

# 温室气体的卫星遥感—进展与趋势

刘毅<sup>1,2,3</sup>, 王婧<sup>1,2</sup>, 车轲<sup>1,2</sup>, 蔡兆男<sup>1</sup>, 杨东旭<sup>1,3</sup>, 吴林<sup>4</sup>

1. 中国科学院大气物理研究所 中层大气与全球环境探测重点实验室, 北京 100029;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院上海高等研究院, 上海 201210;

4. 中国科学院大气物理研究所 大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029

**摘要:** 二氧化碳和甲烷减排是控制全球增温最核心的手段, 传统的人为碳排放计算主要依赖于在线监测和清单算法, 2019年第49届IPCC全会明确了利用大气观测通过“自上而下”通量计算对排放清单进行支撑和验证, 因此了解大气遥感碳监测发展趋势以及同化反演技术方法成为了中国应对国际气候变化事务亟待探明的重要问题。根据卫星遥感技术发展进程和监测需求, 将碳监测遥感的发展划分为3个阶段(1999年—2008年, 2009年—2019年, 2019年—), 前两个阶段和第三阶段对应卫星分别为第一代和第二代温室气体监测卫星。本文在分析日本、美国、欧洲和中国第一代段碳监测卫星遥感探测技术发展进程的基础上, 重点介绍了第二代卫星遥感探测技术的创新及其在探测精度、分辨率和覆盖率等方面提升。为了满足全球和区域人为碳排放监测的重大需求, 需要优化反演算法提高精度、科学规划卫星的组网观测提升监测效率。同时也进一步阐述了如何依据组网观测的全球高精度、高时空分辨率的卫星数据, 利用“自上而下”数据同化方法获得独立源汇信息来补充和验证清单。最后, 指出了卫星高光谱遥感和新一代碳监测卫星的未来发展趋势及估算人为碳排放的潜力。

**关键词:** 卫星遥感, 温室气体, 碳源汇, MRV, 卫星组网

**引用格式:** 刘毅, 王婧, 车轲, 蔡兆男, 杨东旭, 吴林. 2021. 温室气体的卫星遥感—进展与趋势. 遥感学报, 25(1): 53–64

Liu Y, Wang J, Che K, Cai Z N, Yang D X and Wu L. 2021. Satellite remote sensing of greenhouse gases: Progress and trends. National Remote Sensing Bulletin, 25(1): 53–64 [DOI: 10.11834/jrs.20210081]

## 1 引言

自工业革命以来, 人类排放的二氧化碳(CO<sub>2</sub>)、甲烷(CH<sub>4</sub>)等温室气体是导致全球变暖的重要因素, 其中CO<sub>2</sub>和CH<sub>4</sub>是最重要的温室气体, 因此控制人为碳排放是减缓全球增温最核心的手段。2015年巴黎气候变化大会确立了国家自主贡献INDC(Intended Nationally Determined Contributions)机制, 要求各缔约方参考各国国情以“自下而上”的方式提出应对气候变化的减排目标(陈艺丹等, 2018)。《巴黎协定》建议利用可监测、可报告、可核查的“三可”MRV(Measurement, Reporting and Verification)方法体系, 建立一个透明的框架来监测能源和化石燃料密集型的国家的排放变化。当前的MRV方法体系

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。因此, 2019年第49届IPCC全会上通过了对2006年IPCC国家清单指南的改进方案(IPCC, 2019), 明确增加了采用基于大气浓度, 结合“自上而下”(即大气反演)方法, 验证排放清单的内容。

利用同化反演模式计算估算碳源汇, 需要结合地基观测和卫星观测数据。传统的地基网络观测数据具有较高的精度, 但空间分辨率不足, 海洋、沙漠以及赤道区域也缺乏足够的观测信息, 因此从中很难获取全球区域范围内温室气体的源汇分布信息。卫星观测可以在较高的空间分辨率上实现全球观测, 为碳监测研究、全球碳循环、气候变化和温室气体减排提供重要的科学观测数据。2016年新德里宣言强调了星载大气碳监测可

收稿日期: 2020-04-02; 预印本: 2020-10-09

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(编号: XDA17010102); 中国科学院重点部署项目(编号: ZDRW-ZS-2019-1)

第一作者简介: 刘毅, 1961年生, 男, 研究员, 研究方向为大气遥感和中层大气过程研究。E-mail: liuyi@mail.iap.ac.cn

通信作者简介: 王婧, 1987年生, 女, 博士后, 研究方向为碳同化反演计算。E-mail: jingwang@mail.iap.ac.cn

作为估算 INDC 的补充系统, 国际卫星对地观测委员会明确提出在 2025 年形成星座业务化运行, 支撑 2028 年全球碳盘点。将卫星遥感碳监测方法与技术体系应用于 MRV、MVS 的理论、方法、技术成为中国应对国际气候变化事务亟待探明的重要问题。

利用卫星遥感数据监测人为碳排放, 为国家排放清单进行验证补充, 对卫星观测是一项重要的挑战和任务, 需要高精度与时空分辨率的卫星观测数据, 多个卫星遥感技术强国的卫星团队都在积极备战。自 2009 年日本 GOSAT (The Greenhouse gases Observing Satellite) 卫星发射成功且观测数据被广泛用来进行全球碳源汇计算, 碳监测卫星技术及应用已经有了一系列的发展和改进。本文根据碳监测卫星技术发展进程—成熟程度、探测精度、探测效率和应用需求牵引, 首次提出了第一代和第二代碳监测卫星概念, 在介绍日本、美国、欧洲和中国第一代碳监测卫星技术特征的基础上, 论述了第二代碳监测卫星的技术创新及其在探测精度、分辨率和覆盖率方面的提升; 在单颗卫星探测技术革新的基础上, 为了获得能够监测区域人为源的观测数据集, 还需要遥感反演算法的改进并开展卫星组网观测; 论述了如何利用“自上而下”的反演方法进行碳源汇监测, 最后总结展望了卫星高光谱遥感和新一代碳监测卫星的发展趋势和潜力。

## 2 星载碳监测技术

碳监测卫星的重要目的在于监测碳源汇动态分布, 因此对近地面更敏感的短波红外波段更适合用于地面碳源汇动态变化的监测。搭载于 ENVISAT (ENVironmental SATellite) 卫星上的 SCIAMACHY (SCanning Imaging Absorption spectrometer for Atmospheric Cartography) 探测器, 是首个采用短波红外吸收带作为探测波段的星载探测器, 受制于光谱分辨率和信噪比, 探测精度低 (14 ppm), 难以满足需求。日本 2009 年发射的 GOSAT、美国 2014 年发射的 OCO-2 (Orbiting Carbon Observatory-2)、中国 2017 年发射的中国碳卫星 (TanSat) 等多颗碳监测卫星沿用这种探测波段, 随着探测器指标和反演方法的不断改进, 探

测精度逐步提高。为了深入论述碳监测卫星技术发展过程与趋势, 本文根据卫星遥感技术进步程度和碳监测应用需求将碳监测技术发展划分为 3 个阶段: 准备阶段 (1999 年—2008 年)、快速发展阶段 (2009 年—2018 年) 以及监测应用阶段 (2019 年—今)。本文将准备阶段和快速发展阶段的卫星称为第一代卫星, 监测应用阶段的卫星称为第二代卫星。第一代卫星从技术与方法角度, 实现了从无到有的突破, 主要突破卫星遥感监测的关键技术、高精度反演方法和通量计算方法, 但是总体探测效率较低; 从应用需求角度, 第一代卫星数据以科学探索和小范围、强排放监测为主, 难以满足全球和区域碳监测需求; 从时间进程, 第一代主要从 1999 年—2018 年, 属于打基础的二十年 (表 1、2), 第二代卫星从 2019 年—2028 年进入快速发展和应用的十年, 从 2019 年 IPCC 会议开始强调大气监测支撑清单编制的作用到 2028 年首次进入全球碳盘点应用阶段。为了提高观测精度和数据时空分辨率, 对第一代碳监测卫星在探测原理、探测波段、探测器定标等方面进行了多种尝试, 使得探测精度不断改进和优化, 获得了近 10 年的科学数据和初步的研究成果, 但第一代碳监测卫星主要以技术验证和科学目标探索为主, 基本采用被动遥感探测仪和窄幅观测的极轨轨道卫星, 主要目的在于获得高精度的遥感数据。为了满足监测区域碳源汇的需求, 第二代温室气体监测卫星主要提高观测的空间和时间分辨率, 例如增加刈幅宽度增加跨轨方向的观测数据数量 ( $\geq 200$  km)、或者利用地球静止轨道增加观测频率和数据覆盖率, 大幅提升观测效率; 此外还可以通过采用主动激光探测器获得更高精度 (0.5 ppm) 不受日照影响的廓线数据等。由于不同国家研制卫星的体制和途径不同, 发射时间不同, 也有一些卫星介于第一代和第二代之间。

