

文章编号: 1002-1582(2026)04-0411-08

基于DOAS技术检测痕量气体的研究综述

王海燕*, 李剑, 刘学刚, 程丽萍, 吕利, 王国娟
(青岛市计量技术研究院, 山东 青岛 266101)

摘 要: 差分吸收光谱(DOAS)技术已成为检测痕量气体的主流技术, 被广泛应用于城市空气研究、农村地区测量、平流层和对流层痕量气体监测、火山羽流成分分析等方面。DOAS具有高选择性、高灵敏性、非接触、多组分同步检测等特点, 可检测NO、NO₂、CHOCHO、SO₂、O₃、芳香烃等多种气体, 检测限最低可达pptv量级。该综述以主/被动两种模式分别介绍了DOAS检测痕量气体的研究现状。针对主动式DOAS介绍了系统结构的变化, 光源、探测器等元件的发展, 可探测气体种类, 特定领域的应用; 针对被动DOAS, 介绍了地面站点、移动平台(车辆、船舶、飞机)和环境卫星等遥感监测方式。最后, 针对DOAS与成像技术和DOAS与腔增强吸收光谱结合应用情况进行了介绍, 并对DOAS检测痕量气体的未来发展和研究方向进行了展望。

关 键 词: 光学测量; 差分吸收光谱; 痕量气体; 长光程差分吸收光谱; 多轴差分吸收光谱

中图分类号: X831

文献标识码: A

Research review on the detection of trace gases based on DOAS technology

WANG Haiyan*, LI Jian, LIU Xuegang, CHENG Liping, LV Li, WANG Guojuan

(Qingdao Institute of Measurement Technology, Qingdao 266101, China)

Abstract: Differential Optical Absorption Spectroscopy (DOAS) has become a mainstream technique for detecting trace gases and is widely used in urban air quality studies, measurements in rural areas, stratospheric and tropospheric trace gas monitoring, and volcanic plume composition analysis. DOAS offers high selectivity, high sensitivity, non-contact operation, and simultaneous multi-component detection, enabling the measurement of various gases such as NO, NO₂, CHOCHO, SO₂, O₃, Aromatic Hydrocarbons, with detection limits as low as the pptv level. Its applications are presented in trace gas detection using both active and passive modes. For active DOAS, it discusses the evolution of system configurations, advancements in components like light sources and detectors, the variety of detectable gases, and its applications in specific fields. For passive DOAS, it covers remote sensing methods using ground-based stations, mobile platforms (vehicles, ships, aircraft), and environmental satellites. Following that, an introduction was provided on the combined application of DOAS with imaging technology, as well as DOAS with cavity-enhanced absorption spectroscopy. Finally, the paper offers an outlook on the future development and research directions for DOAS in trace gas detection.

Keywords: optical measurement; differential optical absorption spectroscopy; trace gas; long-path differential optical absorption spectroscopy; multi-axis differential optical absorption spectroscopy

0 引 言

近年来, 随着科学技术的快速发展, 痕量气体的存在及影响越来越受到关注。所谓痕量气体,

其体积分数一般介于ppmv至pptv之间, 含量相对较低, 但却具有深远的影响。在环境领域, 如SO₂、NO₂和近地表的O₃等, 是光化学烟雾和酸雨等污染的重要来源^[1,2]。在工业安全领域, 石油炼

收稿日期: 2026-01-25; 收到修改稿日期: 2026-04-13

基金项目: 山东计量测试学会科技项目(2024KJ43)

作者简介: 王海燕(1988—), 女, 高级工程师, 硕士, 从事气体分析计量研究。

* 通讯作者: wanghaiyan_0418@163.com

制中的 H_2S 、化工生产中的 Cl_2 、 NH_3 、VOCs 等，只要痕量就会对人体造成不可逆的伤害。中国职业卫生标准 GBZ 2.1-2019《工作场所有害因素职业接触限值 第 1 部分：化学有害因素》中更是对痕量气体的浓度限制有明确规定。由此，为了更健康更安全地向前发展，人们探索各种高精度、高可靠性的痕量气体检测方法，把气体由“看不见”变为“看得见”，应用于生产生活中的各个方面。

痕量气体的测量技术有多种，相对成熟的主要包括电化学传感器技术^[3]、气相色谱技术^[4]、光学技术^[5,6]等，其中光学技术由于具有高灵敏度、高选择性、非接触检测、快速响应等优点，成为目前检测痕量气体的优选方案。差分吸收光谱（Differential Optical Absorption Spectroscopy, DOAS）技术作为光学技术的一种，目前已成为测量大气中多种痕量气体的主流技术。DOAS 最早由德国海德堡大学 Platt 等^[7]提出，之后被广泛应用于城市空气研究、农村地区测量、平流层和对流层痕量气体监测、火山羽流成分分析等方面。本文主要针对 DOAS 的原理、研究进展、与其他技术结合情况、未来发展等方面进行综述。

1 DOAS 原理

DOAS 基于待测气体在窄带吸收光谱上的“指纹”吸收特性，通过将目标气体的窄吸收部分与背景光源的宽吸收分离，消除颗粒物等散射的影响，然后比较入射光和透射光差异，来实现高精度痕量气体检测。DOAS 算法原理如图 1 所示，其中光强 I_0 和吸收截面 σ 被分为宽带部分（ I'_0 和 σ_b ）和窄带部分（ D' 和 σ' ）。

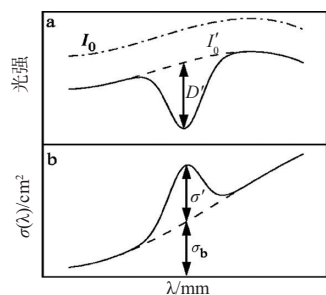


图 1 DOAS 算法原理示意图^[7]

1.1 基本原理

已知光程长度的 DOAS 的基本原理由 Beer-Lambert 定律表示

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp \left\{ -L \cdot \left[\sum_i \sigma_i(\lambda) c_i + \epsilon_R(\lambda) + \epsilon_M(\lambda) \right] \right\} \cdot A(\lambda) \quad (1)$$

