

陈玲,李流川. 离子色谱法测定生活饮用水中高氯酸盐含量的不确定度评定[J]. 净水技术, 2025, 44(7): 192-201.

CHEN L, LI L C. Uncertainty evaluation of ion chromatography for perchlorate content determination in drinking water [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(7): 192-201.

离子色谱法测定生活饮用水中高氯酸盐含量的不确定度评定

陈玲*,李流川

(达州市疾病预防控制中心,四川达州 635002)

摘要 【目的】 评定离子色谱法测定生活饮用水中高氯酸盐含量的不确定度,以提高检测结果的准确性和科学性。【方法】 根据不确定度测量的评定原理和方法,该研究分析和讨论影响测量的各个因素,包括标准物质、校准曲线拟合、标准溶液配制过程、仪器本身、样品重复性测量、样品稳定性等。同时对标准溶液及样品不同次数的重复性测量综合对比评定。并采用 WPS Office 2023 软件进行数据整理和统计分析。分析计算出各均值、试验标准差及不确定度值。不确定度分量采用构成比进行统计描述。【结果】 标准溶液和样品测量次数均为 1 次时,引入的不确定度较大;各测量次数逐渐增加,引入的不确定度值逐渐减小。通过标准点平行测量 3 次和样品平行测量 6 次,得到样品中高氯酸盐测定结果为 $9.68 \mu\text{g/L}$,扩展不确定度为 $0.93 \mu\text{g/L}$ (包含因子 $k=2$)。【结论】 该方法中不确定度主要来源是校准曲线拟合(39.34%)和标准溶液配制过程(19.36%),其次是标准物质(15.21%)和样品重复性测量(10.34%),并提出了降低不确定度的建议与对策。

关键词 离子色谱法 生活饮用水 高氯酸盐 不确定度 评定

中图分类号: TU991 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)07-0192-10

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.07.023

Uncertainty Evaluation of Ion Chromatography for Perchlorate Content Determination in Drinking Water

CHEN Ling*, LI Liuchuan

(Dazhou Center for Disease Control and Prevention, Dazhou 635002, China)

Abstract [Objective] Assessing the uncertainty of ion chromatography in determining the content of perchlorate in drinking water to improve the accuracy and scientificity of detection result. [Methods] Based on the evaluation principles and method of uncertainty measurement, this paper analyzed and discussed various factors that affected measurement, including standard substances, standard curve fitting, standard solution preparation process, instrument itself, sample repeatability measurement, sample stability, etc. Simultaneously, this paper compared and evaluated the repeatability measurements of standard solutions and samples at different times. And used WPS Office 2023 software for data organization and statistical analysis, analyzed and calculated the mean values, test standard deviation, and uncertainty values. The uncertainty components were statistically described using the composition ratio. [Results] When both the standard solution and the sample were measured once, a large degree of uncertainty was introduced. The number of measurements gradually increased, and the introduced uncertainty values gradually decreased. By parallel measuring the standard point 3 times and the sample 6 times, the determination result of perchlorate in the sample was $9.68 \mu\text{g/L}$, and an extended uncertainty was $0.93 \mu\text{g/L}$ (the inclusion factor k was 2). [Conclusion] The main sources of uncertainty in this method are calibration curve fitting (39.34%) and standard solution preparation process (19.36%), followed by standard substances (15.21%) and sample repeatability measurements (10.34%). Suggestions and strategies for reducing uncertainty have been proposed.

Keywords ion chromatography domestic drinking water perchlorate uncertainty evaluation

随着生活水平的提高和我国水环境污染问题的日益严峻,饮用水安全问题逐渐浮出水面,引发了公

[收稿日期] 2025-03-11

[通信作者] 陈玲(1989—),女,主要从事卫生检验研究等工作,E-mail: 979039193@qq.com。

众的广泛关注^[1-2]。高氯酸盐(ClO_4^-)主要为高氯酸所形成的盐类物质,具有稳定的四面体型离子^[3],因此,具有非常稳定的化学性质。常作为添加剂、强氧化剂以及工业用助剂,被广泛地应用在军事产业、涂料生产、烟花爆竹制造和橡胶制品制造等多个领域中^[4]。高氯酸盐易溶于水、具有强烈扩散能力,广泛渗透于地下水和地表水中,长期存在并成为一种持续性的微量有毒环境污染物质。高氯酸盐被认为具有内分泌干扰性,对新陈代谢和生长发育有严重影响,特别是对孕妇和生长发育中的儿童构成的危害更大^[5]。在南极冰雪的监测过程中,我国科研人员^[6-7]意外发现南极大陆存在微量的高氯酸盐,这已经侵入了地球最后一块洁净的大陆^[7]。现有大量关于饮用水中高氯酸盐的分析方法和污染现状研究^[8-10]需用到较多的数据,因此,提高定量分析饮用水中高氯酸盐含量的可信度具有重要的现实意义。

我国最新版《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)已将高氯酸盐新增为扩展指标,限值为 $70 \mu\text{g}/\text{L}$ ^[11]。依据《生活饮用水标准检验方法 第五部分:无机非金属指标》(GB/T 5750.5—2023)^[12]测定高氯酸盐方法有:离子色谱法-氢氧根系统淋洗液、离子色谱法-碳酸盐系统淋洗液和超高效液相色谱串联质谱法。超高效液相色谱串联质谱法采用内标法定量分析,试剂和仪器成本较高。而离子色谱法具有操作简便、分析速度快等优点,是测定饮用水中无机阴离子的理想方法^[13]。目前国内离子色谱法评定其他离子不确定度报道较多,研究^[14-16]表明,标准曲线拟合和标准溶液配制过程影响最大。对此,此研究设计了标准溶液及样品不同次数的重复性测量综合对比评定(当前未见相关文献报道)。而国内外评定水中高氯酸盐的不确定度报道较少,只有陈成瑶等^[17]使用离子色谱法-碳酸盐系统淋洗液方法进行了研究。而此研究使用离子色谱法-氢氧根系统淋洗液方法进行测定和评定。

不确定度是赋予被测量量值的分散性^[18],测量不确定度表达了检测结果的准确程度^[19]。而合理评定不确定度对数据比对、实验室能力验证、临界值判定等都有着重要意义^[20]。因此,此研究参照一系列不确定度相关标准要求和规定,运用离子色谱法测定生活饮用水中高氯酸盐含量,通过测定与分析,

