

全球碳盘点卫星遥感监测方法、进展与挑战

刘良云¹, 陈良富¹, 刘毅², 杨东旭², 张兴赢³, 卢乃锰³, 居为民⁴, 江飞⁴, 尹增山⁵, 刘国华⁵, 田龙飞⁵, 胡登辉⁵, 毛慧琴⁶, 刘思含⁶, 张建辉⁶, 雷莉萍¹, 范萌¹, 张雨琮¹, 周翔¹, 吴一戎¹

1. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094;
2. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029;
3. 中国气象局国家卫星气象中心, 北京 100081;
4. 南京大学, 南京 210023;
5. 中国科学院微小卫星创新研究院, 上海 201203;
6. 生态环境部卫星环境应用中心, 北京 100094

摘要: 以全球变暖为主要特征的气候变化已成为全球性环境问题, 对全球可持续发展带来严峻挑战。2015年《巴黎协定》确定了自2020年后国家自主贡献的减排方式, 并从2023年开始每5 a开展一次全球碳盘点。2019年第49届IPCC全会明确增加了基于卫星遥感的排放清单校验方法。欧盟、美国、日本、加拿大等正在大力发展温室气体排放的MVS (Monitoring and Verification Support) 能力。本文调研分析了全球碳盘点对卫星遥感技术的需求, 介绍了全球碳盘点卫星遥感的原理, 梳理了温室气体卫星遥感、生态系统碳源汇卫星遥感估算、人为源碳排放卫星遥感、碳通量同化估算等全球碳盘点卫星遥感核心环节的研究现状与进展, 分析了当前卫星遥感技术对全球碳盘点任务的支撑能力, 并结合国内外发展趋势, 针对性地提出中国的碳监测卫星计划方案, 并展望了中国开展全球碳盘点卫星遥感监测重点任务, 期望为中国全球碳盘点卫星遥感体系建设提供思路与方案。

关键词: 全球变暖, 碳盘点, 碳排放, 碳源汇, 卫星遥感, 同化

引用格式: 刘良云, 陈良富, 刘毅, 杨东旭, 张兴赢, 卢乃锰, 居为民, 江飞, 尹增山, 刘国华, 田龙飞, 胡登辉, 毛慧琴, 刘思含, 张建辉, 雷莉萍, 范萌, 张雨琮, 周翔, 吴一戎. 2022. 全球碳盘点卫星遥感监测方法、进展与挑战. 遥感学报, 26(2): 243-267
Liu L Y, Chen L F, Liu Y, Yang D X, Zhang X Y, Lu N M, Ju W M, Jiang F, Yin Z S, Liu G H, Tian L F, Hu D H, Mao H Q, Liu S H, Zhang J H, Lei L P, Fan M, Zhang Y C, Zhou X and Wu Y R. 2022. Satellite remote sensing for global stocktaking: methods, progress and perspectives. National Remote Sensing Bulletin, 26(2): 243-267 [DOI: 10.11834/jrs.20221806]

1 引言

自工业化以来, 全球大气CO₂浓度从工业革命以前的280 ppm (Etheridge等, 1996) 增加到2020年的413.2 ppm (Friedlingstein等, 2020), 并正以每年2—3 ppm的速度快速增加。相比工业化革命前, 2019年全球平均气温已上升了1.1℃, 2015年—2019年也是有记录以来最热的5 a (World Meteorological Organization, 2019)。以全球变暖为主要特征的气候变化已成为全球性环境问题, 对全球可持续发展带来严峻挑战, 形势严峻, 积极应对刻不容缓。

国际社会逐步达成了“温室气体减排是抑制全球增温最有效途径”这一共识, 2007年《巴厘路线图》提出“可测量、可报告、可检查”MRV (即Monitoring, Reporting, Verification) 的三可要求和核查手段 (Winkler, 2008)。欧盟委员会也正在建设业务化运行的人为碳排放的监测和验证支持MVS (Monitoring and Verification Support) 能力。2015年通过的《巴黎协定》制定了21世纪全球平均升温幅度控制在2℃水平, 尽可能接近1.5℃; 同时确定自2020年后国家自主贡献的减排方式, 并从2023年开始每5 a开展一次全球碳盘点 (global

收稿日期: 2021-12-07; 预印本: 2021-12-26

基金项目: 国家重点研发计划(编号:2021YFB3901000); 国家自然科学基金(编号:41825002)

第一作者简介: 刘良云, 1975年生, 男, 研究员, 研究方向为光学定量遥感。E-mail: liuly@radi.ac.cn

stocktaking) (Vandyck 等, 2016), 以促进《巴黎协定》的全面落实。2019年第49届IPCC全会上通过了2006年IPCC国家清单指南的改进方案(IPCC, 2019), 明确增加了新的排放清单的校验方法, 即通过大气浓度观测数据“自上而下”反演的温室气体通量结果来验证排放清单。

卫星遥感具有客观、连续、稳定、大范围、重复观测的优点, 已成为监测全球大气CO₂浓度不可或缺的技术手段, 卫星遥感也正在成为新一代、国际认可的全球碳核查方法(刘毅等, 2021)。2016年《新德里宣言》强调了星载大气碳监测可作为估算国家自主贡献INDC(Intended Nationally Determined Contributions)的补充系统, 国际卫星对地观测委员会也明确提出在2025年形成星座业务化运行, 支撑2028年全球碳盘点。当前卫星遥

感可以探测大气CO₂浓度, 但是科学家和政府决策部门真正想知道的是大气CO₂的来源和提取出其中来自人类活动排放的部分。

图1是全球碳计划(GCP)2020年报告中人类活动、大气、陆地与海洋生态系统的碳收支结果, 其包括5个方面的内容, 即大气中CO₂浓度及增量、化石燃料和工业排放、土地利用变化碳排放、陆地生态系统碳汇和海洋生态系统碳汇等, 其中人类活动碳排放是全球碳盘点的核心任务。为了探明人类工业活动产生的碳排放, 还必须确定并区分陆地和海洋生态系统吸收和释放了多少CO₂, 需要监测火山爆发、森林砍伐、火灾等自然释放和土地利用变化排放的CO₂(Friedlingstein等, 2020; Tollefson, 2016)。

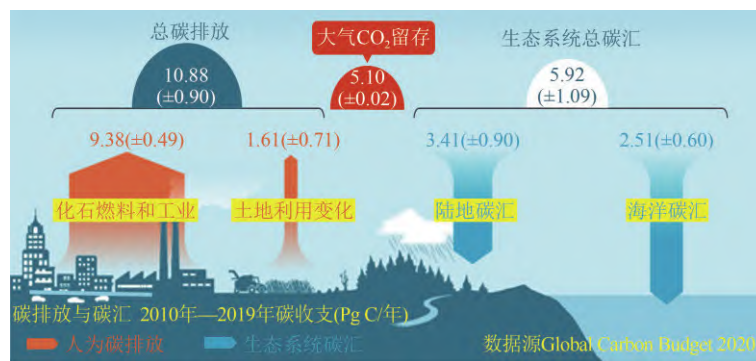


图1 2010年—2019年10 a间人类活动、大气与自然生态系统的平均碳收支(Friedlingstein等, 2020)

Fig. 1 The global carbon budget of human activities, atmospheric CO₂, and natural uptakes by terrestrial and marine ecosystems during the decade 2010—2019 (Friedlingstein et al., 2020)

《巴黎协定》也明确提出缔约方应尽快实现碳达峰和碳中和目标。碳中和目标以及全球碳盘点的现实压力, 需要集成利用卫星遥感、大数据、碳同化等先进技术和方法, 监测大气CO₂浓度的时空变化, 高分辨、高精度估算全球碳通量, 并有效区分人为活动和自然过程对碳源汇的贡献, 阐明大气碳增加的来源, 同时还需要对结合地面观测手段对卫星估算结果进行验证。本文的目的就是梳理碳中和与碳盘点对卫星遥感的重大国家需求, 调研国内外温室气体卫星遥感、全球生态系统碳源汇、人为源排放反演等研究现状, 分析当前全球碳盘点卫星监测能力, 针对性地提出中国的碳监测卫星计划方案, 为中国应对气候谈判与碳盘点、服务碳中和评估提供解决方案。

2 国内外研究现状

2.1 温室气体地基观测网络

大气温室气体监测可分为本底浓度监测和排放监测。1989年WMO组建全球大气地面观测网GAW(Global Atmosphere Watch Programme), 开展包括大气温室气体在内的200多种要素的长期监测。美国、欧洲和加拿大等国家分别建立了大气能见度保护联合会IMPROVE(Interagency Monitoring of PROtected Visual Environments)、环境监测与评价项目EMAP(Environmental Monitoring and Assessment Program)、加拿大大气与降水监测网CAPMon(Canadian Air and Precipitation Monitoring Network)等观测网络, 关注诸如温室气体等大气成分的变化。

GAW 致力于建立对大气成分及其变化的全球一致性理解,其中,加入该计划的大气成分变化探测网络 NDACC (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change)、总碳柱观测网络 TCCON (Total Carbon Column Observing Network)、现役飞机全球观测系统 IAGOSA (In-service Aircraft for Global Observing System) 和集成碳观测系统 ICOS (Integrated Carbon Observation System) 都提供了温室气体的地面监测数据。NDACC 在全球共有 90 多个站点,由傅里叶变换红外光谱仪、微波光谱仪、激光雷达等多种传感器组成,自 1991 年运行以来,收集了全球大量温室气体 (CO_2 、 CH_4 、 N_2O)、污染气体 (CO 、 NO_2)、水蒸气、痕量气体等的地面观测数据 (De Mazière 等, 2018)。2004 年建立的 TCCON 是由地面傅里叶变换光谱仪组成的全球近红外吸收分子 (CO_2 、 CO 、 CH_4 、 N_2O 等) 柱浓度监测网络,该网络能实现高精度的 CO_2 浓度检测 (误差小于 0.25%) (Wunch 等, 2011), 被应用于 SCIAMACHY、GOSAT 系列卫星、OCO 系列卫星测量数据的验证 (Crisp 等, 2017; Cogan 等, 2012; Kulawik 等, 2016)。TCCON 和 NDACC 网络的 CO 数据之间存在受先验剖面配置影响的误差和系统之间 6.8% 的固定偏差,相比之下, NDACC 更接近理论真实值 (Zhou 等, 2019)。ICOS 大气专题中心 ATC (Atmosphere Thematic Centre) 收集并处理来自网络站点大气温室气体摩尔分数数据。该体统提供欧洲范围内近实时的监测数据, CO_2 的平均校准修正值为 $1.7 \pm 0.3 \mu\text{mol/mol}$, CH_4 为 $2.8 \pm 3 \text{ nmol/mol}$, 为碳循环的量化和欧洲温室气体源汇提供标准化、可靠的站点数据和详细的数据产品 (Hazan 等, 2016)。此外,部分 ICOS 站点参与的由 7 个欧洲机构合作的项目 EUROCOM (European atmospheric transport inversion comparison) 也提供了 CO_2 观测数据和陆地生态系统与大气之间碳通量的估算 (Monteil 等, 2020), ICOS 与 AmeriFlux、NEON、AsiaFlux、ChinaFLUX 和 TERN-OzFlux 等区域观测网络共同构建的 FLUXNET 能提供全球范围的 CO_2 等主要温室气体的地面监测数据并支持碳通量估算 (Pastorello 等, 2020; Jung 等, 2020)。

中国也是世界上较早开展温室气体本底观测的国家之一。1982 年,中国第一个区域大气本底监测站在北京上甸子投入使用。1994 年,青海瓦

里关国家大气本底站作为欧亚大陆腹地唯一的全球大气本底站在海拔 3816 m 的青藏高原上建立。经过近 40 a 建设,中国首个温室气体观测网基本建成,包含 60 个覆盖全国主要气候关键区、并以高精度观测为主的站点,由国家大气本底站、国家气候观测台和国家及省级应用气象观测站 (温室气体) 等组成。其观测要素涵盖《京都议定书》中规定的二氧化碳、甲烷、氧化亚氮、氢氟碳化物、全氟化碳、六氟化硫和三氟化氮等 7 类温室气体。中国温室气体观测网的建成,可提升气候变化监测评估能力,持续为中国碳达峰、碳中和和行动成效科学评估与碳排放核算提供数据支撑。

迄今为止,国际社会引用的全球温室气体浓度资料主要来自 GAW,但 GAW 的这些站点地理分布很不均匀,发达国家站点较多,南美洲、非洲、亚洲内陆地区等广袤区域的站点较为稀缺。

2.2 温室气体卫星遥感与进展

基于传统地面站点观测数据,依然难以准确了解温室气体的源汇变化特征和机制,而卫星遥感可以监测全球大气温室气体浓度信息。迄今,国际上欧洲、日本、美国、加拿大和中国相继发射了具备大气 CO_2 浓度观测能力的卫星。表 1 汇总了全球已经发射和规划 (2028 年前发射) 的碳监测卫星。

欧洲在温室气体的卫星遥感探测方面起步较早,并将温室气体卫星遥感列入最优先的空间观测计划。欧洲空间局 2002-02-28 发射的 ENVISAT 环境卫星搭载的扫描成像光谱仪 SCIAMACHY,具备临边、天底和掩星 3 种观测模式,是第 1 台能够探测到边界层 CO_2 浓度变化的星载传感器,证实了卫星在近红外谱段探测近地面 CO_2 浓度的可行性 (Buchwitz 等, 2007; 陈良富 等, 2015; 周敏强 等, 2014)。在 CH_4 卫星遥感方面,欧洲 MERLIN (Methane Remote Sensing Mission) 任务原计划于 2021 年后发射单颗卫星用于探测 CH_4 柱浓度总量,其上搭载的主要载荷为路径差分吸收激光雷达,预计两周内覆盖全球区域,能够实现昼夜连续观测 CH_4 柱浓度总量,目前发射时间仍然推迟待定。欧洲空间局的人为 CO_2 排放监测计划 (European Copernicus anthropogenic CO_2 monitoring mission: CO2M) 计划 2025 年发射 2 颗哨兵 7 号卫星,不仅提供高分辨率 ($2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$) 和高信噪比的

精准观测, 并具有 250 km 大幅宽 XCO₂ (column-averaged dry air mole fraction of CO₂)、CH₄、NO₂、SIF

(Solar-induced Chlorophyll Fluorescence)、气溶胶等多种参数的同步成像观测能力 (Rusli 等, 2021)。

表 1 全球已发射和规划(2028年前发射)的碳监测卫星信息汇总

Table 1 Summary of GHG monitoring satellites (Launched, or to be launched before 2028)

卫星或载荷	国家或机构	发射时间/年	轨道	精度		幅宽/km	空间分辨率
				CO ₂ /ppm	CH ₄ /ppb		
SCIAMACHY	欧盟	2002	772 km	16	—	960 km	32×60 km ²
GOSAT	日本	2009	666 km	<4	34	N/A (640 km)	φ10.5 km
GOSAT-2	日本	2018	613 km	1	5	N/A (632 km)	φ9.7 km
GOSAT-GW	日本	>2023	666 km	N.A	N.A	911 km/90 km	10 km/1—3 km
OCO-2	美国	2014	705 km	1	—	10.6 km	1.29×2.25 km ²
TanSat	中国	2016	700 km	1—4	—	20 km	1×2 km ²
Sentinel-5P	欧盟	2017	824 km	—	5.6	2600 km	7×5.5 km ²
Sentinel-5	欧盟	2022~	8175 km	—	N.A	2715 km	7×7 km ²
FY-3D	中国	2017	836.4 km	1—4	—	—	φ10 km
GF-5	中国	2017	708 km	1—4	—	N/A (800 km)	φ10.5 km
OCO-3	美国	2018	394 km	1	—	16 km	~4 km ²
Microcarb	法国	2022	650 km	0.5-1	—	13.5 km	2×2 km ²
MethaneSAT	美国	2022	N/A	—	2	260 km	100×400 m ²
Metop-SGA	欧盟	2023~	830 km	N.A	N.A	2670 km	7×7 km ²
FengYun-3G	中国	2022~	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
GEOCARB	美国	2022	35400 km	1.2	10	3000 km	3×6 km ²
DQ-01	中国	2022	705 km	N.A	N.A	N.A	N.A
CO2M	欧盟	2026	602 km	0.7	10	>250 km	4 km ²
DQ-02	中国	2023	705 km	N.A	—	>100 km	3 km
MerLin	法国	2024	500 km	—	22	—	φ50 km
ASCENDS	美国	2025	400 km	—	1	N.A	N.A
Carbon Mapper	美国	2023	400 km	N.A	N.A	18	30 m
GHGSat	加拿大	2016, 2020, 2021	520 km	4	18	12	25 m