式中， $I(\lambda)$ 为通过光程 L 后的测量光强； $I_0(\lambda)$

为波长为 λ 处的原始光强； L 为光程长； c_i 为第 i 种待测气体浓度； $\sigma_i(\lambda)$ 为痕量气体 i 在波长 λ 处的吸收截面； $\epsilon_R(\lambda)$ 和 $\epsilon_M(\lambda)$ 分别为瑞利散射和米散射造成的光强衰减； $A(\lambda)$ 为光学系统衰减系数。

吸收截面构成可表示为

$$\sigma_i(\lambda) = \sigma'_i(\lambda) + \sigma_{i0}(\lambda) \quad (2)$$

式中， $\sigma'_i(\lambda)$ 为差分吸收截面； $\sigma_{i0}(\lambda)$ 为宽带吸收截面。将式 (2) 代入式 (1) 得到

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp \left\{ -L \cdot \left[\sum_i \sigma'_i(\lambda) c_i \right] \right\} \cdot \exp \left\{ -L \cdot \left[\sum_i \sigma_{i0}(\lambda) c_i + \epsilon_R(\lambda) + \epsilon_M(\lambda) \right] \right\} \cdot A(\lambda) \quad (3)$$

式中，两个指数函数依次表示痕量气体差分吸收部分和痕量气体“宽带”吸收部分与散射部分。用 $I'_0(\lambda)$ 表示“慢变化”部分，即

$$I'_0(\lambda) = I_0(\lambda) \exp \left\{ -L \cdot \left[\sum_i \sigma_{i0}(\lambda) c_i + \epsilon_R(\lambda) + \epsilon_M(\lambda) \right] \right\} \cdot A(\lambda) \quad (4)$$

将式 (4) 代入式 (3)，两边取对数，可得差分光学厚度为

$$D' = \ln \frac{I'_0(\lambda)}{I(\lambda)} = L \cdot \left[\sum_i \sigma'_i(\lambda) c_i \right] \quad (5)$$

式中，差分吸收截面 $\sigma'_i(\lambda)$ 取自实验室数据库（如 HITRAN），根据数据库提供的高分辨率谱线参数，依据实际温度和压力进行修正，再与仪器狭缝函数进行卷积运算，光谱分辨率一致后，通过最小二乘法拟合，得到各待测痕量气体浓度。

1.2 被动 DOAS 技术基本原理

光程长度未知情况下，即采用太阳光作为光源，应用 Beer-Lambert 定律时需要进行特定调整。可采用积分形式

$$I(\lambda) = I'_0(\lambda) \exp \left\{ - \int \left[\sum_i \sigma'_i(\lambda) c_i \cdot ds \right] \right\} \quad (6)$$

被动 DOAS 反演的气体浓度称为斜柱浓度（Slanted Column Density, SCD），即

$$SCD_i = \int c_i(s) \cdot ds \quad (7)$$

将式 (7) 代入式 (6)，则

$$I(\lambda) = I'_0(\lambda) \exp \left\{ - \int \left[\sum_i \sigma'_i(\lambda) SCD_i \right] \right\} \quad (8)$$

通过光谱仪测得吸收光谱，并与已知气体标准吸收特征匹配，可反演多种痕量气体的斜柱浓度（SCD）。

2 DOAS的研究进展

2.1 DOAS概况

差分吸收光谱技术可实现非接触实时监测,抗干扰能力强,具有高灵敏度,优异的时间分辨率,可实现多组分同时检测。通过检测相对光强,实现光谱分析,降低了对温度等环境因素的敏感性。DOAS更适合于检测具有窄带吸收结构的气体,对痕量气体的连续吸收、波长单调变化的消光过程、光学系统透射率的缓慢变化基本上不敏感。理论上所有在紫外、可见光或者近红外波段具有窄带吸收结构的气体都可以被检测,但限于痕量气体在大气中的浓度和当前DOAS仪器的检测限,限制了可探测的痕量气体种类。

DOAS根据光源不同可分为主动式和被动式两种。主动式一般采用人工光源,如氙灯^[8]、氙灯^[9]、LED^[10]等,典型代表为长光程差分吸收光谱(Long Path Differential Optical Absorption Spectros-

copy, LP-DOAS)技术,其光谱范围更宽,可以在夜间和深紫外波段工作,检测的是长光程中平均浓度水平,局部变化对检测结果的影响较小^[11]。采用多路径LP-DOAS和层析反演结合,可获得二维乃至三维痕量气体分布。被动式DOAS主要采用自然光源,包括太阳光、月光等^[12],典型代表为多轴差分吸收光谱(Multi-AXis Differential Optical Absorption Spectroscopy, MAX-DOAS)技术,其仅适合日间工作,无法替代主动式DOAS,但其独特优势在于,部署便捷,能耗低,可反演气体垂直廓线,时间分辨率高。

DOAS的应用涵盖城市空气研究、对流层和平流层痕量气体观测以及火山羽流观测等,可同步检测多种痕量气体。DOAS原理可用多种光路布置和观测模式,具体分类如图2所示。其中,(a)~(b)为主动模式,采用人工光源;(c)~(f)为被动模式,采用自然光源。以下将分别针对主动式DOAS和被动式DOAS进行详细介绍。

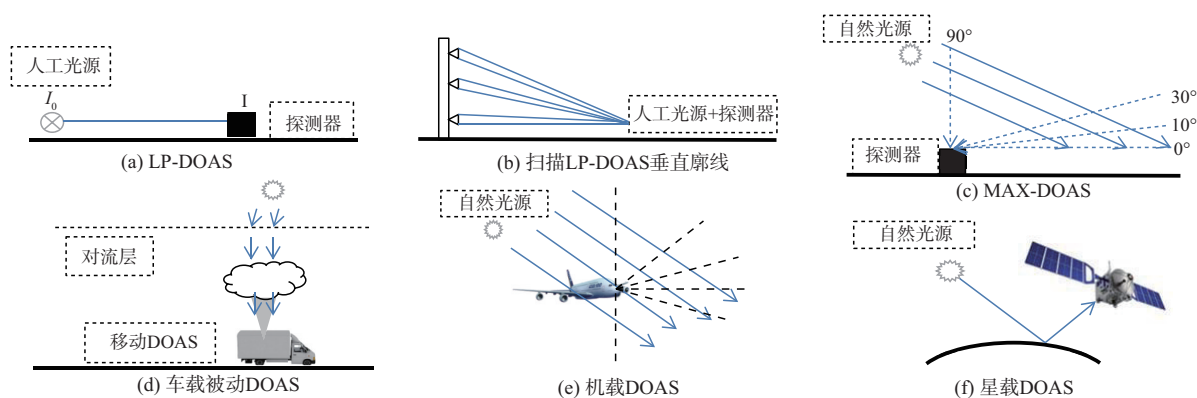


图2 DOAS观测模式示意图^[13-15]