对不确定度来源进行全面评估,从而找到影响测定结果的关键因素,并对其测量结果的不确定度作出评价,进一步提供更为合理的试验设计方法,也为实验室检测过程中的质量控制和判定测量结果准确度提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 仪器与试剂

离子色谱仪:ICS-1000 型(戴安中国有限公司),抑制器为Dionex ADRs300 4 mm 型,KOH 淋洗液自动发生器;超纯水机:AFZ-2002-U 型(重庆颐洋企业发展有限公司);高氯酸盐溶液标准物质 $[(1\ 000 \pm 0.03\%) \mu\text{g}/\text{mL}]$,编号为 BWJ4007-2016,批号为 20230614,北京北方伟业]。

1.2 仪器工作条件

色谱柱:Dionex IonPac™ AS20 型阴离子分析柱,Dionex ionPac™ AG20 型阴离子保护柱。定量环: $500 \mu\text{L}$,柱温为 $30\text{ }^\circ\text{C}$,进样量为 $500 \mu\text{L}$,抑制器电流为 112 mA 。淋洗液为 45 mmol/L KOH 溶液,流速为 $1.0\text{ mL}/\text{min}$,淋洗液浓度为等度洗脱。

1.3 试验步骤

1.3.1 样品来源和预处理

实际样品来自于达州市宣汉县胡家水源地的末梢水,采样容器为螺口高密度聚乙烯瓶,顶部至少留 $1/3$ 空隙,采集后需 $0\sim 4\text{ }^\circ\text{C}$ 冷藏且密封保存。水样经过 $0.22\text{ }\mu\text{m}$ 滤膜后直接上机测定。

1.3.2 试验方法

(1)检测方法、精密度、准确度判定方法

《生活饮用水标准检验方法 第五部分:无机非金属指标》(GB/T 5750.5—2023)离子色谱法-氢氧根系统淋洗液^[12];

(2)不确定度的评定方法

《测量不确定度评定和表示》(GB/T 27418—2017)^[21]、《常用玻璃量器》(JJG 196—2006)^[22]、《测量不确定度评定与表示》(JJF 1059.1—2012)^[23]、《移液器检定规程》(JJG 646—2006)^[24]、《化学分析中不确定度的评估指南》(CNAS-GL006—2019)^[25]、《标准物质的定值及均匀性、稳定性评估》(JJF 1343—2022)^[26]。

1.3.3 标准系列的配制

高氯酸盐标准使用液($2.00\text{ }\mu\text{g}/\text{mL}$):用 1.00 mL 的单标线移液管吸取 1.00 mL 高氯酸盐溶

液标准物质 1 000 $\mu\text{g/mL}$, 置于 10 mL 容量瓶中, 用纯水定容, 混匀, 得质量浓度为 100.0 $\mu\text{g/mL}$ 的标准中间液, 再用 1.00 mL 的单标线移液管吸取 1.00 mL 标准中间液, 置于 50 mL 容量瓶中, 用纯水定容, 混匀, 得质量浓度为 2.00 $\mu\text{g/mL}$ 的标准使用液, 临用时配制。

取 8 个 50 mL 棕色容量瓶, 依次准确移取 0、125、250、625、1 250、2 000、2 750、3 500 μL 高氯酸盐标准使用液, 用纯水定容, 混匀, 配制成 0、5、10、25、50、80、110、140 $\mu\text{g/L}$ 标准系列质量浓度, 上机测定。

1.3.4 准确度和精密度

取 12 个 50 mL 棕色容量瓶, 按每 6 份 1 组分 2 组, 分别向 2 组样品中加入低质量浓度 (10 $\mu\text{g/L}$)、高质量浓度 (40 $\mu\text{g/L}$) 2 种不同质量浓度。

1.3.5 测量模型

按照 1.2 条件, 分别对标准系列、空白和样品溶液测定。由仪器工作站自动分析数据, 被测样品中高氯酸盐的浓度按式 (1) 计算。

$$C_x = \frac{A_1 - a}{b} \quad (1)$$

其中: b ——高氯酸盐校准曲线斜率;

C_x ——样品中高氯酸盐的质量浓度, $\mu\text{g/L}$;

A_1 ——仪器测定的峰面积, $\mu\text{S} \cdot \text{min}$;

a ——高氯酸盐校准曲线截距。

1.4 不确定度来源

影响此次测量不确定度的主要来源为标准物质引入的相对标准不确定度 $u_{\text{rel}}(S)$; 标准溶液配制过程中引入的相对标准不确定度 $u_{\text{rel}}(X)$ 主要来源于标准溶液稀释定容时使用的容量瓶、移液管、移液器以及温度; 校准曲线拟合引入的相对标准不确定度 $u_{\text{rel}}(L)$ 主要来源于校准曲线的浓度、数量及测定次数, 样品的浓度及测定次数, 曲线的截距和斜率。样品重复性测量引入的相对标准不确定度 $u_{\text{rel}}(R)$; 回收率引入的相对标准不确定度 $u_{\text{rel}}(H)$; 仪器稳定性引入的相对标准不确定度 $u_{\text{rel}}(I)$; 样品稳定性引入的相对标准不确定度 $u_{\text{rel}}(A)$ 。如图 1 所示。

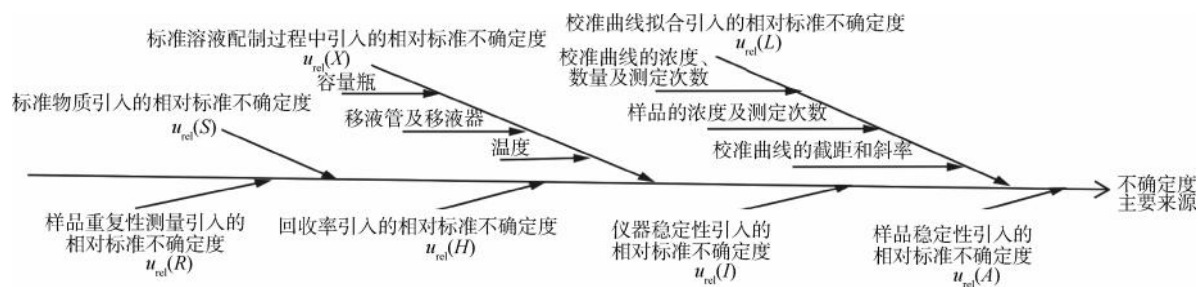


图 1 不确定度的来源

Fig. 1 Source of Uncertainty

1.5 统计分析

采用 WPS Office 2023 软件进行数据整理和统计分析。拟合线性回归, 分析计算出各均值、试验标准差、残差标准偏差及不确定度值。回收率采用 t 检验分析, 以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。不确定度分量采用构成比进行统计描述。

