



刘建国,“十二五”863 资源环境技术领域主题专家,科技部“蓝天科技工程”重点专项总体专家组成员,中国环境科学学会理事,中国光学工程学会常务理事。国家环境光学监测仪器工程技术研究中心副主任,大气环境监测技术与装备国家工程实验室副主任。2004 年荣获“合肥(青年)专业技术拔尖人才”称号,2007 年获国务院政府特殊津贴;2008 年获得“科技奥运先进个人”荣誉称号,2011 年荣获第 12 届“安徽青年科技奖”,2013 年入选“万人计划”首批国家万人计划科技创新领军人才。长期从事环境光学监测技术和光学遥感监测技术研究。主持完成国家自然科学基金课题和国家 863 课题多项,承担多项国家级研究计划项目。获 130 多项专利授权,发表论文 200 余篇。获国家科学技术进步二等奖 4 项,国家环保部环境保护科技技术一等奖 1 项,安徽省科学技术一等奖 5 项。获 2020 年度安徽省重大科技成就奖。



移动扫码阅读

束胜全,孙友文,徐亮,等.我国温室气体监测技术应用及减排措施[J].能源环境保护,2023,37(1):83-90.

SHU Shengquan, SUN Youwen, XU Liang, et al. Greenhouse gas monitoring application and emission reduction measures in China[J]. Energy Environmental Protection, 2023, 37(1): 83-90.

我国温室气体监测技术应用及减排措施

束胜全,孙友文,徐亮,刘建国*

(中国科学院合肥物质科学研究院 安徽光学精密机械研究所,安徽合肥 230031)

摘要:二氧化碳、甲烷等温室气体的过度排放会引发全球变暖等一系列环境问题,对温室气体进行监测具有重要意义,世界各国正在积极开展温室气体监测以及减排工作。尽管我国温室气体监测工作及技术起步晚于国外,但近几十年来,我国监测技术尤其是光学监测技术发展迅速,光谱学技术已然成为我国监测温室气体的重要方法,并在多场景、多领域得到应用。利用光学技术,通过大气本底观测、地面排放监测、地基观测以及高空探测等多种探测方式,能够获得温室气体空间分布、时序变化以及源汇信息,帮助理解温室气体变化的环境效应,为我国温室气体减排控排工作提供数据支持。为应对温室气体过度排放带来的环境问题,中国各级政府及机关出台了多项相关政策,针对工业、交通运输以及农业等不同行业提出了各种减排措施,并取得了一定的减排成效。

关键词:温室气体监测;光谱学;碳排放;减排控排

中图分类号:X511

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2023)0083-08

Greenhouse gas monitoring application and emission reduction measures in China

SHU Shengquan, SUN Youwen, XU Liang, LIU Jianguo*

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Science, Hefei 230031, China)

Abstract: Excessive emissions of carbon dioxide, methane and other greenhouse gases will lead to a series of environmental problems such as global warming. It is of great significance to monitor greenhouse gases. Countries around the world are actively carrying out greenhouse gas monitoring and emission reduction work. Although Chinese greenhouse gas monitoring work and technology started later than that of foreign countries, in recent decades, Chinese monitoring technology, especially optical monitoring technology, has developed rapidly. Spectroscopy has become an important method to monitor greenhouse gases in China and has been applied in multiple scenarios and fields. Through various de-

收稿日期:2022-11-20;责任编辑:蒋雯婷

DOI:10.20078/j.eep.20230106

基金项目:国家自然科学基金专项项目(41941011)

作者简介:束胜全(1996—),男,安徽六安人,博士研究生,主要从事环境监测及光学遥感工作。E-mail: sqshu@aiofm.ac.cn

通讯作者:刘建国(1968—),男,甘肃天水人,博士,研究员,主要从事环境污染光学监测新技术及遥感监测技术研究。E-mail: jgliu@aiofm.ac.cn

tection methods such as atmospheric background observation, ground emission monitoring, ground-based observation and high-altitude detection, the spatiotemporal variation and source and sink information of greenhouse gases could be obtained to help understand the environmental effects of greenhouse gas changes, and provide data support for the control and emission of greenhouse gases. In order to deal with the environmental problems caused by excessive emissions of greenhouse gases, it is essential to reduce carbon emissions in human production and life. To this end, Chinese governments and organs at all levels have issued a number of relevant policies and put forward various emission reduction measures for different industries such as industry, transportation and agriculture, and achieved certain emission reduction results.

