

# 紫外分光光谱技术在环境污染物检测中的应用

许鼎均

中山公用水质检测有限公司

DOI:10.32629/eep.v8i10.2935

**[摘要]** 环境污染物的高效检测是环境保护的重要前提。紫外分光光谱技术因其操作简便、分析快速及成本低廉等优势,在环境污染物检测中发挥着重要作用。本文系统阐述了该技术的基本原理,包括其与物质的相互作用机制及仪器构成,并详细分析了其在水、气、土等环境介质污染物检测中的具体应用。通过与其他主流检测技术的对比,进一步明确了紫外分光光谱技术在联用分析与快速筛查方面的综合优势。最后,文章总结了该技术的现状与挑战,并展望了其向联用化、智能化及微型化发展的未来趋势,旨在为环境监测技术的创新与应用提供有益参考。

**[关键词]** 紫外分光光谱技术; 环境污染物检测; 快速检测

**中图分类号:** X131 **文献标识码:** A

## Application of UV Spectroscopy in Environmental Pollutant Detection

Dingjun Xu

Zhongsan Public Water Quality Testing Co., Ltd.

**[Abstract]** The efficient detection of environmental pollutants is a crucial prerequisite for environmental protection. Ultraviolet spectrophotometry plays a significant role in this field due to its advantages of simple operation, rapid analysis, and low cost. This paper systematically elaborates on the fundamental principles of this technique, including its interaction mechanism with matter and instrument composition, and provides a detailed analysis of its specific applications in detecting pollutants in various environmental media such as water, air, and soil. By comparing it with other mainstream detection technologies, the comprehensive advantages of ultraviolet spectrophotometry in hyphenated techniques and rapid screening are further clarified. Finally, the article summarizes the current status and challenges of this technology and outlooks its future trends toward hybridization, intellectualization, and miniaturization, aiming to provide valuable references for the innovation and application of environmental monitoring technologies.

**[Key words]** UV Spectrophotometry, Environmental Pollutant Detection, Rapid Detection

### 引言

随着环境污染问题日益严重,快速准确地检测环境污染物已成为环境保护领域的关键任务。紫外分光光谱技术作为一种基于物质对紫外光选择性吸收的分析方法,因其操作简便、分析快速和成本低廉等优势,在环境监测中展现出重要价值。该技术已广泛应用于水体、大气及土壤中多种污染物(如重金属离子、有机化合物等)的定性与定量分析,为环境污染评估与防治提供了有效工具。本文旨在系统阐述紫外分光光谱技术的原理及其在环境污染物检测中的具体应用,通过与其他检测技术的比较,突出其综合优势,以期对环境监测技术的优化与发展提供有益参考。

### 1 紫外分光光谱技术原理

#### 1.1 紫外分光光谱技术基础<sup>[1]</sup>

紫外分光光谱技术是一种基于分子对紫外-可见光区(通常指200-800nm)电磁辐射选择性吸收的分析方法。其理论基础是朗伯-比尔定律,该定律表明,当一束平行单色光通过均匀、非散射的吸光物质溶液时,溶液的吸光度与吸光物质的浓度及液层厚度成正比,这为环境中污染物的定量分析提供了核心依据。当物质分子中的价电子或分子轨道上的电子吸收特定波长的光子能量后,会发生能级跃迁,从而产生特征的吸收光谱。因此,通过测量和分析物质的吸收光谱,不仅可以对特定污染物进行定性鉴别,还能依据朗伯-比尔定律实现精准的定量分析,使其成为环境污染物检测中的重要工具。例如,宋歌等利用紫外分光光度法有效测定了土壤中的硝态氮含量,验证了该方法在复杂环境基质中的适用性。

