

# 我国环境空气中温室气体监测技术研究进展

曹军,汪琦,徐政\*,秦艳红

(江苏省环境监测中心,江苏 南京 210019)

**摘要:**开展温室气体监测,获取温室气体浓度水平并以此开展相关研究是实现碳达峰、碳中和的重要支撑。简述了世界气象组织、我国气象部门及生态环境部门制定温室气体监测标准情况,分析了非色散红外法、气相色谱法、光腔衰荡光谱法、离轴腔积分系统法等温室气体监测技术方法的测量原理、应用场景及优缺点,以及进样系统与标校系统的研究进展,展望了温室气体监测技术的发展前景,以期为我国开展温室气体监测工作提供参考与借鉴。

**关键词:**温室气体;二氧化碳;甲烷;碳监测;监测技术

中图分类号:X831

文献标志码:A

文章编号:1674-6732(2022)01-0001-06

## Research Progress in Monitoring Technology for Atmospheric Greenhouse Gases in China

CAO Jun, WANG Qi, XU Zheng\*, QIN Yan-hong

(Jiangsu Provincial Environmental Monitoring Center, Nanjing, Jiangsu 210019, China)

**Abstract:** The monitoring of greenhouse gas (GHG) is the important supports for achieving China's target of peak carbon emission and zero-carbon. This paper summarized the GHG monitoring standards from World Meteorological Organization, China Meteorological Administration and Ministry of Ecological Environment, reviewed the major GHG measurement technologies including the non-dispersive infrared method, gas chromatography, optical cavity ring-down spectroscopy, off-axis cavity integral system. The principles, the advantages and disadvantages of the methods were analyzed, the suitable application scenarios of different methods were proposed, the importance of sampling and calibration system was highlighted, the development of GHG measurement technology was forecasted. It is expected to provide reference and support for China's greenhouse gas monitoring network.

**Key words:** Greenhouse gas; CO<sub>2</sub>; CH<sub>4</sub>; Carbon monitoring; Monitoring technology

### 0 前言

大气中温室气体主要包括二氧化碳(CO<sub>2</sub>)、甲烷(CH<sub>4</sub>)、氧化亚氮(N<sub>2</sub>O)、氢氟氯碳化合物类(CFCs、HFCs、HCFCs)、全氟碳化合物(PFCs)及六氟化硫(SF<sub>6</sub>)等,其中,CO<sub>2</sub>浓度占比最高,对全球辐射强迫的贡献占比最大(约占66%)。自工业革命以来,人类活动导致的温室气体排放对全球生态系统产生重要影响,且极有可能是导致全球变暖的最主要原因。2015年气候变化大会达成的《巴黎协定》提出了“要控制全球升温在2.0℃以内,努力控制在1.5℃以内”的目标,要求各国以自主贡献的方式参与全球应对气候变化

行动。2020年9月,在第七十五届联合国大会一般性辩论中,中国庄严承诺“将提高国家自主贡献力度,采取更加有力的政策和措施,CO<sub>2</sub>排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和”。

温室气体的监测是控制全球温室气体排放的基础和重要支柱。为了准确获取大气中CO<sub>2</sub>等温室气体浓度,探索研究温室气体与气候变化之间的关系,20世纪60年代,国外相关研究机构在夏威夷Mauna Loa开展了全球最早的大气CO<sub>2</sub>浓度的连续监测,随后世界气象组织在全球建立了覆盖范围最广的温室气体监测网络,已建有站点500余

收稿日期:2021-07-19;修订日期:2021-12-03

基金项目:江苏省环境监测科研基金资助项目(2109)

作者简介:曹军(1985—),男,高级工程师,硕士,从事环境监测管理工作。

\*通讯作者:徐政 E-mail:zheng.xu@nju.edu.cn

个。我国气象部门在 20 世纪 90 年代在青海瓦里关全球背景站开展的 CO<sub>2</sub> 观测是我国最早、持续时间最长的温室气体观测。整体看来,我国开展温室气体观测起步较晚,监测点位较少。

