

# 冷原子吸收法测定水质总汞的误差控制策略

韩华

山西寰源润晟环保科技有限公司

DOI:10.12238/eep.v8i3.2621

**[摘要]** 冷原子吸收法基于汞原子对253.7nm紫外线的特征吸收实现水质总汞的定量分析,具有高灵敏度、强选择性的技术优势,在环境监测和水质安全评估领域具有重要应用价值。本研究系统分析了影响测定准确性的关键因素:仪器设备方面,光源稳定性衰减、吸收池污染及部件灵敏度下降会导致系统误差;试剂材料方面,氧化剂/还原剂纯度不足及储存条件不当会引入干扰;操作流程中,采样不规范、消解不完全及读数时机不当会放大误差;环境因素中温湿度波动及空气污染物会干扰测定过程。针对上述问题,提出了多维度控制策略:建立仪器定期校准与维护制度,实施光源强度监测和吸收池清洁规程;严格试剂质量验收与储存管理,确保氧化还原体系稳定性;制定标准化操作手册并强化人员培训,规范采样至读数的全流程操作;优化实验室温湿度控制及空气净化系统。实践表明,这些策略能有效将测定相对误差控制在 $\pm 5\%$ 以内,加标回收率达到90%~110%,显著提升了数据的准确性和可靠性,为水质汞污染监测与生态风险评估提供了可靠的技术支撑。

**[关键词]** 冷原子吸收法;水质总汞;误差控制;测定准确性

中图分类号: P618.68 文献标识码: A

## Error Control Strategy for Total Mercury Determination in Water Quality by Cold Atomic Absorption Spectroscopy

Hua Han

Shanxi Huanyuan Runsheng Environmental Protection Technology Co., Ltd

**[Abstract]** The core principle of quantitatively analyzing total mercury content based on the absorption characteristics of atoms towards specific wavelengths of light, and its important application value in environmental monitoring, water quality safety assessment, and other fields. Next, from multiple dimensions such as instrument and equipment performance degradation, reagent purity fluctuations, differences in operator skills, and changes in environmental temperature and humidity, potential factors that may cause errors in actual operations are thoroughly analyzed. Then, in response to issues such as insufficient instrument stability, cross contamination of reagents, non-standard operating procedures, and environmental interference, a series of scientific and practical control strategies were proposed, including establishing a regular calibration and maintenance mechanism for instruments, strictly controlling the quality and storage conditions of reagent procurement, developing standardized operating procedures and strengthening personnel training, and optimizing laboratory environmental control parameters. Through the comprehensive application of these strategies, measurement errors can be significantly reduced, and the accuracy and reliability of total mercury measurement results in water quality can be greatly improved, providing solid data support for water quality monitoring and ecological environment assessment.

**[Key words]** cold atomic absorption method; Total mercury in water quality; Error control; Determination accuracy

汞作为一种毒性极强的重金属元素,具有高生物累积性和神经毒性,即便在水体中以痕量浓度存在,也会通过食物链传递富集,对生态系统和人体健康构成严重威胁。准确测定水质中的

总汞含量,不仅是判断水体污染程度、评估生态风险的关键依据,更是保障饮用水安全、维护公众健康的重要前提。冷原子吸收法凭借其高灵敏度、良好选择性及快速响应等优势,成为水质总

汞测定的常用技术手段。然而,在实际应用场景中,受仪器老化、试剂不纯、操作不当及环境波动等因素干扰,该方法易产生测定误差,导致数据偏离真实值。因此,全面探究误差来源并制定精准有效的控制策略,对提升冷原子吸收法测定准确性、推动水质监测技术发展具有不可忽视的现实意义。