随后, 日本发射了 GOSAT 系列卫星用于温室气体观测。GOSAT (Greenhouse Gases Observing Satellite) 在 2009-01-23 成功发射, 至今运行良好。它是第一颗专门用于大气温室气体 CO₂ 和 CH₄ 探测的卫星, 在全球尺度上实现了对大气 CO₂ 和 CH₄ 的高光谱分辨率的探测。GOSAT 搭载的星载仪器包括热红外及近红外探测器 TANSO (Thermal and near infrared sensor for carbon Observation), TANSO-FTS 主要探测地表反射的太阳短波红外辐射 SWIR (short-wavelength infrared), 以及地表和大气发射的热红外辐射 TIR (Thermal infrared), 能对全球的 CO₂、CH₄、N₂O 和 O₃ 进行探测 (Yokota 等, 2009)。TANSO-CAI 观测波段在紫外到近红外区域有 4 个窄的光谱带, 主要用于排除 TANSO-

FTS 视场中的散射干扰, 修正 TANSO-FTS 光谱数据中云和气溶胶造成的影响。GOSAT-2 卫星于 2018-10-29 在日本种子岛航天中心发射成功, 作为 GOSAT-1 的直接继承者, GOSAT-2 卫星旨在利用更高性能的传感器探测更高精度的温室气体浓度数据。由于 GOSAT 和 GOSAT-2 只能获得离散空间采样, 其对空间的连续探测能力明显不足, 为了提高对大气温室气体探测的空间覆盖能力, 2019-12 立项研制的 GOSAT-GW 放弃了傅里叶变换光谱探测体制, 采用了与 OCO、Sentinel-5 以及 TanSat 相同的光栅分光光谱探测模式。

美国在温室气体遥感探测方面走在国际前列。美国第一颗碳卫星 OCO (Orbiting Carbon Observatory) 由于载荷火箭出现故障在 2009 年发射失败, 时隔

5 a 后于 2014-07 成功发射了第二颗 CO₂ 观测卫星 (OCO-2), 其搭载的有效观测载荷是综合 3 个通道的高分辨率光栅光谱仪 (Crisp 等, 2004; Janssens-Maenhout 等, 2011)。OCO-2 与日本 GOSAT 卫星一样, 除了对地观测, 还能够进行耀斑观测及特定目标观测。星下点像元直径约 2.5 km, 能够获得比 GOSAT 更多的晴空像元, 提供更多的有效观测数据。NASA 在 2014-12-08 首次发布了 OCO-2 第 1 张 2014-10-01 至 2014-11-11 的全球 CO₂ 浓度分布图。此外, 根据 Frankenberg 等 (2011) 研究成果, NASA 给出了同时期全球的荧光分布, 得到全球植被光合作用分布。作为延续 OCO-2 观测的 OCO-3 于 2019-05-04 发射搭载到国际空间站 (ISS)。与 OCO-2 相比, OCO-3 观测范围更大, 以空间站的轨道绕地球运行, 每个轨道能够在不同时间对任意一点进行目标和 Snapshot 观测, 同时可以在从黎明或黑夜一天周期内观测获取 CO₂ 和 SIF 数据, 极大地扩展了局地 and 点源目标编程观测能力 (Taylor 等, 2020)。2021-12-01 美国白宫发布了《美国空间优先框架》, 明确美国将优先支持应对气候变化行动的卫星遥感计划, 通过政府、私营和慈善机构之间的合作, 利用地球观测数据支持美国和国际社会应对气候危机。

卫星分辨率对于发电厂等点排放源的遥感探测非常重要, 为此, 加拿大和美国的商业卫星公司启动了高空间分辨率的温室气体卫星遥感探测计划。加拿大 GHGSat 公司于 2016 年、2020 年、2021 年相继发射了 3 颗 GHGSat 卫星, 可获得 25 m 分辨率、4 ppm 精度 XCO₂、18 ppb 精度 XCH₄ 的温室气体遥感数据, 为点源排放的高精度估算提供了新的解决方案。美国 Planet 公司也将于 2023 年发射两颗 Carbon Mapper 卫星, 将采集 30 m 分辨率、18 km 幅宽、400—2500 nm 范围的高信噪比光谱数据, 可提供高精度的 XCO₂、XCH₄ 温室气体科学数据, 能够探测源强为 50 kg/h CH₄、300 t/h CO₂ 的排放源, 该探测能力能够实现全球 90% 以上的煤炭发电厂的有效监测。

中国近年来在温室气体遥感探测方面也突飞猛进, 2016-12-22 中国在酒泉卫星发射中心成功发射首颗碳卫星 (TanSat)。首颗碳卫星工程由科技部立项、国家高技术发展计划支持, 是中国自主研发的全球大气二氧化碳观测实验卫星。卫星发射后, 其数据应用在全球大气 CO₂ 浓度、叶

绿素荧光监测等方面取得系列重要成果。利用中国科学院大气物理研究所自主研发的碳反演系统 IAPCAS (Institute of Atmospheric Physics Carbon retrieval and inversion Algorithm System), 反演获取了中国碳卫星大气 CO₂ 柱平均干空气混合比 XCO₂ (Yang 等, 2018), 采用 TCCON (Total Column Carbon Observing Network) 地面站观测资料对 TanSat 卫星 XCO₂ 反演产品进行了验证, RMSE 为 1.41 ppm, 远超设计时的 4 ppm 精度指标 (Yang 等, 2020a, 2020b, 2021)。Wang 等 (2021b) 利用 TanSat 卫星 XCO₂ 遥感产品, 基于南京大学的 GEOS-Chem 4D-Var 碳同化系统, 估算了 2017-04—2018-03 的全球 NEE, 发现全球 NEE 为 -3.46 Pg C/a, 明显高于先验估计结果。日光诱导叶绿素荧光反演 (SIF) 是中国碳卫星的一个重要应用。利用 TanSat 卫星 O₂-A 通道的 0.04 nm 光谱分辨率的数据成果反演了全球高精度 SIF 科学数据产品, 准确捕获了全球植被光合时空动态, 与 OCO-2 卫星同类产品交叉验证的 RMSE 误差为 0.168 mw m⁻²·nm⁻¹·sr⁻¹ (Du 等, 2018, 2021; Yao 等, 2021)。2017-11-15, 中国在太原卫星发射中心成功发射“风云三号 D”气象卫星 (FY-3D)。FY-3D 气象卫星搭载的高光谱温室气体监测仪 (GAS) 通过使用短波红外干涉仪 (SWIR) 来测量全球的 CO₂ 和 CH₄ 柱浓度。2018-05-09, 高分五号卫星 (以下简称 GF-5) 在太原卫星发射中心成功发射。作为 GF-5 卫星搭载的温室气体监测仪 GMI (Greenhouse gases Monitor Instrument) 的主要功能是定量监测 CO₂ 和 CH₄ 的全球浓度分布变化, 验证结果表明 GF-5 卫星 XCO₂ 反演精度 0.67%、优于 1% 的设计指标 (Shi 等, 2021; Ye 等, 2021)。Chen 等 (2021) 利用差分光学吸收光谱 (DOAS) 方法进行了对流层 NO₂ 柱浓度反演, 展示了基于 GF-5 卫星 EMI 载荷的对流层 NO₂ 柱浓度反演结果, 验证表明 EMI NO₂ 反演结果具有较高的精度, 与 OMI、TROPOMI 也具有较好的时空一致性和较低的相对偏差。未来计划发射的风云三号 08 星上搭载的高光谱温室气体监测仪, 通过对近红外、短波红外谱段 (0.76 μm、1.61 μm、2.06 μm、2.3 μm) 连续高精度、高光谱分辨率、高空间分辨率和高采样率观测, 实现全球大气温室气体 (CO₂、CH₄ 等) 的高精度定量反演。2017 年中国大气环境监测卫星 (DQ-1) 正式批复立项, 目前正处于研制进程当中, 预计 2022 年发

射。大气环境监测卫星是国际首颗搭载CO₂探测激光雷达的卫星,在国际上首次采用双体制激光,具有CO₂和高光谱探测能力,将填补该领域国际空白。2017-09中国启动高精度温室气体综合探测卫星(DQ-2)的立项工作,目前该卫星正处于研制过程中。大气环境监测卫星与高精度温室气体探测卫星发射后可与风云三号气象卫星、高光谱观测卫星组网,为支撑新时期全球气候变化、节能减排、环境外交与履约、污染防治等生态环境管理工作的主要目标,构建具备主动激光、紫外、可见光、红外等主要观测手段的环境监测天基平台。

2.3 生态系统碳源汇卫星估算进展与展望

根据GCP2020年报告(图1)(Friedlingstein等,2020),2010年—2019年全球碳排放强度为 10.88 ± 0.90 Pg C/a,其中陆地与海洋生态系统吸收碳汇强度为 5.92 ± 1.09 Pg C/a,占比54.4%,余下 5.10 Pg C/a排放到大气、并导致过去10 a大气CO₂浓度年均增加2.4 ppm。陆地生态系统碳汇具有明显的时空变化,对其精准估算是当今全球碳循环研究的前沿问题之一。生态系统碳汇估算主要包括3种方法。

(1) 基于温室气体浓度探测的同化反演方法,也就是“自上而下法”,即采用大气化学传输模式,结合地基或卫星观测的大气CO₂浓度数据来反演区域碳通量(Basu等,2013;Deng等,2014;Liu等,2021)。利用GOSAT、OCO-2等温室气体卫星观测反演的XCO₂时间序列数据,可以提取XCO₂时空异常变化信息,且XCO₂异常变化与极端气候有关,极端气候影响了地球生态系统的碳呼吸进而导致大气CO₂浓度异常升高的时空分布(He等,2017);GOSAT和MODIS植被指数等多源卫星观测数据的处理分析发现中国南部近年来(2003年—2015年)植被生长季陆地生态碳吸收的增强趋势(He等,2020)。这些研究表明,卫星遥感XCO₂能够定性反映地表植被碳汇时空强度信息。但是,自上而下的大气化学传输模式估算结果不确定性还非常巨大(Maksyutov等,2013;Peylin等,2013;Jiang等,2016;Wang等,2020)。

(2) 利用生态过程模型模拟方法估算陆地和海洋生态系统碳汇。由于不同模型的物理机制、数据源以及参数设定不同,估算结果不确定性

很大(Le Quéré等,2016;Piao等,2013)。以陆地生态系统碳汇模型估算的结果为例(图2),不同动态植被模型估算结果差异巨大,16个不同模型模拟的2007年—2018年全球陆地生态系统碳汇强度存在0.28—5.82 Pg C/a的巨大变幅(Friedlingstein等,2020)。在国家尺度上不确定性更是巨大,如Wang等(2020)估计2010年—2016年,中国陆地生态系统碳汇强度为 1.11 ± 0.38 Pg C/a,约等于在此期间估算的中国每年人为排放量的45%,而Jiang等(2016)估计2006年—2009年中国陆地生态系统碳汇强度为0.33 Pg C/a,二者相差3.4倍。

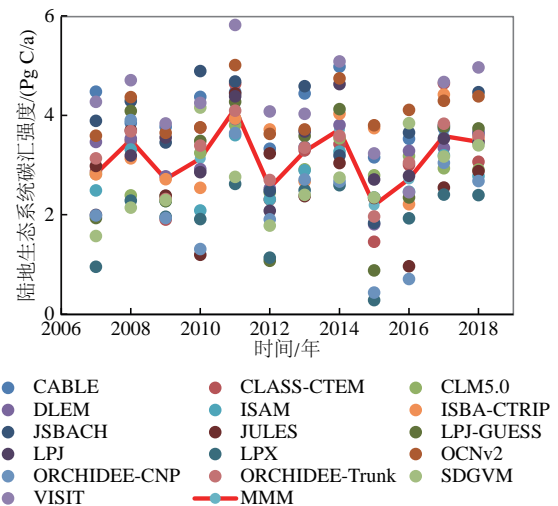


图2 基于16种动态植被模型模拟的2007年—2018年全球陆地生态系统碳汇强度模拟数据(Friedlingstein等,2020)

Fig. 2 Simulations of global terrestrial carbon sink from 2007 to 2018 based on 16 dynamic vegetation models (Friedlingstein et al., 2020)

(3) 基于数据驱动的机器学习模型的碳源汇估算方法。当前国际通量观测网络、海洋CO₂走航现场观测,为全球碳循环研究积累了大量实测数据,且卫星定量遥感也提供了全球陆地、海洋、大气的丰富定量遥感产品,为尺度扩展提供了可能。特别是以深度学习为代表的机器学习方法为地球大数据驱动的全球碳源汇估算提供新的研究范式。Jung等(2020)采用机器学习方法和遥感等数据,将站点通量观测数据扩展到全球,生成时空连续的FLUXCOM碳通量数据产品。Huang等(2020)基于多源遥感数据和全球土壤呼吸地面观测数据集,构建了数据驱动模型,生产了2000年—2014年全球1 km分辨率陆地生态系统土壤呼吸产

品。Zeng等(2020)基于全球通量观测资料,采用机器学习方法建立了陆地生态系统碳通量估算模型,结合MODIS陆表定量遥感产品和气象资料,研发了1999年—2019年全球 0.1° 网格、10 d分辨率的陆地生态系统碳通量产品,发现过去20 a全球陆地总初级生产力GPP、生态系统呼吸RECO、净生态系统生产力NEP年均分别增加 0.49 Pg C/a 、 0.33 Pg C/a 、 0.14 Pg C/a 。然而,现有数据驱动产品的拟合能力还有待进一步提高,不同方法的碳通量产品之间难以统一,依然无法通过数据产品闭环碳循环。因此,迫切需要综合当前模型与数据驱动方法的优势,发展新的高精度生态系统碳源汇监测方法,降低生态系统碳汇估算不确定性,完善全球、国家和区域等不同空间尺度的生态系统碳收支定量计算方法,提供高精度、精细分辨率、长时间序列的生态系统碳源汇资料。

当前,全球碳源汇的巨大不确定性既源于碳循环模式的理论和认知缺陷,又包括缺乏精细时空分辨率的观测数据(刘良云等,2021)。由国际地圈—生物圈计划(IGBP)、全球环境变化人文因

素计划(IHDP)和世界气候研究计划(WCRP)共同发起的全球碳计划(GCP),其目标就是深入全面地理解全球碳循环,并为碳排放相关政策的制定提供科学依据,其中关键是准确量化全球碳循环格局和变率(Global Carbon Project, 2003)。在中国2010年启动的全球变化研究国家重大科学研究计划、2016年启动的国家重点研发计划“全球变化及应对”专项中,生态系统碳循环是核心任务之一。2017年立项的国家重点研发计划项目“全球生态系统碳循环关键参数立体观测与反演”,其核心任务就是研制覆盖全球、参数完备、时空分辨率精细、连续一致的碳循环关键参数产品,共包含陆地植被、土壤、海洋等3大类24种碳循环关键参数的长时间序列空间观测产品GLOCC(Global Land and Ocean Carbon Cycle products)(刘良云等,2021)。图3展示了24种GLOCC产品在生态系统碳循环过程中的位置和相互关系,为陆地与海洋生态系统碳源汇的精细、动态评价提供了重要基础数据产品。