在我国提出碳达峰、碳中和的目标和时间点后,生态环境部门出台了相关文件统筹和加强应对气候变化与生态环境保护工作,提出加强温室气体监测,逐步将其纳入生态环境监测体系统筹实施。面对碳达峰、碳中和的要求,我国将进一步提升碳监测的覆盖范围,提升碳监测精度,支撑碳减排等相关工作。但我国生态环境部门目前还缺少开展温室气体监测的相关经验,同时,随着温室气体监测技术的快速发展,色谱法、光学法等多种方法被用于不同情景下的温室气体监测,各类方法存在测量原理不同,测量精度不同,适用场景亦存在差异。现对国内外温室气体监测技术进行总结论述,分析各种方法的测量原理、应用场景及优缺点,展望温室气体监测技术发展前景,为进一步开展温室气体监测和相关研究工作提供参考和借鉴。

## 1 温室气体监测标准

### 1.1 世界气象组织温室气体监测标准

世界气象组织(WMO)是温室气体监测的权威机构,目前在 WMO 编制的 8 号文件《仪器与观测方法指南》中将目前主流方法均列入了其观测方法内,包括非色散红外法(NDIR)、气相色谱法(GC)、傅里叶变换红外吸收光谱法(FTIR)、光腔衰荡光谱法(CRDS)和离轴积分腔输出光谱法(OA-ICOS)<sup>[1]</sup>。目前国内主流温室气体监测方法均在上述方法范围内。

WMO 基本上对监测方法不设置限定,同时鼓励开发新技术开展温室气体测量,主要通过要求监测精度来限定监测方法的应用场景。WMO 针对大气温室气体监测的 2 个不同目标测量场景,要求了不同的测量精度,见表 1。在区域背景站开展测量的目标 1 对温室气体测量精度要求较高,如 CO<sub>2</sub> 在北半球要求精度在  $\pm 0.1$  ppm。同时 WMO 还设置了目标 2 所需要的测量精度,该目标场景适用于背景站网络拓展点,如排放量较大的城市地区,要求 CO<sub>2</sub> 测量精度在  $\pm 0.2$  ppm。上述方法中,能够达到目标 1 和目标 2 测量精度的设备均符合 WMO 温室气体测量要求。

表 1 WMO 监测网络建议温室监测设备测量精度<sup>[2]</sup>

组分	目标 1	目标 2	非污染地区 测量范围	WMO 全部 监测范围
CO <sub>2</sub> /ppm	$\pm 0.1$ 北半球 $\pm 0.05$ 南半球	$\pm 0.2$	380 ~ 450	250 ~ 520
CH <sub>4</sub> /PPb	$\pm 2$	$\pm 5$	1 750 ~ 2 100	300 ~ 5 900
CO/PPb	$\pm 2$	$\pm 5$	30 ~ 300	30 ~ 500
N <sub>2</sub> O/PPb	$\pm 0.1$	$\pm 0.3$	325 ~ 335	260 ~ 370
SF <sub>6</sub> /PPt	$\pm 0.02$	$\pm 0.05$	9 ~ 11	2.0 ~ 20

### 1.2 我国温室气体监测标准

目前我国温室气体测量标准主要来自气象部门,分别在 2015 和 2017 年编制了气相色谱法测量 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>,光腔衰荡法测量 CO<sub>2</sub>,离轴积分腔输出光谱法测量 CO<sub>2</sub> 的国家标准<sup>[3-5]</sup>。上述标准对测量目标气体进样系统、测量精度进行了约束。如光腔衰荡法测量 CO<sub>2</sub> 标准中要求针对环境空气 CO<sub>2</sub> 的测量,仪器重新进样测量结果应优于 0.1 ppm。我国生态环境部门于 2017 年编制了非色散红外方法和气相色谱法分别测量 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 的固定源排放的监测标准<sup>[6-7]</sup>。相较于环境空气的监测精度,源排放监测设备要求的精度较低,如在固定源 CO<sub>2</sub> 的监测中,对于设备性能要求示值误差不超过  $\pm 5\%$ ,远大于光腔衰荡法测量环境空气 CO<sub>2</sub> 的误差(0.025%)。我国温室气体监测标准见表 2。