2 结果与讨论

2.1 准确度和精密度评定

《生活饮用水标准检验方法 第五部分: 无机非金属指标》(GB/T 5750.5—2023) 离子色谱法—氢氧根系统淋洗液方法中规定回收率为 84%~118%; 相对标准偏差为 0.19%~9.30%; 本次测定结果低浓度的回收率为 107%, 相对标准偏差为

2.8% ($n=6$); 高浓度的回收率为 98%, 相对标准偏差为 2.6% ($n=6$)。高氯酸盐低浓度和高浓度 2 组回收率差异有统计学意义 ($t=3.41, P=0.006$)。如表 1 所示。

2.2 不确定度分量评定

2.2.1 标准物质引入的相对标准不确定度 $u_{\text{rel}}(S)$

查标准物质证书, 其给定质量浓度为 $(1\,000 \pm 3\%) \mu\text{g/mL}$, 在包含因子 $k=2$ 时, $u_{\text{rel}}(S) = 3\%/2 = 0.015$ 。

2.2.2 标准溶液配制过程中引入的相对标准不确定度 $u_{\text{rel}}(X)$

体积引入的不确定度: 1 支 1.00 mL A 级单标

表 1 高氯酸盐的回收率和相对标准偏差
Tab. 1 Recovery Rate and Relative Standard Deviation of Perchlorate

浓度水平	加标量/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	样品本底值/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	样品测定值/($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	平均值/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	回收率	相对标准偏差
低	10	9.68	20.72, 20.39, 20.82, 20.08, 20.73, 19.34	20.35	107%	2.8%
高	40		47.31, 49.68, 49.13, 50.67, 47.83, 48.25	48.81	98%	2.6%

线移液管容量允差为 0.007 mL;1 支 10 mL A 级容量瓶容量允差为 0.02 mL;1 支 50 mL A 级容量瓶容量允差为 0.05 mL;200 μL 移液器在 100 μL 检定点容量允差为 2.0%;1 000 μL 移液器在 100、500、1 000 μL 检定点容量允差分别为 2.0%、1.0%、1.0%;5 000 μL 移液器在 1 000、2 500、5 000 μL 检定点容量允差分别为 1.0%、0.5%、0.6%。按均匀分布,取包含因子 $k=\sqrt{3}$,采用 B 类评定,1.00 mL A 级单标线移液管引入的不确定度为: $u_{\text{rel}}(V)=0.007/\sqrt{3}=0.004\ 04\ (\text{mL})$;同理,其他规格移液器和容量瓶引入的不确定以此类推,如表 2 所示。

温度引入的不确定度:考虑温度的波动范围,即 $(20\pm 4)\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[27]。由于水的膨胀系数 $(2.1\times 10^{-4}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1})$ 远大于玻璃容器 $(1\times 10^{-5}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1})$ 的膨胀系数,因此主

要关注温度对溶液体积变化的影响^[28]。 $\Delta T=4\text{ }^{\circ}\text{C}$,按均匀分布,取包含因子 $k=\sqrt{3}$,采用 B 类评定,1.00 mL A 级单标线移液管引入的不确定度为: $u_{\text{rel}}(T)=2.1\times 10^{-4}\times 4\times 1.00/\sqrt{3}=0.000\ 485\ (\text{mL})$;同理,其他规格容量瓶和移液器引入的不确定以此类推。

由计量器具引入的不确定度如式(2)。

$$1.00\text{ mL A 级单标线移液管 } u_{\text{rel}}(1.00\text{ mL}) = \frac{\sqrt{u_{\text{rel}}^2(V)+u_{\text{rel}}^2(T)}}{1.00} = \frac{\sqrt{(0.004\ 04)^2+(0.000\ 485)^2}}{1.00} = 0.004\ 07 \quad (2)$$

同理,其他规格容量瓶和移液器体积和温度引入的不确定以此类推,如表 2 所示。

表 2 标准溶液配制过程中量器具引入的不确定度
Tab. 2 Uncertainty Introduced by Measuring Instruments during the Preparation Process of Standard Solutions

量器具	移取体积/mL	$u_{\text{rel}}(V)/\text{mL}$	$u_{\text{rel}}(T)/\text{mL}$	使用次数	相对标准不确定度
A 级 1.00 mL 单标线移液管	1.00	0.004 04	0.000 485 0	2	0.004 070
A 级 10 mL 容量瓶	—	0.011 50	0.004 850 0	1	0.001 250
A 级 50 mL 容量瓶	—	0.028 90	0.024 200 0	8	0.000 754
200 μL 移液器	0.125	0.001 44	0.000 060 6	1	0.011 6 00
1 000 μL 移液器	0.250	0.002 17	0.000 121 0	1	0.008 670
1 000 μL 移液器	0.625	0.003 61	0.000 303 0	1	0.005 790
5 000 μL 移液器	1.250	0.007 22	0.000 606 0	1	0.005 790
5 000 μL 移液器	2.000	0.011 60	0.000 970 0	1	0.005 790
5 000 μL 移液器	2.750	0.007 94	0.001 330 0	1	0.002 930
5 000 μL 移液器	3.500	0.010 10	0.001 700 0	1	0.002 930

注:“—”表示无数据。

标准使用液配制引入的不确定度如式(3)。

$$u_{\text{rel}}(\text{稀释}) = \frac{\sqrt{(0.004\ 07)^2\times 2+(0.001\ 25)^2+(0.000\ 754)^2}}{0.005\ 94} \quad (3)$$

