

DOI: 10.16369/j.oher.issn.1007-1326.2021.02.021

·实验技术·

离子色谱法测定空气中氟化物质量浓度的不确定度评定

Uncertainty evaluation of method for determining airborne hydrogen fluoride in workplaces by ion chromatography

刘栋¹, 李妍²LIU Dong¹, LI Yan²

1. 陕西安科安全生产技术研究所有限公司, 陕西 西安 710065; 2. 陕西立方环保科技服务有限公司, 陕西 西安 710065

摘要:目的 建立和运用离子色谱法测定空气中氟化物质量浓度的不确定度评定方法。方法 依据国家职业卫生标准 GBZ/T 160.36—2004《工作场所空气有毒物质测定 氟化物》和 JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》的原理和方法,采用不确定度传播律对各输入分量不确定度进行逐层评定计算。结果 工作场所空气中氟化物的浓度为 0.52 mg/m³ 时,在 95% 的置信水平下,其扩展不确定度为 0.06 mg/m³ ($k=2$)。评定结果表明,标准采样体积的合成不确定度为 0.394 L;氟化物质量浓度的合成不确定度为 0.075 9 μg/mL,其中标准工作曲线拟合对测量不确定度贡献最大。结论 该方法准确可靠,适用于离子色谱法测定空气中氟化物质量浓度的不确定度评定,测量过程中标准曲线拟合是重要质控点,对检测结果准确度的提高具有指导意义。

关键词:离子色谱法;氟化物;不确定度;职业卫生;分析;测定

中图分类号: O65; R134

文献标志码: A

文章编号: 1007-1326(2021)02-0219-05

引用: 刘栋, 李妍. 离子色谱法测定空气中氟化物质量浓度的不确定度评定 [J]. 职业卫生与应急救援, 2021, 39 (2): 219-223.

氟化物在工作场所空气中浓度超过职业接触限值时,可能会产生不良健康效应,对人体的呼吸道、皮肤和眼部具有刺激作用,严重者会造成肺水肿和牙齿酸蚀症,甚至对人体肝脏细胞有致毒作用^[1-4]。氟化物在空气中富集对饮用水、土壤也会造成一定污染。因此在化学定量分析过程中,有效地评定氟化物测量结果的可信度显得尤为重要。

在职业卫生检测与评价活动中,化学定量分析的结果用于判定工作场所所有害因素是否符合法定限值,也可为政府部门做出执法决策提供依据。所以,实验室有必要建立质量控制程序和计量溯源性。在化学分析中,测量不确定度是用于度量测量结果的可信度和可接受性的重要指标^[5-6],这一参数是表征合理赋予被测量值的分散性。本次研究的离子色谱法测定空气中氟化物含量的不确定度评定,包括采样过程不确定度评定和实验分析检测过程不确定度评定,采用不确定度传播律逐层评定法评定,相关文献报道少见。我们依据 GBZ/T 160.36—2004《工作场所空气中有毒物质测定 氟化物》^[7]和 JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与

表示》^[8]对分析结果进行了不确定度评定,分析了采样过程和样品中氟化物含量的不确定度来源,根据测量不确定度评定结果确定离子色谱法测定氟化物含量的重要质控点,以提高检测结果的准确性和科学性。

1 材料与方法

1.1 主要仪器设备与试剂

ICS-600 型离子色谱仪(美国戴安公司); QC-4S 型防爆大气采样仪(北京市劳动保护科学研究所); DYM3 型空盒气压表(长春气象仪器研究所); 单标线吸管(10 mL, A 级); 刻度吸管(10 mL, A 级); 容量瓶(100 mL, A 级)。氟标准溶液[GBW(E) 080187, 100 mg/L, 核工业北京化工冶金研究院]; 吸收液为 190.8 mg/L 的 Na₂CO₃ 和 142.8 mg/L 的 NaHCO₃ 的混合溶液; 实验用水为去离子水。

