad (10)$$

由测量环境中温度波动所导致的标准不确定度计算,体现在式(11)。

$$u_3(\text{容 } 100) = \frac{2 \times 100 \times 2.1 \times 10^{-4}}{\sqrt{3}} = 0.0242 \quad (11)$$

综合以上3项的计算结果,因100 mL容量瓶引入的合成相对标准不确定度如式(12)。

$$u_{\text{rel}}(\text{容 } 100) = \sqrt{\left[\frac{u_1(\text{容 } 100)}{100}\right]^2 + \left[\frac{u_2(\text{容 } 100)}{100}\right]^2 + \left[\frac{u_3(\text{容 } 100)}{100}\right]^2} = 0.0005 \quad (12)$$

综上,在标准溶液配制步骤中所产生的相对标准不确定度,其计算依据式(13)。

$$u_{\text{rel}}(\text{稀}) = \sqrt{u_{\text{rel}}^2(\text{标}) + u_{\text{rel}}^2(\text{吸 } 10) + u_{\text{rel}}^2(\text{容 } 100)} = 0.0051 \quad (13)$$

2.2.4 标准曲线的线性回归分析产生的相对标准不确定度

对锂离子标准系列6个浓度点进行测定,相关计算数值如表3所示。

表3 标准系列溶液测定结果

Tab. 3 Results of Standard Series Solutions

标准系列质量浓度(x_i)/(mg·L ⁻¹)	峰面积(y_i)/(μS·min)	bx_i+a 拟合值/(μS·min)	$y_i-(bx_i+a)$	$x_i-\bar{x}$
0.050	0.043 3	0.038 7	0.004 6	-0.60
0.100	0.090 9	0.089 4	0.001 5	-0.55
0.250	0.241 2	0.241 5	-0.000 3	-0.40
0.500	0.491 0	0.495 0	-0.004 0	-0.15
1.000	0.995 1	1.002 0	-0.006 9	0.35
2.000	2.019 7	2.016 0	0.003 7	1.35

通过最小二乘法对标准系列中浓度与峰面积这两项变量进行拟合分析,成功建立了标准曲线的线性回归模型方程,如式(14)。

$$y = 1.014x - 0.012 = 0.9999 \quad (14)$$

在线性回归分析中,使用剩余标准差 S_E 来表示拟合值的精度,其计算结果如式(15)。

$$S_E = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m [y_i - (bx_i + a)]^2}{m - 2}} = 0.005 0 \quad (15)$$

标准曲线拟合产生的标准不确定度计算结果如式(16)。

$$u(\text{曲}) = \frac{S_E}{b} \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{1}{m} + \frac{(\bar{\rho} - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2}} = 0.003 0 \quad (16)$$

其中: S_E ——剩余标准差;

m ——标准系列中锂离子浓度点个数,
 $m = 6$;

y_i ——标准系列中各点响应峰面积的测定值, $\mu\text{S}\cdot\text{min}$;

x_i ——标准系列中各点的锂离子质量浓度, mg/L ;

b ——标准曲线斜率, $b = 1.014$;

a ——标准曲线截距, $a = -0.012$;

n ——样品重复测定次数, $n = 6$;

$\bar{\rho}$ ——样品平均值, $\bar{\rho} = 1.007 \text{ mg/L}$;

$\bar{x}$ ——标准系列中锂离子的平均值, $\bar{x} = 0.65 \text{ mg/L}$ 。

综上,标准曲线拟合产生的相对标准不确定度如式(17)。

$$u_{\text{rel}}(\text{曲}) = \frac{u(\text{曲})}{\bar{\rho}} = \frac{0.003 0}{1.007} = 0.003 0 \quad (17)$$

