

碘量法测定水质样品溶解氧结果的不确定度评定

林桂芝, 李 强, 张晓云, 张亚平, 胡转玲

核工业二〇三研究所分析测试中心, 陕西 西安

收稿日期: 2023年3月13日; 录用日期: 2023年4月27日; 发布日期: 2023年6月30日

摘 要

本文依据GB/T27418-2017《测量不确定度评定与表示》对运用GB 7489-1987《水质溶解氧的测定碘量法》测定水质样品中溶解氧含量进行了不确定度评定; 在实际工作中系统地运用不确定度评定方法对环境水样品测定溶解氧过程中的不确定度分量进行了分析和量化, 求出溶解氧测定结果的合成标准不确定度和扩展不确定度分别为0.102 mg/L和0.204 mg/L; 并对容量法的测量不确定度评定进行了概括与总结, 具有一定的实用性与指导意义。

关键词

溶解氧, 碘量法, 测定结果, 不确定度评定

Evaluation of Uncertainty in the Determination Results of Dissolved Oxygen in Water Samples by Iodometric Method

Guizhi Lin, Qiang Li, Xiaoyun Zhang, Yaping Zhang, Zhuanling Hu

Analysis and Testing Center of Research Institute No. 203, CNNC, Xi'an Shaanxi

Received: Mar. 13th, 2023; accepted: Apr. 27th, 2023; published: Jun. 30th, 2023

Abstract

Based on GB/T27418-2017 *Guide to the Evaluation and Expression of Uncertainty in Measurement*, this paper evaluates the uncertainty in the determination of dissolved oxygen (DO) in water environment samples by GB 7489-1987 *Water quality-Determination of dissolved oxygen-Iodometric method*. In practical work, the uncertainty components in the determination of DO in water samples are analyzed and

作者简介: 林桂芝(1968年9月-), 女, 河北省枣强县人, 应用化学工业分析专业本科学历, 核工业二〇三研究所分析测试中心高级工程师, 主要从事分析测试和实验室质量管理工作, Email: L3572022@126.com

文章引用: 林桂芝, 李强, 张晓云, 张亚平, 胡转玲. 碘量法测定水质样品溶解氧结果的不确定度评定[J]. 水资源研究, 2023, 12(3): 287-295. DOI: 10.12677/jwrr.2023.123033

quantified using the method of uncertainty evaluation, and the combined standard uncertainty and the expanded uncertainty of the determination result of DO are 0.102 mg/L and 0.204 mg/L respectively. The evaluation of measurement uncertainty of the volumetric method is summarized, which has certain practicability and guiding significance.

Keywords

Dissolved Oxygen, Iodometric Method, Determination Results, Evaluation of Uncertainty

Copyright © 2023 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在分析测试工作中,对检测质量的判定,通常使用绝对误差、相对误差、标准偏差、相对标准偏差等方式进行表征,随着实验室资质认定和合格评定的深入开展,对检测结果的不确定度评定提出了明确的要求,检测结果的不确定度是检测结果正确性的可疑程度,科学合理地对检测结果进行不确定度评定,找出影响检测结果的不确定因素,有效地控制影响检测质量的各个环节,有利于提高检测质量,使检测结果能反映样品的真实情况,发挥其应有的指导作用。

在水质样品分析中,溶解于水中的分子态氧称为溶解氧,水中溶解氧的含量是衡量水体自净能力的一项重要重要的水文地球化学指标;目前溶解氧的检测方法很多,例如碘量法[1][2]、电化学探头法[3]、现场快速仪器检测[4]等,其中碘量法因操作简单、检测结果较为准确可靠、成本低等特点被广泛应用;为了保证检测结果的准确性,这些检测方法的不确定度评定方面的论文和学术探讨陆续见诸相关专业学术刊物[5][6][7],目前这些学术探讨主要基于各自工作经验的基础上进行的,通过不同层面的探讨和摸索,会对溶解氧的不确定度评定和学术研究起到积极的促进作用。