表 2 我国温室气体监测标准

标准名称	标准编号	发布单位
温室气体二氧化碳测量离轴积分腔输出光谱法	GB/T 34286—2017	国家质量监督检验检疫总局;国家标准化管理委员会
大气二氧化碳(CO <sub>2</sub> )光腔衰荡光谱观测系统	GB/T 34415—2017	
大气甲烷(CH <sub>4</sub> )光腔衰荡光谱观测系统	GB/T 33672—2017	
气相色谱法本底大气二氧化碳和甲烷浓度在线观测方法	GB/T 31705—2015	
固定污染源废气二氧化碳的测定 非色散红外吸收法	HJ 870—2017	环境保护部
固定污染源废气甲烷、总烃和非甲烷总烃的测定 气相色谱法	HJ 38—2017	

## 2 温室气体监测方法

### 2.1 非色散红外法(NDIR)

目前,背景大气 CO<sub>2</sub> 监测主要采用 NDIR 法,该方法是基于 CO<sub>2</sub> 吸收红外辐射的原理进行测量。由于具有非对称双原子或多原子分子结构的气体(CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>等),在中红外波段均有特征吸收光

谱,其吸收关系服从朗伯-比尔定律,因此,利用待测气体对中红外光的吸收强度开展测量,可获知待测目标气体浓度。NDIR法技术成熟、成本低,但对CO<sub>2</sub>的响应为非线性,高精度观测时对仪器的标校工作要求较高,并且系统易受环境因素(温度、压力等)的影响。

1991年,温玉璞等<sup>[8]</sup>在WMO协助下,成功建立了基于NDIR法的CO<sub>2</sub>观测系统,首次在瓦里关获得了我国大陆上空大气CO<sub>2</sub>本底浓度资料,发现我国CO<sub>2</sub>浓度季节变化幅度约在10 ppm。随后温玉璞等<sup>[9]</sup>利用后续连续监测数据分析了CO<sub>2</sub>的季节变化、日变化及年际变化率,发现瓦里关CO<sub>2</sub>浓度的季节变化与全球分布规律一致。刘立新等<sup>[10]</sup>利用每周1次Flask瓶采样/实验室非色散红外吸收法的方式测量分析了我国4个国家级本底站的大气CO<sub>2</sub>浓度变化特征。汪巍等<sup>[11]</sup>在青海门源站开展1年CO<sub>2</sub>的观测,分析了其浓度变化特征。

## 2.2 气相色谱法(GC)

使用气相色谱法测量CO<sub>2</sub>,最早主要采用离线方式对采集的CO<sub>2</sub>样品开展分析,近年来开展了CO<sub>2</sub>在线分析。GC法需要将CO<sub>2</sub>与空气样品内的其他气体组分分离,利用催化剂以及H<sub>2</sub>将CO<sub>2</sub>还原成CH<sub>4</sub>,并利用火焰离子检测器来检测。利用GC法结合ECD检测器则可测量大气中的N<sub>2</sub>O和SF<sub>6</sub>。气相色谱技术的局限在于检测样品时间较长。整体而言,色谱系统成熟度高,检测精度高,但系统较为复杂,维护量较大。