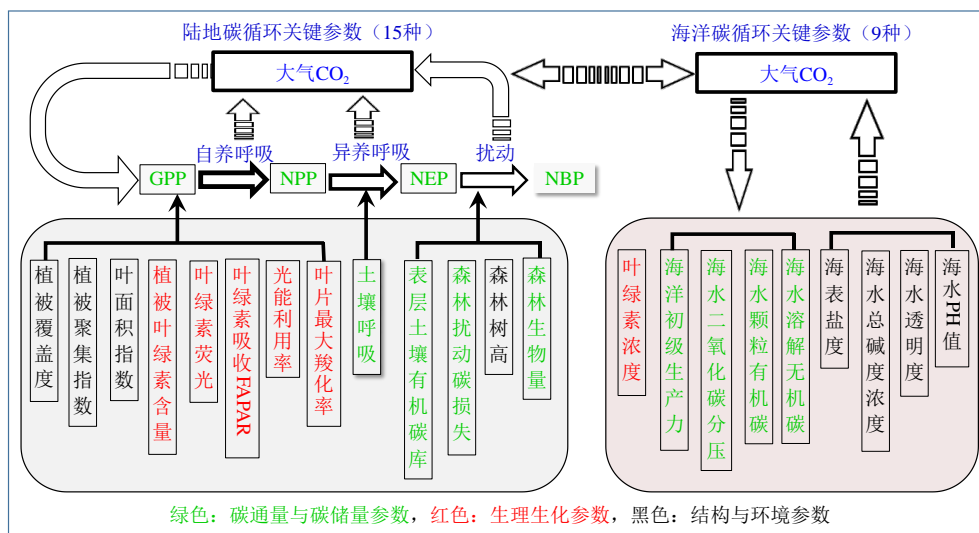


图3 24种碳循环关键参数产品及其对碳源汇估算贡献关系图

Fig. 3 The 24 Global Land & Ocean Carbon Cycle (GLOCC) products and their relationships

2.4 人为源碳排放卫星监测研究

为评估世界各国协议的全球温室气体减排目标实现状况,我们需要多种手段调查跟踪评估人为排放减排效果。遥感卫星作为对地观测的重要手段,是实现大范围、长时序稳定而真实的人为源碳排放检测的重要平台。

近十多年来发射了一系列温室气体卫星,提

高了大气 CO_2 遥感观测精度,推进了温室气体的卫星遥感应用。大量研究已经证明通过大气温室气体(GHG)浓度变化检测分析能够定量评估人为温室气体排放(Zhao等,2012; Buchwitz等,2017; Zhao等,2012; Broquet等,2018; Buchwitz等,2017),满足人为温室气体排放定量监测需求已经成为温室气体卫星遥感观测技术的重要发展方向。

利用卫星数据监测局地源汇, 卫星探测必须能够监测到与当地源汇变化有关的信息, 并将其与大气传输的贡献区分开来。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, CO₂和CH₄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指标尚不能满足反演区域尺度通量的需求。Chevallier等(2014)指出, 反演区域CO₂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CO₂和CH₄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需求的有效途径。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需求的卫星数据集, 除了卫星探测技术的提高以及组网观测外, 还需要卫星XCO₂以及XCH₄反演算法精度的提高。

化石燃料不含放射性碳而其他CO₂释放源包含放射性碳, 从而导致大气中CO₂的¹⁴C浓度具有可测量损耗, 因此, ¹⁴C观测仍是将大气中人为CO₂排放与自然通量信号分离的最佳方法(Basu等, 2016, 2020)。然而, ¹⁴C的全球覆盖连续监测目前无法实现。2017年底欧盟哥白尼监测和验证支撑(MVS)能力建设计划启动, 该计划为有史以来最大的用于监测动态地球的空间环境计划(Pinty等, 2019)。MVS计划旨在以空间观测技术和其他数据源作为整体解释, 将人类活动及其排放和温室气体浓度的大气模式结合, 提高温室气体排放清单的质量, 更精确地评估人类活动对气候变化的影响。然而, 当前的基准本底观测、空间观测以及排放清单在空间和时间尺度都无法完全满足MVS的支撑能力建设需求(Pinty等, 2019)。GOSAT、OCO-2和OCO-3卫星在观测仪器参数设计时更多地关注通过模型数据同化以减少全球碳平衡估算不确定性的应用, 并没有重点考虑区域人为排放和大型排放点源的检测。然而在卫星发射后的应用研究发现卫星观测特别是有着高分辨率的OCO-2

数据(Nassar等, 2017; Eldering等, 2017)在定量分析来自区域、城市和点源的人为碳排放中显示了巨大的应用潜力, 将有力支持全球人为碳排放的评估以及排放清单的对比验证。许多研究利用GOSAT和OCO-2卫星观测反演的XCO₂/XCH₄在空间和时间上的变化, 通过对比分析, 结合区域模型模拟, 定量评估了区域、大型城市、化石燃烧电厂以及生物质燃烧的排放(Kiel等, 2021)。这些研究一方面探讨了卫星数据驱动的人为排放定量检测方法; 另一方面, 揭示了人为排放引起的XCO₂/XCH₄增量及其与排放量的关系, 并对比排放清单数据(EDGAR和ODIAC), 验证了卫星观测检测人为排放能力, 同时评价了排放清单数据的不确定性。结果显示了GHG卫星观测在人为排放定量评估的能力, 同时也指出了为实现区域/点源人为排放的监测卫星观测技术所面临的挑战。

在区域尺度上, 以美国东部、欧洲中部、亚洲东部等城市集聚地区, 利用GOSAT和SCIAMACHY的XCO₂和XCH₄数据, 通过对象区域与背景区域的XCO₂反差值, 结合模型模拟的对比验证, 研究表明卫星观测能够定量/半定量评估人为排放(Keppel-Aleks等, 2013; Schneising等, 2013; Hakkarainen等, 2016; Eldering等, 2017; Wang等, 2018; Hakkarainen等, 2019)。然而, 卫星定量评估的准确性还有待提升, 应用GOSAT和OCO-2观测的XCO₂研究结果指出, 亚洲东部区域卫星观测与模型模拟的不一致性在22%, 略高于国家排放清单数据15%的不确定性(Janardanan等, 2016)。另外, GOSAT和OCO-2检测到人为排放活动的急剧减少可以引起大气CO₂浓度2—3 ppm的降低(Lei等, 2017; Buchwitz等, 2021), 显示了卫星能够检测人为排放控制效果的潜力。基于SCIAMACHY、GOSAT观测数据(2003年—2014年), 应用数据驱动的对比方法定量检测美国中央谷及南部、阿拉伯2个油田(Azerbaijan and Turkmenistan)CH₄排放, 对比排放清单数据(EDGAR), 定量分析了排放清单的不确定性, 结果指出EDGAR低估了区域CH₄的排放(主要来自油气/牲畜排放)(Buchwitz等, 2017)。以美国、中国和欧洲为研究区域, 通过GOSAT观测数据与人为排放清单ODIAC数据的神经网络分析发现, 在大型城市卫星估算结果低于ODIAC排放值, 指出了GOSAT数据在高排放点源区的不确定性(Yang等, 2019)。上述研究结果

表明,虽然GOSAT和OCO-2观测反演的XCO₂数据精度并不能完全满足模型数据同化等要求,但通过其时空相对变化对比分析可以监测区域碳排放,温室气体卫星遥感技术在验证国家尺度化石燃料人为排放控制政策效果中有着可期待的应用潜力。

大型城市和火电厂的碳排放是区域人为排放的主要贡献源。利用GOSAT观测数据,通过排放区与周边背景区对比,发现大型城市如美国洛杉矶城市、韩国首尔、印度孟买等城市XCO₂高于周边3 ppm以上(Kort等,2012; Shim等,2019)。对比背景的XCO₂增量可以跟踪其时间变化,在95%置信度可以检测到洛杉矶0.7 ppm的变化,对应于排放量的22%变化(Kort等,2012)。而利用OCO-2观测(2014年秋季到2015年冬季)发现,美国洛杉矶XCO₂比周边高4.4—6.1 ppm,伊苏尔(Yasur)火山则有3.4 ppm增量,显示了OCO-2对人为和自然排放源的高分辨率和高敏感的观测能力(Schwandner等,2017)。应用OCO-2进行美国点源排放检测分析结果指出,在一些特定条件下,OCO-2能够检测大型单体火电厂的碳排放;进一步结合模型模拟分析后指出,通过卫星组网观测优化点源CO₂观测,加密排放源及其周围的卫星观测,检测大型单体电厂的排放,可以提供一种验证查明排放清单数据偏差的手段(Nassar等,2017)。

另一方面,研究也指出了背景和区域自然生态系统对碳通量的影响。在尼罗河三角洲地区,利用OCO-2观测反演的XCO₂和SIF数据发现,XCO₂增量的季节变化与农田生态系统碳通量变化有关(Shekhar等,2020)。在中国长三角地区,植被碳通量对CO₂增量的影响达到了20%或以上,研究指出确定来源于化石燃料排放的浓度增量时需要考虑植被吸收/排放引起的背景浓度变化(叶函函等,2020)。

协同利用人为排放示踪气体成分的观测,已成为解决卫星人为排放定量估算精度改善的有效途径。通常,点源目标的大气CO₂略高于背景CO₂浓度,这使得由跟踪点源排放的大气CO₂烟羽路径成为定量人为排放的机遇和挑战。NO₂和CO等大气污染物与人为CO₂具有相同的来源,因而可以指示人为CO₂排放的变化,实现对人为源碳排放的优化计算。利用CO₂排放与大气污染NO₂的排放同源特征,将该成分作为辅助数据,确定点源排放的

CO₂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CO₂通量,由此估算的人为排放的不确定性在23%—72%(Reuter等,2019);同时结合卫星观测的模拟分析研究指出了CO₂和NO₂卫星同步观测的价值(Kuhlmann等,2019),Liu等(2020)基于卫星观测的NO₂数据和排放监测系统观测的CO₂和NO_x排放比值反演估算了美国火电厂的CO₂排放;Nathan等(2018)利用站点大气CO和CO₂数据优化计算了美国印第安纳波利斯人为碳排放;Boschetti等(2018)利用欧洲IAGOS飞机大气观测项目的CO₂、CO和CH₄多种数据优化计算了欧洲区域人为碳排放。另外,结合CO和NO₂的浓度分析,能够识别点源燃烧的类型(生物质燃烧和工业化石燃烧)及其空间分布,但对于生物质燃烧的空间分布,排放清单并没有清晰地显示出这些特征。这个研究结论指出了CO₂结合人为活动示踪成分的分析能够应用于检测点源和区域排放时空变化趋势和不同燃烧类型的排放(Silva和Arellano,2017)。利用OCO-2的XCO₂,结合Sentinel-5/TROPOMI观测的CO和NO₂,评估2018年—2020年北半球多个大城市碳排放和污染排放的变化特征(Park等,2021),结果发现发展中国家的城市由于大型火电厂、机动车以及冬季取暖的增加以及低能效问题使其CO₂浓度年变化增量高于发达国家城市;CO₂的增加也伴随了大气污染成分CO和NO₂的增加,显示了碳排放和污染排放的同源特征。然而在发达国家的一些大城市(机动车增加以及交通的拥挤堵塞)中,虽然CO₂浓度年增趋势小,但NO₂浓度却显示了年升高趋势,指出了CO₂年变化趋势分析的不确定性。研究总结指出,未来多源卫星长时期CO₂和空气污染的同步/准同步组网观测,可以为城市碳排放和空气污染的同步控制提供数据依据,支持空气质量控制和碳减排的耦合决策(Park等,2021)。

此外,夜间灯光数据作为人类活动的直接体现,也被应用于人为源碳排放的监测。由DMSP(Defense Meteorological Satellite Program)系列卫星搭载的OLS(Operational Linescan System)传感器获取的1992年—2013年夜间灯光数据是第一批可用于反应人类活动的长时序夜间灯光遥感数据(Baugh等,2010)。但该数据存在空间分辨率低、缺少星上校准、数值饱和及晕变(Blooming)等问题(Cao等,2019)。而后,先后搭载在S-NPP(Suomi

National Polar-Orbiting Partnership) 卫星和 JPSS (Joint Polar Satellite System) 上的 VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) 传感器的日/夜波段 DNB (Day/Night Band), 具有更高质量的夜间灯光成像的能力 (Elvidge 等, 2017; Xiong 等, 2018)。较长时序、质量稳定的夜间灯光遥感数据为人为碳排放源监测提供了新的思路。化石燃料燃烧是主要的人为碳排放途径, 夜间灯光数据与能源使用密度和化石燃料燃烧碳排放密切相关 (Raupach 等, 2010), 其中, 工业生产过程中的天然气通常以火炬燃烧 (gas flaring) 的方式被消耗掉, 这种形式的燃烧产生的在夜间图像中能被直观识别, Elvidge 等 (2009) 采用 DMSP 夜间灯光数据建立了首个全球长时序天然气燃烧及燃烧效率数据集, 而后 Elvidge 等 (2013) 又提出了针对 VIIRS 夜间数据的包括工厂排放、气体燃烧等高辐射排放识别的 VIIRS Nightfire 算法, 并进一步提出了天然气燃烧点的识别算法 (Elvidge 等, 2016), 该算法通过 VIIRS 数据在全球范围内识别出 7467 个天然气燃烧排放点, 对气体体积估算的不确定性为 $\pm 9.5\%$ 。此外, VIIRS 数据和燃烧识别算法还被应用于亚马孙西部地区不可燃碳区 (Unburnable Carbon Areas) 的排放点识别 (Facchinelli 等, 2020)、天然气减排 (Elvidge 等, 2018) 等多种化石燃料燃烧监测的应用场景。在 CO_2 排放的全球估算中, VIIRS 数据表现出比 DMSP 数据更高的准确性 (Ou 等, 2015)。ODIAC (Open-source Data Inventory for Anthropogenic CO_2) 全球人为排放数据集率先在化石燃料燃烧清单产品的网格化中引入夜间灯光数据作为排放源的空间代理变量, 对清单数据进行空间扩展, 获得了 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 的高空间分辨率的人为排放清单 (Oda 等, 2018)。夜间灯光数据也在中国县级 CO_2 排放量估算 (Chen 等, 2020)、美国本土内 CO_2 排放量制图 (Oda 等, 2021)、俄罗斯黑炭排放估算 (Huang 等, 2015) 等针对国家的专题排放量估算的研究中, 作为碳排放因子出现并发挥了重要作用。

综合上述, 人为排放的定量监测是未来碳卫星观测计划的核心目标。发展温室气体 (CO_2 、 CH_4) 浓度、大气污染成分 (NO_2 、 CO 等)、自然生态 CO_2/CH_4 吸收与排放、生物质燃烧排放以及火山爆发等排放的同步/准同步卫星组网观测, 提高定向 (点源目标和区域加密) 观测、高时空分辨

率的持续观测能力, 将是温室气体卫星遥感观测技术的主要发展方向。其中最引人注目的是欧洲空间局 CO_2 监测计划 (CO2M 计划), CO2M 将同步观测温室气体 (CO_2 、 CH_4)、污染物 (NO_2 、 CO)、SIF 和气溶胶, 并以卫星组网提供史无前例的观测频率、分辨率和探测精度, 推动区域源的 CO_2 、 CH_4 排放估算, 并建立服务于全球碳盘点的高分辨率碳同化系统, 提供全球 0.05° 网格的碳排放清单同化反演结果 (Rusli 等, 2021; Reuter 等, 2019; Kuhlmann 等, 2019)。

2.5 碳通量数据同化与反演研究

传统的人为碳排放和生态系统碳汇估算分别主要采用源清单、生态系统模型模拟和通量观测数据外推的方法, 即“自下而上”方法 (Bronfield 等, 2012; Gately 等, 2013)。清单方法也是碳排放源调查的主要手段, 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 (Andres 等, 2012), 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 (四维变分和卡尔曼滤波等), “自上而下”估算区域碳源汇及变化状况。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。

