

# 浅析环境空气中臭氧监测方法及应用研究

白晓艳<sup>1</sup> 普列扎布<sup>2\*</sup>

1 锡林郭勒环保投资有限公司 2 蒙古国立教育大学

DOI:10.32629/eep.v8i12.3008

**[摘要]** 臭氧(O<sub>3</sub>)作为大气关键污染物,其浓度变化对人体健康、生态环境及气候变化具有显著影响。精准监测臭氧浓度及前体物分布,是解析臭氧生成机制、制定污染防控策略的核心前提。本文系统梳理了环境空气臭氧主流监测方法,从化学分析法、仪器法、遥感监测法,阐述各方法的技术原理、核心特性,通过对比各方法的原理、优劣及适用场景,结合实际应用案例探讨技术落地效果,展望未来发展趋势,为臭氧污染防控与监测网络建设提供技术参考。

**[关键词]** 环境空气臭氧; 监测方法; 遥感技术; 应用研究

中图分类号: X169 文献标识码: A

## Analysis of Monitoring Methods and Application Research of Ozone in Ambient Air

Xiaoyan Bai<sup>1</sup> Urjintseren Purevjav<sup>2\*</sup>

1 Xilin Gol Environmental Protection Investment Co., LTD

2 Mongolian State University of Education, School of Mathematics and Natural Sciences, Department of Chemistry

**[Abstract]** As a key pollutant in the atmosphere, ozone (O<sub>3</sub>) concentration changes have significant impacts on human health, ecological environment and climate change. Accurate monitoring of ozone concentration and precursor distribution is a core prerequisite for analyzing ozone formation mechanisms and formulating pollution prevention and control strategies. This paper systematically sorts out the mainstream monitoring methods of ozone in ambient air, expounds the technical principles and core characteristics of each method from chemical analysis, instrumental analysis and remote sensing monitoring. By comparing the principles, advantages, disadvantages and applicable scenarios of various methods, combined with practical application cases to discuss the technical implementation effects, and look forward to the future development trends, so as to provide technical references for ozone pollution prevention and control and monitoring network construction.

**[Key words]** Ambient air ozone; Monitoring methods; Remote sensing technology; Application research

## 引言

环境空气中的臭氧主要分为对流层臭氧与平流层臭氧,其中对流层近地面臭氧作为典型二次污染物,并非由污染源直接排放,而是由氮氧化物(NO<sub>x</sub>)、挥发性有机物(VOCs)等前体物在阳光照射下,经复杂光化学反应生成。近地面臭氧具有强氧化性,长期暴露会穿透人体呼吸道屏障,诱发哮喘、肺炎等呼吸系统疾病,甚至损伤心血管系统与免疫系统,严重威胁人体健康;同时,臭氧浓度异常还会影响植物光合作用效率,导致农作物减产、生态系统退化,且对大气能见度及区域气候产生调控作用。

随着全球城市化、工业化进程加快,近地面臭氧污染问题日益突出,成为全球大气污染治理的重点与难点。臭氧污染的复杂性在于其生成机制受前体物浓度比例、气象条件、地形地貌等多重因素影响,且具有显著的时空异质性与跨境传输特性。本文通过系统梳理各类臭氧监测方法的技术要点,结合实际应用案

例对比分析其应用价值,展望技术发展方向,为优化臭氧监测体系、提升污染治理能力提供支撑。

## 1 环境空气臭氧主流监测方法及其技术特性

### 1.1 化学分析法

化学分析法基于臭氧与特定试剂的定量反应实现检测,是臭氧浓度监测的经典手段,以精准度高、数据可溯源为核心优势,主流方法为碘量法与靛蓝二磺酸钠分光光度法。

#### 1.1.1 碘量法

碘量法作为臭氧浓度测定的经典化学方法,其原理基于臭氧的强氧化性。臭氧与碘化钾溶液反应,将碘离子氧化为碘单质,再用硫代硫酸钠标准溶液滴定生成的碘单质,根据硫代硫酸钠的消耗量计算臭氧浓度。该法优点在于操作便捷、成本较低,适用于实验室精准分析及现场应急采样后的离线测定,精度可满足科研与校准需求。其局限性也较为明显:一是采样与分析