1994年,周凌晞等<sup>[12]</sup>与加拿大环保局合作建立了我国第1套GC-FID的CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>在线监测系统,实现了CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>的高精度、无人值守监测。方双喜等<sup>[13]</sup>通过自组装、集成及调试,在瓦里关建立了双通道GC在线观测系统,实现了CH<sub>4</sub>、CO、N<sub>2</sub>O和SF<sub>6</sub>的同精度监测。汪巍等<sup>[14]</sup>在上甸子建立的GC在线观测系统实现了CH<sub>4</sub>、CO高精度观测,并分析了其变化趋势和来源。张俊刚等<sup>[15]</sup>对商业化GC-ECD仪器进行改装,在单阀单柱的基础上,利用双阀双柱技术实现了大气SF<sub>6</sub>的高精度连续监测。姚波等<sup>[16]</sup>利用GC-ECD方法于2006年在上甸子首次对我国氟氯碳化物、哈龙等12种气体进行观测。

## 2.3 光腔衰荡光谱法(CRDS)

该方法是一种新兴的光学系统方法,其主要原

理是利用光能在光腔中的衰荡时间,来检测目标气体,衰荡时间仅与衰荡腔反射镜的反射率和衰荡腔内介质吸收有关。在固定反射率的情况下,衰荡时间与目标气体浓度呈反相关,而与入射光强的大小无关。该方法具有灵敏度高、信噪比高、抗干扰能力强等优点。利用该系统结合近红外激光器可实现大气中CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>的测量,利用中红外激光器可实现N<sub>2</sub>O的测量。

20世纪80年代,Okeefe等<sup>[17]</sup>在总结前人研究的基础上正式提出了CRDS技术,将其引入光谱探测领域。随后大量科研人员对CRDS技术的性能提升和应用进行了研究<sup>[18-19]</sup>。最具代表性的为美国国家标准与技术研究院的Hodeges<sup>[20]</sup>利用CRDS技术对CO<sub>2</sub>及其同位素的测量进行大量的测试和研发,使得这一技术广泛应用于温室气体测量。安徽光学精密机械研究所于2014年成功利用CRDS技术实现对大气中CO<sub>2</sub>和CH<sub>4</sub>的高精度测量,并在青藏高原地区搭载大载荷系留飞艇实现了海拔3300~7000 m范围内的CH<sub>4</sub>垂直观测<sup>[21]</sup>。蒲静娇等<sup>[22]</sup>利用该方法在长三角区域背景站临安开展了CO<sub>2</sub>观测研究,分析了其变化特征。方双喜等<sup>[23]</sup>利用光腔衰荡光谱系统测量了我国4个大气本底站CO<sub>2</sub>浓度,分析了站点CO<sub>2</sub>的日变化及季节变化特征。

## 2.4 离轴腔积分系统法(ICOS)

该方法是在CRDS上逐渐发展而来,不同的是,ICOS是利用待测物体对光的吸收来监测待测样品,是一种基于痕量气体对光辐射独特的“指纹”特征吸收实现定性和定量测量。具体为根据目标物质的特征吸收光谱使特定波长的激光偏离轴入射充有样气的高精密谐振光腔,在高效反射的作用下不断反射,在1 m的光学腔内通过高反透镜之间来回反射,可形成几至几十公里的光程。通过测量和比较入射光和透射光的强度,从而得到样气中目标物质的浓度。与共轴入射相比,离轴入射使得激光与腔的耦合更加简单,更易调节。该方法同样具有灵敏度高、信噪比高、抗干扰能力强等优点。

2001年,Paul等<sup>[24]</sup>首次提出了离轴积分腔输出光谱技术,采用离轴方式将激光耦合进入光腔,有效降低了腔内光干涉。赵卫雄等<sup>[25]</sup>建立了近红外的离轴腔积分系统,实现了CO<sub>2</sub>的高精度测量。赵辉等<sup>[26]</sup>利用1.573 μm窄线宽可调谐半导体激光器作为光源,实现了0.36 ppm精度的CO<sub>2</sub>测量。