本文依据 GB/T27418-2017《测量不确定度评定与表示方法》对 GB 7489-1987《水质 溶解氧的测定 碘量法》进行了不确定度评定,对影响溶解氧检测质量的不确定因素进行了分析和量化,对控制检测质量和有效地使用检测结果具有一定的指导作用,并对水质分析中容量法测定的不确定度评定进行了总结和概括,对于水质分析中容量法的不确定度评定具有一定的指导作用。

2. 实验部分

采用 GB 7489-1987《水质 溶解氧的测定 碘量法》的方法测定水环境样品中溶解氧的含量[1][2]。

1) 碘酸钾标准溶液的制备

称取经 180℃烘干的碘酸钾基准物质 3.567 ± 0.003 g,用纯净水溶解后转移至 1000 mL 容量瓶中并稀释至标线,摇匀;使用时将上述溶液吸取 100 mL 移至 1000 mL 容量瓶中,稀释至标线,即得浓度为 $c(1/6\text{KIO}_3) = 0.001667$ mol/L 的碘酸钾标准溶液。

2) 硫代硫酸钠滴定液的标定

按照 GB7489-1987 使用 1.1 制备的浓度 0.001667 mol/L 的碘酸钾标准溶液对硫代硫酸钠滴定液进行标定,标定后硫代硫酸钠的浓度为 $c(\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3) = 0.0190$ mol/L。

3) 水样的采集及溶解氧的固定

按照 GB7489-1987 采集水样于 575 mL 细口水样瓶中,加 1 mL 二价硫酸锰溶液和 2 mL 碱性试剂,将溶解

在水中的氧气固定。

4) 用硫代硫酸钠溶液滴定被测试样

当所形成的沉淀物沉降在细口瓶三分之一部分，慢速加入 1:1 硫酸 5 mL，盖上细口瓶盖，摇动瓶子，要求瓶中沉淀物完全溶解，且碘分布均匀；将细口瓶内的组分或其部分体积(V_1)转移到锥形瓶内，用硫代硫酸钠溶液滴定，在接近滴定终点时，加 1 mL 淀粉指示剂，继续滴定至溶液由兰色变为无色为终点[1]。

3. 数学模型

1) 碘酸钾标准溶液浓度的数学模型

碘酸钾标准溶液的浓度为：

$$C_0 = \frac{m_0 \times P}{M_0 \times V_0 \times n} \quad (1)$$

式中： C_0 为碘酸钾标准溶液的摩尔浓度，mol/L； m_0 为碘酸钾基准物质的质量，g； P 为碘酸钾基准物质的纯度； M_0 为碘酸钾的摩尔质量， $M_0 = 214.001$ ； V_0 为碘酸钾标准溶液的定容体积，L； n 为稀释倍数， $n = 10$ 。

2) 硫代硫酸钠溶液浓度的数学模型

硫代硫酸钠溶液的浓度为：

$$C_1 = \frac{6 \times C_0 \times V_1}{V_2} \quad (2)$$

式中： C_1 为硫代硫酸钠溶液的摩尔浓度，mol/L； C_0 为碘酸钾标准溶液的摩尔浓度，mol/L； V_1 为移取碘酸钾标准溶液的体积，mL； V_2 为标定消耗硫代硫酸钠溶液的体积，mL。

3) 水质样品中溶解氧含量的数学模型

水质样品中溶解氧含量为：

$$C = \frac{M_r \times C_1 \times V_4 \times V}{4 \times V_3 \times (V - V')} \quad (3)$$

式中： C 为水中溶解氧的含量，mg/L； M_r 为氧气的摩尔质量， $M_r = 31.9988$ ； C_1 为硫代硫酸钠溶液的摩尔浓度，mol/L； V_3 为滴定时样品的体积，mL； V_4 为滴定样品时所消耗硫代硫酸钠溶液的体积，mL； V 为采集水样时细口瓶的体积，mL； V' 为加入二价硫酸锰溶液和碱性试剂体积的总和，mL。

4. 不确定度来源和评定

根据溶解氧的测定过程和数学模型(1)、(2)、(3)，对样品测量过程中的不确定度分量进行了分析和量化，列出了所有被测量数值的各个参数的不确定度来源[8]，各不确定度分量见图 1。

