

下一代碳卫星方案及指标体系论证技术研究

范萌¹, 陈良富¹, 田龙飞², 杨东旭³, 毛慧琴⁴, 陈林⁵, 陶金花¹,
江飞⁶, 刘良云¹, 张美根³, 刘国华², 尹增山², 陈翠红⁴,
王军⁶, 姚璐³, 杜珊珊¹, 余超¹, 张莹¹, 胡登辉²,
周冠华⁷, 孔亚文¹, 吴一戎¹

1. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094;
2. 中国科学院微小卫星创新研究院, 上海 201203;
3. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029;
4. 环境保护部卫星环境应用中心, 北京 100094;
5. 中国气象局国家卫星气象中心, 北京 100081;
6. 南京大学 国际地球系统科学研究所, 南京 210023;
7. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191

摘要: 全球气候变化已成为人类社会面临的重大挑战, 温室气体 (GHGs) 排放是其主要驱动因素之一。为有效评估全球温室气体减排进展, 《巴黎协定》确立了全球碳盘点 (GST) 机制, 要求对各缔约国温室气体排放清单进行核查。本文介绍了中国用于碳核查的下一代碳监测卫星 (TanSat-2) 建设总体技术方案和论证技术体系。具体包括: 建立了涵盖“全球—区域—点源”多尺度的主要温室气体排放清单卫星校核技术体系, 明确了不同尺度碳清单校核的关键技术需求, 并提出下一代碳卫星清单校核的不确定度约束指标; 构建了“温室气体—示踪气体—植被荧光”多要素协同观测与人为排放源分离技术体系, 综合评估卫星碳监测在区分生态系统碳循环与人为碳排放方面的能力, 并据此提出了科学产品指标体系; 研究评估了不同载荷技术参数 (光谱分辨率、信噪比、波段范围等) 对各观测要素反演误差的影响, 形成符合卫星平台和载荷工程研制能力约束条件的温室气体、污染气体、气溶胶及太阳诱导叶绿素荧光 (SIF) 探测载荷技术指标体系。在此基础上完成了多要素、高时效、多尺度、高精度的下一代碳卫星总体方案设计, 提出中轨椭圆冻结太阳同步轨道卫星方案, 并制定3类核心有效载荷设计方案: 分别是超大幅宽污碳协同监测仪、高分辨热点温室气体排放综合监测仪与云与气溶胶监测仪。本研究提出的下一代碳卫星方案论证结果, 将为后续卫星平台、有效载荷及地面系统工程研制提供科学需求输入与技术指标体系支撑, 为中国构建高时空分辨率、高精度、多尺度协同的碳排放监测卫星体系提供理论基础与技术保障。

关键词: TanSat-2, 碳盘点, 碳排放, 卫星遥感, 同化

中图分类号: P2

引用格式: 范萌, 陈良富, 田龙飞, 杨东旭, 毛慧琴, 陈林, 陶金花, 江飞, 刘良云, 张美根, 刘国华, 尹增山, 陈翠红, 王军, 姚璐, 杜珊珊, 余超, 张莹, 胡登辉, 周冠华, 孔亚文, 吴一戎. 2025. 下一代碳卫星方案及指标体系论证技术研究. 遥感学报, 29 (6): 1426–1437

Fan M, Chen L F, Tian L F, Yang D X, Mao H Q, Chen L, Tao J H, Jiang F, Liu L Y, Zhang M G, Liu G H, Yin Z S, Chen C H, Wang J, Yao L, Du S S, Yu C, Zhang Y, Hu D H, Zhou G H, Kong Y W and Wu Y R. 2025. Requirements and design of TanSat-2 Mission. National Remote Sensing Bulletin, 29 (6): 1426–1437 [DOI: 10.11834/jrs.20255080]

收稿日期: 2025-02-27; 预印本: 2025-04-09

基金项目: 国家重点研发计划 (编号: 2022YFB3904800)

