



全球温室气体遥感监测和盘点研究综述与展望

刘良云^{1*}, 陈良富¹, 尹增山², 江飞³, 雷莉萍¹, 程天海¹, 潘洁¹, 朱金彪¹, 杨健¹, 胡岩峰¹, 牛沂芳¹, 张雨琮¹, 刘承府¹, 刘国华², 田龙飞², 胡登辉², 董冠宇³, 居为民³, 陶金花¹, 李正强¹, 石玉胜¹, 赵海涛¹, 闫冬梅¹, 刘新杰¹, 杜珊珊¹, 张丽丽¹, 李小英¹, 毛慧琴⁴, 沈路路⁵, 袁文平⁶, 周丰⁷, 张羽中⁸, 吴一戎¹

1. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094

2. 中国科学院微小卫星创新研究院, 上海 201203

3. 南京大学国际地球系统科学研究所, 南京 210023

4. 生态环境部卫星环境应用中心, 北京 100094

5. 北京大学物理学院, 北京 100871

6. 北京大学城市与环境学院, 北京 100871

7. 河海大学地理与遥感学院, 南京 210024

8. 西湖大学工学院, 杭州 310012

* 联系人, E-mail: liuly@radi.ac.cn

2024-10-02 收稿, 2024-12-04 修回, 2025-01-07 接受, 2025-01-13 网络版发表

国家重点研发计划(2023YFB3907403)和国家杰出青年科学基金延续项目(42425001)资助

摘要 《巴黎协定》确定通过国家自主贡献(NDCs)方式实现升温幅度控制在2℃的目标, 并建立了全球碳盘点机制, 且从2023年开始每五年进行一次全球碳盘点, 评估NDCs目标实现进展情况. 卫星遥感具有客观、透明、全球动态观测的优点, 我国也计划建设自主的全球碳盘点监测技术体系, 调研和展望全球温室气体遥感监测与碳盘点研究进展和趋势非常必要. 本文首先调研了温室气体的星空地监测技术、观测网络与国际观测计划等, 分析了温室气体星空地协同组网观测趋势, 即未来以高精度、多物种、宽幅高分辨率成像为特点的下一代碳卫星发射, 使得以卫星遥感数据为核心的全球碳盘点评估将成为可能. 其次, 以全球碳计划(Global Carbon Project, GCP)系列评估报告为核心资料, 调研了全球和区域尺度的温室气体排放与通量的科学评估现状, 并重点分析了卫星遥感和同化反演技术在CO₂、CH₄、N₂O三种主要温室气体排放估算的作用和能力现状, 分析了温室气体星空地协同组网观测趋势. 最后, 系统总结了我国温室气体监测与排放评估的需求, 并展望了我国开展全球温室气体盘点卫星遥感的重点任务, 即高精度、高分辨率、高时频的中国下一代温室气体监测卫星星座, 高分辨率、多物种的全球温室气体同化系统, 支持人为源和自然源温室气体排放校核的碳盘点业务平台. 本文面向气候变化履约和“双碳”国家战略的需求, 综述分析了全球温室气体遥感监测和盘点研究现状、重要进展和发展趋势, 可以为我国的全球碳盘点卫星遥感体系建设提供思路, 推动我国温室气体遥感技术的发展.

关键词 碳盘点, 温室气体排放, 全球变暖, 卫星遥感, 数据同化

自工业化以来, 化石燃料燃烧、工业生产和土地利用变化等人类活动排放了巨量的温室气体, 2024年3

月全球大气二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)和氧化亚氮(N₂O)浓度分别达到了创记录的423.46 ppm、1940.75

引用格式: 刘良云, 陈良富, 尹增山, 等. 全球温室气体遥感监测和盘点研究综述与展望. 科学通报, 2025, 70: 4134–4155

Liu L, Chen L, Yin Z, et al. Review and perspective of remote sensing research on global greenhouse gas monitoring and stocktaking (in Chinese). Chin Sci Bull, 2025, 70: 4134–4155, doi: 10.1360/TB-2024-1033

ppb和337.66 ppb, 分别为工业革命前(1750s)的1.57、2.77和1.25倍^[1-4]。这三种主要温室气体占全部温室气体增温效应的98%左右(<https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/>), 且其大气浓度还在快速增加, 最近10年全球大气CO₂、CH₄和N₂O浓度平均年增速分别为2.52 ppm、11.13 ppb、1.08 ppb^[1]。

面对全球人为温室气体排放和大气温室气体浓度持续上升, 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”的共识。2015年《巴黎协定》确定了通过国家自主贡献(nationally determined contributions, NDCs)的缔约方式实现《巴黎协定》定下的升温幅度控制在2℃的长期目标, 并建立了全球碳盘点(global stocktake, GST)机制, 这是应对气候变化行动的一个关键转折点(<https://unfccc.int/topics/global-stocktake>)。通过全球碳盘点可定期评估各缔约方在实现《巴黎协定》目标方面取得了哪些进展以及哪些方面没有进步, 全面审视地球系统的状态、全球气候行动和支持工作进展, 评估距离实现《巴黎协定》全球温控目标还有多大的差距等, 并为共同努力实现全球温控目标的解决方案提供定量数据支撑。

全球碳盘点从2021年联合国气候变化框架公约(COP)第26次缔约方大会(COP26)后开始了数据收集和准备、技术评估和审议产出。2023年COP秘书处首次发布了《巴黎协定》全球盘点报告《全球盘点技术综合报告》(https://unfccc.int/sites/default/files/resource/sb2023_09_adv.pdf)。该报告由大量事实数据支撑, 总结了近两年来全球有关应对气候危机的关键数据和观点, 首次集合了科学家、技术专家、商业人士、民间组织和众多群体的见解, 对全球削减温室气体排放、建立气候韧性应对、筹集气候资金等方面的行动进展进行了评估。报告对比了各国减排承诺与全球实际排放, 发现自2016年《巴黎协定》生效以来, 尽管全球在减排、采取行动适应极端气候等方面取得了相当大的进展, 但到2030年, 全球温室气体排放仍然面临203~239亿吨CO₂当量排放的执行缺口。

全球碳盘点报告在2023年首次发布后, 自此每五年将实施一次全球盘点, 核算缔约方温室气体排放和清除量, 以及评估缔约方采取的减排减缓气候变化应对措施效果。全球碳盘点是作为评估缔约方减排措施效果的基础依据, 也是我国履约和气候外交的重大需求。目前人为排放还是以行业经济活动统计数据作为基础, 使用自下而上的方法、利用人为活动数据和排

放因子的进行清单估算。该方法一方面需要良好的行业经济活动统计数据, 而许多发展中国家还缺乏自下而上方法的基础数据; 另一方面土地利用变化以及一些行业的排放和吸收估算还有很大的不确定性。与此同时, 自下而上的排放清单估算中对自然碳源汇的考虑还非常薄弱, 而温室气体对气候的影响不仅受人为排放的影响, 更是包括自然源贡献在内的地表与大气之间总净通量驱动。上述问题对全球碳盘点评估以及气候变化应对政策制定等带来了巨大不确定性。

卫星遥感观测数据具有客观、透明、高时空分辨率、动态观测等“一把尺子量全球”的优点, 已成为全球碳监测不可或缺的技术手段。随着卫星遥感技术的快速发展, 温室气体卫星遥感观测已能够为全球碳盘点提供全球温室气体浓度监测、自上而下的温室气体排放核算和清除提供基础事实数据, 并逐步成为新一代、国际认可的全球碳核查方法^[5]。2019年第49届政府间气候变化专门委员会(IPCC)全会上通过的“IPCC国家清单指南的改进方案”, 新增了利用卫星观测数据自上而下反演的温室气体通量来验证排放清单的新方法^[6]。世界气象组织(WMO)、国际卫星对地观测委员会(CEOS)等国际组织也纷纷提出了相应地温室气体观测网络和卫星观测计划, 以支撑2028年第二次全球盘点^[7]。

欧盟、美国、日本、加拿大等国家和组织正在大力发展温室气体排放监测-核查-支持(MVS)能力, 发射了具备大气CO₂和CH₄等温室气体观测能力的卫星, 如日本的温室气体观测卫星(Greenhouse Gases Observing Satellite, GOSAT)^[8]、加拿大的温室气体排放监测服务(Greenhouse Gas Emissions Monitoring Service, GHGSat)系列卫星^[9]、美国的轨道碳观测(Orbiting Carbon Observatory, OCO)系列卫星^[10]、欧洲的二氧化碳监测星座(Carbon Dioxide Monitoring constellation, CO2M)计划等^[11]。其中欧洲CO2M计划, 将于2025年发射两颗哨兵7号卫星, 通过宽幅、组网观测, 实现高时频的全球动态监测, 在2026年形成温室气体排放MVS的全球碳盘点技术能力, 为2028年第二次全球盘点提供全球0.05°网格分辨率的碳排放业务化监测数据, 将成为评估缔约方气候变化履约进展的重要数据依据。由此, 我国也亟需发展全球尺度、高分辨率、高时频、高精度碳监测能力, 提供国际引领和自主可控的中国碳监测方法和中国数据, 增强国际气候变化外交的话语权。中国2016年12月成功发射首颗碳卫星TanSat, 实

现了1.47 ppm精度的大气CO₂柱浓度(XCO₂)的反演; 2018和2024年相继发射了高分5号(GF-5)卫星和大气1号(DQ-1)卫星, 并计划于2025年发射DQ-2等, 实现大气温室气体主被动观测. 科学技术部“十四五”已立项支持, 并计划2026年发射下一代碳卫星, 不仅具备欧空局CO2M卫星的多参数同步观测能力, 还拥有4 km分辨率、1500 km幅宽的优势, 期望实现主要经济体的逐日观测目标, 为2028年第二次全球碳盘点提供方法和数据支持^[5].

卫星遥感观测的全球大气温室气体浓度以及自上而下同化反演的地气净碳通量是人为活动排放信息、自然生态系统排放与吸收以及自然活动排放(如火山喷发、野火等)等的总和信息, 而全球碳盘点和应对气候变化更需要温室气体人为排放、生态通量等专题信息. 因此需要科学家从温室气体观测的这些混合信息中分离来自人类活动排放的信息. 为实现全球碳盘点, 卫星应用研究需要解决如何从卫星观测光谱到温室气体浓度的反演、从浓度到通量的反演、从通量到人为源排放与生态系统碳通量的分离等一系列关键科技问题. 集成利用多源卫星-航空-地面(星空地)协同的多平台观测、大数据、数据同化等先进技术和方法, 构建综合的温室气体监测体系将成为全球盘点的重要途径, 以实现高精度全球温室气体通量的估算、有效分离人为活动和自然过程对温室气体通量的贡献, 从而阐明大气碳温室气体浓度变化的来源.

本文围绕全球盘点和气候变化应对的需求, 调研分析了国内外温室气体观测现状与发展趋势、全球主要温室气体(CO₂、CH₄、N₂O)排放与通量科学评估能力状况, 明确当前温室气体监测与校核的科学问题与技术难题, 并针对性地提出中国温室气体监测与校核方案, 为中国碳盘点与应对气候谈判、服务碳中和评估提供解决方案.

1 面向全球碳盘点的温室气体星空地一体化监测趋势

全球碳盘点需要对温室气体浓度和通量进行持续、精细监测, 以评估协议缔约方减缓措施的影响和整体有效性. 2023年世界气象大会(WMO)第19届会议批准了一项新的全球温室气体监测计划(Global Greenhouse Gas Watch, G3W)倡议. G3W旨在满足全球盘点和应对气候变化对温室气体浓度和通量相关信息的迫切需求, 同时解决人类和自然对大气中温室气体浓度

影响所存在的关键信息空白问题, 帮助缔约方国家了解对气候状况采取的减缓行动的影响以及GST报告的完成.

G3W聚焦CO₂、CH₄、N₂O三种主要温室气体的观测、建模和数据同化能力, 主要由4个部分组成: (1) 一套全面、持续、全球性的地面和卫星观测数据, 包括CO₂、CH₄和N₂O浓度、总柱量、垂直剖面以及气象、海洋和陆地辅助变量; (2) 基于活动数据和基于过程模型的温室气体排放先验估计; (3) 一套服务温室气体跨圈层循环模拟的全球高分辨率地球系统模型; (4) 观测与模型、同化等技术结合的高精度、精细时空分辨率的全球人为活动与自然过程的碳收支估算科学数据集. G3W为地面和卫星温室气体观测和建模产品及时的国际交流提供了一个平台. 参与G3W的各个模型系统将以通用标准格式提供至少4类数据产品: (1) 地表和大气之间的CO₂净通量, 时间分辨率逐月、空间分辨1°×1°, 最大延迟一个月; (2) 地表和大气之间的CH₄净通量, 时间分辨率逐月、空间分辨1°×1°, 延迟一个月; (3) 逐小时分辨率、近实时更新的CO₂和CH₄浓度三维场模拟数据; (4) N₂O浓度和净通量, 分辨率和更新时频待定.

G3W对应GST每5年报告时间节点设计了实施时间表, 如图1所示. G3W是在WMO多年观测运行的经验基础上搭建的框架. 根据WMO在协调天气预报和气候分析国际合作方面的经验、1989年以来全球大气观测(GAW)及其全球综合温室气体信息系统(IG3IS)下开展的温室气体监测经验, 以及有关研究成果的基础上, 将所有天基、航空和地基观测系统以及与温室气体监测相关的建模和数据同化能力集中在一个框架下. 面向碳盘点的业务化发展的G3W框架中温室气体观测网络和模型数据同化还需要更多的研究, 以解决目前框架中存在的一些问题, 如基于星-机-地观测的一体化、数据扩展以解决数据空白、模型辅助数据参数不足以及模型不确定性等科学问题.

