

## 温室气体通量测量方法及进展

岳斌<sup>1</sup>, 余赛芬<sup>2</sup>, 董晶晶<sup>2</sup>, 魏天问<sup>2</sup>, 袁金龙<sup>2</sup>, 章振<sup>2</sup>, 唐大为<sup>1</sup>, 夏海云<sup>1,2\*</sup><sup>1</sup>中国科学技术大学地球和空间科学学院, 安徽 合肥 230026;<sup>2</sup>南京信息工程大学大气物理学院, 江苏 南京 210044

**摘要** 分析了国内外主要的温室气体通量测量方法,包括针对地球生态系统通量的测量方法和针对人为排放通量的测量方法。梳理了地基原位通量测量网络、地基和星载被动遥感技术和以激光雷达为代表的主动遥感技术的研究现状与进展,分析了当前测量技术对人为碳排放的探测能力。结合国内外发展趋势,展望了为满足全球和区域人为碳排放监测的需求,需要同化原位探测与主动遥感探测数据、通过科学的卫星组网提高时空分辨率并建立不同尺度的模型。

**关键词** 遥感; 温室气体通量; 生态系统通量; 人为排放

**中图分类号** O436

**文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/AOS222172

## 1 引言

大气中温室气体浓度增加所引起的全球变暖是人类面临的最大挑战之一<sup>[1]</sup>。人为温室气体持续排放是近百年来引发全球气候变暖的重要驱动力<sup>[2]</sup>。控制全球变暖的关键在于控制温室气体的排放量<sup>[3]</sup>。温室气体中,二氧化碳(CO<sub>2</sub>)和甲烷(CH<sub>4</sub>)产生的影响最大。2015年第21届联合国气候变化大会(COP21)一致认为需要进一步努力,将全球平均气温较前工业化时期的上升幅度控制在2℃以内。为实现这一目标,应尽快达到温室气体排放峰值,并在21世纪下半叶,通过碳汇来平衡人为的排放。从碳排放总量来看,我国实现碳中和所需的碳排放减量远高于其他经济体。近30年,我国CO<sub>2</sub>的排放量约为美国的2倍、欧盟的3倍,约占全球CO<sub>2</sub>排放总量的30%<sup>[4]</sup>。中国提出2030年前实现碳达峰与2060年前实现碳中和的“双碳”目标。因此,改进对温室气体源和汇的估计,准确地测量温室气体的排放量,科学理解碳循环非常重要<sup>[5]</sup>。亟需研究开发科学的温室气体排放监测技术,获得国际社会认可的有效监测结果,服务于我国不同阶段的碳排放政策,为我国实现“双碳”目标提供有力的技术支持。

国际上量化全球范围内的碳排放的方法主要有两种,一种是清单法,另一种是基于浓度测量的通量反演法。清单法是目前联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)主流的计算碳排放量的方法,也称为自下而上的方法<sup>[6]</sup>。清单法通过统计每个排放源消耗的能源,精确地计算出CO<sub>2</sub>的总排放量,也可以通过植物的生

长计算碳吸收量。清单法的缺点在于:由于统计资料和排放因子无法快速更新,难以捕捉排放源的动态变化<sup>[7-8]</sup>。此外,清单法对小区域的统计可以非常准确,但放大到国家甚至全球范围,统计测量的复杂度和各地的政策都会影响测量的准确性<sup>[9]</sup>。

基于浓度测量的通量反演法使用仪器观测CO<sub>2</sub>浓度,结合大气扩散模型和气象数据等来综合估算温室气体的排放通量。相对于清单法,通过测量气体浓度推导通量获得的排放数据更新频次快,且测量数据相对客观,可以为温室气体的排放及溯源提供更准确的依据。

目前,温室气体浓度的测量方法主要包括原位测量和遥感测量两类。原位测量通过在地基或机载平台部署大量点式传感器等进行监测<sup>[5,9]</sup>,但覆盖范围有限,不能对区域内高时空变化的气体进行连续测量。原位测量仪器包括红外气体分析仪<sup>[10]</sup>、基于光学反馈腔增强吸收光谱技术的浓度分析仪<sup>[11]</sup>和气相色谱分析仪<sup>[12]</sup>等。遥感技术则可实现远距离的连续测量。根据光源类型,可将遥感技术分为被动遥感和主动遥感两种。被动遥感仪器通常使用太阳作为光源,具有探测精度高、系统简单、稳健且成本低的特点,适用于搭载在卫星平台进行全球范围的温室气体观测。被动遥感仪器主要包括光栅光谱仪<sup>[13]</sup>、傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)<sup>[14]</sup>、成像光谱仪<sup>[15-17]</sup>、光学相关光谱仪(OCS)<sup>[18]</sup>等。温室气体地基遥感的典型方法是高分辨率的FTIR。目前,总碳柱浓度观测网(TCCON)是基于地基高分辨率的傅里叶变换光谱仪的观测网络平台,收集了CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、CO、HDO等大气温室气体的柱

收稿日期: 2022-12-23; 修回日期: 2023-02-26; 录用日期: 2023-05-16; 网络首发日期: 2023-06-28

通信作者: \*003333@nuist.edu.cn

总量和垂直廓线。该网站建立了严格的数据采集与反演标准,可用于研究全球的碳循环,也为卫星的校准提供了标准数据库<sup>[19]</sup>。主动遥感仪器可以主动出射激光信号,因此可以进行昼夜连续的观测,同时具有非接触式探测、时空分辨率高、探测距离远、不受探测时间和地点限制等特点,在气体成分探测方面有显著优势。主动遥感技术主要包括可调谐激光吸收光谱(TDLAS)技术<sup>[20]</sup>和差分吸收激光雷达(DIAL)技术,其中 TDLAS 技术能够实现温室气体原位点式和开放式探测,DIAL 技术则是目前用于大气气体遥感的最成熟的激光雷达技术<sup>[21-22]</sup>。

通过测量目标气体的通量密度,能够推导出该气体的排放和吸收情况。根据研究对象的不同,通量测量可以分为地球生态系统的通量测量和人为排放的通量测量。根据研究平台的不同,通量测量又可以分为原位测量、地基遥感、机载遥感和卫星遥感等。本文主要概述目前先进的温室气体通量测量技术,分析其不同平台上的应用现状和未来的发展潜力。

## 2 温室气体通量测量方法

### 2.1 地球生态系统通量测量方法

#### 2.1.1 箱式法

箱式法在测量农田、草地和森林土壤的温室气体排放中应用最广泛,通常和测量气体浓度的气相色谱法结合<sup>[23-24]</sup>。箱式法将封闭箱体放置在土壤或植被上方,通过测量封闭箱体内被测气体浓度随时间的变化来计算该气体的地表交换通量。箱式法适用于排放速率很小的源,不适用于大面积测量或区域测量<sup>[25]</sup>。

#### 2.1.2 微气象学方法

微气象学方法通过测量近地层的湍流参数(风速、温度、湿度等)和被测气体浓度,计算气体的排放通量<sup>[9]</sup>。微气象学方法的测量尺度为 1~10 km<sup>2</sup><sup>[26]</sup>。测量温室气体通量的微气象学方法主要包括空气动力学法、示踪剂法<sup>[27]</sup>、质量平衡法<sup>[28-29]</sup>、能量平衡法<sup>[30]</sup>和涡度相关法<sup>[9,31-32]</sup>等。涡度相关法,也称为涡度协方差法,通过原位探测器结合涡流协方差技术对湍流标量进行测量,直接测定大气 CO<sub>2</sub> 通量。该方法的理论假设少,不需要经验参数,是国际上测量地球生态系统温室气体通量最常用的方法<sup>[33-35]</sup>。在涡度相关法中,地表与大气之间待测气体的通量<sup>[9]</sup>  $F_g$  为

$$F_g = \rho_a (\omega' + C'_g), \quad (1)$$

式中: $\rho_a$  为干空气密度; $C'_g$  为待测气体浓度的脉动值; $\omega'$  为垂直于风速的脉动量。

#### 2.1.3 平衡大气边界层方法

平衡对流边界层理论可以用来定量确定地表与大气之间的 CO<sub>2</sub> 交换速率<sup>[36-37]</sup>。将接近大气边界层的平均 CO<sub>2</sub> 和水蒸气混合比作为准平衡参数,可以估计净 CO<sub>2</sub> 地表交换<sup>[38]</sup>。该方法能够实现在区域尺度(广义

定义为 10<sup>4</sup>~10<sup>6</sup> km<sup>2</sup>)上估算净地表通量<sup>[39]</sup>,其计算公式为

$$F_c = \rho W (C_{FT} - C), \quad (2)$$

式中: $F_c$  为 CO<sub>2</sub> 的净表面通量; $C$  为边界层中 CO<sub>2</sub> 充分混合的混合比; $C_{FT}$  为自由对流层(FT)中的 CO<sub>2</sub> 混合比; $\rho$  为边界层的空气密度; $W$  为边界层顶部的垂直速度。系统的边界层建模方法能够加深对地表 CO<sub>2</sub> 通量季节变化和年际变化的理解<sup>[40]</sup>。

#### 2.1.4 星载平台的逆向建模反演系统

基于卫星平台的全球或局部气体通量反演方法,也称为自上而下的方法,通过搭载在卫星上的被动遥感仪器如光栅光谱仪、傅里叶变换光谱仪等,获得气体特有的光谱辐射数据,并使用基于大气传输模型的逆向建模反演系统得到气体通量。这种方法的本质是基于贝叶斯概率统计理论的非线性最优化方法。通过数值计算求取使大气输送模式模拟结果与观测结果最为接近的区域通量,利用气体浓度观测结果来反演通量,寻求观测资料和模式计算的最佳优化融合<sup>[7-8]</sup>。通量  $x$  (要优化的量)和 CO<sub>2</sub> 浓度  $y$  之间的关系由大气传输模型  $H$  描述<sup>[41-42]</sup>,可以写为

$$y = H(x) + \epsilon, \quad (3)$$

式中: $\epsilon$  为与模型表示(例如模型和观测值之间的比例差异)、运输和测量相关的误差。由于没有足够的信息来求解式(3)的通量,因此使用统计优化方法时需要利用先验信息。使用贝叶斯理论的反演模式,所求解的问题可以表示为给定先验信息和观测值的通量概率密度函数的最大化,等同于找到成本函数的最小值,即

$$J(x) = \frac{1}{2} (x - x_b)^T B^{-1} (x - x_b) + \frac{1}{2} [y - H(x)]^T R^{-1} [y - H(x)], \quad (4)$$