2.2.5 离子色谱仪产生的标准不确定度

仪器不确定度,是指由所采用的测量工具或系统引入的测量结果不确定性部分,该值可通过具备相应资质的校准机构对仪器进行测量校准获得。根据安徽省计量科学研究院提供的校准证明文件所示,离子色谱仪最小检测结果的相对扩展不确定度为 $U_{\text{rel}} = 1.4\%$, $k = 2$,其标准不确定度的具体数值依据式(18)。

$$u_{\text{rel}}(\text{仪}) = \frac{1.4\%}{2} = 0.007 0 \quad (18)$$

2.3 合成相对标准不确定度

各项相对标准不确定度分量的数值如表4所示。

表4 各项相对标准不确定度
Tab.4 Each Relative Standard Uncertainty

不确定度来源	相对标准不确定度值
重复性	0.001 3
标准溶液配制	0.005 1
标准曲线的线性回归分析	0.003 0
离子色谱仪	0.007 0

合成的相对标准不确定度如式(19)。

$$u_{\text{rel}} = \sqrt{u_{\text{rel}}^2(\text{重}) + u_{\text{rel}}^2(\text{稀}) + u_{\text{rel}}^2(\text{曲}) + u_{\text{rel}}^2(\text{仪})} = 0.009 3 \quad (19)$$

2.4 扩展标准不确定度和测量结果的表示

当置信概率为95%时,取包含因子 $k = 2$,扩展标准不确定度可以由式(20)表示。

$$U = u_{\text{rel}} \times \bar{\rho} \times k = 0.009 3 \times 1.007 \times 2 = 0.019 \quad (20)$$

根据以上试验数据和公式计算,离子色谱法测量水中锂离子的结果为 $(1.007 \pm 0.019) \text{ mg/L}$, $k = 2$ 。

2.5 对策与建议

由上述计算结果可知,在离子色谱法测定水中锂离子不确定度评价过程中,标准溶液的配制过程和离子色谱仪产生的不确定度对总不确定度的影响最大,标准曲线拟合次之,重复性测量影响最小。基于此结果,可以从标准溶液的配制、标准曲线的线性回归分析、离子色谱仪3个方面来提升。

标准溶液配制过程受到温度、稀释倍数选择、玻璃量器选取使用、检测人员的检测水平等因素影响,这就要求在试验前后,均要保持恒定的环境温度;在稀释过程中应合理确定稀释倍数,避免多次稀释、稀释倍数过大等问题;玻璃量器选用方面,应使用校准后的移液管、容量瓶,使用单标线吸量管代替刻度吸量管,即使用满量程进行溶液的移取,尽可能地减小允差;试验过程也应由专业人员操作,尽量减少人为因素引入的不确定度。

标准曲线拟合方面,容易受标准曲线浓度点和浓度范围设置的影响,应按照检测方法合理设置浓度点和浓度范围:过小的浓度值配制中会使用较小量程的量具,这就引入了较大的允差,造成不确定度

的增大;浓度点个数越多,使用量具的次数也越多,不确定度也会随之增大。

离子色谱仪方面,色谱柱的柱效会随使用时间的增加而降低,抑制器的长时间使用也会对电导率的数值产生影响,从而导致仪器响应峰面积的变化。在使用过程中应保证各项元器件运行正常,定期进行维护保养,及时更换色谱分离柱和抑制器,以保持最佳检测状态。

3 结论

本研究应用离子色谱分析技术测定水体中锂离子含量,并构建了一套针对该分析方法的水中锂离子不确定度评估体系。在评估体系中,不确定度构成要素主要包括测量重复性、标准溶液配制、标准曲线的线性回归分析及离子色谱仪器,其对应的相对标准不确定度分量值分别为 $u_{\text{rel}}(\text{重}) = 0.0013$ 、 $u_{\text{rel}}(\text{稀}) = 0.0051$ 、 $u_{\text{rel}}(\text{曲}) = 0.0030$ 、 $u_{\text{rel}}(\text{仪}) = 0.0070$ 。基于此方法测得的水中锂离子含量的 $u_{\text{rel}} = 0.0093$,扩展不确定度为 0.019 mg/L 。分析显示,标准溶液配制与离子色谱仪器两方面产生的不确定度对总体结果影响最为显著。因此,在日常检测操作中,应从强化标准溶液的配制流程、优化标准曲线的浓度点选择与覆盖范围、保持仪器运行时环境温湿度恒定、色谱柱和抑制器经常性维护等方面总结提升,进一步降低不确定度分量数值,从而提高锂离子含量测定的准确度。