1.2 仪器工作参数

色谱柱: Dionex IonPacTMAS18 型阴离子保护柱(4mm × 250 mm); 流动相: 吸收液; 柱温: 室温; 流速: 1.0 mL/min; 进样量 10 μL; 检测器: 电导检测器。

作者简介: 刘栋(1987—), 男, 硕士, 工程师

1.3 实验原理

空气中气态氟化物与弱碱性吸收液反应,生成氟离子盐类化合物,氟离子经由阴离子色谱柱离子交换,电导检测器检测,色谱峰面积定量。

2 结果

2.1 数学模型

2.1.1 标准采样体积

标准采样体积^[9]按公式(1)计算:

$$V_0 = V_t \times \frac{293}{273 + T} \times \frac{P}{101.3}; \quad (1)$$

式中: V_0 ——标准采样体积,L; V_t ——采样体积,L; T ——采样点温度,℃; P ——采样点大气压,kPa。

2.1.2 氟化物质量浓度

空气中氟化物质量浓度按公式(2)计算:

$$C = \frac{5 \times c}{V_0} \quad (2)$$

式中: C ——空气中氟化物的质量浓度,mg/m³;
5——吸收液体积,mL; c ——测得样品溶液中氟化物的质量浓度,μg/mL; V_0 ——标准采样体积,L。

2.2 测量不确定度的来源

由公式(1)和(2)分析可知,离子色谱法测定空气中氟化物质量浓度的不确定度主要来源于采样过程和样品中氟的分析检测。标准采样体积不确定度包括:采样体积准确性、采样环境温度和采样大气压 3 个分量;样品中氟化物质量浓度不确定度来源于实验环境、标准溶液、标准溶液稀释和标准曲线绘制等分量。

2.3 分量不确定度评定

2.3.1 标准采样体积不确定度评定

标准采样体积不确定度来源于实际采样体积标准不确定度 $u(V)$ 、采样环境温度标准不确定度 $u(T)$ 和采样大气压标准不确定度 $u(P)$ 3 个输入分量。实际样品采集时,工作场所环境温度 $T = 24.2$ ℃,大气压 $P = 925.7$ kPa,以 1.0 L/min 流量采集 15 min 空气样品,实际采样体积 $V_t = 15$ L,标准采样体积为 $V_0 = 13.5$ L。

(1) 实际采样体积标准不确定度 $u(V)$ 。

实际采样体积标准不确定度包含采样流量和采样时间分量。采样流量标准不确定度:按照 QC-4S 型防爆大气采样仪出厂技术参数,得知采样仪的负载流量的最大允许误差为 $\leq \pm 5\%$ 。假设为均匀分布,则由采样流量引入的 B 类相对标准不确定度: $u_{\text{rel}}(Q) = \frac{5\%}{\sqrt{3}} = 0.029$ 。

采样时间标准不确定度:按照 QC-4S 型防爆大气采样仪出厂技术参数,得知采样仪的计时误差的计量性能要求为 $\pm 0.2\%$ 。假设为均匀分布,则由采样时间引入的 B 类相对标准不确定度: $u_{\text{rel}}(t) = \frac{0.2\%}{\sqrt{3}} = 0.0012$ 。

故采样体积引入标准不确定度为: $u(V) = V_t \times \sqrt{u_{\text{rel}}(Q)^2 + u_{\text{rel}}(t)^2} = 0.433$ L。

(2) 采样环境温度标准不确定度 $u(T)$

依据 JJG 205—2005《机械式温湿度计检定规程》^[10]得知, JFY-2 型矿井通风参数检测仪的温度示值误差不超过 ± 2.0 ℃。假设为均匀分布,则由环境温度引入的 B 类标准不确定度: $u(T) = \frac{2.0}{\sqrt{3}} =$