周期长,无法实现实时在线监测;二是易受干扰,空气中的二氧化硫、氯气等氧化性气体干扰导致监测结果偏高,不适用于大范围、高频次的常规监测。

### 1.1.2 靛蓝二磺酸钠分光光度法

靛蓝二磺酸钠分光光度法是中国环境监测领域广泛采用的手工监测方法,其原理为臭氧靛蓝二磺酸钠氧化为无色的靛红二磺酸钠,通过分光光度计测定氧化前后溶液的吸光度变化,根据吸光度衰减程度计算臭氧浓度。该方法的优势在于抗干扰能力强,监测精度高,检出限低,适用于环境空气、室内空气及污染源排放口周边臭氧浓度的测定。其主要局限性为:样品运输与储存过程中易发生氧化还原反应,影响结果准确性;无法实现实时在线监测,难以满足污染预警与动态管控需求。

### 1.2 仪器分析法

仪器分析法凭借高时效性、高自动化、连续监测的优势,成为城市空气质量自动监测网核心技术,可实现24小时连续监测、数据实时传输与异常预警,为污染动态管控、应急响应提供精准数据支撑。目前主流的仪器监测方法包括紫外吸收法、化学发光法、差分吸收光谱法等。

#### 1.2.1 紫外吸收法

紫外吸收法是国际公认的臭氧标准监测方法,也是中国城市空气质量自动监测站的主流选型技术,其原理基于臭氧对特定波长紫外光的选择性吸收特性。当紫外光穿过含臭氧的气体样品时,光强度会因臭氧吸收而衰减,衰减程度遵循朗伯-比尔定律,通过检测紫外光入射强度与透射强度的比值,得出臭氧浓度。

紫外吸收法的优势为:一是监测精度高,数据稳定性好,响应速度快;二是抗干扰能力强,无需复杂的样品预处理;三是自动化程度高,可实现自动校准、自动吹扫、故障报警等功能,运维成本相对可控。其局限性为:设备初期投资较高,不适用于高密度网格化补充监测;对环境湿度敏感,高湿度环境下易产生光散射干扰,需配备除湿装置,核心部件需定期更换,运维人员需具备专业技能。

#### 1.2.2 化学发光法

化学发光法基于臭氧与特定试剂的化学发光反应,通过检测发光强度换算臭氧浓度,主流技术为乙烯化学发光法。其原理为臭氧与乙烯在常温下发生氧化还原反应,生成激发态的甲醛,激发态甲醛跃迁回基态时释放出特定波长的光子,光子强度与臭氧浓度呈线性关系,得出臭氧浓度。

该法优势在于:一是灵敏度极高,可达ppb级,适用于低浓度臭氧的监测;二是响应速度快,可实现实时连续监测;三是设备体积相对小巧,便于移动监测与应急监测。其局限性为:一是乙烯为易燃易爆气体,储存与使用存在安全风险;二是易受干扰,空气中的氮氧化物、硫化物等会抑制发光反应,导致监测结果偏低;三是运维成本高,需定期更换乙烯试剂与光电倍增管,且试剂消耗量大,长期运行成本较高。目前,化学发光法主要应用于背景大气监测与科研场景。

### 1.2.3 差分吸收光谱法(DOAS)

差分吸收光谱法是一种基于光谱分析的多组分同时监测技术,可同时测定臭氧、NO<sub>x</sub>、VOCs、二氧化硫等多种污染物浓度,其原理为:利用臭氧在紫外-可见光波段的特征吸收光谱,通过采集大气中污染物的吸收光谱与标准光谱对比,得出臭氧浓度。