#### 1.2 紫外光与物质相互作用机制

紫外光与物质的相互作用本质上是光子与分子中外层电子(或价电子)发生能量交换的量子化过程。当紫外光照射物质时,分子会选择性地吸收特定波长的光子能量,使其外层电子从能量较低的基态(例如成键 $\sigma$ 轨道或 $\pi$ 轨道)跃迁至能量较高的激发态(相应的反键 $\sigma^*$ 轨道或 $\pi^*$ 轨道)。这些跃迁主要包括 $\sigma \rightarrow \sigma^*$ 、 $n \rightarrow \sigma^*$ 、 $\pi \rightarrow \pi^*$ 及 $n \rightarrow \pi^*$ 等类型,并在紫外光谱上形成特征吸收峰。其中,含有不饱和键或未共用电子对的官能团(如C=O、-NO<sub>2</sub>等)是发生电子跃迁、产生紫外吸收的根源,被称为发色团。分子结构、共轭体系以及取代基性质共同决定了吸收峰的位置和强度,这为从分子层面识别与解析各类环境污染物提供了关键的理论依据。

### 1.3 紫外分光光谱仪的组成和工作原理<sup>[2]</sup>

紫外分光光谱仪主要由光源系统、单色器、样品室、检测器与信号处理系统五个核心部件组成。其工作原理为:光源(如氙灯与钨灯)产生的复合光经单色器中的光栅分光后,形成特定波长的单色光;该单色光通过盛有样品的吸收池时,部分光被待测物质选择性吸收;未被吸收的光抵达检测器(如光电倍增管)并被转换为电信号;系统最终依据朗伯-比尔定律,通过测量吸光度实现对污染物浓度的定量分析。现代双光束设计还可将单色光分割为样品光束与参比光束,通过实时比对有效补偿光源波动及环境干扰,显著提升测量的稳定性与准确度。

## 2 紫外分光光谱技术在环境污染物检测中的应用

### 2.1 水体污染物的检测

紫外分光光谱技术在水体污染物检测中发挥着重要作用,尤其适用于硝酸盐、酚类、苯系物及部分重金属离子等具有特征紫外吸收物质的快速筛查与定量分析。该技术通过直接测定水样在特定波长下的吸光度,依据朗伯-比尔定律即可实现目标污染物浓度的快速确定,操作简便且无需复杂前处理。例如,通过建立硝酸盐氮在220 nm波长处的校准曲线,可直接测定其在水体中的含量;而对含有苯环或共轭结构的有机污染物,可利用其独特的吸收光谱进行定性识别和定量监测。该方法灵敏度高、分析速度快,已成为地表水、地下水及污水中多种特征污染物常规监测的有效手段。

### 2.2 大气污染物的检测

在环境大气监测领域,紫外分光光谱技术凭借其高灵敏度和快速响应的特点,被广泛应用于气相污染物的定性分析与定量分析。该技术尤其适用于检测臭氧(O<sub>3</sub>)、氮氧化物(NO<sub>x</sub>)、二氧化硫(SO<sub>2</sub>)以及苯、甲醛等挥发性有机化合物(VOCs)。这些气体污染物分子在紫外波段具有特征吸收峰,例如臭氧在254nm处存在强吸收,氮氧化物在200-300 nm范围内有特定吸收带。基于朗伯-比尔定律,通过测量样品气体在特征吸收波长处的吸光度变化,即可实现对目标污染物浓度的精确测定。在实际应用中,常采用长光程吸收池或差分吸收光谱(DOAS)等技术来增强对低浓度污染物的检测能力,为大气环境质量和污染源解析提供了重要的技术支撑。

### 2.3 土壤污染物的检测

在土壤污染物检测中,紫外分光光谱技术主要应用于经溶剂提取后液态样品中特定污染物的分析。由于土壤基体复杂,直接测定困难,通常需借助特定溶剂对目标污染物进行萃取。该技术对含有共轭结构或芳香环的有机污染物,如多环芳烃、部分农药残留及硝态氮等,表现出良好的检测性能。通过检测萃取液在紫外区的特征吸收光谱,可实现对上述污染物的定性与半定量分析。例如,硝酸盐氮在220nm波长处的特征吸收可用于评估土壤氮素污染状况;多环芳烃在特定波长组合下的吸收光谱则可用于其类别识别与含量估算。该方法虽需依赖萃取前处理,但因其分析快速、成本较低,在土壤环境筛查与监测中仍具有重要应用价值。