### 2.1 第一代温室气体监测卫星

自 2002 年欧洲空间局 ENVISAT 卫星发射成功, 至今已有多颗碳源汇监测卫星成功发射 (仪器参数见表 1)。第一代卫星侧重探测精度方面的提高, 主要将 XCO<sub>2</sub> 误差范围从最初的 14 ppm 降低到 1.5 ppm, 使得利用卫星观测数据进行全球尺度碳源汇监测逐步进入了应用阶段。

表1 第一代碳监测卫星参数  
Table 1 Parameter description of first generation carbon monitoring satellites

卫星	SCIA-MACHY	GOSAT	OCO-2	TanSat	FY-3 D	GF-5	GOSAT-2	OCO-3	MicroCarb
发射时间	2002.3	2009.1	2014.7	2016.12	2017.11	2018.5	2018.10	2019.5	2021
当地时	10:00	13:00 ± 0.15	13:30 ± 0.15	13:30	14:00	13:30	13:00±15	—	10:30
轨道高度/ km	790	666	705	708	836	705	613	400	649
倾角/(°)	98.5	98.0	98.2	98.07	98.75	98.2	97.8	51.6	98
星下点分辨率 (d:直径)	30×60	10.5 km(d)	1.29×2.25 km <sup>2</sup>	2×2 km <sup>2</sup>	10 km(d)	10.3 km(d)	9.7 km(d)	4 km <sup>2</sup>	4.5×9 km <sup>2</sup>
幅宽/km	960	790	10.6	18	2250	1850	903	11	13.5
回访周期/d	35	3	16	16	6	2	3	—	21
搭载探测器	8通道光栅 光谱仪	TANSO—FTS, TANSO—CAI	3通道光栅 光谱仪	ACGS, CAPI	GAS, FTS	GMI	TANSO— FTS2 TANSO— CAI2	3通道光栅 光谱仪	小型光栅 光谱仪
波长带宽/ μm	0.24—0.44 0.4—1.0 1.0—1.7 1.94—2.04 2.265—2.38	0.76—0.78; 1.56—1.72; 1.92—2.08; 5.56—14.30	0.76—0.77; 1.59—1.62; 2.04—2.08;	0.76—0.77; 1.59—1.62; 2.04—2.08;	0.75—0.77 1.56—1.72 1.92—2.08 2.20—2.38	0.76—0.77 1.57—1.58 1.64—1.66 2.04—2.06	0.75—0.77; 1.56—1.69; 1.92—2.38; 5.6—14.30	0.76—0.77; 1.59—1.60; 2.04—2.08;	0.76—0.77; 1.26—1.28 1.60—1.62; 2.04—2.08;
信噪比	<100@1.57	300@0.75—0.77 300@1.56—1.72 300@1.92—2.08 300@5.5—14.3	>300@1.60 >240@2.06	360@0.76 250@1.60 180@2.06	320@0.76 260— 300@1.61 160— 300@2.0 140— 300@2.3	300@0.76 300@1.58 250@1.65 250@2.05	400@0.75— 0.77 300@1.56— 1.69 300@1.92— 2.33 300@5.5— 8.4 300@8.4— 14.3	—	—
观测方式	临边,天底	天底, 耀斑, 目标	天底, 耀斑, 目标	天底, 耀斑, 目标	天底, 耀斑, 目标	天底, 耀斑, 掩星	天底, 耀斑, 目标	天底, 耀斑, 目标	天底, 耀斑, 目标
气体观测 目标	O <sub>3</sub> , O <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O, NO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , CO, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, SO <sub>2</sub> , HCHO	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , O <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , CO, N <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> NO <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> 大气气溶胶	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , O <sub>3</sub> , O <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> O, CO, 黑碳, PM2.5	CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>

注: 表中FY-3 D以及GF-5仅列出短波CO<sub>2</sub>相关的探测器和波段。

GOSAT和GOSAT-2主要携带TANSO (Thermal And Near-infrared Sensor for carbon Observation) 和TANSO-2探测器, TANSO由傅里叶变换光谱仪(FTS)以及云与气溶胶成像仪(CAI)构成, 其中TANSO-CAI主要用来订正云和气溶胶信息。GOSAT-2搭载的TANSO-FTS-2和TANSO-CAI-2都是前一代TANSO的升级版(表1), 使用更大的光学元件, 更灵敏的探测器和读数仪表, 具有更高的信噪比, 计划得到在500×500 km<sup>2</sup>区域范围内

月均XCO<sub>2</sub>的随机误差不超过0.125% (0.5 ppm), XCH<sub>4</sub>不超过0.25% (5 ppb)的观测数据。TANSO-FTS-2还新增了智能指向控制程序(Nakajima等, 2017), 使仪器自动指向视场中的无云区域, 这项新技术可以将GOSAT-2的有效数据量提升一倍。FTS-2信噪比的提升和沿轨指向角的增加使每日的耀斑观测有效数据可以达到原来的两倍, 有助于GOSAT捕捉海洋上空二氧化碳变化。

表2 第二代碳监测卫星参数

Table 2 Parameters description of the second generation carbon monitoring satellites

卫星	S5P	Sentinel-5	GeoCarb	MERLIN	AEMS	HGMS
发射时间/年	2017	2021	2022	2024	2021	2023
主/被动	被动	被动	被动	主动	主动	主动
轨道种类	极轨	极轨	静止	极轨	极轨	极轨
当地时	13:30	09:30	13:00	06:00/18:00	13:30	10:30
轨道高度/km	824	817	35768	500	705	705
倾角/(°)	98.74	98.7	—	97.4	98.2	98.2
星下点分辨率	7×7 km <sup>2</sup> (SWIR 波段) 7×28 km <sup>2</sup> (UV 1 波段) 7×3.5 km <sup>2</sup> (其他波段)	7×7 km <sup>2</sup>	2.7×5.4 km <sup>2</sup>	0.15×0.15 km <sup>2</sup>	0.35 km	0.35 km
幅宽/km	2600	2715	2800	0.1	0.07	0.07
轨道重复周期/d	16	29	—	28	51	51
搭载探测器	TROPOMI	UVNS	四通道狭缝成像 光栅光谱仪	IPDA 雷达	IPDA 雷达	ACDL
波长带宽/μm	0.27—0.30 0.30—0.32 0.31—0.41 0.41—0.50 0.68—0.73 0.73—0.78 2.31—2.39	0.27—0.30 0.30—0.37 0.37—0.50 0.69—0.71 0.75—0.76 0.76—0.77 1.59—1.67 2.31—2.39	0.65—0.77 1.59—1.62; 2.04—2.08 2.20—2.38	1.64555/1.64585	1.572/1.064/0.532	1.572/1.064/ 0.532
观测方式	天底	天底	天底,目标	天底	天底	天底
观测目标	NO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , SO <sub>2</sub> , HCHO, CH <sub>4</sub> , CO	O <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , HCHO, CO, CH <sub>4</sub> ,气溶胶光 学厚度	CO <sub>2</sub> , CO, CH <sub>4</sub>	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub> ,气溶胶、云	CO <sub>2</sub> ,气溶 胶、云

OCO-2上仅搭载了一台三波段成像光栅式高光谱CO<sub>2</sub>探测器,OCO-2可以利用A-Train系列其他卫星同步获得云和气溶胶的信息(Crisp, 2015)。为了减少偏振效应带来的误差,OCO-2探测器不以传统的推扫结构收集数据,而是采取控制狭缝方向随纬度旋转从而跟踪主平面(由太阳、表面足迹和航天器定义)的方式观测(Crisp等, 2017)。