4.1. 碘酸钾标准溶液浓度引起的标准不确定度

1) 基准物质纯度 P 引起的标准不确定

基准物质证书给出碘酸钾基准物质的纯度是(100% ± 0.02%)，该误差服从均匀分布， $K = \sqrt{3}$ ，求得由于纯度引起的标准不确定度为：

$$u(P) = \frac{0.0002}{\sqrt{3}} = 0.00012$$

2) 基准物质称量引起的标准不确定

制备浓度为 0.001667 mol/L 的碘酸钾标准溶液，需称量基准碘酸钾基准物质的质量为 3.567 g，每一次称量都

会因随机变化和天平校准引入不确定度；天平校准本身有两个可能的不确定度来源：灵敏度和校准函数的线性；由于称量是同一台天平且称量范围很小，所以灵敏度带来的不确定度可忽略不计[9]。

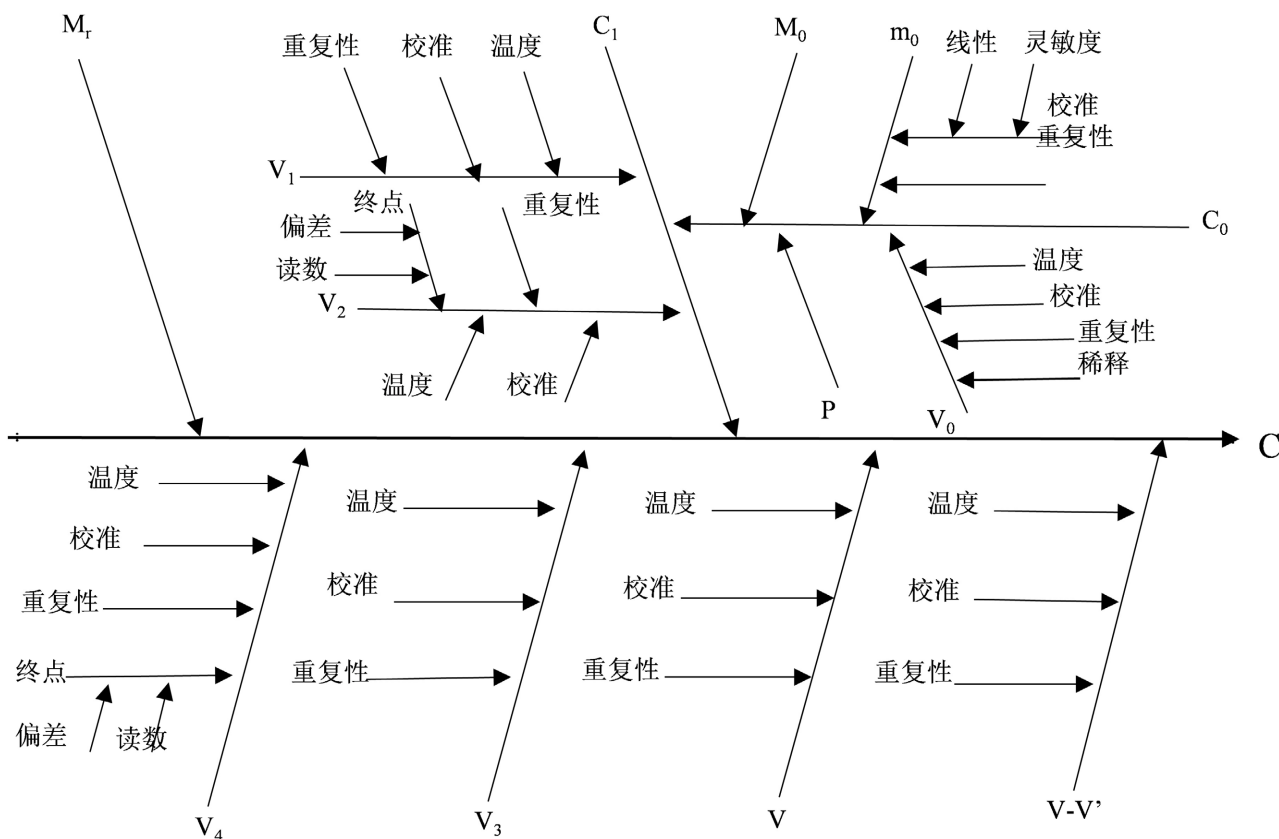


Figure 1. The decomposition diagram of the uncertainty components in the determination results of DO content