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系统的 CO_2 通量和湿地的 CH_4 通量 (Thompson 等, 2016; Liu 等, 2017; Palmer 等, 2019)。在这种反演过程中, 通常假定化石燃料碳排放和土地利用变化碳排放是准确的, 利用大气浓度观测数据反演优化陆地生态系统和海洋的碳通量。早期, 受全球大气 CO_2 观测数据量以及计算条件等方面的限制, 通常, 将全球分成若干区域, 如 TransCOM 计划将全球陆地和海洋分别分成 11 个区域, 事先计算好每个区域的大气传输矩阵, 通过矩阵求逆的方式, 计算每个区域每个月的碳通量 (Gurney 等, 2002; Jiang 等, 2013)。

近年来, 全球站点连续观测、飞机和高塔等 CO_2 观测数据逐渐增多, 特别是随着日本 GOSAT、

美国OCO-2/3和中国TanSat等碳卫星的发射,为全球CO₂提供了空间覆盖较高、数据一致性好、更新发布及时的CO₂柱浓度(XCO₂)产品。传统的分区大气反演方法,无法同化海量的观测数据进行高分辨率的碳通量优化。全球碳同化系统是解决这一问题的有效途径。美国NOAA于2007年建成了全球第一个面向业务运行的全球碳同化系统CT(Carbon Tracker)(Peters等,2007),该系统采用嵌套式大气输送模式(北美地区1°×1°,其他地区3°×2°),同化全球地面和飞机CO₂浓度观测数据,优化每周的全球生态系统碳通量。各国研究人员在此基础上分别建立了以欧洲CT-Europe(Peters等,2010)、亚洲CT-Asia(Kenea等,2019)和中国CT-China(Zhang等,2014)为中心的CT系统。近年来,欧洲科学家在EUROCOM(European atmospheric transport inversion comparison,2015)框架的支持下,通过多同化系统的比较,基于统一的观测数据及同化协议,力求实现区域范围内高精度碳通量估算的准确性与一致性,为评估气候影响提供有力支撑。

2010年开始,在全球变化重大科学计划项目“全球不同区域陆地生态系统碳源汇演变驱动机制与优化计算研究(2010CB950700)”支持下,中国合作自主开发了GCAS(Global Carbon Assimilation System)(陈镜明等,2015),其观测算子、同化算法和误差估计等核心算法全部自主完成(Zhang等,2015)。在中国科学院战略性先导科技专项和国家高技术研究发展计划(863计划)支持下,中国科学院大气物理研究所基于集合四维变分同化方法POD-4DVar建成了全球碳同化系统Tan-Tracker(Tian等,2014)。该系统面向中国碳卫星TanSat设计,可同化卫星和地面CO₂浓度观测数据,其空间分辨率为2°×2.5°,采用4D滑动采样提高计算效率。以上这些全球碳同化系统优化的都是地表与大气之间的CO₂通量,需要基于人为排放碳通量误差可以忽略的假设,以得到陆地生态系统与大气之间的净碳通量。

联合同化卫星和地面大气CO₂浓度、站点通量数据、遥感地表参数等数据,同时优化生态系统和人为源碳通量是全球碳同化系统的发展趋势。欧洲科学家们开发了全球碳循环数据同化系统CCDAS(Carbon Cycle Data Assimilation System),联合同化站点通量、遥感地表参数和CO₂浓度等数

据,优化生态系统模型参数和碳通量,鉴别生态模型误差特征(Scholze等,2016;Wu等,2020)。CCDAS是一个以生态模型(BETHY)为中心的变分数据同化系统,与CT不同的之处在于,CCDAS同化的观测数据种类更多,首先通过优化生态系统模型参数,再将模拟得到优化的陆地生态系统碳通量输入大气传输模型,进而实现陆一气的同步优化,而CT是直接通过对先验地表碳通量进行订正进而实现优化的陆地生态系统碳通量。因此,CCDAS相对具有较强的碳循环机理。

由于计算量大,CCDAS的空间分辨率相对较低并且同化的地面CO₂浓度观测数据相对较少。Scholz等(2016)在进行联合同化土壤水分和站点CO₂浓度观测数据的研究时,系统的空间分辨率为8°×10°(全球陆地共分为170个格点、13种植被功能类型),同化了全球10个站点的CO₂浓度观测数据和格点的SMOS L3共2 a的数据,对BETHY模型的101个参数进行了优化,发现联合同化土壤水分和CO₂浓度可以显著降低陆地生态系统净碳通量估算结果的不确定性。Wu等(2020)将CCDAS空间分辨率提高到2°×2°,同化时间窗口延长到6 a(2010年—2015年),同化了8个观测站的地面CO₂浓度和SMOS L3土壤湿度数据,提高了模拟总初级生产力(GPP)与日光诱导叶绿素荧光(SIF)的相关性。

研究表明,基于地面CO₂浓度观测数据的同化虽然观测精度较高,但是地面CO₂浓度观测数据的稀疏性限制了全球碳同化系统的空间分辨率并导致结果较大的空间不确定性,若强行提高系统空间分辨率,将造成更大的不确定性。此外,全球地面CO₂浓度观测数据发布的滞后,制约了全球碳同化系统产品的时效性,如CT系统发布的碳通量产品在时间上要滞后1—2 a。卫星XCO₂数据的不断积累和质量的不断提高,为高分辨率全球碳同化系统的构建创造了条件。卫星XCO₂产品发布的时效性(仅滞后2月)及其使用的便利程度都要大大优于站点观测数据,可保障优化的碳通量产品的时效性。

在2016年开始实施的国家重点研发计划项目“基于多源卫星遥感的高分辨率全球碳同化系统研究(2016YFA0600200)”的支持下(居为民等,2016),南京大学以GCAS系统为基础,汲取Tan-Tracker的优势,发展了GCAS-v2,将大气输送模

型的空间分辨率提高到 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ ，可联合同化多源地面和卫星观测数据（Wang等，2019，2021a；Jiang等，2021），提高了优化的碳通量产品质量，系统优化了局地化方案和卫星数据处理方案。该系统采用两步优化方案，先优化地表碳通量，然后用优化的碳通量通过正向模拟优化下一时间窗口的 CO_2 浓度初始场，保证了优化的鲁棒性，大幅提高了优化精度；引入“超级观测”方案，解决卫星XCO₂数据量过大和重复优化导致的过调问题；耦合遥感驱动的生态系统过程模型BEPS，使得同化系统不仅可以利用XCO₂数据，也可以充分利用植被参数遥感信息，如叶面积指数、聚集度指数等；通过改写代码优化计算效率，实现将同化系统分辨率从全球 $3^{\circ}\times 3^{\circ}$ 提高到了 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ ；发展了在全球碳同化系统框架下应用SIF遥感数据优化生态系统重要光合作用参数 V_{cmax} （maximum carboxylation rate）的方法。试验应用表明，GCAS-v2能更好地揭示不同地区陆地碳汇的时空分布和年际变化，揭示极端气候事件对陆地碳汇的影响（Jiang等，2021）。该系统已经具备了业务运行能力。发展能够高效融合多源观测的数据同化算法，实现XCO₂与生态（如SIF，VOD）及水文（土壤水分、总储水量）遥感数据的联合优化将是地球大数据时代全球碳同化系统的重点发展方向。

全球碳同化系统另一个重要的优化对象是人为源碳排放的时空分布。由于人为源碳排放和陆地生态系统碳通量混合，如何利用碳同化系统优化计算人为源碳排放，是科学家们力图解决的重要问题，也是实现碳中和目标的重要技术需求。发展区域高分辨率碳同化系统同化大气浓度观测数据，是进行人为源碳排放优化估算的有效手段（Council，2010；Palmer等，2018）。当前，全球多国已启动基于大气浓度观测的人为碳排放优化研究项目，如欧盟哥白尼计划（Ciais等，2015），美国 and 欧洲的大城市碳计划（Megacities Carbon Project）（Duren和Miller，2012；Kort等，2012）等。由于人为源碳排放具有显著的时空差异，对其优化计算，一方面需要发展区域高分辨率（1—10 km）碳同化系统，充分利用高频次的地面连续观测数据和高空间分辨率的碳卫星等观测数据，以更好刻画人为碳排放的时空分布；另一方面需要同化更多的指示物，仅利用大气 CO_2 浓度观测数据难以很好区分人为碳排放和生态系统碳通量的

贡献。 $^{14}\text{CO}_2$ 是理想的人为碳排放指示物，美国和欧洲等正在加强基于大气 $^{14}\text{CO}_2$ 站点观测的人为碳排放优化计算研究（Basu等，2020；Graven等，2018）。通过联合同化大气 CO_2 和 $^{14}\text{CO}_2$ 浓度观测，Graven等（2018）优化计算了美国加州人为碳排放；Basu等（2020）优化计算了2010年美国化石燃料燃烧和水泥生产的碳排放。但是，在美国和欧洲以外的其他地区 $^{14}\text{CO}_2$ 观测极度缺乏，因此无法采用这种方法优化计算人为碳排放。

近几年，人们开始探索利用卫星数据提高人为碳排放的估算精度。世界气象组织（WMO）正在积极推进全球温室气体综合信息系统（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2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）。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规模计算，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_2 、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)，以验证城市尺度的通量反演模式计算精度。

一些研究针对中国部分城市和工业区或者事件利用大气浓度观测数据优化估算人为碳排放。基于 OCO-2 卫星观测的 XCO₂, Zheng 等 (2020a) 估算了中国 46 个城市或工业区的人为 CO₂ 排放；基于 OCO-2 和 S5P 卫星分别观测的 CO₂ 和 NO₂ 浓度, Reuter 等 (2019) 估算了南京的 CO₂ 排放。上述研究主要采用高斯函数拟合的方法进行，并未结合大气输送模型详细计算不同物种的输送和扩散过程。利用全球嵌套式大气化学模型 GEOS-chem 以及卫星观测的 NO₂ 数据，结合自下而上方法估算的 CO₂ 与 NO_x 排放比值, Zheng 等 (2020b) 估算了新冠疫情期间中国人为 CO₂ 排放的变化。但是，该研究并未详细模拟不同网格之间的排放和浓度变化关系，仅通过对比基准实验和一次排放降低 40% 的敏感性实验结果确定每个网格的排放变化与对应浓度变化之间的关系，结果也并未开展独立验证。

综上所述，中国在碳通量数据同化与反演研

究有重大进展，但相比欧洲 CO2M 计划，还存在巨大差距。

3 全球碳卫星监测计划需求、现状与重点任务

全球碳盘点不仅需要卫星遥感提供高时空分辨率大气 CO₂ 等观测数据，更需要通过观测系统与同化反演系统集成，提供高时空分辨率的大气 CO₂ 的溯源解析数据，如人为碳排放、生态系统碳源汇等。

3.1 当前全球温室气体卫星遥感监测反演能力分析

包括 GOSAT、OCO-2 和中国 TanSat 等第一代碳卫星的核心目标是解决大气温室气体浓度的卫星观测技术问题。而第二代碳卫星的核心目标是服务于全球碳盘点的清单校核，从而对卫星系统提出了更大挑战，不仅要求卫星载荷系统提供宽幅、高分辨率、高精度的观测能力，还需要通过同化反演系统，监测碳通量，并区分和量化人为碳排放。因此，根据卫星科学目标与技术能力，可以将全球碳卫星分为第一代和下一代碳卫星，如表 2 所示。

表 2 下一代碳卫星与第一代性能特点与对比

Table 2 Specification of the next generation carbon satellite and comparison with the first generation

卫星	应用目标	卫星系统		
		成像能力	观测要素	XCO ₂ 精度
第一代碳卫星	大气浓度观测	窄带扫描成像(km级分辨率, 10—20 km 幅宽)或点采样	CO ₂ , CH ₄ , SIF	1—4 ppm
下一代碳卫星	清单卫星校核, 同化反演碳通量并分离人为源碳排放	宽幅、高分辨率扫描成像(km级分辨率, >200 km 幅宽)	CO ₂ , CH ₄ , NO ₂ , SIF 等	优于 1 ppm

3.2 中国下一代碳卫星的总体方案与科学需求

为了满足全球温室气体清单校核需求，需要从应用需求端牵引中国下一代碳卫星的总体方案设计。十四五国家重点研发计划“地球观测与导航”重点专项启动了“下一代碳卫星”任务，并初步确定了中国下一代碳卫星的温室气体清单校核需求目标、科学产品技术指标以及卫星组网观测能力需求，如表 3 所示。

表 3 所示的下一代碳卫星科学产品对载荷研制提出了非常苛刻的要求，如何在工程技术上平衡光谱分辨率、信噪比、空间分辨率与幅宽的制约关系存在巨大挑战。在碳卫星观测要素的遥感反演算法

研究基础上，结合当前载荷工程研制能力，初步确定了下一代碳卫星载荷技术指标，如表 4 所示。

下一代碳卫星星座需要充分利用低轨、中轨和高轨轨道优势，并实现主被动等不同探测手段相配合，以满足全球温室气体清单校核对多要素、多尺度、高时效、高精度监测数据的需求 (表 3)。在充分对比各类方案优势的基础上，重点针对全球主要经济体的高时效监测，中国科学院微小卫星创新研究院提出了基于中轨椭圆冻结太阳同步轨道的下一代碳卫星星座方案 (TanSat-2 星座)。该方案具备如下特点：(1) 轨道倾角约 116.6° (临界倾角)，满足轨道拱点“冻结”特性，将轨道远

地点设置于北半球上空, 可实现对北半球人类活动较为密集区域(包括亚洲、北美、欧洲)长时间观测; (2) 太阳同步特性, 通过对轨道倾角、半长轴、偏心率等进行多参数联合设计, 使得升交点赤经(RAAN)每天向东进动约 0.98° , 即可实现太阳同步特性, 保证每天观测的光照条件; (3) 卫星搭载宽视场温室气体监测仪、污染气体

监测仪、云与气溶胶监测仪等, 可实现多要素高精度监测; (4) 卫星具备星上自主云判能力, 可识别云覆盖区域并进行扫描路径智能规划, 有助于提升整体观测数据有效率。所设计的TanSat-2星座可包含1—3颗星, 可实现每天一次的主要经济体观测覆盖。

表3 下一代碳卫星(TanSat-2)总体方案与科学需求

Table 3 User requirements of the next-generation carbon satellite (TanSat-2)

需求	指标名称	下一代碳卫星系统技术指标
温室气体清单校核	空间分辨率	全球 $1^\circ \times 1^\circ$ 、中国 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 、典型城市 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$
	不确定度	全球、中国、典型城市分别优于15%、20%、50%
	校核能力	国别清单校核能力
碳卫星科学产品	监测要素	CO_2 , CH_4 , CO , NO_2 , SIF, 气溶胶, N_2O
	X CO_2 精度	1 ppm
	X CH_4 精度	10 ppb
	SIF精度	$0.25 \text{ mw m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$
	XCO精度	10%
	NO_2 精度	$1.0 \times 10^{15} \text{ molecules/cm}^2$
	气溶胶光学厚度	$0.05 \pm 15\%$
卫星观测能力	空间分辨率	全球 $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$ 、热点地区 $0.5 \text{ km} \times 0.5 \text{ km}$
	时间分辨率	1 d
	幅宽	1000 km
	卫星寿命	8 a

表4 下一代碳卫星载荷的关键技术指标方案

Table 3 Preliminary spectral specifications (spectral range, resolution, interval and signal-to-noise ration) of the key payloads on the next-generation carbon satellite (TanSat-2)

参数名称	NO_2 带	O_2A 带	弱 CO_2 带	强 CO_2 带	CH_4 带
探测对象	NO_2	O_2 , SIF	CO_2 , CH_4	CO_2	CH_4 , CO
波长范围/ μm	0.4—0.49	0.747—0.773	1.590—1.675	1.990—2.095	2.305—2.385
带宽/nm	90	26	85	105	80
光谱分辨率/nm	0.6	0.12	0.3	0.35	0.25
光谱采样率	3	3	3	3	3
信噪比@参考辐亮度/ (photons/s/nm/cm ² /sr)	800@2.4E13	620@6.4E12	520@2.1E12	480@1.8E12	150@8.5E11