第一作者简介: 范萌, 研究方向为大气环境遥感理论和应用。E-mail: fanmeng@aircas.ac.cn

通信作者简介: 陈良富, 研究方向为温室气体清单卫星校核方法与技术体系、大气遥感与全球气候变化研究。E-mail: chenlf@aircas.ac.cn

1 引言

全球气候变化已成为人类社会面临的最严峻挑战之一，人为排放使大气温室气体（GHGs）浓度持续增长是导致全球变暖的主要驱动因素。2015年，《巴黎协定》第3条规定了以“国家自主贡献”（NDCs）为核心的全球温室气体减排机制，其中第14条确定了自2023年起每5年开展一次全球碳盘点（GST），并规定从2028年正式实施该机制，以定期评估实现本协定宗旨和长期目标集体进展情况（Vandyck等，2016）。然而，目前各国提交的“自下而上”温室气体排放清单在编制方法、数据完整性和可验证性方面存在显著差异和不确定性。一方面，虽然政府间气候变化专门委员会（IPCC）提供了温室气体排放清单编制指南（IPCC，2019），但清单编制涉及大量能源消耗、工业生产、农业排放等不同领域的的数据，各国数据收集和计算方法存在较大差异，难以独立核验，各国排放清单数据不确定性差异大。其次，各国在排放数据统计和监测基础设施上的投入不同，导致数据质量和完整性参差不齐，并进一步影响全球碳盘点的公平性和一致性。因此，亟需建设独立的碳监测核查支持（MVS）能力，以客观核验“自下而上”温室气体排放清单的不确定性和合理性，提升全球碳盘点的数据透明度和可信度。

《IPCC 2006年国家温室气体清单指南 2019修订版》（IPCC，2019）总论中提出了通过观测大气中温室气体浓度，结合大气传输模型和同化方法反演得到排放源强度和空间分布的“自上而下”碳排放清单校核技术途径。“自上而下”的核查途径不依赖于人为活动水平数据和排放因子，能够提供独立的排放估算。虽然地面、航空和卫星均可提供大气温室气体浓度监测数据，但地面和航空观测受限于观测区域和规模，仅能在特定地区开展全方位观测。因此，卫星作为唯一可以提供全球无差别性连续观测的手段，可用于独立核查各缔约国提交的“自下而上”排放清单，更全面、客观地评估全球碳排放水平。

近十余年，卫星遥感技术在获取全球尺度温室气体浓度的空间分布和变化趋势方面取得显著进展（汪钱盛等，2023）。日本GOSAT和GOSAT-2（Yokota等，2009；Imasu等，2023）、美国OCO-2（Eldering等，2017）和中国TanSat（Yang等，

2021）等第一代碳监测卫星验证了天基温室气体浓度高精度观测能力，为全球气候变化和碳循环研究提供了关键数据支持。TanSat卫星之后，虽然中国又在多颗综合监测卫星如GF-5、GF-5（02）（Shi等，2021），FY-3H、DQ-1/2（Chen等，2022；Han等，2024）上搭载了温室气体浓度监测载荷，但第一代碳监测卫星和其他卫星搭载的相关温室气体探测载荷存在幅宽窄、重访频次过低、人为碳排放信号不显著、点源排放烟羽监测能力有限和监测精度不高等问题，难以满足全球碳盘点对化石燃料燃烧为主的人为温室气体排放的核心探测需求（刘良云等，2022）。因此，下一代碳监测卫星需高时效、高精度、高分辨和多要素综合监测方向发展。目前欧洲、美国、日本等发达地区和国家已开始部署下一代碳监测卫星研制任务。其中，欧洲的CO2M计划通过多颗极轨卫星组网，提升时间分辨率和空间覆盖范围，实现全球二氧化碳（CO₂）和甲烷（CH₄）的高精度监测（Meijer等，2023）。美国计划发射的GeoCarb静止轨道卫星，可对美洲地区进行CO₂和CH₄高时频连续监测（Moore等，2018）。日本GOSAT-GW（Tanimoto等，2025）和美国OCO-Next（Chatterjee等，2023）计划则延续了第一代GOSAT和OCO系列卫星的技术优势，进一步提升观测精度和数据覆盖能力。在此背景下，中国也启动了面向碳盘点的下一代全球碳监测科学实验卫星（简称TanSat-2）的卫星技术方案论证任务，为后续卫星研制与系统建设提供科学需求输入。

卫星技术方案论证是卫星和载荷系统设计与数据接收和处理系统研制中的关键环节，其核心在于通过科学方法评估卫星方案的可行性与性能指标。传统的观测系统实验（OSE）方法主要通过分析已有观测数据和模型输出，利用实际观测数据评估卫星系统的观测精度和性能。然而，OSE在面对新的卫星任务或观测系统时存在一定的局限性，尤其是缺乏足够代表性数据时，难以全面反映卫星系统的潜力，且对设计参数的敏感性分析能力有限。相比之下，观测系统模拟实验（OSSE）构建高精度数值模型和虚拟观测场景，通过将模拟仿真卫星观测结果并与模型反演预测的“真实值”对比，能够更全面地评估卫星系统性能（Atlas和Riishojgaard，2008）。OSSE技术在设计阶段即可分析和识别潜在误差源，优化卫星