1.155(℃)。

(3) 采样大气压标准不确定度 $u(P)$ 。

采样大气压数值通过空盒气压表读数得知,由该环境参数检测设备的检定证书结果可知,该设备温度系数为 0.00 hPa/℃,故不考虑温度分量对其不确定度的影响;空盒气压表经过示值、温度和补充修正后,其最大示值误差为 0.20 kPa。假设为均匀分布,则由大气压引入的 B 类相对标准不确定度: $u(P) = \frac{0.20}{\sqrt{3}} = 0.115$ (kPa)。

(4) 标准采样体积的合成标准不确定度 $u(V_0)$ 。

标准采样体积的合成标准不确定度采用不确定度传播律合成;由于标准采样体积的 3 个输入分量采样体积 V 、大气压 P 和温度 T 之间无相关性,即不考虑其协方差,故 $r(V, T, P) = 0$,则不确定度传播律公式(3)可以简化成公式(4);式中 $\varphi f / \varphi x_i$ 为测量函数对于输入量的偏导数,称为灵敏系数,用符号 c_i 表示。

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left[\frac{\varphi f}{\varphi x_i} \right]^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\varphi f}{\varphi x_i} \frac{\varphi f}{\varphi x_j} r(x_i, x_j) u(x_i) u(x_j)} \quad (3)$$

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left[\frac{\varphi f}{\varphi x_i} \right]^2 u^2(x_i)} \quad (4)$$

式中: $u_c(y)$ ——合成标准不确定度; x_i, x_j ——表示第 i 个和第 j 个输入分量的估计值, $i \neq j$; N ——输入分量的数量; $\varphi f(\varphi x_i)$ ——输入分量 x_i 的灵敏系数; $u(x_i)$ ——输入量 x_i 的标准不确定度; $u(x_j)$ ——输入量 x_j 的标准不确定度; $r(x_i, x_j)$ ——输入量 x_i 与 x_j 的相关系数; $r(x_i, x_j) u(x_i) u(x_j)$ ——输入量 x_i 与 x_j 之间的协方差。

根据公式(1),可求得各分量的灵敏系数 c_i 分别为:

$$c_v = \frac{\partial V_0}{\partial V} = \frac{293}{273+T} \times \frac{P}{101.3} = 0.901; c_P =$$

$$\frac{\partial V_0}{\partial P} = V_t \times \frac{293}{273+T} \times \frac{1}{101.3} = 0.146 \text{ L/kPa};$$

$$c_T = \frac{\partial V_0}{\partial T} = -V_t \times \frac{293}{(273+T)(273+T)} \times \frac{P}{101.3} \\ = -0.045 \text{ L/} (^{\circ}\text{C})^2。$$

$$\text{则: } u(V_0) = \sqrt{c_v^2 u(V)^2 + C_P^2 u(P)^2 + C_T^2 u(T)^2} \\ = 0.394 \text{ L}。$$

2.3.2 样品中氟化物质量浓度的不确定度评定

样品中氟化物质量浓度的不确定度主要来源:氟化物标准溶液引入的不确定度 $u(c_{\text{标}})$ 、标准工作曲线拟合引入的不确定度 $u(\text{SC})$ 、检测时离子色谱仪 $u(\text{ICS})$ 和样品重复性测定引入的不确定度 $u(x)$ 等分量。