式中: $B$  和  $R$  分别为先验通量和观测值的误差协方差矩阵。最小化成本函数的通量可以通过求解式(4)的一阶导数得到,并且需要计算运输算子的梯度。

在这个反演过程中,通常需要假定化石燃烧碳和水泥排放估值是准确的。受限于目前星载平台观测数据的精度和覆盖率,基于卫星平台的全球或局部气体通量反演方法主要用于评估地球生态系统的 CO<sub>2</sub> 通量。

数据同化是地球科学研究中常用的方法,模拟场与观测资料相结合可以仿真出更加准确的三维均匀场。数据同化技术主要有两种,分别为变分技术和集合卡尔曼滤波技术<sup>[43]</sup>。变分技术需要切线性模式和伴随模式,但这两种模式的开发耗时且易错。集合卡尔曼滤波技术通过集合模拟方法避免了伴随模式的缺点,并能得到分析不确定度。研究表明,小集合下集合卡尔曼滤波技术的效果不如变分技术,但在同等计算量下集合卡尔曼滤波技术与变分技术的分析效果是一致的<sup>[44]</sup>。Zheng 等<sup>[45]</sup> 采用四维变分技术在 WRF-

Chem 模式的状态变量中加入地面 CO<sub>2</sub> 通量的缩放因子,通过极小化代价函数得出最优的地面 CO<sub>2</sub> 通量。Liu 等<sup>[44,46-47]</sup>在地球系统模式中采用局地集合卡尔曼滤波(LETKF)同化 AIRS 卫星的 CO<sub>2</sub> 观测数据。Kang 等<sup>[48-49]</sup>在 Liu 等工作的基础上,在状态变量中加入地面 CO<sub>2</sub> 通量,通过同化大气 CO<sub>2</sub> 浓度得到改进的地面 CO<sub>2</sub> 通量。Wuerth<sup>[50]</sup>在 CESM 模式中采用集合调整卡尔曼滤波(EAKF)同化 OCO-2 卫星的 CO<sub>2</sub> 观测数据,提升了地面 CO<sub>2</sub> 通量的反演精度。

## 2.2 人为排放通量测量方法

近年来人为排放逐渐增加,包括燃烧化石燃料的发电厂、垃圾填埋场的排放。人为排放的特点是多以点源形式非均匀分布,且排放区域浓度高,具有较为明显的烟羽。

### 2.2.1 逆扩散技术

点源排放强度  $S$  和通过点源的大气浓度波动 ( $c_i - c_{i-b}$ ) 的关系为

$$c_i - c_{i,b} = \int_A f_i(\xi) S(\xi) d(\xi), \quad (5)$$

式中:  $A$  为源面积; 下标  $b$  表示背景气体浓度;  $f_i$  为大气扩散系数, 与在源内的位置  $\xi$  释放的粒子到达下风向烟羽中浓度测量的位置  $i$  的概率成正比。在测量未知源的排放时, 一般采用预设的大气扩散模型, 结合下风向的气体浓度推导出源排放速率<sup>[9]</sup>。

逆扩散技术通过建立一个大气传输模式, 由下风向的气体浓度推导出排放速率。用一个大气传输模式来计算烟羽传输路径的某个点  $M$  的气体浓度对排放通量的比值  $(c/F)_{sim}$ , 如图 1 所示, 则源的排放通量<sup>[51]</sup>可表示为

$$Q = \frac{c - c_b}{(c/F)_{sim}}, \quad (6)$$

式中:  $Q$  为源的排放速率;  $c$  为  $M$  点测量的气体浓度;  $c_b$  为气体背景浓度。

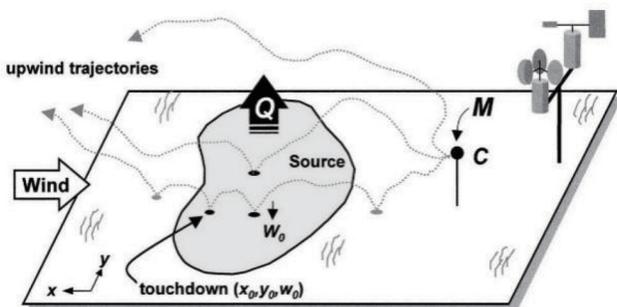


图 1 逆扩散技术原理图<sup>[51]</sup>

Fig. 1 Illustration of inverse dispersion technique<sup>[51]</sup>

若扩散模式能够准确描述大气传输过程, 则对排放点源的形状、尺寸及测量点  $M$  均没有严格限制。逆扩散技术的关键是建立合理的大气传输模式来推导出  $(c/F)_{sim}$ 。一种方案是采用示踪剂直接计算, 另一种方

案则是利用大气传输模型间接推导。

点源气体排放通量的计算中, 最简单且最常用的模型是高斯烟羽模型。位于点源下风口的气体浓度可以通过准静态高斯烟羽模型描述<sup>[52]</sup>。以气体浓度为柱浓度, 模型可以写为<sup>[53]</sup>

$$V(x, y) = \frac{F}{\sqrt{2\pi} \sigma_y(x) u} \exp\left\{-\frac{1}{2} \left[\frac{y}{\sigma_y(x)}\right]^2\right\}, \quad (7)$$

式中:  $V$  为气体垂直柱浓度;  $x$  方向平行于风向,  $y$  方向垂直于风向。垂直积分形式的优点是烟羽的实际垂直分布具有独立性。  $V$  取决于排放率  $F$ 、横风距离  $y$ 、风速  $u$  和  $y$  方向上的水平分散系数(标准偏差)  $\sigma_y$ 。标准偏差  $\sigma_y$  是顺风距离  $x$  的函数, 取决于大气稳定性参数  $a$ <sup>[53]</sup>:

$$\sigma_y(x) = a \left(\frac{x}{x_0}\right)^{0.894}, \quad (8)$$

其中  $x_0 = 1000$  m, 色散系数  $a$  取决于 Pasquill-Gifford 大气稳定性类别定义的大气稳定性。式(8)的解可能涉及对观测到的烟羽的非线性最优估计拟合。该模型的缺点是, 如果瞬时烟羽与稳态高斯行为出现较大偏离, 则拟合可能不会成功<sup>[54]</sup>。

### 2.2.2 源像素法

源像素法主要应用于卫星遥感平台。该方法解决了烟羽不符合高斯行为时点源排放的测量问题。在 Jacob 等<sup>[55]</sup>使用的源像素方法中, 为了比较不同的卫星观测配置, 气体排放量仅通过源像素相对于当地背景的增强来推断。对于尺寸为  $W$  的观测像素, 当平均风速为  $\bar{U}$  时, 源排放速率  $Q$  由平均源像素增强  $\Delta\Omega$  计算, 即

$$Q = \frac{\bar{U} W p}{g \Omega_a} \Delta\Omega, \quad (9)$$

式中:  $p$  为表面压力;  $g$  为重力加速度。源像素方法忽略了来自顺风烟羽的附加信息, 因此不是最优的方法。此外, 由于湍流的影响, 瞬时风速  $U$  对于小像素可能具有较大的不确定性。源像素法还容易受到在源像素上反演的列增强中的系统误差(例如, 发射器与周围区域相比具有不同的反射特性)和局部背景估计中的误差<sup>[54]</sup>的影响。

### 2.2.3 截面通量法

截面通量法中, 源排放速率是通过计算穿过与烟羽轴正交的一个或多个烟羽横截面的通量来估计的。截面通量法在地基激光雷达遥感、机载雷达遥感、卫星遥感中均得到应用<sup>[56-58]</sup>。基于质量平衡原理, 源排放速率  $Q$  等于风速  $U(x, y)$  和沿垂直于风向的  $y$  轴的柱状羽横截面面积  $\Delta\Omega(x, y)$  的乘积<sup>[54]</sup>:

$$Q = \int_{-\infty}^{+\infty} U(x, y) \Delta\Omega(x, y) dy. \quad (10)$$

式(10)的积分在观测中被近似为

$U(x, y)\Delta\Omega(x, y)$  在可检测到的烟羽宽度上的离散总和。原位机载测量的优点是可覆盖烟羽的整个垂直范围,而缺点是风速  $U(x, y)$  的表征结果并不理想。它必须描述烟羽范围内的一些垂直平均值,并且通常没有关于其在烟羽范围内的水平变化信息。因此,卫星遥感中需要估计有效风速  $U_{\text{eff}}$  沿  $y$  轴的柱截面烟羽积分  $C_{\text{SP}}$ :

$$\begin{cases} Q = C_{\text{SP}}U_{\text{eff}} \\ C_{\text{SP}} = \int_{-\infty}^{+\infty} \Delta\Omega(x, y)dy \end{cases} \quad (11)$$

假设  $U_{\text{eff}}$  与源的顺风距离  $x$  的方向一致,则积分  $C$  与  $x$  无关,并且可以计算不同的  $x$  值后取平均值来提高精度。

地基激光雷达遥感测量主要依据截面通量法的核心原理。Queiβer 等<sup>[59]</sup>使用地基积分差路径分激光雷达(IPDA)测量  $\text{CO}_2$  浓度,通过测得的火山口上方截面气体浓度和风速来估算烟羽传输速度,然后利用式(12)计算火山口排放的  $\text{CO}_2$  通量  $\Phi_{\text{CO}_2}$ 。

$$\Phi_{\text{CO}_2} = 10^{-6}v_{\text{pl}}N_{\text{air}}\frac{M_{\text{CO}_2}}{N_{\text{A}}} \sum_{\text{plume}} \Delta r_i Y_{\text{CO}_2, \text{pl}} \quad (12)$$

式中: $v_{\text{pl}}$  为烟羽传输速率; $N_{\text{air}}$  为干空气数密度; $M_{\text{CO}_2}$  为  $\text{CO}_2$  的摩尔质量; $N_{\text{A}}$  为阿伏伽德罗常量; $\Delta r_i$  为激光雷达每个角度步长的横向距离增量; $Y_{\text{CO}_2, \text{pl}}$  为反演出的  $\text{CO}_2$  浓度。