2.2 主动式DOAS

主动式DOAS使用人工光源,积分时间的量级一般为秒到分钟。LP-DOAS可探测数百米至20公里光路上的痕量气体,针对痕量气体种类的不同,检测灵敏度可达ppbv至pptv级别^[13]。LP-DOAS的探测极限与精密度,与光谱残差结构紧密相关,除噪声外,光源不稳定性、光束偏移、元件机械形变、探测器暗电流等因素均会引入系统性光谱残差^[16]。通过系统结构、光学元件、探测器的更新和发展,可有效抑制残差,提升系统性能。

2.2.1 系统结构

LP-DOAS作为一种长距离测量方式,其有效光强对测量精度尤为关键,每个光学元件的效率及组合模式都会影响光强的输出。LP-DOAS早期采用双静态架构,即收发两端均采用望远镜。1990年, Axelson等^[17]创新研发单静态架构,通过单个望远镜和角反射器实现光路折返,设计简化且光程增加一倍。

2011年, Merten等^[18]将发射和接收两端采用光纤连接,取代了常用的望远镜组合,这种创新提高了光通量,发现信号提高10倍,也更便于仪器小型化。目前最先进的LP-DOAS系统多基于光纤技术。

2.2.2 光学元件

LP-DOAS对光源要求是发射光谱区间足够宽,光谱变化小,当前大多采用氙灯、氙灯或发光二极管(Light Emitting Diode, LED)作为光源。氙灯相对于氙灯来说,在紫外光区能量较强,光谱形状较为平缓,稳定性和重现性更好。氙灯的使用寿命更长,更适合长期监测领域的应用^[8]。传统弧光灯作为光源在其使用寿命期间,强度和光谱形状会发生变化,也会出现杂散光问题。2006年, Kern等^[9]首次将LED取代传统热光源—氙弧灯作为LP-DOAS光源,实现了NO₂和NO₃的检测,在6km光程检测限分别为0.3ppbv和16pptv。LED窄光谱特性相对于传统光源来说,可将杂散光严格控制在

1% 以内, 且全谱能量均可用来测量。针对单个 LED 光谱范围窄的特点, 郑尼娜等^[10]采用两种紫外 LED 形成组合式宽带光源, 并在光谱反演时提出两种 LED 独立的灯结构参与拟合, 可减小干扰的影响, 实现了大气中痕量 SO_2 和 O_3 的同步探测。竺耀东等^[8]将高压氙灯和紫外 LED 结合, 将氙灯的光谱覆盖范围从 190~400nm 扩展到 450nm 以上, 实现了对 SO_2 、 NO 和 NO_2 的同时检测。杨雷等^[19]采用波长 450nm 的可见光 LED 作为光源进行 NO_2 气体浓度检测, 为进一步获得稳定光谱, 通过试验得出 LED 工作温度应低于 20℃, 驱动电流在 1.5A 以内。2019 年, Nasse 等^[16]首次引入激光驱动光源 (Laser-Driven Light Source, LDLS), 采用望远镜耦合提高了传输均匀性, 并能有效抑制干扰, 痕量气体的检测限降低为原来的 1/4, 与弧光灯相比, 采用 LDLS 残差降低 35%。此外, LDLS 的使用寿命比典型氙弧灯长约一个数量级。

2.2.3 探测器

探测器需要快速可靠地测量光谱的相对强度差异, 从而实现痕量气体浓度检测。探测器早期采用基于光电倍增管的机械扫描探测器, 后来发展为基于光电二极管阵列 (Photodiode Array, PDA) 的固态探测器, 通过叠加多次扫描, 明显提高信噪比, 测量时间缩短两个数量级^[20]。随后, 新型的电荷耦合 (Charge-Coupled Device, CCD) 探测器的出现, 使得测量的稳定性进一步提高^[21]。CCD 探测器在近紫外区域具有高于 20% 的量子效率, 有更好的信噪比, 但容易受暗电流干扰, 一般通过维持低温来消除其影响, 减小系统残差^[22]。

2.2.4 可检测气体种类

LP-DOAS 可检测多种气体, 包括 NO 、 NO_2 、 HNO_2 、 CHOCHO 、 SO_2 、 O_3 、 HCHO 、 NH_3 、 CH_3SCH_3 、芳香烃等, 检测限可达 ppbv 甚至 pptv。卢慧等^[23]提出一种光强免校准的差分吸收光谱反演算法, 并对 NO 进行测量应用, 在 226.2nm 吸收峰处获得良好线性。Zou 等^[24]采用 Y 型光纤结构, 优化 LP-DOAS 系统, 实现 738m 光程同步检测 SO_2 和 NO_2 浓度, 其测量结果与监测站数据在量级和变化趋势上具有良好的一致性。Volkamer 等^[25]首次验证了 LP-DOAS 测定 CHOCHO 的可行性, 通过其在可见光特有的窄带吸收, 检测限达 ppbv。Wang 等^[26]通过 LP-DOAS 连续监测空气中 NO_2 、 O_3 和 HNO_2 , 三种痕量气体的理论探测限都不超过 2ppbv, 并针对性指出温度、湿度、日照时长等气象条件对 O_3 浓度有关键影响。Liu 等^[27]采用 LP-DOAS 对 HCHO 进行监测, 并选择 CO 和 O_x ($\text{NO}_2 + \text{O}_3$)