MicroCarb探测器具备较高的光谱分辨率和信噪比,可结合1.27 μm和0.76 μm两波段的O<sub>2</sub>-A带探测地表气压、干空气质量和大气光学长度(Bertaux等, 2019)。MicroCarb可以获取±200 km幅宽的格点观测或40×40 km<sup>2</sup>的区域连续观测以获得城市的XCO<sub>2</sub>分布,预期单次探测的XCO<sub>2</sub>随机误差在0.5—1 ppm,区域尺度偏差小于0.2 ppm,这有助于未来对超大城市的碳源汇监测。

TanSat由中国科技部,中国科学院和中国气象

局联合研发,并于2016-12-22凌晨在中国酒泉卫星基地发射成功。TanSat以高光谱温室气体探测器(ACGS),云和气溶胶偏振成像仪(CAPI)为主要载荷(Yang等, 2018)。中国科学院大气物理所团队研发了应用于TanSat的全物理高精度反演算法IAPCAS,该算法对GOSAT的反演精度优于1.5 ppm(Liu等, 2018),是中国在碳监测方面取得的重要成果之一。

GF-5上搭载了大气温室气体探测器(GMI-Geenhouse-gases Monitoring Instrument)。GMI的光学系统包括二维扫描镜、望远镜、分色装置和空间外差光谱仪(SHS),这是中国首次应用SHS技术的卫星载荷(熊伟, 2019)。SHS技术结合了FTS和光栅特点,使探测仪器可在窄带光谱范围内获得超高光谱分辨率信息(叶松等, 2007)。

OCO-3的探测器和OCO-2类似,但开始探索除太阳同步轨道以外的观测轨道。NASA于2019年

将OCO-3发射至国际空间站(ISS),并随着ISS在51°S到51°N的低倾角轨道运行,目标在于探测人类排放CO<sub>2</sub>较集中的中纬度地区。OCO-3可以通过ISS上其他协同测量载荷开展同步观测,获取陆地生态系统特征参量。OCO-3可以在不同时间对同一地点进行观测,是可以探测XCO<sub>2</sub>和日光诱导叶绿素荧光(SIF)日变化,研究生物圈碳循环的日变化,因此OCO-3作为第一代向第二代卫星的过渡卫星。

以上这些卫星虽然进行了一系列改进,但是由于整体探测能力限制,仍存在覆盖范围和分辨率之间平衡问题:一些卫星采用离散采样点并加大之间距离增加覆盖率(如GOSAT TANSO-FTS、FY-3 D GAS、GF-5 GMI),另一些卫星采用窄幅(10—25 km)连续像素观测(如OCO-2、TANSAT ACGS、MicroCarb),但是轨道之间存在很大观测空白。被动遥感受日照时间限制,不能开展昼夜循环或冬季高纬度地区观测,同时受云和气溶胶的严重干扰,影响观测效率。这类卫星称为第一代碳源汇监测卫星。

## 2.2 第二代碳监测卫星

第一代卫星将探测精度提高到了水平,但是覆盖范围和分辨率仍存在一些问题,这在进行区域甚至更小尺度碳源汇监测时是不够的。国际大气遥感界开始设计第二代卫星及探测器来解决第一代卫星及探测器存在的弊端,这些仪器(各仪器参数见表2)的探测目标是获取高空间分辨率(2 km×2 km)、高精度(~0.1%/探测)和高准确性(<0.1%)的宽幅(>200 km)XCO<sub>2</sub>和XCH<sub>4</sub>连续观测。

为了解决第一代卫星窄幅观测重访周期长的问题,Sentinel 5 Precursor上搭载的对流层观测仪TROPOMI(TROPospheric Monitoring Instrument)采用了宽幅天底扫描推扫式成像光谱仪,幅宽达2600 km,水平分辨率约为7×7 km<sup>2</sup>。TROPOMI还具备了NO<sub>2</sub>的探测能力,可以同CO一起协助分析人为CO<sub>2</sub>排放分布(Reuter等,2019),为利用卫星数据进行人为CO<sub>2</sub>排放监测提供了重要信息。中国气象局计划部署第二代大气成分探测器(GAS-2),从观测幅宽方面接近第二代卫星,GAS-2成像光栅光谱仪的幅宽达100 km,水平分辨率优于3 km,信噪比为300(Lu,2017),计划搭载于FY-3G并

于2022年完成发射。

第一代卫星采用被动遥感探测,有近90%的数据受到云的干扰(Dupuy等,2016),严重制约卫星探测精度的提升,采用雷达主动探测是解决这一问题的有效方法。MERLIN(Methane Remote Sensing Lidar Mission)是探测CH<sub>4</sub>的激光雷达主动遥感卫星,由德国航天局(DLR)和法国航天局(CNES)联合研制,计划在2024年发射。MERLIN首次使用积分路径差分吸收(IPDA)激光雷达探测XCH<sub>4</sub>的主动探测器,可以开展全球高精度(区域系统性误差<3.7 ppb)探测(Ehret等,2017),预期精度为27 ppb,区域系统误差优于3.7 ppb。主动探测可以有效降低云的影响、增加有效观测次数, MERLIN有望极大地提高我们对全球及区域尺度,尤其是补充对冬季半球高纬度地区和热带多云地区甲烷源汇分布的认识。

中国星载主动激光雷达技术借助于国家的大力投入,采用了超常发展思路,直接进入第二代的研制,可以充分发挥主动探测的优势。大气环境监测卫星AEMS(Atmospheric Environment Monitoring Satellite)采用差分激光雷达IPDA Lidar作为CO<sub>2</sub>探测载荷,计划于2021年发射;主要任务是全天时获得卫星轨迹方向全球大气CO<sub>2</sub>柱浓度分布信息,为CO<sub>2</sub>源和汇的确定提供量化的科学数据;同时通过激光探测沿卫星运动轨迹探测全球大气气溶胶和云的高分辨率垂直剖面,观测大气气溶胶、云的光学特性,研究其在监测空气质量及全球气候变化中的影响及作用,CO<sub>2</sub>柱浓度测量精度达1 ppm。高精度温室气体综合探测卫星HGMS(High-precision Greenhouse gases Monitoring Satellite)是《国家民用空间基础设施中长期发展规划(2015—2025)》中规划的业务星,计划配置5台有效载荷,其中包括气溶胶和碳监测雷达(ACDL),具有主被动方式结合获取高光谱分辨率、高时间分辨率的温室气体、污染气体及气溶胶等大气环境要素遥感监测能力,计划于2024年发射(Han等,2018;Liu等,2019)。NASA继承了OCO-2和OCO-3的成功经验,计划2022年发射第一颗静止轨道高轨卫星探测器“地球静止碳循环观测站”(Geostationary Carbon Cycle Observatory, GeoCarb),开展CO<sub>2</sub>、CO、叶绿素荧光(SIF)的高频次观测(O'Brien等,2016),该星将部署在75°E—100°E, -50°N—50°N,可以进行每天两次

以上的观测,从而可以研究不同天气过程对 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 分布和源汇的影响,并将针对美洲主要的城市和工业区、大型农业区以及广阔的南美热带森林和湿地开展观测。

### 3 高精度遥感数据应用方法

#### 3.1 遥感反演方法进展

国际上从SCIAMACHY卫星数据处理开始研制碳监测卫星遥感反演方法, $\text{CO}_2$ 反演算法主要包括经验算法和物理反演算法两类,物理反演算法中包括最优化算法和差分吸收光谱算法(陈良富等,2015)。国际上主流的碳监测卫星遥感算法主要有:NIES-FP(Yoshida等,2013),ACOS(Crisp等,2012;O'Dell等,2012),UoL-FP(Boesch等,2011),RemoTeC(Wu等,2018),IAPCAS(Liu等,2013)等,在进行质量控制后,目前,这些算法在反演 $\text{XCO}_2$ 和 $\text{XCH}_4$ 时的误差分别为1 ppm(Wunch等,2017;Buchwitz等,2017;Hedelius等,2017;O'Dell等,2018)和6 ppb(Yoshida等,2013;Parker等,2015)。此外,开发识别和纠正区域尺度偏差的先进方法,有助于进一步减少偏差的影响(O'Dell等,2018)。