孙守家等<sup>[27-28]</sup>采用商业化离轴积分腔输出光谱技术的 CO<sub>2</sub> 分析仪测定和分析了北京交通干道和华北地区人工林冠层上、下部大气 CO<sub>2</sub> 浓度和 <sup>13</sup>CO<sub>2</sub> 数值,在小时尺度上分析 CO<sub>2</sub> 和 <sup>13</sup>CO<sub>2</sub> 变化及其影响因素。

### 2.5 其他方法

针对温室气体的监测,WMO 呈现出开放的态度,鼓励各类方法的开发,例如,20 世纪 90 年代实现了基于傅里叶变换红外光谱法对大气中 CO<sub>2</sub> 及其同位素的高精度测量<sup>[29]</sup>,可调谐二极管激光吸收光谱(TDLAS)对大气中多种温室气体的测量<sup>[30]</sup>,以及基于不同调制的光声光谱技术对多组分混合气体的同时检测<sup>[31]</sup>。目前,上述设备的开发和应用还多集中于科研部门,开展温室气体网络化监测还需要一定时间的检验和验证。

温室气体的监测经历了长期的发展过程,在方法建立之初往往采用了精度更高、更容易定量的化学色谱法。随着光学技术的发展,利用不同类型的光学技术开展温室气体的监测逐渐成为趋势。鉴于温室气体监测的长期性需要,无论采用何种方法,开发一套具备高精度监测能力,同时可以长期、连续、无人值守的方法一直是温室气体监测的发展目标。

## 3 进样系统和标校系统

为了准确开展温室气体的测量,除了选用相应的技术方法外,进样系统和标校系统的可靠性同样是保证高质量温室气体监测的关键。开展温室气体监测基本均需从采样系统上对采样气体开展除水,同时开展溯源标校。

### 3.1 进样系统

进样系统主要从水汽含量和采样高度 2 个方面对温室气体的测量进行了规范和要求。为避免地面人为活动以及地面植被生态系统的光合作用以及呼吸作用对大气中 CO<sub>2</sub> 的测量产生影响,中国气象局编写的《大气成分观测业务技术手册-温室气体分册》中,要求进样口一般要高出陆地生态系统 10 m,《气体中微量水分的测定 第 3 部分:光腔衰荡光谱法》(GB/T 5832.3—2011)中要求进样口位于地面植被冠层 15 m 以上。在水汽含量影响方面,必须要考虑水汽对 CO<sub>2</sub> 测量的影响。这是因为水汽会在 2 个方面影响 CO<sub>2</sub> 测量:(1)水汽也吸收红外辐射,并会干扰 CO<sub>2</sub> 测量;(2)当标准气体为

干空气时,水汽会占用样品室的容量。在温暖潮湿的地点,水汽会占空气总量的 3%。干燥至露点温度为 -50°C 便足以消除水汽的干扰。新型光学光谱法通常能够同时确定水汽含量,原则上可以校正水汽的稀释和光谱效应。然而,校正仍会带来不确定性。目前,最好的实践仍建议对样品进行干燥<sup>[1]</sup>。在对其他非碳温室气体监测中,为了减少水分的测量干扰,在实际测量中均需使用冷阱或干燥管等方式去除样品中的水汽。如在使用光学法测量 CH<sub>4</sub> 时需将样品干燥至露点温度为 -40°C,如使用 GC-ECD/FID 等气相色谱双通道设备测量 CH<sub>4</sub>/CO/N<sub>2</sub>O/SF<sub>6</sub> 时可将样品导入 -70°C 超低温冷阱中去除大部分水汽<sup>[13]</sup>。

### 3.2 标校系统

为了精确获取温室气体浓度,准确开展温室气体国际间的比对计划,WMO 建立了一套可靠的温室气体多级标定溯源工作办法。如 WMO 委托美国国家海洋大气局地球系统研究实验室全球监测室(NOAA-ESRL)为 WMO 建立 CO<sub>2</sub> 一级标气,由 WMO 标校实验室向全球大气观测计划(GAW)各国实验室进行传递,再由各国中心实验室向下逐级传递。整个标校溯源体系包括了 WMO 一级标气、国家一级标气、实验室或站台标气、工作标气一套溯源标气流程。除 CO<sub>2</sub> 外,NOAA-ESRL 还承担了 CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、SF<sub>6</sub> 一级标气的制定。