参考文献

- [1] 李媛,时进钢,陈楠,等. 中国锂动力电池产业链污染调查评估及风险管控[J]. 环境污染与防治, 2024(3): 387-391.
LI Y, SHI J G, CHEN N, et al. Pollution evaluation and environmental risk management of China's lithium power batteries industry chain[J]. Environmental Pollution and Control, 2024(3): 387-391.
- [2] 杨学志,齐甜雨,文昊楠,等. 高精度锂分析方法及我国多种环境介质中锂污染初探[J]. 科学通报, 2023, 68(15): 1959-1970.
YANG X Z, QI T Y, WEN H N, et al. Development of high-precision analytical method for lithium and the preliminary investigation on lithium pollution in environmental media in China[J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(15): 1959-1970.
- [3] 秦俊法. 锂的生物必需性及人体健康效应[J]. 广东微量元素科学, 2000(3): 1-16.
QIN J F. Biological essentiality of lithium and its health effects in humans[J]. Trace Elements Science, 2000(3): 1-16.
- [4] 乐胜锋,王尉,高峡,等. 离子色谱技术特点及其在环境与食品领域的应用[J]. 食品安全质量检测学报, 2016,7(11): 4333-4340.
LE S F, WANG W, GAO X, et al. Characteristics of ion chromatography technology and its application in environmental and food fields[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2016, 7(11): 4333-4340.
- [5] 尚霜霜. 三倍频试验装置校准测量结果的不确定度分析[J]. 品牌与标准化, 2024(2): 226-228.
SHANG S S. Analysis of uncertainty in calibration measurement results of triple frequency test equipment [J]. Brand and Standardization, 2024(2): 226-228.
- [6] 李盼盼,史晓华,李嘉业,等. 气相色谱法测定西葫芦中百菌清残留量的不确定度评定[J]. 中国标准化, 2024(6): 185-191.
LI P P, SHI X H, LI J Y, et al. Evaluation of the uncertainty of chlorothalonil residue in zucchini by gas chromatography [J]. China Standardization, 2024(6): 185-191.
- [7] 国家市场监督管理总局. 测量不确定度评定与表示: JJF 1059.1—2012 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. Evaluation and expression of uncertainty in measurement: JJF 1059.1—2012 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2013.
- [8] 中华人民共和国国家标准化管理委员会, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 测量不确定度评定和表示: GB/T 27418—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
Standardization Administration of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Guide to the evaluation and expression of uncertainty in measurement: GB/T 27418—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [9] 朱良琪,郭晶晶,马雯爽,等. 离子色谱法测定饮用水中丙烯酸测定法及不确定度分析[J]. 净水技术, 2022, 41(4): 155-163.
ZHU L Q, WU J J, MA W S, et al. Determination of acrylic acid in drinking water by ion chromatography and uncertainty analysis[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(4): 155-163.
- [10] 中华人民共和国质量监督检验检疫总局. 常用玻璃量器检定规程: JJG 196—2006 [S]. 北京: 中国质检出版社, 2006.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Working glass container: JJG 196—2006 [S]. Beijing: Quality Inspection Press of China, 2006.