尽管TanSat-2卫星在观测要素、观测精度、时空分辨率等方面相比第一颗TanSat卫星有巨大的飞跃和进步, 但卫星成像监测也受到轨道、天气等诸多因素的影响, 无法实现连续动态观测、且分辨率不高。而点源碳排放和城市碳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要求, 仅凭卫星遥感难以取得满意效果。因此, 必须结合地基监测、航空遥感等多源数据,

才能实现点源、城市、国别尺度的温室气体排放的精确估算(Filges等, 2015)。目前, 生态环境部、中国气象局、中国科学院等机构正在组织和实施大范围地基温室气体观测任务, 已初步建成、并正在逐步完善国家温室气体观测网络, 温室气体卫星星座与地基网络的协同, 对于为中国碳达峰、碳中和行动成效的科学评估与碳排放核算提供了重大机遇。

3.3 中国碳卫星科学计划重点任务

碳卫星科学计划目标是服务2028年全球碳盘点和碳中和国家需求,提供可靠监测数据、关键技术、方法体系和科学产品,其核心任务就是人为碳排放与生态系统碳源汇。因此,需要集成当前温室气体卫星、陆地卫星、海洋卫星等多源数据,提供高精度、高时效性、高分辨率温室气体溯源(碳排放与碳源汇),主要任务包括如下3个方面:(1)多尺度碳排放清单的卫星遥感监测(全球/国家、城市和点源尺度);(2)全球土地利用碳排放的卫星遥感监测;(3)全球生态系统碳源汇的卫星遥感监测。

为了实现面向碳盘点的卫星监测目标,需要优先部署如下7个方面的任务。

(1)下一代碳卫星研发与运行。服务于全球和重点区域碳监测需求,研制宽视场、高分辨率、高精度的大气CO₂监测载荷,特别是为了满足0.5 ppm大气CO₂监测需求,需要创新载荷成像体制,提供高精度的辐亮度光谱观测数据。其次,服务于高精度大气CO₂卫星反演需求,研制配套的气溶胶、NO₂卫星监测载荷。此外,还需要研发高效费比的卫星星座系统,实现优于一天的全球普查和热点地区详查,提供高性能、长寿命的卫星姿控、定标、温控、测控、通讯等系统。最后,前瞻性部署在轨定标技术研究,形成碳卫星星座数据一致性校正系统。

(2)高精度碳监测卫星遥感科学共享产品研发。针对中国下一代碳卫星及载荷指标特点,结合国内外多源卫星数据,开展碳卫星科学产品关键技术研究,包括全球高时空分辨率、高精度的大气XCO₂产品算法、大气气溶胶产品算法、大气NO₂浓度产品算法、SIF卫星产品算法等,研究气溶胶、地表反照率等先验知识获取及对XCO₂反演精度的误差传递模型,突破高气溶胶条件下、低反照率背景的大气CO₂高精度监测关键技术,形成业务化的全球产品快速生产能力;加强地基碳监测网络建设,开展上述科学卫星产品真实性检验关键技术研究,形成相关科学产品的真实性检验能力。

(3)全球多尺度碳排放清单卫星校验技术。面向全球碳盘点的需求,开展高时空分辨率、高精度、高时效性的碳排放清单的卫星校验方法研

究。发展高分辨的全球碳同化理论与技术,自主构建嵌套式高分辨率碳同化系统(全球1°×1°、中国30 km、东部地区10 km、重点城市群3 km),可通过同化多源地面和卫星观测数据(CO₂和NO₂等),利用污、碳同源特点,准实时优化地表CO₂和NO₂通量,提供高时空分辨率的全球、国家、区域的碳排放清单数据集;发展数据驱动的碳排放清单卫星校验方法,融合卫星观测大气CO₂浓度、日光诱导叶绿素荧光、植被指数、夜间灯光等,深度挖掘时间序列的多源卫星数据,实现高精度、高时效性的全球碳排放清单模拟,并开展全球碳排放清单的校验、评估工作。

(4)重要点源碳排放卫星监测技术。面向重要点源目标碳排放卫星监测的需求,采用高斯羽流模型等先进方法,融合高时空分辨率的风场数据以及精细分辨率的CO₂、CH₄等温室气体卫星产品,建立点源排放综合监测与模拟系统,形成温室气体扩散动态模拟能力,实现利用卫星观测大气温室气体数据量化点源排放量的高精度估算目标,并形成业务化运行能力。此外,还需要开展不同排放强度点源碳排放估算的不确定性研究,评估先验风场数据、大气XCO₂卫星数据的观测精度、时空分辨率等因素对点源碳排放估算的影响,通过模型和先验数据优化降低点源碳排放监测的不确定性。

(5)全球生态系统碳源汇卫星监测。面向全球碳盘点和国家碳中和需求,发展高时空分辨率、高精度、长时间序列的全球生态系统碳通量监测技术。利用碳监测卫星数据,研究“自上而下”的全球生态系统碳源汇监测技术,建立嵌套式高分辨率的陆地生态系统碳同化系统,提供高分辨率的生态系统碳通量同化数据。发展遥感大数据驱动的陆地生态系统碳通量估算方法,建立陆地生态系统碳循环关键参量高时频、高精度、全要素的碳源汇监测产品与核算方法;研发全球/区域陆地生态系统碳源汇核算服务平台,开展全球/区域碳中和进程监测评估,揭示陆地生态系统碳源汇变化特征及其成因,明晰不同省市生态系统碳汇“中和”人为碳排放的潜力,为全球碳盘点和双碳目标的实现提供科学支撑。

(6)全球土地利用碳排放卫星监测。土地利用碳排放是仅次于化石燃料燃烧的第二大碳排放源,也是碳监测卫星的“自上而下”排放清单校

核的不可或缺的基础数据,需要面向全球碳盘点和国家碳中和需求,发展高时空分辨率、高精度、长时间序列的全球土地利用碳排放监测技术。研发以变化检测方法为核心的地表覆盖变化专题数据产品,精确监测地表覆盖变化的类型和相应的面积;通过对森林类型和森林空间结构的直接测量,准确估算森林覆盖区域土地利用方式变化前地上碳储量;发展地表覆盖变化的土地利用碳排放监测方法,建立全球地表覆盖变化的碳排放估算的方法体系,提供长时间序列、高精度、高时空分辨率的全球土地利用碳排放科学数据,准确评估卫星观测记录以来的全球地表覆盖变化的碳排放。

(7) 碳卫星科学计划项目集成与国际合作。围绕全球碳盘点和国家碳中和战略对空间信息技术的需求,系统研究基于卫星遥感的“可测量、可报告、可检查”核查手段,集成卫星遥感、模型同化、遥感大数据等,开展全球碳盘点的科学支撑能力建设,形成支持全球/区域碳中和进程监测评估的方法体系,构建具备统一时空基准、精度和分类标准的碳卫星数据库和知识库。研发统筹国内外碳卫星数据资源的存算一体化的大数据分析平台,实现碳卫星数据产品的高效、快捷、可控、可回溯的国际化服务能力。并建设与国际主要碳观测和碳分析机构的数据交换网络,推广碳卫星科学计划项目数据的国际合作与应用推广,开展面向发展中国家的碳卫星数据应用分析培训。

4 结 语

面向全球碳盘点和中国双碳目标需求,需要利用卫星遥感、大数据、碳同化等先进技术和方法,实现高时空分辨率、高精度、高时频的大气温室气体浓度监测,并提供高精度、高分辨率的人为碳排放和生态系统碳源汇科学数据,阐明大气温室气体的来源、并有效区分与量化人为源和自然源的通量贡献,建立全球、国家和热点区域的温室气体排放的MVS技术体系。为此,中国碳盘点卫星遥感研究尚需在如下几个方面取得突破。

(1) 在技术上,将形成宽刈幅、高分辨率、高精度的大气CO₂、CH₄卫星自主监测体系,提供高精度、高时空分辨率的大气温室气体,主要包括:CO₂和CH₄,以及协同观测产品,如NO₂和SIF。

(2) 在方法上,通过融合大气温室气体、SIF、NO₂等卫星数据和地基温室气体观测网络数据,发展基于碳同化系统和数据驱动的高分辨率自然生态系统碳通量和人为碳排放空间估算新方法,建成人为源排放和生态系统碳源汇计算方法,支撑全球碳盘点和碳中和进程核查。

(3) 在科学上,加强温室气体浓度不断攀升情景的全球陆地与海洋生态系统碳源汇时空变化监测与驱动机制研究,为阐明全球变暖与温室气体排放的耦合关系、生态系统对气候变化和人类活动响应研究以及地球系统模式的情景模拟等提供科学支撑。

(4) 在体系上,要打通减污降排,统筹资源环境和碳卫星监测能力。卫星发射前,需要加强端到端的全应用链路仿真研究,建立碳卫星立体监测的观测系统仿真实验系统OSSE(Observing Systems Simulation Experiment),同步开展卫星论证、研制和应用研究;卫星发射后,需要重视国际合作、统筹国内外卫星资源,并发展国际认可具有知识产权的人为碳排放与全球碳源汇评估方法体系,提供全球碳盘点的中国卫星遥感监测数据,维护中国在碳核查中的核心利益。

参考文献(References)

- Andres R J, Boden T A, Bréon F M, Ciais P, Davis S, Erickson D, Gregg J S, Jacobson A, Marland G, Miller J, Oda T, Olivier J G J, Raupach M R, Rayner P and Treanton K. 2012. A synthesis of carbon dioxide emissions from fossil-fuel combustion. *Biogeosciences*, 9(5): 1845-1871 [DOI: 10.5194/bg-9-1845-2012]
- 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 CO₂ fluxes estimated from GOSAT retrievals of total column CO₂. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(17): 8695-8717 [DOI: 10.5194/acp-13-8695-2013]
- Basu S, Lehman S J, Miller J B, Andrews A E, Sweeney C, Gurney K R, Xu X M, Southon J and Tans P P. 2020. Estimating US fossil fuel CO₂ emissions from measurements of ¹⁴C in atmospheric CO₂. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117(24): 13300-13307 [DOI: 10.1073/pnas.1919032117]
- Basu S, Miller J B and Lehman S. 2016. Separation of biospheric and fossil fuel fluxes of CO₂ by atmospheric inversion of CO₂ and ¹⁴CO₂ measurements: observation system simulations. *Atmospher-*

- ic Chemistry and Physics, 16(9): 5665-5683 [DOI: 10.5194/acp-16-5665-2016]
- Baugh K, Elvidge C, Ghosh T and Ziskin D. 2010. Development of a 2009 stable lights product using DMSP-OLS data. Proceedings of the Asia-Pacific Advanced Network, 30: 114-130 [DOI: 10.7125/APAN.30.17]
- Boschetti F, Thouret V, Maenhout G J, Totsche K U, Marshall J and Gerbig C. 2018. Multi-species inversion and IAGOS airborne data for a better constraint of continental-scale fluxes. Atmospheric Chemistry and Physics, 18(13): 9225-9241 [DOI: 10.5194/acp-18-9225-2018]
- Brondfield M N, Hutyrá L R, Gately C K, Raciti S M and Peterson S A. 2012. Modeling and validation of on-road CO₂ emissions inventories at the urban regional scale. Environmental Pollution, 170: 113-123 [DOI: 10.1016/j.envpol.2012.06.003]
- Broquet G, Bréon F M, Renault E, Buchwitz M, Reuter M, Bovensmann H, Chevallier F, Wu L and Ciais P. 2018. The potential of satellite spectro-imagery for monitoring CO₂ emissions from large cities. Atmospheric Measurement Techniques, 11(2): 681-708 [DOI: 10.5194/amt-11-681-2018]
- Buchwitz M, Reuter M, Noël S, Bramstedt K, Schneising O, Hilker M, Fuentes Andrade B, Bovensmann H, Burrows J P, Di Noia A, Boesch H, Wu L H, Landgraf J, Aben I, Retscher C, O'Dell C W and Crisp D. 2021. Can a regional-scale reduction of atmospheric CO₂ during the COVID-19 pandemic be detected from space? A case study for East China using satellite XCO₂ retrievals. Atmospheric Measurement Techniques, 14(3): 2141-2166 [DOI: 10.5194/amt-14-2141-2021]
- Buchwitz M, Schneising O, Burrows J P, Bovensmann H, Reuter M and Notholt J. 2007. First direct observation of the atmospheric CO₂ year-to-year increase from space. Atmospheric Chemistry and Physics, 7(16): 4249-4256 [DOI: 10.5194/acp-7-4249-2007]
- 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 H, Gao Q X, Fang S X, Pan X B and Zheng X H. 2019. The interpretation of 2019 refinement to the 2006 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. 《IPCC2006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]
- Cao X, Hu Y, Zhu X L, Shi F, Zhuo L and Chen J. 2019. A simple self-adjusting model for correcting the blooming effects in DMSP-OLS nighttime light images. Remote Sensing of Environment, 224: 401-411 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.02.019]
- Chen J D, Gao M, Cheng S L, Hou W X, Song M L, Liu X, Liu Y and Shan Y L. 2020. County-level CO₂ emissions and sequestration in China during 1997-2017. Scientific Data, 7(1): 391 [DOI: 10.1038/s41597-020-00736-3]
- Chen J M, Ju W M, Liu R G, Li Y and Jiang F. 2015. Remote Sensing and Optimizing Method of Global Terrestrial Carbon Sink. Beijing: Science Press (陈镜明, 居为民, 刘荣高, 李勇, 江飞. 2015. 全球陆地碳汇的遥感和优化计算方法. 北京: 科学出版社)
- Chen L F, Zhang Y, Zou M M, Xu Q, Li L J, Li X Y and Tao J H. 2015. Overview of atmospheric CO₂ 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CO₂浓度卫星遥感进展. 遥感学报, 19(1): 1-11) [DOI: 10.11834/jrs.20153331]
- Cheng L X, Tao J H, Yu C, Zhang Y, Fan M, Wang Y P, Chen Y L, Zhu L L, Gu J B and Chen L F. 2021. Tropospheric NO₂ column density retrieval from the GF-5 EMI data. National Remote Sensing Bulletin, 25(11): 2313-2325 (程良晓, 陶金花, 余超, 张莹, 范萌, 王雅鹏, 陈元琳, 朱莉莉, 顾坚斌, 陈良富. 2021. 高分五号大气痕量气体差分吸收光谱仪对流层NO₂柱浓度遥感反演研究. 遥感学报, 25(11): 2313-2325) [DOI: 10.11834/jrs.20210303]
- Chevallier F, Palmer P I, Feng L, Boesch H, O'Dell C W and Bousquet P. 2014. Toward robust and consistent regional CO₂ flux estimates from in situ and spaceborne measurements of atmospheric CO₂. Geophysical Research Letters, 41(3): 1065-1070 [DOI: 10.1002/2013GL058772]
- Ciais P, Crisp D, van der Gon H D, Engelen R, Janssens-Maenhout G, Heiman M, Rayner P and Scholze M. 2015. Towards a European Operational Observing System to Monitor Fossil: CO₂ Emissions: Final Report from the Expert Group. European Commission [DOI: 10.2788/350433]
- Cogan A J, Boesch H, Parker R J, Feng L, Palmer P I, Blavier J F L, Deutscher N M, Macatangay R, Notholt J, Roehl C, Warneke T and Wunch D. 2012. Atmospheric carbon dioxide retrieved from the Greenhouse gases Observing SATellite (GOSAT): comparison with ground-based TCCON observations and GEOS-Chem model calculations. Journal of Geophysical Research, 117(D21): D21301 [DOI: 10.1029/2012JD018087]
- 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, Atlas R M, Breon F M, Brown L R, Burrows J P, Ciais P, Connor B J, Doney S C, Fung I Y, Jacob D J, Miller C E, O'Brien D, Pawson S, Randerson J T, Rayner P, Salawitch R J, Sander S P, Sen B, Stephens G L, Tans P P, Toon G C, Wennberg P O, Wofsy S C, Yung Y L, Kuang Z, Chudasama B, Sprague G, Weiss B, Pollock R, Kenyon D and Schroll S. 2004. The Orbiting Carbon Observatory (OCO) mission. Advances in Space Research, 34(4):