平台和载荷技术指标设计,避免后期修正成本和时间延迟。同时,OSSE能够灵活调整轨道高度、幅宽、重访周期等设计参数,并通过敏感性分析量化其对观测性能的影响,为优化卫星系统设计提供科学依据。此外,OSSE可模拟多种观测场景(如不同大气、地表、排放源状态),全面评估卫星系统的适应性和鲁棒性。因此,OSSE以其系统性、灵活性和高精度优势,正在成为卫星技术论证的主流方法,为未来卫星系统设计与性能提升提供重要支撑。国际上,NASA和ESA等已在NPOESS、CO2M、Sentinel-5等多项卫星任务中应用OSSE优化设计(Lord等,2001;Broquet等,2018;Santaren等,2021)。

本文是面向全球碳盘点的TanSat-2卫星方案论证技术的总结,主要阐述瞄准高时频、高精度、多要素、多尺度的下一代碳卫星设计和研制需求,基于OSSE框架论证形成的TanSat-2卫星系统方案和关键技术解决途径,为中国发展中/中低轨道人为碳排放监测卫星技术体系提供理论和技术支撑。

2 下一代碳卫星方案论证技术

2.1 下一代碳卫星设计需求及挑战

“自上而下”主要温室气体排放清单卫星校核方案是以碳同化模式为核心的清单校核技术体系(张羽中等,2024)。旨在通过卫星观测的温室气体浓度和碳同化模型反演计算人为碳排放通量,从而对各缔约国自主申报的碳排放清单进行独立校核。因此,下一代碳卫星设计的核心是需要明确满足清单校核精度需求的观测要素、观测精度、空间分辨率等关键参数指标体系,以及相应载荷与平台的技术指标体系。

下一代碳卫星的论证与设计面临以下4方面的复杂性和技术挑战。首先,温室气体(如CO₂)具有较长的大气寿命,并在全球范围内混合均匀,导致其本底浓度非常高。目前,CO₂的全球平均本底浓度约为410—420 ppm,而人为排放带来的CO₂浓度仅产生2—3 ppm微小增量,当观测噪声大于排放引起的浓度梯度变化时,卫星难以提供有效的排放信息。因此,如何提升载荷的观测精度,以识别并提取这一微弱信号,是观测系统指标设计的核心挑战之一。而且由于大气气溶胶颗粒多次散射对CO₂浓度的微小增量探测精度影响较大,

所以在探测温室气体的同时需要同步探测大气气溶胶参数;其次,卫星观测的温室气体浓度是人为排放与陆地生态系统排放进入大气中混合后的综合信号,如何同化区分人为与自然排放贡献成为制约卫星校核能力的关键问题。为此采用双约束方案,即基于污(NO₂)碳(CO₂)同源特性通过污染物协同观测提供人为排放信息,又同时结合反映光合作用重要参数叶绿素荧光观测进一步约束生态系统碳汇过程,从而辅助人为排放贡献的有效分离。第三,大气输送和扩散过程对卫星观测效果具有显著影响。同一温室气体排放源强在不同扩散条件下会导致较大差异的大气温室气体浓度梯度进一步影响卫星观测效果。因此,在轨道设计和观测时频选择上,需要充分考虑对重点排放区域的高频次重访能力,以提高排放识别精度。最后,卫星的空间分辨率直接决定了其对点源排放的探测能力。对于源强较弱的点源排放,若卫星空间分辨率过低,则难以分辨其排放贡献。因此,下一代碳卫星方案的设计需在空间分辨率、覆盖范围和观测频次之间寻求最佳平衡,以确保对不同类型排放源的有效监测。

2.2 基于OSSE的卫星方案论证技术

下一代碳卫星方案设计采用需求导向范式开展论证,即从清单校核需求出发,逐层确定观测、反演及工程设计的关键约束条件,以确保卫星设计能够满足科学目标(图1)。首先,碳排放清单的校核需求决定了卫星遥感科学产品所需具备的观测要素及其精度要求,包括温室气体(如CO₂、CH₄)的浓度、污染气体(如NO₂)和气溶胶的分布等。这些遥感产品需能够为碳同化提供有效约束,以确保碳同化的可靠性。其次,碳同化系统对浓度遥感反演的需求进一步决定了卫星载荷的核心技术指标,如光谱覆盖范围、信噪比、空间分辨率和时间分辨率等。基于上述技术需求,需进一步优化卫星载荷配置、选择合适的载荷体制,并结合全球轨道覆盖需求,合理设计轨道和有效方案,以确保观测数据的空间连续性和时间可用性。

由于科学需求通常倾向于更高精度、更高分辨率的观测能力,但卫星工程受限于现有技术能力、硬件承载能力及成本约束。因此,方案论证过程中,必须在科学需求与工程可行性之间进行