我国自 1995 年加入世界气象组织标定中心组织的质控比对计划,并随后建立了基于非色散红外法、气相色谱法、光腔衰荡法的标气质量传递系统。刘立新等<sup>[32]</sup>研究发现与 CRDS 系统分析的原始值相比,经过溯源至 WMO/GAW 的标气进行校正后,浓度差值可达 3 ppm。张晓春等<sup>[33]</sup>对我国基于非色散红外法的标准气标定系统进行测试,结果表明大气 CO<sub>2</sub> 标准气标定及采样瓶分析系统具有很高的分析精度和稳定性能,其分析精度优于 0.1 ppm,再现性可达 0.01 ppm,性能完全适用于各级 CO<sub>2</sub> 标准气体浓度的标定和传递。臧昆鹏等<sup>[34]</sup>利用光腔衰荡法自组装新型 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 混合标气标校系统,研究建立了简便高效的标校流程和方法,并成功应用于我国中心标气实验室。2018 年中国气象局国家级中心实验室通过采购开始建设相关微量成分(CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、SF<sub>6</sub>、HFCs、PFCs、CFCs、HCFCs、哈龙等)的高精度标校能力。

#### 4 结语

准确开展温室气体监测,获取我国温室气体浓度长期变化趋势是深入开展碳循环气候变化研究的基础,有助于科学评估各地碳减排成效,支撑我国碳达峰、碳中和工作的开展和相应政策的制定。目前,我国各地都已经开展或者正在开展温室气体监测工作。相对于空气污染物,温室气体具有寿命长的特点,其浓度年际变化幅度小,准确获取温室气体的变化趋势对温室气体监测的准确性、精确性和稳定性提出较高的要求。目前在我国生态环境监测体系中,省级及各地市开展的CO<sub>2</sub>监测大多以中精度监测设备开展,缺少对采样系统和标校系统的综合配备,降低了过往CO<sub>2</sub>监测数据的可靠性和可比性,对碳排放的数据核算支撑不足。这需要未来在开展温室气体监测时,除了考虑高精度的监测设备外,还需要综合考虑其采样系统、标校系统。同时,目前我国温室气体溯源标校中心较少,难以满足未来一段时间的温室监测发展需求,发展和建立一定数量的温室气体区域标校中心,也应成为我国高质量温室气体监测网络建设的重要发展方向。