- 700-709 [DOI: 10.1016/j.asr.2003.08.062]
- 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, Eldering 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]
- De Mazière M, Thompson A M, Kurylo M J, Wild J D, Bernhard G, Blumenstock T, Braathen G O, Hannigan J W, Lambert J C, Leblanc T, Mcgee T J, Nedoluha G, Petropavlovskikh I, Seckmeyer G, Simon P C, Steinbrecht W and Strahan S E. 2018. The Network for the Detection of Atmospheric Composition Change (NDACC): history, status and perspectives. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(7): 4935-4964 [DOI: 10.5194/acp-18-4935-2018]
- 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. 2014. Inferring regional sources and sinks of atmospheric CO₂ from GOSAT XCO₂ data. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(7): 3703-3727 [DOI: 10.5194/acp-14-3703-2014]
- Du S S, Liu L Y, Liu X J and Chen J D. 2021. First investigation of the relationship between solar-induced chlorophyll fluorescence observed by TanSat and gross primary productivity. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14: 11892-11902 [DOI: 10.1109/JSTARS.2021.3128355]
- Du S S, Liu L Y, Liu X J, Zhang X, Zhang X Y, Bi Y M and Zhang L C. 2018. Retrieval of global terrestrial solar-induced chlorophyll fluorescence from TanSat satellite. *Science Bulletin*, 63(22): 1502-1512 [DOI: 10.1016/j.scib.2018.10.003]
- Duren R M and Miller C E. 2012. Measuring the carbon emissions of megacities. *Nature Climate Change*, 2(8): 560-562 [DOI: 10.1038/nclimate1629]
- 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]
- Elvidge C D, Baugh K, Zhizhin M, Hsu F C and Ghosh T. 2017. VIIRS night-time lights. *International Journal of Remote Sensing*, 38(21): 5860-5879 [DOI: 10.1080/01431161.2017.1342050]
- Elvidge C D, Bazilian M D, Zhizhin M, Ghosh T, Baugh K and Hsu F C. 2018. The potential role of natural gas flaring in meeting greenhouse gas mitigation targets. *Energy Strategy Reviews*, 20: 156-162 [DOI: 10.1016/j.esr.2017.12.012]
- Elvidge C D, Zhizhin M, Baugh K, Hsu F C and Ghosh T. 2016. Methods for global survey of natural gas flaring from visible infrared imaging radiometer suite data. *Energies*, 9(1): 14 [DOI: 10.3390/en9010014]
- Elvidge C D, Zhizhin M, Hsu F C and Baugh K E. 2013. VIIRS night-fire: satellite pyrometry at night. *Remote Sensing*, 5(9): 4423-4449 [DOI: 10.3390/rs5094423]
- Elvidge C D, Ziskin D, Baugh K E, Tuttle B T, Ghosh T, Pack D W, Erwin E H and Zhizhin M. 2009. A fifteen year record of global natural gas flaring derived from satellite data. *Energies*, 2(3): 595-622 [DOI: 10.3390/en20300595]
- Etheridge D M, Steele L, Langenfelds R L, Francey R J, Barnola J M and Morgan V I. 1996. Natural and anthropogenic changes in atmospheric CO₂ over the last 1000 years from air in Antarctic ice and firn. *Journal of Geophysical Research*, 101(D2): 4115-4128 [DOI: 10.1029/95JD03410]
- Eurocom. 2015. Development of regional ecosystem-atmosphere models assimilating the ICOS data for a European-scale intercomparison of net CO₂ fluxes[EB/OL]. [2021-11-22]. <https://eurocom.icos-cp.eu/>
- Facchinelli F, Pappalardo S E, Codato D, Diantini A, Della Fera G, Crescini E and De Marchi M. 2020. Unburnable and unleakable carbon in western amazon: using VIIRS nightfire data to map gas flaring and policy compliance in the yasuní biosphere reserve. *Sustainability*, 12(1): 58 [DOI: 10.3390/su12010058]
- Filges A, Gerbig C, Chen H L, Franke H, Klaus C and Jordan A. 2015. The IAGOS-core greenhouse gas package: a measurement system for continuous airborne observations of CO₂, CH₄, H₂O and CO. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 67(1): 27989 [DOI: 10.3402/tellusb.v67.27989]
- Frankenberg C, Butz A and Toon G C. 2011. Disentangling chlorophyll fluorescence from atmospheric scattering effects in O₂ A-band spectra of reflected sun-light. *Geophysical Research Letters*, 38(3): L03801 [DOI: 10.1029/2010GL045896]
- Friedlingstein P, O'Sullivan M, Jones M W, Andrew R M, Hauck J, Olsen A, Peters G P, Peters W, Pongratz J, Sitch S, Le Quéré C, Canadell J G, Ciais P, Jackson R B, Alin S, Aragão L E O C, Arneeth A, Arora V, Bates N R, Becker M, Benoit-Cattin A, Bittig H C, Bopp L, Bultan S, Chandra N, Chevallier F, Chini L P, Evans W, Florentie L, Forster P M, Gasser T, Gehlen M, Gilfillan D, Gkritzalis T, Gregor L, Gruber N, Harris I, Hartung K, Haverd V, Houghton R A, Ilyina T, Jain A K, Joetzjer E, Kadono K, Kato E, Kitidis V, Korsbakken J I, Landschützer P, Lefèvre N, Lenton A, Lienert S, Liu Z, Lombardozzi D, Marland G, Metz N, Munro D R, Nabel J E M S, Nakaoka S I, Niwa Y, O'Brien K, Ono T, Palmer P I, Pierrot D, Poulter B, Resplandy L, Robertson E, Rödenbeck C, Schwinger J, Séférian R, Skjelvan I, Smith A J P, Sutton A J, Tanhua T, Tans P P, Tian H, Tilbrook B, van der Werf G,

- Vuichard N, Walker A P, Wanninkhof R, Watson A J, Willis D, Wiltshire A J, Yuan W, Yue X and Zaehele S. 2020. Global carbon budget 2020. *Earth System Science Data*, 12(4): 3269-3340 [DOI: 10.5194/essd-12-3269-2020]
- Gately C K, Hutrya L R, Wing I S and Brondfield M N. 2013. A bottom up approach to on-road CO₂ emissions estimates: improved spatial accuracy and applications for regional planning. *Environmental Science and Technology*, 47(5): 2423-2430 [DOI: 10.1021/es304238v]
- Global Carbon Project. 2003. Science Framework and Implementation. Earth System Science Partnership (IGBP, IHDP, WCRP, DIVERSITAS) Report No.1; Global Carbon Project Report No.1 69pp, Canberra
- Graven H, Fischer M L, Lueker T, Jeong S, Guilderson T P, Keeling R F, Bambha R, Brophy K, Callahan W, Cui X, Frankenberg C, Gurney K R, Lafranchi B W, Lehman S J, Michelsen H, Miller J B, Newman S, Paplawsky W, Parazoo N C, Sloop C and Walker S J. 2018. Assessing fossil fuel CO₂ emissions in California using atmospheric observations and models. *Environmental Research Letters*, 13(6): 065007 [DOI: 10.1088/1748-9326/aabd43]
- Gurney K R, Law R M, Denning A S, Rayner P J, Baker D, Bousquet P, Bruhwiler L, Chen Y H, Ciais P, Fan S M, Fung I Y, Gloor M, Heimann M, Higuchi K, John J, Maki T, Maksyutov S, Masarie K, Peylin P, Prather M, Pak B C, Randerson J, Sarmiento J, Taguchi S, Takahashi T and Yuen C W 2002. Towards robust regional estimates of CO₂ sources and sinks using atmospheric transport models. *Nature*, 415(6872): 626-630 [DOI: 10.1038/415626a]
- Hakkarainen J, Ialongo I, Maksyutov S and Crisp D. 2019. Analysis of four years of global XCO₂ anomalies as seen by orbiting carbon observatory-2. *Remote Sensing*, 11(7): 850 [DOI: 10.3390/rs11070850]
- Hakkarainen J, Ialongo I and Tamminen J. 2016. Direct space-based observations of anthropogenic CO₂ emission areas from OCO-2. *Geophysical Research Letters*, 43(21): 11400-11406 [DOI: 10.1002/2016GL070885]
- Hazan L, Tarniewicz J, Ramonet M, Laurent O and Abbaris A. 2016. Automatic processing of atmospheric CO₂ and CH₄ mole fractions at the ICOS Atmosphere Thematic Centre. *Atmospheric Measurement Techniques*, 9(9): 4719-4736 [DOI: 10.5194/amt-9-4719-2016]
- He Z H, Lei L P, Zeng Z C, Sheng M Y and Welp L R. 2020. Evidence of carbon uptake associated with vegetation greening trends in Eastern China. *Remote Sensing*, 12(4): 718 [DOI: 10.3390/rs12040718]
- He Z H, Zeng Z C, Lei L P, Bie N and Yang S Y. 2017. A data-driven assessment of biosphere-atmosphere interaction impact on seasonal cycle patterns of XCO₂ using GOSAT and MODIS observations. *Remote Sensing*, 9(3): 251 [DOI: 10.3390/rs9030251]
- 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 CO₂ (XCO₂) variations, with a focus on the Southern California Megacity. *Journal of Geophysical Research*, 122(13): 7200-7215 [DOI: 10.1002/2017JD026455]
- Huang K, Fu J S, Prikhodko V Y, Storey J M, Romanov A, Hodson E L, Cresko J, Morozova I, Ignatieva Y and Cabaniss J. 2015. Russian anthropogenic black carbon: emission reconstruction and Arctic black carbon simulation. *Journal of Geophysical Research*, 120(21): 11306-11333 [DOI: 10.1002/2015JD023358]
- Huang N, Wang L, Song X P, Black T A, Jassal R S, Myneni R B, Wu C Y, Wang L, Song W J, Ji D B, Yu S S and Niu Z. 2020. Spatial and temporal variations in global soil respiration and their relationships with climate and land cover. *Science Advances*, 6(41): eabb8508 [DOI: 10.1126/sciadv.abb8508]
- IPCC. 2019. 2019 Refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[EB/OL]. [2021-11-22]. <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>
- Janardanan R, Maksyutov S, Oda T, Saito M, Kaiser J W, Ganshin A, Stohl A, Matsunaga T, Yoshida Y and Yokota T. 2016. Comparing GOSAT observations of localized CO₂ enhancements by large emitters with inventory-based estimates. *Geophysical Research Letters*, 43(7): 3486-3493 [DOI: 10.1002/2016GL067843]
- Janssens-Maenhout G, Petrescu A M R, Muntean M and Blujdea V. 2011. Verifying greenhouse gas emissions: methods to support international climate agreements. *Greenhouse Gas Measurement and Management*, 1(2): 132-133 [DOI: 10.1080/20430779.2011.579358]
- Jiang F, Chen J M, Zhou L X, Ju W M, Zhang H F, Machida T, Ciais P, Peters W, Wang H M, Chen B Z, Liu L X, Zhang C H, Matsuuda H and Sawa Y. 2016. A comprehensive estimate of recent carbon sinks in China using both top-down and bottom-up approaches. *Scientific Reports*, 6: 22130 [DOI: 10.1038/srep22130]
- Jiang F, Wang H M, Chen J M, Ju W M, Tian X J, Feng S Z, Li G C, Chen Z Q, Zhang S P, Lu X H, Liu J, Wang H K, Wang J, He W and Wu M S. 2021. Regional CO₂ fluxes from 2010 to 2015 inferred from GOSAT XCO₂ retrievals using a new version of the Global Carbon Assimilation System. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(3): 1963-1985 [DOI: 10.5194/acp-21-1963-2021]
- Jiang F, Wang H M, Chen J M, Zhou L X, Ju W M, Ding A J, Liu L X and Peters W. 2013. Nested atmospheric inversion for the terrestrial carbon sources and sinks in China. *Biogeosciences*, 10(8): 5311-5324 [DOI: 10.5194/bg-10-5311-2013]
- Ju W M, Fang H L, Tian X J, Jiang F, Zhan W F, Liu Y, Wang Z X, He J F, Wang S Q, Peng S S, Zhang Y G, Zhou Y L, Jia B H, Yang D X, Fu Y, Li R, Liu J X, Wang H K, Li G C and Chen Z Q. 2016. Study on the global carbon assimilation system based on multi-source remote sensing data. *Advances in Earth Science*, 31(11): 1105-1110 (居为民, 方红亮, 田向军, 江飞, 占文凤, 刘洋, 王正兴, 何剑锋, 王绍强, 彭书时, 张永光, 周艳莲, 贾炳浩, 杨东旭, 符瑜, 李荣, 柳竟先, 王海鲲, 李贵才, 陈卓奇. 2016. 基于多源卫

- 星遥感的高分辨率全球碳同化系统研究. 地球科学进展, 31(11): 1105-1110 [DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2016.11.1105]
- Jung M, Schwalm C, Migliavacca M, Walther S, Camps-Valls G, Koirala S, Anthoni P, Besnard S, Bodesheim P, Carvalhais N, Chevallier F, Gans F, Goll D S, Haverd V, Köhler P, Ichii K, Jain A K, Liu J Z, Lombardozi D, Nabel J E M S, Nelson J A, O'Sullivan M, Pallandt M, Papale D, Peters W, Pongratz J, Rödenbeck C, Sitch S, Tramontana G, Walker A, Weber U and Reichstein M. 2020. Scaling carbon fluxes from eddy covariance sites to globe: synthesis and evaluation of the FLUXCOM approach. *Biogeosciences*, 17(5): 1343-1365 [DOI: 10.5194/bg-17-1343-2020]
- Kenea S T, Oh Y S, Rhee J S, Goo T Y, Byun Y H, Li S L, Labzovskii L D, Lee H and Banks R F. 2019. Evaluation of simulated CO₂ concentrations from the carbontracker-asia model using in-situ observations over East Asia for 2009-2013. *Advances in Atmospheric Sciences*, 36(6): 603-613 [DOI: 10.1007/s00376-019-8150-x]
- Keppel-Aleks G, Wennberg P O, O'Dell C W and Wunch D. 2013. Towards constraints on fossil fuel emissions from total column carbon dioxide. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(8): 4349-4357 [DOI: 10.5194/acp-13-4349-2013]
- Kiel M, Eldering A, Roten D D, Lin J C, Feng S, Lei R X, Lauvaux T, Oda T, Roehl C M, Blavier J F and Iraci L T. 2021. Urban-focused satellite CO₂ observations from the orbiting carbon observatory-3: a first look at the los angeles megacity. *Remote Sensing of Environment*, 258: 112314 [DOI: 10.1016/j.rse.2021.112314]
- Kort E A, Frankenberg C, Miller C E and Oda T. 2012. Space-based observations of megacity carbon dioxide. *Geophysical Research Letters*, 39(17): L17806 [DOI: 10.1029/2012GL052738]
- Kuhlmann G, Broquet G, Marshall J, Clément V, Löscher A, Meijer Y and Brunner D. 2019. Detectability of CO₂ emission plumes of cities and power plants with the Copernicus Anthropogenic CO₂ Monitoring (CO2M) mission. *Atmospheric Measurement Techniques*, 12(12): 6695-6719 [DOI: 10.5194/amt-12-6695-2019]
- Kulawik S, Wunch D, O'Dell C, Frankenberg C, Reuter M, Oda T, Chevallier F, Sherlock V, Buchwitz M, Osterman G, Miller C E, Wennberg P O, Griffith D, Morino I, Dubey M K, Deutscher N M, Notholt J, Hase F, Warneke T, Sussmann R, Robinson J, Strong K, Schneider M, De Mazière M, Shiomi K, Feist D G, Iraci L T and Wolf J. 2016. Consistent evaluation of ACOS-GOSAT, BESD-SCIAMACHY, CarbonTracker, and MACC through comparisons to TCCON. *Atmospheric Measurement Techniques*, 9(2): 683-709 [DOI: 10.5194/amt-9-683-2016]
- Le Quéré C, Andrew R M, Canadell J G, Sitch S, Korsbakken J I, Peters G P, Manning A C, Boden T A, Tans P P, Houghton R A, Keeling R F, Alin S, Andrews O D, Anthoni P, Barbero L, Bopp L, Chevallier F, Chini L P, Ciais P, Currie K, Delire C, Doney S C, Friedlingstein P, Gkritzalis T, Harris I, Hauck J, Haverd V, Hoppe M, Klein Goldewijk K, Jain A K, Kato E, Körtzinger A, Landschützer P, Lefèvre N, Lenton A, Lienert S, Lombardozi D, Melton J R, Metz N, Millero F, Monteiro P M S, Munro D R, Nabel J E M S, Nakaoka S I, O'Brien K, Olsen A, Omar A M, Ono T, Pierrot D, Poulter B, Rödenbeck C, Salisbury J, Schuster U, Schwinger J, Séférian R, Skjelvan I, Stocker B D, Sutton A J, Takahashi T, Tian H Q, Tilbrook B, van der Laan-Luijkx I T, van der Werf G R, Viovy N, Walker A P, Wiltshire A J and Zaehle S. 2016. Global carbon budget 2016. *Earth System Science Data*, 8(2): 605-649 [DOI: 10.5194/essd-8-605-2016]
- Lei L P, Zhong H, He Z H, Cai B F, Yang S Y, Wu C J, Zeng Z C, Liu L Y and Zhang B. 2017. Assessment of atmospheric CO₂ concentration enhancement from anthropogenic emissions based on satellite observations. *Chinese Science Bulletin*, 62(25): 2941-2950 [DOI: 10.1360/N972016-01316]
- Liu F, Duncan B N, Krotkov N A, Lamsal L N, Beirle S, Griffin D, McLinden C A, Goldberg D L and Lu Z F. 2020. A methodology to constrain carbon dioxide emissions from coal-fired power plants using satellite observations of co-emitted nitrogen dioxide. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(1): 99-116 [DOI: 10.5194/acp-20-99-2020]
- Liu J J, Baskaran L, Bowman K, Schimel D, Bloom A A, Parazoo N C, Oda T, Carroll D, Menemenlis D, Joiner J, Commane R, Daube B, Gatti L V, McKain K, Miller J, Stephens B B, Sweeney C and Wofsy S. 2021. Carbon monitoring system flux net biosphere exchange 2020 (CMS-Flux NBE 2020). *Earth System Science Data*, 13(2): 299-330 [DOI: 10.5194/essd-13-299-2021]
- Liu J J and Bowman K. 2016. A method for independent validation of surface fluxes from atmospheric inversion: application to CO₂. *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 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 L Y, Bai Y, Sun R and Niu Z G. 2021. Stereo observation and inversion of the key parameters of global carbon cycle: project overview and mid-term progressess. *Remote Sensing Technology and Application*, 36(1): 11-24 (刘良云, 白雁, 孙睿, 牛振国. 2021. “全球生态系统碳循环关键参数立体观测与反演”项目概述与研究进展. *遥感技术与应用*, 36(1): 11-24) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2021.1.0011]
- 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 (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) [DOI: 10.11834/jrs.20210081]
- Maksyutov S, Takagi H, Valsala V K, Saito M, Oda T, Saeki T, Be-