根据校准曲线配制步骤,利用不同规格和使用频次的移液器和容量瓶,所得校准曲线配制过程中

引入的不确定度如式(4)。

$$u_{\text{rel}}(\text{曲线}) = \frac{\sqrt{(0.011\ 6)^2+(0.008\ 67)^2+(0.005\ 79)^2\times 3+(0.002\ 93)^2\times 2+(0.000\ 754)^2\times 7}}{0.018\ 2} \quad (4)$$

则标准溶液配制过程中引入的相对标准不确定度如式(5)。

$$u_{\text{rel}}(X) = \sqrt{u_{\text{rel}}^2(\text{稀释}) + u_{\text{rel}}^2(\text{曲线})} = \sqrt{(0.005\ 94)^2 + (0.018\ 2)^2} = 0.019\ 1 \quad (5)$$

2.2.3 校准曲线拟合引入的相对标准不确定度 $u_{\text{rel}}(L)$

对标准系列和样品测定,每个标准点平行测量3次,样品平行测量6次,并用最小二乘法拟合校准曲线,测定结果及拟合结果如表3所示,校准曲线拟合引入的相对标准不确定度如式(6)~式(8)。

表3 标准溶液及样品测定结果

Tab. 3 Determination Results of Standard Solutions and Samples

高氯酸盐质量 浓度/($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	仪器峰面积响应值/($\mu\text{S}\cdot\text{min}$)			
标准溶液	5	0.005 353	0.005 391	0.005 152
	10	0.011 012	0.011 184	0.010 700
	25	0.030 036	0.030 270	0.029 296
	50	0.061 448	0.062 322	0.059 990
	80	0.096 764	0.099 610	0.099 204
	110	0.135 430	0.136 485	0.137 277
	140	0.174 372	0.174 942	0.176 159
样品溶液	9.68	0.010 574	0.011 228	0.010 433
	(均值)	0.010 494	0.010 756	0.010 457

注:线性回归方程为 $y = 0.001\ 26x - 0.001\ 51$, $r^2 = 0.999\ 8$ 。

$$u = \frac{s}{b} \sqrt{\frac{1}{p} + \frac{1}{n} + \frac{(c_0 - \bar{c})^2}{\sum_{i=1}^n (c_i - \bar{c})^2}} \quad (6)$$

其中:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A_i - A)^2}{n - 2}} \quad (7)$$

$$\text{则: } u_{\text{rel}}(L) = \frac{u}{c_0} \quad (8)$$

表4 标准溶液及样品几种不同重复性测量引入的不确定度

Tab. 4 Uncertainty Introduced by Several Different Repeatability Measurements of Standard Solutions and Samples

n	p	$C_0/(\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	s	u	$u_{\text{rel}}(L)$	S_m	$u_{\text{rel}}(R)$
21	1	9.61	0.000 918	0.764	0.079 5	—	—
21	3	9.75	0.000 918	0.480	0.049 2	0.338	0.020 0
21	6	9.68	0.000 918	0.376	0.038 8	0.241	0.010 2
14	6	9.47	0.000 846	0.381	0.040 2	0.242	0.010 4
7	6	9.61	0.000 991	0.542	0.056 4	0.242	0.010 3
7	1	9.55	0.000 991	0.904	0.094 7	—	—

注:“—”表示无数据。

其中: p ——测量样品的次数, $p=6$;

n ——测量标准的总次数, $n=21$;

u ——标准不确定度值;

s ——残差标准偏差;

A_i ——标准浓度点测定的响应值;

$\bar{c}$ ——校准曲线各标准点的平均值, $\mu\text{g/L}$;

c_0 ——样品中高氯酸盐含量的平均值, $\mu\text{g/L}$;

A ——该浓度点带入回归方程计算的响应值;

c_i ——实际校准曲线各点质量浓度, $\mu\text{g/L}$ 。

将以上数据代入式(6)~式(8)得出: $s = 0.000\ 918$; $u = 0.376$; $c_0 = 9.68\ \mu\text{g/L}$; $u_{\text{rel}}(L) = 0.038\ 8$ 。

2.2.4 样品重复性测量引入的相对标准不确定度 $u_{\text{rel}}(R)$

根据6次重复性样品测量结果,如表3所示,计算出试验标准差为 $S_m = 0.241$,平均值为 $c_0 = 9.68\ \mu\text{g/L}$,则重复性测量引入的相对标准不确定度如式(9)。

$$u_{\text{rel}}(R) = \frac{S_m}{\sqrt{n} \times c_0} = \frac{0.241}{\sqrt{6} \times 9.68} = 0.010\ 2 \quad (9)$$

2.2.5 标准溶液及样品不同次数的重复性测量引入的相对标准不确定度对比评定

对标准溶液及样品几种不同重复性测量,校准曲线拟合和样品重复性测量引入的相对标准不确定度进行对比评定,按照2.2.3和2.2.4评定方法进行计算。每个标准点测量1次和样品测量1次,校准曲线拟合引入的不确定度较大;每个标准点平行测量3次和样品测量6次,校准曲线拟合引入的不确定度较小。样品测量6次比3次引入的不确定度小,如表4所示。

2.2.6 回收率引入的相对标准不确定度 $u_{\text{rel}}(H)$

对水样进行加标回收,测定回收率低、高浓度 12 份样品的平均回收率 $\bar{R} = 102.5\%$,标准偏差为 $S_R = 0.0439$,平均值的标准偏差为 $u(\bar{R}) = S_R / \sqrt{12} = 0.0439 / \sqrt{12} = 0.0127$,则回收率引入的相对标准不确定如式(10)。

$$u_{\text{rel}}(H) = \frac{u(\bar{R})}{\bar{R}} = \frac{0.0439}{\sqrt{12} \times 1.025} = 0.0124 \quad (10)$$