Keywords: Greenhouse gas monitoring; Spectroscopy; Carbon emission; Emission reduction and control

0 引言

温室效应是维持地球热量平衡、为生物创造宜居条件的关键要素。然而自工业革命以来,人类活动造成的温室效应增强是全球变暖的主要原因^[1]。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告指出,温室气体的过多排放严重危害了地球环境,全球平均温度已经上升了1.1℃,并且仍将保持升温趋势^[2]。为了应对全球变暖,必须对温室气体总量进行长期监测和控制。

大气中需要进行总量控制的温室气体包括二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)、氧化亚氮(N₂O)、氢氟碳化合物(HFCs)、全氟碳化合物(PFCs)以及六氟化硫(SF₆)等。其中,前三者对全球变暖的贡献比例达77%,且长期观测资料显示,它们的浓度呈现出逐年升高的趋势。因此,前三种气体也是温室气体监测以及控制排放的主要对象^[3]。

目前,全球性的温室气体观测网络有全球大气监测网(GAW)、全球碳柱总量观测网(TCCON)、大气成分变化观测网(NDACC)以及碳卫星监测网络^[4-6]。这些监测网络可以提供温室气体的整体浓度水平、大尺度的区域分布以及年际变化。此外,世界各国都相继开展了区域性温室气体排放监测,为减排控排工作提供数据支持。例如,2009年芬兰对全国多省市的用电、取暖及交通所排放的温室气体实施监测;美国加州政府对2010年对该州范围内的温室气体排放进行了精确监测^[7]。

习近平总书记在第七十五届联合国大会一般性辩论上作出碳达峰碳中和郑重承诺,而按照当前的排放速度,最多30年,我国将用光所有额度,减排控排迫在眉睫^[8]。温室气体排放具有较大的

时空差异,精确、高效、多角度、长期连续性的温室气体监测是准确估算、精准控制温室气体排放的关键。纵观温室气体监测技术和应用的发展历程,光谱学方法在其中起到了举足轻重的作用。

1 非光学监测技术

应用最广泛的温室气体非光学监测技术是气相色谱法(GC),根据不同检测器对气体响应灵敏度不同又可细分为氢火焰离子化检测气相色谱法(GC-FID)、电子捕获检测气相色谱法(GC-ECD)和气相色谱质谱法(GC-MS)^[9]。

气相色谱法利用载气气体作为移动相搭载试样,根据不同试样在色谱柱中分离速度不同,使各种成分互相分离,并依次先后进入检测器,记录色谱图,根据保留时间确定成分,根据峰高或者峰面积,通过标准曲线法确定成分浓度。

根据世界气象组织(WMO)的推荐:FID是一种通用检测器,CO₂和CH₄的测定一般可用GC-FID方法,但当利用GC-FID测量CO₂时,需要将其催化还原成CH₄后才可以进一步测定CO₂浓度;ECD检测器对N、O、卤素等含有强负电性元素的气体具有较高的响应,因而N₂O和SF₆测定可采用GC-ECD方法;GC-MS方法则可用于测定HFCs、PFCs和SF₆^[9]。

除了气相色谱法外,还可以利用气敏电极法以及化学滴定法等方法测量CO₂^[10]。

2 光谱学监测技术

相比于传统的电化学分析方法,光谱学监测技术具有以下优点:同一波段可以同时监测几种温室气体的浓度,实现完全非接触在线自动监测;仪器的灵敏度高,对于某种温室气体只要选择合适的光谱波段,就可以测出十亿分之一(1 ppb)量

级的质量/体积浓度;测量范围可从几米到数千千米,反映一个区域的平均浓度程度,不需要多点取样,监测结果比单点监测更具有代表性;系统易于升级,增加新的监测项目不改变硬件,运行费用低;光谱学方法是唯一能够在星载平台观测全球大气环境变化的技术手段。WMO 推荐的温室气体光谱学检测技术主要有非分散红外光谱技术(NDIR)、傅里叶变换光谱技术(FTIR)、光腔衰荡光谱技术(CRDS)以及离轴积分腔输出光谱技术(OAICOS)^[11]。

NDIR 方法利用窄带滤光片对经过待测温室气体吸收后的红外辐射进行滤波处理,把某一特征吸收波长之外的能量滤除,然后将探测器接收到的红外信号经过算法处理,最终得到待测温室气体的浓度值^[12]。NDIR 方法起步早,技术成熟,具有精度高、成本低等优点,在全世界范围内得到了广泛应用。

FTIR 方法是上世纪末发展起来的一项气体监测技术,利用 FTIR 测量温室气体时,首先要将红外光进行准直形成平行光,平行光经分束片后分成两束光,两束光在经过不同的光路后于探测器处形成干涉,最后将干涉图通过傅里叶变换得到一条包含待测气体浓度信息的宽带吸收光谱^[13]。FTIR 具有很高的信噪比和光谱分辨率,而且可以同时测量多种温室气体的浓度。

与 NDIR 和 FTIR 方法不同,CRDS 方法基于光在光腔中的衰荡时间计算温室气体的浓度。对特定的衰荡腔而言,衰荡时间只与腔内介质的吸收(即浓度)相关,测量过程不受光源强度影响,吸收光程可达十几千米,因此具有很高的灵敏度和信噪比^[14]。