国内学者从第一代碳监测卫星研制期间自主研发了卫星数据的反演方法,近期在这一领域取得了突破性进展,大气物理所卫星遥感 $\text{CO}_2$ 反演算法(IAPCAS)是大气所团队开发的基于最优估计的全物理温室气体遥感算法(Yang等,2015)。2018年,Yang等(2018)发布TanSat第一张全球 $\text{XCO}_2$ 分布图,利用碳柱浓度观测网络TCCON(The Total Carbon Column Observing Network)站点对这一结果进行了验证,结果显示平均精度为2.11 ppm,达到了TanSat观测目标精度的要求(Liu等,2018)。近期,在对L1B辐射光谱数据进行新的辐射校正后,对比全球20个TCCON站点,TanSat最新反演结果的平均均方根误差(RMSE)为1.47 ppm,平均偏差为-0.08 ppm(Yang等,2020),这使TanSat数据在碳通量应用研究中向前迈进了一步。

尽管目前国内外遥感反演算法取得了这些进步,但为了获得精度、覆盖率、可靠性和计算速度均满足要求的高质量 $\text{CO}_2$ 和 $\text{CH}_4$ 观测数据,遥感反演算法以及所用的正演辐射传输模型仍需要进

一步的改进。例如,使用更准确的先验廓线;降低气体吸收截面的不确定性、减少误差引入;需要更可靠的晴空像素识别方法,并检测和订正附近云的散射或遮蔽对像素的影响;在有化石燃料或生物质烟团情况下,更可靠准确的订正光学薄云和气溶胶的散射对反演的影响。即使处理目前在轨运行的观测数据,高精度反演方法也需求大量快速的计算能力,必须通过提升计算速度来处理未来温室气体星座的海量数据。这些方面都在取得进展,但必须在今后的十年快速发展,从而使得遥感反演算法可以准确分析 $\text{CO}_2/\text{CH}_4$ 星座组网观测的全部信息,从而形成可用于大气通量反演计算的全球产品。

#### 3.2 卫星组网观测

利用卫星数据监测局地源汇信息,卫星探测必须能够监测到与当地源汇变化有关的信息,并将其与大气传输贡献的部分区别开来。这对卫星观测的准确度、精度和分辨率以及覆盖范围有严格的要求。全球气候观测系统GCOS(Global Climate Observing System)2011年提出卫星的观测目标任务为:采样分辨率为5—10 km,时间分辨率为4 h, $\text{CO}_2$ 和 $\text{CH}_4$ 的精度分别为1 ppm和10 ppb,满足这一精度对于区分自然源汇与人为排放至关重要,但是后续研究证明这一精度要求在反演区域尺度的通量时是不够的,Chevallier等(2014)指出,反演区域 $\text{CO}_2$ 通量时,卫星区域系统性误差应小于0.125% (0.5 ppm)。目前,尽管新一代卫星探测能力得到了有效提高,但是任何单独一颗卫星都无法满足 $\text{CO}_2$ 和 $\text{CH}_4$ 全球探测的需求。根据科学目标将多颗卫星组成一个虚拟的卫星星座,开展多颗卫星组网观测是满足快速增长的全球业务化观测的有效途径。组网观测可以形成全球质量统一、连续的温室气体观测数据集,全方位观测温室气体浓度和源汇的时空变化特征。获得满足碳源汇监测的卫星数据集,仅有卫星探测技术的提高以及组网观测还不足,还需要提高卫星 $\text{XCO}_2$ 以及 $\text{XCH}_4$ 反演算法的精度。

##### 3.2.1 低地球轨道(LEO)卫星组网

目前大部分在轨运行的卫星都处于低轨道(LEO)上,如GOSAT,OCO-2,TanSat等。由3颗或3颗以上携带宽波段 $\text{CO}_2$ 和 $\text{CH}_4$ 成像光谱仪的卫

星组成LEO观测网,可提供周间隔的高分辨率观测数据。每颗卫星的光谱成像仪需包含:  $0.765\ \mu\text{m}$ 的 $\text{O}_2\text{-A}$ 带,  $1.61$ 和 $2.06\ \mu\text{m}$ 的 $\text{CO}_2$ 吸收带,  $1.67$ 和 $2.33\ \mu\text{m}$ 的 $\text{CH}_4$ 吸收带,还需包含 $0.43\ \mu\text{m}$ 的 $\text{NO}_2$ 波段和 $2.33\ \mu\text{m}$ 的 $\text{CO}$ 波段以辅助区分自然和人类排放产生的 $\text{CO}_2$ ;  $\text{XCO}_2$ 和 $\text{XCH}_4$ 的探测精度需分别优于 $0.125\%$  ( $0.5\ \text{ppm}$ )和 $0.25\%$  ( $4.5\ \text{ppb}$ )。由3颗LEO星座每天绕地球轨道运行15圈左右可以提供足够时空分辨率和覆盖率的观测数据,实现探测天气尺度上 $\text{XCO}_2$ ,  $\text{XCH}_4$ 变化的目标。同时,低倾角轨道的主动雷达探测器不受日照的限制,可以协助减小被动卫星探测器的系统误差。

### 3.2.2 地球静止轨道(GEO)卫星组网

组合3颗位于 $85^\circ\text{W}$ ,  $20^\circ\text{E}$ 和 $105^\circ\text{E}$ 的地球静止轨道卫星(GEO)可开展南北美洲、欧洲、非洲及东亚地区全天时的碳监测,是对LEO卫星的有效补充。为了达到卫星组网观测要求的采样频率,每个卫星平台上的光谱仪需要达到 $4\text{--}10\ \text{km}^2$ 的空间分辨率,且对目标区域有不大于 $4\ \text{h}$ 间隔的连续观测。高时间分辨率的GEO星系有助于探测化石燃料开采、运输和使用过程产生的 $\text{CO}_2$ 和 $\text{CH}_4$ 。同时对SIF的连续观测,可以探测陆地生物圈吸收二氧化碳的日变化、季节变化和长期变化,进一步可以分析陆地生物系统如何响应由气候变化引起的异常加热和干旱过程。

### 3.2.3 高椭圆轨道(HEO)卫星组网

GEO无法提供高纬地区高质量的观测数据,虽然LEO可以提供高纬地区数据,但也无法提供每隔 $4\ \text{h}$ 一次的昼夜半球数据。为满足北极地区的观测需求,需至少两颗HEO卫星探测仪进行观测。此外,利用HEO和GEO的重叠数据可以开展卫星间的交叉验证。

## 4 通量计算

传统的碳排放估算主要基于源清单和通量方法进行不同尺度外推,即“自下而上”方法,该方法也是碳排放源清单调查的主要手段,由于统计资料和排放因子无法快速更新,该方法难以捕捉排放源的动态变化。另一种方法为“自上而下”的方法,这种方法可基于大气观测的温室气体浓度和气象场资料,结合大气化学传输模式,通过

数据同化方法(四维变分,卡尔曼滤波等)，“自上而下”估算区域源汇及变化状况。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,表现为利用浓度观测结果来“反演”通量,寻求观测资料和模式计算的最佳优化融合。

地面观测数据精度高、时间连续性强,有很多研究(Chevallier等, 2010; Basu等, 2013; Lauvaux等, 2016)利用地基观测数据计算全球碳通量,但当需要获取更高时空分辨率的通量分布时,基于地基数据反演的通量不确定性大大增加,这主要是由于化学传输模式误差以及地基观测站点稀疏造成的(尤其在欧洲以及北美以外的区域)。东亚区域对碳循环以及气候变化非常重要,但是由于地基观测数据的稀疏及缺乏,在全球模式反演中,不同模式差异较大(Peylin等, 2013; Thompson等, 2016; Wang等, 2020)。

引入卫星观测数据进行同化反演,可以提高对于全球以及赤道区域通量的理解(Deng等, 2013),降低地面观测站点稀疏地区(尤其是欧亚大陆北部和赤道地区)的不确定性(Saeki等, 2013)。过去十年,利用卫星数据进行通量反演计算得到了迅速发展,但由于目前卫星数据的区域性偏差,导致在计算区域通量时,仍存在一定误差(Feng等, 2016)。