多轮优化迭代，权衡不同技术参数的优先级，最终形成一套同时满足应用需求和工程技术能力双重约束的下一代碳卫星技术指标体系，以支撑全

球碳排放清单的高精度校核。各关键环节具体迭代论证流程如下。

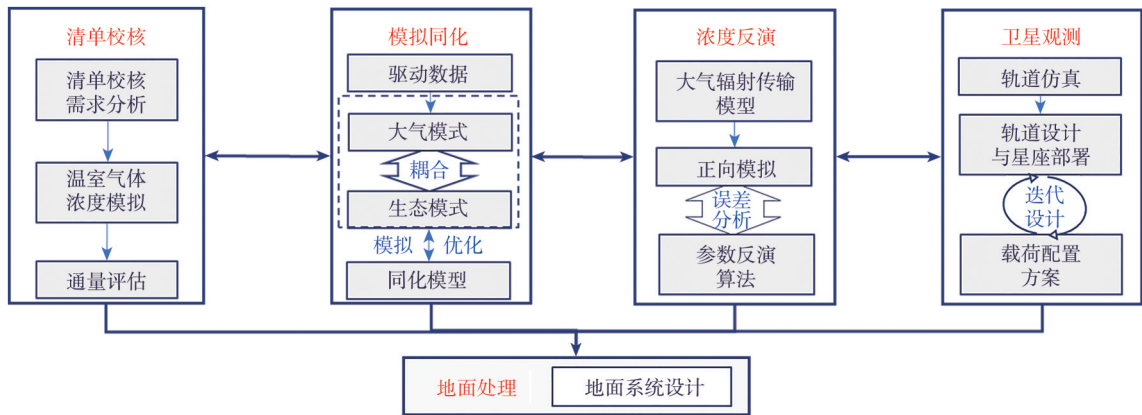


图1 下一代碳卫星方案论证技术路线图
Fig.1 Flowchart of the TanSat-2 satellite mission design

(1) 主要温室气体清单卫星校核指标和方法体系构建。构建涵盖“全球—国别/区域—城市—点源”多尺度的卫星校核方法技术体系，并在该技术体系框架下开展下一代碳卫星技术方案论证。基于现有国际及国内主要的“自下而上”CO₂和CH₄排放清单数据，对全球、国别、中国及重点省市的主要温室气体排放不确定性进行统计分析，明确当前清单的不确定性现状，并提出满足下一代碳卫星观测需求的不确定度约束指标。通过建立多层嵌套的温室气体模拟系统，解析温室气体浓度变化及其梯度分布特征，量化不同空间分辨率下卫星对排放量的识别能力，并揭示CO₂和CH₄观测精度与碳通量推算精度之间的定量关系，最终形成多尺度碳通量指标体系，以支撑清单校核需求。

(2) 下一代碳卫星观测要素科学产品指标论证。发展耦合动态生态过程的大气化学传输模式，并基于多尺度嵌套模式计算与数据同化方法，建立“全球—区域—城市—点源”多尺度的碳同化系统。重点研究利用大气温室气体、大气污染物和生态参数观测的多源观测数据，优化人为碳排放估算方法，并以大气浓度观测资料同化为核心，辅助以污碳同源与叶绿素荧光双约束方案，构建人为碳排放的定量计算框架。针对主要温室气体排放清单卫星校核需求，分析不同卫星观测科学参数产品的精度、幅宽、空间分辨率的同化结果对清单校核不确定性的影响，进而提出满足中国

下一代碳卫星的观测要素产品指标体系的需求。

(3) 下一代碳卫星观测仿真模拟与载荷技术指标论证。针对下一代碳卫星观测要素科学产品需求，耦合气体吸收、气溶胶散射、地表反射、大气辐射传输（偏振）和植被辐射传输等模型，建立覆盖紫外~红外波段的“地表—大气—载荷”卫星载荷观测模拟仿真系统。构建CO₂、CH₄、NO₂、SIF和气溶胶等观测要素的高精度遥感反演模型，并开展不同载荷指标（光谱分辨率、信噪比、波段范围等）、地表特性及大气状态对卫星观测信号的敏感性分析和误差传递研究。面向下一代碳卫星观测要素科学产品的精度需求，评估载荷指标对各观测要素反演误差的影响，提出既满足观测要素科学产品需求又符合卫星工程可实现性的下一代碳卫星载荷技术指标体系和卫星使用要求。

