

实验室水质化验中痕量污染物精准识别技术研究

吴兵

天津华勘检验测试有限公司

DOI : 10.32629/jpm.v7i5.8924

[摘要] 本文主要研究实验室水质化验中痕量污染物的准确识别技术,论述了化学分析对于矿石、水、土等介质检测的作用。从浓度很低、基质干扰复杂的两个方面出发,对液质联用、光谱分析、电化学传感这些主流的检测技术进行了详细的介绍,分析了它们的优势和应用范围。经过实际案例分析可知不同的技术对于水质中痕量污染物的检测效果存在差异。探究检测技术发展的趋向,微型化、智能化、多技术融合等,为提高实验室水质化验中痕量污染物精准识别的能力赋予理论支撑和操作参照,助力环境整治和水资源的合理运用。

[关键词] 实验室水质化验;痕量污染物;精准识别技术;化学分析

Research on Precision Identification Technologies for Trace Pollutants in Laboratory Water Quality Analysis

Wu Bing

Tianjin Huakan Testing Co., Ltd.

[Abstract] This paper focuses on developing accurate identification techniques for trace pollutants in laboratory water quality testing and discusses the role of chemical analysis in detecting substances in media such as ores, water, and soil. Addressing both extremely low concentration levels and complex matrix interference, it provides a detailed overview of mainstream detection methods—including liquid chromatography–mass spectrometry (LC–MS), spectral analysis, and electrochemical sensing—while evaluating their respective advantages and applications. Case studies demonstrate varying performance of different techniques in detecting trace pollutants in water samples. The study explores emerging trends in detection technology development, such as miniaturization, intelligent systems, and multi–technology integration, providing theoretical foundations and practical guidelines to enhance precision identification capabilities in laboratory water quality analysis, thereby supporting environmental remediation efforts and the rational utilization of water resources.

[Key words] Laboratory water quality testing; Trace pollutants; Precision identification technology; Chemical analysis

引言

水是生命之源,水质好坏直接影响到人类健康和生态环境的稳定。随着工业化、城市化的发展,新兴污染物,即全氟化合物、抗生素、内分泌干扰物等,大量进入水体,其浓度非常低(ppb–ppm),但是毒性很强,生物富集性好,并且持久,对水环境和人体健康有潜在的危害。因此准确灵敏的检测水中微量污染物对评价水质状况、制定污染防治对策、保证水资源安全都有着十分重要的意义。

实验室水质化验属于水质监测的必要部分,主要任务是准确测定水中的各种污染物成分及含量。化学分析技术由于具有高选择性、高灵敏度、高准确性等特点,是实验室水质化验中

的主要手段。对矿石、水、土等介质中痕量污染物进行化学分析,可对污染物来源及迁移转化规律有更深层次的认识,进而为环境管理及决策提供参考。

1 痕量污染物检测的难点分析

1.1 浓度极低

痕量污染物的浓度一般为ppb、ppt,这样低的浓度给检测带来了极大的困难。传统的检测方法分光光度法、原子吸收光谱法等由于灵敏度低,不能准确地检测出痕量污染物的浓度。对于浓度低于 $\mu\text{g/L}$ 的有机污染物,分光光度法很难检测出它的特征吸收信号,造成假阴性的结果。即使使用一些灵敏度较高的方法,也要做复杂的前处理,例如富集、分离等才能提高

检测信号的强度，但这些都大大增加了检测的时间和成本，并且还会产生误差，从而导致检测结果不准确^[1]。

1.2 基质干扰复杂

水体中含有很多其他的物质，例如无机盐、有机物、悬浮颗粒等，这些物质会和痕量污染物发生相互作用，干扰检测信号，使检测结果不准。在检测水体中重金属离子的时候，水中的钙、镁等离子会和检测试剂发生反应，形成沉淀或者络合物，从而影响到重金属离子的测定。另外水体中的有机物会吸附痕量污染物，改变它的化学性质和存在状态，干扰检测。基质干扰的复杂性造成痕量污染物的检测要采取更为挑选的检测技术及方法，才能摆脱干扰物质的影响。

1.3 前处理要求高

为了准确检测水体中微量的污染物，一般要对水样做前处理，除去干扰物质，富集目标污染物。前处理步骤是否合理、有效将直接关系到检测结果的好坏。但是痕量污染物检测前处理要求很高，任何操作不当时都会造成污染或者使目标污染物丢失。固相萃取时，如果萃取柱选择不当、活化不彻底或者洗脱条件不合适都会影响目标污染物的富集效率以及回收率。前处理过程中所用的试剂和器皿也会有微量的污染物，这些污染物会对检测结果造成影响。

2 实验室水质化验中痕量污染物精准识别技术

2.1 液质联用技术 (LC - MS)