图 1. 溶解氧含量测定结果不确定度分量分解图

称量重复性：由天平证书确认在 0~5 g 称量范围内，天平的标准偏差为±0.2 mg。

天平线性：根据天平校准证书，该天平的线性为 0.2 mg，按均匀分布考虑， $K = \sqrt{3}$ ，求得由于天平线性引起的标准不确定为：

$$\frac{0.2}{\sqrt{3}} = 0.12(\text{mg})$$

上述分量需要引用两次，一次作为空盘，另一次作为毛重，因为每一次称量均为独立的观测结果，二者间的线性影响是不相关的。

$$u(m_0) = \sqrt{0.2^2 + 2 \times 0.12^2} = 0.27(\text{mg})$$

3) 碘酸钾标准溶液定容体积(V_0)引起的标准不确定度

校准：制造商提供的容量瓶在 20℃时的体积为(1000 ± 0.4) mL，按三角分布考虑， $K = \sqrt{6}$ ，计算出标准不确定度为[9]：

$$\frac{0.4}{\sqrt{6}} = 0.17(\text{mL})$$

温度：根据制造商提供的信息该容量瓶在 20℃被校准，而实验室温度在±10℃之间变动，水的膨胀系数为

$2.1 \times 10^{-4} \text{ mL}/^{\circ}\text{C}$ ，因此体积的变化为： $10 \times 1000 \times 2.1 \times 10^{-4} = 2.10(\text{mL})$ ；视温度变化为均匀变化， $K = \sqrt{3}$ ，计算出温度变化引入的不确定度为[9]：

$$\frac{2.10}{\sqrt{3}} = 1.22(\text{mL})$$

重复性：对 1000 mL 容量瓶进行 10 次充满至刻度线并进行称量，实验得出单次标准偏差为 0.07 mL。

稀释：吸取 100 mL 碘酸钾母液移至 1000 mL 容量瓶中，稀释至标线；对 100 mL 移液管进行 10 次充满至刻度线并进行称量，实验得出单次标准偏差为 0.05 mL，由于稀释至 1000 mL 容量瓶，1000 mL 容量瓶引入的不确定度为 2 次，因此碘酸钾标准溶液定容体积(V_0)引入的标准不确定度为：

$$u(V_0) = \sqrt{0.17^2 + 1.22^2 + 0.07^2 + 0.05^2 + 0.07^2} = 1.24(\text{mL})$$

由以上计算可以看出，在上述五个不确定度分量中，温度按上下限峰值计算，对于定容体积的不确定度贡献最大，占 97.3%，因此对于 1000 mL 的定容体积来说，校准、重复性和稀释引入的不确定度可忽略不计。

4) 碘酸钾的摩尔质量(M_0)引入的标准不确定度

根据元素周期表，各元素的标准不确定度为：

$$u(\text{K}) = 0.0001, \quad u(\text{I}) = 0.00003, \quad u(\text{O}) = 0.0003$$

因此碘酸钾(KIO_3)的摩尔质量(M_0)引入的标准不确定度为：

$$u(M_0) = \sqrt{0.0001^2 + 0.00003^2 + 3 \times 0.0003^2} = 0.00053$$

根据公式(1)计算出碘酸钾标准溶液的浓度 C_0 为：

$$C_0 = \frac{C_0 \times P}{M_0 \times V_0} = \frac{0.3567 \times 100\%}{214.001 \times 1} = 0.001667(\text{mol/L})$$