### 2.2.4 综合质量增强方法

综合质量增强(IME)方法主要用在星载测量平台中。该方法基于简单的比尔定律,使用星载成像光谱仪绘制气体排放分布图。综合质量增强方法将源排放速率与在源顺风处检测到的烟羽总质量关联。包含区域  $A_j(j=1, 2, \dots, N)$  的  $N$  个像素的观察柱羽的综合质量增强  $\alpha_{\text{IME}}$  为

$$\alpha_{\text{IME}} = \sum_{j=1}^N \Delta\Omega_j A_j \quad (13)$$

Frankenberg 等<sup>[60]</sup>使用横截面通量方法中几个来源的独立估计,定义了  $\alpha_{\text{IME}}$  和  $Q$  之间的经验线性关系,用于计算飞机上检测的  $\text{CH}_4$  烟羽,然后将这种线性关系应用到所有观察到的烟羽。

$\alpha_{\text{IME}}$  和点源排放速率  $Q$  之间的关系由  $\text{CH}_4$  在可检测烟羽中的停留时间  $\tau$  定义: $Q = \alpha_{\text{IME}}/\tau$ 。也可以用有效风速  $U_{\text{eff}}$  和烟羽大小  $L$  在  $\tau$  维度上表示  $Q$ :

$$Q = \frac{1}{\tau} \alpha_{\text{IME}} = \frac{U_{\text{eff}}}{L} \alpha_{\text{IME}} = \frac{U_{\text{eff}}}{L} \sum_{j=1}^N \Delta\Omega_j A_j \quad (14)$$

如果烟羽的消散是通过源头均匀输送到下风的终端距离而发生的,则  $U_{\text{eff}}$  和  $L$  将具有风速和烟羽长度的简单物理含义。但烟羽消散的实际机制是湍流扩散,它发生在各个方向。因此,必须将  $U_{\text{eff}}$  和  $L$  视为与风速  $U$  和烟羽观测范围相关的运行参数。在式(14)中引入非线性,可检测的烟羽大小  $L$  取决于  $Q$  和  $U$ 。

点源排放通量的反演方法中,通过高斯烟羽反演、源像素或质量平衡来推断源排放速率的标准方法容易出现大误差,这是因为湍流无法在小规模的瞬时气体烟羽中正确参数化。将烟羽总质量与源排放速率联系起来的质量增强方法,以及从烟羽横断面的通量推断源排放速率的横截面通量方法的适用范围更广。低风速有利于排放源的检测,但不利于源排放的量化<sup>[54]</sup>。

### 2.2.5 高斯向量积分法

高斯向量积分法利用高斯散度定理。该方法指出向量场  $G$  通过封闭区域  $U$  的积分通量  $F$  等于排放量,它可以是正数或负数,分别表示源或汇。

$$F = \iiint_U \text{div}G dU = \iint_S G \cdot dS, \quad (15)$$

向量场为

$$G = Vu, \quad (16)$$

式中: $V$  为气体的垂直柱浓度; $u$  为风速。当采用机载或星载方式探测时,积分通量为

$$F = \iint_S Vu \cdot ndS \approx \sum_i V_i u \cdot ndS, \quad (17)$$

式中: $n$  为边界  $S$  的法向量<sup>[53]</sup>。

### 2.2.6 水平净通量法

水平净通量法通过对特定高度处的水平净通量进行估算,能够帮助分析目标区域的源和汇。水平净通量<sup>[61]</sup>的定义为

$$F = \oint_L \rho u \cdot ndl, \quad (18)$$

式中: $\rho$  为气体浓度; $l$  为测量区域边界长度。水平净通量  $F$  表示特定高度区域温室气体的水平输送量,其中:正值表示输出高于输入,为碳源;负值表示输入高于输出,为碳汇。

## 3 观测进展

温室气体通量观测平台包括原位测量仪器、地基、机载和星载遥感平台。原位测量中的通量箱的测量面积通常只有  $10\sim 20 \text{ cm}^2$ ,通量塔的测量面积可以达到  $1 \text{ km}^2$ ;地基激光雷达的分辨率一般为  $30\sim 150 \text{ m}$ ,测量范围可达  $110 \text{ km}^2$ <sup>[61]</sup>;机载平台的分辨率为  $2 \text{ cm}^2\sim 1 \text{ m}^2$ ;星载平台可进行全球范围的探测,分辨率为  $1 \text{ m}^2\sim 1 \text{ km}^2$ <sup>[62]</sup>。从原理上看,温室气体通量观测包括地基原位测量、被动遥感和主动遥感。

### 3.1 地基原位测量进展

随着基于微气象学理论的涡度相关观测技术的发展和成熟,生态系统尺度的碳水交换通量的直接测定得以实现,并形成了全球和多个区域的通量观测网络,为评价全球尺度的碳水收支以及各类生态系统和典型区域陆地生态系统碳水平衡,分析生态系统对全球气候变化的响应和适应提供了重要的科学知识和数据基础<sup>[62]</sup>。应用涡度相关法,通过搭建通量塔网络,能够测

量空间分辨率从几十  $\text{km}^2$  到几百  $\text{km}^2$  的平均通量, 通量塔也称为 EC 塔。1998 年, 美国宇航局 (NASA) 牵头组建了全球通量网 (FLUXNET), 用于观测全球范围内的温室气体通量。截至 2006 年, 该网络已拥有 400 多个通量观测站点, 40 个不同参数的网络共享数据库<sup>[63-64]</sup>; 截至 2021 年, 全球通量观测站点数量已超过 900 个。通量塔的平均测量面积或表面通量积分面积通常不超过  $1 \text{ km}^2$ 。通量塔原位测量的最大优势是测量精度相对较高, 可以达到 10%。因此, 通过遥感方法反演的碳通量模型通常需要使用来自通量塔的数据进行验证。此外, 通量塔测量的时间连续性强, 通量塔测量以高频和相对较长的时间段记录 (能够全年记录以约 10 Hz 的频率进行  $\text{CO}_2$  浓度测量时的半小时平均值), 很好地分析站点的时间变化<sup>[63]</sup>。作为全球通量网的重要组成部分和亚洲区域的主体, 中国陆地生态系统通量观测研究网络 (ChinaFLUX) 于 2001 年正式创建, 并开始了长期联网观测。截至 2014 年, 中国范围的通量观测站已超过 200 个, 形成了具有相当规模的生态系统碳、氮、水和能量通量观测研究资源, 为多部门联合观测和数据资源整合共享奠定了基础<sup>[64]</sup>。

对于非均匀覆盖的区域, 通量塔测量难度较大, 需要使用足迹模型来提高准确性。此外, 受限于塔高, 只有少数几座延伸数百米的高塔适合在夜间层 (NL) 进行垂直采样, 但其无法对高度大于 0.5 km 的对流大气边界层或夜间残留层进行采样<sup>[65]</sup>。从全球通量反演的维度来看, FLUXNET 的站点仍然非常稀疏, 且地理分布很不均匀, 发达国家站点较多, 南美洲、非洲、亚洲内陆地区及高纬度地区的站点较为稀缺。当需要获取更高时空分辨率的通量分布时, 由于站点稀疏和模式误差, 基于地基通量网反演的通量不确定性显著增加<sup>[8,41]</sup>。

### 3.2 被动遥感通量观测进展

目前, 星载平台是主流的被动遥感温室气体通量观测平台。传统的人为碳排放计算主要基于在线监测与 IPCC 清单方法, 缺乏第三方空天地独立数据验证。引入卫星观测数据进行同化反演, 可以提高对全球通量的理解, 降低地面站点稀疏地区的不确定性。因此, 2019 年第 49 届 IPCC 通过了对 2006 年 IPCC 国家清单指南的改进方案, 明确增加了采用基于大气气体浓度, 结合“自上而下”(即星载平台大气反演) 方法, 验证排放清单的内容<sup>[8]</sup>。早期的 Terra、Landsat 和 Aqua 等卫星已被用于各种生态系统碳通量的研究中<sup>[66]</sup>。2009 年, 日本发射了第一颗专门用于温室气体探测的卫星 GOSAT, 并于 2018 年发射了精度更高的 GOSAT-2 卫星<sup>[67]</sup>。GOSAT/GOSAT-2 卫星具备同时观测  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  的能力。2014 年, NASA 成功发射了专门用于观测全球大气碳循环的 OCO-2 卫星; 2019 年, NASA 又将其姊妹碳卫星 OCO-3 部署到国际空间站上, 目标在于探测人类排放  $\text{CO}_2$  较集中的中纬度地区<sup>[68-71]</sup>。

2016 年, 我国的碳卫星 TanSat 成功发射, 它是国际上第三颗用于温室气体探测的专职卫星<sup>[8]</sup>。我国 2018 年发射的 GF-5 卫星上携带了大气温室气体监测仪 (GMI), GMI 主要用于  $\text{CO}_2$  等温室气体浓度的遥感反演。GMI 采用空间外差技术进行精细辐亮度谱线探测, 该技术同时兼具傅里叶变换技术和光栅光谱仪的优点<sup>[72]</sup>。目前在轨的卫星主要使用被动的光栅光谱仪和傅里叶变换技术来获得  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  等的柱浓度<sup>[73]</sup>, 已退役的 SCIAMACHY 传感器、OCO-2、TanSat 等均使用光栅技术, 日本的 GOSAT、GOSAT-2 及其后续卫星均采用傅里叶变换技术。

与传统的单点实地测量技术相比, 卫星遥感的最大优势是能够实现区域和全球范围的实时探测。通过卫星同化大气  $\text{CO}_2$  测量进行自上而下的碳通量反演是评估全球碳收支的有用工具, 基于卫星遥感的温室气体通量测量也取得了一系列进展。

#### 3.2.1 生态系统 $\text{CO}_2$ 通量估算进展

受限于精度和数据覆盖率, 目前基于卫星被动遥感反演的温室气体通量主要为生态系统的通量。日本国立环境研究所 (NIES)、法国气候与环境科学实验室 (MACC)、荷兰瓦赫宁根大学 (WU)、日本海洋地球科技署 (JAMSTEC)、澳大利亚英联邦科学和工业研究组织 (CSIRO)、日本气象厅 (JMA)、俄罗斯中央高空气象台 (CAO) 等 7 个国际知名的团队对东亚地区的碳通量进行了计算<sup>[41]</sup>, 涉及 7 个独立的反演系统, 每个反演系统都有不同的传输模型、先前的陆地生态系统、海洋通量以及化石燃料和水泥 (FFC) 排放估计。可见, 所有反演系统都解决了亚洲地区不同分辨率的  $\text{CO}_2$  通量反演问题。通过使用全球反演系统, 可以推断亚洲通量与全球碳收支和大气中  $\text{CO}_2$  的增长率一致<sup>[41]</sup>。但是, 从反演结果也看到, 不同团队估算的通量结果存在较大差距。