#### [参考文献]

- [1] JARRAUD M. Guide to meteorological instruments and methods of observation (WMO-No. 8) [S]. Geneva: World Meteorological Organisation, 2008.
- [2] ANDREW C, MARTIN S. Switzerland: 19th WMO/IAEA meeting on carbon dioxide, other greenhouse gases and related measurement techniques (GGMT-2017) [S]. Geneva: World Meteorological Organization, 2017.
- [3] 中华人民共和国国家治理监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 大气甲烷光腔衰荡光谱观测系统: GB/T 33672—2017 [S]. 北京:中国标准出版社,2017.
- [4] 中华人民共和国国家治理监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 大气二氧化碳(CO<sub>2</sub>)光腔衰荡光谱观测系统: GB/T 34415—2017 [S]. 北京:中国标准出版社,2017.
- [5] 中华人民共和国国家治理监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 气相色谱法本底大气二氧化碳和甲烷浓度在线观测方法: GB/T 31705—2015 [S]. 北京:中国标准出版社,2015.
- [6] 生态环境部. 固定污染源废气二氧化碳的测定 非色散红外吸收法: HJ 870—2017 [S]. 北京:中国环境出版社,2017.
- [7] 生态环境部. 固定污染源废气甲烷、总烃和非甲烷总烃的测定 气相色谱法: HJ 38—2017 [S]. 北京:中国环境出版社,2017.
- [8] 温玉璞,徐晓斌,邵志清,等. 用非色散红外气体分析仪进行大气CO<sub>2</sub>本底浓度的测量[J]. 应用气象学报, 1993(4): 476—480.
- [9] 温玉璞,汤洁,邵志清,等. 瓦里关山大气二氧化碳浓度变化及地表排放影响的研究[J]. 应用气象学报, 1997(2): 2—9.
- [10] 刘立新,周凌晞,张晓春,等. 我国4个国家级本底站大气CO<sub>2</sub>浓度变化特征[J]. 中国科学D辑, 2009, 39(2): 222—228.
- [11] 汪巍,刘冰,李健军,等. 青藏高原高寒草甸地区大气CO<sub>2</sub>浓度变化特征[J]. 环境科学研究, 2015, 28(4): 503—508.
- [12] 周凌晞,汤洁,张晓春,等. 气相色谱法观测本底大气中的甲烷和二氧化碳[J]. 环境科学学报, 1998, 18(4): 22—27.
- [13] 方双喜,周凌晞,张芳,等. 双通道气相色谱法观测本底大气中的CH<sub>4</sub>、CO、N<sub>2</sub>O和SF<sub>6</sub>[J]. 环境科学学报, 2010, 30(1): 52—59.
- [14] 汪巍. 北京上甸子大气本底站气相色谱法在线观测CH<sub>4</sub>和CO研究[D]. 北京:中国气象科学研究院, 2011.
- [15] 张俊刚. 大气中SF<sub>6</sub>的分析方法及其实际应用研究[D]. 武汉:中国地质大学,2006.
- [16] 姚波,周凌晞,张芳,等. 气相色谱-电子捕获检测法在线观测12种卤代温室气体[J]. 环境化学, 2010, 29(6): 1158—1162.
- [17] OKEEFE A, DEACON D A G. Cavity ring-down optical spectrometer for absorption measurements using pulsed laser sources [J]. Review of Scientific Instruments, 1988, 59(25): 44—51.
- [18] FLEISHER A J, ADKINS E M, REED Z D, et al. Twenty-five-fold reduction in measurement uncertainty for a molecular line intensity [J]. Physical Review Letters, 2019, 123(4): 043001.
- [19] FLEISHER A J, LONG D A, LIU Q, et al. Optical measurement of radiocarbon below unity fraction modern by linear absorption spectroscopy [J]. The Journal of Physical Chemistry Letters, 2017, 8(18): 4550—4556.
- [20] LONG D A, FLEISHER A J, LIU Q, et al. Ultra-sensitive cavity ring-down spectroscopy in the mid-infrared spectral region [J]. Optics Letters, 2016, 41(7): 1612—1615.
- [21] 刘文清,王兴平,马国盛,等. 高灵敏腔衰荡光谱技术及其应用研究[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 434—450.
- [22] 浦静姣,徐宏辉,顾骏强,等. 长江三角洲背景地区CO<sub>2</sub>浓度变化特征研究[J]. 中国环境科学, 2012, 32(6): 973—979.
- [23] 方双喜,周凌晞,臧昆鹏,等. 光腔衰荡光谱(CRDS)法观测我国4个本底站大气CO<sub>2</sub>[J]. 环境科学学报, 2011, 31(3): 624—629.
- [24] PAUL J B, LAPSON L, ANDERSON J G. Ultrasensitive absorption spectroscopy with a high-finesse optical cavity and off-axis alignment [J]. Applied Optics, 2001, 40(27): 4904—4910.
- [25] 赵卫雄,高晓明,张为俊,等. 高灵敏度离轴积分腔输出光谱技术[J]. 光学学报, 2006, 26(8): 1260—1264.
- [26] 赵辉,王贵师,蔡廷栋,等. 利用离轴腔增强吸收光谱技术探测实际大气中的二氧化碳[J]. 光谱学与光谱分析, 2012,