1.1 地面遥感观测网络

由于卫星观测得到的是温室气体柱浓度, 本文调研了温室气体柱浓度地面观测网络现状. 温室气体柱浓度地基观测常用光谱遥感探测方法直接测量大气柱浓度. 当前, 全球地基观测网络主要有国际合作建设的总碳柱浓度观测网(total carbon column observing network, TCCON)、联合碳柱浓度观测网(collaborative

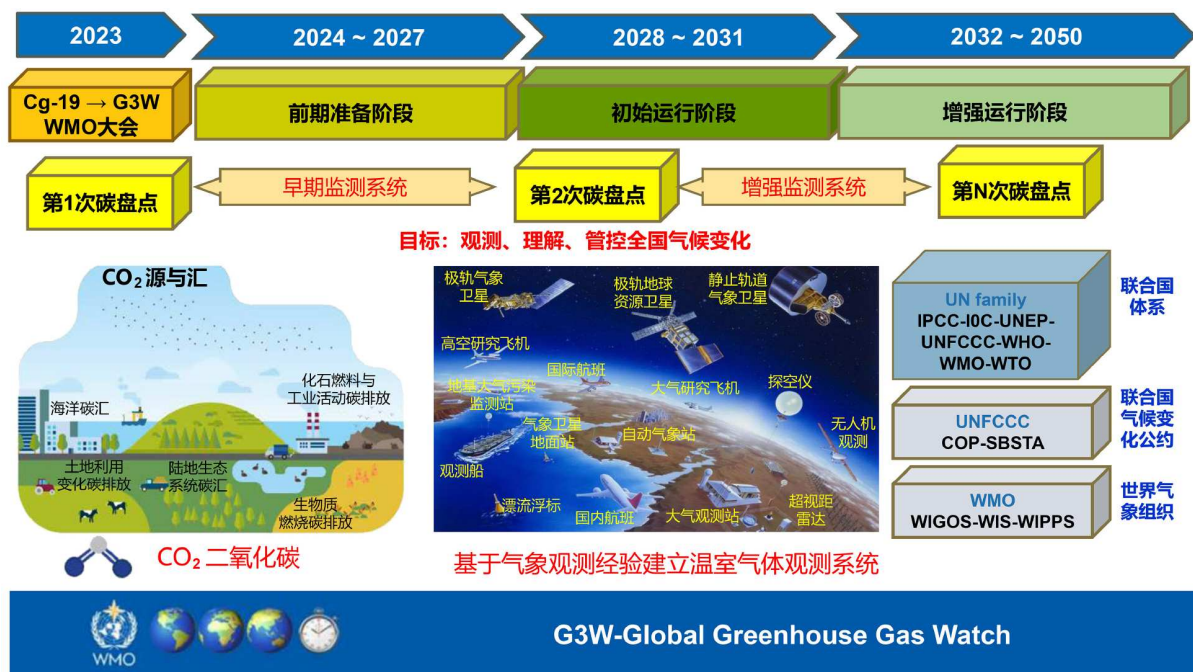


图1 G3W计划实施时间表、范围和背景信息图^[7]

Figure 1 The implementation timeline, scope, and context of G3W initiative^[7]

carbon column observing network, COCCON)、大气成分变化探测网(network for the detection of atmospheric composition change, NDACC)三个主要地面观测网络,可以获得连续、稳定、高质量的大气温室气体柱浓度观测数据。

TCCON全球共39个站点,覆盖北美、欧洲、亚洲、澳洲、南美等。国内有香河站和合肥站两个站点加入了该网络^[12]。TCCON观测站点均采用傅里叶变换光谱仪(Fourier transform spectrometers, FTS)Burker IFS 125HR观测大气CO₂、CH₄、N₂O、HF、CO、H₂O和HDO的柱浓度^[13]。按照GGG2020数据说明, TCCON观测的XCO₂误差小于0.16%(约0.6 ppm)、XCH₄产品误差低于0.4%(约7 ppb)、N₂O的产品误差低于1.25%(约为4 ppb)^[14]。TCCON观测数据已成为卫星反演XCO₂结果的交叉验证和偏差校正的主要地面数据源^[13,15]。然而,由于Burker IFS 125HR观测和维护成本高,限制了其在全球广泛设置观测站点。

COCCON在全球布设有27个站点,主要分布在欧洲、北美洲和非洲(<https://www.imk-asf.kit.edu/english/3884.php>)。COCCON观测站使用便携Bruker EM27/SUN傅里叶变换光谱仪观测CO₂、CH₄、H₂O和CO。与

TCCON同步观测的对比验证表明, EM27/SUN与TCCON产品之间的年漂移量: XCO₂约0.02 ppm, XCH₄约0.9 ppb; 两个数据之间的偏差: XCO₂约为3.9 ppm, XCH₄为13.0 ppb^[16]。比TCCON成本较低的COCCON便携式EM27SUN能够提供与TCCON相近的观测精度和准确性^[17]的观测数据,其长期的稳定性和集成性能能够增加更多的地面观测数据,为卫星观测和模型模拟提供在多种地表情况下的地面验证参考。

NDACC在全球共有118个站点,主要集中在欧洲和北美洲,而在非洲、亚洲、大洋洲和南美洲站点比较少,国内有合肥站和香河站2个站点^[18]。NDACC采用不同的地面观测仪器(探空仪、激光雷达、微波辐射计、傅里叶变换红外光谱仪、差分吸收光谱仪以及紫外光谱辐射计)对CO₂、CH₄、N₂O、O₃、H₂O、CO等多种气体的柱浓度和廓线进行测量^[19]。NDACC的XCH₄产品和XN₂O产品的精度估计高于1%^[19]。NDACC观测数据已为50多台星基探测仪的数据验证和算法改进提供了持续的支持。全球碳盘点需要扩展建设更多具有长期稳定性的地基观测站点,为卫星观测的验证和偏差校正以及模型数据同化提供高精度准确的观测数据。

1.2 温室气体航空监测方法与体系

温室气体的航空观测主要有采样、原位测量和遥感三种模式。国际上系统地进行长时序温室气体航空观测的有日本国立环境研究所(National Institute for Environmental Studies, NIES)负责的空中客机痕量气体综合观测网络(comprehensive observation network for trace gases by airliners, CONTRAIL)和美国国家温室气体廓线飞机采样观测项目(national observations of greenhouse gases aircraft profiles, NOGAP)。

CONTRAIL项目采用了采样观测的方式, 利用商业航空公司飞机高频率、广覆盖的优势, 在日本航空公司运营的波音747-400、777-200ER和777-300ER飞机上安装了CO₂连续测量设备和改进的自动空气采样设备^[20]。CONTRAIL的观测对象包括CO₂、CH₄、N₂O、CO和SF₆等常见的温室气体和痕量气体浓度和廓线, 覆盖区域包括亚洲、欧洲、北美洲、澳大利亚等全球重点区域。CONTRAIL项目成果取得了不同气体种类的年际变化、对流层分布与跨半球传输等多个科学发现^[20-22]。此外, 美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)和美国联合航空公司2024年7月宣布, 将在美国联合航空公司波音737客机上搭载一套先进仪器, 用于测量美国国内航线的温室气体和污染物气体浓度, 提升对CO₂、CH₄和其他温室气体浓度廓线变化的认知^[23]。

为了准确获取温室气体浓度垂直梯度的时空变化, 美国国家海洋和大气管理局的全球温室气体基准网络项目(Global Greenhouse Gas Reference Network's aircraft program, GGGRN)构建了观测台站和航空平台, 通过采样测量CO₂、CH₄、N₂O、CO浓度和垂直廓线。GGGRN在全球部署了60个采样点、在美国部署了14个常规航线, 平均每月3次采集空中样本。GGGRN数据能够让科学家准确地跟踪大气温室气体垂直分布及其动态变化, 已经成为气候科学家广为使用的基础科学数据集。目前在不同飞行的高度收集了12个烧瓶样本(高达13000 m), 用于分析CO₂、N₂O、CH₄、CO、H₂、SF₆、CO₂和CH₄同位素以及多种卤代烃和烃类物质。收集的数据揭示了整个年度北美大陆范围内痕量气体水平和垂直分布变化, 这种全年大尺度、三维刻画的大气痕量气体混合比为评估北美大陆对碳基硫化物和CO₂等长寿气体示踪剂的浓度变化提供了重要依据^[24,25], 并为正向和逆向反演模型的参数标定提供了

重要基准^[26,27]。此外, 各国众多机构也开展了系列的大气温室气体廓线采样观测实验, 如基于AirCore采样器和航空飞行器对大气进行采样观测分析等^[28]。

此外, 航空高光谱成像数据能获得热点排放源的高分辨率温室气体浓度的梯度场信息, 为点源排放估算提供了全新的探测方法, 并在最近十年内迅速得到了广泛应用^[29,30]。如Sherwin等人^[31]基于航空遥感高光谱数据, 结合点源排放量模型模拟定量评估美国6个油气生产区的石油和天然气生产过程CH₄排放, 结果显示6个生产区的总排放量约高于国家清单排放3倍。

1.3 温室气体卫星遥感观测现状与发展趋势

卫星遥感正逐步成为新一代、国际认可的全球温室气体监测与人为碳排放校核技术。欧盟、美国、日本、加拿大等国家和组织正在大力发展温室气体排放监测-核查-支持能力, 发射并规划了系列温室气体观测卫星, 温室气体观测种类、观测精度、观测时空分辨率等核心指标越来越高。已发射或即将发射具备大气CO₂、CH₄浓度以及N₂O柱浓度观测能力的卫星分别如表1和2所示。

从2009年第一颗温室气体专用观测卫星GOSAT的发射以来, 温室气体卫星遥感观测技术开始快速发展。随着美国OCO-2、OCO-3以及中国的TanSat等卫星相继发射、卫星遥感观测浓度反演方法的改进和精度的提高, 其卫星观测温室气体产品已得到广泛应用。

目前在轨卫星遥感观测反演的大气CO₂、CH₄、N₂O柱浓度的误差分别为1~4 ppm、<18 ppb和<30 ppb, 浓度反演方法也还在不断的完善中。卫星遥感反演温室气体浓度的最常用方法是最优估计理论的全物理反演方法(Rodgers, 2008)。在模拟辐射传输的物理过程中考虑了水汽、温度、云特别是气溶胶等大气和地表状态参量对光谱的影响, 并同步订正大气和地表等参数, 以提高反演精度。目前不同机构开发了多种算法, 如NIES-FP(national institute for environmental studies-full physics)^[32]、ACOS(atmospheric CO₂ observations from space)^[33]、UoL-FP(university of leicester full physics)^[34]和RemoTeC(remote sensing of greenhouse gases for carbon cycle modelling)^[35]、RemoTAP8^[36]、FOCAL^[37]、IAPCAS^[38]等, 并对应公开发布了卫星遥感数据产品。然而当前无论哪种方法仍不能全面地描述气溶胶的光学性质, 导致高气溶胶背景反演误差大。此外, 针对最优化估计的全物理算法的计算量巨大, 难以

表 1 全球已发射(*)、在轨运行(**)和规划(+)的CO₂和CH₄观测卫星信息汇总^{a)}Table 1 Summary of Launched and scheduled observation satellites for CO₂ and CH₄

卫星/载荷	国家/组织	发射时间	轨道(km)	精度		幅宽(km)	空间分辨率
				CO ₂ (ppm)	CH ₄ (ppb)		
SCIAMACHY*	欧盟	2002	772	16	—	960	32 km×60 km
IASI**	法国	2006, 2012, 2018	817	2	16	2000	25 km×25 km
GOSAT**	日本	2009	666	<4	34	N/A(640)	φ10.5 km
OCO-2*	美国	2014	705	1	<5	10.6	1.29 km×2.25 km
TanSat**	中国	2016	700	1~4	—	20	1 km×2 km
GHGSat* ⁺	加拿大	2016~2024	500	4	18	12	25 m
FY-3D*	中国	2017	836.4	1~4	—	—	φ10 km
GF-5*	中国	2017	705	2	10	865	10.3 km
Sentinel-5P*	欧盟	2017	824	—	5.6	2600	7 km×5.5 km
OCO-3*	美国	2018	394	1~2	<5	16	~4 km ²
GOSAT-2*	日本	2018	613	1~2	5	N/A(632)	φ9.7 km
GF-5B*	中国	2021	705	N.A	N.A	865	10.3 km
DQ-01*	中国	2022	705	N.A	N.A	N.A	N.A
FY-3G*	中国	2023	407	N.A	N.A	N.A	N.A
Carbon Mapper*	美国	2024	400	N.A	N.A	18	30 m
MethaneSAT ⁺	美国	2024	590	—	3	200	100 km×400 m
GOSAT-GW ⁺	日本	2024	666	N.A	N.A	911/90	10 km/1~3 km
TanSat-2 ⁺	中国	2026	待定	1	8	1500	4 km
DQ-02 ⁺	中国	2025	705	N.A	—	>100	3 km
Sentinel-5 ⁺	欧盟	2025	817 km	—	N.A	2670	7.5 km×7.5 km
Microcarb ⁺	法国	2025	650 km	0.5~1	—	13.5	2 km×2 km
IASI-NG ⁺	法国	2025	817 km	N.A	N.A	2000	25 km×25 km
CO2M ⁺	欧盟	2026	602 km	0.7	10	>250	4 km
SCARBO ⁺	欧盟	>=2028	-	0.5~1	4~6	200	2.3 km×2.3 km
MerLin ⁺	法国	>=2028	500 km	—	22	—	φ50 km
OCO-neXt ⁺	美国	2030	705 km	<1	<5	400	<4 km

a) “—”表示不涉及该技术指标; “N.A”表示该技术指标未提供; “待定”表示该技术指标还未正式确定

表 2 全球已发射(*)、在轨运行(**)和规划(+)的N₂O观测卫星信息汇总Table 2 Summary of Launched and scheduled observation satellites for N₂O

卫星/载荷	国家/组织	发射时间(年)	轨道(km)	精度N ₂ O(ppb)	幅宽(km)	空间分辨率
ADEOS/IMG*	日本	1996	797	3~9	1000	8 km×8 km
AQUA/AIRS**	美国	2002	705	8	1650	φ13.5 km
ENVISAT/SCIAMACHY*	欧盟	2002	774	<30	960	30 km×60 km
AURA/TES**	美国	2004	705	20	885	0.53 km×5.3 km
METOP-A/IASI*	欧盟	2006	705	3~10	2400	φ12 km
GOSAT/TANSO*	日本	2009	666	6	790	φ10.5 km
FY-3D/GAS**	中国	2017	836	—	2250	10 km×10 km
GOSAT-2/TANSO-2**	日本	2018	613	4	903	φ9.7 km
METOP-SG/IASI-NG+	欧盟	2025	835	3	2000	φ12 km
FY-3H/GAS-2+	中国	2025	836	—	2900	3 km×3 km
Meteor-MP/TGSP+	俄罗斯	2025	830	—	1000	φ8~14 km
MIN2OS/TIR+	欧盟	2031	830	3	300	10 km×10 km

满足全球高时频、高分辨率的温室气体卫星遥感反演需求. 作为一种高效的数学工具——神经网络方法, 可以对复杂的非线性关系进行模拟与计算, 有望实现温室气体卫星的实时反演需求^[39,40].