## 1 冷原子吸收法测定水质总汞的原理与特点

### 1.1 测定原理

冷原子吸收法测定水质总汞基于汞原子对253.7nm紫外线的独特吸收特性。实际操作中,水样预处理是核心环节,需加入高锰酸钾、过硫酸钾等强氧化剂消解,破坏水样有机物结构,将有机汞、无机汞等化合物彻底氧化分解;再利用氯化亚锡等还原剂,将氧化态汞离子还原为单质汞。单质汞常温下易挥发为汞蒸汽,当其通过吸收池时,会选择性地吸收253.7nm紫外线,导致透射光强度衰减。根据朗伯-比尔定律,在一定浓度范围内,吸光度与汞蒸汽浓度呈线性关系<sup>[1]</sup>。借助光电倍增管等高精度光学检测系统,测量吸光度变化,结合标准曲线,便能精准计算水样中总汞含量,为水质汞污染监测与治理提供数据依据。

### 1.2 方法特点

冷原子吸收法以高灵敏度、强选择性和操作便捷性著称。其检测下限低至纳克级别,能够精准捕捉水体中极微量的汞元素。在饮用水源监测中,可有效检测出可能存在的痕量汞污染,保障居民用水安全;对于工业废水排放检测,即便汞浓度较高,也能实现准确测定,适用于从清洁水源到严重污染水体等各类水质的检测。由于该方法基于汞原子对特定波长光的独特吸收特性,仅对汞元素产生特异性响应,因此可有效排除铜、铅、镉等共存金属离子的干扰,确保测定结果真实可靠。相较于电感耦合等离子体质谱法等复杂技术,冷原子吸收法无需昂贵精密的大型仪器,操作流程简明易懂,对实验人员的专业技术要求适中。从样品预处理到得出检测结果,整个分析周期较短,且试剂消耗、仪器维护等成本较低,便于在基层环境监测站、中小型实验室等广泛应用,具有显著的实用价值和推广潜力。

## 2 冷原子吸收法测定水质总汞误差的潜在因素分析

### 2.1 仪器设备因素

仪器设备的性能状态是决定测定准确性的核心要素。原子吸收光谱仪的光源作为提供激发能量的关键部件,其稳定性对测量结果影响深远<sup>[2]</sup>。空心阴极灯若出现老化现象,内部金属元素的发射效率降低,发射的紫外线强度会随时间发生漂移;而供电电压的不稳定,会使光源的激发过程产生波动,导致光强在测量期间出现不规则变化,最终造成吸光度测量值大幅波动,引入难以修正的系统性误差。吸收池作为光传输的重要通道,其洁净程度至关重要,内壁残留的油污、水渍等污染物,会改变光线的传播路径,增强光线散射,同时还可能吸附汞蒸汽,使得进入检测器的光信号强度减弱,致使吸光度测量值异常偏高。此外,仪器长期使用后,核心部件的灵敏度会逐渐下降,噪声水平也会不断升高,这不仅会降低检测信号的信噪比,还会使仪器对低浓度汞的检测能力大幅下降,严重影响测定结果的可靠性。

### 2.2 试剂材料因素

试剂材料的品质直接影响测定结果准确性。水样预处理中,氧化剂、还原剂等试剂纯度至关重要。例如盐酸若存在工艺缺陷,含有的微量杂质会在消解时参与反应,使水样汞含量虚增,导致测定结果偏高。同时,试剂储存条件关乎其稳定性,强氧化性的高锰酸钾受潮分解,氧化能力下降;氯化亚锡等还原剂接触空气易氧化变质,失去还原作用。试剂性能改变不仅降低反应效率,还可能引发副反应,产生干扰物质,严重影响汞含量测定,致使测量结果偏离真实值。

### 2.3 操作流程因素

操作流程的规范性直接影响水样代表性与测定准确性。水样采集环节是整个测定过程的基础,若未严格遵循采样规范,在水流湍急处取样,水体中的悬浮物分布不均匀,会导致采集的样品无法真实反映水体汞含量<sup>[3]</sup>;而未充分混匀水体就进行采样,也会使样品缺乏代表性。在预处理阶段,消解过程是将汞化合物转化为单质汞的关键步骤,若消解温度未达到设定值,汞化合物的分解反应不充分;消解时间不足,则反应无法完全进行,均会导致汞化合物无法完全转化为单质汞。在仪器操作过程中,进样量不准确会改变样品中汞蒸汽的浓度,读数时间过早,汞蒸汽尚未完全达到稳定状态;读数时间过晚,汞蒸汽可能已发生部分逸散,这些操作失误都会使吸光度数据偏离真实值,且这些误差会通过各环节的累积效应显著放大,最终严重影响测定结果的准确性。