作为示踪剂, 解析甲醛来源, 检测限可达 ppbv 级别。胡嘉琪等^[28]搭建了开放光路的紫外 DOAS 系统, 分别针对 NH_3 、 CH_3SCH_3 气体在 190~240nm 波段的吸收特征, 通过混气实验选择最优反演波段, 探测下限可达 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。Stutz 等^[29]为监测芳香烃, 研发了基于光纤混频器与双 LED 光源结合的 LP-DOAS, 可实现在 270m 至 1200m 光路上测量芳香烃, 检测限低于 1ppbv。

2.2.5 特定领域的应用

LP-DOAS 在特定领域的应用, 促进了痕量气体检测的发展。Vita 等^[30]设计了一种微型 LP-DOAS 仪器, 具有轻量、便携、低功耗的特点, 专门用于测量火山气体排放, 能够对低至 8ppmv·m 的 SO_2 柱密度进行测量。Krause 等^[31]采用 LP-DOAS 首次实现了单船大气中 NO_2 和 SO_2 排放速率的定量测算, 分别为 $(1.5 \pm 2.9)\text{g/s}$ 和 $(0.6 \pm 1.1)\text{g/s}$, 能够独立于气象条件测量含有污染物的船舶羽流。Duan 等^[32]研发了一套 LP-DOAS 仪器, 用于在机场区域监测飞机排放污染物, 光路可覆盖滑行道和起飞跑道, 在不影响机场正常运行下, 可实时监测 NO_2 和 SO_2 排放, 在飞机起飞时, NO_2 和 SO_2 的平均浓度为 25ppbv 和 8ppbv。胡嘉琪等^[28]应用开放光路 DOAS 技术, 在 1.2m 怀特池的基长下, 可实现最长为 33.6m 的测量光程, 通过车载系统的移动观测, 实现了填埋场有毒有害气体的在线监测。

2.3 被动式 DOAS

被动 DOAS 是一种广泛应用于不同平台的遥感技术, 包括地面站点、移动平台 (车辆、船舶、飞机) 和环境卫星。特点是低能耗、可反演廓线, 但依赖太阳光, 仅能日间工作, 且数据处理较为复杂。多轴差分吸收光谱 (MAX-DOAS) 将痕量气体检测由天顶扩展至多方向, 通过对不同观测仰角下的散射太阳光进行分析, 来获得对流层痕量气体的垂直廓线, 其中最小仰角对近地表具有高敏感性^[33]。

被动 DOAS 光源一般为太阳光, 反演过程需要考虑多个因素, 包括夫琅禾费线, 辐射传输路径长度、不明的光谱结构等, 其中可用 Ring 效应去除夫琅禾费结构的影响^[34]。反演得到的痕量气体的 SCD 不能直接代表痕量气体的空间分布, 需要通过几何近似或利用大气辐射传输模型确定大气质量因子 (Air Mass Factor, AMF), 从而获得垂直柱浓度 (Vertical Column Density, VCD)。在晴朗、无云、低气溶胶天气, 目标气体的 AMF 可以通过简单的几何近似来估算。复杂环境下, AMF 依赖于大气辐射传输模型, 例如: SCIATRAN、VECTOR 等。Xu 等^[35]利用德国不来梅大学设计的 SCIATRAN 模型, 讨论分析了不同条件下地表反照率、不对称因子、太阳方位角、

单次散射反照率等对气体 AMF 的影响差异。随着机器学习的成功,空气质量因子的计算及廓线反演得以发展。Dong 等^[36]使用 VECTOR 模型结合卷积神经网络和长短期记忆网络,实现了单次 MAX-DOAS 反演 360nm 波长下的气溶胶消光系数廓线、单次反照率和不对称参数。Kuhn 等^[37]基于新的机器学习模型 NitroNet,利用获得的垂直柱浓度和气象场、地表类型等作为输入,可预测完整的 NO₂ 廓线。

2.3.1 地基 DOAS

地基 MAX-DOAS 通过转动望远镜可以接收不同方向的散射或直射太阳光线,从而获取痕量气体的空间分布信息。Zhong 等^[38]采用 MAX-DOAS 技术,分别获取 O₄ 和 NO₂ 的差分斜柱浓度,通过实测 O₄ 数据提取光路信息,将 NO₂ 差分斜柱浓度转换为体积混合比,并采用修正系数对混合比校正,再乘以混合层高度来推算 NO₂ 垂直柱浓度。Qian 等^[39]通过扣除平流层 O₃ 影响,利用地面 MAX-DOAS 反演对流层 O₃ 垂直廓线,无观测盲区,结果显示高浓度 O₃ 分布在距地表 1km 以下,最高 O₃ 浓度出现在 0.3km~0.5km 高度。Nikolis 等^[40]基于研究级 MAX-DOAS 系统,采用两个温度吸收截面的光谱拟和方法,通过分析直射太阳光谱来反演大气 NO₂ 浓度。Xu 等^[35]对传统 MAX-DOAS 方法进行了改进,通过快门切换模块,按需控制望远镜角度,并集成二维面阵 CCD 光栅光谱仪及多模多芯光纤,能够快速获取痕量气体垂直廓线,单个仰角扫描周期可控制在 2min 内。

2.3.2 移动 DOAS

移动 DOAS 可基于车载、船载和机载等方式,观测范围也逐渐由小变大。González Rivero 等^[41]采用移动式微型 DOAS,充分考虑气象条件与地形特征,运行 AERMOD 模型,实现了对 NO₂ 和 SO₂ 扩散情况的评估。王志多等^[42]构建了车载 DOAS,包括控温、光谱采集和 GPS 功能,可得到路径上 HCHO 空间分布。Hong 等^[43]介绍了沿长江航段的船载 MAX-DOAS 测量研究,工业区下风向探测到显著 NO₂ 和 SO₂ 垂直柱浓度,与风速呈正相关。叶凡等^[44]研发了一套低成本、轻量化的 MAX-DOAS 机载系统,采用多传感器实现 90m 内不同高度和 360° 不同方位痕量气体观测,获取了 NO₂、SO₂、HCHO 浓度分布。Baidar 等^[45]采用机载 MAX-