2.4 案例分析:紫外分光光谱技术在特定环境污染物检测中的应用<sup>[3]</sup>

为具体展示紫外分光光谱技术的实际效能,以水体中化学需氧量(COD)和浊度(TURB)的同步检测为例展开分析。在实际水体监测中,COD(代表还原性有机物含量)与浊度(反映悬浊物含量)的光谱信号在180-400 nm范围内存在严重耦合与重叠干扰,传统方法难以精确区分。研究通过采用紫外光谱法,结合连续投影算法-支持向量回归(SPA-SVR)模型,有效提取了COD与浊度的特征波长,优化了预测模型,成功实现了对两者共存时特征耦合及谱峰重叠干扰的解析。此案例表明,紫外分光光谱技术结合化学计量学方法,能显著提升复杂水体基质中多污染物同步检测的精度与可靠性,为水质在线监测与污染评估提供了有效解决方案。

## 3 紫外分光光谱技术与其他检测技术的比较

### 3.1 紫外分光光谱技术与色谱技术<sup>[4]</sup>

紫外分光光谱技术与色谱技术的联用,结合了色谱卓越的分离能力与紫外光谱有效的定性分析能力,显著提升了复杂环境样品中多污染物分析的准确性与可靠性。例如,气相色谱与紫外光谱(GC-UV)的联用技术,能有效获取气相光谱以支持污染物结构解析,其非破坏性的检测特性允许与质谱(MS)等检测器串联使用,从而在不增加额外分析时间的前提下,实现信息的互补与增强。对于液相色谱,配备紫外二极管阵列检测器(DAD)的系统在环境水体中苯胺类除草剂等污染物的筛查与监测中应用广泛,其长期稳定性、宽线性范围和较低成本构成了其主要优势。这种联用策略不仅克服了单一紫外光谱在混合物分析中选择性不足的局限,也弥补了色谱技术仅依靠保留时间进行定性识别的缺陷,为复杂环境基质中污染物的分离、鉴定与定量提供了强有力的工具。

### 3.2 紫外分光光谱技术与质谱技术

紫外分光光谱技术与质谱技术在环境污染物检测中分别扮演着定性分析与结构解析的角色,二者在分析能力上形成显著互补。紫外光谱依据发色团的电子跃迁进行识别,对含有共轭体系或特定官能团的化合物响应灵敏,操作简便且成本较低,适用于常规污染物的大量筛查与定量分析。然而,其在复杂混合物分析中选择性较差,且难以鉴定未知物结构。相比之下,质谱技术通过

测定质荷比提供被测物精确的分子量与丰富的结构碎片信息, 具有极高的灵敏度与特异性, 尤其擅长于未知污染物的鉴定与代谢产物的甄别。因此, 在实际应用中, 紫外光谱常作为高效的初步筛查工具, 而质谱则作为确证与深度解析的核心手段; 二者亦可联用, 实现优势互补, 共同构成环境污染物分析中不可或缺的技术体系。

### 3.3 紫外分光光谱技术与电化学技术<sup>[5]</sup>

紫外分光光谱技术与电化学技术作为环境污染物检测的两种重要手段, 在原理和应用上具有显著的互补性。紫外光谱基于物质对特定波长紫外光的吸收进行定性与定量分析, 尤其适用于含有发色团(如芳香族化合物、共轭体系)的污染物。电化学技术则通过测量污染物在电极表面发生氧化还原反应产生的电信号(如电流、电位)来实现检测, 对电活性物质(如酚类、儿茶酚胺、某些重金属)展现出高灵敏度。相较于紫外光谱, 电化学方法在检测某些污染物时, 能避免降解中间产物在相同波长区域的吸收干扰。实际应用中, 二者可联用构成光谱电化学系统, 同步获取物质的光谱信息和电化学信息, 为研究污染物转化路径与反应机理提供了更为强大的工具。