目前“自上而下”方法虽然得到了广泛应用,但受限于观测数据的精度和覆盖率,主要用于评估自然生态圈的 $\text{CO}_2$ 通量和湿地的 $\text{CH}_4$ 通量(Thompson等, 2016; Liu等, 2017; Palmer等, 2019)。近几年,开始探索利用卫星数据监测人为排放,如利用OCO-2观测研究城市 $\text{XCO}_2$ 分布(Eldering等, 2017)和估测OCO-2轨迹附近发电厂的 $\text{CO}_2$ 排放(Nassar等, 2017)。世界气象组织(WMO)正在积极推进全球温室气体综合信息系系统(IG3IS)计划(WMO, IG3IS),该计划旨在结合全球大气观测结果和反演模式,评估全球和区域碳源汇及变化,对“自下而上”的清单进行验证补充,降低排放清单不确定性,为国家在减排战略和减排承诺方面的进展提供及时和量化的指导。IPCC将浓度观测作为排放清单估算的重要验证手段,国际卫星对地观测委员会(CEOS)明确提出在2025年形成星座业务化运行,以支撑

2028年第二次全球碳盘点。未来,借助新一代高精度高时空分辨率的组网卫星观测,基于观测浓度的源汇碳排放评估将逐渐成为独立于排放清单调查的另一种重要估算手段(蔡博峰等,2019)。未来,在提高观测数据质量与数量基础上,还需要改进数据同化方法和大气化学模型:大气化学模型需包括从全球模型到中尺度模型、到城市规模和点源模型的多种尺度模型,提高大气化学传输模式分辨率,降低模式误差;利用先进的数据同化反演模型融合尽可能多的大气观测信息(地基网络观测、卫星组网观测以及飞机观测等),支撑城市到国家范围的碳排放清单验证,开展自然碳循环对气候变化的响应研究;同时大量观测数据的同化过程需大量计算,因此还需要提高反演模式的计算效率。为了提高模式模拟的准确度,还需要注意在以下几个方面进行改进:利用NO<sub>2</sub>、CO或同位素观测等示踪气体观测协助识别化石燃料等人为排放;加强与“自下而上”模式的合作,也是未来准确计算碳通量的重点发展方向。“自下而上”方法可以为反演同化提供更准确的先验通量,降低先验通量的不确定度。“自下而上”方法的地面通量观测网还可以对“自上而下”模式进行验证,促进反演模式的改进优化(Liu和Bowman,2016)。例如随着卫星观测分辨率和覆盖范围的提升以及部署更密集的地面通量监测网络,可以在火电厂以及超大城市开展通量验证(Conley等,2016;Hedelius等,2017),这可以验证城市尺度的通量反演模式计算。

## 5 结 语

本文介绍了日本、美国、欧洲和中国碳监测卫星遥感技术与应用的发展进程。第一代碳监测卫星探测技术重点是提高监测精度,在SCIAMACHY的基础上,进入快速发展阶段。在GSOAT和OCO-2的经验基础上,GOSAT-2创新设计了智能指向系统,可以增加晴空探测概率、提升观测效率;高光谱分辨率、高信噪比的MicroCarb首次加入较0.76 μm更有优势的1.27 μm O<sub>2</sub>-A吸收带,提高观测精度。OCO-3采用第一代卫星的探测器,通过采用国际空间站轨道,可以探测XCO<sub>2</sub>和SIF的日变化,为研究生物圈日变化提供有效数据;第二代碳监测卫星主要侧重通过方法和技术创新提高探测分辨率和覆盖率。

TROPOMI实现了分辨率较高的宽幅观测,提高了观测效率,同时具备了可以作为人为源示踪气体的NO<sub>2</sub>和CO观测,可以为监测人为源CO<sub>2</sub>提供辅助数据;中国计划发射的GAS-2探测器提升跨轨宽幅观测和分辨率。GeoCarb采用静止轨道,可对观测区域进行一天多次观测,旨在研究生态系统对天气过程的响应。主动探测卫星可以解决被动探测卫星受日照时间限制的问题,缓解云、气溶胶对采样像素的干扰,MERLIN首次采用激光雷达探测XCH<sub>4</sub>,可以全天候高精度探测全球范围内的CH<sub>4</sub>,尤其是增加了被动探测无法开展的冬季半球高纬地区观测。搭载于大气环境监测卫星以及高精度温室气体综合探测卫星的中国星载CO<sub>2</sub>探测激光雷达可以提供全天时的XCO<sub>2</sub>观测信息,是中国在CO<sub>2</sub>卫星探测方面发展的重要一步。

为了更好地利用卫星遥感数据服务于人为源监测,在卫星探测技术提高的同时,遥感反演算法也需要进一步的改进。目前,进行质量控制后的反演数据精度分别达到了1 ppm(XCO<sub>2</sub>)和6 ppb(XCH<sub>4</sub>),未来还需要不断改进遥感反演算法和辐射传输模式,从而产生高时空分辨率、高精度的全球组网观测数据产品。此外,单独一颗卫星数据不足以满足监测全球碳源汇的需求,这就需要将轨运行和即将发射的碳监测卫星科学组合成一个高、低轨结合的观测系统,进而可以高效率、全方位捕捉碳源汇的变化特征。实现卫星组网观测,需要对卫星反演算法、卫星间的交叉对比做出改进和优化。IPCC 2019指南中首次提出利用基于大气浓度的反演算法验证传统清单方法,这是“自上而下”方法的一次新的挑战。为了更好的利用大气观测监测人为碳排放,不仅需要大气温室气体观测数据的改进,还需要对大气反演同化模式进行改进。“自上而下”反演算法需要充分同化尽可能多的大气观测数据(地基观测,卫星观测、飞机观测等),并在先验通量不确定度、化学传输模式准确性等方面做出改进,并加强与“自下而上”方法的合作,以满足用大气观测数据验证全球及区域碳排放的需求。

IPCC将利用大气浓度观测作为源清单核算的重要验证手段纳入新的指南,将会促使“自上而下”方法进入快速发展阶段,按照全球盘点的路线图有计划的部署,逐步形成准业务化监测系统,对各国碳排放清单进行支撑和检验。欧盟已批复



18.1亿欧元的对地观测计划,其中最重要的任务是CO<sub>2</sub>M组网观测计划,逐渐形成业务化的碳监测系统,重点探测人为CO<sub>2</sub>源和自然源。这就需要我们推进中国自主碳卫星的研发和应用,推进基于大气浓度(尤其是遥感监测浓度)反演碳排放量的技术和方法,提高中国碳排放空间化建设和定量反演能力,掌握国际话语权。

中国一直积极推动碳监测卫星研发进程,到目前为止已经发射了3颗卫星,是目前世界上拥有温室气体卫星最多的国家,在前十年中打下了良好的理论和技术基础。在未来快速发展和应用的十年(2019年—2028年),中国将充分发挥空间探测优势,期望达到(1)降低国家排放清单报告的不确定性;(2)为国家自主贡献的减排策略提供及时量化的科学依据;(3)为探究由人类活动和气候变化引起的生态系统碳收支提供科学数据。中国充分借鉴国际上相关卫星的经验和成果,近期正在探索高轨静止卫星与低轨极轨卫星相结合的动与静组合、主动与被动探测相结合科学实验卫星系统的科学需求和可行性,为中国低碳可持续发展、生态文明引领的美丽中国建设及一带一路等国家战略的实施提供天基科技支撑。