DOAS,配备运动补偿系统,通过多角度旋转实现飞机上方、下方、前方等多种痕量气体的水平和垂直分布监测,30s 积分时间内,实现对流层中 NO₂、CHOCHO、HCHO、H₂O 的检测限分别为 5ppbv、3ppbv、100pptv、42ppmv。移动 DOAS 针对工业区、城市等区域排放源的排放通量方面也取得了相应进展,杨东上等^[46]基于机载和车载 DOAS 对工业区进行走航观测,考虑实时风场数据,并结合 NO_x 在大气的衰减模型,获得工业区的 NO_x 排放通量。汤玉洁等^[47]采用搭建了便携式增稳车载 DOAS 系统,开展车载 DOAS 走航观测,基于 ERA5 风场数据,估算了淮北市外环区域 NO₂ 的排放通量。

2.3.3 星载 DOAS

星载 DOAS 最大的优势是可以全球观测,覆盖范围广,但其分辨率一般在几十公里量级,需要借助地基观测验证。当前,星载 DOAS 主要包括 ERS-2 卫星上的 GOME 仪器、ENVISAT 卫星上的 SCIAMACHY 仪器、AURA 卫星上的 OMI 仪器、Sentinel-5P 卫星上的 TROPOMI 仪器以及我国高分五号卫星上的 EMI 等,各个卫星载荷关于搭载平台、发射时间、空间分辨率、主要监测气体种类等多个方面对比如表 1 所示^[11]。其中,TROPOMI 能够提供全球大气痕量气体分布最高分辨率为 3.5km×5.5km^[48]。Beirle 等^[49]结合 TROPOMI 空间高分辨率优势,提出散度方法,能够清晰定位和解析单个发电厂 NO_x 排放源。De Smedt I 等^[33]对比了 OMI 和 TROPOMI 两种仪器对 HCHO 的观测,两者观测的柱浓度大小和空间分布总体吻合良好,但 TROPOMI 观测值更加稳定,精度比 OMI 高。Leue 等^[50]通过 ERS-2 搭载的 GOME,实现了全球 NO_x 排放量的量化估计,弥补了地基、机载仪器局部测量的限制。Buchwitz 等^[51]采用 WFM-DOAS 处理 SCIAMACHY 天底光谱,反演了 CH₄、CO₂ 和 O₂ 的垂直柱浓度,并首次利用卫星测量探测到一个自然的 CO₂ 源。2023 年,钱园园^[52]应用我国国产的 EMI 进行 O₃ 观测,通过 DOAS 反演臭氧柱浓度,并与 OMI、TROPOMI 等测量结果在全球范围内进行对比,测量结果的平均相对差异小于 5%,具有单日检测全球臭氧柱浓度的能力。同年,又首次反演了我国第二代星载大气痕量气体差分吸收光谱仪 (EMI-II) 的 SO₂ 斜柱浓度^[53]。

表 1 卫星载荷综合对比

卫星载荷	搭载平台	发射时间/年	空间分辨率/(km×km)	主要监测气体种类
GOME	ERS-2	1995	40×320	O ₃ 、NO ₂ 、SO ₂ 、BrO、ClO、OCIO
SCIAMACHY	ENVISAT	2002	30×60	O ₃ 、NO ₂ 、SO ₂ 、BrO、HCHO、OCIO
OMI	AURA	2004	13×24	O ₃ 、NO ₂ 、SO ₂ 、BrO、HCHO、OCIO
TROPOMI	Sentinel-5P	2017	3.5×5.5	O ₃ 、NO ₂ 、SO ₂ 、HCHO、CHOCHO
EMI	高分五号卫星 GF-5	2018	13×48	O ₃ 、NO ₂ 、SO ₂ 、HCHO
EMI-II	大气环境监测卫星 DQ-1	2022	13×24	O ₃ 、NO ₂ 、SO ₂ 、HCHO

3 DOAS与其他技术结合

3.1 DOAS与成像技术结合

DOAS与成像技术相结合是最近的一个重要进展,可获取排放羽流中痕量气体的二维成像图,特别适用于个体排放源,如单个化工厂或火山。成像技术主要采用二维CCD检测器,一个维度用来测量入射光的光谱强度,另一个维度用“推扫”方法获得空间信息。

Bobrowski等^[54]采用成像DOAS技术进行火山羽流观测,每15min生成一次痕量气体分布的二维图像,实现全面的区域覆盖,获得痕量气体SO₂分布图。Zhang等^[55]介绍了一种新型机载成像差分吸收光谱,采用光纤和成像光谱技术,结合飞机平台的扫描模式工作,实现NO₂浓度的二维分布可视化。Kern等^[46]专为空中观测设计的成像DOAS,可实现垂直向上和垂直向下的两种观测方式,能够追踪痕量气体下风向漂移的空间范围。

3.2 DOAS与腔增强吸收光谱结合

DOAS在测量痕量气体过程中具有宽光谱和特异性方面的优势,CRDS利用谐振腔来延长吸收光程,通过光在腔内衰减速率来反演气体浓度。两者结合,采用宽带光源注入光学谐振腔,之后通过光谱仪采集宽带光谱,并利用DOAS进行数据处理。该技术集聚了CRDS和DOAS两者的优势,一方面可获得超高灵敏度,在超短腔内可实现数公里甚至数十公里的有效吸收光程;另一方面在测量多种气体的同时,可以更好避免其它气体的干扰。但相对于单一的CRDS或DOAS,整个系统更加复杂,对光学元件、数据采集和处理等方面要求更高。

Platt等^[57]首次提出腔增强差分吸收光谱技术,并针对性提出校正补偿来减少消光的影响。Meinen等^[58]采用腔增强光谱仪与DOAS仪器结合,专门用来检测NO₃,在300s积分时间,最低可实现6pptv的检测限,与传统LP-DOAS仪器之间的相关系数 $R=0.98$ 。Horbanski等^[59]提出了基于迭代算法的腔增强DOAS技术,使得测量独立于光强的宽带变化,利用数据评估优势,构建了50cm腔长、轻量化、低功耗的NO₂测量仪器,检测限为20pptv。