OAICOS 方法于 2001 年被首次提出,OAICOS 方法通过激光器发出激光,经准直后,离轴进入积分腔,激光在腔内多次反射,与气体介质充分相互作用后,最终进入探测器,通过分析前后光强的变化计算出待测气体的浓度^[15],OAICOS 方法同样具有很高的灵敏度。

除上述方法外,激光外差光谱技术(LHS)、空间外差光谱技术(SHS)、差分光学吸收光谱技术(DOAS)、差分吸收激光雷达技术(DIAL)、可调谐半导体激光吸收光谱技术(TDLAS)等光谱学方法也已在国内迅速发展起来并应用于温室气体监测^[3]。

3 我国温室气体监测应用

我国研究人员利用多种技术开展了不同形式的观测,按搭载平台主要分为地面探测、地基探测和高空探测。地面监测可以细分为本底浓度监测和原位排放监测;地基探测指利用遥测设备对整层温室气体进行观测计算;高空监测则是利用飞机、卫星等飞行器搭载观测仪器,实现温室气体多角度、全方位探测^[3, 7]。按照工作方式可分为主动测量技术和被动测量技术。如图 1 所示,主动测量技术(1 和 2)使用人工光源,被动测量技术(3、4、5、6)使用自然光源探测温室气体。

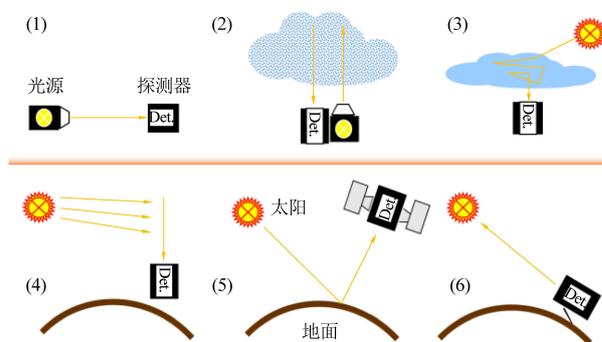


图 1 光谱法探测温室气体工作方式

Fig. 1 Spectroscopic methods of greenhouse gases monitoring

3.1 本底浓度监测

中国最早的大气本底站位于青海瓦里关山,之后陆续在北京上甸子、黑龙江龙凤山等地建立本底站,此外在全国各地也都建有温室气体监测站,已形成了国家级观测网络。

温玉璞^[16-17]等利用改进的 NDIR 测量系统,对瓦里关大气本底站的 CO₂ 浓度进行了连续测量,首次获得中国大陆 CO₂ 的本底浓度数据资料,并结合观测结果分析了 CO₂ 本底浓度的变化特征;刘立新^[18]等根据 4 个大气本底站 NDIR 观测数据分析了 CH₄ 本底浓度的季节性变化特征;夏玲君^[19]等利用 CRDS 观测系统在景德镇温室气体站对 CH₄ 和 CO 进行了长期连续观测,基于观测数据和模型对 CH₄ 和 CO 本底浓度的季节性变化和排放来源进行了解析;夏玲君^[20]等根据上甸子站点的 CRDS 观测资料系统分析了 CO₂ 及其同位素的年际变化、季节性变化以及源汇特征。

3.2 原位排放监测

原位排放监测是指在排放源处对温室气体进行实时观测,根据观测数据结合相关算法计算排放浓度、速率、通量等要素。

徐亮^[21]等利用 FTIR 观测系统对北京地区的 CO₂ 和 CH₄ 进行了连续监测,获得了两种气体的变化规律,并对其相关性进行了分析;成潇潇^[22]等利用开放光路 FTIR(OP-FTIR)对页岩气开采过程中甲烷的排放浓度和速率进行了监测计算,并与传统手持式设备测量进行了对比,结果具有较好的一致性,成潇潇^[23]等利用 OP-FTIR 对工业园区边界的包括 CH₄ 在内的十几种污染气体进行了定量分析,并根据便携式 FTIR 测算的不同排放标准机动车尾气的源浓度分析了周边交通对园区污染浓度的影响。

3.3 地基探测

中科院合肥物质科学研究院建立的地基高分辨率观测站点连续获得了合肥地区 6 年的温室气体柱总量和垂直分布数据。合肥站点在我国复杂大气环境下可以精确遥感 CO₂、CH₄、N₂O、SF₆、CFC-11、CFC-12、HCFC-22 等温室气体的垂直分

布。地基高分辨率遥感结果于 2018 年通过了全球总碳柱观测网(TCCON)的数据质量鉴定,成为了中国地区首个达到 TCCON 质量要求的基准站点,数据供全球公开下载(<https://tccodata.org/>)。中科院大气物理研究所所在香河建立了类似的地基高分辨率观测站并于 2021 年加入了 TCCON 观测网。