综合各分量，合成碘酸钾标准溶液的浓度引起的相对标准不确定度为：

$$\begin{aligned} \frac{u(C_0)}{C_0} &= \sqrt{\left[\frac{u(P)}{P}\right]^2 + \left[\frac{u(m_0)}{m_0}\right]^2 + \left[\frac{u(V_0)}{V_0}\right]^2 + \left[\frac{u(M_0)}{M_0}\right]^2} \\ &= \sqrt{\left[\frac{0.00012}{100\%}\right]^2 + \left[\frac{0.27}{356.7}\right]^2 + \left[\frac{1.24}{1000}\right]^2 + \left[\frac{0.00053}{214.001}\right]^2} \\ &= 0.0015 \end{aligned}$$

4.2. 标定硫代硫酸钠溶液浓度引起的标准不确定度

1) 移取碘酸钾标准溶液体积 V_1 引起的标准不确定

影响 V_1 的不确定度因素同 V_0

1、重复性：通过 10 次移取 20.00 mL 碘酸钾标准溶液和称量，实验得出标准偏差为 0.0082 mL。

2、校准：由制造商提供移液管的不确定度为 0.05 mL，按三角分布考虑， $K = \sqrt{6}$ ，计算出标准不确定度为： $0.05/\sqrt{6} = 0.021 \text{ mL}$ 。

3、温度： $10 \times 20 \times 2.1 \times 10^{-4} / \sqrt{3} = 0.025(\text{mL})$ 。

三项分量合成移取碘酸钾标准溶液体积 V_1 引起的标准不确定度为：

$$u(V_1) = \sqrt{0.0082^2 + 0.021^2 + 0.025^2} = 0.034(\text{mL})$$

2) 消耗硫代硫酸钠溶液体积 V_2 引起的标准不确定

1、重复性：与 20.00 mL 浓度为 0.001667 mol/L 碘酸钾标准溶液反应，需消耗硫代硫酸钠溶液约 10 mL，通过 10 次滴定和称量，实验得出标准偏差为 0.006 mL。

2、校准：由制造商提供 10 mL 滴定管的不确定度为 0.02 mL，按三角分布考虑， $K = \sqrt{6}$ ，计算出标准不确定度为： $0.02/\sqrt{6} = 0.0082$ mL。

3、温度： $10 \times 10 \times 2.1 \times 10^{-4} / \sqrt{3} = 0.013$ (mL)。

4、读数偏差：人工读取滴定终点刻度时，小数点后第二位是估计值，它的偏差为 0.02 mL。

5、滴定终点偏差：滴定终点时指示剂颜色变化明显，由指示剂视觉引起的终点偏差很小，最多为一滴滴定液，一滴滴定液的体积约为 0.05 mL，因此按最大滴定偏差，滴定终点的标准偏差为 0.05 mL。

由上述分量合成消耗硫代硫酸钠溶液体积 V_2 引起的标准不确定度为：

$$u(V_2) = \sqrt{0.006^2 + 0.0082^2 + 0.013^2 + 0.02^2 + 0.05^2} = 0.056 \text{ (mL)}$$

当 $V_1 = 20.00$ mL， $V_2 = 10.53$ mL，根据公式(2)计算出硫代硫酸钠溶液的浓度 C_1 为：

$$C_1 = \frac{6 \times C_0 \times V_1}{V_2} = \frac{6 \times 0.001667 \times 20.00}{10.53} = 0.0190 \text{ (mol/L)}$$

综合各分量，合成标定硫代硫酸钠溶液引起的相对标准不确定度为：

$$\frac{u(C_1)}{C_1} = \sqrt{\left[\frac{u(V_1)}{V_1}\right]^2 + \left[\frac{u(V_2)}{V_2}\right]^2 + \left[\frac{u(C_0)}{C_0}\right]^2} = \sqrt{\left[\frac{0.034}{20.00}\right]^2 + \left[\frac{0.056}{10.53}\right]^2 + 0.0015^2} = 0.0058$$

4.3. 滴定试样溶液引起的标准不确定度

1) 采集水样所用细口瓶体积(V)引起的标准不确定度

影响 V 的不确定度因素同 V_0

1、重复性：对 575 mL 细口水样瓶进行 10 次充满和称量，按实验得出单次标准偏差为 0.05 mL。

2、校准：由制造商提供水样瓶的不确定度为 0.5 mL，按三角分布考虑， $K = \sqrt{6}$ ，计算出标准不确定度为： $0.5/\sqrt{6} = 0.21$ mL。