4 未来发展趋势与研究方向

当前,DOAS对痕量气体检测的应用领域日益广泛,可检测的气体种类也在逐步增加,通过多平台的应用,观测范围也由小尺度发展至区域性乃至全球性的痕量气体监测。从系统结构来看,无论是光源、探测器的更新换代,还是光纤的结

合应用,都对DOAS的发展起到极大的助力。DOAS处于一个快速发展的阶段,其对痕量气体的监测,建议继续向三个方面展开研究:

第一,加强立体监测,探求卫星载荷的更高时空分辨率,关注国产卫星载荷的发展,进一步研发无人机遥感载荷,发展新型立体探测技术和光学成像探测技术。多平台、多技术联合观测,发挥各自优势,实现痕量气体在多个空间尺度和时间尺度的有效监测。第二,硬件的突破是提升检测精度的关键,研发新材料传感器,如光纤传感器,提升系统使用寿命,降低光强损耗;探寻新型光源提升光谱辐射亮度,覆盖更宽光谱范围;设计更精密的微型长光程气室,与光纤技术相结合等方式推动光谱仪向更加小型和便携式发展;通过低功耗设计来改进仪器,满足极地等偏远地区甚至无人区的痕量气体的长时期观测。第三,光谱分析的关注点在于从复杂的光学信号中提取目标气体的特征吸收,面对吸收截面相似的气体,要提升DOAS算法的有效性。宽光谱扩展可实现不同组分在不同波段信息互补,提高分析精度。同时随着机器学习的发展,卷积神经网络反演要进一步发展,与宽光谱扩展相结合,实现更加精确的探测,获得更低的痕量气体检出限。

参考文献:

- [1] 马路遥,林俊,张亮,等.温室气体浓度监测的光腔衰荡光谱研究进展[J].计量学报,2022,43(2):274—280.
Ma Luyao, Lin Jun, Zhang Liang, et al. Review on the Cavity Ring-down Spectroscopy for greenhouse gas monitoring[J]. Acta Metrologica Sinica, 2022, 43(2): 274—280.
- [2] 王菁,黄云彪,甄长飞,等.短光程下差分吸收光谱法测量烟气温度的研究[J].光学技术,2020,46(3):336—341.
Wang Jing, Huang Yunbiao, Zhen Changfei, et al. Study on measurement of flue gas concentration based on DOAS in short light path[J]. Optical Technique, 2020, 46(3): 336—341.
- [3] 葛亮,徐一鹏,肖小汀,等.燃气管四氢噻吩浓度电化学在线检测仪设计[J].电子测量与仪器学报,2025,39(7):247—258.
Ge Liang, Xu Yipeng, Xiao Xiaoting, et al. Design and implementation of an online detection instrument for tetrahydrothiophene concentration in gas pipeline networks[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2025, 39(7): 247—258.
- [4] 侯晓玲,李思思,邢冠华,等.气相色谱-高灵敏检测技术同步测定环境空气痕量温室气体(CO₂/CH₄/N₂O/SF₆)[J].中国测试,2025,51(8):68—79.
Hou Xiaoling, Li Sisi, Xing Guanhua, et al. Simultaneous determination of trace greenhouse gases (CO₂/CH₄/N₂O/SF₆) in ambient air by gas chromatography coupled with high-sensitivity detection: method development and application[J]. China Measurement & Test, 2025, 51(8): 68—79.
- [5] Giechaskiel B, Clairotte M. Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy for measurements of vehicle exhaust emissions: A review[J]. Applied Sciences, 2021, 11(16): 7416.
- [6] 李刻泰,李晓峰,夏传青,等.基于双飞秒光学频率梳的CO₂光谱测量[J].光学技术,2025,51(2):218—224.
Li Ketai, Li Xiaofeng, Xia Chuanqing, et al. CO₂ spectroscopy