合肥站点观测的部分温室气体时间序列如图 2 所示。该柱总量遥感数据集已被全球 14 个国家、44 家研究机构应用于卫星、化学模式校验和环境演变、溯源研究领域。此外,我国研究人员还利用小型化、便携式、走航式的地基 FTIR、CRDS 设备进行温室气体监测^[4, 24-25]。在此基础上,徐亮等通过发展光谱基线自动修正算法^[26],开发基于 PSD 的高精度高速太阳跟踪系统^[27],进一步发展了 AG-FTIR-GH2000 型国产化温室气体大气总量地基遥感观测装备。

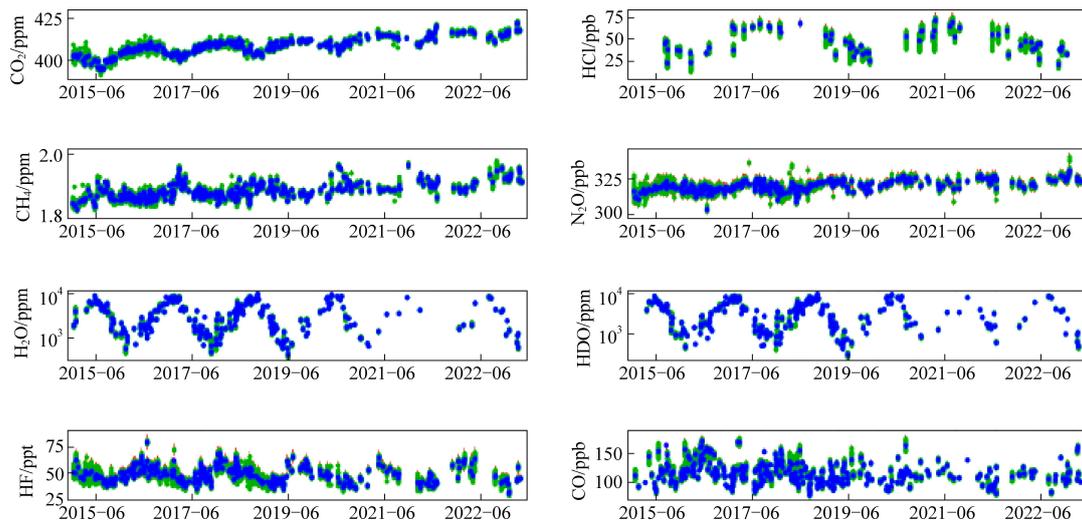


图 2 合肥站点观测的部分温室气体时间序列

Fig. 2 Greenhouse gas time series observed at Hefei Station

3.4 高空探测

高空探测可以对大范围区域乃至全球范围内的温室气体进行监测,主要包括球载、机载、星载探测设备。

袁峰^[28]等基于 CRDS 技术设计了一套球载 CH₄ 测量系统,成功实现了西藏鲁朗地区海拔 3 340~6 000 m 甲烷浓度垂直分布的测量;夏辉辉^[3]等利用机载 FTIR 设备在山东地区成功开展了多种温室气体的观测^[3]。我国自主研发的 Tansat 卫星和高分五号(GF-5)温室气体卫星载荷,成功获取了全球大气二氧化碳和甲烷柱浓度高精度数据。通过与 TCCON、GOSAT 和 OCO-2

等数据的对比,表明中国温室气体卫星的准确度、精度和时空分辨率等关键性能指标达到了预期要求^[29-30]。TanSat 和 GF-5 系列温室气体有效载荷都基于被动遥感技术,从散射太阳光中获得全球温室气体分布。

因此,它们只能在白天工作,也受到云层和气溶胶的严重影响。中国首个星载二氧化碳激光雷达于 2022 年 4 月 16 日发射,搭载在大气环境监测卫星上,利用主动遥感技术获得全球 CO₂ 分布。星载二氧化碳激光雷达的运行不依赖阳光,受云层和气溶胶的影响较小,将大大提高全球 CO₂ 测绘能力。

4 我国温室气体监测概况

对生产生活过程中的温室气体排放进行有效监测具有重要意义。当前我国温室气体排放监测主要还是以固定排污口测量为主,不能对无组织排放和偷排漏排进行有效监测。针对污染源周边大气污染监测主要通过现场采样、实验室测定的方式实现,耗人力、时效慢、不能连续监测。光谱学方法不需要对待测气体进行过多前处理,通过自动抽气或者直接采用开放式光路的方法,就能实现气体连续监测及快速测量,通过遥感的方法还能对无组织排放以及偷排漏排进行监控;但利用光谱学方法进行排放监测目前仍处于小范围应用阶段。一方面,由于绝大多数光谱学方法还没有形成相应的质量标准,极大地限制了光谱学方法的推广应用;另一方面,尽管近年来国产化光学检测设备飞速发展,但一些关键的核心技术仍然受制于国外,总体来说运用光学方法进行温室气体排放监测的成本较高。