- 32(1): 41 - 45.
- [27] 孙守家, 舒健骅, 丛日晨, 等. 北京市交通干道空气中 CO<sub>2</sub> 和 δ<sup>13</sup>C 变化及来源分析[J]. 环境工程学报, 2016, 10(4): 1924 - 1932.
- [28] 孙守家, 孟平, 张劲松, 等. 华北低丘山区栓皮栎人工林冠层 CO<sub>2</sub> 浓度和 δ<sup>13</sup>C 变化及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2015, 26(2): 370 - 378.
- [29] 李相贤, 高阔光, 徐亮, 等. 基于傅里叶变换红外光谱法 CO<sub>2</sub> 气体碳同位素比检测研究[J]. 物理学报, 2013, 62(3): 15 - 23.
- [30] 焦晓锋, 孙鹏, 管今哥, 等. 基于 TDLAS 的二氧化碳检测技术综述[J/OL]. 测控技术. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=IKJS20211119003&uniplatform=NZKPT&v=8fjOpgInDXJF2ewVXMg2s5u3CL45Pz2MLreeY6ynA821xQKzu1rhi8sHYcXLUJt->, 2021 - 11 - 20.
- [31] 邵晓鹏, 张乐, 刘丽娟, 等. 基于光声光谱技术的多组分气体探测研究进展[J]. 数据采集与处理, 2021, 35(5): 850 - 871.
- [32] 刘立新, 周凌晞, 夏玲君, 等. 本底大气 CO<sub>2</sub> 观测分析过程中 QA/QC 方法的建立与评估[J]. 环境科学, 2014, 35(12): 4482 - 4488.
- [33] 张小春, 蔡永祥, 温玉璞, 等. 大气 CO<sub>2</sub> 标准气浓度标定及采样瓶 CO<sub>2</sub> 浓度分析系统[J]. 气象科技, 2005, 33(6): 538 - 542, 547.
- [34] 臧昆鹏, 周凌晞, 方双喜, 等. 新型 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 混合标气校准流程及方法[J]. 环境化学, 2011, 30(2): 511 - 516.

· 征订启事 ·

## 欢迎订阅 2022 年《环境监控与预警》

《环境监控与预警》是经中华人民共和国新闻出版广电总局批准, 由江苏省生态环境厅主管、江苏省环境监测中心主办、南京大学环境学院协办的期刊。本刊为中国科技核心期刊, 面向全国公开发刊, 国内统一刊号 CN32 - 1805/X, 国际标准刊号 ISSN1674 - 6732。

本刊致力于传播和推广先进的环保科技成果, 聚焦环境前沿科技, 介绍国内外环境监测、环境预警、环境信息等领域的新技术、新成果、新发展, 跟踪国家及地方的环境政策、环境标准的变化。读者对象主要是从事环境管理、环境监测、环境监察、环境信息、环境治理、环境科学研究及其他领域的环境工作者。常设栏目有: 前沿评述、环境预警、监测技术、解析评价、监管新论等。

本刊为双月刊, 大 16 开国际标准版, 92 页, 每逢单月 30 日出版。国内定价(含邮费)35 元/期, 全年 210 元。

订阅方法: 1. 邮局订阅: 邮发代号: 28 - 414。

2. 自行订阅: 汇款后将回执单 E-mail 至以下联系人(回执单下载地址: <http://www.hjjkyyj.com>)。

联系人: 朱滢; 联系电话: 025 - 69586548; 联系邮箱: [hjjkyyj@163.com](mailto:hjjkyyj@163.com)

汇款信息: 单位名称: 江苏省环境监测中心

开户行: 中国银行南京凤凰花园城支行 账号: 530058192469

《环境监控与预警》编辑部