(4) 下一代碳卫星系统设计。针对下一代碳卫星系统平台和载荷设计需求，构建多模式复合观测策略的碳卫星数字仿真系统。通过卫星观测系统的仿真实验，综合评估不同轨道配置、载荷布局 and 观测模式在全球及重点区域的数据获取能力，重点分析高排放强度区域的温室气体及其人为排放示踪气体NO₂点监测能力，确保卫星能够有效捕捉人为排放信号并提升温室气体反演的精度。基于下一代碳卫星观测要素科学产品指标需求和载荷技术指标需要，制定包括轨道部署、观测模式、卫星平台、有效载荷配置、抗辐照特性等卫

星系统整体设计方案。针对长期稳定运行需求,深入分析卫星系统可能面临的关键技术挑战,如载荷稳定性、数据传输与存储、辐射环境适应性等,提出相应的解决方案,以确保下一代碳卫星具备高精度、长寿命、稳定运行的观测能力。

(5) 下一代碳卫星地面处理系统设计。基于下一代碳卫星的总体方案设计,构建高效、智能的地面处理系统,以确保观测数据的高质量处理、存储、分发与应用。首先,建立星地数据传输与运控系统,研究高速数传链路、卫星组网通信、数据压缩与高效存储等关键技术,以提升数据传输效率和稳定性。针对下一代碳卫星的中长期监测任务规划及近期科学观测需求,研发智能化观测模式,结合多星协同观测、动态任务调度及自适应观测策略,提高卫星数据的时空覆盖能力。建立科学产品的分类分级体系,明确不同层级产品(原始观测数据、气体浓度反演产品、碳排放卫星校核结果等)的数据标准、处理流程及质量

控制方法。此外,构建开放共享的数据服务体系,推进数据的标准化存储与高效检索,支持多领域用户的科学研究与政策应用。最终形成满足高精度碳监测需求的地面处理系统设计方案。

2.3 “观测—模拟—反演—同化”数值仿真平台(CH-Tan-OSSE)构建

基于上述论证技术,构建面向主要温室气体排放清单卫星校核的全链路“观测—模拟—反演—同化”数值仿真平台(CH-Tan-OSSE)(图2),确保碳排放监测与核算的科学精度和可靠性,支撑下一代碳卫星技术方案论证和OSEEs实验分析。该平台集成耦合多层嵌套温室气体清单的正向评估系统、地面与卫星监测资料的多尺度嵌套双约束同化系统、碳卫星观测模拟仿真与观测要素反演系统、多模式复合观测星座数字仿真模型系统,为全球碳排放清单卫星校核提供了一套完整的数值仿真框架。

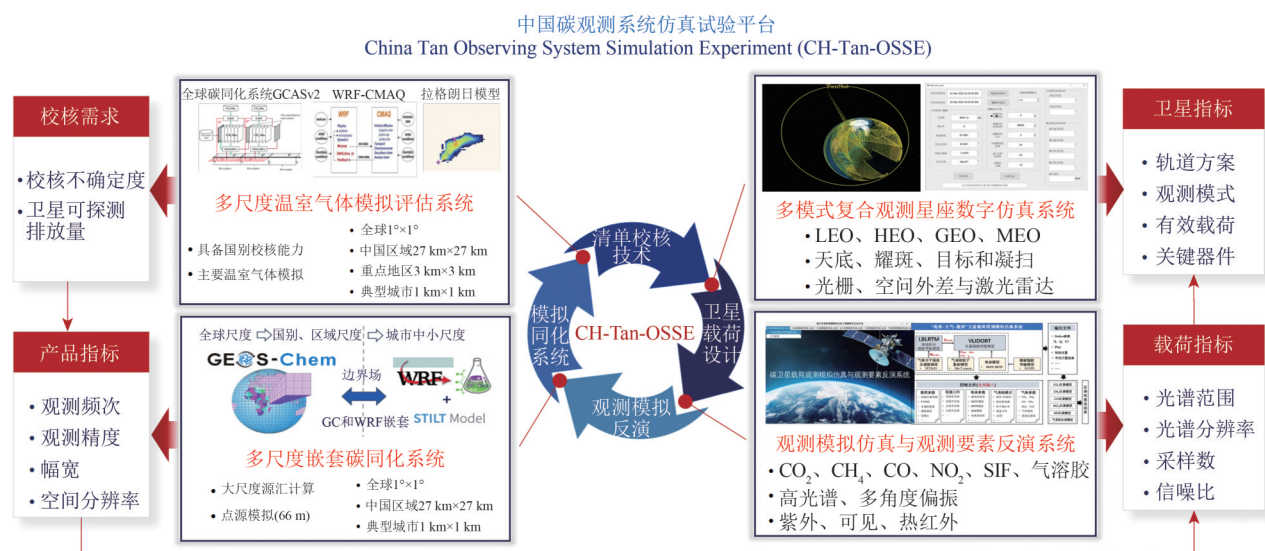


图2 面向下一代碳卫星方案论证的“观测—模拟—反演—同化”全链路数值仿真平台架构图

Fig.2 Framework of the "observation-simulation-inversion-assimilation" full-chain numerical simulation platform for the requirement analysis of the TanSat-2 mission design