对计算结果进行显著性检验(t 检验)。根据式(11),当置信概率为 95%,自由度为 11 时,查《测量不确定度评定与表示》(JJF 1059.1—2012)附录 B^[23], t 分布临界值 $t_{0.95}(11) = 2.20$,检测值 $t = 1.97 \leq 2.20$,与回收率 100%无显著性差异,测量结果不采用修正因子^[18]。

$$t = |1 - \bar{R}| / u(\bar{R}) = 1.97 \quad (11)$$

2.2.7 仪器稳定性引入的相对标准不确定度 $u_{\text{rel}}(I)$

查阅 ICS-1000 离子色谱仪的有效校准证书,仪器短期稳定性(30 min 内)的校准结果为 1.1%,采用 B 类评定,按照均匀分布,选取包含因子 $k = \sqrt{3}$ ^[29],则由仪器稳定性引入的相对标准不确定度如式(12)。

$$u_{\text{rel}}(I) = 1.1\% / \sqrt{3} = 0.00635 \quad (12)$$

2.2.8 样品稳定性引入的相对标准不确定度 $u_{\text{rel}}(A)$

考虑样品采集后,不能立即测定,在保存过程可能影响水中高氯酸盐的稳定性。为了测定样品放置过程稳定性引入的不确定度,将其中 1 份水样分成 8 份,于 0~4℃ 冷藏且密封保存,分别放置 0、2、4、6、10、15、21、28 d 后进行测量,每份样品平行测定 6 次,以每份样品测定的平均值作为稳定性检测数据,则测定的高氯酸盐的质量浓度分别为 9.68、9.54、9.75、9.79、9.84、9.72、9.83、9.90 $\mu\text{g/L}$ 。在稳定性变化趋势不明显时,采用趋势分析法进行稳定性检验^[26],以测定的高氯酸盐特性量值(Y)与保存时间(X),拟合成 1 条直线,即 $Y = 0.0082X + 9.6677$,斜率 $\beta_1 = 0.0082$,截距 $\beta_0 = 9.6677$ [式(13)~式(14)]。

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \beta_0 - \beta_1 X_i)^2}{n - 2} \quad (13)$$

$$s(\beta_1) = \frac{S}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}} \quad (14)$$

其中: S ——直线上的每点标准偏差;
 $s(\beta_1)$ ——直线斜率的不确定度;
 X_i ——第 i 个时间点;
 Y_i ——第 i 个时间点的测量值;
 β_1 ——直线的斜率;
 β_0 ——直线的截距;
 $\bar{X}$ ——时间的平均值。

将以上数据代入式(13)和式(14)得出: $S = 0.0836$, $s(\beta_1) = 0.00320$ 。

用 t -检验进行判断,当置信概率为 95%,自由度为 $n-2$,查表 $t_{(0.95, n-2)} = 2.45$, $|\beta_1| < t_{(0.95, n-2)} \times s(\beta_1)$,表明斜率不显著,没有观察到不稳定性。说明 4℃ 冷藏保存条件下,该样品在 28 d^[12] 的保存期内比较稳定。测得高氯酸盐的所有质量浓度平均值 $\bar{Y} = 9.76$,则样品稳定性引入的相对标准不确定如式(15)。

$$u_{\text{rel}}(A) = \frac{s(\beta_1) \times 28}{\bar{Y}} = \frac{0.00320 \times 28}{9.76} = 0.00918 \quad (15)$$

2.3 合成相对标准不确定度 (u_{crel})

经过综合分析,将各不确定度分量汇总,如图 2 所示,得出合成相对标准不确定度如式(16)。

$$u_{\text{crel}} = \sqrt{\frac{u_{\text{rel}}^2(S) + u_{\text{rel}}^2(X) + u_{\text{rel}}^2(L) + u_{\text{rel}}^2(R) + u_{\text{rel}}^2(I) + u_{\text{rel}}^2(A)}{0.015^2 + 0.0191^2 + 0.0388^2 + 0.0102^2 + 0.00635^2 + 0.00918^2}} = 0.0482 \quad (16)$$

2.4 测量结果报告

根据设定包含因子 $k = 2$,并采用置信水平 $P = 95\%$,可得出扩展不确定度(U)如式(17)。

$$U = c_0 \times u_{\text{crel}} \times k = 9.68 \times 0.0482 \times 2 = 0.93 (\mu\text{g/L}) \quad (17)$$

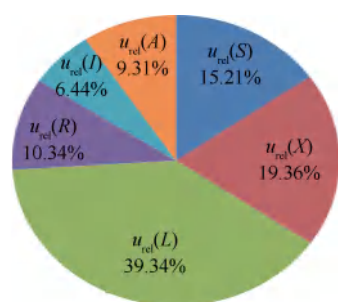


图2 各不确定度分量结果占比

Fig. 2 Proportion of Each Uncertainty Component Result

即样品中高氯酸盐测定结果报告为 $(9.68 \pm 0.93) \mu\text{g/L}$ ($k=2$)。

本次测定结果回收率和精密度均符合《生活饮用水标准检验方法 第五部分:无机非金属指标》(GB/T 5750.5—2023)离子色谱法-氢氧根系统淋洗液标准方法规定,即本次测定结果可靠有效。在试验过程中,测量样品的不确定度受多种因素影响,各分量贡献各不相同。研究显示,该方法中校准曲线拟合和标准溶液配制过程2个分量贡献最大,这一点与其他多数关于离子色谱法不确定度评定的文献^[14-16]所述一致。提示标准曲线拟合和标准溶液配制是整个试验过程比较关键的步骤。主要因为校准曲线拟合引入的不确定度影响因素较多,与标准溶液、曲线、样品均有关联;标准溶液配制过程会用到较多的量器具且步骤繁多,同时还受到温度的影响。标准物质和样品重复性测量贡献其次;仪器稳定性和样品稳定性贡献相对较小。陈斌鸿^[14]研究显示样品中氯化物的结果为 $(0.166 \pm 0.0095) \text{ mg/L}$,赵莹等^[16]研究显示,样品中5种消毒副产物的结果为溴酸盐 (2.00 ± 0.075) 、亚氯酸盐 (12.6 ± 0.35) 、氯酸盐 (9.41 ± 0.24) 、二氯乙酸 (2.04 ± 0.062) 、三氯乙酸 $(0.99 \pm 0.054) \text{ mg/L}$ ($k=2$)。提示高氯酸盐比其他离子引入的不确定度要大,主要原因可能是样品含量较低,线性值为 $5 \sim 140 \mu\text{g/L}$,样品含量趋近于校准曲线的下端。其样品测试浓度与校准曲线浓度点的平均值差方较大,相应的不确定度就会越大。这与朱良琪等^[30]研究不确定分析提法一致。陈成瑶等^[17]研究显示饮用水中高氯酸盐的结果为 $(0.101 \pm 0.005) \text{ mg/L}$ ($k=2$),其中因仪器淋洗液不同,仪器稳定性引入的不确定度都较小。但合成相对不确定度比本文研究的结果要小,原因可能是陈成瑶等^[17]研究中,未考虑本文研究的