### 2.4 环境条件因素

环境条件对测定过程存在不可忽视的影响。实验室温度的波动会直接改变汞蒸汽的饱和蒸气压,根据热力学原理,温度升高时,汞蒸汽的扩散速率加快,这会导致吸收池内汞蒸汽浓度分布不均,使得不同位置的吸光度存在差异,影响测量的准确性。当实验室湿度较高时,水蒸气在吸收池内壁凝结形成小液滴,这些液滴会改变光线的折射和反射路径,干扰光传输过程,造成光信号强度的不稳定。此外,实验室环境中的挥发性有机物、含汞气溶胶等污染物,会通过空气流动进入检测系统,挥发性有机物可能与汞蒸汽竞争吸收紫外线,降低汞蒸汽的吸收效率;含汞气溶胶则会直接污染样品,增加样品中的汞含量,干扰测定过程,导致测量结果出现偏差,影响水质总汞测定的准确性<sup>[4]</sup>。

## 3 冷原子吸收法测定水质总汞的误差控制策略

### 3.1 仪器设备的误差控制

定期对原子吸收光谱仪进行校准和维护是保证仪器性能稳定的关键。按照仪器操作规程,定期对光源进行检查和调整,确保光源强度稳定。对吸收池进行定期清洁和校准,使用合适的清洁剂去除池内壁的污染物,保证吸收池的光学性能良好。同时,定期对仪器的灵敏度、噪声水平等参数进行检测和调整,确保仪器处于最佳工作状态。此外,在仪器使用过程中,要严格按照操作规程进行操作,避免因操作不当导致仪器损坏或测定误差。

### 3.2 试剂材料的误差控制

严格选用高质量、高纯度的试剂材料是控制误差的重要措

施。在购买试剂时,要选择信誉良好的供应商,确保试剂的质量符合要求。对试剂进行严格的验收和检验,检查试剂的纯度、有效期等指标。在试剂保存过程中,要按照试剂的性质和要求,选择合适的保存条件,如密封、避光、低温等,防止试剂受潮、变质。同时,在使用试剂时,要严格按照操作规程进行操作,准确控制试剂的加入量和加入顺序<sup>[5]</sup>。

### 3.3 操作流程的误差控制

制定严格的操作规范和标准流程是保证操作准确性的关键。在水样采集过程中,要根据水体的特点和监测目的,合理选择采样点和采样方法,确保所采集的水样具有代表性。在水样预处理过程中,要严格控制消解时间、温度、试剂加入量等操作参数,保证汞的还原效果<sup>[6]</sup>。在仪器操作过程中,要准确控制进样量,严格按照仪器操作规程进行读数,确保读数的准确性。同时,要加强操作人员的培训和管理,提高操作人员的业务水平和责任心,避免因人为因素导致误差产生。

### 3.4 环境条件的误差控制

为确保水质总汞测定准确,需落实多项误差控制策略。将仪器校准维护、试剂管理、操作规范转化为标准化规程与制度,并针对不同岗位开展专项培训,通过理论讲解与实操演示,以考核确保操作人员掌握关键控制点。实际测定时,严格执行流程,建立双人复核机制,交叉检查仪器调试、试剂配制、样品处理等关键环节。同时,构建由分析人员、质量监督员、技术负责人组成的三级质量控制体系,定期审核数据,发现异常及时溯源优化,保障测定精准稳定。