## 参考文献(References)

- Basu S, Guerlet S, Butz A, Houweling S, Hasekamp O, Aben I, Krummel P, Steele P, Langenfelds R, Torn M, Biraud S, Stephens B, Andrews A and Worthy D. 2013. Global CO<sub>2</sub> fluxes estimated from GOSAT retrievals of total column CO<sub>2</sub>. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(17): 8695-8717 [DOI: 10.5194/acp-13-8695-2013]
- Bertaux J L, Hauchecorne A, Lefèvre F, Breon F M, Blanot L, Jouget D, Lafrique P and Akaev P. 2019. The use of O<sub>2</sub> 1.27 μm absorption band revisited for GHG monitoring from space and application to MicroCarb. *Atmospheric Measurement Techniques Discussion* [DOI: 10.5194/amt-2019-54]
- Boesch H, Baker D, Connor B, Crisp D and Miller C. 2011. Global characterization of CO<sub>2</sub> column retrievals from shortwave-infrared satellite observations of the Orbiting Carbon Observatory-2 mission. *Remote Sensing*, 3(2): 270-304 [DOI: 10.3390/rs3020270]
- Buchwitz M, Schneising O, Reuter M, Heymann J, Krautwurst S, Bovensmann H, Burrows J P, Boesch H, Parker R J, Somkuti P, Detmers R G, Hasekamp O P, Aben I, Butz A, Frankenberg C and Turner A J. 2017. Satellite-derived methane hotspot emission estimates using a fast data-driven method. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(9): 5751-5774 [DOI: 10.5194/acp-17-5751-2017]
- Cai B F, Zhu S L, Yu S M, Dong H M, Zhang C Y, Wang C K, Zhu J, Gao Q X, Fang S X, Pan X B and Zheng X H. 2019. The interpretation of 2019 refinement to the 2016 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventory. *Environmental Engineering*, 37(8): 1-11 (蔡博峰, 朱松丽, 于胜民, 董红敏, 张称意, 王长科, 朱建华, 高庆先, 方双喜, 潘学标, 郑循华. 2019. 《IPCC 2006年国家温室气体清单指南2019修订版》解读. *环境工程*, 37(8): 1-11) [DOI: 10.13205/j.hjgc.201908001]
- Chen L F, Zhang Y, Zou M M, Xu Q, Li L J, Li X Y and Tao J H. 2015. Overview of atmospheric CO<sub>2</sub> remote sensing from space. *Journal of Remote Sensing*, 19(1): 1-11 (陈良富, 张莹, 邹铭敏, 徐谦, 李令军, 李小英, 陶金花. 2015. 大气CO<sub>2</sub>浓度卫星遥感进展. *遥感学报*, 19(1): 1-11) [DOI: 10.11834/jrs.20153331]
- Chen Y D, Cai W J and Wang C. 2018. The characteristics of Intended Nationally Determined Contributions. *Climate Change Research*, 14(3): 295-302 (陈艺丹, 蔡闻佳, 王灿. 2018. 国家自主决定贡献的特征研究. *气候变化研究进展*, 14(3): 295-302) [DOI: 10.12006/j.issn.1673-1719.2017.124]
- Chevallier F, Ciais P, Conway T J, Aalto T, Anderson B E, Bousquet P, Brunke E G, Ciattaglia L, Esaki Y, Fröhlich M, Gomez A, Gomez-Pelaez A J, Haszpra L, Krummel P B, Langenfelds R L, Leuenberger M, Machida T, Maignan F, Matsueda H, Morguí J A, Mukai H, Nakazawa T, Peylin P, Ramonet M, Rivier L, Sawa Y, Schmidt M, Steele L P, Vay S A, Vermeulen A T, Wofsy S and Worthy D. 2010. CO<sub>2</sub> surface fluxes at grid point scale estimated from a global 21 year reanalysis of atmospheric measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D21): D21307 [DOI: 10.1029/2010JD013887]
- Chevallier F, Palmer P I, Feng L, Boesch H, O'Dell C W and Bousquet P. 2014. Toward robust and consistent regional CO<sub>2</sub> flux estimates from in situ and spaceborne measurements of atmospheric CO<sub>2</sub>. *Geophysical Research Letters*, 41(3): 1065-1070 [DOI: 10.1002/2013GL058772]
- Conley S, Franco G, Faloona I, Blake D R, Peischl J and Ryerson T B. 2016. Methane emissions from the 2015 Aliso Canyon blowout in Los Angeles, CA. *Science*, 351(6279): 1317-1320 [DOI: 10.1126/science.aaf2348]
- Crisp D. 2015. Measuring atmospheric carbon dioxide from space with the Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2)//*Proceedings Volume 9607, Earth Observing Systems XX*. San Diego, California, United States: SPIE: 960702 [DOI: 10.1117/12.2187291]
- Crisp D, Fisher B M, O'Dell C, Frankenberg C, Basilio R, Bösch H, Brown L R, Castano R, Connor B, Deutscher N M, Eldering A, Griffith D, Gunson M, Kuze A, Mandrake L, McDuffie J, Messerschmidt J, Miller C E, Morino I, Natraj V, Notholt J, O'Brien D M, Oyafuso F, Polonsky I, Robinson J, Salawitch R, Sherlock V, Smyth M, Suto H, Taylor T E, Thompson D R, Wennberg P O, Wunch D and Yung Y L. 2012. The ACOS CO<sub>2</sub> retrieval algorithm-Part II: global X<sub>CO<sub>2</sub></sub> data characterization. *Atmospheric Measurement Techniques*, 5(4): 687-707 [DOI: 10.5194/amt-5-687-2012]
- Crisp D, Pollock H R, Rosenberg R, Chapsky L, Lee R A M, Oyafuso F A, Frankenberg C, O'Dell C W, Bruegge C J, Doran G B, Elder-