校准曲线拟合引入的相对标准不确定度;本文样品含量较低。因此,在实际检测时,建议将待测物的浓度尽可能设置在校准曲线线性范围的中间段^[31],特别是高准确度的检测。

本文通过标准溶液及样品不同次数的重复性测定综合对比评定。根据2.2.5研究显示,标准溶液和样品的测量次数均为1次时,校准曲线拟合引入的不确定度较大;随着标准溶液和样品的测量次数增加,校准曲线拟合引入的不确定度值逐渐减小。样品重复性测量6次比3次引入的不确定度小,试验标准差测量6次比3次小,因此,建议增加标准溶液和样品测定次数,相应的不确定度能有效降低。

试验过程中,标准物质本身不确定度值对结果的影响,应综合考虑检测要求和成本,购买相应的有证标准物质^[32]。在配制标准溶液过程中,标准浓度的选取;移液管、移液器、容量瓶等量器具的使用,都会引入相异的不确定度。根据2.2.2研究显示,在使用移液器配制校准曲线时,取样大体积比小体积引入的不确定度要小,所以稀释时如果条件允许,尽量取大一点的体积稀释和配制校准曲线。研究还发现,5 mL移液器在2 500、5 000 μL 检定点容量允差分别为0.5%、0.6%,这两点引入的不确定度较小。因此,移液器配制标准曲线时,建议各标准点吸取体积尽量多设置为2.5~5 mL。另外对使用的量器具须进行定期检定。

3 结语

建立了离子色谱法分析生活饮用水中高氯酸盐含量的测量不确定度评定模型,分析了测试过程的各个要素和引入的不确定度分量,通过各相对不确定的评定结果,其中校准曲线拟合(39.34%)和标准溶液配制过程(19.36%)引入的相对标准不确定度最大,其次是标准物质(15.21%)和样品重复性测量(10.34%)引入的不确定度,仪器稳定性(6.44%)和样品稳定性(9.31%)引入的不确定度较小。因此,在实际检测中,选择适合的标准溶液;标准溶液配制时须合理使用量器具,尽量取大一点的体积稀释和配制校准曲线,移液器吸取体积宜为2.5~5.0 mL;校准曲线浓度点的平均值应尽可能和待测物浓度相接近;为提高样品测定的精密度,需等仪器稳定后再进行进样测定;增加标准溶液和样品的测

量次数;加强检测技术人员理论及操作技能的培训,从而减小测量的不确定度。

参考文献

- [1] 王艳鑫,张亚南,刘瑞朋,等.离子色谱法测定生活饮用水中4种阴离子含量的不确定度评定[J].食品安全质量检测学报,2020,11(8):2529-2534.
WANG Y X, ZHANG Y N, LIU R P, et al. Uncertainty evaluation of determination of 4 anions in drinking water by ion chromatography [J]. Journal of Food Safety and Quality, 2020, 11(8): 2529-2534.
- [2] 李学莲,杨春雷.基于离子色谱法的水中四种阴离子测定研究[J].当代化工,2018,47(10):2245-2249.
LI X L, YANG C L. Determination of four anions in water by ion chromatography [J]. Contemporary Chemical Industry, 2018, 47(10): 2245-2249.
- [3] 上官佳,吴海智,梁军,等.婴幼儿乳粉中新兴持久性有机污染物的来源、检测技术及污染水平研究进展[J].食品与机械,2023,39(2):227-235.
SHANGGUAN J, WU H Z, LIANG J, et al. Progress on source, detection technique and pollution level of the new persistent organic pollutant in infant milk powder [J]. Food and Machinery, 2023, 39(2): 227-235.
- [4] 冷安芹,袁悦,薛莹,等.2022年四川省市售蔬果中高氯酸盐和氯酸盐检测结果分析[J].预防医学情报杂志,2023,39(12):1508-1512,1519.
LENG A Q, YUAN Y, XUE Y, et al. Test results of perchlorate and chlorate in the vegetables and fruits in Sichuan Province [J]. Journal of Preventive Medicine Information, 2023, 39(12): 1508-1512, 1519.
- [5] 夏添.离子色谱法测定饮用水中低浓度高氯酸盐方法研究[J].科学技术创新,2023,27(7):82-86.
XIA T. Research on ion chromatography method for determining low concentration perchlorate in drinking water [J]. Scientific and Technological Innovation, 2023, 27(7): 82-86.
- [6] JIANG S, LI YS, SUN B. Determination of trace level of perchlorate in Antarctic snow and ice by ion chromatography coupled with tandem mass spectrometry using an automated sample on-line preconcentration method [J]. Chinese Chemical Letters, 2013, 24(4): 311-314.
- [7] 宋正规,沈坚,张爱芝,等.高氯酸盐毒性及其检测方法研究进展[J].食品工业科技,2018,39(8):341-347,351.
SONG Z G, SHEN J, ZHANG A Z, et al. Research progress in toxicological effects of perchlorate and its detection methods [J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(8): 341-347, 351.
- [8] 游咏妍.抑制型电导检测离子色谱法测定饮用水中高氯酸盐[J].化学分析计量,2023,32(5):47-50.
YOU Y Y. Determination of perchlorate in drinking water by suppressed conductivity detection ion chromatography [J]. Chemical Analysis Metrology, 2023, 32(5): 47-50.
- [9] 覃芳葵,翟一凡,罗晓飞,等.成都市饮用水中高氯酸盐分布特征与人群健康风险分析[J].现代预防医学,2024,51(17):3218-3222.
QIN F K, ZHAI Y F, LUO X F, et al. Distribution characteristics of perchlorate in drinking water in Chengdu and analysis of health risks to the population [J]. Modern Preventive Medicine, 2024, 51(17): 3218-3222.
- [10] 马红玉,王亚楠,杨蔚,等.我国中东部城镇水源高氯酸盐的点源分布及潜在来源[J].环境科学学报,2023,43(11):105-114.
MA H Y, WANG Y N, YANG W, et al. Perchlorate pollution in urban water sources of central and eastern China: Point sources and potential origins [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2023, 43(11): 105-114.
- [11] 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管理委员会.生活饮用水卫生标准:GB 5749—2022[S].北京:中国标准出版社,2022.
State Administration for Market Regulation of the People's Republic of China, National Standardization Administration of the People's Republic of China. Standard for drinking water quality: GB 5749—2022 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.
- [12] 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管理委员会.生活饮用水标准检验方法 第5部分:无机非金属指标:GB/T 5750.5—2023[S].北京:中国标准出版社,2023.
State Administration for Market Regulation of the People's Republic of China, National Standardization Administration of the People's Republic of China. Standard examination methods for drinking water—Part 5: Inorganic nonmetallic indicators: GB/T 5750.5—2023 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2023.
- [13] 平伟光.离子色谱法测定水质中的无机阴离子[J].山西化工,2022,42(3):79-80.
PING W G. Determination of inorganic anions in water by ion chromatography [J]. Shanxi Chemical Industry, 2022, 42(3): 79-80.
- [14] 陈斌鸿.离子色谱法对饮用水中氟化物测定的不确定度分析[J].山东化工,2020,49(11):97-99,102.
CHEN B H. Uncertainty evaluation for determination of fluoride in drinking water by ion chromatography [J]. Shandong Chemical Industry, 2020, 49(11): 97-99, 102.
- [15] 刘苗,杨荣,甘平胜,等.离子色谱法测定生活饮用水中氯酸盐和亚氯酸盐的不确定度分析[J].广州化工,2022,50(19):136-138,158.
LIU M, YANG R, GAN P S, et al. Uncertainty evaluation for determination of chlorate and chlorite in drinking water by ion chromatography [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2022, 50