2.1.1 技术原理

液质联用技术把液相色谱的分离能力同质谱的定性定量能力结合起来，是检测水体中痕量污染物的有效方法。液相色谱是利用不同物质在固定相与流动相分配系数的不同来实现样品中各种成分分离。分离出的组分分别进入质谱仪，用离子源把它们电离成离子，再经过质量分析器根据质荷比 (m/z) 分开检测，从而得到各个组分的质谱图。通过对质谱图上的特征离子及相对丰度进行分析，可对目标污染物进行定性定量分析。

2.1.2 优势

液质联用技术具有很高的选择性、灵敏度和宽线性范围。它的高选择性是由于质谱的特异性，能用精确的质量数以及二级碎片信息来准确地锁定目标物，排除基质干扰。检测水体中全氟化合物时，液质联用技术可以区分不同的结构全氟化合物同分异构体，解决传统方法不能区分同分异构体的问题。该技术灵敏度高，可以检测出 ppt 级的痕量污染物，能符合超痕量污染物检测的要求。同时液质联用技术的线性范围宽，可以检测出 ppt 级到 ppb 级浓度的污染物，对各种浓度水平的污染物都有很好的适用性。另外液质联用技术可以实现多目标物的筛查，一次进样就可以检测出几十种污染物，提高了检测效率^[2]。

2.1.3 应用案例

全氟辛酸 (PFOA) 在饮用水中用液相色谱-质谱联用法进行检测。经过优化色谱分离条件以及质谱参数后可以得到高灵敏度的 PFOA 检测结果。该方法检测限为 0.01ng/L，较传统的 HPLC-UV 法检测效率提高 3 倍以上，假阳性率降低到原来的一十分之一左右。在实际的饮用水中微量的 PFOA 可以被准确检测出来，给饮用水的安全提供有力的支持。

2.2 光谱分析技术

2.2.1 紫外 - 可见光谱法 (UV - Vis)

紫外可见光谱法是利用物质分子对紫外、可见光的吸收特性来建立分析方法。某些污染物本身就具有很强的紫外光或可见光吸收性，不需要使用显色剂来“染色”，可以直接进行测定。该法操作简便、速度快，可以用来对一些具有较强吸合力特征污染物进行快速筛选。比如对共轭双键含量较多的有机污染物如多环芳烃等，可以在紫外光区有明显的吸收峰，用紫外 - 可见光谱法可以做初步检测。但是紫外 - 可见光谱法灵敏度较低，对于浓度很低的痕量污染物检测能力较差，一般需要配合富集等前处理步骤来提高检测灵敏度。

2.2.2 原子吸收光谱法 (AAS)

原子吸收光谱法是利用气态的基态原子外层电子对紫外光、可见光范围内相对应的原子共振辐射线的吸收强度来定量测定被测元素含量为基础的分析方法。此法选择性好，灵敏度高，抗干扰能力强，常用于水中重金属离子的测定。用火焰原子吸收光谱法可以测定水中的铅、镉、铜等重金属离子，检出限可以达到 $\mu\text{g/L}$ 。但是对于一些热不稳定或者难挥发的元素来说，原子吸收光谱法的应用会受到一定的限制^[3]。

2.2.3 电感耦合等离子体质谱法 (ICP - MS)

电感耦合等离子体质谱法就是将电感耦合等离子体作为离子源，把样品中的元素电离成离子，然后通过质量分析器进行分离、检测的方法。ICP-MS 灵敏度高、线性范围广，可以同时检测 70 多种元素进行检测，是最为简便的痕量重金属检测方法之一。在检测水体中各种重金属污染物的时候，ICP - MS 一次能检测出铅、汞、镉、铬等许多种重金属元素的含量，检出限可达到 ng/L 甚至 pg/L 级。该技术有抗干扰强、分析速度快等优点，在环境监测、地质勘探等各方面都有广泛的应用。

2.2.4 表面增强拉曼光谱法 (SERS)

表面增强拉曼光谱法是基于拉曼散射效应，用增强的现象来建立分析方法的一种技术。在金属纳米结构表面吸附目标分子可以大大提高拉曼信号，达到对痕量物质高灵敏度检测的目的。例如，顶空固相萃取-SERS 法是检测水中痕量汞的现场快速检测方法。该方法用罗丹明 6G (R6G) 制备 AgNPs 纸基 SERS 基底，在水中加入 NaBH_4 还原汞生成汞蒸气，汞蒸气与基底表

面的 AgNPs 反应生成银汞齐, 抑制了 AgNPs 的拉曼增强作用, 导致 R6G 特征拉曼峰强度减弱。水中汞含量和 R6G SERS 信号强弱成负相关, 用拉曼光谱仪测量信号变化可进行汞的定量分析。该方法的检出限为 $0.51 \mu\text{g/L}$, 具有便携、快速、高精等特点, 适合于水环境汞污染实时监测和应急处置。