该法优势在于,多组分同步监测,同时获取臭氧及前体物浓度数据,为臭氧生成机制解析提供完整数据链;监测范围广,自动化程度高,可实现24小时连续监测与数据远程传输。其局限性为,监测精度受光谱分辨率影响较大,对低浓度臭氧的监测误差高;易受气象条件(如降水、强光)干扰,设备价格昂贵,数据处理复杂,适用于超级监测站、区域污染溯源监测等场景。

### 1.3 遥感监测方法

遥感监测方法可突破地面监测站的空间覆盖限制,实现大范围、立体化、长时序的臭氧污染监测,弥补地面监测网络的盲区,为区域污染格局分析、跨境传输模拟提供宏观数据支撑。目前主流的遥感监测方法包括卫星遥感法与无人机遥感法。

#### 1.3.1 卫星遥感法

卫星遥感法通过卫星搭载的高光谱传感器,采集大气中臭氧的特征吸收光谱,反演臭氧柱浓度或近地面臭氧浓度,实现全球或区域尺度的臭氧污染动态监测。

该法优势在于:一是覆盖范围广,可实现全球尺度、跨境区域的臭氧污染监测;二是时序性强,可获取长时间序列的臭氧浓度数据,为臭氧污染演变趋势研究提供支撑;三是可同步监测臭氧前体物与气溶胶浓度,为臭氧生成机制与跨境传输模拟提供完整数据。其局限性为:一是空间分辨率有限,难以捕捉城市内部、污染源周边等小尺度区域的臭氧浓度变化;二是数据滞后性,无法满足实时预警需求。目前,卫星遥感法广泛应用于区域臭氧污染跨境传输研究、长时间序列演变分析及宏观防控策略制定。

#### 1.3.2 无人机遥感法

无人机遥感法通过无人机搭载激光雷达、高光谱传感器或便携式臭氧监测设备,实现小尺度区域的臭氧浓度立体监测与精准溯源。

该法优势在于:灵活性强,可突破地形限制,深入工业园区、山谷、污染源周边等地面监测站难以覆盖的区域;空间分辨率高,可精准捕捉局部高值区,可实现立体化监测,获取臭氧浓度的垂直分布数据,为解析臭氧生成与扩散机制提供支撑;响应速度快,可快速完成应急监测与污染源排查,适用于突发污染事件处置。其局限性为:续航时间有限,单次飞行时间短,监测范围受飞行半径限制;受气象条件影响大,大风、降水、高温等天气会影响飞行安全与监测精度。目前,无人机遥感法主要应用于工业园区污染排查、污染源周边精准监测、应急污染事件处置等场景。

## 2 环境空气臭氧监测方法的实际应用案例

### 2.1 城市环境空气质量自动监测网中应用

臭氧监测方法已全面融入城市空气质量自动监测网,该网正朝着全球化布局、标准化建设、一体化运维方向演进,覆盖范围从发达国家核心城市延伸至发展中国家重点区域,技术与质控标准实现国际趋同,成为全球联防联控的关键基础设施。多地数据结果表明,城市臭氧污染峰值集中于夏季午后,浓度与 $\text{NO}_x$ 、VOCs排放及太阳辐射强度显著相关,为精准“削峰降污”提供数据支撑。

### 2.2 区域臭氧污染溯源监测中应用

区域臭氧溯源监测是破解污染“成因复杂、来源多元、传输跨境”难题的核心,国内外案例验证了多技术融合的有效性。国内四川绵阳构建“卫星遥感—激光雷达—车载质谱走航—无人机核查”一体化体系,实现夏季臭氧高值时段污染源快速锁定;国际上,欧盟哥白尼大气监测服务(CAMS)整合卫星、地面监测与数值模拟,搭建跨境溯源平台支撑协同减排;美国纽约都会区通过“飞机观测—地面站点—气象轨迹模型”立体监测,厘清 $\text{NO}_x$ 、VOCs贡献及跨境传输路径。实践表明,可构建“宏观—微观”全尺度技术体系与闭环管理模式,能提升臭氧污染防控科学性。