- likov D A, Saito R, Ito A, Yoshida Y, Morino I, Uchino O, Andres R J and Yokota T. 2013. Regional CO₂ flux estimates for 2009-2010 based on GOSAT and ground-based CO₂ observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(18): 9351-9373 [DOI: 10.5194/acp-13-9351-2013]
- Monteil G, Broquet G, Scholze M, Lang M, Karstens U, Gerbig C, Koch F T, Smith N E, Thompson R L, Lujikx I T, White E, Meesters A, Ciais P, Ganesan A L, Manning A, Mischurou M, Peters W, Peylin P, Tarniewicz J, Rigby M, Rödenbeck C, Vermeulen A and Walton E M. 2020. The regional European atmospheric transport inversion comparison, EUROCOM: first results on European-wide terrestrial carbon fluxes for the period 2006-2015. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(20): 12063-12091 [DOI: 10.5194/acp-20-12063-2020]
- Nassar R, Hill T G, McLinden C A, Wunch D, Jones D B A and Crisp D. 2017. Quantifying CO₂ emissions from individual power plants from space. *Geophysical Research Letters*, 44(19): 10045-10053 [DOI: 10.1002/2017GL074702]
- Nathan B J, Lauvaux T, Turnbull J C, Richardson S J, Miles N L and Gurney K R. 2018. Source sector attribution of CO₂ emissions using an urban CO/CO₂ bayesian inversion system. *Journal of Geophysical Research*, 123(23): 13611-13621 [DOI: 10.1029/2018JD029231]
- Oda T, Maksyutov S and Andres R J. 2018. The open-source data inventory for anthropogenic CO₂, version 2016 (ODIAC2016): a global monthly fossil fuel CO₂ gridded emissions data product for tracer transport simulations and surface flux inversions. *Earth System Science Data*, 10(1): 87-107 [DOI: 10.5194/essd-10-87-2018]
- Oda T, Román M O, Wang Z S, Stokes E C, Sun Q S, Shrestha R M, Feng S, Lauvaux T, Bun R, Maksyutov S, Chakraborty S, Paynter I and Kalb V L. 2021. US cities in the dark//Yang X J, ed. *Urban Remote Sensing*. [s.l.]: John Wiley and Sons Ltd.: 337-367 [DOI: 10.1002/9781119625865.ch16]
- Ou J P, Liu X P, Li X, Li M F and Li W K. 2015. Evaluation of NPP-VIIRS nighttime light data for mapping global fossil fuel combustion CO₂ emissions: a comparison with DMSP-OLS nighttime light data. *PLoS One*, 10(9): e0138310 [DOI: 10.1371/journal.pone.0138310]
- 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 CO₂ signal. *Nature Communications*, 10(1): 3344 [DOI: 10.1038/s41467-019-11097-w]
- Palmer P I, O'Doherty S, Allen G, Bower K, Bösch H, Chipperfield M P, Connors S, Dhomse S, Feng L, Finch D P, Gallagher M W, Gloor E, Gonzi S, Harris N R P, Helfter C, Humpage N, Kerridge B, Knappett D, Jones R L, Le Breton M, Lunt M F, Manning A J, Matthiesen S, Muller J B A, Mullinger N, Nemitz E, O'Shea S, Parker R J, Percival C J, Pitt J, Riddick S N, Rigby M, Sembhi H, Siddans R, Skelton R L, Smith P, Sonderfeld H, Stanley K, Stavert A R, Wenger A, White E, Wilson C and Young D. 2018. A measurement-based verification framework for UK greenhouse gas emissions: an overview of the Greenhouse gAs Uk and Global Emissions (GAUGE) project. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(6): 11753-11777 [DOI: 10.5194/acp-18-11753-2018]
- Park C, Jeong S, Park H, Yun J and Liu J J. 2021. Evaluation of the potential use of satellite-derived XCO₂ in detecting CO₂ enhancement in megacities with limited ground observations: a case study in seoul using orbiting carbon observatory-2. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 57(2): 289-299 [DOI: 10.1007/s13143-020-00202-5]
- Pastorello G, Trotta C, Canfora E, Chu H S, Christianson D, Cheah Y W, Poindexter C, Chen J Q, Elbashandy A, Humphrey M, Isaac P, Polidori D, Reichstein M, Ribeca A, Van Ingen C, Vuichard N, Zhang L M, Amiro B, Ammann C, Arain M A, Ardö J, Arkebauer T, Arndt S K, Arriga N, Aubinet M, Aurela M, Baldocchi D, Barr A, Beamesderfer E, Marchesini L B, Bergeron O, Beringer J, Bernhofer C, Berveiller D, Billesbach D, Black T A, Blanken P D, Bohrer G, Boike J, Bolstad P V, Bonal D, Bonnefond J M, Bowling D R, Bracho R, Brodeur J, Brümmer C, Buchmann N, Burban B, Burns S P, Buysse P, Cale P, Cavagna M, Cellier P, Chen S P, Chini I, Christensen T R, Cleverly J, Collalti A, Consalvo C, Cook B D, Cook D, Coursolle C, Cremonese E, Curtis P S, D'andrea E, Da Rocha H, Dai X Q, Davis K J, Cinti B D, Grandcourt A D, Ligne A D, De Oliveira R C, Delpierre N, Desai A R, Di Bella C M, Tommasi P D, Dolman H, Domingo F, Dong G, Dore S, Duce P, Dufrene E, Dunn A, Dušek J, Eamus D, Eichmann U, Elkhidir H A M, Eugster W, Ewenz C M, Ewers B, Famulari D, Fares S, Feigenwinter I, Feitz A, Fensholt R, Filippa G, Fischer M, Frank J, Galvagno M, Gharun M, Gianelle D, Gielen B, Gioli B, Gitelson A, Godec I, Goeckede M, Goldstein A H, Gough C M, Goulden M L, Graf A, Griebel A, Gruening C, Grünwald T, Hammerle A, Han S J, Han X G, Hansen B U, Hanson C, Hatakka J, He Y T, Hehn M, Heinesch B, Hinko-Najera N, Hörtnagl L, Hutley L, Ibrom A, Ikawa H, Jackowicz-Korczynski M, Janouš D, Jans W, Jassal R, Jiang S C, Kato T, Khomik M, Klatt J, Knohl A, Knox A, Kobayashi H, Koerber G, Kolle O, Kosugi Y, Kotani A, Kowalski A, Kruijt B, Kurbatova J, Kutsch W L, Kwon H, Launiainen S, Laurila T, Law B, Leuning R, Li Y N, Liddell M, Limousin J M, Lion M, Liska A J, Lohila A, López-Ballesteros A, López-Blanco E, Loubet B, Loustau D, Lucas-Moffat A, Lüers J, Ma S Y, Macfarlane C, Magliulo V, Maier R, Mammarella I, Manca G, Marcolla B, Margolis H A, Marras S, Massman W, Mastepanov M, Matamala R, Matthes J H, Mazzenga F, McCaughey H, McHugh I, McMillan A M S, Merbold L, Meyer W, Meyers T, Miller S D, Minerbi S, Moderow U, Monson R K, Montagnani L, Moore C E, Moors E, Moreaux V, Moureaux C, Munger J W, Nakai T, Neiryneck J, Nescic Z, Nicolini G, Noormets A, Northwood M, Noretto M, Nouvellon Y, Novick K, Oechel E, Olesen J E, Ourcival J M, Papuga S A, Parmentier F J, Paul-Limoges E,

- Pavelka M, Peichl M, Pendall E, Phillips R P, Pilegaard K, Pirk N, Posse G, Powell T, Prasse H, Prober S M, Rambal S, Rannik Ü, Raz-Yaseef N, Rebmann C, Reed D, de Dios V R, Restrepo-Coupe N, Reverter B R, Roland M, Sabbatini S, Sachs T, Saleska S R, Sánchez-Cañete E P, Sanchez-Mejia Z M, Peter Schmid H, Schmidt M, Schneider K, Schrader F, Schroder I, Scott R L, Sedláč P, Serrano-Ortiz P, Shao C L, Shi P L, Shironya I, Siebicke L, Šigut L, Silberstein R, Sirca C, Spano D, Steinbrecher R, Stevens R M, Sturtevant C, Suyker A, Tagesson T, Takanashi S, Tang Y H, Tapper N, Thom J, Tomassucci M, Tuovinen J P, Urbanski S, Valentini R, van der Molen M, van Gorsel E, van Huissteden K, Varlagin A, Verfaillie J, Vesala T, Vincke C, Vitale D, Vygodskaya N, Walker J P, Walter-Shea E, Wang H M, Weber R, Westermann S, Wille C, Wofsy S, Wohlfahrt G, Wolf S, Woodgate W, Li Y L, Zampedri R, Zhang J H, Zhou G Y, Zona D, Agarwal D, Biraud S, Torn M and Papale D. 2020. The FLUXNET2015 dataset and the ONEFlux processing pipeline for eddy covariance data. *Scientific Data*, 7(1): 225 [DOI: 10.1038/s41597-020-0534-3]
- Peters W, Jacobson A R, Sweeney C, Andrews A E, Conway T J, Masarie K, Miller J B, Bruhwiler L M P, Pétron G, Hirsch A I, Worthy D E J, van der Werf G R, Randerson J T, Wennberg P O, Krol M C and Tans P P. 2007. An atmospheric perspective on North American carbon dioxide exchange: carbontracker. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104(48): 18925-18930 [DOI: 10.1073/pnas.0708986104]
- Peters W, Krol M C, van der Werf G R, Houweling S, Jones C D, Hughes J, Schaefer K, Masarie K A, Jacobson A R, Miller J B, Cho C H, Ramonet M, Schmidt M, Ciattaglia L, Apadula F, Helta D, Meinhardt F, di Sarra A G, Piacentino S, Sferlazzo D, Aalto T, Hatakka J, Ström J, Haszpra L, Meijer H A J, van der Laan S, Neubert R E M, Jordan A, Rodó X, Morgui J A, Vermeulen A T, Popa E, Rozanski K, Zimnoch M, Manning A C, Leuenberger M, Uglietti C, Dolman A J, Ciais P, Heimann M and Tans P P. 2010. Seven years of recent European net terrestrial carbon dioxide exchange constrained by atmospheric observations. *Global Biogeochemical Cycles*, 16(4): 1317-1337 [DOI: 10.1111/j.1365-2486.2009.02078.x]
- 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 CO₂ inversions. *Biogeosciences*, 10(10): 6699-6720 [DOI: 10.5194/bg-10-6699-2013]
- Piao S L, Sitch S, Ciais P, Friedlingstein P, Peylin P, Wang X H, Ahlström A, Anav A, Canadell J G, Cong N, Huntingford C, Jung M, Levis S, Levy P E, Li J S, Lin X, Lomas M R, Lu M, Luo Y Q, Ma Y C, Myneni R B, Poulter B, Sun Z Z, Wang T, Viovy N, Zaehe S and Zeng N. 2013. Evaluation of terrestrial carbon cycle models for their response to climate variability and to CO₂ trends. *Global Biogeochemical Cycles*, 19(7): 2117-2132 [DOI: 10.1111/gcb.12187]
- Pinty B, Ciais P, Dee D, Dolman H, Dowell M, Engelen R, Holmlund K, Janssens-Maenhout G, Meijer Y, Palmer P, Scholze M, Denier van der Gon H, Heimann M, Juvyns O, Kentarchos A and Zunker H. 2019. An Operational Anthropogenic CO₂ Emissions Monitoring and Verification Support Capacity. TNO
- Raupach M R, Rayner P J and Paget M. 2010. Regional variations in spatial structure of nightlights, population density and fossil-fuel CO₂ emissions. *Energy Policy*, 38(9): 4756-4764 [DOI: 10.1016/j.enpol.2009.08.021]
- Reuter M, Buchwitz M, Schneising O, Krautwurst S, O'Dell C W, Richter A, Bovensmann H and Burrows J P. 2019. Towards monitoring localized CO₂ emissions from space: co-located regional CO₂ and NO₂ enhancements observed by the OCO-2 and S5P satellites. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(14): 9371-9383 [DOI: 10.5194/acp-19-9371-2019]
- Rusli S P, Hasekamp O, Aan De Brugh J, Fu G L, Meijer Y and Landgraf J. 2021. Anthropogenic CO₂ monitoring satellite mission: the need for multi-angle polarimetric observations. *Atmospheric Measurement Techniques*, 14(2): 1167-1190 [DOI: 10.5194/amt-14-1167-2021]
- Schneising O, Heymann J, Buchwitz M, Reuter M, Bovensmann H and Burrows J P. 2013. Anthropogenic carbon dioxide source areas observed from space: assessment of regional enhancements and trends. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(5): 2445-2454 [DOI: 10.5194/acp-13-2445-2013]
- Scholze M, Kaminski T, Knorr W, Blessing S, Vossbeck M, Grant J P and Scipal K. 2016. Simultaneous assimilation of SMOS soil moisture and atmospheric CO₂ in-situ observations to constrain the global terrestrial carbon cycle. *Remote Sensing of Environment*, 180: 334-345 [DOI: 10.1016/j.rse.2016.02.058]
- Schwandner F M, Gunson M R, Miller C E, Carn S A, Eldering A, Krings T, Verhulst K R, Schimel D S, Nguyen H M, Crisp D, O'Dell C W, Osterman G B, Iraci L T and Podolske J R. 2017. Spaceborne detection of localized carbon dioxide sources. *Science*, 358(6360): eaam5782 [DOI: 10.1126/science.aam5782]
- Shekhar A, Chen J, Paetzold J C, Dietrich F, Zhao X X, Bhattacharjee S, Ruisinger V and Wofsy S C. 2020. Anthropogenic CO₂ emissions assessment of Nile Delta using XCO₂ and SIF data from OCO-2 satellite. *Environmental Research Letters*, 15(9): 095010 [DOI: 10.1088/1748-9326/ab9cfe]
- Shi H L, Li Z W, Ye H H, Luo H Y, Xiong W and Wang X H. 2021. First level 1 product results of the greenhouse gas monitoring instrument on the GaoFen-5 satellite. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 59(2): 899-914 [DOI: 10.1109/TGRS.2020.2998729]
- Shim C, Han J, Henze D K and Yoon T. 2019. Identifying local anthropogenic CO₂ emissions with satellite retrievals: a case study in