(1) 氟标准溶液标准不确定度评定 $u(c_{\text{标}})$ 。

标准系列溶液引入的不确定度含有 3 个输入量,分别为标准储备液、配制的标准应用液和标准系列。采用逐层评定法对各分量的不确定度进行评定。

标准应用液配制过程涉及的量具有 10 mL 单标线吸管和 100 mL 容量瓶;标准系列配制过程中用到 5 mL 刻度吸管、10 mL 刻度吸管和 10 mL 容量瓶。实验室器具均为 A 级,且单标线吸管和刻度吸管均为流出式。依据 JJG 196—2006《常用玻璃量器检定规程》^[11]得知,10 mL 单标线吸管、100 mL 容量瓶、5 mL 刻度吸管、10 mL 刻度吸管和 10 mL 容量瓶的容量允差分别为 $\pm 0.05 \text{ mL}$ 、 $\pm 0.10 \text{ mL}$ 、 $\pm 0.025 \text{ mL}$ 、 $\pm 0.020 \text{ mL}$ 和 $\pm 0.020 \text{ mL}$;实验计量量具的量值在日常实验室内部检查时出现极端值的可能性很低,认为其估计值更接近于中间值而不是两边界值;同时在研制实验室器具时,采用同行共识原则,欧洲分析化学中心认为其服从三角分布,所以其包含因子 $k = \sqrt{6}$ 。

分析检测过程中,实验环境温度为 $(20 \pm 3)^{\circ}\text{C}$,假设氟标准溶液体积膨胀系数近似于水的体积膨胀,其温度膨胀系数为 $2.1 \times 10^{-4} / ^{\circ}\text{C}$,认为其属于矩形分布,包含因子 $k = \sqrt{3}$ 。另外,实验室常用玻璃器具大多数为高硼硅材质,属于硬质玻璃,其热膨胀系数远小于水的体积膨胀系数,故环境温度对实验室玻璃器具体积的影响可忽略不计。

标准储备液引入的相对标准不确定度 $u_{\text{rel}}(c_{\text{标1}})$:标准储备液证书显示其浓度为 $100 \mu\text{g/mL}$,扩展不确定度为 $1.2 \mu\text{g/mL}$ ($k = 2$),即半宽度 $\alpha = 1.2/2 = 0.6 (\mu\text{g/mL})$,则其相对标准不确定度 $u_{\text{rel}}(c_{\text{标1}}) =$

$0.6/100 = 0.6\%$ 。

标准应用液配制引入的标准不确定度 $u(c_{\text{标2}})$:用 10 mL 单标线吸管移取 10.00 mL 氟标准储备液于 100 mL 容量瓶中,再用吸收液稀释定容,配制成浓度为 $10.00 \mu\text{g/mL}$ 氟化物标准应用液。

标准储备液稀释过程中各分量引入的标准不确定度见表 1。

表 1 配制标准应用液引入的测量不确定度评定

实验室容器	容器允差标准 不确定度/mL	体积膨胀标准 不确定度/mL	合成标准 不确定度/mL
10 mL 单标线吸管	$0.05/\sqrt{6}$	$10 \times 2.1 \times 10^{-4} \times 3/\sqrt{3}$	0.020 7
100 mL 容量瓶	$0.10/\sqrt{6}$	$100 \times 2.1 \times 10^{-4} \times 3/\sqrt{3}$	0.038 6

由上可得,配制标准应用液引入的标准不确定度为:

$$u(c_{\text{标2}}) = 10 \times$$

$$\sqrt{[u_{\text{rel}}(c_{\text{标1}})]^2 + \left[\frac{u(V_{10})}{10}\right]^2 + \left[\frac{u(V_{100})}{100}\right]^2}$$

$$= 10 \times \sqrt{[0.006 0]^2 + \left[\frac{0.020 7}{10}\right]^2 + \left[\frac{0.038 6}{100}\right]^2}$$

$$= 0.006 4 (\mu\text{g/mL})。$$

标准系列配制引入的标准不确定度 $u_{\text{rel}}(c_{\text{标3}})$:取 5 支 10 mL 容量瓶,用 5 mL 刻度吸管分别移取 0、1.00、3.00、5.00 mL 氟化物标准应用液,用 10 mL 刻度吸管移取 7.00 mL 氟化物标准应用液,用吸收液稀释定容至 10 mL 刻度,配制成浓度分别为 0、1.0、3.0、5.0、7.0 $\mu\text{g/mL}$ 标准系列,为了降低实验误差,对 $10.0 \mu\text{g/mL}$ 浓度水平的氟化物标准溶液直接测定。配制标准系列过程引入的标准不确定度详见表 2。