2020 年, 中国科学院大气物理研究所基于碳卫星 TanSat 的观测数据对我国的碳通量进行观测, 结果表明中国西南地区存在被低估的巨大碳汇<sup>[74]</sup>。2021 年, 中国科学院大气物理研究所基于 TanSat 卫星首次对全球  $\text{CO}_2$  通量分布进行估算<sup>[75]</sup>, 其估算结果与其他卫星如 GOSAT 和 OCO-2 的估算结果具有较好的一致性。与先验通量相比, 高后验误差降低 (30%~50%), 表明同化卫星为全球碳通量估计提供了非常有效的约束。它们的影响还体现在对全球碳收支至关重要的地区 (如南美洲和中国) 通量模式具有显著的时空变化特征。

#### 3.2.2 人为排放通量估算进展

2019 年, 中国科学技术大学的 Wang 等<sup>[76]</sup>将由权重函数修正的被动差分吸收光谱 (WFM-DOAS) 技术应用于温室气体浓度测量, 并测量了火力发电厂烟囱排放的  $\text{CO}_2$  浓度。实验结果表明, 该系统能够精确获得点源排放的温室气体浓度二维分布信息和通量信

息,适用于人为源排放的遥测。

受限于卫星遥感技术的测量面积和探测距离,目前在轨的温室气体探测卫星主要致力于减少区域尺度生态系统碳通量时空分布的不确定性,而不是量化人为活动产生的碳通量。近年来,人为排放也逐渐受到重视。基于卫星遥感平台估算人为排放的 $\text{CO}_2$ 和 $\text{CH}_4$ 通量方面也涌现出一些有价值的研究成果。

2010年,德国不莱梅大学 Bovensmann 等<sup>[77]</sup>使用 CarbonSat 量化单个发电厂的温室气体排放量,并进行了机载验证实验。在实验中,使用所搭载的光栅光谱仪测量 $\text{CO}_2$ 气体浓度。发电厂的 $\text{CO}_2$ 排放量计算基于观测到的 $\text{CO}_2$ 增强色谱柱,并结合大气传输模型来计算 $\text{CO}_2$ 的排放通量。该实验使用两种不同的反演方法计算 $\text{CO}_2$ 通量,一种是基于高斯羽流模型的方法,另一种是使用简单高斯积分的方法。两种方法都能够推导出强点源排放率的估计值,误差在报告值的 $\pm 10\%$ 范围内<sup>[53]</sup>。2017年,加拿大环境与气候变化部气候研究部的 Nassar 等<sup>[78]</sup>利用高分辨率的 OCO-2 卫星的测量数据捕捉到地面发电厂的 $\text{CO}_2$ 通量。尽管 OCO-2 卫星并非用于电厂排放监测,但是在特定情况下,通过将数据拟合到高斯羽流模型中进行模拟,OCO-2 可用于量化单个大中型煤电厂的每日 $\text{CO}_2$ 排放。该研究证实了未来针对点源优化的 $\text{CO}_2$ 成像卫星可以监测单个发电厂的排放,以支持气候政策的实施。2019年,美国密歇根大学的 Zheng 等<sup>[79]</sup>同样基于 OCO-2 的卫星观测数据,使用新的 WRF-Chem 模型计算雅可比矩阵,通过最大似然估计计算火电厂的温室气体排放量,其估算结果与发电厂报告的排放率非常吻合,证明了该方法的可行性。Brunner 等<sup>[80]</sup>也对柏林六家大型发电厂和 22 个较大点源的烟羽进行模拟。2021年,中国科学院空天信息创新研究院的 Hu 等<sup>[81]</sup>利用 OCO-2 卫星的观测数据,使用改进的高斯羽流模型对中国两个火电厂的气体排放进行了监测,将监测结果与 3 个标准数据库进行对比后发现,先前跨越不同时间范围的排放清单可能高估了其中一个发电厂在进行测量的两天内的 $\text{CO}_2$ 排放量。 $\text{CH}_4$ 排放监测方面也取得了一系列进展。2022年9月26日,北溪一号(NordStream 1)和北溪二号(NordStream 2)天然气管道发生大规模泄漏。南京大学的 Jia 等<sup>[82]</sup>使用天气研究和预报(WRF)-社区多尺度空气质量模型(CMAQ)、随机时间反转拉格朗日输运模型(STILT)和卫星图像结合 IME 模型 3 种方式,分别对 2022 年 9 月 26 日至 2022 年 10 月 1 日北溪管道天然气泄漏事件中向大气释放的 $\text{CH}_4$ 进行估算。通过机载平台对油气和煤矿设施上空 $\text{CH}_4$ 柱浓度进行遥感测试,结果表明,瞬时烟羽具有不规则的形状,可检测到的尺寸为 $0.1\sim 1\text{ km}$ <sup>[54]</sup>。Krings 等<sup>[58]</sup>采用横截面通量方法,扩展了原位烟羽测量范围。Jacob 等<sup>[55]</sup>采用质量平衡方法,基于卫星观测的气体源像素增强推断点源排放。Frankenberg 等<sup>[60]</sup>从烟羽中检测

的 $\text{CH}_4$ 总质量经验性地推断出点源排放。

上述从烟羽观测中反演点源排放的方法的共同特征是它们需要独立了解驱动烟羽传输的风速。在应用于机载原位观测的横截面通量法中, $\text{CH}_4$ 和当地风速可以同时测量。然而,在卫星遥感中,瞬时柱状烟羽的风速不能直接测量,且在烟羽的垂直和水平方向上会有变化。来自地面和卫星观测的 $\text{CO}_2$ 通量的逆向建模的关键取决于大气传输模拟的准确性。Brunner 等<sup>[80]</sup>对火电厂的气体排放进行模拟后发现:以前的研究强调大气边界层中风场模拟误差的影响,忽略了地表排放的气体在垂直方向分布的重要性。当前估算电厂气体排放的方法通过由烟羽位置定义的风向来规避这个问题,然而,由于烟羽的平流速度需要根据模拟或观测的垂直风廓线进行估算,这些方法还需要对烟羽的高度作出假设。目前,对火电厂烟羽的准确模拟对于任何中尺度大气传输模型来说仍然是一个巨大的挑战。目前的网格化排放清单仅提供二维信息。为了更准确地反演点源排放,建议在区域大气传输和反演建模中用 3 个维度来表示气体排放。

上述利用卫星数据直接反演通量的研究进展显示了卫星遥感能够检测人为排放温室气体的潜力。然而,卫星遥感反演的点源排放气体浓度通常略高于背景浓度,这使得跟踪点源排放气体烟羽的路径成为定量估算人为排放的挑战。因此,一些研究利用示踪气体来识别人为排放的目标气体。 $\text{NO}_2$ 和 $\text{CO}$ 等大气污染物与人为排放 $\text{CO}_2$ 具有相同的来源,因此可以指示人为 $\text{CO}_2$ 排放的变化,实现对人为源碳排放的优化计算。2019年,德国不来梅大学的 Reuter 等<sup>[83]</sup>利用 $\text{CO}_2$ 排放与大气污染 $\text{NO}_2$ 的排放同源特征,将该成分作为辅助数据,确定点源排放的 $\text{CO}_2$ 流动羽流轨迹,过滤背景对排放点源检测的影响,结合大气输送模拟导出横断面 $\text{CO}_2$ 通量,由此估算的人为排放的不确定性为 $23\%\sim 72\%$ 。2019年,Kuhlmann 等<sup>[84]</sup>通过对规划中的 CO2M 卫星观测结果的模拟分析验证了 $\text{CO}_2$ 和 $\text{NO}_2$ 卫星同步观测的可靠性。NASA 的 Liu 等<sup>[85]</sup>基于卫星观测的 $\text{NO}_2$ 数据和排放监测系统观测的 $\text{CO}_2$ 和 $\text{NO}_x$ 排放比值反演估算了美国火电厂的 $\text{CO}_2$ 排放量。研究表明,未来在星载平台部署 $\text{CO}_2$ 和 $\text{NO}_x$ 或 $\text{CO}$ 同步观测或组网观测,可以提高人为排放 $\text{CO}_2$ 的监测能力,同时能为空气污染同步控制提供数据支持<sup>[7]</sup>。

卫星被动遥感在生态系统的温室气体通量和人为排放气体通量的反演方面都取得了一系列研究成果。但是,目前卫星被动遥感也存在一些问题,比如:1)测量时间方面,由于依赖太阳辐射,无法进行夜间观测,且重访周期长。2)测量区域方面,无法覆盖高纬度和两极地区,海洋测量则依赖于耀斑。3)数据覆盖率方面,主流的传感器所选用的短波红外波段易受云和气溶胶的影响,研究表明有近 $90\%$ 的数据受到云的干扰<sup>[86]</sup>,导致星载平台被动遥感的全球数据覆盖率仅为

5%~10%。一些卫星采用离散采样点并加大采样点距离来提高覆盖率(如 GOSAT TANSO-FTS、FY-3D GAS、GF-5GMI),另一些卫星采用窄幅(10~25 km)连续像素观测(如 OCO-2、TANSATACGS、MicroCarb),但是轨道之间存在很大的观测空白区域。4)反演精度方面,被动遥感路径长度的不确定性导致其无法进行高精度反演;目前星载平台被动遥感精度为  $2 \times 10^{-6} \sim 4 \times 10^{-6}$ ,中国科学院大气物理所的 Liu 等<sup>[87]</sup>通过自研的算法,将 CO<sub>2</sub> 反演精度提高到  $1.5 \times 10^{-6}$ 。

对人为排放温室气体通量的高精度监测是未来卫星观测计划的核心目标。人为排放的 CO<sub>2</sub> 通量要比生态系统通量弱至少一个量级,且以点源高浓度排放为主、面积小、时空分布不均匀,星载平台很难实现精细化监测和追踪。2011 年,全球气候观测系统 GCOS 提出的卫星观测目标为:采样分辨率为 5~10 km,时间分辨率为 4 h,CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 的精度分别为  $10^{-6}$  和  $10 \times 10^{-9}$ 。该研究指出,满足这一精度对于区分自然源汇与人为排放至关重要。2014 年,Chevallier 等<sup>[88]</sup>进一步指出,反演区域 CO<sub>2</sub> 通量时,卫星区域系统性误差应小于 0.125%(即 CO<sub>2</sub> 浓度测量误差小于  $0.5 \times 10^{-6}$ ),目前,没有任何一个卫星能达到该要求。