当前温室气体卫星遥感还存在分辨率低、或窄带扫描或时空不连续的问题. 如目前在轨运行的GOSAT卫星为10 km分辨率、打点观测观测模式, OCO-2为1.29 km×2.25 km分辨率、10 km窄带扫描, 此外, GHGSat等温室气体商业遥感卫星, 其空间分辨率达到了10 m量级(25 m), 为提升点源排放量的检测精度提供了新的解决方案^[41,42]. 温室气体卫星遥感的高分辨率、全球观测优势同时为模型模拟实现全球碳通量和浓度优化反演提供有效的约束^[43]. 未来, 温室气体卫星遥感在观测技术上需要提高时间和空间分辨率, 并提高浓度反演精度和准确度. 我国在温室气体卫星遥感进展巨大, 如发射温室气体主动激光雷达卫星具备昼夜观测的独特优势, 2026年将发射的下一代碳卫星可以实现1 ppm精度的温室气体浓度反演, 还大幅提升了观测时间频率和空间分辨率.

2 全球温室气体排放与通量评估现状与问题

2.1 全球人为源碳排放与生态系统碳汇的估算研究

全球碳计划2023年定量评估了2013~2022年10年期间大气CO₂浓度增量、化石燃料和工业排放、土地利用变化排放、陆地生态系统碳汇和海洋生态系统碳汇等5个部分, 如图2所示^[2]. 来自化石燃料和工业的碳排放(E_{FF})是当前全球大气CO₂浓度增加的最主要原因. E_{FF} 主要包括化石燃料(煤炭、石油、天然气)燃烧(如交通、供暖)、工业过程(如钢铁、水泥的生产)和工业燃烧(如化工企业)造成的碳排放. 2022年全球 E_{FF} 达9.9 PgC, 其中41%来自煤炭, 32%来自石油, 21%来自天然气, 4%来自水泥, 1%来自工业燃烧, 其他成分占比不足1%.

2023年全球碳计划(Global Carbon Project, GCP)评估报告还指出2013~2022年期间全球CO₂排放量为10.9±0.8 Pg C a⁻¹, 其中 E_{FF} 为9.6±0.5 Pg C a⁻¹, 约占总CO₂排放量的88%^[2]. 因此, 精确量化评估 E_{FF} 及其变化对各国减排控排成效的评估、政策的制定以及深入理解其对大气CO₂浓度影响的科学分析具有重要作用.

2.1.1 全球化石燃料和工业碳排放遥感评估研究现状

当前对 E_{FF} 的评估主要依据《IPCC国家清单指南》

采用自下而上方法, 如全球碳收支数据库(GCP)^[44]、二氧化碳信息分析中心数据档案库(CDIAC)^[45]、全球大气研究排放数据库(EDGAR)^[46]、英国石油公司(BP)、中国多尺度排放清单(MEIC)^[47]等. 不同排放清单估算的全球 E_{FF} 总量具有较好的一致性, 不确定性约为5%; 但在国家尺度, 由于使用的活动水平和排放因子数据的差异, 相对不确定可达10%~50%. 例如Guan等人^[48]利用我国国家统计局和各省的统计数据估算了1997~2010年我国的 E_{FF} , 发现基于国家统计数据的估算量与依据各省统计数据的估算结果相差达1.4 Pg CO₂. Liu等人^[49]发现, 我国的实际燃煤碳排放因子相比IPCC中发布的排放因子低, 这导致CDIAC等排放清单对我国的碳排放存在约14%的高估. 除了估算的排放总量差异外, 不同清单由于使用了不同的方法进行网格化, 导致评估的 E_{FF} 在空间分布上也有显著差异. 例如CDIAC使用全球人口分布作为依据进行空间网格化, 而ODIAC清单则使用全球夜间灯光数据结合全球火电厂分布进行空间网格化^[50]. 依据这些排放清单统计的城市尺度的碳排放量存在更大的不确定性(>50%).

随着温室气体卫星遥感观测观测技术日趋成熟, 2019年第49届IPCC全会上通过了《IPCC国家清单指南》的改进方法, 明确增加了采用基于大气浓度(卫星遥感和地面观测)反演温室气体排放量, 进而检验和校正传统排放清单的方案^[6]. 自2009年第一颗温室气体专用观测卫星GOSAT发射, 加之后期OCO-2等卫星观测反演精度的提高, 利用温室气体卫星遥感观测在人为CO₂排放评估的应用研究得到了迅速发展.

大型电厂和工业点源是温室气体排放最大来源. 近年来大型电厂等强排放目标的排放量化监测已成为研究热点. 大型火电厂点源的CO₂浓度排放量明显高于周边区域背景浓度, 利用卫星观测捕捉点源排放引起的大气CO₂浓度变化, 结合大气风场模型(如高斯烟羽模型), 以欧美和中国区域的大型排放点源为对象已经开展了大量点源排放量的评估^[41,51,52]. 评估结果指出了由于清单排放对点源排放评估的不足将导致区域排放存在较大的不确定性^[41,52]. 利用与化石燃料和工业活动碳排放同源的污染大气成分如NO₂、CO卫星观测, 结合模型模拟示踪污染气体排放源及其轨迹, 能够有效改进点源CO₂排放的估算精度^[53,54].

在区域尺度上, 卫星观测的大气CO₂浓度除了人为排放的CO₂信息外还包含了区域生态系统碳通量^[55,56], 以排放活跃的城市以及城市群为对象研究表明基于卫



图2 2013~2022年10年期间大气CO₂、人类活动和自然(陆地和海洋)生态系统的全球碳收支^[2]

Figure 2 The global carbon budget of human activities, atmospheric CO₂, and natural uptakes by terrestrial and marine ecosystems during the decade 2013–2022^[2]

星观测数据的同化方法(如集成卡尔曼滤波、四维变分等)可以分解生态系统碳通量同时优化人为CO₂排放^[53,54,57]。部分研究利用了与CO₂排放同源的污染气体卫星观测数据,通过污碳协同分析,可以评估区域(国家和城市)排放的变化趋势^[54,58]。

在城市研究尺度上,Zheng等人^[42]基于2014~2019年OCO-2卫星观测数据,运用高斯烟羽模型将XCO₂增强信号与研究区内人为排放源相关联,成功定量分析了我国46个城市中60个烟羽案例的CO₂排放量。Zheng等人^[54]开发了一套基于NO₂卫星遥感观测的人为源“碳污协同”反演系统,成功捕捉到2020年初新冠疫情期间我国E_{FF}的大幅下降。Feng等人^[59]用一个基于集成卡尔曼滤波的区域多空气污染物同化框架(RAPAS),同化我国站点NO₂浓度观测并反演NO_x排放后,结合清单提供的CO₂/NO_x排放比计算我国CO₂日排放,发现我国西部的E_{FF}存在显著低估,而东部发达地区和重点城市的E_{FF}则存在明显高估。

此外,基于多源卫星观测和多模态数据约束的机器学习方法构建数据驱动模型^[60~62],也可以评估区域和全球尺度的人为CO₂排放。如Zhang等人^[61]利用1°分辨率网格化CO₂柱浓度卫星产品,以清单数据作为模型训练数据,构建了随机森林模型实现了全球碳排放清单的准确模拟与动态更新。然而,当前全球CO₂卫星产

品的1°分辨率过于粗糙,难以满足小尺度的排放估算需求。为此,如Zhang等人^[60]基于污碳同源排放特征,利用TROPOMI卫星NO₂柱浓度卫星产品,进一步实现了0.1°分辨率的全球碳排放清单的遥感大数据估算与动态更新。然而,这类数据驱动的机器学习方法受限于训练清单的准确性和客观性,排放估算不确定性问题有待进一步解决^[59,63]。

综上,受当前碳卫星观测的幅宽和重返频率的限制,利用温室气体卫星观测数据开展E_{FF}排放评估研究主要集中在区域和点源尺度的排放量估算和验证。如何协同利用与CO₂排放同源的大气成分(如NO₂、CO等)多源卫星观测,以及与人为排放活动以及自然生态系统CO₂吸收/排放相关的卫星遥感观测(如夜光、日光诱导叶绿素荧光(SIF))等参数数据,结合数据同化和大数据方法,是提高E_{FF}排放卫星遥感量估算精度的主要途径。

2.1.2 陆地生态系统碳汇遥感评估现状

陆地生态系统碳汇(简称陆地碳汇)是减缓大气CO₂浓度上升以及全球气候变暖的重要一环。最新的GCP报告显示^[2],2013~2022年期间全球陆地碳汇为3.3±0.8 Pg C a⁻¹(图2),高于海洋生态系统碳汇(2.8±0.4 Pg C a⁻¹)。然而,受到气候变化、自然生态环境以及人类生产活动等多方面因素影响,陆地碳汇呈现出明显的时

空变化,导致全球大气CO₂浓度呈现明显波动,进而影响陆地碳通量的估算精度^[64].因此,精确评估陆地碳汇的时空变化特征、明晰其影响和驱动机制具有十分重要的科学意义.

样地清查、站点通量观测、遥感监测、模型模拟和自上而下的大气反演优化是目前评估陆地碳汇的主要方法.这些方法各具优势和不足,同时它们盘点评估的内容存在一定的差异,评估的结果也存在很大不确定性.陆地生态系统模型模拟和大气反演方法在全球和区域尺度碳汇评估中得到了越来越广泛的关注^[5,65].陆地生态系统模型根据陆地生态系统碳循环的机理,模拟陆地生态系统与大气之间的能量和物质交换,分析其对气候变化、大气CO₂浓度升高、自然干扰(如火灾)和人类活动(如放牧、砍伐、土地利用变化、管理)的响应^[66].然而,由于不同模型在碳循环过程表达方法和假设、参数化方案、阈值设置和碳库初始化等方面存在诸多差异,陆地生态系统模型对全球/区域陆地碳汇的模拟具有较大的不确定性,GCP使用了16个陆地生态系统模型结果的集合估算全球陆地碳汇,不同模型模拟的全球陆地碳汇的差异可达40%以上^[2].

自上而下的大气反演优化方法利用生态系统模型模拟的净生态系统生产力(NEP)、人为源和野火碳排放清单数据作为先验通量,采用大气化学传输模型模拟大气CO₂浓度,假定人为源排放无误差,通过最小化模拟与观测的大气CO₂浓度之差反演地表碳通量(后验通量),得到优化后的陆地碳汇^[67,68].基于全球或区域大气化学传输模型,采用各种数据同化技术融合大气CO₂浓度等观测数据,许多学构建了各自的碳同化系统,以实现对全球或区域地表碳通量高分辨率的优化计算^[57,69].不同的全球碳同化系统在反演全球尺度陆地碳汇时具有较好的一致性,最新的GCP报告中使用了14个全球碳同化系统,对全球陆地碳汇进行反演估算,14个系统反演的全球净碳通量与观测的CO₂年增长率的误差均小于0.1 ppm^[2].然而,由于碳同化系统高度依赖于观测数据,在观测站点稀疏的地区,如东亚、非洲和南美等,反演估算的陆地碳汇不确定仍较大^[70,71].

GOSAT、OCO-2和TanSat等碳卫星的发射,很大范围地填补了大气CO₂浓度观测数据空白,为碳同化系统提供了更多且一致性较高的卫星XCO₂观测数据^[72].研究表明卫星XCO₂可以改进区域陆地碳汇的估算结果^[73,74],揭示极端气候事件对陆地碳汇的影响^[67,75].Zhang等人^[76]利用了12个生态系统模型结果作为先验

通量,基于GOSAT XCO₂反演了全球不同区域的陆地碳汇,结果指出由于GOSAT观测数据的全球覆盖有限且存在3 ppm左右的误差,只能在大洲尺度得到可靠的估算结果,在次大洲以及更小尺度,观测数据约束的空白对反演结果影响很大.对于区域尺度的陆地碳汇反演优化估算,不同学者给出的结果存在显著差异.例如对于2010年澳大利亚陆地生态系统,一些研究认为是碳汇^[43,73],而在另一些研究显示为碳源^[74,77].同样,分别基于GOSAT和OCO-2观测的XCO₂对欧洲陆地碳汇的估计显示了很大差异(-0.9~1.8 Pg C a⁻¹)^[43,78].在中国,不同学者反演估算的陆地碳汇在0.3~1.11 Pg C a⁻¹^[79~81].导致这些差异的原因,一方面是反演优化方法各不相同,包括大气传输模型、误差设置、优化算法和先验通量等;另一方面是当前的观测数据量以及精度仍存在不足,GOSAT、OCO-2等卫星观测反演XCO₂的误差在1~3 ppm,误差的传递很大程度影响了反演优化结果.