(下转第95页)

- 有机物指标; GB/T 5750. 8—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- State Administration for Market Regulation of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Standard examination methods for drinking water—Part 8: Organic indices; GB/T 5750. 8—2023 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2023.
- [2] 中华人民共和国国家环境保护总局, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 地表水环境质量标准; GB 3838—2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- State Environmental Protection Administration of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Environmental quality standards for surface water; GB 3838—2002[S]. Beijing: Standards Press of China, 2002.
- [3] 段绍恒, 叶凡, 陶胜康, 等. 气相色谱质谱法测定地表水中四氯苯[J]. 化学工程师, 2021, 35(9): 32-34.
- DUAN S H, YE F, TAO S K, et al. Determination of tetrachlorobenzene in surface water by GPLC mass spectrometry [J]. Chemical Engineer, 2021, 35(9): 32-34.
- [4] 中华人民共和国生态环境部. 水质 氯苯类化合物的测定 气相色谱法; HJ 621—2011[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011.
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Water quality—Determination of chlorobenzenes—Gas chromatography; HJ 621—2011 [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2011.
- [5] 陈东洋, 范翔, 冯家力, 等. 吹扫捕集/气相色谱-质谱法同时测定环境水样中 5 种三卤甲烷[J]. 分析科学学报, 2023, 39(4): 456-460.
- CHEN D Y, FAN X, FENG J L, et al. Simultaneous determination of five trihalomethanes in water by gas chromatography-mass spectrometry coupling with purge and trap pretreatment[J]. Journal of Analytical Science, 2023, 39(4): 456-460.
- [6] 王玮, 赵莹, 刘存卫. 吹扫捕集-气相色谱-质谱联用法快速检测生活饮用水中 55 种挥发性有机物[J]. 中国卫生检验杂志, 2022, 32(24): 2945-2950.
- WANG W, ZHAO Y, LIU C W. Rapid detection of 55 volatile organic compounds in drinking water by purge and trap-gas chromatography-mass spectrometry [J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2022, 32(24): 2945-2950.
- [7] 陈秋玲, 高回香, 姜妍君, 等. 吹扫捕集-气相色谱-质谱法同时测定水体中 14 种挥发性消毒副产物[J]. 环境化学, 2023, 42(7): 2496-2500.
- CHEN Q L, GAO H X, JIANB J Y, et al. Study on determination of 14 kinds of volatile disinfection by-products in water by purge and trap/gas chromatography/mass spectrometry [J]. Environmental Chemistry, 2023, 42(7): 2496-2500.
- [8] 詹未, 韩志宇, 李勇, 等. 吹扫捕集-气相色谱-三重四极杆质谱法同时测定饮用出厂水中 6 种卤乙腈[J]. 色谱, 2021, 39(7): 758-763.
- ZHAN W, HAN Z Y, LI Y, et al. Simultaneous determination of six haloacetonitriles in finished water for drinking by purge and trap-gas chromatography-triple quadrupole mass spectrometry [J]. Chinese Journal of Chromatography, 2021, 39(7): 758-763.
- [9] 中华人民共和国生态环境部. 水质 松节油的测定 吹扫捕集/气相色谱-质谱法; HJ 866—2017[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2017.
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Water quality—Determination of turpentine—Purge and trap/gas chromatography-mass spectrometry; HJ 866—2017[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2017.
- [10] 中华人民共和国国家市场监督管理总局, 中华人民共和国国家标准化委员会. 生活饮用水标准检验方法 第 3 部分: 水质分析质量控制; GB5750. 3—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- State Administration for Market Regulation of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Standard examination methods for drinking water—Part 3: Water analysis quality control; GB 5750. 3—2023[S]. Beijing: Standards Press of China, 2023.
- [11] 中华人民共和国生态环境部. 环境监测 分析方法标准制订技术导则; HJ 168—2020[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2020.
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Environmental monitoring-Technical guideline on drawing and revising analytical method standards; HJ168—2020 [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2020.

(上接第 75 页)

- [11] 郑延清. 离子色谱法测定水中碘化物的不确定度评定[J]. 环境保护与循环经济, 2021, 41(9): 69-71.
- ZHEN Y Q. Evaluation of uncertainty for determination of iodide in water by ion chromatography [J]. Environmental Protection and Circular Economy, 2021, 41(9): 69-71.