5 我国温室气体减排政策及措施

对温室气体进行有效精确观测是非常必要的,但想要应对温室气体带来的潜在环境危害,减少和控制温室气体排放显得更为重要。我国作为一个负责任的人口和工业大国,一直致力于全球环境保护工作,我国各级政府都制定出台了一系列的减排政策,各行各业积极响应,减排工作已取得了一定的成效。

5.1 碳排放权交易政策

一系列减排措施中最具市场调节作用的就是碳排放权交易,碳排放权交易是利用市场机制控制和减少温室气体排放^[31]。

我国的碳排放交易主要历经3个阶段:2011年,发改委确定北京等7个省市为碳排放交易试点地区;2013年6月,碳交易试点正式启动,碳排放权交易平台相继在深圳、上海、北京、广东、天津、湖北、重庆等地推出;2017年12月,全国碳交易体系形成^[32]。

碳交易政策通过降低能源消耗规模、促进技术创新和产业结构升级、增加外商直接投资等渠道达成减排目的,能够显著减少碳排放,具有明显的减排效应^[33]。

以电力行业为例:试点地区与非试点地区电力行业碳排放差异明显,试点地区具有更大的碳

排放下降趋势;且碳排放量与碳交易活跃度具有负相关关系,碳交易量越高,碳排放量越少^[34]。

5.2 交通业减排

交通运输业一直都是碳排放主要来源之一,2020年我国交通领域碳排放占全国终端碳排放的15%。道路交通碳排放占比高达90%,必须加快推进交通行业降碳减排^[35]。

借鉴国外经验,我国实现低碳交通可采取如下策略:一是优化运输结构,积极推动大宗、中长途货物运输由公路向铁路、水路转变;二是提升运输组织效率,节约物流成本,促进减排;三是建设低碳交通基础设施,推广新能源车辆,降低运输碳排放量;四是加快构建绿色出行体系,推动发展公共交通网络,培养群众低碳出行理念^[36]。

天津市针对交通运输领域制定了包括小客车总量调控、天津港运输结构优化、老旧车淘汰、新能源公共汽车推广、绿色货运、货运甩挂运输、货车差异化收费以及中心城区货车限行等多项减排政策。2019年,天津市通过上述政策实现了630万t的CO₂减排量,其中小客车总量调控减排效果最为显著,占总减排量的94.5%,达到595.36万t^[37]。

5.3 农业减排

农业既是主要的温室气体排放来源,同时也是重要的碳汇系统,积极健康的农业生态系统可以使得由于农业生产造成的温室气体排放减少80%^[38]。我国农业温室气体排放主要以CO₂、CH₄和N₂O为主。CO₂排放来源于生产中的能源消耗、秸秆燃烧、作物根系呼吸以及腐殖质分解;CH₄排放来源于水稻田种植、动物肠道发酵以及动物粪便;N₂O排放主要源于施肥、动物粪便以及土壤本底释放^[39]。

实现农业减排主要通过两种途径:一是减少投入品的使用量,尤其是化肥的使用,同时合理选择氮肥种类和施肥时间;二是提高废弃物资源利用率,主要是作物秸秆以及动物粪便的资源利用,农作物秸秆还田用作生物肥料,对秸秆进行加工用作动物饲料,或者利用秸秆作为能源进行发电以及作为原材料制备生物炭,极大地降低了秸秆燃烧产生的碳排放;动物粪便则可以用于堆肥和沼气工程^[38]。

2011年,《“十二五”农作物秸秆综合利用实施方案》印发,开始明确和扩大禁燃区域;2013年,《大气污染防治行动计划》出台,明确要求“实

现农村废弃物综合利用,减少秸秆露天焚烧”,并在各省市落实。秸秆禁燃政策的出台和实施以来,我国秸秆燃烧产生的温室气体排放量明显减少,2013—2019年,28个省份露天秸秆燃烧导致的温室气体排放减少了14%~97%^[40]。

秸秆的综合利用具有很大的减排固碳贡献潜力。根据相关资料计算,2020年我国秸秆综合利用净减排量为 7.0×10^7 tCO₂当量,其中,秸秆资源化利用的减排量为 1.26×10^8 tCO₂当量,露天焚烧以及自然分解的排放量为 5.6×10^7 tCO₂当量。预计到2030年,秸秆综合利用净减排量可达到 $1.52 \times 10^8 \sim 1.72 \times 10^8$ tCO₂当量,2060年可达 $2.20 \times 10^8 \sim 2.73 \times 10^8$ tCO₂当量^[41]。