综上,区域和国别尺度陆地碳汇的评估当前还存在很大的不确定性.卫星CO₂浓度观测的是降低陆地碳汇不确定性的有效途径.为了进一步提高陆地碳汇的估算精度,未来,一方面需采用多模式/系统集成方法^[2,82],以降低模型/系统设置对反演结果的影响;另一方面,需要协同利用地基、塔基、航空和卫星等星空地立体观测数据,并进一步提高观测数据精度和质量,降低观测误差对陆地碳汇估算的影响.

2.2 全球人为源CH₄排放与收支的评估现状

CH₄温室气体效应仅次于CO₂.相比大气CO₂,大气CH₄的寿命短,但其微量变化的辐射效应强,升温潜能值是CO₂的80倍以上.如何快速且持续地减少CH₄排放,近年来被视为是减缓全球变暖和应对气候变化的关键.引起大气CH₄浓度升高的来源包括自然源如湿地、内陆水域、地质源,以及人为源如农业活动、化石燃料(油气田和煤矿)开采和生产、垃圾废物处理等.

人为CH₄排放评估方法包括自下而上和自上而下方法^[3,83,84].自下而上方法根据CH₄排放过程的科学理解,如湿地的生物地球化学循环、农业活动和化石燃料的开采等,利用过程模型模拟这些过程,并结合详细的活动数据和排放因子估算不同源的CH₄排放量^[85].这种自下而上方法有助于理解CH₄排放机理以及环境因素如何影响CH₄的产生.自上而下方法考虑了大气中CH₄浓度的时空分布,利用地面和卫星大气观测数据,

结合大气化学传输模型反演估计地表排放,揭示了不同地区和时间段的排放变化^[86]。

面向区域和全球尺度的大气CH₄监测卫星分辨率在0.1~10 km,主要有GOSAT、TROPMI/Sentinel-5P以及未来规划的CO2M、GeoCarb、MERLING等;面向点源排放及其羽流监测的高空间分辨率大气CH₄卫星有GHGSat、VEGA/PRISMA、EMIT、EnMAP、MethaneSAT以及我国的GF-5、ZY-1E和GF-5B等(表1)。此外,Sentinel-2、Worldview-3以及Landsat-8等卫星的多光谱观测也被组合应用于识别和量化大型CH₄排放点源。

由于CH₄超大型点源如油气和煤矿开采以及储气设施泄漏等排放很大程度地影响了全球和区域排放量的评估精度^[87],近年来有关CH₄排放点源的卫星识别及其排放量估算等研究备受关注。很多学者以油气、煤矿以及垃圾填埋场等热点排放源为研究对象,开展了CH₄排放卫星监测研究。如中美典型CH₄超级排放源、山西和澳大利亚煤矿、土库曼斯坦输油管泄漏、海上油气生产平台等CH₄排放量的卫星估算。这些研究指出卫星观测能够检测CH₄排放点源及羽流,量化约500~1600 kg/h排放量^[88-90]。在北美洲基于卫星的区域排放监测结果表明人为年CH₄排放(30.6 Tg)略高于EPA(Environmental Protection Agency)Inventory of US Greenhouse Gas Emissions and Sinks(GHGI)格网清单排放量(28.7 Tg),分析指出了差异主要来自油气部门对清单对点源排放评估不足有关。点源排放的检测和量化将影响全球和区域排放估算的精度^[91,92],进而影响对于全球CH₄排放承诺的评判^[87]。目前卫星光谱仪检测CH₄排放阈值在100~10000 kg/h范围,能够监测大型CH₄排放点源,发现以前未知的排放源并量化总排放量。随着CH₄点源检测卫星星座的扩展,包括GHGSat和Carbon Mapper星座及我国即将发射的CH₄卫星星座等,未来几年将通过密集观测将提高点源观测系统的完整性、空间覆盖范围和重访周期,有助于更好地了解CH₄排放的时空变化;从点源、区域到全球的多尺度立体观测对满足全球CH₄承诺需求具有足够的通用性。

在全球尺度,Sauniois等人^[3]在全球碳项目框架下集成多学科领域科学家最新研究,采用自下而上和自上而下方法评估了2010~2019年全球CH₄收支(GMB报告),评估结果如图3所示。

对于不同的排放源和汇,图3所示的GMB报告提供

了估计的不确定性范围,评估了不同方法和数据源之间的差异,以及它们对总排放量估算的影响。2010~2019年期间人为直接年均CH₄排放总量为369 Tg,与自下而上的方法(358 Tg CH₄)显示了统计上的一致性;但自上而下方法的估算平均高于自下而上方法11 Tg CH₄ a⁻¹。全球尺度上基于卫星观测与基于地面观测反演的年均排放基本一致,基于GOSAT的反演略高于基于地面的反演。自上而下评估湿地平均占CH₄总排放量的28%,但在自下而上的评估中仅占24%,存在很大的不确定性。全球CH₄收支自上而下评估结果指出总排放量约65%来源于人为活动(化石燃料生产和使用、农业和废物以及人为生物质燃烧)的直接排放,35%来源于自然(湿地和内陆水域等)的排放。CH₄的汇主要为大气中羟基自由基(OH)的氧化作用,约占总汇机制的90%^[93];剩余清除是由于光化学(与氯原子(Cl)和激发原子氧(O(¹D)))反应、土壤中的氧和海洋边界层中的光化学^[94]。2010~2019年期间每年大气OH和O(¹D)对CH₄的氧化作用清除521 Tg CH₄ a⁻¹,不确定性约为2%。

尽管多学科、多源数据、多方法集成等在全球、区域及不同来源的CH₄排放评估中发挥了重要作用,然而当前全球CH₄收支评估时空分辨率不足以支持国别和不同来源的CH₄排放评估,GMB评估结果依然存在巨大不确定性(图3),面临的问题和挑战主要表现为如下5个方面^[3]。

(1) 湿地和内陆水域排放的不确定性。湿地和内陆水域的CH₄排放量估算存在较大不确定性,主要由于这些生态系统的空间分布不均和排放动态复杂。例如,内陆淡水系统的排放量估算范围较广,从小型湖泊和池塘到河流和水库,不同研究得出的排放量估算值差异较大。此外,湿地和内陆水域的排放量受到气候、水文条件和人类活动的影响,这些因素增加了预测和量化排放的难度。

(2) 人为源的排放估算。农业和化石燃料行业的CH₄排放量估算需要更精确的数据和模型。农业排放主要来自家畜肠道发酵和稻田,而化石燃料行业的排放则与煤炭开采、石油和天然气系统有关。这些领域的排放量估算存在差异,部分原因是不同研究采用了不同的活动数据和排放因子。

(3) 温室气体观测网络的不均衡覆盖。观测网络在不同地区的覆盖度不均衡,特别是在热带和南半球地区,观测站点较少,这限制了对区域排放的准确估计。

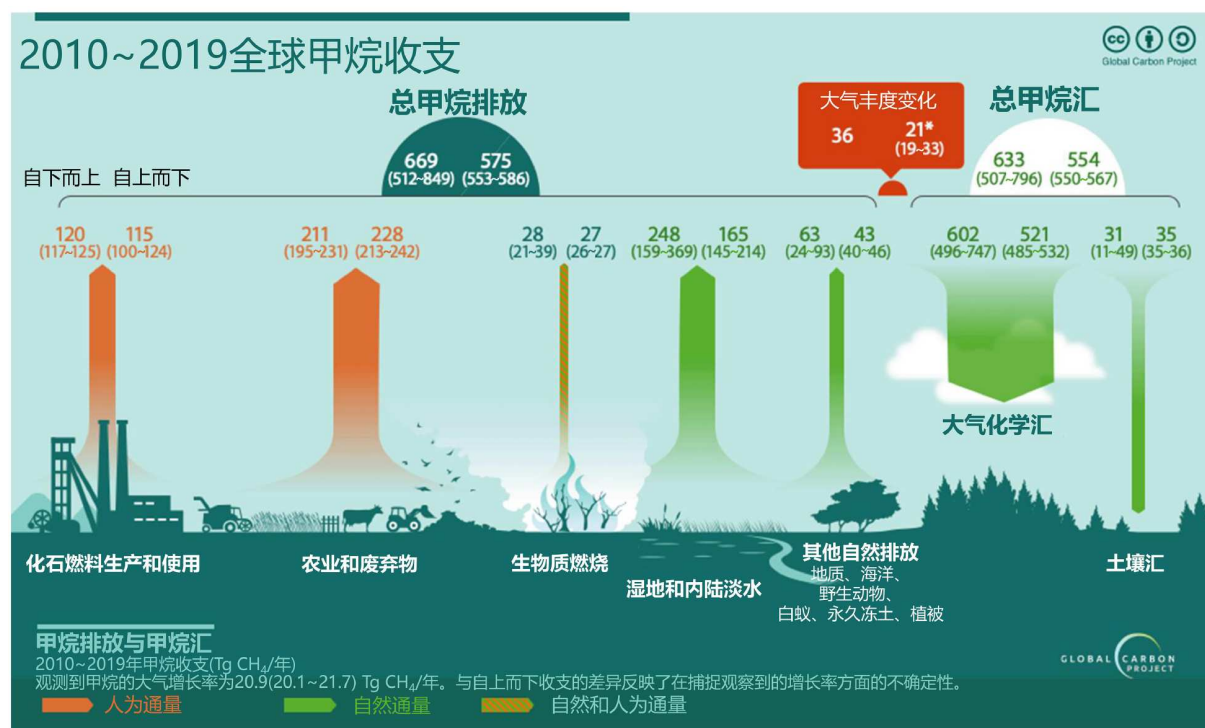


图 3 2010~2019年人类活动、大气CH₄与自然生态系统的全球CH₄收支^[3]

Figure 3 The global methane budget (GMB) of human activities, atmospheric CH₄, and natural uptakes during 2010–2019^[3]

卫星观测为这些地区提供了重要的补充信息，但仍然存在系统性误差和云层覆盖等问题。

(4) 模型和观测的一致性. 不同模型和观测结果之间存在差异，这可能是由于模型输送、化学过程表达的差异，以及观测技术和方法的不同。未来需要提高模型和观测结果之间的一致性。

(5) 化学移除的不确定性. CH₄在大气中的化学移除，尤其是与羟基自由基的反应，存在不确定性。不同模型对羟基自由基浓度的估算差异较大，这影响了对CH₄化学移除的准确估计。

2.3 全球人为源N₂O排放与收支的评估现状

大气N₂O是仅次于CO₂、CH₄导致全球变暖的第三大温室气体，其寿命超过100年，是CO₂气候辐射强迫的10%，且是目前平流层消耗臭氧层物质中最重要的排放气体，阻碍着臭氧空洞的恢复^[95]。由于全球N₂O排放量的迅速增加，近年来观测到的大气N₂O浓度已开始超过IPCC第六次评估报告耦合模型比对项目第6阶段(CMIP6)中预测的所有情景下的N₂O水平^[96]。在过去10年中N₂O排放量每年增加0.25%~0.30%，预计未来几十

年N₂O排放量还将继续增加^[97-99]。

大气N₂O主要由土壤、海洋和淡水系统中发生硝化和反硝化微生物过程^[100]产生，以及部分来自不完全燃烧和某些工业过程产生的非生物排放源排放^[98]。来自微生物过程的排放很大程度上受环境条件(土壤水分、温度、氧气可用性等)以及管理措施等多种因素的影响，在时间上和空间上呈现出很大的变化，给N₂O排放的模拟和预测带来了挑战。全球N₂O收支评估结果表明，全球N₂O总排放量(~17 TgN a⁻¹)的~57%源于自然排放，剩余~43%来自人为排放；人为排放以农业(由于氮添加肥对氮循环的扰动)为主(约52%)，工业和化石燃料燃烧贡献了约27%^[99]。

自下而上的N₂O排放估算方法已广泛用于估算全球的国家排放^[46,101]。该方法采用固定的排放因子，没有考虑环境因素对N₂O排放的影响^[102,103]，来自农业和废物处理部门的排放因子不确定性高达300%(https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/4_Volume4/V4_11_Ch11_N2O&CO2.pdf)。部分学者利用机器学习模型方法模拟估算了土壤N₂O的排放，由此改进全球陆地N₂O排放估算精度^[104,105]。为了进一步解析不同驱

动因素对全球 N_2O 排放(人为和自然)的影响过程,部分学者利用生态系统过程模型,综合考虑了肥料利用、大气氮沉降、土地利用变化、气候变化、大气 CO_2 浓度变化等控制土壤 N_2O 排放的多种驱动因素,模拟影响 N_2O 产生和排放的关键过程,计算输出全球 N_2O 排放^[106,107]。然而自下而上方法由于数据和模型存在的多种问题(如排放因子的不确定性、模型输入数据的不确定性、缺乏对 N_2O 排放机理的准确认知形成的不同过程模型中生物地球化学过程参数化的差异等问题),导致区域和全球 N_2O 排放估算结果存在很大的不确定性。

自上而下的大气反演优化方法可以通过大气 N_2O 浓度观测的约束,实现 N_2O 排放和收支的估算。大气反演优化方法利用大气 N_2O 浓度观测数据,结合气象场驱动的大气输送模型,以先验排放为初始值,在先验排放与观测的不确定性约束下贝叶斯统计求出最优 N_2O 排放^[108]。截至目前自上而下估算 N_2O 排放还是基于稀疏的地面观测(如国际观测站点网络,辅以飞机^[109]和船舶活动测量)计算量化全球和欧洲每月 N_2O 源^[110,111],尚未同化卫星遥感观测数据。这是因为目前搭载在 N_2O 卫星上的热红外TIR(thermal infrared)观测仪主要反演平流层 N_2O 浓度,还难以用来约束地表 N_2O 排放的时空变化。虽然如此,与大气 CO_2 和 CH_4 同样,卫星观测数据已被认为是自上而下方法补充稀疏地区观测的重要信息源,特别是人类难以进入的重要地区例如热带地区。