- ing A, Fisher B M, Fu D J, Gunson M R, Mandrake L, Osterman G B, Schwandner F M, Sun K, Taylor T E, Wennberg P O and Wunch D. 2017. The on-orbit performance of the Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) instrument and its radiometrically calibrated products. *Atmospheric Measurement Techniques*, 10(1): 59-81 [DOI: 10.5194/amt-10-59-2017]
- Deng F, Jones D B A, Henze D K, Bousserez N, Bowman K W, Fisher J B, Nassar R, O'Dell C, Wunch D, Wennberg P O, Kort E A, Wofsy S C, Blumenstock T, Deutscher N M, Griffith D W T, Hase F, Heikkinen P, Sherlock V, Strong K, Sussmann R and Warneke T. 2013. Inferring regional sources and sinks of atmospheric CO<sub>2</sub> from GOSAT XCO<sub>2</sub> data. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(7): 3703-3727 [DOI: 10.5194/acp-14-3703-2014]
- Dupuy E, Morino I, Deutscher N M, Yoshida Y, Uchino O, Connor B J, De Mazière M, Griffith D W T, Hase F, Heikkinen P, Hillyard P W, Iraci L T, Kawakami S, Kivi R, Matsunaga T, Notholt J, Petri C, Podolske J R, Pollard D F, Rettinger M, Roehl C M, Sherlock V, Sussmann R, Toon G C, Velasco V A, Warneke T, Wennberg P O, Wunch D, Yokota T. 2016. Comparison of XH<sub>2</sub>O retrieved from GOSAT short-wavelength infrared spectra with observations from the TCCON network. *Remote Sensing*, 8(5): 414 [DOI: 10.3390/rs8050414]
- Ehret G, Bousquet P, Pierangelo C, Alpers M, Millet B, Abshire J B, Bovensmann H, Burrows J P, Chevallier F, Ciais P, Crevoisier C, Fix A, Flamant P, Frankenberg C, Gibert F, Heim B, Heimann M, Houweling S, Hubberten H W, Jöckel P, Law K, Löw A, Marshall J, Agusti-Panareda A, Payan S, Prigent C, Rairoux P, Sachs T, Scholze M and Wirth M. 2017. MERLIN: a French-German space Lidar mission dedicated to atmospheric methane. *Remote Sensing*, 9(10): 1052 [DOI: 10.3390/rs9101052]
- Eldering A, Taylor T E, O'Dell C W and Pavlick R. 2019. The OCO-3 mission: measurement objectives and expected performance based on 1 year of simulated data. *Atmospheric Measurement Techniques*, 12(4): 2341-2370 [DOI: 10.5194/amt-12-2341-2019]
- Eldering A, Wennberg P O, Crisp D, Schimel D S, Gunson M R, Chatterjee A, Liu J, Schwandner F M, Sun Y, O'Dell C W, Frankenberg C, Taylor T, Fisher B, Osterman G B, Wunch D, Hakkarainen J, Tamminen J and Weir B. 2017. The Orbiting Carbon Observatory-2 early science investigations of regional carbon dioxide fluxes. *Science*, 358(6360): (eaam5745 [DOI: 10.1126/science.aam5745])
- Feng L, Palmer P I, Deutscher N M, Feist D G, Kivi R, Morino I and Sussmann R. 2016. Estimates of European uptake of CO<sub>2</sub> inferred from GOSAT XCO<sub>2</sub> retrievals: sensitivity to measurement bias inside and outside Europe. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(3): 1289-1302 [DOI: 10.5194/acp-16-1289-2016]
- Han G, Xu H, Gong W, Liu J Q, Du J, Ma X and Liang A L. 2018. Feasibility study on measuring atmospheric CO<sub>2</sub> in urban areas using spaceborne CO<sub>2</sub>-IPDA LIDAR. *Remote Sensing*, 10(7): 985 [DOI: 10.3390/rs10070985]
- Hedelius J K, Feng S, Roehl C M, Wunch D, Hillyard P W, Podolske J R, Iraci L T, Patarasuk R, Rao P, O'Keefe D, Gurney K R, Lauvaux T and Wennberg P O. 2017. Emissions and topographic effects on column CO<sub>2</sub> (X<sub>CO<sub>2</sub></sub>) variations, with a focus on the Southern California Megacity. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(13): 7200-7215 [DOI: 10.1002/2017JD026455]
- IPCC. 2019. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Switzerland: IPCC
- Lauvaux T, Miles N L, Deng A J, Richardson S J, Cambaliza M O, Davis K J, Gaudet B J, Gurney K R, Huang J H, O'Keefe D, Song Y, Karion A, Oda T, Patarasuk R, Razlivanov I, Sarmiento D, Shepson P, Sweeney C, Turnbull J and Wu K. 2016. High-resolution atmospheric inversion of urban CO<sub>2</sub> emissions during the dormant season of the Indianapolis Flux Experiment (INFLUX). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(10): 5213-5236 [DOI: 10.1002/2015JD024473]
- Liu D, Zheng Z F, Chen W B, Wang Z B, Li W J, Ke J, Zhang Y P, Chen S J, Cheng C H and Wang S B. 2019. Performance estimation of space-borne high-spectral-resolution Lidar for cloud and aerosol optical properties at 532 nm. *Optics Express*, 27(8): A481-A494 [DOI: 10.1364/OE.27.00A481]
- Liu J J and Bowman K. 2016. A method for independent validation of surface fluxes from atmospheric inversion: application to CO<sub>2</sub>. *Geophysical Research Letters*, 43(7): 3502-3508 [DOI: 10.1002/2016GL067828]
- Liu J J, Bowman K W, Schimel D S, Parazoo N C, Jiang Z, Lee M, Bloom A, Wunch D, Frankenberg C, Sun Y, O'Dell C W, Gurney K R, Menemenlis D, Gierach M, Crisp D and Eldering A. 2017. Contrasting carbon cycle responses of the tropical continents to the 2015-2016 El Niño. *Science*, 358(6360): (eaam5690 [DOI: 10.1126/science.aam5690])
- Liu Y, Wang J, Yao L, Chen X, Cai Z N, Yang D X, Yin Z S, Gu S Y, Tian L F, Lu N M and Lyu D. 2018. The TanSat mission: preliminary global observations. *Science Bulletin*, 63(18): 1200-1207 [DOI: 10.1016/j.scib.2018.08.004]
- Liu Y, Yang D X and Cai Z N. 2013. A retrieval algorithm for Tansat XCO<sub>2</sub> observation: retrieval experiments using GOSAT data. *Chinese Science Bulletin*, 58(13): 1520-1523 [DOI: 10.1007/s11434-013-5680-y]
- Lu F. 2017. Recent development and plans in CMA, expert team on satellite systems (ET-SAT) 11th SESSION, 4-6 April 2017, WMO Headquarters, Geneva, Switzerland, 2017. <http://www.wmo.int/pages/prog/sat/meetings/ET-SAT-11/ET-SAT-11.html>
- Nakajima M, Suto H, Yotsumoto K, Shiomi K and Hirabayashi T. 2017. Fourier transform spectrometer on GOSAT and GOSAT-2// Proceedings Volume 10563, International Conference on Space Optics—ICSO 2014. Tenerife, Canary Islands, Spain: SPIE: 2014: 105634O [DOI: 10.1117/12.2304062]
- Nassar R, Hill T G, McLinden C A, Wunch D, Jones D B A and Crisp D. 2017. Quantifying CO<sub>2</sub> emissions from individual power plants from space. *Geophysical Research Letters*, 44(19): 10045-10053 [DOI: 10.1002/2017GL074702]
- O'Brien D M, Polonsky I N, Utembe S R and Rayner P J. 2016. Potential of a geostationary geoCARB mission to estimate surface emis-

- sions of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and CO in a polluted urban environment: case study Shanghai. *Atmospheric Measurement Techniques*, 9(9): 4633-4654 [DOI: 10.5194/amt-9-4633-2016]
- O'Dell C W, Connor B, Bösch H, O'Brien D, Frankenberg C, Castano R, Christi M, Eldering D, Fisher B, Gunson M, McDuffie J, Miller C E, Natraj V, Oyafuso F, Polonsky I, Smyth M, Taylor T, Toon G C, Wennberg P O and Wunch D. 2012. The ACOS CO<sub>2</sub> retrieval algorithm-Part 1: description and validation against synthetic observations. *Atmospheric Measurement Techniques*, 5(1): 99-121 [DOI: 10.5194/amt-5-99-2012]
- O'Dell C W, Eldering A, Wennberg P O, Crisp D, Gunson M R, Fisher B, Frankenberg C, Kiel M, Lindqvist H, Mandrake L, Merrelli A, Natraj V, Nelson R R, Osterman G B, Payne V H, Taylor T E, Wunch D, Drouin B J, Oyafuso F, Chang A, McDuffie J, Smyth M, Baker D F, Basu S, Chevallier F, Crowell S M R, Feng L, Palmer P I, Dubey M, García O E, Griffith D W T, Hase F, Iraci L T, Kivi, R, Morino I, Notholt J, Ohyama H, Petri C, Roehl C M, Sha M K, Strong K, Sussmann R, Te Y, Uchino O and Velasco V A. 2018. Improved retrievals of carbon dioxide from Orbiting Carbon Observatory-2 with the version 8 ACOS algorithm. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(12): 6539-6576 [DOI: 10.5194/amt-11-6539-2018]
- Palmer P I, Feng L, Baker D, Chevallier F, Bösch H and Somkuti P. 2019. Net carbon emissions from African biosphere dominate pan-tropical atmospheric CO<sub>2</sub> signal. *Nature Communications*, 10(1): 3344 [DOI: 10.1038/s41467-019-11097-w]
- Parker R J, Boesch H, Byckling K, Webb A J, Palmer P I, Feng L, Bergamaschi P, Chevallier F, Notholt J, Deutscher N, Warneke T, Hase F, Sussmann R, Kawakami S, Kivi R, Griffith D W T and Velasco V. 2015. Assessing 5 years of GOSAT Proxy XCH<sub>4</sub> data and associated uncertainties. *Atmospheric Measurement Techniques*, 8(11): 4785-4801 [DOI: 10.5194/amt-8-4785-2015]
- Peylin P, Law R M, Gurney K R, Chevallier F, Jacobson A R, Maki T, Niwa Y, Patra P K, Peters W, Rayner P J, Rödenbeck C, van der Laan-Luijkx I T and Zhang X. 2013. Global atmospheric carbon budget: results from an ensemble of atmospheric CO<sub>2</sub> inversions. *Biogeosciences*, 10(10): 6699-6720 [DOI: 10.5194/bg-10-6699-2013]
- Phil DeCola and WMO Secretariat. 2017. An integrated global greenhouse gas information system (IG3IS) [EB/OL]. <https://public.wmo.int/en/resources/bulletin/integrated-global-greenhouse-gas-information-system-ig3is>
- Reuter M, Buchwitz M, Schneising O, Krautwurst S, O'Dell C W, Richter A, Bovensmann H and Burrows J P. 2019. 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. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(14): 9371-9383 [DOI: 10.5194/acp-19-9371-2019]
- Saeki T, Maksyutov S, Saito M, Valsala V, Oda T, Andres R J, Belikov D, Tans P, Dlugokencky E, Yoshida Y, Morino I, Uchino O and Yokota T. 2013. Inverse modeling of CO<sub>2</sub> fluxes using GOSAT data and multi-year ground-based observations. *SOLA*, 9: 45-50 [DOI: 10.2151/sola.2013-011]
- Thompson R L, Patra P, Chevallier F, Maksyutov S, Law R M, Ziehn T, van der Laan-Luijkx I T, Peters W, Ganshin A, Zhuravlev R, Maki T, Nakamura T, Shirai T, Ishizawa M, Saeki T, Machida T, Poulter B, Canadell J G and Ciais P. 2016. Top-down assessment of the Asian carbon budget since the mid 1990s. *Nature Communications*, 7: 10724 [DOI: 10.1038/ncomms10724]
- Wang J, Feng L, Palmer P I, Liu Y, Fang S X, Bosch H, O'Dell C W, Tang X P, Yang D X, Liu L X, Xia C Z. Large Chinese land carbon sink estimated from atmospheric carbon dioxide data[J]. *Nature*, 2020, 586:720-723 [DOI: 10.1038/s41586-020-2849-9].
- Wu L H, Hasekamp O, Hu H L, Landgraf J, Butz A, van de Brugh J, Aben I, Pollard D F, Griffith D W T, Feist D G, Koshelev D, Hase F, Toon G C, Ohyama H, Morino I, Notholt J, Shiomi K, Iraci L, Schneider M, de Mazière M, Sussmann R, Kivi R, Warneke T, Goo T Y and Té Y. 2018. Carbon dioxide retrieval from OCO-2 satellite observations using the RemoTeC algorithm and validation with TCCON measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(5): 3111-3130 [DOI: 10.5194/amt-11-3111-2018]
- Wunch D, Wennberg P O, Osterman G, Fisher B, Naylor B, Roehl C M, O'Dell C, Mandrake L, Viatte C, Kiel M, Griffith D W T, Deutscher N M, Velasco V A, Notholt J, Warneke T, Petri C, De Mazière M, Sha M K, Sussmann R, Rettinger M, Pollard D, Robinson J, Morino I, Uchino O, Hase F, Blumenstock T, Feist D G, Arnold S G, Strong K, Mendonca J, Kivi R, Heikkinen P, Iraci L, Podolske J, Hillyard P W, Kawakami S, Dubey M K, Parker H A, Sepulveda E, García O E, Te Y, Jeseck P, Gunson M R, Crisp D and Eldering A. 2017. Comparisons of the Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) X<sub>CO<sub>2</sub></sub> measurements with TCCON. *Atmospheric Measurement Techniques*, 10(6): 2209-2238 [DOI: 10.5194/amt-10-2209-2017]
- Xiong W. 2019. Greenhouse gases Monitoring Instrument (GMI) on GF-5 satellite (invited). *Infrared and Laser Engineering*, 48(3): 0303002 (熊伟. 2019. “高分五号”卫星大气主要温室气体监测仪(特邀). *红外与激光工程*, 48(3): 0303002) [DOI: 10.3788/IR-LA201948.0303002]
- Yang D, Boesch H, Liu Y, Somkuti P, Cai Z, Chen X, Di Noia A, Lin C, Lu N, Lyu D, Parker R J, Tian L, Wang M, Webb A, Yao L, Yin Z, Zheng Y, Deutscher N M, Griffith D W T, Hase F, Kivi R, Morino I, Notholt J, Ohyama H, Pollard D F, Shiomi K, Sussmann R, Té Y, Velasco V A, Warneke T and Wunch D. 2020. Toward high precision XCO<sub>2</sub> retrievals from TanSat observations: retrieval improvement and validation against TCCON measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(22): e2020JD032794 [DOI: 10.1029/2020JD032794]
- Yang D X, Liu Y, Cai Z N, Chen X, Yao L and Lu D. 2018. First global carbon dioxide maps produced from Tansat measurements. *Advances in Atmospheric Sciences*, 35(6): 621-623 [DOI: 10.1007/s00376-018-7312-6]
- Yang D X, Liu Y, Cai Z N, Deng J B, Wang J and Chen X. 2015. An advanced carbon dioxide retrieval algorithm for satellite measure-