- copy measurement based on dual femtosecond optical frequency combs[J]. *Optical Technique*, 2025, 51(2): 218—224.
- [7] Platt U, Stutz J. Differential optical absorption spectroscopy (DOAS): principles and applications[M]. Berlin: Springer, 2008: 135—174.
- [8] 笪耀东, 石腾达, 王钊, 等. 基于差分吸收光谱技术的双光源 SO_2 、 NO 和 NO_2 浓度检测研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2025, 45(08): 2140—2148.
- Da Yaodong, Shi Tengda, Wang Zhao, et al. Study on dual light source measurement of SO_2 , NO and NO_2 based on differential optical absorption spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2025, 45(08): 2140—2148.
- [9] Kern C, Trick S, Rippel B, et al. Applicability of light-emitting diodes as light sources for active differential optical absorption spectroscopy measurements[J]. *Applied optics*, 2006, 45(9): 2077—2088.
- [10] 郑尼娜, 谢品华, 秦敏, 等. 组合式LED宽带光源灯结构对差分吸收光谱反演的影响和扣除方法研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2023, 43(11): 3339—3346.
- Zheng Nina, Xie Pinhua, Qin Min, et al. Research on the influence of lamp structure of the combined LED broadband light source on differential optical absorption spectrum retrieval and its removing method[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2023, 43(11): 3339—3346.
- [11] Liu W Q, Xing C Z. Needs and challenges of optical atmospheric monitoring on the background of carbon neutrality in China[J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2024, 18(6): 73.
- [12] Tirpitz J, Frieß U, Spurr R, et al. Enhancing MAX-DOAS atmospheric state retrievals by multispectral polarimetry-studies using synthetic data[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2022, 15(7): 2077—2098.
- [13] Platt U. Air monitoring by differential optical absorption spectroscopy[M]. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd., 2006: 1—33.
- [14] Huang Y Y, Li A, Xie P H, et al. NO_x Emission Flux Measurements with Multiple Mobile-DOAS Instruments in Beijing[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(16): 2527.
- [15] Ren H M, Li A, Hu Z K, et al. Monitoring and comparative analysis of NO_2 and HCHO in Shanghai using dual-azimuth scanning MAX-DOAS and TROPOMI [J]. *Remote Sensing*, 2025, 17(3): 355.
- [16] Nasse J M, Eger P G, Pöhler D, et al. Recent improvements of long-path DOAS measurements: impact on accuracy and stability of short-term and automated long-term observations[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2019, 12(8): 4149—4169.
- [17] Axelsson H, Galle B, Gustavsson K, et al. A Transmitting/Receiving Telescope for DOAS-measurements using Retroreflectortechneque[C]// *Optical Remote Sensing of the Atmosphere*, Optica Publishing Group, 1990: ThC7.
- [18] Merten A, Tschirter J, Platt U. Design of differential optical absorption spectroscopy long-path telescopes based on fiber optics[J]. *Applied optics*, 2011, 50(5): 738—754.
- [19] 杨雷, 李昂, 谢品华, 等. LED光源DOAS方法的夜间 NO_2 气体浓度遥测研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2019, 39(5): 1398—1405.
- Yang Lei, Li Ang, Xie Pinhua, et al. Telemetry research of NO_2 Concentration in the night based on LED and DOAS method[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2019, 39(5): 1398—1405.
- [20] Stutz J, Platt U. Improving long-path differential optical absorption spectroscopy with a quartz-fiber mode mixer[J]. *Applied optics*, 1997, 36(6): 1105—1115.
- [21] 高齐, 邢成志, 林华, 等. 基于多波段LED长光程DOAS技术的合肥郊区HONO和 NO_2 观测研究[J]. *大气与环境光学学报*, 2025, 20(6): 713—725.
- Gao Qi, Xing Chengzhi, Lin Hua, et al. Observation of HONO and NO_2 in suburban area of Hefei based on multi-wavelength LED coupled long-path DOAS technology[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2025, 20(6): 713—725.
- [22] Plane J M C, Saiz-Lopez A. UV-Visible differential optical absorption spectroscopy (DOAS) [M]. Oxford: Blackwell Pub., 2006: 147—188.
- [23] 卢慧, 王一红, 周宾, 等. 基于光强免校准的差分吸收光谱反演算法及其在 NO 测量中的应用[J]. *应用激光*, 2022, 42(4): 140—146.
- Lu Hui, Wang Yihong, Zhou Bin, et al. Calibration-free retrieval algorithm of DOAS and its application in NO measurement[J]. *Applied Laser*, 2022, 42(4): 140—146.
- [24] Zou J S, Wang F. Simultaneous measurement of SO_2 and NO_2 concentration using an optical fiber-based LP-DOAS system[J]. *Chinese Optics Letters*, 2020, 18(2): 021201.
- [25] Volkamer R, Molina L T, Molina M J, et al. DOAS measurement of glyoxal as an indicator for fast VOC chemistry in urban air[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(8): L08806.
- [26] Wang X, Wang S S, Zhang S B, et al. Clustering analysis on drivers of O_3 diurnal pattern and interactions with nighttime NO_3 and HONO[J]. *Atmosphere*, 2022, 13(2): 351.
- [27] Liu J Q, Wang S S, Zhang Y, et al. Investigation of formaldehyde sources and its relative emission intensity in shipping channel environment[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2024, 142: 142—154.
- [28] 胡嘉琪, 秦敏, 方武, 等. 开放光路怀特池DOAS技术对环境有毒有害气体的车载走航观测研究[J/OL]. *大气与环境光学学报*. (2025-05-15)/ [2026-04-12]. <https://link.cnki.net/urlid/34.1298.O4.20250515.1427.002>.
- Hu Jiaqi, Qin Min, Fang Wu, et al. Study on observation of environmental toxic and harmful gases using mobile open-path white cell DOAS technology[J/OL]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*. (2025-05-15) / [2026-04-12]. <https://link.cnki.net/urlid/34.1298.O4.20250515.1427.002>.
- [29] Stutz J, Hurlock S C, Colosimo S F, et al. A novel dual-LED based long-path DOAS instrument for the measurement of aromatic hydrocarbons[J]. *Atmospheric Environment*, 2016, 147: 121—132.
- [30] Vita F, Kern C, Inguaggiato S. Development of a portable active long-path differential optical absorption spectroscopy system for volcanic gas measurements[J]. *Journal of Sensors and Sensor Systems*, 2014, 3(2): 355—367.
- [31] Krause K, Wittrock F, Richter A, et al. Estimation of ship emission rates at a major shipping lane by long path DOAS measurements[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2021, 14(8): 5791—5807.
- [32] Duan J, Qin M, Fang W, et al. Detection of aircraft emissions using long-path differential optical absorption spectroscopy at Hefei Xinqiao International Airport[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(16): 3927.
- [33] De Smedt I, Pinardi G, Vigouroux C, et al. Comparative assessment of TROPOMI and OMI formaldehyde observations and validation against MAX-DOAS network column measurements[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, 21(16): 12561—12593.
- [34] 张新苑, 李小英, 程天海, 等. 星载 NO_2 探测发展及对流层柱浓度产品精度分析[J]. *遥感技术与应用*, 2023, 38(5): 1148—1158.
- Zhang Xinyuan, Li Xiaoying, Cheng Tianhai, et al. Review of NO_2 retrieval of satellite-borne hyperspectral sensors and accuracy assessment of tropospheric NO_2 Column Density Products