目前 N_2O 观测卫星主要有红外大气探测干涉仪(infrared atmospheric sounding interferometer, IASI)、大气红外探测器(atmospheric infrared sounder, AIRS)和GO-SAT等。这些卫星搭载的TIR观测反演结果对约300 hPa对流层上部的 N_2O 浓度最为敏感^[112~114]。GOSAT和IASI已经分别提供了对流层上部 2° 和 1° 分辨率的格网 N_2O 浓度数据^[114]。虽然TIR观测的敏感性还难以应用于自上而下大气反演优化模型的数据同化中,然而通过卫星观测反演的 N_2O 浓度变化特征的归因分析可以推测地表 N_2O 浓度的变化。如GOSAT观测到地中海盆地对流层上部 N_2O 浓度夏季最大,追溯原因分析发现亚洲季风反气旋将印度次大陆和中国东部对流层下层即地表升高的 N_2O 浓度重新分配到了对流层上部,然后在对流层上层向非洲北部和地中海盆地输送^[112,115]。NASA Aura卫星Microwave Limb Sounder (Aura/MLS)观测已在提供自2004年8月以来全球平流层 N_2O 、 O_3 和温度数据,该数据已被用于简单的平流层化学模型

估算 $\text{O}(^1\text{D})$ 光解和氧化引起的 N_2O 月平均平流层损失即汇^[95,116]。

Tian等人^[106,117]根据2018年启动的全球 N_2O 模式比对项目(NMIP),集成自下而上多种方法(20种)和4个自上而下反演模型(INVICAT, PyVAR-CAMS, MIROC4-ACTM, GEOS-Chem)方法输出的结果,量化了2010~2019年人为源排放、自然源排放以及大气化学汇,评估了全球 N_2O 收支,如图4所示^[4]。自下而上方法量化了四类人为源:1-农业排放(土壤直接排放、牧场粪便、粪便处理、水产养殖),2-其他人为直接排放(化石燃料和工业、废物和废水、生物质燃烧),3-人为氮添加的间接排放(内陆水体河口海岸植被、陆地大气氮沉降、海洋大气氮沉降),4-气候、 CO_2 和土地覆盖变化效应扰动的通量(CO_2 、气候、森林砍伐后的波动、成林面积长期缩小),以及自然源(土壤、海洋、大陆架、内陆水体、河口、海岸、闪电和大气产生)和地表汇(土壤和湿地)。自上而下方法利用了大气地面观测网NOAA(<https://gml.noaa.gov/hats/combined/N2O.html>, <https://gml.noaa.gov/ccgg/arc/?id=132>)、AGAGE (Advanced Global Atmospheric Gases Experiment)^[118]和CSIRO(Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization)^[119]等观测数据,集成量化了总体通量(总排放和平流层 N_2O 汇),未能量化排放源的各项排放和地表汇。

自下而上方法评估的2010~2019年人为源排放结果指出,全球 N_2O 平均人为总排放量占总排放量的35%,其中农业氮添加产生的直接排放量占据了人为排放总量56%;其他人为直接排放值和人为氮添加的间接排放,分别占人为排放总量25%和19%。而人为源的气候效应和土地覆盖的变化效应对 N_2O 排放总体产生了负效应,主要是因为成林面积的减少和大气 CO_2 浓度的增加。

对比自下而上方法与自上而下方法,2010~2019年全球 N_2O 年总排放量的估算结果非常一致,分别为18.2(10.6~25.9) Tg N和17.0(15.8~19.2) Tg N^[4]。然而,自下而上估算值显示出较大的不确定性范围,部分原因是不同过程模型估算结果的离散性导致。基于自下而上集成的全球 N_2O 排放与汇的年总收支为4.9 Tg N,与基于自上而下集成的年均大气 N_2O 留存量(4.6 Tg N)并未达到平衡一致。这是因为自下而上的每项源和汇都是独立得出,自上而下方法并未调整每项源和汇去强迫计算结果的一致。这个不平衡量显示了 N_2O 收支闭合

的总体不确定性范围。

此外,全球 N_2O 收支评估按照国家和区域特征将全球花划分了18个区,评估并对比自下而上和自上而下方法的估算结果。根据自下而上评估结果,近10年(2010~2019年)全球人为源 N_2O 排放中,中国占17.8%,其次南亚13.2%、欧洲11.8%、美国6.7%、赤道非洲6.5%、北非6.4%、东南亚5.7%,其他11个区域均低于5%,最低额的南美洲北部小于1%。另外,总体上农业排放是人为排放增加的主要驱动因素。在上述全球排放量占比在10%~18%的3个区域中,在中国区域自下而上和自上而下评估给出了一致的年均 N_2O 总排放量,分别为1.41(0.82~2.23) Tg N 和1.33(1.06~1.60) Tg N 。根据自下而上评估结果,2010~2019年期间农业氮添加是 N_2O 排放的主要来源,占年均总排放量的48%(0.68(0.48~1.03) Tg N);自然源仅贡献了总排放量的21%(0.29(0.20~0.51) Tg N)。

全球 N_2O 收支报告中的自下而上评估结果的不确定性主要在 N_2O 清单排放因子、土壤 N_2O 排放估算的不确定性(过程模型、土地覆被变化/森林砍伐等)以及海洋和大陆架的 N_2O 排放。而自上而下大气反演排放估算的不确定性主要来自大气传输模拟的误差、先验信息以及大气观测资料数量与质量。当前 N_2O 大气观测站点相对稀疏分布,需要建立更多站点、定期航空廓线以及卫星观测,尤其是在热带和亚热带地区,以更好地约束反演模型并进一步减少后验的不确定性。

综上所述,卫星观测数据已是自上而下方法的潜在数据源,可以通过卫星观测的 N_2O 在时间和空间的变化远程追踪 N_2O 排放足迹^[112,113]。当前 N_2O 星载TIR传感器仅敏感于对流层上部(约300 hPa)的 N_2O ,限制了自上而下同化方法中卫星观测数据的应用。以IASI和IASI-NG观测技术为基础,欧洲航天局(ESA)的The Monitoring Nitrous Oxide Sources(MIN2OS)卫星(2031~2032)计划研制新型TIR传感器,目的是首次研究区域和全球 N_2O 地表通量的年际变化^[120]。MIN2OS设计观测幅宽300 km,空间分辨率10 km,将提供陆地(夏季白天)和海洋的对流层最底层(900 hPa) N_2O 浓度数据,并研发基于大气卫星观测的排放反演优化模型估算全球和区域地表 N_2O 通量(空间分辨率全球尺度1°、区域尺度10 km;时间分辨率月和周)。MIN2OS计划与Metop-SG搭载的IASI-NG和Sentinel-2 NG实施时空协同观测,为反演过程中利用地表特性、大气成分(污染气体、温室气体和气溶胶)垂直剖面和气温去优

化估计 N_2O 的垂直剖面。此外,建立天-空-地一体的 N_2O 通量综合监测和分析体系,可以更好地诠释 N_2O 排放的时空格局、减少不确定性,支持 N_2O 科学减排,为抑制全球变暖提供重要支撑。

3 我国温室气体监测与排放评估需求与重点任务

我国在碳卫星监测方面具有一定研究基础和长期工作积累,如2016年发射首颗国产碳卫星(TanSat)、2018年发射GF-5卫星,2022年发射DQ-1卫星,2026年发射DQ-2以及下一代碳卫星(TanSat-2)等,正逐步形成高精度大气 CO_2 卫星监测能力。这些卫星缺乏包括 CH_4 、 N_2O 等非二温室气体在内的全要素、全球监测能力的星座设计,缺乏长期、持续的卫星观测计划。

国内学者在温室气体浓度反演及其通量的优化计算方面也取得了飞速进展,但与国际先进水平相比,还存在4方面的问题:(1)温室气体反演模型依赖国外开源模型,缺乏自主的高精度、高效率的大气辐射传输模型和反演算法,卫星反演算法尚不能满足高浓度背景、复杂气溶胶和下垫面情况的亚ppm CO_2 、ppb N_2O 的重大科学需求;(2)全球碳同化系统多为1°分辨率,还不能满足中小国家的精细盘点需求,且同化系统缺乏自主的大气化学传送模式和陆面过程模式,模式基础驱动数据也受制于人,溯源研究长期处于跟随角色;(3)已有的少数碳盘点数据产品不仅分辨率低(1°分辨率水平),而且不闭合、无法自洽,自上而下同化反演和自下而上模型模拟两种策略或同一策略不同算法的差异高达数倍;(4)碳盘点卫星MVS方法体系缺乏,虽然可以实现陆气碳通量的同化反演,但是需要假设人为源碳排放清单的误差可以忽略才能得到生态系统碳通量的估算结果,可靠拆分人为源碳排放和生态系统碳通量贡献的技术亟待发展,中国自主提出的应对全球气候谈判的科学产品体系尚未建立。

3.1 建设高时频、高精度、多要素的温室气体监测卫星体系

首先,在卫星平台技术上,面向全球温室气体高时频、高精度、高分辨率、高一致性的观测需求,优化卫星轨道与任务模式设计,构建中轨超大幅宽多要素监测的卫星组网观测体系,实现全球逐日的高时频观测。重点攻关内容包括:突破高载荷承载比平台、复杂空间环境保护、多温区共基准等技术,开展卫星平台

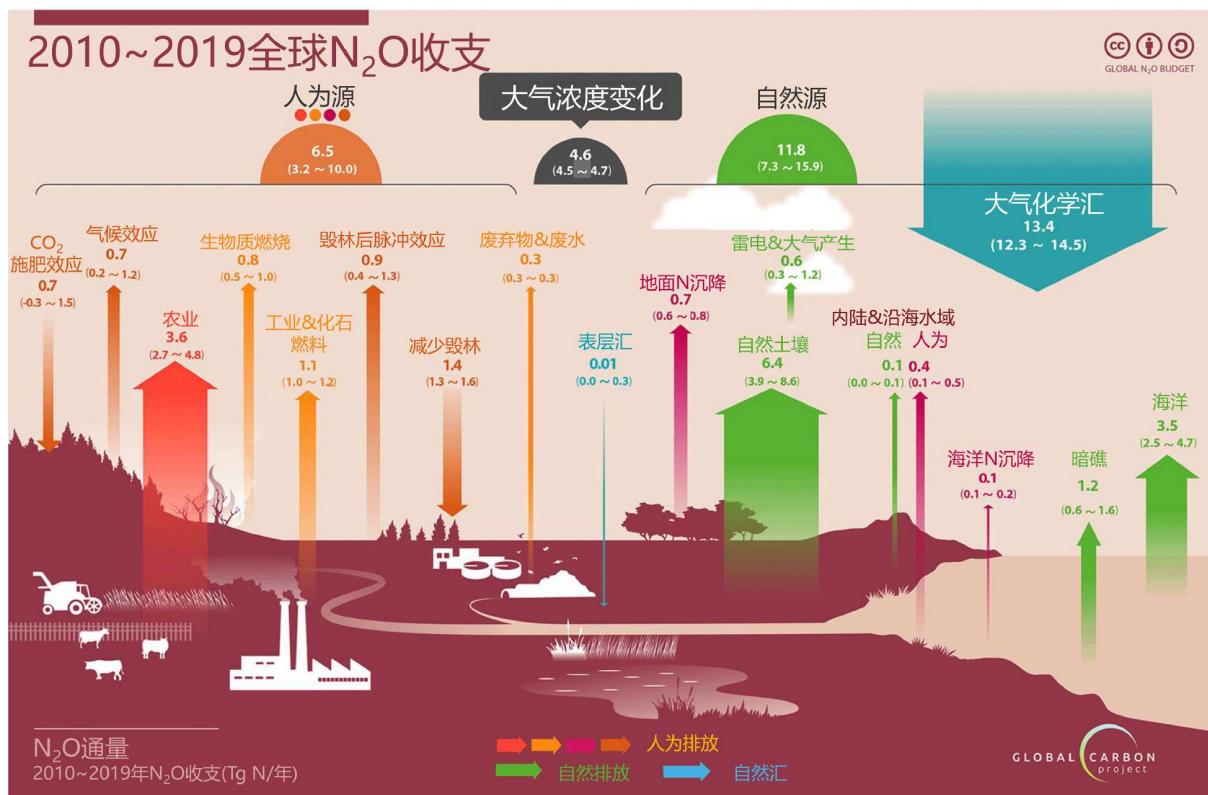


图 4 2010~2019年全球N₂O收支^[4]

Figure 4 Global N₂O budget during 2010~2019^[4]

的轻量化、高可靠设计, 构建多轨道部署、多体制协同的卫星组网观测体系和卫星星座; 针对多星数据高量化要求下的质量控制难题, 突破多星高一致高精度定标技术, 创新星地激光定标等手段, 实现多星高精度光谱比对; 突破基于自主云判与观测路径智能优化的多星协同观测技术, 实现观测数据有效率的提升。

其次, 在传感器观测技术上, 开展超大幅宽高灵敏度高分辨率多要素监测仪技术研究, 突破高稳定、大面阵、低噪声、高灵敏度短波红外传感器器件, 实现高分辨率与大幅宽兼顾, 同时提升探测精度和稳定性; 突破高衍射效率大尺寸光栅等核心光学元件, 进一步提升系统效率; 发展全链路多温区光学设计、低温装调、高精度定标、谱线弯曲和色畸变校正新方法, 构建高空间分辨率、大视场、大口径、低畸变的超大幅宽高灵敏度高分辨率多要素监测仪, 其性能指标支持对CO₂、CH₄、N₂O、光学厚度(AOD)、NO₂、SIF等多要素监测。

最后, 需要开展中轨长寿命卫星极端空间环境防护技术研究, 突破复杂卫星构型三维屏蔽仿真关键技术,

实现重点器件的辐照剂量仿真、局部复合屏蔽优化设计和综合屏蔽效能评估; 突破低质量面密度高阻止本领新型空间辐射防护材料的设计与制备技术, 研究空间环境因素对航天材料的作用机制, 重点评估高密度聚乙烯、聚丙烯、环氧树脂等各种材料对空间质子的防护性能, 开发新型防护材料, 完成新材料制备, 大幅提升卫星抗辐照性能, 保障长寿命、高一致性的全球温室气体观测。

3.2 发展温室气体排放的高分辨率同化反演新方法

现有碳同化系统分辨率低, 难以有效同化卫星海量观测实现国别尺度盘点, 如何构建适应卫星公里级分辨率和全球每日1次覆盖的全球变网格高分辨率温室气体同化系统, 以实现CO₂、CH₄和N₂O的同步高效反演, 存在巨大科学与技术挑战。而且, CH₄和N₂O自然源排放复杂、大气汇的不确定性巨大, 极大地影响了地表排放的估算, 需要专门攻关, 从而提高CH₄和N₂O地表排放估算精度。此外, 当前模式驱动基础数据受制于人, 还需发展自主的全球高分辨率三维大气与陆面

再分析数据集研制技术. 为此, 项目需要开展四方面研究.