卫星被动遥感技术的发展方向为提高时间、空间分辨率和数据覆盖率。可以通过增大刈幅宽度或增加跨轨方向的观测数据数量,或者利用地球静止轨道提高观测频率和数据覆盖率,大幅提升观测效率。最新研究表明,卫星组网观测是提高测量时空分辨率的有效途径,例如可以通过多颗卫星进行低地球轨道(LEO)卫星组网、地球静止轨道(GEO)卫星组网和高椭圆轨道(HEO)卫星组网观测<sup>[83]</sup>。目前,最引人注目的是欧洲空间局 CO<sub>2</sub> 监测计划(CO2M 计划)。2019 年,欧洲空间局将“人为二氧化碳排放监测任务(CO2M)”列为哥白尼计划的 Sentinel 7 任务,这是一个具有成像能力的 CO<sub>2</sub> 卫星星座,预计可以实现  $0.5 \times 10^{-6} \sim 0.7 \times 10^{-6}$  的高精度测量,设计幅宽超过 240 km,该指标考虑了由 3 颗 CO2M 卫星组成的星座。通过 CO<sub>2</sub> 的摩尔分数  $X_{\text{CO}_2}$  的高质量卫星观测,提供全球 0.05° 网格的碳排放清单同化反演结果,以支持人为排放 CO<sub>2</sub> 通量的量化<sup>[89]</sup>。

### 3.3 主动遥感通量进展

主动遥感能够主动发射激光信号,信号强度大,不依赖太阳光,因此可实现全天候测量,其照明路径即为测量路径,可以大幅提高测量精度。温室气体通量的计算基于气体浓度的探测和大气传输或风速的探测,本文中温室气体的通量主动遥感是指采用主动遥感方式探测气体浓度,对于大气传输参数和风速的测量方式不作限定。气体主动遥感技术包括 TDLAS 技术和 CO<sub>2</sub> 激光雷达技术。中国科学技术大学的 Gu 等<sup>[90]</sup>采

用开放光程的波长调制可调谐激光吸收光谱(TDLAS-WMS)技术测量温室气体浓度,结合风速仪测量风速,采用涡度相关法测量农田的 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O 的垂直湍流通量。该测量结果与原位红外气体分析仪的测量结果具有较好的一致性。CO<sub>2</sub> 激光雷达具有探测距离远、时空分辨率高、全天时测量等特点,其覆盖面虽然不如卫星,但比单个地面站点的覆盖面广,是局部区域人为排放 CO<sub>2</sub> 浓度和通量监测的有效手段。目前激光雷达主动遥感温室气体通量的观测以地基和机载平台为主,机载平台主要用于星载激光雷达计划的验证性实验。

地基遥感平台方面,2011 年法国巴黎理工大学的 Gibert 等<sup>[65]</sup>首次尝试用激光雷达测量 CO<sub>2</sub> 通量。他们采用地基相干 DIAL 测量 CO<sub>2</sub> 的浓度和风速,采用涡度协方差方法计算大气边界层的 CO<sub>2</sub> 通量,并将其测量结果与原位通量塔的测量结果进行对比,发现所计算的白天通量标准差为 850%,夜晚通量标准差为 250%。2014 年,英国国家物理实验室(NPL)的 Robinson 等<sup>[91]</sup>通过地基激光雷达扫描来自烟囱点源的 CO<sub>2</sub> 烟羽的横截面,结合正交方向的风,测量到 CO<sub>2</sub> 的排放通量。这是 DIAL 首次成功应用于人为排放 CO<sub>2</sub> 通量的测量。2016 年,英国曼彻斯特大学的 Queißer 等<sup>[59]</sup>对意大利 CampiFlegrei 火山口的 CO<sub>2</sub> 通量进行测量,使用地基 IPDA 测量 CO<sub>2</sub> 浓度,通过测得的火山口上方截面浓度和风速来估算烟羽传输速度。虽然通量的传递误差暂时达到 60%,但为激光雷达通量测量提供了新的手段。2022 年,中国科学技术大学的 Yue 等<sup>[61]</sup>通过地基激光雷达同步测量 CO<sub>2</sub> 浓度和大气风场,估算出区域距离分辨率高的 CO<sub>2</sub> 水平净通量。该雷达以 6 km 半径、60° 角对扇形区域内的 CO<sub>2</sub> 水平净通量进行扫描测量,通量结果如图 2 所示。实验中,对学校、公园和工业区 3 个代表性碳源碳汇区域的通量进行对比,根据计算结果判定碳汇和碳源,其判定结果与区域的实际情况具有很好的一致性,验证了激光雷达水平净通量的遥感能有效地实现 CO<sub>2</sub> 溯源。地基激光雷达测量研究进展表明,激光雷达具有在 100 km<sup>2</sup> 量级的局部区域尺度内提供高距离分辨率的 CO<sub>2</sub> 通量测量的能力,且能够提供同步的高分辨率风场,这些优势使其在局部点源气体排放通量监测中极具潜力。

通过星载激光雷达监测 CO<sub>2</sub> 通量的全球分布及变化,利用激光雷达的优势能够填补高纬地区全年观测和全球范围内夜间观测的空缺。星载平台中,通过激光雷达主动发射激光信号,不依赖太阳光,可实现全天候测量,测量范围可覆盖海洋和高纬度地区;因其照明路径等于测量路径,数据覆盖率可高达 90%,测量精度也明显提升。中国、美国和欧洲国家等都在进行新一代星载 CO<sub>2</sub> 激光吸收光谱主动遥感技术的研究。NASA 设立 ASCENDS (Active Sensing of CO<sub>2</sub> Emissions over Nights, Days, and Seasons)项目,将多

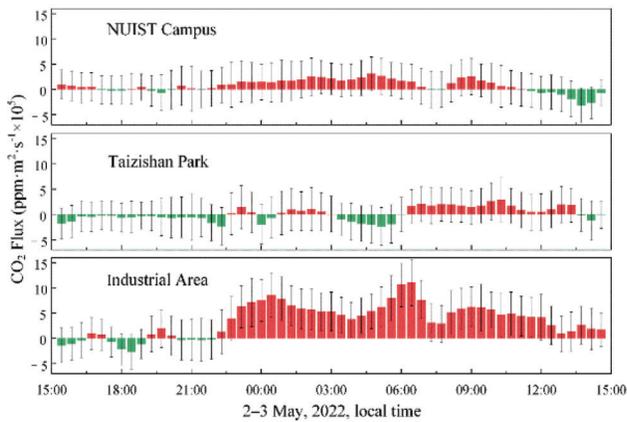


图2 学校、公园和工业区的CO<sub>2</sub>水平通量<sup>[61]</sup>

Fig. 2 CO<sub>2</sub> horizontal flux in campus, park, and industrial area<sup>[61]</sup>

波长和  $1.57 \mu\text{m}$  的 IPDA 方法探测体制用于探测  $X_{\text{CO}_2}$ , 并且在 2008—2011 年进行了 5 次机载激光雷达飞行实验, 在飞机平台上 CO<sub>2</sub> 的反演精度可以达到  $0.3 \times 10^{-6}$  [92-93]。目前, 该计划已经推迟至 2030 年 [92, 94-95]。欧洲空间局早在 2007 年就提出了采用  $1.57 \mu\text{m}$  和  $2.05 \mu\text{m}$  的 CO<sub>2</sub> 吸收波段的 A-SCOPE (Advanced Space Carbon and Climate Observation of Planet Earth) 计划 [96-97], 但是该计划于 2014 年取消。法国宇航局 (CNES) 和德国宇航中心 (DLR) 合作的 MERLIN 被用于全球 CH<sub>4</sub> 测量, 采用  $1.645 \mu\text{m}$  激光光源的 IPDA 探测体制, 该卫星计划于 2026 年发射 [98-99]。中国则于 2022 年 4 月 16 日成功发射了国际首颗主动探测全球 CO<sub>2</sub> 浓度的大气环境监测卫星 DQ-1, 该星在国际上首次实现主动激光 CO<sub>2</sub> 高精度、全天时、全球探测, 采用  $1.57 \mu\text{m}$  波段的 IPDA 探测体制测量 CO<sub>2</sub> 浓度, 探测精度经在轨测试可优于  $10^{-6}$  [100]。基于激光雷达主动遥感在时空分辨率和数据覆盖率方面的优势, 未来星载平台的温室气体通量主动遥感将在全球碳通量反演及碳源碳汇监测中发挥重要作用。

## 4 总结与展望

近百年来, 人类活动使得大气中的 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 等温室气体的浓度迅速增长, 导致全球变暖。近年来, 中国积极实施应对气候变化的国家战略, 提出碳达峰和碳中和的宏伟目标。碳中和的根本途径是“减排”和“增汇”, 需要准确确定地表碳源和碳汇的分布, 甄别自然与人为排放。因此, 需要对温室气体浓度和排放通量进行高时空分辨率测量, 区分人为碳排放和生态系统碳排放的贡献, 建立从全球到局部区域的碳排放监控体系。

虽然温室气体的探测手段日臻丰富, 但是在高精度监测遥感区域乃至全球范围的气体浓度的三维分布及三维通量方面仍然面临挑战。以通量塔为代表的地基原位测量技术的测量精度高、时间连续性强, 在森

林、农田等地球生态系统的通量探测中发挥了重要作用。但是, 站点稀疏和代表距离有限, 导致其难以在全球尺度上定量了解温室气体的源和汇。卫星遥感资料可以获得温室气体在全球范围的空间分布和变化, 反演速度快, 可弥补地基站点稀疏的不足。目前, 卫星遥感已经能够探测地球生态系统和点源的温室气体排放, 但在精度、分辨率和数据覆盖率方面还受到诸多限制。大气化学输送模式能够仿真出大气三维气体浓度场, 但由于输送模式和气象场的不完备、初始场和排放源的不确定性, 所获得的气体浓度三维分布与实际情况存在偏差, 需要结合实际观测数据进一步校正以提高精度。激光雷达技术具有探测距离远、时空分辨率高、可全天时探测等优点, 因此主动遥感是卫星遥感发展的重要方向。目前的卫星主动遥感以 IPDA 技术为主, 只能获得整个大气柱的浓度, 很难准确反演点源排放的垂直分布, 从而影响点源排放通量的反演效果。地基 DIAL 能够获得高距离分辨率的气体浓度分布, 且可以同步高精度探测大气风场数据, 虽然其覆盖面不如卫星, 但比单个站点的覆盖面广, 是局部区域气体通量监测的有效手段。未来, 温室气体通量测量技术可以在以下方向进一步发展。