3、温度： $10 \times 575 \times 2.1 \times 10^{-4} / \sqrt{3} = 0.70$ (mL)。

以上三项分量合成采集水样所用细口瓶体积 V 引起的标准不确定度为：

$$u(V) = \sqrt{0.05^2 + 0.21^2 + 0.70^2} = 0.74 \text{ (mL)}$$

2) 在水样瓶中加入固定剂体积(V')引入的标准不确定度

为防止溶解氧浓度的改变，采用溢流的方法加入固定剂，因此水样的实际体积为 $(V - V')$ ，由于 $V' = 6$ mL，远小于 $V = 575$ mL，可忽略不计，所以 $(V - V')$ 引起的标准不确定度与采集水样体积 V 引起的标准不确定度相似，计为 $u(V - V') = 0.74$ mL。

3) 滴定试样溶液的体积(V_3)引入的标准不确定度

1、重复性：移取碘已分布均匀的水样 100 mL，对所用 100 mL 移液管进行 10 次移取和称量，得出单次标准偏差为 0.012 mL。

2、校准：由制造商提供 100 mL 移液管的不确定度为 0.1 mL，按三角分布考虑， $K = \sqrt{6}$ ，计算出标准不确定度为： $0.1/\sqrt{6} = 0.041$ mL。

3、温度： $10 \times 100 \times 2.1 \times 10^{-4} / \sqrt{3} = 0.13$ (mL)。

以上三项分量合成滴定试样溶液的体积 V_3 引起的标准不确定度为:

$$u(V_3) = \sqrt{0.012^2 + 0.041^2 + 0.13^2} = 0.14(\text{mL})$$

4) 滴定样品时所消耗硫代硫酸钠溶液的体积(V_4)引起的标准不确定度

影响 V_4 的不确定度因素同 V_2

1、重复性: 通过实验, 滴定该试样需消耗硫代硫酸钠溶液约 6 mL, 通过 10 次滴定和称量, 实验得出标准偏差为 0.005 mL。

2、校准: 由制造商提供 10 mL 滴定管的不确定度为 0.02 mL, 按三角分布考虑, $K = \sqrt{6}$, 计算出标准不确定度为: $0.02/\sqrt{6} = 0.0082$ mL。

3、温度: $10 \times 6 \times 2.1 \times 10^{-4} / \sqrt{3} = 0.0073(\text{mL})$ 。

4、读数偏差: 人工读取滴定终点刻度时, 小数点后第二位是估计值, 它的偏差为 0.02 mL。

5、滴定终点偏差: 滴定终点时指示剂颜色变化明显, 由指示剂视觉引起的终点偏差很小, 最多为一滴滴定液, 一滴滴定液的体积约为 0.05 mL, 因此按最大滴定偏差, 滴定终点的标准偏差为 0.05 mL。

由上述分量合成滴定样品时所消耗硫代硫酸钠溶液体积 V_4 引起的标准不确定度为:

$$u(V_4) = \sqrt{0.005^2 + 0.0082^2 + 0.0073^2 + 0.02^2 + 0.05^2} = 0.055(\text{mL})$$

5) 氧气的摩尔质量(M_r)引入的标准不确定度

影响 M_r 的不确定度因素同 M_0 : $u(O) = 0.0003$

因此氧气(O_2)的摩尔质量(M_r)引入的标准不确定度为: $u(M_r) = \sqrt{2 \times 0.0003^2} = 0.00043$ 。

5. 合成标准不确定度和扩展不确定度的计算

将 $V = 575$ mL, $V - V' = 575 - 6 = 569$ mL, $V_3 = 100$ mL = 0.1 L, $V_4 = 5.91$ mL 带入公式(3), 计算出该水样中溶解氧的含量为:

$$C = \frac{M_r \times C_1 \times V_4 \times V}{4 \times V_3 \times (V - V')} = \frac{31.9988 \times 0.0190 \times 5.91 \times 575}{4 \times 0.1 \times 569} = 9.08(\text{mg/L})$$