- South Korea. *International Journal of Remote Sensing*, 40(3): 1011-1029 [DOI: 10.1080/01431161.2018.1523585]
- Silva S J and Arellano A F. 2017. Characterizing regional-scale combustion using satellite retrievals of CO, NO₂ and CO₂. *Remote Sensing*, 9(7): 744 [DOI: 10.3390/rs9070744]
- Taylor T E, Eldering A, Merrelli A, Kiel M, Somkuti P, Cheng C, Rosenberg R, Fisher B, Crisp D, Basilio R, Bennett M, Cervantes D, Chang A, Dang L, Frankenberg C, Haemmerle V R, Keller G R, Kurosu T, Laughner J L, Lee R, Marchetti Y, Nelson R R, O'Dell C W, Osterman G, Pavlick R, Roehl C, Schneider R, Spillers G, To C, Wells C, Wennberg P O, Yelamanchili A and Yu S S. 2020. OCO-3 early mission operations and initial (vEarly) XCO₂ and SIF retrievals. *Remote Sensing of Environment*, 251: 112032 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.112032]
- Thompson R L, Patra P K, 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(1): 10724 [DOI: 10.1038/ncomms10724]
- Tian X, Xie Z, Liu Y, Cai Z, Fu Y, Zhang H and Feng L. 2014. A joint data assimilation system (Tan-Tracker) to simultaneously estimate surface CO₂ fluxes and 3-D atmospheric CO₂ concentrations from observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(23): 13281-13293 [DOI: 10.5194/acp-14-13281-2014]
- Tollefson J. 2016. Carbon-sensing satellite system faces high hurdles: space agencies plan an advanced fleet, but technical and political challenges abound. *Nature*, 533(7604): 446-447
- Vandyck T, Keramidas K, Saveyn B, Kitous A and Vrontisi Z. 2016. A global stocktake of the Paris pledges: implications for energy systems and economy. *Global Environmental Change*, 41: 46-63 [DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2016.08.006]
- Wang H M, Jiang F, Liu Y, Yang D X, Wu M S, He W, Wang J, Wang J, Ju W M and Chen J M. 2021b. Global terrestrial ecosystem carbon flux inferred from TanSat XCO₂ retrievals. *Journal of Remote Sensing* [DOI: 10.5281/zenodo.5720212]
- Wang H M, Jiang F, Wang J, Ju W M and Chen J M. 2019. Terrestrial ecosystem carbon flux estimated using GOSAT and OCO-2 XCO₂ retrievals. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(18): 12067-12082 [DOI: 10.5194/acp-19-12067-2019]
- Wang J, Feng L, Palmer P I, Liu Y, Fang S X, Bösch H, O'Dell C W, Tang X P, Yang D X, Liu L X and Xia C Z. 2020. Large Chinese land carbon sink estimated from atmospheric carbon dioxide data. *Nature*, 586(7831): 720-723 [DOI: 10.1038/s41586-020-2849-9]
- Wang J, Jiang F, Wang H M, Qiu B, Wu M S, He W, Ju W M, Zhang Y G, Che J M and Zhu Y L. 2021a. Constraining global terrestrial gross primary productivity in a global carbon assimilation system with OCO-2 chlorophyll fluorescence data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 304-305: 108424 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2021.108424]
- Wang S H, Zhang Y G, Hakkarainen J, Ju W M, Liu Y X, Jiang F and He W. 2018. Distinguishing anthropogenic CO₂ emissions from different energy intensive industrial sources using OCO-2 observations: a case study in Northern China. *Journal of Geophysical Research*, 123(17): 9462-9473 [DOI: 10.1029/2018JD029005]
- Winkler H. 2008. Measurable, reportable and verifiable: the keys to mitigation in the Copenhagen deal. *Climate Policy*, 8(6): 534-547 [DOI: 10.3763/cpol.2008.0583]
- World Meteorological Organization. 2019. 2019 concludes a decade of exceptional global heat and high-impact weather[EB/OL]. [2019-12-03]. <https://public.wmo.int/en/media/press-release/2019-concludes-decade-of-exceptional-global-heat-and-high-impact-weather>
- Wu M S, Scholze M, Kaminski T, Voßbeck M and Tagesson T. 2020. Using SMOS soil moisture data combining CO₂ flask samples to constrain carbon fluxes during 2010-2015 within a Carbon Cycle Data Assimilation System (CCDAS). *Remote Sensing of Environment*, 240: 111719 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.111719]
- Wunch D, Toon G C, Blavier J F L, Washenfelder R A, Notholt J, Connor B J, Griffith D W T, Sherlock V and Wennberg P O. 2011. The total carbon column observing network. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 369(1943): 2087-2112 [DOI: 10.1098/rsta.2010.0240]
- Xiong X, Butler J, Cao C and Wu X. 2018. Optical sensors—VIS/NIR/SWIR. *Comprehensive Remote Sensing*, 1: 353-375 [DOI: 10.1016/B978-0-12-409548-9.10325-2]
- 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 XCO₂ retrievals from TanSat observations: retrieval improvement and validation against TCCON measurements. *Journal of Geophysical Research*, 125(22): e2020JD032794 [DOI: 10.1029/2020JD032794]
- Yang D X, Liu Y, Boesch H, Yao L, Di Noia A, Cai Z N, Lu N M, Lyu D, Wang M H, Wang J, Yin Z S and Zheng Y Q. 2021. A new TanSat XCO₂ global product towards climate studies. *Advances in Atmospheric Sciences*, 38(1): 8-11 [DOI: 10.1007/s00376-020-0297-y]
- 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 S Y, Lei L P, Zeng Z C, He Z H and Zhong H. 2019. An assessment of anthropogenic CO₂ emissions by satellite-based observations in China. *Sensors*, 19(5): 118 [DOI: 10.3390/s19051118]
- Yao L, Yang D X, Liu Y, Wang J, Liu L Y, Du S S, Cai Z N, Lu N M,

- Lyu D, Wang M H, Yin Z S and Zheng Y Q. 2021. A new global Solar-induced Chlorophyll Fluorescence (SIF) data product from TanSat measurements. *Advances in Atmospheric Sciences*, 38(3): 341-345 [DOI: 10.1007/s00376-020-0204-6]
- Ye H H, Wang X H, Wu S C, Li C, Li Z W, Shi H L and Xiong W. 2021. Atmospheric CO₂ retrieval method for satellite observations of greenhouse gases monitoring instrument on GF-5. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 16(3): 231-238 (叶函函, 王先华, 吴时超, 李超, 李志伟, 施海亮, 熊伟. 2021. 高分五号卫星 GMI 大气 CO₂ 反演方法. *大气与环境光学学报*, 16(3): 231-238) [DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2021.03.008]
- Ye X X, Lauvaux T, Kort E A, Oda T, Feng S, Lin J C, Yang E G and Wu D E. 2020. Constraining fossil fuel CO₂ emissions from urban area using OCO-2 observations of total column CO₂. *Journal of Geophysical Research*, 125(8): e2019JD030528 [DOI: 10.1029/2019JD030528]
- Yokota T, Yoshida Y, Eguchi N, Ota Y, Tanaka T, Watanabe H and Maksyutov S. 2009. Global concentrations of CO₂ and CH₄ retrieved from GOSAT: first preliminary results. *SOLA*, 5: 160-163 [DOI: 10.2151/sola.2009-041]
- Zeng J Y, Matsunaga T, Tan Z H, Saigusa N, Shirai T, Tang Y H, Peng S S and Fukuda Y. 2020. Global terrestrial carbon fluxes of 1999-2019 estimated by upscaling eddy covariance data with a random forest. *Scientific Data*, 7(1): 313 [DOI: 10.1038/s41597-020-00653-5]
- Zhang H F, Chen B Z, van der Laan-Luijk I T, Machida T, Matsueda H, Sawa Y, Fukuyama Y, Langenfelds R, van der Schoot M, Xu G, Yan J W, Cheng M L, Zhou L X, Tans P P and Peters W. 2014. Estimating Asian terrestrial carbon fluxes from CONTRAIL aircraft and surface CO₂ observations for the period 2006-2010. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(11): 5807-5824 [DOI: 10.5194/acp-14-5807-2014]
- Zhang S, Zheng X, Chen J M, Chen Z, Dan B, Yi X, Wang L and Wu G. 2015. A global carbon assimilation system using a modified ensemble Kalman filter. *Geoscientific Model Development*, 8(3): 805-816 [DOI: 10.5194/gmd-8-805-2015]
- Zhao Y, Nielsen C P and McElroy M B. 2012. China's CO₂ emissions estimated from the bottom up: recent trends, spatial distributions, and quantification of uncertainties. *Atmospheric Environment*, 59: 214-223 [DOI: 10.1016/j.atmosenv.2012.05.027]
- Zheng B, Chevallier F, Ciais P, Broquet G, Wang Y L, Lian J H and Zhao Y H. 2020a. Observing carbon dioxide emissions over China's cities and industrial areas with the Orbiting Carbon Observatory-2. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(4): 8501-8510 [DOI: 10.5194/acp-20-8501-2020]
- Zheng B, Geng G N, Ciais P, Davis S J, Martin R V, Meng J, Wu N N, Chevallier F, Broquet G, Boersma F, van der A R, Lin J T, Guan D B, Lei Y, He K B and Zhang Q. 2020b. Satellite-based estimates of decline and rebound in China's CO₂ emissions during COVID-19 pandemic. *Science Advances*, 6(49): eabd4998 [DOI: 10.1126/sciadv.abd4998]
- Zhou M Q, Langerock B, Vigouroux C, Sha M K, Hermans C, Metzger J M, Chen H L, Ramonet M, Kivi R, Heikkinen P, Smale D, Pollard D F, Jones N, Velasco V A, García O E, Schneider M, Palm M, Warneke T and De Mazière M. 2019. TCCON and NDACC X_{CO} measurements: difference, discussion and application. *Atmospheric Measurement Techniques*, 12(11): 5979-5995 [DOI: 10.5194/amt-12-5979-2019]
- Zhou M Q, Zhang X Y, Wang S P and Wang P C. 2014. HITRAN versions influence on calculation of CO₂ transfer properties for satellite 1.6 μm channel. *Journal of Remote Sensing*, 18(5): 1003-1010 (周敏强, 张兴赢, 王舒鹏, 王普才. 2014. HITRAN 数据库对卫星 1.6 μm 通道 CO₂ 辐射传输特性计算的影响. *遥感学报*, 18(5): 1003-1010) [DOI: 10.11834/jrs.20143316]

Satellite remote sensing for global stocktaking: Methods, progress and perspectives

LIU Liangyun¹, CHEN Liangfu¹, LIU Yi², YANG Dongxu², ZHANG Xingying³, LU Naimeng³, JU weimin⁴, JIANG Fei⁴, YIN Zengshan⁵, LIU Guohua⁵, TIAN Longfei⁵, HU Denghui⁵, MAO Huiqin⁶, LIU Sihan⁶, ZHANG Jianhui⁶, LEI Liping¹, FAN Meng¹, ZHANG Yucong¹, ZHOU Xiang¹, WU Yirong¹

1. Institute of Aerospace Information Innovation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

2. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

3. National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;

4. Nanjing University, Nanjing 210023, China;

5. Institute of Microsatellite Innovation, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201203, China;

6. Satellite Application Center of Ecology and Environmental Protection, MEE, Beijing 100094, China

Abstract: Climate warming has become a great challenge for global sustainable development. Under the Paris Agreement, every country

must present a climate action plan in five-yearly cycles, a National Determined Contributions (NDC) report will be presented using a standard inventory approach for each country since 2020, and all countries will engage in the global stocktake every five years to assess countries' NDC progress since 2023. The 49th session of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC 49) recommend a 'top-down' inversion approach to account greenhouse gas (GHG) emission based on space-borne atmospheric measurements. The European Union, the United States, Japan, and Canada are vigorously developing MVS (Monitoring & Verification Support) capabilities for accounting GHG emissions using satellite remote sensing. Here, we aimed to give a detailed review on the methods and progresses of satellite-based inversion for global stocktaking, and highlight the challenges and perspectives for satellite remote sensing for global stocktaking in China.

Firstly, Earth observation for atmospheric GHG, including ground-based observation networks and GHG satellites, were summarized. Compared to ground-based observations, satellite remote sensing has been providing more and more accurate and higher resolution global GHG detection. In the next five years, 13 GHG satellites will be launched, with resolutions ranging from 25 m to 100 km. Secondly, the progresses of satellite remote sensing of ecosystem carbon fluxes were reviewed. There are three kinds of methods to estimate global carbon fluxes, including: the assimilation inversion method (also named as the "top-down" method), that uses atmospheric chemical transmission model and ground-based or satellite observations of atmospheric GHG to invert carbon flux; the modelling simulation method (also named as the "bottom-up" method) that uses the process model to estimate terrestrial and marine ecosystems carbon fluxes; the data-driven machine learning method that uses remote sensing datasets and metrological datasets to model the carbon uptakes of terrestrial and marine ecosystems. However, the uncertainty in the estimation results of all these top-down or bottom-up methods is still huge at regional or global scale. Thirdly, the researches on satellite monitoring of anthropogenic GHG emissions were summarized. Satellite remote sensing has been an important platform for realizing large-scale, long-term observations of anthropogenic GHG emissions. Although the current accuracy of the satellite-based observations does not fully meet the requirements of the global stocktake, satellite remote sensing has become a promising tool for verifying hot-spot, city, national and global anthropogenic emissions. Finally, the current capability of satellite remote sensing to support global carbon monitoring was assessed, and the Chinese carbon satellite future program was proposed. According the preliminary simulations based on Observation System Simulation Experiments (OSSE), the China's next generation carbon satellite (TanSat-2) are presented. Similar to CO2M project supported by European Union, TanSat-2 will give global accurate retrieval of GHGs (1 ppm for CO₂ and 10 ppb for CH₄), pollution gases (1.0×10^{15} molecules/cm² for NO₂, 10% for CO) and solar-induced chlorophyll fluorescence (SIF) ($0.25 \text{ mw m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$) with a swath of 1000 km and a resolution 500 m resolution, which will provide unprecedented imaging capabilities for estimating GHG emissions.

Satellite remote sensing plays extremely role in build the MVS capability for global stocktake, we provide a reference for the roadmap of the Chinese carbon monitoring program based on the preliminary OSSE simulations. It is absolutely necessary to integrate satellite remote sensing, in-situ observations, big data, carbon assimilation to achieve high precision, high-resolution scientific data on GHG fluxes at hot-spot, regional and global scales, and to effectively distinguish and quantify the flux contributions of anthropogenic GHG emissions and terrestrial carbon sinks /sources.

Key words: global warming, carbon stocktaking, carbon emissions, carbon sources and sinks, satellite remote sensing, assimilation

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFB3901000); National Natural Science Foundation of China (No. 41825002)