- (19): 136–138, 158.
- [16] 赵莹, 尹丹阳. 离子色谱法同时测定饮用水中 5 种消毒副产物的不确定度评定[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(9): 3021–3028.
- ZHAO Y, YIN D Y. Uncertainty evaluation for the simultaneous determination of 5 kinds of disinfection by-products in drinking water by ion chromatography [J]. Journal of Food Safety and Quality, 2020, 11(9): 3021–3028.
- [17] 陈成瑶, 张泾凯. 离子色谱法测定饮用水中高氯酸盐不确定度评定[J]. 实验室检测, 2024, 2(7): 157–160.
- CHEN C Y, ZHANG J K. Evaluation of uncertainty in the determination of perchlorate in drinking water by ion chromatography [J]. Laboratory Testing, 2024, 2(7): 157–160.
- [18] 梁馨予, 庞桂娇. 电感耦合等离子体质谱法测定辣椒镉含量中不确定度的评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 23(11): 8952–8957.
- LIANG X Y, PANG G J. Evaluation of uncertainty for the determination of cadmium in peppers by inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Journal of Food Safety and Quality, 2020, 23(11): 8952–8957.
- [19] 胡婷婷, 陆鸣, 刘洋, 等. 如何进行测量不确定度的评定[J]. 现代科学仪器, 2022, 39(4): 74–79.
- HU T T, LU M, LIU Y, et al. How to evaluate the measurement uncertainty[J]. Modern Scientific Instruments, 2022, 39(4): 74–79.
- [20] 汪廷彩, 谭靖怡, 蔡展帆, 等. 离子色谱法测定包装饮用水中的溴酸盐不确定度评定[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(12): 2993–2997.
- WANG T C, TAN J Y, CAI Z F, et al. Uncertainty evaluation for the determination of bromate in packaged drinking water by ion chromatography [J]. Journal of Food Safety and Quality, 2018, 9(12): 2993–2997.
- [21] 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.
- National Standardization Administration of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Evaluation and representation of measurement uncertainty: GB/T 27418—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [22] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 常用玻璃量器: JJG 196—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Working glass container: JJG 196—2006[S]. Beijing: Standards Press of China, 2006.
- [23] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 测量不确定度评定与表示: JJF 1059.1—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Evaluation and expression of uncertainty in measurement: JJF 1059.1—2012[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.
- [24] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 移液器检定规程: JJG 646—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Verification regulation of locomotive pipette: JJG 646—2006[S]. Beijing: Standards Press of China, 2006.
- [25] 中国合格评定国家认可委员会. 化学分析中不确定度的评估指南: CNAS-GL006: 2019[S]. 北京: 中国计量出版社, 2019.
- China National Accreditation Service for Conformity Assessment. Guidance on quantifying uncertainty in chemical analysis: CNAS-GL006: 2019[S]. Beijing: China Metrology Press, 2019.
- [26] 中华人民共和国国家市场监督管理总局. 标准物质的定值及均匀性、稳定性评估: JJF 1343—2012[S]. 北京: 中国计量出版社, 2022.
- State Administration for Market Regulation of the People's Republic of China. Characterization, homogeneity and stability assessment of reference materials: JJF 1343—2012[S]. Beijing: China Metrology Press, 2022.
- [27] 李流川, 李德华, 常虹, 等. 电感耦合等离子体发射光谱法测定油条中铝含量的不确定度评定[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(4): 1443–1447.
- LI L C, LI D H, CHANG H, et al. Evaluation of uncertainty in determination of aluminum in deep-fried dough sticks by inductively coupled plasma-optical emission spectrometry [J]. Journal of Food Safety and Quality, 2021, 12(4): 1443–1447.
- [28] 苑金鹏, 李恩霞, 王晓利, 等. 离子色谱法测定饮用水水源水中 4 种阴离子的不确定度评定[J]. 化学分析计量, 2022, 31(10): 77–81.
- YUAN J P, LI E X, WANG X L, et al. Uncertainty evaluation for determination of four anions in drinking source water by ion chromatography[J]. Chemical Analysis and Meterage, 2022, 31(10): 77–81.
- [29] 辛希奕. 电感耦合等离子体质谱法测定儿童洗手液中 17 种有害元素的不确定度评定[J]. 化学分析计量, 2022, 31(5): 89–94.
- XIN X Y. Evaluation of uncertainty of determination of 17 toxic elements in children's hand sanitizer by ICP-MS [J]. Chemical Analysis and Metrology, 2022, 31(5): 89–94.
- [30] 朱良琪, 邹晶晶, 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.