### 2.3 科研领域臭氧生成机制研究中应用

在臭氧生成机制研究中,化学分析方法与DOAS法、卫星遥感法结合,可实现臭氧及前体物的精准分析与多尺度监测。研究发现,干旱半干旱地区沙尘气溶胶对臭氧生成具有双重影响:一方面,沙尘颗粒散射太阳辐射,抑制光化学反应,降低臭氧生成效率;另一方面,沙尘颗粒可作为催化剂,促进前体物转化为臭氧,且吸附的前体物在沙尘天气结束后解吸,导致臭氧浓度反弹。该研究成果为干旱半干旱地区臭氧污染治理提供了理论支撑,也体现了多监测方法融合在科研领域的应用价值。

## 3 臭氧监测技术的发展趋势与展望

### 3.1 监测设备小型化与智能化

随着科技的发展,臭氧监测设备正朝着小型化、低成本化、智能化方向升级。一方面,低成本臭氧传感器的性能不断提升,基于紫外吸收原理的微型传感器体积小、价格低廉,结合人工智能算法优化数据校准模型,降低环境湿度、温度对监测精度的影响,可实现高密度网格化监测网络规模化部署,填补地面固定站的空间覆盖盲区。另一方面,监测设备智能化水平持续提升,通过物联网技术实现设备状态实时监控、远程校准、故障自动报警与数据自动上传,结合大数据分析实现监测数据的精准解析与异常预警,降低运维成本,提升监测网络运行效率。

### 3.2 多污染物协同监测技术体系构建

传统臭氧监测多聚焦于浓度监测,而前体物组分对臭氧生成机制的影响至关重要。未来,臭氧监测将逐步形成多污染物协同监测综合技术,将从单一指标向多污染物协同监测转变,DOAS、质子转移反应质谱等技术持续优化,实现臭氧与 $\text{NO}_x$ 、VOCs等前体物同步监测,为成因分析与溯源提供全面数据。

## 4 结论

环境空气臭氧监测方法已形成多元技术体系,各类方法各具优势与适用场景:化学分析法精度高、成本低,适用于校准与科研分析;仪器法时效性强、自动化程度高,是城市常规监测与预警的核心技术,其中紫外吸收法综合性能最优,应用最广泛;遥感监测方法覆盖范围广,适用于宏观格局分析、立体监测与污染源排查。

实际应用中,多技术融合是臭氧污染监测的发展趋势,通过手工监测校准、自动在线监测实时管控、遥感监测宏观覆盖,可实现臭氧污染全尺度、精准化监测。目前,臭氧监测技术已成功应用于城市管控、区域溯源、应急处置与科研研究,为臭氧污染治理提供了坚实的数据支撑,但仍存在设备成本较高、低浓度监测精度不足、多源数据融合能力薄弱等问题。未来,随着技术迭代升级,臭氧监测将朝着小型化、智能化、多技术融合、一体化管控方向发展,监测精度与效率将持续提升。

## [参考文献]

- [1]中华人民共和国生态环境部.HJ504-2009环境空气臭氧的测定靛蓝二磺酸钠分光光度法[S].北京:中国环境科学出版社,2009.
- [2]中华人民共和国生态环境部.HJ653-2013环境空气臭氧的测定紫外光度法[S].北京:中国环境科学出版社,2013.
- [3]国家环境保护总局《空气和废气监测分析方法》编委会.空气和废气监测分析方法[M].北京:中国环境科学出版社,2003.
- [4]陈军辉,李丽,王强.无人机遥感技术在工业园区臭氧污染溯源中的应用[J].环境监测管理与技术,2023,35(2).

## 作者简介:

白晓艳(1985--),女,蒙古族,内蒙古自治区锡林郭勒盟锡林浩特市人,毕业于内蒙古大学,本科,高级工程师,主要研究方向:生态环境监测及污染治理。

## \*通讯作者:

普列扎布(1965--),女,蒙古族,博士,教授,研究方向:生物化学与食品化学技术。