- ments and its application to GOSAT observations. *Science Bulletin*, 60(23): 2063-2066 [DOI: 10.1007/s11434-015-0953-2]
- Ye S, Fang Y H, Hong J, Qiao Y L and Xiong W. 2007. Experimental study on spatial heterodyne spectroscopy. *Opto-Electronic Engineering*, 34(5): 84-88 (叶松, 方勇华, 洪津, 乔延利, 熊伟. 2007. 空间外差光谱技术实验研究. *光电工程*, 34(5): 84-88) [DOI: 10.3969/j.issn.1003-501X.2007.05.019]
- Yoshida Y, Kikuchi N, Morino I, Uchino O, Oshchepkov S, Bril A, Saeki T, Schutgens N, Toon G C, Wunch D, Roehl C M, Wennberg P O, Griffith D W T, Deutscher N M, Warneke T, Notholt J, Robinson J, Sherlock V, Connor B, Rettinger M, Sussmann R, Ahonen P, Heikkinen P, Kyrö E, Mendonca J, Strong K, Hase F, Dohe S and Yokota T. 2013. Improvement of the retrieval algorithm for GOSAT SWIR XCO<sub>2</sub> and XCH<sub>4</sub> and their validation using TCCON data. *Atmospheric Measurement Techniques*, 6(6): 1533-1547 [DOI: 10.5194/amt-6-1533-2013]

## Satellite remote sensing of greenhouse gases: Progress and trends

LIU Yi<sup>1,2,3</sup>, WANG Jing<sup>1,2</sup>, CHE Ke<sup>1,2</sup>, CAI Zhaonan<sup>1</sup>, YANG Dongxu<sup>1,3</sup>, WU Lin<sup>4</sup>

1. Key Laboratory of middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;
2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China;
3. Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201210, China;
4. State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

**Abstract:** Reduction of greenhouse gas (GHG) (carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and methane (CH<sub>4</sub>)) emissions is a crucial way to mitigate global warming. Traditional estimation of anthropogenic carbon emissions mainly relies on inventory method and lacks independent validation data. The 49th IPCC plenary session (2019) proposed the use of “top-down” inversion with atmospheric observations to support and verify GHG emission inventories. The “top-down” method depends on atmospheric concentration observations, chemical transport models, and data assimilation algorithms. Global covered atmospheric concentration measurement with high accuracy and precision is a key element in better using the “top-down” method in global carbon flux investigation. Measurements from space provide global and regional datasets that improve the spatial coverage of existing in-situ networks. Understanding the development of spaceborne GHG monitoring techniques and “top-down” method has become an important issue in China’s response to international climate change affairs.

We divided the carbon monitoring remote sensing technology into three phases (1999—2008, 2009—2019, 2019—) based on the development process of satellite remote sensing technology and monitoring requirements. The corresponding satellites in the first two phases were called the first generation, and the corresponding satellites in the third phases were called the second generation. The first generation of GHG satellites was tested in many aspects, such as measurement principle, calibration, and validation. These processes were performed to improve the observation accuracy and the spatial and temporal resolutions of measurements. These efforts made continuous improvement on measurement accuracy and obtained approximately 10 years of scientific data and research results. The first generation of GHG monitoring satellites mainly focused on technical verification and scientific target exploration flying a polar-orbit and onboarded passive remote sensing instrument with narrow swath, mainly aiming to obtain high-precision remote sensing data. The first generation laid the foundation, and the second generation entered the decade of rapid development and application from 2019 to 2028. The second generation of GHG monitoring satellites mainly aimed to improve the spatial and temporal resolutions of observations, such as increasing the swath and observation data in the cross-orbit direction ( $\geq 200$  km) or using geostationary orbit to increase the observation frequency and data coverage, thereby greatly improving the observation efficiency. Active laser detectors can be used to obtain profile data with high accuracy (0.5 PPM), which are unaffected by sunlight.

Optimizing the retrieval algorithm to improve the accuracy and scientifically planning the operational constellations of satellites to improve the monitoring efficiency are necessary. These processes are required to meet the major demand of global and regional monitoring of anthropogenic carbon emissions. Furthermore, the verification of the inventory algorithm is introduced by using the “top-down” data assimilation method with high precision, high spatial and temporal resolution measurements of the satellite constellations. The future development trend of hyperspectral remote sensing and new generation of carbon monitoring satellites and the potential of estimating anthropogenic carbon emissions are provided.

**Key words:** carbon monitoring satellites, greenhouse gases, carbon source and sink, MRV, satellites virtual constellation