由此可得,氟标准溶液合成标准不确定度为:

$$u(c_{\text{标}}) =$$

$$\sqrt{0^2 + 0.010 3^2 + 0.010 8^2 + 0.007 9^2 + 0.022 0^2 + 0.006 4^2} \\ = 0.028 4 (\mu\text{g/mL})$$

(2) 标准工作曲线拟合引入的不确定度评定 $u(\text{SC})$ 。

将氟标准系列的每个标准使用液重复测定 3 次,检测结果见表 3。用最小二乘法拟合,标准工作曲线方程为 $y = 0.164 2 x - 0.031 8$,式中斜率 $a = 0.164 2$,截距 $b = -0.031 8$,相关系数 $R^2 = 0.999 3$ ($P < 0.01$)。

用测定标准系列的操作条件检测样品,重复测定 3 次,测得氟化物的质量浓度分别为 $1.416 8 \mu\text{g/mL}$ 、 $1.406 3 \mu\text{g/mL}$ 和 $1.392 7 \mu\text{g/mL}$,浓度平均值为 $1.405 3 \mu\text{g/mL}$ 。

标准工作曲线的剩余标准偏差(残余标准偏差)可由贝塞尔公式计算:

表 2 配制标准系列引入的测量不确定度评定

标准系列	实验室容器	使用容量/mL	容器允差标准不确定度/mL	体积膨胀标准不确定度/mL	合成标准不确定度 $u(c_{\text{标}})$ /μg/mL
STD1	5 mL 刻度吸管	0.00			0
	10 mL 容量瓶	10	$0.020/\sqrt{6}$	$10 \times 2.1 \times 10^{-4} \times 3/\sqrt{3}$	
STD2	5 mL 刻度吸管	1.00	$0.025/\sqrt{6}$	$1 \times 2.1 \times 10^{-4} \times 3/\sqrt{3}$	0.010 3
	10 mL 容量瓶	10	$0.020/\sqrt{6}$	$10 \times 2.1 \times 10^{-4} \times 3/\sqrt{3}$	
STD3	5 mL 刻度吸管	3.00	$0.025/\sqrt{6}$	$3 \times 2.1 \times 10^{-4} \times 3/\sqrt{3}$	0.010 8
	10 mL 容量瓶	10	$0.020/\sqrt{6}$	$10 \times 2.1 \times 10^{-4} \times 3/\sqrt{3}$	
STD4	5 mL 刻度吸管	5.00	$0.025/\sqrt{6}$	$5 \times 2.1 \times 10^{-4} \times 3/\sqrt{3}$	0.007 9
	10 mL 容量瓶	10	$0.020/\sqrt{6}$	$10 \times 2.1 \times 10^{-4} \times 3/\sqrt{3}$	
STD5	10 mL 刻度吸管	7.00	$0.05/\sqrt{6}$	$7 \times 2.1 \times 10^{-4} \times 3/\sqrt{3}$	0.022 0
	10 mL 容量瓶	10	$0.020/\sqrt{6}$	$10 \times 2.1 \times 10^{-4} \times 3/\sqrt{3}$	
STD6					0.006 4

表 3 标准工作曲线绘制

序号	标液浓度/(μg/mL)	峰面积/(μs·min)			平均值 \bar{S} /(μs·min)	$S - \bar{S}$ /(μs·min)
		S1	S2	S3		
1	0	0	0	0	0	0
2	1.00	0.139 7	0.137 7	0.138 5	0.138 6	0.138 6
3	3.00	0.443 0	0.437 3	0.436 9	0.439 1	0.439 1
4	5.00	0.773 2	0.767 0	0.762 1	0.767 4	0.767 4
5	7.00	1.112 8	1.101 0	1.111 3	1.108 4	1.108 4
6	10.00	1.637 6	1.630 9	1.629 9	1.632 8	1.632 8

$$S_R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [y_i - (ax_i + b)]^2}{n-2}}$$
$$= \sqrt{\frac{4.948 \times 10^{-3}}{6 \times 3 - 2}} = 0.017 6 (\mu\text{g/mL}),$$