首先, 改进 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 自然源汇的生物地球化学模拟, 包括土地利用变化碳排放与陆地生态系统碳循环模拟模型, CH_4 稻田、湿地排放模型, N_2O 草原和农田、土壤排放模型等. 基于多源遥感观测数据, 改进全球稻田、湿地、湖泊信息监测能力, 优化模型参数, 改进不同区域不同类型生态系统排放模拟精度, 实现 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 自然源汇的高时空分辨率模拟估算.

其次, 发展和改进温室气体大气化学传输模式. 开发高分辨全球大气化学传输模型, 完善大气化学模式中的平流层和对流层的 N_2O 和 CH_4 的化学反应机制, 并基于多源遥感观测数据估算全球OH自由基的浓度分布, 改进 CH_4 大气汇的模拟; 耦合全球-区域多尺度陆面生态系统碳循环模型和多尺度温室气体大气传输模型, 实现陆面生态模型和大气传输模型在线动态交互反馈.

再次, 发展自主的全球高分辨率三维大气与陆面再分析数据集研制技术. 当前各类大气和地球系统模式的基础驱动数据受制于人, 迫切需要探讨采用更先进的大气与陆面过程同化技术, 融合更多国内外观测资料特别是国产观测, 研制更高分辨率(10 km)、更高频次(1 h)、更高质量的全球大气与陆面再分析数据集, 来支撑全球温室气体同化系统运行.

最后, 研究全球多尺度、多重网格技术的高分辨率温室气体同化反演系统构建关键技术. 针对碳卫星每日一次、公里级分辨率全球覆盖的特点, 迫切需要发展更先进的大气与陆面过程同化技术; 创新基于可变网格模型的高分辨率全球碳同化系统构建技术, 集成大气化学传送模型、大气光化学模型和陆地生态系统过程模型, 能够同化三种温室气体, 并将陆地区域同化分辨率从 1° 提升至 0.1° .

3.3 构建要素齐全的温室气体盘点应用模型与产品体系

首先, 需要突破温室气体高精度反演技术. 当前国际温室气体卫星遥感反演面临3大挑战. 首先在洁净大气环境下 CO_2 反演精度可达1 ppm、 CH_4 可达8 ppb, 然而高气溶胶背景下的反演精度尚无法满足盘点需求, 而全球碳盘点重点关注的人为碳排放主要发生在气溶胶浓度较高的城市区域. 其次 N_2O 温室气体的红外通道卫星遥感虽然能够获得优于5 ppb柱浓度反演精度, 但

红外通道对高层大气敏感、底层浓度不敏感, 而 N_2O 排放主要影响低层大气浓度变化, 短波反射通道对低层大气浓度变化更为敏感, 但基于短波反射通道的3 ppb N_2O 高精度反演影响是国际难题, 在我国也还是空白. 此外, 碳盘点卫星星座将开创高精度、高时频观测先河, 日监测有效数据量高达40 TB. 为进行业务化碳盘点, 当日完成全部轨道数据处理与产品生产面临前所未有的挑战. 为解决上述难题, 未来需要发展自主的高光谱快速辐射传输模型, 在不降低反演精度同时大幅提升反演计算效率. 利用碳卫星气溶胶与温室气体协同观测的优势, 提出并建立全新的耦合多角度偏振遥感气溶胶光学性质信息的反演模型, 以降低由于气溶胶光学性质不确定性引入的反演误差. 发展基于短波反射通道的 N_2O 卫星反演新方法, 实现复杂气溶胶背景、全球尺度的温室气体高精度反演与产品生产.

其次, 突破人为源与自然源的温室气体排放的精准分离技术. 卫星遥感直接探测的大气 CO_2 浓度时空变化是人为源排放与自然生态系统通量的混合信号. 当前自上而下的卫星数据同化方法仅能探测陆气净通量, 而生态系统光合呼吸的碳通量比人为源排放高1个数量级, 如何从陆气净通量中分离化石燃料与工业活动的人为源排放, 面临巨大挑战. 为解决这一关键难题, 碳盘点卫星将具备温室气体、 NO_2 示踪物、SIF等多参数观测能力. 如何利用污碳同源排放特性, 从陆气碳通量混合信号中准确分离化石燃料碳排放, 尚停留在思路和探索阶段. 为此, 未来需要研究化石燃料与工业活动引起的大气污染物与碳同源的排放机制, 研究联合同化卫星 CO_2 和 NO_2 拆分陆气碳通量, 结合SIF遥感进一步优化光合作用碳通量, 创新污碳协同和植被荧光双约束的人为源分离技术, 实现全球和国别尺度的化石燃料与工业活动碳排放的高精度量化.

最后, 以全球碳盘点卫星的自主数据为核心, 在上述高精度温室气体反演、精细分辨率跨圈层温室气体同化、人为源与自然源排放的精准分离和陆地生态系统碳收支估算等关键技术研究基础上, 开展模型算法集成研究, 构建全球碳盘点科学产品生产与分析平台, 提出全球碳盘点科学分析方法, 研制全球碳盘点科学产品生产系统, 构建如表3所示覆盖全球碳盘点指标的核心产品与指标体系.

3.4 构建温室气体浓度与通量的校核技术体系

真实性检验与校核是保障全球碳盘点产品准确可

表 3 全球碳盘点产品与指标体系

Table 3 The potential remote sensing products and their specifications for global carbon stocktaking

产品名称	精度或不确定度指标	时空分辨率
卫星反演产品	XCO ₂ XCH ₄ XN ₂ O XNO ₂ SIF 气溶胶	0.8 ppm 5 ppb 3 ppb $1.3 \times 10^{15} \text{ mole cm}^{-2}$ $0.3 \text{ mw m}^{-2} \text{ nm}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ $0.05 + \text{AOD} \times 15\%$ 4 km 逐日全球覆盖产品
盘点应用产品	人类活动CH ₄ 排放 人类活动N ₂ O排放 化石燃料与工业活动CO ₂ 排放 土地利用变化CO ₂ 排放 陆地生态系统CO ₂ 汇	全球<5%、国别<10% 全球<15%、国别<30% 全球<3%、国别<10% 全球<20%、国别<30% 全球<10%、国别<20% 全球0.1° 重点区域4 km 月度和年值产品

信的关键。针对温室气体产品校核面临的对象复杂性、时空异质性、精度挑战性等难题，未来需要建设涵盖三种温室气体的“空、地、塔、车多平台”高精度综合立体观测系统。从四个方面构建温室气体浓度和通量的校核技术体系，实现高质量校核。

(1) 三种温室气体的浓度和通量观测网络建设。构建涵盖有人机、无人机和浮空器等多种类型的航空高精度温室气体观测平台等，实现地基的大气温室气体柱浓度连续观测、点源排放目标连续观测、高精度温室气体航空观测以及对企业级点源温室气体排放监测等。

(2) 构建温室气体柱浓度产品的真实性检验系统。针对高时空异质性的全球碳盘点柱浓度产品校核难题，基于地面-塔基-车载-航空等多手段综合协同观测数据，突破航空原位与地基观测协同的点尺度柱浓度高精度反演、格网柱浓度产品的校核模型，构建全球碳盘点格网尺度柱浓度校核系统，实现温室气体柱浓度高精度校核。

(3) 人为源和自然源排放的有效分离与校核系统。针对不同场景的复杂自然源和人为源排放难以精确区分和量化的问题，研究基于测量的碳排放量估算、碳同位素及示踪气体等多要素约束的人为源和自然源分离方法、碳排放量及人为碳排放量格网尺度解析等关键技术，建立全球碳盘点格网化碳排放量校核系统，实现碳排放量高精度校核。

(4) 全链路误差溯源与质控。针对不同来源的碳盘点校核数据质量差异显著、误差难以定量评估等问题，研究校核数据误差解析及量化表征方法，研发校核产品误差溯源与质控标识系统，实现碳盘点校核数据全

过程质量控制与量化标识。

4 结语

2019年IPCC在国家温室气体清单指南修订稿中，提出了利用温室气体观测方法来验证排放清单的指导性技术框架。欧盟、美国、日本、加拿大等近年来正相继规划部署温室气体观测卫星，大力发展温室气体排放MVS能力，并体现出以下趋势：(1) 高分辨率宽幅成像观测。新规划的卫星设计将提供更高的空间分辨率，能够识别点源碳排放；提供更大的幅宽，提高了同一区域的重访频次，提高了对碳源汇时间动态变化的捕捉能力。(2) 高精度、高一致性的温室气体探测。通过创新全反射波段的高光谱传感器，提高大气温室气体探测的精度；同时借助先进的反演、同化和验证方法，保证数据一致性和质量。(3) 多物种温室气体与多要素陆气参数协同探测。未来碳卫星不仅关注CO₂，还监测CH₄、N₂O等在内的多种温室气体，且考虑人为排放源监测需求，设计了NO₂示踪物、气溶胶、SIF等陆气参数的协同观测模式。(4) 天空塔地一体化的多源数据融合与集成应用。整合多源卫星数据、航空、塔基、地面等多平台监测信息，发展自上而下同化反演、大数据估算等新方法，实现更精准的排放源识别与排放量核查，提高盘点和分析能力。

为此，我国开展全球碳盘点卫星遥感，亟需在以下三个方面取得突破：(1) 突破温室气体高精度观测与反演关键技术，构建高精度、高一致性、高分辨率、大幅宽的温室气体监测卫星星座，提供高精度、高时空分辨率温室气体、NO₂、SIF和气溶胶等卫星产品；(2) 突破遥感与模型协同的陆地生态系统碳通量监测、