1) 同化卫星、地基和机载平台的测量数据, 获取更高精度的温室气体通量三维分布。采用卫星遥感获得全球范围的气体柱浓度; 利用地基 DIAL 获取  $100 \text{ km}^2$  范围的高时空分辨率的三维气体浓度和大气风场, 采用集合卡尔曼滤波方法和 WRF-Chem 模式等同化激光雷达观测数据, 获得温室气体三维通量同化数据; 利用原位探测仪器获取精确的测量数据, 并对同化数据进行校准和优化, 从而获得更加准确、网格均匀的三维温室气体浓度场和通量分布。通过研究地面温室气体通量的三维空间分布, 分析温室气体源汇的发生机理并甄别自然和人为排放。结合星载平台监测全球温室气体通量的全球分布及变化, 利用激光雷达的优势提供局部高分辨率数据, 协同部署高密度的地基原位探测站点的高精度数据, 形成更加准确的温室气体通量的三维空间分布网络, 为温室气体减排增汇战略提供科学指导。

2) 开发温室气体同化预报系统, 建立准确的温室气体模型。获取温室气体空间浓度分布、三维风场信息、云高云厚、湍流廓线数据, 结合实测气象场资料, 获得温室气体异地传输和沉降、气象场和气体浓度场的耦合关系; 研究温室气体的季节演变, 开发温室气体同化预报系统。此外, 目前尚无完善的针对地面温室气体源汇 (人为源、野火源、陆地汇、海洋汇等) 的动力模型, 需要确定地面温室气体通量的向前模式以及反算出准确的地面碳通量, 建立准确的温室气体源汇模型。在提高数据质量和数量的基础上, 还需要改进卫星数据同化算法和大气化学模型。建立不同尺度的模型, 例如全球尺度模型、中尺度模型、城市规模模型、点源

规模模型等。现有模型的分辨率和计算效率也需要提高。

3)通过卫星组网实现全球高时空分辨率遥感。由于点源碳排放和人为排放的高精度监测对卫星时空分辨率和监测精度提出了非常苛刻的要求,仅凭单颗卫星无法满足全球探测的需求。未来,将多颗高精度高时空分辨率的卫星组成一个虚拟的卫星星座,能够大幅提高数据覆盖率和时间分辨率,形成全球质量统一、连续的温室气体观测数据集,全方位观测温室气体的浓度和源汇时空变化。

4)发展温室气体和污染物协同监测技术。由于人为温室气体排放通常伴随着污染物排放,可以利用示踪气体观测协助识别人为排放。开展温室气体与 $\text{NO}_2$ 、 $\text{O}_3$ 和气溶胶等协同观测,通过高时空分辨遥感,累积长期观测数据,分析其时空变化规律与相互影响机制,将有助于增强对温室气体及污染物排放规律的理解。

#### 参 考 文 献

- [1] Dickinson R E, Cicerone R J. Future global warming from atmospheric trace gases[J]. *Nature*, 1986, 319(6049): 109-115.
- [2] 秦大河. 气候变化科学与人类可持续发展[J]. *地理科学进展*, 2014, 33(7): 874-883.
- [3] Qin D H. Climate change science and sustainable development [J]. *Progress in Geography*, 2014, 33(7): 874-883.
- [4] Kallbekken S. Why the CDM will reduce carbon leakage[J]. *Climate Policy*, 2007, 7(3): 197-211.
- [4] 刘文清. “双碳”目标下大气环境光学监测技术发展机遇[J]. *光学学报*, 2022, 42(6): 0600001.
- [5] Liu W Q. Opportunities and challenges for development of atmospheric environmental optics monitoring technique under “double carbon” goal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(6): 0600001.
- [5] 季红程, 谢品华, 徐晋, 等. 基于可调谐法布里-珀罗干涉仪的大气二氧化碳测量方法研究[J]. *光学学报*, 2021, 41(18): 1812004.
- [6] Ji H C, Xie P H, Xu J, et al. Measuring method of atmospheric carbon dioxide based on tunable Fabry-Perot interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(18): 1812004.
- [6] Hockstad L, Hanel L. Inventory of U. S. greenhouse gas emissions and sinks[R]. Washington, D.C.: EPA, 2018.
- [7] 刘良云, 陈良富, 刘毅, 等. 全球碳盘点卫星遥感监测方法、进展与挑战[J]. *遥感学报*, 2022, 26(2): 243-267.
- [8] Liu L Y, Chen L F, Liu Y, et al. Satellite remote sensing for global stocktaking: methods, progress and perspectives[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2022, 26(2): 243-267.
- [8] 刘毅, 王婧, 车轲, 等. 温室气体的卫星遥感: 进展与趋势[J]. *遥感学报*, 2021, 25(1): 53-64.
- [9] Liu Y, Wang J, Che K, et al. Satellite remote sensing of greenhouse gases: progress and trends[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, 25(1): 53-64.
- [9] 王薇. 温室气体及其稳定同位素排放通量测量技术和方法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013.
- [10] Wang W. Study on measurement technology and method of greenhouse gas and its stable isotope emission flux[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013.
- [10] Desai A R, Bolstad P V, Cook B D, et al. Comparing net ecosystem exchange of carbon dioxide between an old-growth and mature forest in the upper Midwest, USA[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 128(1/2): 33-55.
- [11] Motto-Ros V, Durand M, Morville J. Extensive characterization of the optical feedback cavity enhanced absorption spectroscopy (OF-CEAS) technique: ringdown-time calibration of the absorption scale[J]. *Applied Physics B*, 2008, 91(1): 203-211.
- [12] Christiansen J R, Outhwaite J, Smukler S M. Comparison of  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  soil-atmosphere exchange measured in static chambers with cavity ring-down spectroscopy and gas chromatography[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 211/212: 48-57.
- [13] Gangopadhyay P K, van der Meer F, van Dijk P. Detecting anomalous  $\text{CO}_2$  flux using space borne spectroscopy[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2009, 11(1): 1-7.
- [14] Hase F, Hannigan J W, Coffey M T, et al. Intercomparison of retrieval codes used for the analysis of high-resolution, ground-based FTIR measurements[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2004, 87(1): 25-52.
- [15] Green R O, Eastwood M L, Sarture C M, et al. Imaging spectroscopy and the airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 65(3): 227-248.
- [16] Burrows J P, Hölzle E, Goede A P H, et al. SCIAMACHY: scanning imaging absorption spectrometer for atmospheric chartography[J]. *Acta Astronautica*, 1995, 35(7): 445-451.
- [17] Kaufmann H, Förster S, Wulf H, et al. Science plan of the environmental mapping and analysis program (EnMAP)[J]. *GFZ Data Services*, 2012: 1-60.
- [18] Chambers P, Austin E A D, Dakin J P. Theoretical analysis of a methane gas detection system, using the complementary source modulation method of correlation spectroscopy[J]. *Measurement Science and Technology*, 2004, 15(8): 1629-1636.
- [19] 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.
- [20] Xia H H, Kan R F. Present situation and development trend of greenhouse gas monitoring technology[J]. *China Environmental Protection Industry*, 2022(9): 56-61.
- [20] 李明星, 许振宇, 阚瑞峰, 等. 用于涡动相关法的激光气体分析仪的研制[J]. *中国激光*, 2021, 48(11): 1111001.
- [21] Li M X, Xu Z Y, Kan R F, et al. Development of laser gas analyzer for eddy correlation method[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(11): 1111001.
- [21] Yu S F, Zhang Z, Xia H Y, et al. Photon-counting distributed free-space spectroscopy[J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10: 212.
- [22] Hamperl J, Dherbecourt J B, Totems J, et al. Preliminary range-resolved detection of stable water isotopologues by differential absorption lidar using a 2  $\mu\text{m}$  parametric source[C]// *Optica High-brightness Sources and Light-driven Interactions Congress 2022*, March 21-25, 2022, Budapest. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2022: MF3C.3.
- [23] Zhang F, Liu F B, Ma X, et al. Greenhouse gas emissions from vegetables production in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 317: 128449.
- [24] 张旭东, 彭镇华, 漆良华, 等. 生态系统通量研究进展[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(10): 1976-1982.
- [25] Zhang X D, Peng Z H, Qi L H, et al. Research advances in ecosystem flux[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(10): 1976-1982.
- [25] Denmead O T. Approaches to measuring fluxes of methane and nitrous oxide between landscapes and the atmosphere[J]. *Plant and Soil*, 2008, 309(1): 5-24.
- [26] Dalal R C, Wang W J, Robertson G P, et al. Nitrous oxide emission from Australian agricultural lands and mitigation options: a review[J]. *Soil Research*, 2003, 41(2): 165-195.
- [27] Grainger C, Clarke T, McGinn S M, et al. Methane emissions from dairy cows measured using the sulfur hexafluoride ( $\text{SF}_6$ )