### 3.4 紫外分光光谱技术的综合应用优势

在与色谱、质谱及电化学等技术的比较中, 紫外分光光谱技术展现出其独特的综合应用优势。该技术最显著的特点在于操作简便、分析快速且仪器购置和维护成本相对较低廉, 这使其特别适合于环境样品的现场快速筛查与常规批量检测。尽管在定性专属性上不及质谱, 在灵敏度上可能逊于电化学方法, 但其对含有共轭结构与发色团的污染物具备普适的响应能力, 提供了重要的互补价值。尤为重要的是, 紫外检测器与液相色谱的联用已成为环境分析实验室的标准配置, 凸显了其作为核心检测技术之一的地位。因此, 紫外分光光谱技术凭借其卓越的性价比、高效的分析通量以及良好的协同互补性, 在复杂环境基质污染物的检测体系中发挥着不可替代的作用。

## 4 结论与展望

### 4.1 紫外分光光谱技术在环境污染物检测中的现状

当前, 紫外分光光谱技术已发展成为环境污染物检测领域一项成熟且应用广泛的分析手段。该技术凭借其操作简便、分析快速和成本低廉的核心优势, 在各类环境监测实验室的常规分析中占据了稳固地位。它不仅作为独立的分析方法, 用于水体

中硝酸盐、酚类及特定有机污染物的直接测定, 更作为高效液相色谱(HPLC)等分离技术的关键检测器, 在复杂环境样品的多组分分析中发挥着不可替代的作用。尽管在面对痕量超痕量污染物或复杂基质干扰时存在一定局限性, 但其卓越的实用性、稳定性和高性价比, 使其依然是环境筛查、常规监测乃至科学研究中不可或缺的基础工具。

### 4.2 对未来环境污染物检测技术的建议

面向未来, 环境污染物检测技术应着力构建以多维联用、快速精准、智能互联为核心特征的技术体系。建议持续推进紫外分光光谱与色谱、质谱及电化学等技术的深度联用与融合创新, 充分发挥各自优势; 重点开发高灵敏、微型化的现场快速检测设备与实时在线监测系统, 以满足复杂环境基质中痕量污染物精准监测的迫切需求; 同时加强人工智能与大数据分析技术在光谱解析、污染溯源与风险评估中的创新应用, 推动环境检测技术从单一分析向智能化、网络化、预警化的综合诊断平台发展, 最终形成覆盖全面、响应迅速、精准高效的环境监测解决方案。

### [参考文献]

[1]宋歌,孙波,教剑英.测定土壤硝态氮的紫外分光光度法与其他方法的比较[J].土壤学报,2007,44(2):288-293.

[2]张明.紫外分光光度计常见问题与结构原理分析[J].实验技术与设备,2025.

[3]姜吉光,石磊,苏成志,等.基于SPA-SVR的紫外光谱水质污染物含量解耦预测方法[J].激光与光电子学进展,2023,60(4):0470002.

[4]Gras R,Luong J,Haddad P R,et al.Gas chromatography with simultaneous detection:Ultraviolet spectroscopy,flame ionization, and mass spectrometry[J].Journal of Chromatography A,2018,1563:171-179.

[5]Olvera-Vargas H,Cocerva T,Drogué P,et al.Electroanalytical methods for monitoring pollutants during (photo)-(electro)-catalytic treatments of wastewater - A critical review on possible hybrid vs sequenced combinations[J].Current Opinion in Electrochemistry,2024,45:101787.

### 作者简介:

许鼎均(1990--),男,汉族,广东阳江人,本科,职称:工程师,研究方向:环境监测(从事水质检测工作)。