化石燃料与工业活动碳排放的污碳协同反演、土地利用变化碳排放精细估算等关键技术, 大幅降低全球碳收支估算的不确定性; (3) 构建高分辨率、多物种的全

球温室气体同化系统, 研发要素齐全的全球碳盘点科学数据产品, 实现产品研发、同化、应用服务一体化, 支持全球碳盘点、服务我国双碳国家战略目标。

参考文献

- Lan X, Thoning K W, Dlugokencky E J. Trends in globally-averaged CH₄, N₂O, and SF₆ determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements. Version 2024-08. 2022, <https://doi.org/10.15138/P8XG-AA10>
- Friedlingstein P, O'Sullivan M, Jones M W, et al. Global carbon budget 2023. *Earth Syst Sci Data*, 2023, 15: 5301–5369
- Saunois M, Martinez A, Poulter B, et al. Global methane budget 2000–2020. *Earth Syst Sci Data Discuss*, 2024, 2024: 1–147
- Tian H, Pan N, Thompson R L, et al. Global nitrous oxide budget (1980–2020). *Earth Syst Sci Data*, 2024, 16: 2543–2604
- Liu L, Chen L, Liu Y, et al. Satellite remote sensing for global stocktaking: methods, progress and perspectives (in Chinese). *Natl Remote Sens Bull*, 2022, 26: 243–267 [刘良云, 陈良富, 刘毅, 等. 全球碳盘点卫星遥感监测方法. 进展与挑战. *遥感学报*, 2022, 26: 2243–2267]
- IPCC. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. IPCC Geneva, Switzerland, 2019
- Balsamo G. G3W Global Greenhouse Gas Watch Home, 2024, <https://confluence.ecmwf.int/display/G3W/G3W+Global+Greenhouse+Gas+Watch+Home>
- Masakatsu N, Akihiko K, Hiroshi S. The current status of GOSAT and the concept of GOSAT-2. In: proceedings of the Proc.SPIE, 2012
- Jervis D, McKeever J, Durak B O A, et al. The GHGSat-D imaging spectrometer. *Atmos Meas Tech*, 2021, 14: 2127–2140
- Hammerling D M, Michalak A M, Kawa S R. Mapping of CO₂ at high spatiotemporal resolution using satellite observations: global distributions from OCO-2. *J Geophys Res*, 2012, 117: 2011JD017015
- Kuhlmann G, Broquet G, Marshall J, et al. Detectability of CO₂ emission plumes of cities and power plants with the Copernicus Anthropogenic CO₂ Monitoring (CO2M) mission. *Atmos Meas Tech*, 2019, 12: 6695–6719
- TCCON. Total Carbon Column Observing Network (TCCON). <https://tccondata.org/>
- Wunch D, Toon G C, Blavier J F L, et al. The Total Carbon Column Observing Network. *Phil Trans R Soc A*, 2011, 369: 2087–2112
- Laughner J L, Toon G C, Mendonca J, et al. The Total Carbon Column Observing Network's GGG2020 data version. *Earth Syst Sci Data*, 2024, 16: 2197–2260
- Lindqvist H, O'Dell C W, Basu S, et al. Does GOSAT capture the true seasonal cycle of carbon dioxide? *Atmos Chem Phys*, 2015, 15: 13023–13040
- Frey M, Sha M K, Hase F, et al. Building the CO2 Collaborative Carbon Column Observing Network (COCCON): long-term stability and ensemble performance of the EM27/SUN Fourier transform spectrometer. *Atmos Meas Tech*, 2019, 12: 1513–1530
- Alberti C, Hase F, Frey M, et al. Improved calibration procedures for the EM27/SUN spectrometers of the CO2 Collaborative Carbon Column Observing Network (COCCON). *Atmos Meas Tech*, 2022, 15: 2433–2463
- NDACC. Network for the Detection of Atmospheric Composition Change. <https://ndacc.larc.nasa.gov/>
- García O E, Schneider M, Ertl B, et al. The MUSICA IASI CH₄ and N₂O products and their comparison to HIPPO, GAW and NDACC FTIR references. *Atmos Meas Tech*, 2018, 11: 4171–4215
- Machida T, Matsueda H, Sawa Y, et al. Worldwide measurements of atmospheric CO₂ and other trace gas species using commercial airlines. *J Atmos Ocean Tech*, 2008, 25: 1744–1754
- Nakazawa T, Miyashita K, Aoki S, et al. Temporal and spatial variations of upper tropospheric and lower stratospheric carbon dioxide. *Tellus B-Chem Phys Meteor*, 1991, 43: 106–117
- Umezawa T, Matsueda H, Oda T, et al. Statistical characterization of urban CO₂ emission signals observed by commercial airliner measurements. *Sci Rep*, 2020, 10: 7963
- NOAA. NOAA and United Airlines partner to measure greenhouse gases, pollutants with high-tech flight instruments, 2024, <https://www.noaa.gov/news-release/noaa-and-united-airlines-partner-to-measure-greenhouse-gases-pollutants>
- Crevoisier C, Sweeney C, Gloor M, et al. Regional US carbon sinks from three-dimensional atmospheric CO₂ sampling. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2010, 107: 18348–18353
- Montzka S A, Calvert P, Hall B D, et al. On the global distribution, seasonality, and budget of atmospheric carbonyl sulfide (COS) and some similarities to CO₂. *J Geophys Res*, 2007, 112: D09302
- Campbell J E, Carmichael G R, Chai T, et al. Photosynthetic control of atmospheric carbonyl sulfide during the growing season. *Science*, 2008, 322: 1085–1088

- 27 Stephens B B, Gurney K R, Tans P P, et al. Weak northern and strong tropical land carbon uptake from vertical profiles of atmospheric CO₂. *Science*, 2007, 316: 1732–1735
- 28 Membrive O, Crevoisier C, Sweeney C, et al. AirCore-HR: a high-resolution column sampling to enhance the vertical description of CH₄ and CO₂. *Atmos Meas Tech*, 2017, 10: 2163–2181
- 29 Frankenberg C, Thorpe A K, Thompson D R, et al. Airborne methane remote measurements reveal heavy-tail flux distribution in Four Corners region. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2016, 113: 9734–9739
- 30 Johnson M R, Conrad B M, Tyner D R. Creating measurement-based oil and gas sector methane inventories using source-resolved aerial surveys. *Commun Earth Environ*, 2023, 4: 139
- 31 Sherwin E D, Rutherford J S, Zhang Z, et al. US oil and gas system emissions from nearly one million aerial site measurements. *Nature*, 2024, 627: 328–334
- 32 Oshchepkov S, Bril A, Yokota T, et al. Effects of atmospheric light scattering on spectroscopic observations of greenhouse gases from space. Part 2: algorithm intercomparison in the GOSAT data processing for CO₂ retrievals over TCCON sites. *JGR Atmos*, 2013, 118: 1493–1512
- 33 O'Dell C W, Connor B, Bösch H, et al. The ACOS CO₂ retrieval algorithm – Part 1: description and validation against synthetic observations. *Atmos Meas Tech*, 2012, 5: 99–121
- 34 Boesch H, Baker D, Connor B, et al. Global characterization of CO₂ column retrievals from shortwave-infrared satellite observations of the Orbiting Carbon Observatory-2 Mission. *Remote Sens*, 2011, 3: 270–304
- 35 Butz A, Guerlet S, Hasekamp O, et al. Toward accurate CO₂ and CH₄ observations from GOSAT. *Geophys Res Lett*, 2011, 38: L14812
- 36 Lu S, Landgraf J, Fu G, et al. Simultaneous retrieval of trace gases, aerosols, and cirrus using RemoTAP—The global orbit ensemble study for the CO2M Mission. *Front Remote Sens*, 2022, 3: 914378
- 37 Reuter M, Buchwitz M, Schneising O, et al. A Fast atmospheric trace gas retrieval for hyperspectral instruments approximating multiple scattering —Part 1: radiative transfer and a potential OCO-2 XCO₂ retrieval setup. *Remote Sens*, 2017, 9: 1159
- 38 Liu Y, Yang D X, Cai Z N. A retrieval algorithm for TanSat XCO₂ observation: retrieval experiments using GOSAT data. *Chin Sci Bull*, 2013, 58: 1520–1523
- 39 Fenwick R, Boesch H, Tyukin I. Neural networks for the retrieval of methane from the Sentinel-5 Precursor Satellite. In: proceedings of the 2020 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), 19–24 July 2020, 2020
- 40 Turquety S, Hadji - Lazaro J, Clerbaux C, et al. Operational trace gas retrieval algorithm for the Infrared Atmospheric Sounding Interferometer. *J Geophys Res*, 2004, 109: D21301
- 41 Chevallier F, Broquet G, Zheng B, et al. Large CO₂ emitters as seen from satellite: comparison to a gridded global emission inventory. *Geophys Res Lett*, 2022, 49: e2021GL097540
- 42 Zheng B, Chevallier F, Ciais P, et al. Observing carbon dioxide emissions over China's cities and industrial areas with the Orbiting Carbon Observatory-2. *Atmos Chem Phys*, 2020, 20: 8501–8510
- 43 Chevallier F, Palmer P I, Feng L, et al. Toward robust and consistent regional CO₂ flux estimates from in situ and spaceborne measurements of atmospheric CO₂. *Geophys Res Lett*, 2014, 41: 1065–1070
- 44 Jones M W, Andrew R M, Peters G P, et al. Gridded fossil CO₂ emissions and related O₂ combustion consistent with national inventories 1959–2018. *Sci Data*, 2021, 8: 2
- 45 Gilfillan D, Marland G. CDIAC-FF: global and national CO₂ emissions from fossil fuel combustion and cement manufacture: 1751–2017. *Earth Syst Sci Data*, 2021, 13: 1667–1680
- 46 Crippa M, Guizzardi D, Pagani F, et al. GHG emissions of all world countries. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2023, doi: 10.2760/953322
- 47 Xu R, Tong D, Xiao Q, et al. MEIC-global-CO₂: a new global CO₂ emission inventory with highly-resolved source category and sub-country information. *Sci China Earth Sci*, 2024, 67: 450–465
- 48 Guan D, Liu Z, Geng Y, et al. The gigatonne gap in China's carbon dioxide inventories. *Nat Clim Change*, 2012, 2: 672–675
- 49 Liu Z, Guan D, Wei W, et al. Reduced carbon emission estimates from fossil fuel combustion and cement production in China. *Nature*, 2015, 524: 335–338
- 50 Han P, Zeng N, Oda T, et al. Evaluating China's fossil-fuel CO₂ emissions from a comprehensive dataset of nine inventories. *Atmos Chem Phys*, 2020, 20: 11371–11385
- 51 Nassar R, Mastrogiovanni J P, Bateman-Hemphill W, et al. Advances in quantifying power plant CO₂ emissions with OCO-2. *Remote Sens Environ*, 2021, 264: 112579
- 52 He C, Lu X, Zhang Y, et al. Revisiting the quantification of power plant CO₂ emissions in the United States and China from satellite: a comparative study using three top-down approaches. *Remote Sens Environ*, 2024, 308: 114192
- 53 Reuter M, Buchwitz M, Schneising O, et al. Towards monitoring localized CO₂ emissions from space: co-located regional CO₂ and NO₂

- enhancements observed by the OCO-2 and S5P satellites. *Atmos Chem Phys*, 2019, 19: 9371–9383
- 54 Zheng B, Geng G, Ciais P, et al. Satellite-based estimates of decline and rebound in China's CO₂ emissions during COVID-19 pandemic. *Sci Adv*, 2020, 6: eabd4998
- 55 Schwandner F M, Gunson M R, Miller C E, et al. Spaceborne detection of localized carbon dioxide sources. *Science*, 2017, 358: eaam5782
- 56 Lei L P, Zhong H, He Z H, et al. Assessment of atmospheric CO₂ concentration enhancement from anthropogenic emissions based on satellite observations. *Chin Sci Bull*, 2017, 62: 2941–2950
- 57 Jiang F, Wang H, Chen J M, et al. Regional CO₂ fluxes from 2010 to 2015 inferred from GOSAT XCO₂ retrievals using a new version of the Global Carbon Assimilation System. *Atmos Chem Phys*, 2021, 21: 1963–1985
- 58 Yang E G, Kort E A, Ott L E, et al. Using space-based CO₂ and NO₂ observations to estimate urban CO₂ emissions. *JGR Atmos*, 2023, 128: e2022JD037736
- 59 Feng S, Jiang F, Wang H, et al. China's fossil fuel CO₂ emissions estimated using surface observations of coemitted NO₂. *Environ Sci Technol*, 2024, 58: 8299–8312
- 60 Zhang Y, Du S, Guan L, et al. Estimating global 0.1° scale gridded anthropogenic CO₂ emissions using TROPOMI NO₂ and a data-driven method. *Sci Total Environ*, 2024, 949: 175177
- 61 Zhang Y, Liu X, Lei L, et al. Estimating global anthropogenic CO₂ gridded emissions using a data-driven stacked random forest regression model. *Remote Sens*, 2022, 14: 3899
- 62 Yang S, Lei L, Zeng Z, et al. An assessment of anthropogenic CO₂ emissions by satellite-based observations in China. *Sensors*, 2019, 19: 1118
- 63 Reichstein M, Camps-Valls G, Stevens B, et al. Deep learning and process understanding for data-driven Earth system science. *Nature*, 2019, 566: 195–204
- 64 Le Quéré C, Andres R J, Boden T, et al. The global carbon budget 1959–2011. *Earth Syst Sci Data*, 2013, 5: 165–185
- 65 Piao S, He Y, Wang X, et al. Estimation of China's terrestrial ecosystem carbon sink: methods, progress and prospects. *Sci China Earth Sci*, 2022, 65: 641–651
- 66 Peng S S, Yue C, Chang J F. Developments and applications of terrestrial biosphere model (in Chinese). *Chin J Plant Ecol*, 2020, 44: 436–448 [彭书时, 岳超, 常锦峰. 陆地生物圈模型的发展与应用. 植物生态学报, 2020, 2022, 44: 436–448]
- 67 Wang H, Jiang F, Liu Y, et al. Global terrestrial ecosystem carbon flux inferred from TanSat XCO₂ retrievals. *J Remote Sens*, 2022, 2022: 9816536
- 68 Deng F, Chen J M. Recent global CO₂ flux inferred from atmospheric CO₂ observations and its regional analyses. *Biogeosciences*, 2011, 8: 3263–3281
- 69 Thompson R L, Patra P K, Chevallier F, et al. Top-down assessment of the Asian carbon budget since the mid 1990s. *Nat Commun*, 2016, 7: 10724
- 70 Piao S, Fang J, Ciais P, et al. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China. *Nature*, 2009, 458: 1009–1013
- 71 Chen J M, Miao G, Ju W, et al. Uncertainty in China's carbon budget estimates (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2024, 69: 2710–2714 [陈镜明, 缪国芳, 居为民, 等. 中国碳收支估算的不确定性. 科学通报, 2024, 69: 2710–2714]
- 72 Crisp D, Fisher B M, O'Dell C, et al. The ACOS CO₂ retrieval algorithm – Part II: global XCO₂ data characterization. *Atmos Meas Tech*, 2012, 5: 687–707
- 73 Deng F, Jones D B A, Henze D K, et al. Inferring regional sources and sinks of atmospheric CO₂ from GOSAT XCO₂ data. *Atmos Chem Phys*, 2014, 14: 3703–3727
- 74 Basu S, Guerlet S, Butz A, et al. Global CO₂ fluxes estimated from GOSAT retrievals of total column CO₂. *Atmos Chem Phys*, 2013, 13: 8695–8717
- 75 Liu J, Bowman K W, Schimel D S, et al. Contrasting carbon cycle responses of the tropical continents to the 2015–2016 El Niño. *Science*, 2017, 358: eaam5690
- 76 Zhang L, Jiang F, He W, et al. A robust estimate of continental-scale terrestrial carbon sinks using GOSAT XCO₂ retrievals. *Geophys Res Lett*, 2023, 50: e2023GL102815
- 77 Wang J S, Kawa S R, Collatz G J, et al. A global synthesis inversion analysis of recent variability in CO₂ fluxes using GOSAT and in situ observations. *Atmos Chem Phys*, 2018, 18: 11097–11124
- 78 Kong Y, Zheng B, Zhang Q, et al. Global and regional carbon budget for 2015–2020 inferred from OCO-2 based on an ensemble Kalman filter coupled with GEOS-Chem. *Atmos Chem Phys*, 2022, 22: 10769–10788
- 79 Wang J, Feng L, Palmer P I, et al. Large Chinese land carbon sink estimated from atmospheric carbon dioxide data. *Nature*, 2020, 586: 720–723
- 80 Jiang F, Chen J M, Zhou L, et al. A comprehensive estimate of recent carbon sinks in China using both top-down and bottom-up approaches. *Sci Rep*, 2016, 6: 22130
- 81 He W, Jiang F, Wu M, et al. China's terrestrial carbon sink over 2010–2015 constrained by satellite observations of atmospheric CO₂ and land