多层嵌套温室气体清单正向评估系统,构建了多层嵌套温室气体(CO_2 和 CH_4)清单正向评估模型,可实现全球 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 、中国区域 $27 \text{ km} \times 27 \text{ km}$ 、长三角及京津冀等重点地区 $3 \text{ km} \times 3 \text{ km}$ 、典型城市 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 空间分辨率的主要温室气体浓度模拟。地面与卫星监测资料的多尺度嵌套同化系统,实现了全球、中国和典型城市尺度的温室气体排放校核能力,在全球、中国和典型城市温室气体源

汇计算空间分辨率分别达到 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 、 $27 \text{ km} \times 27 \text{ km}$ 和 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$,并支持重要行业点源百米量级分辨率的高分辨率大涡模拟(LES),可用于工业设施、工业园区等局地排放源的精细化排放评估。碳卫星观测模拟仿真与观测要素反演系统,满足 CO_2 、 CH_4 、 NO_2 、SIF和气溶胶等多种关键观测要素的观测模拟、遥感反演和误差评估需求,基于辐射传输模型和遥感反演算法,系统可模拟不同观测条

件下的卫星探测信号，并评估观测误差对反演结果的影响，为卫星载荷设计与数据反演优化提供科学依据。多模式复合观测星座数字仿真模型系统，支持不同轨道（LEO、HEO、GEO、MEO）和不同类型的传感器（光栅光谱仪、空间外差光谱仪、主动激光雷达）在多种观测模式（天底观测、耀斑观测、目标观测、凝视观测）下的仿真分析，可用于评估多星协同观测对碳排放监测的能力优化方案。

3 下一代碳卫星总体方案论证结果

3.1 需主要温室气体排放清单卫星校核需求

各缔约方温室气体排放数据主要参考2019年Global Carbon Grid（Tong等，2018）、EDGAR（Crippa等，2020）、GRACED（Dou等，2023）和ODIAC（Oda等，2018）4套CO₂全球排放清单数据，以及EDGAR和CEDS（McDuffie等，2020）两套全球尺度CH₄排放清单数据，中国区域还增加了基于卫星大数据的两套CH₄排放清单（Liu等，2021；Gong和Shi，2021）。在此基础上分析全球、国别与重点城市等不同尺度的CO₂和CH₄排放量及其不确定度，以及中国国内省级尺度上CO₂和CH₄排放量及相应不确定度。不确定度需求指标分析结果（表1）为下一代碳卫星的设计和清单校核提供了科学依据。

表1 主流CO₂和CH₄排放清单不确定度现状及卫星校核不确定度需求

Table 1 Current uncertainties in main CO₂ and CH₄ emission inventories and the uncertainty requirements of satellite-based verification for GHG inventories

区域范围	CO ₂ 排放清单 不确定度/%	CH ₄ 排放清单 不确定度/%	CO ₂ 和CH ₄ 排放清单卫星 校核不确定度需求/%
全球	4.7	3.4	3—4
全球重点国别	11.0	15.5	5—10
中国	16.8	38.7	
重点城市	46.8	48.9	30—35

3.2 中轨椭圆冻结太阳同步轨道设计

由于全球GDP排名前十国家的碳排放占全球比例超过60%，也是下一代碳卫星重点关注的高时效观测覆盖的对象。根据Global Carbon Grid统计

表明，全球90%的人为碳排放集中在15°N—55°N，中心纬度为35°N的区域范围。因此，针对主要经济体分布与全球碳排放分布特点，形成了下一代碳卫星中轨椭圆冻结太阳同步轨道方案（图3）。该轨道方案通过将远地点冻结在北半球上空，能够实现对北纬人类活动密集区域（包括亚洲、北美、欧洲）进行长时间驻留观测。通过可观测弧段的绝对时间比例分析，中轨椭圆冻结太阳同步轨道可实现65.1%周期的观测时长，相比低轨的43.8%周期增加21.3个百分点，约为传统低轨圆轨道北半球观测时长2倍。配合2900 km幅宽载荷，与欧洲CO2M相比，单星对重点城市观测频次提升10倍以上。为进一步评估下一代碳卫星观测幅宽对碳排放清单校核能力的影响，以GEOS-Chem和集合卡尔曼滤波方法构建的CO₂同化系统计算结果表明，对于月均碳通量空间分布而言，中低轨椭圆冻结太阳同步轨道2900 km幅宽计算得到的碳通量后验与先验的差异显著减小（-0.01 gC/m²/月），卫星观测在北半球的碳排放校核能力显著优于热带和南半球地区，且2900 km较240 km幅宽观测会在亚洲、北美和欧亚大陆等区域的区域校核效果更好（图4）。