6 总结和展望

光谱学遥感方法能够有效地对全球范围内的温室气体的整体浓度以及垂直分布情况进行监测,此外,光谱学方法还被广泛应用于大气本底监测,形成了天地一体化的观测网络,为气候变化研究提供了数据支持。

光谱学方法在温室气体排放监测应用中具有自动、实时、高精度、宽范围、多组分、可长期连续测量等优点,但目前处于快速发展阶段。为了更好地推广应用光谱学方法,制定相关行业质量标准或规范是非常有必要的;在国家大力支持国产化设备技术研发的政策条件下,相关仪器设备也在朝着高度国产化、小型化、低成本、智能化的方向稳步发展,光谱学方法将会在温室气体监测方面发挥重要作用。

各行业也在积极响应国家减排政策,提出并开始施行许多具有明显成效的减排措施,减排工作需要所有人的共同参与,对于行业而言,使用清洁生产工艺和清洁能源,废弃资源再利用等可以降低碳排放。

参考文献(References):

- [1] 汪巍,刘冰,李健军. 大气温室气体浓度在线监测方法研究进展[J]. 环境工程, 2015, 33(6): 125-128.
WANG Wei, LIU Bing, LI Jianjun. Progress on in-situ monitoring methods of atmospheric greenhouse gases [J]. Environmental Engineering, 2015, 33(6): 125-128.
- [2] 樊星,秦圆圆,高翔. IPCC第六次评估报告第一工作组报告主要结论解读及建议[J]. 环境保护, 2021, 49(Z2): 44-48.
FAN Xing, QIU Yuanyuan, GAO Xiang. Interpretation of the main conclusions and suggestions of IPCC AR6 working group I report[J]. Environmental Protection, 2021, 49(Z2): 44-48.
- [3] 夏晖晖,阚瑞峰. 温室气体监测技术现状和发展趋势[J]. 中国环保产业, 2022(9): 56-61.
XIA Huihui, KAN Ruifeng. Current situation and development trend of greenhouse gas monitoring technology[J]. China Environmental Protection Industry, 2022(9): 56-61.
- [4] 车轲,刘毅,蔡兆男,等. 便携式傅里叶变换红外光谱仪在大气温室气体观测中的应用进展[J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(1): 44-54.
CHE Ke, LIU Yi, CAI Zhaonan, et al. Review of atmospheric greenhouse gas observation and application based on portable fourier transform infrared spectrometer [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(1): 44-54.
- [5] 李勤勤. 大气CO₂卫星遥感反演算法与软件实现[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020: 2-8.
LI Qinqin. Inversion algorithm and software implementation for atmospheric CO₂ satellite remote sensing[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020: 2-8.
- [6] 章育仲,袁凤杰. 全球大气监测网与我国监测站网[J]. 气象科技, 2002(1): 57-59+36.
ZHANG Yuzhong, YUAN Fengjie. Global atmospheric monitoring network and Chinese network of monitoring stations [J]. Meteorological Science and Technology, 2002(1): 57-59+36.
- [7] 吕桅桅. 主要温室气体监测研究现状[J]. 科技与企业, 2012(20): 128+130.
LV Zhizhi. Research status of main greenhouse gases monitoring [J]. Journal of Technology and Business, 2012(20): 128+130.
- [8] 张丰,胡狄瑞. 碳达峰碳中和背景下的温室气体监测与减排研究[J]. 中国资源综合利用, 2021, 39(11): 186-188.
ZHANG Feng, HU Dirui. Research on greenhouse gas monitoring and emission reduction under the background of Carbon Peak and Carbon Neutrality[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2021, 39(11): 186-188.
- [9] 杜玉明,赵丽媛,王维,等. 中国环境科学学会2022年科学技术年会论文集: 大气温室气体监测方法研究进展[C]. 北京: 中国环境科学出版社, 2022: 44-50.
- [10] 何日安. 中国环境科学学会学术年会论文集: 温室气体监测方法的研究进展[C]. 北京: 中国环境科学出版社, 2010: 2022-2026.
- [11] WMO. Guide to instruments and methods of observation [EB/OL]. (2021-01-01) [2022-12-10]. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=11386.
- [12] 刘崎,汪磊,朱向冰,等. 基于非分散红外法的二氧化碳浓度检测综述[J]. 红外, 2022, 43(7): 1-7.
LIU Qi, WANG Lei, ZHU Xiangbing, et al. Review of CO₂ concentration detection based on Non-Dispersive Infrared Method[J]. Infrared, 2022, 43(7): 1-7.
- [13] 曲立国,刘建国,徐亮,等. 便携式FTIR的机动车尾气检测方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(6): 1751-1757.
QU Liguang, LIU Jianguo, XU Liang, et al. Vehicle exhaust de-