- [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2023, 38 (5): 1148—1158.
- [35] Xu J M, Li A, Hu Z K, et al. Study of NO₂ and HCHO vertical profile measurement based on fast synchronous multi-axis differential optical absorption spectroscopy (FS MAX-DOAS) [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2025, 18(4): 865—879.
- [36] Dong Y, Spinei E, Karpatne A. A feasibility study to use machine learning as an inversion algorithm for aerosol profile and property retrieval from multi-axis differential absorption spectroscopy measurements[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2020, 13(10): 5537—5550.
- [37] Kuhn L, Beirle S, Osipov S, et al. NitroNet-a machine learning model for the prediction of tropospheric NO₂ profiles from TROPOMI observations[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2024, 17(21): 6485—6516.
- [38] Zhong M Y, Zhang Z Z, Wei Y M, et al. Research on horizontal distribution of NO₂ around coal-fired power plants based on two dimensional Multi-Axis Differential Optical Absorption Spectroscopy (MAX-DOAS) [J]. Air Quality, Atmosphere & Health, 2025, 18: 4231—4344.
- [39] Qian Y Y, Luo Y H, Dou K, et al. Retrieval of tropospheric ozone profiles using ground-based MAX-DOAS[J]. Science of the Total Environment, 2023, 857: 159341.
- [40] Nikolis D, Bais A, Karagiannis D, et al. Direct sun total NO₂ column measurement at Thessaloniki, Greece with two DOAS systems and comparisons with S5P/TROPOMI[J]. Atmospheric Environment, 2025, 352: 121161.
- [41] González Rivero R A, Rivera Cárdenas C I, Barrera Huertas H A, et al. Assessment of NO₂ and SO₂ emissions in the Tula industrial complex, Hidalgo, using the mobile mini-DOAS technique combined with the AERMOD dispersion model[J]. Environ Monit Assess, 2025, 197(8): 864.
- [42] 王志多, 牟福生, 李素文, 等. 移动车载 DOAS 获取 HCHO 浓度方法及应用[J]. 环境科学学报, 2025, 45(4): 383—389. Wang Zhiduo, Mou Fusheng, Li Suwen, et al. Method and application of HCHO concentration acquisition by mobile vehicle DOAS [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2025, 45(4): 383—389.
- [43] Hong Q Q, Liu C, Chan K L, et al. Ship-based MAX-DOAS measurements of tropospheric NO₂, SO₂, and HCHO distribution along the Yangtze River[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018, 18(8): 5931—5951.
- [44] 叶凡, 李素文, 牟福生, 等. 旋翼无人机载差分光学吸收二维探测系统的研究及应用[J]. 物理学报, 2024, 73(18): 180701. Ye Fan, Li Suwen, Mou Fusheng, et al. Research and application of differential optical absorption two-dimensional detection system for rotorcraft unmanned aerial vehicle[J]. Acta Physica Sinica, 2024, 73(18): 180701.
- [45] Baidar S, Oetjen H, Coburn S, et al. The CU Airborne MAX-DOAS instrument: vertical profiling of aerosol extinction and trace gases[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2013, 6 (3): 719—739.
- [46] 杨东上, 曾议, 奚亮, 等. 基于机载与车载差分吸收光谱技术同步观测的污染源 NO_x 排放通量的分析[J]. 光学学报, 2020, 40(5): 0501002. Yang Dongshang, Zeng Yi, Xi Liang, et al. Analysis of the emission flux of pollution source NO_x based on synchronous observation of airborne and vehicular differential optical absorption spectroscopy technique[J]. Acta Optica Sinica, 0501002.
- [47] 汤玉洁, 牟福生, 李素文, 等. 车载小型增稳二维 DOAS 系统的研究及应用[J/OL]. 大气与环境光学报. (2026-04-08)/ [2026-04-12]. <https://link.cnki.net/urlid/34.1298.o4.20260403.1821.007>. Tang Yujie, Mou Fusheng, Li Suwen, et al. Development and application of a miniaturized stabilized vehicle-mounted two-dimensional DOAS system[J/OL]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics. (2026-04-08)/ [2026-04-12]. <https://link.cnki.net/urlid/34.1298.o4.20260403.1821.007>.
- [48] Lange K, Richter A, Schönhardt A, et al. Validation of Sentinel-5P TROPOMI tropospheric NO₂ products by comparison with NO₂ measurements from airborne imaging DOAS, ground-based stationary DOAS, and mobile car DOAS measurements during the S5P-VAL-DE-Ruhr campaign[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2023, 16(5): 1357—1389.
- [49] Beirle S, Borger C, Dörner S, et al. Pinpointing nitrogen oxide emissions from space[J]. Science Advances, 2019, 5(11): eaax9800.
- [50] Leue C, Wenig M, Wagner T, et al. Quantitative analysis of NO_x emissions from Global Ozone Monitoring Experiment satellite image sequences[J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106(D6): 5493—5505.
- [51] Buchwitz M D, De Beek R, Burrows J P, et al. Atmospheric methane and carbon dioxide from SCIAMACHY satellite data: initial comparison with chemistry and transport models[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2005, 5(4): 941—962.
- [52] 钱园园. 基于多平台差分吸收光谱技术的臭氧反演算法研究及应用[D]. 安徽: 中国科学技术大学, 2023, 1—107. Qian Yuanyuan. Research and application of ozone retrieval algorithm based on the multi-platform differential optical absorption spectroscopy[D]. Anhui: University of Science and Technology of China, 2023, 1—107.
- [53] 钱园园, 罗宇涵, 周海金, 等. 基于 EMI-II 的火山区域二氧化硫反演研究[J]. 光学学报, 2023, 43(06): 0601006. Qian Yuanyuan, Luo Yuhang, Zhou Haijin, et al. Research on retrieval of sulfur dioxide in volcanic region from EMI-II[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(06): 0601006.
- [54] Bobrowski N, Hönninger G, Lohberger F, et al. IDOAS: A new monitoring technique to study the 2D distribution of volcanic gas emissions[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2006, 150(4): 329—338.
- [55] Zhang X, Xi L, Zhou H J, et al. High-resolution nitrogen dioxide measurements from an airborne fiber imaging spectrometer over Tangshan, China[J]. Remote Sensing, 2024, 16(6): 1042.
- [56] Kern C, Kelly P J. Weak degassing from remote Alaska volcanoes characterized with a new airborne imaging DOAS instrument and a suite of in situ sensors[J]. Frontiers in Earth Science, 2023, 11: 1088056.
- [57] Platt U, Meinen J, Pöhler D, et al. Broadband cavity enhanced differential optical absorption spectroscopy (CE-DOAS) – applicability and corrections[J]. Atmospheric Measurement Techniques Discussions, 2008, 1(1): 481—507.
- [58] Meinen J, Thieser J, Platt U, et al. Using a high finesse optical resonator to provide a long light path for differential optical absorption spectroscopy: CE-DOAS[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2010, 10(8): 3901—3914.
- [59] Horbanski M, Pöhler D, Lampel J, et al. The ICAD (iterative cavity-enhanced DOAS) method[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2019, 12(6): 3365—3381.