- tracer and chamber techniques[J]. *Journal of Dairy Science*, 2007, 90(6): 2755-2766.
- [28] Laubach J, Kelliher F M. Measuring methane emission rates of a dairy cow herd by two micrometeorological techniques[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 125(3/4): 279-303.
- [29] Griffis T J, Zhang J, Baker J M, et al. Determining carbon isotope signatures from micrometeorological measurements: implications for studying biosphere-atmosphere exchange processes[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2007, 123(2): 295-316.
- [30] Leuning R. Measurements of trace gas fluxes in the atmosphere using eddy covariance: WPL corrections revisited[M]//Lee X H, Massman W, Law B. *Handbook of micrometeorology*. Atmospheric and oceanographic sciences library. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2006, 29: 119-132.
- [31] 陈琦, 秦凯, 陆亚萍. 基于涡度相关技术的徐州市城郊 CO<sub>2</sub> 通量特征研究[J]. *地理与地理信息科学*, 2020, 36(4): 85-93.  
Chen Q, Qin K, Lu Y P. Study on the characteristics of CO<sub>2</sub> fluxes on the outskirts of Xuzhou based on eddy covariance technique[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2020, 36(4): 85-93.
- [32] 严燕儿, 赵斌, 郭海强, 等. 生态系统碳通量估算中耦合涡度协方差与遥感技术研究进展[J]. *地球科学进展*, 2008, 23(8): 884-894.  
Yan Y E, Zhao B, Guo H Q, et al. On the coupling between eddy covariance and remote sensing techniques in ecosystem carbon flux estimation[J]. *Advances in Earth Science*, 2008, 23(8): 884-894.
- [33] Baldocchi D, Falge E, Gu L H, et al. FLUXNET: a new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2001, 82(11): 2415-2434.
- [34] Aubinet M. Eddy covariance CO<sub>2</sub> flux measurements in nocturnal conditions: an analysis of the problem[J]. *Ecological Applications*, 2008, 18(6): 1368-1378.
- [35] Massman W J, Lee X. Eddy covariance flux corrections and uncertainties in long-term studies of carbon and energy exchanges[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113(1/2/3/4): 121-144.
- [36] Gibert F, Schmidt M, Cuesta J, et al. Retrieval of average CO<sub>2</sub> fluxes by combining *in situ* CO<sub>2</sub> measurements and backscatter lidar information[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, 112(D10): D10301.
- [37] Denmead O T, Raupach M R, Dunin F X, et al. Boundary layer budgets for regional estimates of scalar fluxes[J]. *Global Change Biology*, 1996, 2(3): 255-264.
- [38] Shi T Q, Han G, Ma X, et al. Quantifying CO<sub>2</sub> uptakes over oceans using LIDAR: a tentative experiment in Bohai Bay[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(9): e2020GL091160.
- [39] Helliker B R, Berry J A, Betts A K, et al. Estimates of net CO<sub>2</sub> flux by application of equilibrium boundary layer concepts to CO<sub>2</sub> and water vapor measurements from a tall tower[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2004, 109(D20): D20106.
- [40] Dang X R, Lai C T, Hollinger D Y, et al. Combining tower mixing ratio and community model data to estimate regional-scale net ecosystem carbon exchange by boundary layer inversion over four flux towers in the United States[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2011, 116(G3): G03036.
- [41] Thompson R L, Patra P K, Chevallier F, et al. Top-down assessment of the Asian carbon budget since the mid 1990s[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 10724.
- [42] Peylin P, Law R M, Gurney K R, et al. Global atmospheric carbon budget: results from an ensemble of atmospheric CO<sub>2</sub> inversions[J]. *Biogeosciences*, 2013, 10(10): 6699-6720.
- [43] Bannister R N. A review of operational methods of variational and ensemble-variational data assimilation[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2017, 143(703): 607-633.
- [44] Liu J J, Fung I, Kalnay E, et al. CO<sub>2</sub> transport uncertainties from the uncertainties in meteorological fields[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(12): L12808.
- [45] Zheng T, French N H F, Baxter M. Development of the WRF-CO<sub>2</sub> 4D-Var assimilation system v1.0[J]. *Geoscientific Model Development*, 2018, 11(5): 1725-1752.
- [46] Liu J J, Fung I, Kalnay E, et al. Simultaneous assimilation of AIRS X<sub>CO<sub>2</sub></sub> and meteorological observations in a carbon climate model with an ensemble Kalman filter[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, 117(D5): D05309.
- [47] Liu J J, Bowman K W, Lee M. Comparison between the Local Ensemble Transform Kalman Filter (LETKF) and 4D-Var in atmospheric CO<sub>2</sub> flux inversion with the Goddard Earth Observing System-Chem model and the observation impact diagnostics from the LETKF[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, 121(21): 13066-13087.
- [48] Kang J S, Kalnay E, Liu J J, et al. "Variable localization" in an ensemble Kalman filter: application to the carbon cycle data assimilation[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2011, 116(D9): D09110.
- [49] Kang J S, Kalnay E, Miyoshi T, et al. Estimation of surface carbon fluxes with an advanced data assimilation methodology [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, 117(D24): D24101.
- [50] Wuerth S M. Development and applications of a carbon-weather data assimilation system[M]. Berkeley: University of California, Berkeley, 2019.
- [51] Flesch T K, Wilson J D, Harper L A, et al. Deducing ground-to-air emissions from observed trace gas concentrations: a field trial[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2004, 43(3): 487-502.
- [52] Sutton O G, Simpson G C. A theory of eddy diffusion in the atmosphere[J]. *Proceedings of the Royal Society of London Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 1932, 135(826): 143-165.
- [53] Krings T, Gerilowski K, Buchwitz M, et al. MAMAP: a new spectrometer system for column-averaged methane and carbon dioxide observations from aircraft: retrieval algorithm and first inversions for point source emission rates[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2011, 4(9): 1735-1758.
- [54] Varon D J, Jacob D J, McKeever J, et al. Quantifying methane point sources from fine-scale satellite observations of atmospheric methane plumes[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2018, 11(10): 5673-5686.
- [55] Jacob D J, Turner A J, Maasackers J D, et al. Satellite observations of atmospheric methane and their value for quantifying methane emissions[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, 16(22): 14371-14396.
- [56] Tratt D M, Buckland K N, Hall J L, et al. Airborne visualization and quantification of discrete methane sources in the environment[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 154: 74-88.
- [57] Tratt D M, Young S J, Lynch D K, et al. Remotely sensed ammonia emission from fumarolic vents associated with a hydrothermally active fault in the Salton Sea Geothermal Field, California[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2011, 116(D21): D21308.
- [58] Krings T, Gerilowski K, Buchwitz M, et al. Quantification of methane emission rates from coal mine ventilation shafts using airborne remote sensing data[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, 6(1): 151-166.
- [59] Quei er M, Granieri D, Burton M. A new frontier in CO<sub>2</sub> flux measurements using a highly portable DIAL laser system[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 33834.
- [60] Frankenberg C, Thorpe A K, Thompson D R, et al. Airborne methane remote measurements reveal heavy-tail flux distribution in Four Corners region[J]. *Proceedings of the National Academy*

- of Sciences of the United States of America, 2016, 113(35): 9734-9739.
- [61] Yue B, Yu S F, Li M Y, et al. Local-scale horizontal CO<sub>2</sub> flux estimation incorporating differential absorption lidar and coherent Doppler wind lidar[J]. Remote Sensing, 2022, 14(20): 5150.
- [62] 于贵瑞, 伏玉玲, 孙晓敏, 等. 中国陆地生态系统通量观测研究网络(ChinaFLUX)的研究进展及其发展思路[J]. 中国科学.D 辑: 地球科学, 2006, 36(S1): 1-21.  
Yu G R, Fu Y L, Sun X M, et al. Research progress and development ideas of China terrestrial ecosystem flux observation research network (ChinaFLUX)[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2006, 36(S1): 1-21.
- [63] Lees K J, Quaife T, Artz R R E, et al. Potential for using remote sensing to estimate carbon fluxes across northern peatlands-A review[J]. Science of the Total Environment, 2018, 615: 857-874.
- [64] 于贵瑞, 张雷明, 孙晓敏. 中国陆地生态系统通量观测研究网络(ChinaFLUX)的主要进展及发展展望[J]. 地理科学进展, 2014, 33(7): 903-917.  
Yu G R, Zhang L M, Sun X M. Progresses and prospects of Chinese terrestrial ecosystem flux observation and research network (ChinaFLUX)[J]. Progress in Geography, 2014, 33(7): 903-917.
- [65] Gibert F, Koch G J, Beyon J Y, et al. Can CO<sub>2</sub> turbulent flux be measured by lidar? A preliminary study[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2011, 28(3): 365-377.
- [66] Prince S D, Goward S N. Global primary production: a remote sensing approach[J]. Journal of Biogeography, 1995, 22(4/5): 815-835.
- [67] Nakajima M, Suto H, Yotsumoto K, et al. Fourier transform spectrometer on GOSAT and GOSAT-2[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10563: 105634O.
- [68] Crisp D. Measuring atmospheric carbon dioxide from space with the Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2)[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9607: 960702.
- [69] Crisp D, Pollock H R, Rosenberg R, et al. The on-orbit performance of the Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) instrument and its radiometrically calibrated products[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2017, 10(1): 59-81.
- [70] Eldering A, Taylor T E, O'Dell C W, et al. The OCO-3 mission: measurement objectives and expected performance based on 1 year of simulated data[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2019, 12(4): 2341-2370.
- [71] Taylor T E, Eldering A, Merrelli A, et al. OCO-3 early mission operations and initial (vEarly) X<sub>CO<sub>2</sub></sub> and SIF retrievals[J]. Remote Sensing of Environment, 2020, 251: 112032.
- [72] 吴时超, 王先华, 叶函函, 等. 应用于 GF-5 卫星的大气 CO<sub>2</sub> 协同反演算法[J]. 光学学报, 2021, 41(15): 1501002.  
Wu S C, Wang X H, Ye H H, et al. Atmospheric CO<sub>2</sub> cooperative inversion algorithm applied to GF-5 satellite[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(15): 1501002.
- [73] Buchwitz M, Rozanov V V, Burrows J P. A correlated-k distribution scheme for overlapping gases suitable for retrieval of atmospheric constituents from moderate resolution radiance measurements in the visible/near-infrared spectral region[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2000, 105 (D12): 15247-15261.
- [74] Wang J, Feng L, Palmer P I, et al. Large Chinese land carbon sink estimated from atmospheric carbon dioxide data[J]. Nature, 2020, 586(7831): 720-723.
- [75] Yang D X, Liu Y, Feng L, et al. The first global carbon dioxide flux map derived from TanSat measurements[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2021, 38(9): 1433-1443.
- [76] Wang R W, Xie P H, Xu J, et al. Novel infrared differential optical absorption spectroscopy remote sensing system to measure carbon dioxide emission[J]. Chinese Physics B, 2019, 28(1): 013301.
- [77] Bovensmann H, Buchwitz M, Burrows J P, et al. A remote sensing technique for global monitoring of power plant CO<sub>2</sub> emissions from space and related applications[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2010, 3(4): 781-811.
- [78] Nassar R, Hill T G, McLinden C A, et al. Quantifying CO<sub>2</sub> emissions from individual power plants from space[J]. Geophysical Research Letters, 2017, 44(19): 10045-10053.
- [79] Zheng T, Nassar R, Baxter M. Estimating power plant CO<sub>2</sub> emission using OCO-2 X<sub>CO<sub>2</sub></sub> and high resolution WRF-Chem simulations[J]. Environmental Research Letters, 2019, 14(8): 085001.
- [80] Brunner D, Kuhlmann G, Marshall J, et al. Accounting for the vertical distribution of emissions in atmospheric CO<sub>2</sub> simulations [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2019, 19(7): 4541-4559.
- [81] Hu Y Q, Shi Y S. Estimating CO<sub>2</sub> emissions from large scale coal-fired power plants using OCO-2 observations and emission inventories[J]. Atmosphere, 2021, 12(7): 811.
- [82] Jia M W, Li F, Zhang Y Z, et al. The Nord Stream pipeline gas leaks released approximately 220,000 tonnes of methane into the atmosphere[J]. Environmental Science and Ecotechnology, 2022, 12: 100210.
- [83] Reuter M, Buchwitz M, Schneising O, et al. Towards monitoring localized CO<sub>2</sub> emissions from space: co-located regional CO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub> enhancements observed by the OCO-2 and S5P satellites[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2019, 19(14): 9371-9383.
- [84] Kuhlmann G, Broquet G, Marshall J, et al. Detectability of CO<sub>2</sub> emission plumes of cities and power plants with the Copernicus Anthropogenic CO<sub>2</sub> Monitoring (CO2M) mission[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2019, 12(12): 6695-6719.
- [85] Liu F, Duncan B N, Krotkov N A, et al. A methodology to constrain carbon dioxide emissions from coal-fired power plants using satellite observations of co-emitted nitrogen dioxide[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2020, 20(1): 99-116.
- [86] Dupuy E, Morino I, Deutscher N, et al. Comparison of X<sub>HO<sub>2</sub></sub> retrieved from GOSAT short-wavelength infrared spectra with observations from the TCCON network[J]. Remote Sensing, 2016, 8(5): 414.
- [87] Liu Y, Wang J, Yao L, et al. The TanSat mission: preliminary global observations[J]. Science Bulletin, 2018, 63(18): 1200-1207.
- [88] Chevallier F, Palmer P I, Feng L, et al. Toward robust and consistent regional CO<sub>2</sub> flux estimates from *in situ* and spaceborne measurements of atmospheric CO<sub>2</sub>[J]. Geophysical Research Letters, 2014, 41(3): 1065-1070.
- [89] Janssens-Maenhout G, Pinty B, Dowell M, et al. Toward an operational anthropogenic CO<sub>2</sub> emissions monitoring and verification support capacity[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2020, 101(8): E1439-E1451.
- [90] Gu M S, Chen J J, Mei J X, et al. Open-path anti-pollution multi-pass cell-based TDLAS sensor for the online measurement of atmospheric H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> fluxes[J]. Optics Express, 2022, 30(24): 43961-43972.
- [91] Robinson R A, Gardiner T D, Innocenti F, et al. First measurements of a carbon dioxide plume from an industrial source using a ground based mobile differential absorption lidar [J]. Environmental Science: Processes & Impacts, 2014, 16(8): 1957-1966.
- [92] 陈良富, 张莹, 邹铭敏, 等. 大气 CO<sub>2</sub> 浓度卫星遥感进展[J]. 遥感学报, 2015, 19(1): 1-11.  
Chen L F, Zhang Y, Zou M M, et al. Overview of atmospheric CO<sub>2</sub> remote sensing from space[J]. Journal of Remote Sensing, 2015, 19(1): 1-11.
- [93] Abshire J B, Iiris H, Allan G R, et al. Measuring atmospheric