- tection method based on portable FTIR[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(6): 1751-1757.
- [14] 唐靖. 基于光腔衰荡光谱的痕量气体高灵敏检测技术[D]. 成都: 电子科技大学, 2019: 15-20.
TANG Jing. The high-sensitivity detection technology for trace gases based on cavity ring-down spectroscopy[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019: 15-20.
- [15] 王坤阳. 基于离轴积分腔光谱大气 CO₂ 和 CH₄ 高精度测量技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021: 26-31.
WANG Kunyang. In-situ measurement of CO₂ and CH₄ in atmosphere using off-axis integrated cavity spectroscopy[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2021: 26-31.
- [16] 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.
WEN Yupu, TANG Jie, SHAO Zhiqing, et al. A study of atmospheric CO₂ concentration variations and emission from the soil surface at MT.WALIGUAN[J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 1997(2): 2-9.
- [17] 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 CO₂本底浓度的测量[J]. 应用气象学报, 1993(4): 476-480.
WEN Yupu, XU Xiaobin, SHAO Zhiqing, et al. Measurement of the atmospheric CO₂ concentration with the Non-Dispersive Infrared gases analyzer[J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 1993(4): 476-480.
- [18] 刘立新, 周凌晞, 温民, 等. 中国 4 个国家级野外站大气 CH₄本底浓度变化特征[J]. 气候变化研究进展, 2009, 5(5): 285-290.
LIU Lixin, ZHOU Lingxi, WEN Min, et al. Characteristics of atmospheric CH₄ concentration variations at four national baseline observatories in China[J]. Advances in Climate Change Research, 2009, 5(5): 285-290.
- [19] 夏玲君, 张根, 陈昆, 等. 江西景德镇站大气 CH₄和 CO 季节变化及源解析[J]. 中国环境科学, 2021, 41(12): 5485-5494.
XIA Lingjun, ZHANG Gen, CHEN Kun, et al. The seasonal variations of atmospheric CH₄ and CO concentrations and their emission sources at Jingdezhen station in Jiangxi[J]. China Environmental Science, 2021, 41(12): 5485-5494.
- [20] 夏玲君, 周凌晞, 刘立新, 等. 北京上甸子站大气 CO₂及 δ¹³C(CO₂)本底变化[J]. 环境科学, 2016, 37(4): 1248-1255.
XIA Lingjun, ZHOU Lingxi, LIU Lixin, et al. Monitoring atmospheric CO₂ and δ¹³C(CO₂) background levels at Shangdianzi station in Beijing, China[J]. Environmental Science, 2016, 37(4): 1248-1255.
- [21] 徐亮, 刘建国, 高闽光, 等. FTIR 监测北京地区 CO₂ 和 CH₄及其变化分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2007(5): 889-891.
XU Liang, LIU Jianguo, GAO Minguang, et al. Monitoring and analysis of CO₂ and CH₄ using long path FTIR spectroscopy over Beijing[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2007(5): 889-891.
- [22] 成潇潇, 刘建国, 徐亮, 等. 基于页岩气返排液中甲烷浓度及排放速率的红外光谱反演研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(12): 3717-3721.
CHENG Xiaoxiao, LIU Jianguo, XU Liang, et al. IR spectral inversion of Methane concentration and emission rate in shale gas backflow[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(12): 3717-3721.
- [23] 成潇潇, 刘建国, 徐亮, 等. 工业园区边界污染气体定量分析及来源研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42(12): 3762-3769.
CHENG Xiaoxiao, LIU Jianguo, XU Liang, et al. Quantitative analysis and source of trans boundary gas pollution in industrial park[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2022, 42(12): 3762-3769.
- [24] 臧昆鹏, 赵化德, 王菊英, 等. 光腔衰荡光谱法走航连续观测海表大气中 CH₄[J]. 环境科学学报, 2013, 33(5): 1362-1366.
ZANG Kunpeng, ZHAO Huade, WANG Juying, et al. High-resolution measurement of CH₄ in sea surface air based on cavity ring-down spectroscopy technique: The first trial in China seas[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(5): 1362-1366.
- [25] 程巳阳, 高闽光, 徐亮, 等. 合肥地区大气中 CO₂和 CH₄柱浓度季节变化遥测[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(3): 587-591.
CHENG Siyang, GAO Minguang, Xu Liang, et al. Remote sensing of seasonal variation in column concentration of atmospheric CO₂ and CH₄ in Hefei[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(3): 587-591.
- [26] Shen X C, Xu L, Ye S B, et al. Automatic baseline correction method for the open-path fourier transform infrared spectra by using simple iterative averaging[J]. Optics Express, 2018, 26(10): A609-A614.
- [27] Qu L G, Liu J G, Deng Y S, et al. Analysis and adjustment of positioning error of PSD system for mobile SOF-FTIR[J]. Sensors, 2019, 19(23): 5081.
- [28] 袁峰, 高晶, 姚璐, 等. 球载 CRDS 高灵敏度甲烷测量系统的研制[J]. 光学精密工程, 2020, 28(9): 1881-1892.
YUAN Feng, GAO Jing, YAO Lu, et al. Development of highly sensitive balloon borne methane measurement system based on cavity ringdown spectroscopy[J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(9): 1881-1892.
- [29] 刘毅, 姚璐, 王靖, 等. 中国碳卫星数据的应用现状[J]. 卫星应用, 2022(2): 46-50.
LIU Yi, YAO Lu, WANG Jing, et al. Application status of carbon satellite data in China[J]. Satellite Application, 2022(2): 46-50.
- [30] 陈良富, 尚华哲, 范萌, 等. 高分五号卫星大气参数探测综述[J]. 遥感学报, 2021, 25(9): 1917-1931.
CHEN Liangfu, SHANG Huazhe, FAN Meng, et al. Mission