综合 4.2 和 4.3 中的各分量, 溶解氧含量的合成相对标准不确定度为:

$$\begin{aligned} \frac{u(C)}{C} &= \sqrt{\left[\frac{u(V)}{V}\right]^2 + \left[\frac{u(V-V')}{V-V'}\right]^2 + \left[\frac{u(V_3)}{V_3}\right]^2 + \left[\frac{u(V_4)}{V_4}\right]^2 + \left[\frac{u(M_r)}{M_r}\right]^2 + \left[\frac{u(C_1)}{C_1}\right]^2} \\ &= \sqrt{\left[\frac{0.74}{575}\right]^2 + \left[\frac{0.74}{569}\right]^2 + \left[\frac{0.14}{100}\right]^2 + \left[\frac{0.055}{5.91}\right]^2 + \left[\frac{0.00043}{31.9988}\right]^2 + 0.0058^2} \\ &= 0.0112 \end{aligned}$$

该试样溶解氧测定结果的合成标准不确定度为: $u(C) = 0.0112 \times 9.08 = 0.102(\text{mg/L})$ 。

取包含因子 $K = 2$, 则溶解氧含量的扩展不确定度为: $U(C) = 2 \times 0.102 = 0.204(\text{mg/L})$ 。

因此该水质样品中溶解氧含量的测定结果为: $9.08 \text{ mg/L} \pm 0.21 \text{ mg/L}$, $K = 2$, 置信概率为 95%。

6. 关于容量法不确定度评定的概括与总结

通过对水质样品中溶解氧测定过程的不确定度评定, 可将此评定方法和过程推广至水质分析中化学需氧量、生化需氧量等检测项目的容量法的不确定度评定, 其主要步骤可概括为:

- 1) 对标准溶液制备过程的不确定度评定;
- 2) 对滴定溶液标定过程的不确定度评定;

- 3) 对样品前处理过程的不确定度评定;
- 4) 对检测项目滴定过程的不确定度评定;

对以上检测过程中存在的不确定因素进行合成, 得到“合成标准不确定度”, 进而带入包含因子, 即得到“扩展不确定度”, 其关系如图 2 所示。

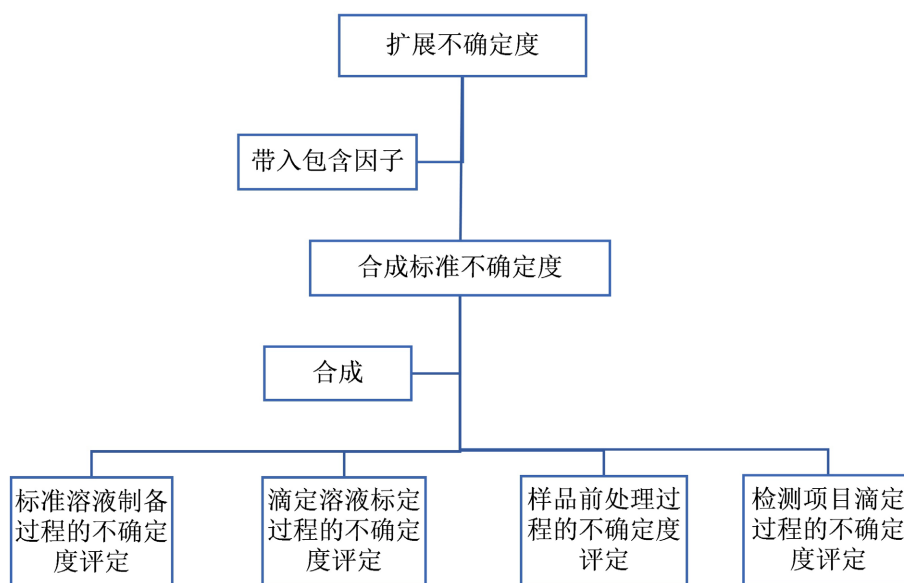


Figure 2. The main steps of uncertainty evaluation analyzed by water quality capacity method
图 2. 水质容量法分析不确定度评定的主要步骤