式中： y_i ——标准工作曲线各标准物质浓度点对应的信号值； s ； x_i ——各标准物质浓度值，μg/mL； a ——标准曲线斜率； b ——标准曲线截距； n ——测定标准物质浓度点总次数，18。

线性最小二乘法拟合标准工作曲线引入的标准不确定度：

$$u(\text{SC}) = \frac{S_R}{a} \times \sqrt{\frac{1}{p} + \frac{1}{n} + \frac{(x_{\text{样品}} - \bar{x})^2}{\sum (x_i - \bar{x})^2}}$$
$$= 0.069 9 \mu\text{g/mL}$$

式中： $u(\text{SC})$ ——标准工作曲线引入的标准不确定度，μg/mL； S_R ——标准曲线剩余标准偏差，0.017 6； a ——标准曲线斜率，0.164 2； p ——采集样品重复测定次数，4 次； n ——测定标准物质浓度点总次数，18 次； $x_{\text{样品}}$ ——测定采集样品中氟化物的平均浓度，1.405 3 μg/mL； x_i ——各标准物质浓度值，μg/mL； \bar{x} ——标准系列氟化物浓度的平均值，4.333 3 μg/mL。

(3) 离子色谱仪引入的标准不确定度评定 $u(\text{ICS})$ 。

由检定证书上可知，检测仪器 ICS600 离子色谱仪的定量测量重复性相对标准偏差 $\text{RSD} = 0.03\%$ ，即相对扩展不确定度 $U_{\text{rel}} = 0.03\%$ ，按均匀分布计算，离子色谱仪的标准不确定度 $u(\text{ICS}) = 1.405 3 \times \frac{0.03\%}{\sqrt{3}} = 0.000 24 (\mu\text{g/mL})$ 。

(4) 样品测定引入的标准不确定度评定 $u(x)$ 。

由于本次检测对样品测定次数较少，采用 A 类极差法评定其标准不确定度。根据有限次数独立重复测量的一系列测量值中，得到检测结果最大值 $x_{\text{max}} = 1.416 8 \mu\text{g/mL}$ 、最小值 $x_{\text{min}} = 1.392 7 \mu\text{g/mL}$ ，根据测量次数 $n = 3$ 查极差系数 C_n 值表得知极差系数 $C_3 = 1.69$ ，代入下式计算求得实验标准偏差 s 。

$$s = \frac{x_{\text{max}} - x_{\text{min}}}{C_3} = \frac{(1.416 8 - 1.392 7)}{1.69}$$
$$= 0.014 3 (\mu\text{g/mL}),$$

则：样品测定引入的标准不确定度 $u(x) =$

$$\frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{0.014 3}{\sqrt{3}} = 0.008 3 (\mu\text{g/mL}).$$

2.3.3 样品中氟化物质量浓度的合成标准不确定度

$$u(c) = \sqrt{u(c_{\text{标}})^2 + u(\text{SC})^2 + u(x)^2}$$
$$= \sqrt{0.028 4^2 + 0.69 9^2 + 0.000 24^2 + 0.008 3^2}$$

$= 0.075\ 9\ (\mu\text{g}/\text{mL})$ 。

2.3.4 合成标准不确定度

由样品溶液中测得氟化物质量浓度 $c = 1.405\ 3\ \mu\text{g}/\text{mL}$, 计算得知工作场所空气中氟化物质量浓度为

$$C = \frac{5 \times c}{V_0} = \frac{5 \times 1.405\ 3}{13.5} = 0.52\ (\text{mg}/\text{m}^3)。$$