- CO<sub>2</sub> for the NASA ascends mission: the CO<sub>2</sub> laser sounder approach[C]//2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, July 22-27, 2012, Munich, Germany. New York: IEEE Press, 2012: 5665-5668.
- [94] Abshire J B, Riris H, Allan G R, et al. A lidar approach to measure CO<sub>2</sub> concentrations from space for the ASCENDS Mission[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7832: 78320D.
- [95] Sun X L, Kolbeck P T, Abshire J B, et al. Attenuated atmospheric backscatter profiles measured by the CO<sub>2</sub> Sounder lidar in the 2017 ASCENDS/ABOVE airborne campaign[J]. Earth System Science Data, 2022, 14(8): 3821-3833.
- [96] Caron J, Durand Y, Bezy J L, et al. Performance modeling for A-SCOPE: a space-borne lidar measuring atmospheric CO<sub>2</sub>[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7479: 74790E.
- [97] Amediek A, Fix A, Ehret G, et al. Airborne lidar reflectance measurements at 1.57 μm in support of the A-SCOPE mission for atmospheric CO<sub>2</sub>[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2009, 2(2): 755-772.
- [98] Pierangelo C, Millet B, Esteve F, et al. MERLIN (methane remote sensing lidar mission): an overview[J]. EPJ Web of Conferences, 2016, 119: 26001.
- [99] Ehret G, Bousquet P, Pierangelo C, et al. MERLIN: a French-German space lidar mission dedicated to atmospheric methane [J]. Remote Sensing, 2017, 9(10): 1052.
- [100] Zhang H Y, Han G, Ma X, et al. Robust algorithm for precise X<sub>CO<sub>2</sub></sub> retrieval using single observation of IPDA LIDAR[J]. Optics Express, 2023, 31(7): 11846-11863.

## Measurement Methods and Progress of Greenhouse Gas Flux

Yue Bin<sup>1</sup>, Yu Saifen<sup>2</sup>, Dong Jingjing<sup>2</sup>, Wei Tianwen<sup>2</sup>, Yuan Jinlong<sup>2</sup>, Zhang Zhen<sup>2</sup>,  
Tang Dawei<sup>1</sup>, Xia Haiyun<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China;

<sup>2</sup>School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, Jiangsu, China

### Abstract

**Significance** Anthropogenic greenhouse gas emissions represented by carbon dioxide and methane are an important driving force of global warming in the last century. The key to controlling global warming is to control greenhouse gas emissions. Carbon dioxide is an important greenhouse gas. Research and development of scientific carbon dioxide emission monitoring technology and scientific identification of regional carbon dioxide emission and absorption are of great significance to serving our country's carbon emission policies at different stages.

**Progress** Traditional inventory methods calculate the total carbon emissions by counting the energy consumed by each emission source. Since statistics and emission factors cannot be updated quickly, it is difficult for these methods to capture the dynamic changes in emission sources. Flux data based on concentration measurement is updated frequently, and the measurement data is objective, which can provide a more accurate basis for greenhouse gas emissions and traceability. In recent decades, various methods have been proposed to measure fluxes based on concentration measurement. The measurement methods for the terrestrial biosphere flux include the chamber method, micrometeorology method, equilibrium boundary layer concepts, and inverse system for space-borne platforms. The measurement methods for the point sources flux contain the inverse diffusion technology represented by the Gaussian plume model, source pixel method, cross-sectional flux method, integrated mass enhancement method, Gaussian vector integral method, and horizontal net flux measurement method.

The ground-based *in-situ* measurement technology represented by the flux tower features high measurement accuracy and strong time continuity and plays a vital role in the flux detection of forests, farmland, and other earth ecosystems. However, since the measurement area of the flux tower usually does not exceed 1 km<sup>2</sup>, it is difficult to quantitatively understand the sources and sinks of greenhouse gases on a global scale due to the sparseness of the sites and limited representation distance.

Satellite remote sensing data can obtain the global spatial distribution and changes of greenhouse gases with fast inversion speed, which can make up for the shortage of ground base stations. At present, satellite remote sensing can detect greenhouse gas emissions from the earth's ecosystems and point sources. Many countries and teams have inverted the greenhouse gas fluxes of global ecosystems based on satellite remote sensing. In 2021, the Chinese Institute estimated the global CO<sub>2</sub> flux distribution based on the TanSat satellite, and the results are in good agreement with other satellites such as Japan's GOSAT and the US's OCO-2. There are also a number of studies that capture CO<sub>2</sub> fluxes from terrestrial power plants through satellite measurements. However, satellite remote sensing still has many limitations in accuracy, resolution, and data coverage. The atmospheric chemical transport model can simulate the three-dimensional gas

concentration field of the atmosphere, but due to the incomplete transport model and meteorological field, and uncertain initial field and emission sources, the obtained three-dimensional distribution of gas concentration deviates from the actual situation, and it needs to be combined with the actual situation. The observed data is further corrected to improve accuracy.

Lidar technology is characterized by long detection distance, high spatial-temporal resolution, and all-day detection. Active remote sensing is an important direction for the development of satellite remote sensing. However, current satellite active remote sensing is mainly based on the path integration technology IPDA and can only obtain the concentration of the entire atmospheric column, thus making it difficult to accurately invert the vertical distribution of point source emissions and affecting the inversion effect of point source emission flux. The ground-based differential absorption lidar DIAL can obtain distance-resolved gas concentration distribution and simultaneously detect atmospheric wind field data with high precision. Although its coverage is not as good as that of satellites, it is wider than that of a single station. It is an effective means for local area gas flux monitoring.

**Conclusions and Prospects** Although the measurement methods of greenhouse gas fluxes are becoming increasingly more abundant, the spatial-temporal resolution, data coverage, and measurement accuracy of the existing methods for the concentration distribution and emission flux of greenhouse gases are still very limited. In the future, greenhouse gas flux measurement technology can be further developed in several directions. Measurement data from satellites, and ground-based and airborne platforms is assimilated to obtain higher-precision three-dimensional distribution of greenhouse gas fluxes, the mechanism of greenhouse gas sources and sinks is analyzed, and natural and anthropogenic carbon emissions are identified. In addition, we develop a greenhouse gas assimilation forecast system and build accurate greenhouse gas source-sink models and inversion models at different scales. As a result, global high spatial-temporal resolution remote sensing is realized through satellite networking to form a global quality-uniform and continuous greenhouse gas observation dataset, and observe the greenhouse gas concentration and spatial-temporal changes of sources and sinks in an all-round way. Collaborative monitoring technologies for greenhouse gases and pollutants are also developed.

**Key words** remote sensing; greenhouse gas flux; biosphere flux; anthropogenic emissions