- [31] 谭曜, 许赛慧, 计红, 等. ICP-MS 法检测食品中铝含量的不确定度评价[J]. 中国口岸科学技术, 2020(10): 11-16.
- TAN Y, XU S H, JI H, et al. Evaluation of uncertainty in determination aluminum content in food by the method of ICP-MS [J]. China Port Science and Technology, 2020(10): 11-16.
- [32] 唐媛媛, 庄姜云, 林铜锐, 等. 气相色谱法测定蜂蜜中马拉硫磷残留量的不确定度评定[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 22(11): 8578-8353.
- TANG Y Y, ZHUANG J Y, LIN J R, et al. Uncertainty evaluation for the determination of malathion residue in honey by gas chromatography [J]. Journal of Food Safety and Quality, 2020, 22(11): 8578-8353.
- (上接第 92 页)
- GONG L, WANG Q B, LIU Z Y, et al. Sludge bulking control and microbial community structure analysis of a large papermaking wastewater treatment plant [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(6): 1761-1768.
- [2] 高春娣, 韩颖璐, 程丽阳, 等. 温度冲击引起的丝状菌污泥膨胀菌群特征[J]. 中国环境科学, 2022, 42(6): 2680-2689.
- GAO C D, HAN Y L, CHENG L Y, et al. Microbial community characteristics of filamentous sludge bulking at temperature shocking environment [J]. China Environmental Science, 2022, 42(6): 2680-2689.
- [3] 杨阔, 林慧敏, 陈坦, 等. 膨胀污泥中主要丝状菌及生物调控措施研究进展[J]. 应用化工, 2023, 52(12): 3365-3370.
- YANG K, LIN H M, CHEN T, et al. Research progress on dominant filamentous bacteria and biological control measures in bulking sludge [J]. Applied Chemical Industry, 2023, 52(12): 3365-3370.
- [4] 张惊宇, 孙乐, 程岩, 等. 寒冷地区污水处理厂保温设计及运维[J]. 广东化工, 2023, 50(9): 182-183.
- ZHANG J Y, SUN L, CHENG Y, et al. Thermal insulation design and operation of sewage treatment plant in cold area[J]. Guangdong Chemical Industry, 2023, 50(9): 182-183.
- [5] 安莹, 张慧敏, 刘韵, 等. 高负荷活性污泥工艺污泥膨胀成因及控制研究[J]. 中国环境科学, 2025, 45(2): 768-775.
- AN Y, ZHANG H M, LIU Y, et al. Causes and control of sludge bulking in high load activated sludge process [J]. China Environmental Science, 2025, 45(2): 768-775.
- [6] 张涛, 余冉. 低温对市政污水生物处理的影响及对策[J]. 净水技术, 2022, 41(6): 24-29, 38.
- ZHANG T, YU R. Influence and countermeasures of low temperature on biological process for municipal wastewater treatment [J]. Water Purification Technology, 2022, 41(6): 24-29, 38.
- [7] 苏高新, 齐嵘, 肖淑敏, 等. 微丝菌致膨的种群动态及关键影响因素[J]. 环境科学, 2024, 45(11): 6765-6774.
- SU G X, QI R, XIAO S M, et al. Population dynamics and key influencing of *Microthrix parvicella* caused sludge bulking [J]. Environmental Science, 2024, 45(11): 6765-6774.
- [8] 罗松, 周飞. CASS 工艺在某小型污水处理厂的运行调试[J]. 净水技术, 2018, 37(12): 98-102.
- LUO S, ZHOU F. Operation commissioning of CASS process in a small sewage treatment plant [J]. Water Purification Technology, 2018, 37(12): 98-102.
- [9] 赵俏迪, 彭党聪, 姚倩, 等. 次氯酸钠控制城市污水处理厂微丝菌污泥膨胀[J]. 中国给水排水, 2018, 34(7): 21-25.
- ZHAO Q D, PENG D C, YAO Q, et al. Control of sludge bulking caused by *Microthrix parvicella* using sodium hypochlorite [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(7): 21-25.
- [10] 米闯, 谢丽, 周琪, 等. 膜生物反应器中污泥膨胀与生物泡沫的形成与控制研究进展[J]. 水处理技术, 2011, 37(6): 1-5.
- MI C, XIE L, ZHOU Q, et al. Review on the research development of the formation and control of sludge bulking and bio-foam in membrane bio-reactor [J]. Technology of Water Treatment, 2011, 37(6): 1-5.
- [11] 郝二成, 袁星, 阜崴. 污泥膨胀原因及控制措施研究[J]. 环境工程, 2017, 35(7): 18-22.
- HAO E C, YUAN X, FU W. Research on reason for sludge bulking and its control strategy [J]. Environment Engineering, 2017, 35(7): 18-22.
- [12] 康华, 王帆, 刘文爱, 等. A²O 工艺处理低温污水污泥膨胀及恢复机理研究[J]. 环境科学与技术, 2022, 45(6): 117-123.
- KANG H, WANG F, LIU W A, et al. Study on sludge bulking and recovery mechanism for low temperature sewage treatment by A²O process [J]. Environmental Science & Technology, 2022, 45(6): 117-123.
- [13] 白雪, 张荣兵, 顾剑, 等. 大型污水处理厂污泥膨胀原因分析及其控制方法[J]. 中国给水排水, 2011, 27(23): 31-35.
- BAI X, ZHANG R B, GU J, et al. Cause analysis and control of sludge bulking in large-scale WWTP [J]. China Water & Wastewater, 2011, 27(23): 31-35.
- [14] 黄潇, 谢诗源, 董文艺, 等. 进水冲击负荷对三级 AO 工艺处理城市污水效能影响[J]. 水处理技术, 2022, 48(9): 103-107.
- HUANG X, XIE S Y, DONG W Y, et al. Effect of influent shock loading on the efficiency of tertiary anoxic aerobic (AO) process treating municipal wastewater treatment [J]. Technology of Water Treatment, 2022, 48(9): 103-107.
- [15] 陆王烨, 陈悦, 李向阳, 等. A²O 工艺系统丝状菌膨胀原因分析及对策[J]. 工业用水与废水, 2023, 54(1): 37-41.
- LU W Y, CHEN Y, LI X Y, et al. Cause analysis and countermeasures of filamentous bacteria bulking in A²O process system [J]. Industrial Water & Wastewater, 2023, 54(1): 37-41.