综上所述, 水质分析中容量法的不确定度评定过程涉及的不确定因素包括: 参与计算的某物质的摩尔质量(如重铬酸钾、氧气); 称量基准物质的电子天平; 用于制备标准溶液和标定滴定溶液所涉及的容量瓶、移液管等; 采集水样时细口瓶的体积、处理水样时加入试剂的体积; 滴定过程中使用的滴定管和滴定终点的确定; 实验全过程中温度的变化、所使用的计量器具的校准和操作的重复性等; 以上这些不确定因素在实验过程中由于其客观存在而反复出现, 其关系如图 1 “溶解氧含量测定结果不确定度分量分解图” 所示。

7. 结论

通过对水质样品中溶解氧测定结果的不确定度进行评定, 为客户正确使用检测数据、实验室控制检测质量提供了重要依据; 本文较全面客观地对水质分析中容量法的不确定度评定进行了总结和概括, 对检测过程中的不确定度分量进行了严谨地分析和量化, 通过对影响不确定度因素之间关系的梳理, 明确了不确定度评定需要注意的关键因素, 对于水质分析中容量法的不确定度评定具有一定的指导作用。

参考文献

- [1] 国家环境保护局. GB/T7489-1987 水质溶解氧的化学分析方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1987.
National Environmental Protection Agency. GB/T7489-1987 Water quality-determination of dissolved oxygen-iodometric method. Beijing: Standards Press of China, 1987. (in Chinese)
- [2] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB17378.4-2007 海洋监测规范——第四部分: 海水分析 31 溶解氧——碘量法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine—The People’s Republic of China, Standardization Administration of China. GB17378.4-2007 The specification for marine monitoring—Part 4: Seawater analysis 31 dissolved oxygen—Iodometric method. Beijing: Standards Press of China, 2008. (in Chinese)
- [3] 环境保护部. HJ506-2009 水质溶解氧的测定——电化学探头法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.

- Ministry of Environmental Protection. HJ506-2009 Water quality, determination of dissolved oxygen—Electrochemical probe method. Beijing: Standards Press of China, 2009. (in Chinese)
- [4] 国家质量监督检验检疫总局. JJG 291-2018 溶解氧测定仪检定规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. JJG 291-2018 Verification regulation dissolved oxygen meters. Beijing: Standards Press of China, 2018. (in Chinese)
- [5] 安卫东, 陶良瑛. 碘量法测定水中溶解氧含量测量不确定度的评定[J]. 化学分析计量, 2003(6): 7-9.
AN Weidong, TAO Liangying. Evaluation of uncertainty in measurement of dissolved oxygen in water by iodometric method. Chemical Analysis and Meterage, 2003(6): 7-9. (in Chinese)
- [6] 蔡大川, 罗军, 何冬琦. 溶解氧测定仪示值误差的不确定度的评定[J]. 化学分析计量, 2005(4): 11-12.
CAI Dachuan, LUO Jun and HE Dongqi. Evaluation of uncertainty on indication error of dissolved oxygen meter. Chemical Analysis and Meterage, 2005(4): 11-12. (in Chinese)
- [7] 李建. 溶解氧测定仪示值误差检定结果的不确定度的评定[J]. 计量与测试技术, 2020(7): 106-108.
LI Jian. Evaluation of measurement uncertainty on the verification result of indication error of dissolved oxygen meter. Metrology and Measurement Technique, 2020(7): 106-108. (in Chinese)
- [8] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T27418-2017 测量不确定度评定与表示方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine—The People's Republic of China, Standardization Administration of China. GB/T27418-2017 Guide to the evaluation and expression of uncertainty in measurement. Beijing: Standards Press of China, 2018. (in Chinese)
- [9] 乔文生. 钢铁及其合金中铬含量测定结果的不确定度评定[J]. 化学分析计量, 2004(2): 4-6.
QIAO Wensheng. Evaluation of the uncertainty of the measurement result for determination of chromium content in steel and its alloys. Chemical Analysis and Meterage, 2004(2): 4-6. (in Chinese)