按公式(2)可求得各分量灵敏系数:

$$C_c = \frac{\partial C}{\partial c} = 5 \times \frac{1}{V_0} = 0.370\ 4; c_{V_0} = \frac{\partial C}{\partial V_0} =$$

$$-5 \times \frac{c}{V_0^2} = -0.038\ 6\ (\text{mg}/\text{m}^3);$$

按照不确定度传播律, 可得工作场所空气中氟化物质量浓度的合成标准不确定度:

$$u(C) = \sqrt{c_c^2 u(c)^2 + c_{V_0}^2 u(V_0)^2} \\ = 0.032\ \text{mg}/\text{m}^3。$$

2.3.5 报告扩展不确定度

职业卫生检测是涉及劳动者健康和安全方面的测量, 按照不确定度评定国际惯例, 取包含因子 $k = 2$, 且接近正态分布, 查 t 分布表, 包含概率近似 $P = 95\%$ 。

工作场所空气中氟化物质量浓度的扩展不确定度 $U = k \times u(C) = 2 \times 0.032 = 0.06\ (\text{mg}/\text{m}^3)$, 由实验测量计算得到空气中待测物浓度的最佳估计值为 $C = 0.52\ \text{mg}/\text{m}^3$ 。报告结果为: 工作场所空气中氟化物质量浓度 $C = (0.52 \pm 0.06)\ \text{mg}/\text{m}^3, k = 2$ 。

3 讨论

本文采用离子色谱法测定工作场所空气中氟化物质量浓度, 评定工作场所空气中氟化物质量浓度的测量不确定度, 其中包括采样过程和实验室样品测量过程。根据不确定度评定结果可以看出, 对合成不确定度贡献较大的分量是待测物标准溶液和标准曲线拟合等, 所以提示在测量过程中标准曲线拟合是离子色谱法测定氟化物的重要质控点, 根

据实际情况, 优化调整标准系列浓度可以降低不确定度。通过该测量不确定度评定, 指导实验室建立健全实验室质量控制体系, 以确保给客户提供的准确、可靠的测量结果, 提高检测工作质量, 对实验室的不确定度评定具有指导意义。

作者声明 本文无实际或潜在的利益冲突

参考文献

- [1] 国家卫生健康委员会. 工作场所有害因素职业接触限值 第1部分: 化学有害因素: GBZ 2.1—2019[S]. 北京: 人民卫生出版社, 2019.
- [2] 何令令, 何守阳, 陈琢玉, 等. 环境中氟污染与人体氟效应[J]. 地球与环境, 2020, 48(1): 87–95.
- [3] FLORENTIN A, DEBLONDE T, DIGUIO N, et al. Impacts of two perfluorinated compounds (PFOS and PFOA) on human hepatoma cells: cytotoxicity but no genotoxicity [J]. Int J Hyg Environ Health, 2011, 214(6): 493–499.
- [4] ZHANG L, REN X M, GUO L H, et al. Structure-based investigation on the interaction of perfluorinated compounds with human liver fatty acid binding protein [J]. Environ Sci Technol, 2013, 47(19): 11293–11301.
- [5] 中国实验室国家认可委员会. 化学分析中不确定度的评估指南[M]. 北京: 中国计量出版社, 2006.
- [6] 国家质量技术监督局. 测量不确定度评定与表示指南[M]. 北京: 中国计量出版社, 2005.
- [7] 中华人民共和国卫生部. 工作场所空气有毒物质测定 氟化物: GBZ/T 160.36—2004[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- [8] 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, 2013.
- [9] 国家安全生产监督管理总局职业安全健康监督管理司, 中国安全生产科学研究院. 职业卫生评价与检测[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2013.
- [10] 国家质量监督检验检疫总局. 机械式温湿度计检定规程: JJG 205—2005[S]. 北京: 中国计量出版社, 2004.
- [11] 国家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: 中国计量出版社, 2007.

收稿日期: 2020–10–15