- surface variables. *JGR BioGeosci*, 2022, 127: e2021JG006644
- 82 Liu J, Baker D, Basu S, et al. The reduced net carbon uptake over Northern Hemisphere land causes the close-to-normal CO₂ growth rate in 2021 La Niña. *Sci Adv*, 2021, 10: eadl2201
- 83 Maasakkers J D, Jacob D J, Sulprizio M P, et al. Global distribution of methane emissions, emission trends, and OH concentrations and trends inferred from an inversion of GOSAT satellite data for 2010–2015. *Atmos Chem Phys*, 2019, 19: 7859–7881
- 84 Scarpelli T R, Jacob D J, Maasakkers J D, et al. A global gridded (0.1° × 0.1°) inventory of methane emissions from oil, gas, and coal exploitation based on national reports to the United Nations Framework Convention on Climate Change. *Earth Syst Sci Data*, 2020, 12: 563–575
- 85 Melton J R, Wania R, Hodson E L, et al. Present state of global wetland extent and wetland methane modelling: conclusions from a model inter-comparison project (WETCHIMP). *Biogeosciences*, 2013, 10: 753–788
- 86 Parker R J, Webb A, Boesch H, et al. A decade of GOSAT Proxy satellite CH₄ observations. *Earth Syst Sci Data*, 2020, 12: 3383–3412
- 87 Wang Y, Guo X, Huo Y, et al. Toward a versatile spaceborne architecture for immediate monitoring of the global methane pledge. *Atmos Chem Phys*, 2023, 23: 5233–5249
- 88 Guanter L, Irakulis-Loitxate I, Gorroño J, et al. Mapping methane point emissions with the PRISMA spaceborne imaging spectrometer. *Remote Sens Environ*, 2021, 265: 112671
- 89 Lauvaux T, Giron C, Mazzolini M, et al. Global assessment of oil and gas methane ultra-emitters. *Science*, 2022, 375: 557–561
- 90 Schuit B J, Maasakkers J D, Bijl P, et al. Automated detection and monitoring of methane super-emitters using satellite data. *Atmos Chem Phys*, 2023, 23: 9071–9098
- 91 Jacob D J, Varon D J, Cusworth D H, et al. Quantifying methane emissions from the global scale down to point sources using satellite observations of atmospheric methane. *Atmos Chem Phys*, 2022, 22: 9617–9646
- 92 Maasakkers J D, Jacob D J, Sulprizio M P, et al. 2010–2015 North American methane emissions, sectoral contributions, and trends: a high-resolution inversion of GOSAT observations of atmospheric methane. *Atmos Chem Phys*, 2021, 21: 4339–4356
- 93 Ehalt D H. The atmospheric cycle of methane. *Tellus*, 1974, 26: 58–70
- 94 Curry C L. Modeling the soil consumption of atmospheric methane at the global scale. *Glob Biogeochem Cycle*, 2007, 21: GB4012
- 95 Prather M J, Hsu J, DeLuca N M, et al. Measuring and modeling the lifetime of nitrous oxide including its variability. *JGR Atmos*, 2015, 120: 5693–5705
- 96 Intergovernmental Panel on Climate C. Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2023
- 97 Reay D S, Davidson E A, Smith K A, et al. Global agriculture and nitrous oxide emissions. *Nat Clim Change*, 2012, 2: 410–416
- 98 Davidson E A, Kanter D. Inventories and scenarios of nitrous oxide emissions. *Environ Res Lett*, 2014, 9: 105012
- 99 Tian H, Xu R, Canadell J G, et al. A comprehensive quantification of global nitrous oxide sources and sinks. *Nature*, 2020, 586: 248–256
- 100 Bakker D C E, Bange H W, Gruber N, et al. Air-sea interactions of natural long-lived greenhouse gases (CO₂, N₂O, CH₄) in a changing climate. In: Liss P S, Johnson M T, eds. *Ocean-Atmosphere Interactions of Gases and Particles*. Berlin Heidelberg: Springer, 2014. 113–169
- 101 Oreggioni G D, Monforti Ferraio F, Crippa M, et al. Climate change in a changing world: socio-economic and technological transitions, regulatory frameworks and trends on global greenhouse gas emissions from EDGAR v.5.0 *Glob Environ Change*, 2021, 70: 102350
- 102 Ehrhardt F, Soussana J, Bellocchi G, et al. Assessing uncertainties in crop and pasture ensemble model simulations of productivity and N₂ O emissions. *Glob Change Biol*, 2018, 24: e603–e616
- 103 Gerber J S, Carlson K M, Makowski D, et al. Spatially explicit estimates of N₂ O emissions from croplands suggest climate mitigation opportunities from improved fertilizer management. *Glob Change Biol*, 2016, 22: 3383–3394
- 104 Yin Y, Wang Z, Tian X, et al. Evaluation of variation in background nitrous oxide emissions: a new global synthesis integrating the impacts of climate, soil, and management conditions. *Glob Change Biol*, 2022, 28: 480–492
- 105 Zhou F, Shang Z, Zeng Z, et al. New model for capturing the variations of fertilizer-induced emission factors of N₂ O. *Glob Biogeochem Cycle*, 2015, 29: 885–897
- 106 Tian H, Yang J, Xu R, et al. Global soil nitrous oxide emissions since the preindustrial era estimated by an ensemble of terrestrial biosphere models: magnitude, attribution, and uncertainty. *Glob Change Biol*, 2019, 25: 640–659
- 107 Xu R, Tian H, Pan S, et al. Global N₂O emissions from cropland driven by nitrogen addition and environmental factors: comparison and uncertainty analysis. *Glob Biogeochem Cycles*, 2020, 34: e2020GB006698
- 108 Thompson R L, Lassaletta L, Patra P K, et al. Acceleration of global N₂O emissions seen from two decades of atmospheric inversion. *Nat Clim Chang*, 2019, 9: 993–998
- 109 Desjardins R L, Pattey E, Smith W N, et al. Multiscale estimates of N₂O emissions from agricultural lands. *Agric For Meteorol*, 2010, 150: 817–824
- 110 Bergamaschi P, Corazza M, Karstens U, et al. Top-down estimates of European CH₄ and N₂O emissions based on four different inverse models. *Atmos Chem Phys*, 2015, 15: 715–736

- 111 Thompson R L, Chevallier F, Crotwell A M, et al. Nitrous oxide emissions 1999 to 2009 from a global atmospheric inversion. [Atmos Chem Phys](#), 2014, 14: 1801–1817
- 112 Kangah Y, Ricaud P, Attié J, et al. Summertime upper tropospheric nitrous oxide over the Mediterranean as a footprint of Asian emissions. [JGR Atmos](#), 2017, 122: 4746–4759
- 113 Ricaud P, Attié J L, Teyssède H, et al. Equatorial total column of nitrous oxide as measured by IASI on MetOp-A: implications for transport processes. [Atmos Chem Phys](#), 2009, 9: 3947–3956
- 114 Chahnel R, Attié J L, Ricaud P, et al. Evaluation and global-scale observation of nitrous oxide from IASI on Metop-A. [Remote Sens](#), 2022, 14: 1403
- 115 Ricaud P, Sič B, El Amraoui L, et al. Impact of the Asian monsoon anticyclone on the variability of mid-to-upper tropospheric methane above the Mediterranean Basin. [Atmos Chem Phys](#), 2014, 14: 11427–11446
- 116 Prather M J, Froidevaux L, Livesey N J. Observed changes in stratospheric circulation: decreasing lifetime of N_2O , 2005–2021. [Atmos Chem Phys](#), 2023, 23: 843–849
- 117 Tian H, Yang J, Lu C, et al. The global N_2O model intercomparison project. [Bull Am Meteorol Soc](#), 2018, 99: 1231–1251
- 118 Prinn R G, Weiss R F, Arduini J, et al. History of chemically and radiatively important atmospheric gases from the Advanced Global Atmospheric Gases Experiment (AGAGE). [Earth Syst Sci Data](#), 2018, 10: 985–1018
- 119 Francey R, Steele L, Spencer D, et al. The CSIRO (Australia) measurement of greenhouse gases in the global atmosphere. Baseline atmospheric program Australia, In: Tindale N W, Derek, N, Fraser, P J, ed. Bureau of Meteorology and CSIRO Atmospheric Research, Melbourne, 2003. 42–53
- 120 Ricaud P, Attié J L, Chahnel R, et al. The Monitoring Nitrous Oxide Sources (MIN2OS) satellite project. [Remote Sens Environ](#), 2021, 266: 112688

Summary for “全球温室气体遥感监测和盘点研究综述与展望”

Review and perspective of remote sensing research on global greenhouse gas monitoring and stocktaking

Liangyun Liu^{1*}, Liangfu Chen¹, Zengshan Yin², Fei Jiang³, Liping Lei¹, Tianhai Cheng¹, Jie Pan¹, Jinbiao Zhu¹, Jian Yang¹, Yanfeng Hu¹, Yifang Niu¹, Yucong Zhang¹, Chengfu Liu¹, Guohua Liu², Longfei Tian², Denghui Hu², Guanyu Dong³, Weimin Ju³, Jinhua Tao¹, Zhengqiang Li¹, Yusheng Shi¹, Haitao Zhao¹, Dongmei Yan¹, Xinjie Liu¹, Shanshan Du¹, Lili Zhang¹, Xiaoying Li¹, Huiqin Mao⁴, Lulu Shen⁵, Wenping Yuan⁶, Feng Zhou⁷, Yuzhong Zhang⁸ & Yirong Wu¹

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

² Institute of Microsatellite Innovation, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201203, China

³ Institute of International Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China

⁴ Satellite Application Center of Ecology and Environmental Protection, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100094, China

⁵ School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China

⁶ College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

⁷ School of Geography and Remote Sensing, Hohai University, Nanjing 210024, China

⁸ School of Engineering, Westlake University, Hangzhou 310012, China

* Corresponding author, E-mail: liuly@radi.ac.cn

The Paris Agreement has set the goal of limiting the global warming to 2°C above pre-industrial levels and established a process for global carbon stocktaking which will take place every five years starting from 2023. The nationally determined contributions (NDCs) are at the heart of the Paris Agreement, which was adopted at the UN Climate Change Conference (COP21) in 2015. Under the Paris Agreement, each country is required to present its NDCs report using the standard ‘bottom-up’ inventory approach recommended by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). The 49th session of IPCC has suggested a ‘top-down’ inversion approach to assess NDCs using measurements of atmospheric Greenhouse Gases (GHGs). Satellite remote sensing can measure the atmospheric GHG concentration at global scale with fine resolution, high accuracy and high frequency, providing a promising tool to validate each country’s NDCs. The European Union, the United States, Japan, and Canada are vigorously developing their satellite systems for monitoring GHGs’ concentrations and emissions. China is also planning to build a GHGs monitoring satellite system to support the second carbon stocktaking in 2028. Therefore, it is extremely urgent to review and investigate the techniques, methods and cutting-edge applications of remote sensing for GHGs monitoring and stocktaking.

In this paper, we first reviewed the current techniques, networks, and upcoming national or international plans for monitoring atmospheric GHGs based on ground-based, airborne, and satellite platforms. The global carbon stocktaking requires continuous and accurate observations of GHGs’ concentrations and fluxes from ground, tower-based, airborne, and spaceborne platforms. The World Meteorological Congress (WMO) approved an ambitious international project, named the Global Greenhouse Gas Watch (G3W) initiative to address key information gaps in our understanding of anthropic and natural activities on the global carbon cycle, and help parties assess the completion of GST reports. Second, we proposed the key features of the next generation carbon monitoring satellite system, which was characterized by high spatial resolution, high accuracy, high temporal frequency, and multiple gases as well as atmospheric aerosol and co-emitted polluted gases (NO₂, CO). However, it is still challenging to meet the strict accuracy requirements for the atmospheric GHGs’ concentrations, such as 1 ppm for CO₂, 5 ppb for CH₄, and 1 ppb for N₂O. China’s next-generation carbon satellite is to be launched in 2026, which will greatly enhance observation capabilities, including GHG species, accuracy, time frequency and spatial resolution. Third, taking the Global Carbon Project (GCP) series of assessment reports as the core references, we summarized the current methods, progress and challenges in the scientific assessment of GHGs’ emissions at global or regional scales. We also investigated the roles and current capabilities of satellite remote sensing and assimilation inversion technology in monitoring emissions of the three major greenhouse gases: CO₂, CH₄, and N₂O. At present, there are large uncertainties among the estimated GHGs’ fluxes (both emissions and sinks) due to very limited observations, model accuracy, and coarse resolution of assimilation systems etc. Finally, we investigated China’s demand for GHGs monitoring and emission assessment, and proposed three urgent tasks for global carbon stocktaking using the ‘top-down’ remote sensing method. These tasks include developing a satellite constellation for high-precision GHGs observation, a high-resolution, multi-species global GHG assimilation system, and an operational platform to assess global GHG emissions from terrestrial ecosystems and anthropogenic activities. Therefore, this paper, focusing on the needs of compliance with climate change and the “dual-carbon” targets, provides ideas for the construction of China’s next generation carbon-sensing satellite system.

global stocktaking, greenhouse gas emissions, global warming, satellite remote sensing, data assimilation

doi: [10.1360/TB-2024-1033](https://doi.org/10.1360/TB-2024-1033)