- overview of the GF-5 satellite for atmospheric parameter monitoring[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, 25(9): 1917-1931.
- [31] 王宁, 窦燕. 中国碳交易政策的减排效应评估[J]. *兰州财经大学学报*, 2022, 38(4): 27-40.
WANG Ning, DOU Yan. Assessment of emission reduction effect of China's carbon trading policy[J]. *Journal of Lanzhou University of Finance and Economics*, 2022, 38(4): 27-40.
- [32] 晋涵. 我国碳交易试点政策的减排效应研究[J]. *环境保护与循环经济*, 2022, 42(9): 104-107.
JIN Han. Research on emission reduction effect of China's carbon trading pilot policy[J]. *Environmental Protection and Circular Economy*, 2022, 42(9): 104-107.
- [33] 陈道平, 廖海风, 谭洪. 中国碳交易政策的减排效应及其机制研究[J]. *技术经济*, 2022, 41(7): 106-119.
CHEN Daoping, LIAO Haifeng, TAN Hong. Study on the emission reduction effect and mechanism of China's carbon trading policy[J]. *Journal of Technology Economics*, 2022, 41(7): 106-119.
- [34] 陈景东, 赵沛. 碳交易试点政策与电力行业碳减排[J]. *中国电力*, 2021, 54(12): 156-161.
CHEN Jingdong, ZHAO Pei. Carbon emissions trading pilot policy and power industry emissions reductions[J]. *Electric Power*, 2021, 54(12): 156-161.
- [35] 黄辛旭. 降碳减排政策陆续发布“碳经济”成汽车产业链发展共识[N]. *每日经济新闻*, 2022-12-22(9).
- [36] 王华丽, 宁静. 发达国家低碳交通建设经验[J]. *生态经济*, 2022, 38(12): 1-4.
WANG Huali, NING Jing. Experience of low-carbon transport construction in developed countries[J]. *Ecological Economy*, 2022, 38(12): 1-4.
- [37] 陈素平, 赵莎莎, 姜洋, 等. 天津市道路交通碳减排政策实施效果评估[J]. *城市交通*, 2021, 19(5): 59-65.
CHEN Suping, ZHAO Shasha, JIANG Yang, et al. Implementation effects of road traffic carbon reduction policies in Tianjin[J]. *Urban Transport of China*, 2021, 19(5): 59-65.
- [38] 金书秦, 李颖, 胡浚哲. 农业碳减排的技术与政策[J]. *开放导报*, 2021(6): 97-104.
JIN Shuqin, LI Ying, HU Junzhe. Technical options and policy arrangements for reduction of agricultural carbon emission[J]. *China Opening Journal*, 2021(6): 97-104.
- [39] 程秀娟. 农业温室气体排放与减排固碳措施分析[J]. *中南农业科技*, 2022, 43(5): 84-90.
CHENG Xiujuan. Analysis of agricultural greenhouse gas emission and carbon sequestration measures[J]. *South-Central Agricultural Science and Technology*, 2022, 43(5): 84-90.
- [40] 朱永慧, 黄凌, 李瑜敏, 等. 中国露天生物质燃烧的温室气体排放及秸秆禁燃政策的协同减排效应[J]. *环境科学学报*, 2022, 42(10): 160-169.
ZHU Yonghui, HUANG Ling, LI Yumin, et al. Greenhouse gas emissions from open biomass burning and the co-reduction due to straw burning bans in China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, 42(10): 160-169.
- [41] 霍丽丽, 姚宗路, 赵立欣, 等. 秸秆综合利用减排固碳贡献与潜力研究[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(1): 349-359.
HUO Lili, YAO Zonglu, ZHAO Lixin, et al. Contribution and potential of comprehensive utilization of straw in GHG emission reduction and carbon sequestration[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(1): 349-359.