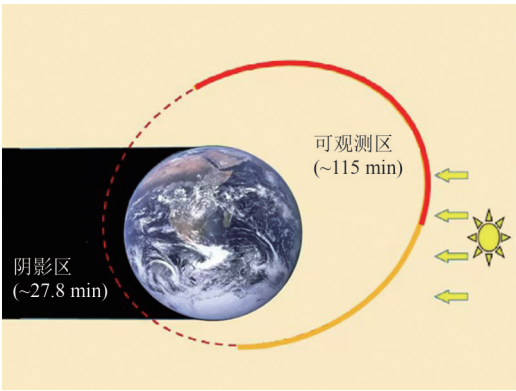


图3 中轨椭圆冻结太阳同步轨道示意图

Fig.3 The medium-Earth elliptical frozen Sun-synchronous orbit

3.3 观测要素与科学产品需求

为提升下一代碳卫星温室气体观测精度和优化人为碳排放估算，分析提出了CO₂、CH₄、NO₂、SIF和气溶胶多参数协同观测的观测要素指标需求。尤其是气溶胶散射通过改变光子传输路径而直接影响卫星观测光谱吸收线深浅程度，是短波红外CO₂平均干空气体积混合比（XCO₂）主要反

演误差来源（华健聪和曾招城，2024），现有卫星在气溶胶光学厚度（AOD）大于0.3时均采用不反演或数据质量控制策略。为此，下一代碳卫星需

要气溶胶与CO₂协同观测，构建XCO₂与气溶胶多参数联合反演模型，同步校正气溶胶散射对XCO₂反演的影响。

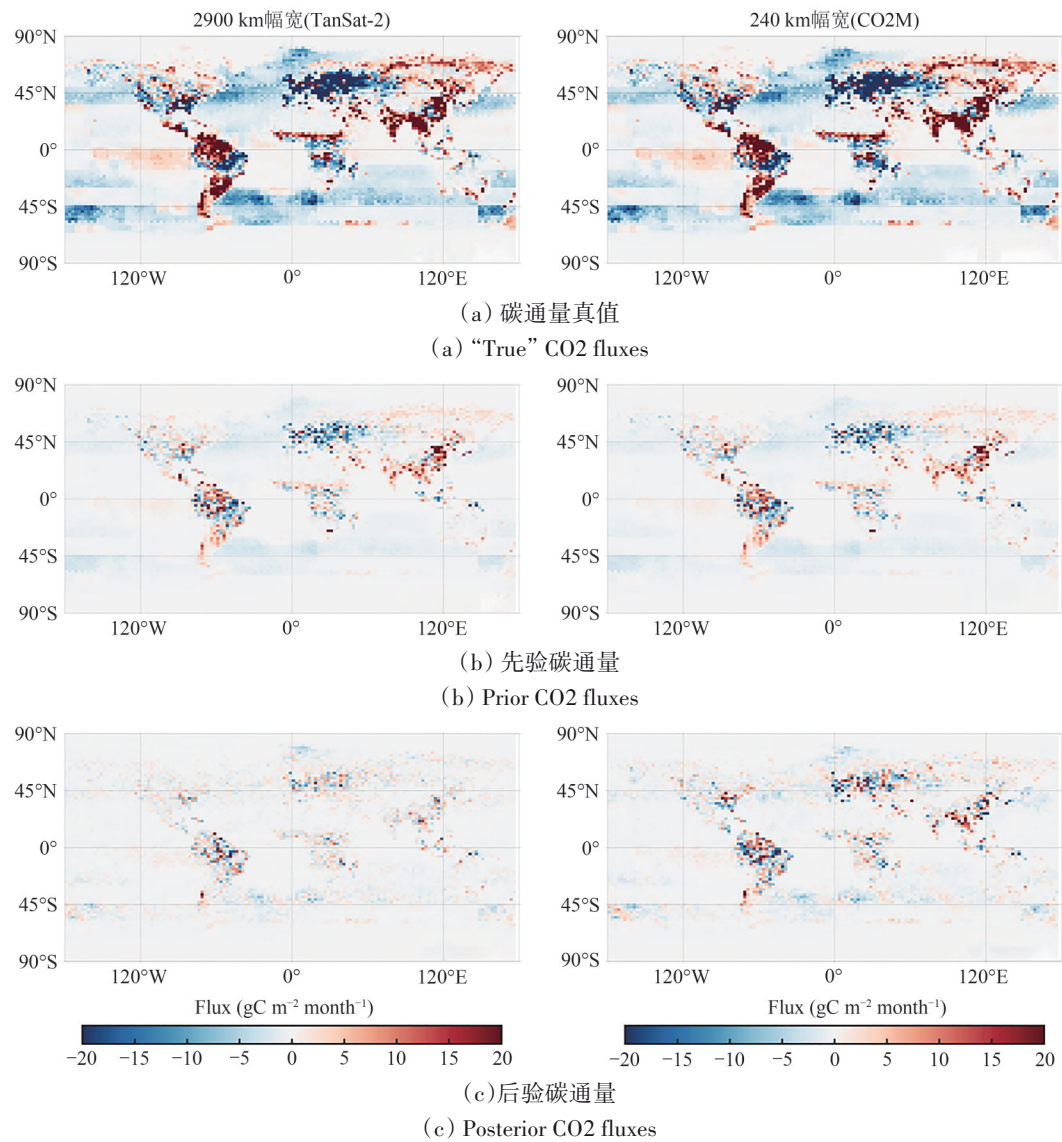


图4 TanSat-2中轨2900 km幅宽与CO2M极轨240 km幅宽对碳排放通量校核能力评估比较
(大气传输模型:GEOS-chem;同化方法:集合卡尔曼滤波)

Fig.4 Comparison of the verification capabilities of TanSat-2's medium-Earth orbit 2900 km swath and CO2M's polar orbit 240 km swath for carbon emission flux assessment (Global chemical transport model: GEOS-Chem; assimilation method: Ensemble Kalman Filter)

具体观测参数的精度需求分析，需基于OSSEs实验构建人为碳排放不确定度随温室气体、示踪气体和生态参数卫星观测误差变化的响应关系。全球和国别尺度，人为碳排放校核不确定度随着CO₂、NO₂观测误差增加而增加，相较幅宽的影响，各要素观测误差影响更大。城市尺度，卫星大幅宽高频次重访可在一定程度上补偿观测精度降低对校核效能的影响，以中等规模城市济南为例，