2.3 电化学传感技术

2.2.1 技术原理

电化学传感技术用特殊的传感器(离子选择电极、气体传感器等)来测定水中某些离子或者分子的浓度。以常见的 pH 计、氨氮电极为例, 其探头表面的敏感膜会对水中氢离子或者铵根离子产生响应, 从而产生一个与离子浓度成比例的电信号(电压或电流)。根据水中的相应离子浓度来测量电信号的大小。

2.2.2 优势

电化学传感技术响应快, 灵敏度高, 成本低, 可以做为在线监测和现场快速检测的一种方法。对于水中重金属离子来说, 新型的电化学传感器能够在几分钟内完成检测, 并且灵敏度可以达到 $\mu\text{g/L}$ 级。另外电化学传感器体积小、便于携带, 可以实时、连续地监测水质, 给水质监测提供了一种简便的方法。

2.2.3 应用案例

重金属离子检测上研究者设计出了一种基于纳米材料的电化学传感器来检测水中铅离子。该传感器以石墨烯为基底, 用具有特异性识别铅离子的分子修饰在上面, 检测铅离子和这些分子之间发生相互作用所产生的电化学信号变化来实现对铅离子的高灵敏度检测。从实验结果可以看出, 该传感器检出限可以达到 $0.1 \mu\text{g/L}$ 左右, 有较好的选择性和稳定性, 在实际水样的检测中有较好的效果。

3 检测技术发展趋势

3.1 微型化与便携化

伴随着科技的发展, 检测技术向着微型化、便携化方向发展。微型化检测仪器体积小、重量轻、携带方便, 可以满足现场快速检测的要求。便携式 GC-MS (重量 $<5\text{kg}$) 已经可以用于突发污染事件现场的检测, 可以快速对污染物做定性、定量分析。微型化 LC-MS 等仪器还在研发之中, 有可能会达到 15 分钟内快速检测的效果, 从而大大提升现场检测的速度^[4]。

3.2 智能化与自动化

智能检测、自动化检测属于检测技术未来发展方向。用物联网、大数据、人工智能这些技术来完成检测仪器的智能化控制以及数据自动处理分析的工作。比如智能水质分析仪可自动完成样品收集、检测以及数据分析, 并且能够把检测结果即时传送到监控中心, 从而达成对于水质的远程实时监控。人工智

能算法可以促使仪器自己在众多的数据当中学习, 并且识别出一些较为复杂的水质模式, 还可以对水质发生怎样的变化做出预判, 进而给水质管理及决策赋予更有力的支撑^[5]。

3.3 多技术融合

单一的检测技术存在着不足, 多技术融合是未来检测技术的发展方向。将不同的检测技术优势结合起来, 达到对痕量污染物更准确、更全面的检测目的。采用色谱质谱联用技术结合离子淌度技术得到“三维分离”, 去除同分异构体干扰, 使检测更加准确、有选择性; 用电化学传感技术和光谱分析技术结合起来进行多参数检测, 使检测更加可靠、灵敏^[6]。

4 结语

实验室水质化验中痕量污染物准确鉴定对保证水资源安全、生态环境稳定具有十分重要的作用。本文对痕量污染物检测中的浓度非常低、基质干扰多、前处理条件严苛等问题进行了分析, 对液质联用、光谱分析、电化学传感等主流检测技术原理、优缺点及应用进行了总结, 并用实际案例对这些技术进行了验证。并就检测技术微型化、智能化、多技术融合的发展趋势作出展望。为了提高我国实验室水质化验中痕量污染物的检测水平, 应该加大高端仪器设备研发和核心技术攻关力度, 提高自主创新能力。还要重视检测技术标准化、规范化的创建工作, 保证检测结果准确可靠。除此之外还要加强人才的培养, 提高检测人员的技术和专业素质, 给痕量污染物检测技术发展提供人才支持。随着检测技术不断进步完善, 可以更加准确地找出水体里隐藏的微量污染物来给环保以及水资源合理使用赋予强有力的支撑。

[参考文献]

- [1]王瑞, 帅宁, 黄帅帅, 等. 基于多时相 Landsat8 影像赣南地区水体污染识别研究[J]. 新疆大学学报(自然科学版中英文), 2024, 41(3):344-353.
 - [2]文平平. 水质化验分析方法的应用及其质量控制研究[J]. 奥秘, 2022(23):115-117.
 - [3]李澜, 田华, 季铁梅, 等. 光谱二阶微分波动指数的河道水质类型识别方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(5):5.
 - [4]张佳佳, 张瑞娟. 如何确保化工生产水质化验的质量[J]. Engineering Science Research & Application, 2025, 6(10).
 - [5]孙婧. 质量管理与控制在污水处理水质化验中的应用[J]. 石油石化物资采购, 2020(11):63-63.
 - [6]赵翠仙, 齐铁月, 汪黎东. 电力工业水质检测质控数据比对及误差分析[J]. 当代化工研究, 2022(017):000.
- 作者简介: 吴兵, 1981.09, 男, 河北唐山, 汉族, 本科, 高级工程师。