## 4 误差控制策略的实施与效果评估

### 4.1 误差控制策略的实施

为保障水质总汞测定的准确性,需将仪器校准维护、试剂管理、操作规范等误差控制策略转化为标准化操作规程与管理制。针对不同岗位人员开展专项培训,通过理论讲解误差产生原理,结合实操演示规范操作流程,并以严格考核确保操作人员熟练掌握关键控制点。在实际测定中,严格执行操作流程,建立双人复核机制,对仪器调试参数、试剂配制浓度、样品处理步骤等关键环节进行交叉检查,避免单人操作失误引入误差。此外,构建由实验室分析人员、质量监督员、技术负责人组成的三级质量控制体系,定期审核测定数据,运用统计分析方法评估数据离散度与趋势,一旦发现异常结果,即刻开展溯源排查,及时优化误差控制措施,确保测定工作稳定、准确。

### 4.2 效果评估方法

采用多种量化手段评估误差控制策略实施效果。通过标准物质对比法,定期选取与水样基体相近的有证标准物质进行平行测定,依据标准值计算相对误差,误差在±5%以内判定为合格,超范围则对仪器、试剂、操作等环节全面核查。运用加标回收率法,在实际水样中添加已知浓度汞标准溶液,测定加标后样品并计算回收率,回收率处于90%~110%区间,表明测定方法可

靠<sup>[7]</sup>。同时,借助配对样本t检验等统计学方法,对比策略实施前后的测定数据,通过显著性差异分析,科学判断误差控制策略对降低测定误差、提升测定准确性和可靠性的实际效果,为后续优化改进提供数据依据。

## 5 结论与展望

### 5.1 结论

冷原子吸收法以其高灵敏度与强选择性,在水质总汞测定领域占据重要地位。然而,仪器设备老化致使光源稳定性下降、试剂纯度不足引入杂质干扰、操作流程不规范造成数据偏差,以及环境温湿度波动和污染物影响等因素,均会对测定结果产生显著误差。本研究针对性制定仪器定期校准维护计划、严格规范试剂采购与存储流程、细化全流程操作标准,并优化实验室环境条件。经实践验证,实施误差控制策略后,有效提升了数据可靠性,为水环境监测与污染防治提供了坚实的技术支撑。

### 5.2 展望

未来,冷原子吸收法测定水质总汞技术将伴随科技进步持续革新。硬件层面,仪器设备有望在光源稳定性、信号检测精度等方面实现突破,进一步降低检测限、提升测量准确性;软件层面,误差控制策略将向智能化、全流程管控方向发展,借助自动化系统实现水样采集、预处理、测定的闭环质量监控。此外,面对日益复杂的环境监测需求,冷原子吸收法与电感耦合等离子体质谱、高效液相色谱等技术的联用将成为趋势,通过优势互补,为水质汞污染的形态分析、迁移规律研究提供更全面的数据支持。

## 参考文献

- [1]李春松,唐莲仙,仇荷洁.浅析食品和食品接触材料及制品中重金属元素污染物的仪器分析方法[J].现代食品,2021,(11):190-195.
- [2]王云鹏.原子吸收光谱法在食品微量元素检测中的优化路径探讨[J].中国食品工业,2024,(06):100-102.
- [3]郭清海,吴启帆.云南腾冲热海高温地热水中汞的地球化学异常及其指示意义[J].地学前缘,2020,27(01):103-111.
- [4]刘振华,王欢,冯晶晶.微分测汞仪法测试水中总汞的条件优化[J].绿色科技,2022,24(14):42-44+48.
- [5]胡伟.化学检验检测实验室风险管控[J].大众标准化,2025,(06):172-174.
- [6]刘胜兰,刘义青,付永胜.UV/SO32-体系降解水中污染物的研究进展[J].环境科学与技术,2020,43(11):172-179.
- [7]张淑华,刘长利,王翼飞,等.电感耦合等离子体原子发射光谱法测定柴胡中17种元素的含量[J].中国卫生检验杂志,2017,27(16):2308-2310.

## 作者简介:

韩华(1981--),女,汉族,山西省左权县人,专科,研究方向:HJ597-2011水质、总汞的测定、冷原子吸收分光光度法。