1 ppm XCO₂观测误差可以满足CO₂排放校核不确定度优于35%校核需求，北京等大城市由于其排放信号更强，排放校核不确定度会进一步降低（Wu等，2023）。点源尺度，相较幅宽，高空间分辨率对点源的识别和探测精度影响占主导，例如，点源排放强度在6 MtCO₂/a的情况下，分辨率在500 m的时候，能看到明显的烟羽，但是在2 km分辨率下，烟羽已经模糊不清（Yao等，2024；Li

等，2024)。

基于所建立的全球—区域—城市—点源等多尺度天基碳监测科学产品关键指标与校核不确定度映射关系，主要温室气体排放清单卫星校核不确定度需求以及目前中国卫星平台、载荷和运控等工程现状，收敛并提出了中国下一代碳卫星科学产品指标（表2），该指标可以实现全球、中国、典型城市人为碳排放校核计算分别优于3%、9%、35%不确定度，满足碳排放清单卫星校核不确定度需求。

表2 下一代碳卫星科学产品指标表

Table 2 List of scientific product indicators for the TanSat-2 mission	
指标名称	指标需求
XCO ₂	优于1.0 ppm
XCH ₄	优于8 ppb
NO ₂ 柱浓度	优于1.3×10 ¹⁵ molecules/cm ²
SIF	优于0.35 mw m ⁻² nm ⁻¹ sr ⁻¹
幅宽	优于1000 km
星下点分辨率	优于4 km, 配合点源监测优于500 m

3.4 载荷指标需求

以CO₂探测载荷技术指标论证为例，短波红外卫星遥感监测CO₂主要利用0.76 μm的O₂-A带，1.61 μm的弱CO₂吸收带和2.06 μm的强CO₂吸收带的光谱获取XCO₂的全球分布。核心器件探测器光谱维对载荷光谱范围、光谱分辨率、信噪比设计产生约束，空间维对空间分辨率、幅宽、信噪比设计产生约束。其中，光谱分辨率和信噪比是影响XCO₂等反演精度的重要且相互制约的指标，本研究建立了如图5所示的XCO₂观测误差与光谱分辨率和信噪比两个参数间映射关系。仿真结果表明，当载荷信噪比设计指标低于600时，XCO₂观测精度同时受制于信噪比和光谱分辨率指标；当载荷信噪比设计指标高于600时，XCO₂观测精度主要受制于信噪比指标，光谱分辨率指标的提升对其影响较弱。根据科学产品精度需求进一步分析评估，结果表明当XCO₂观测精度从2 ppm提升至1 ppm，全球和区域尺度碳通量同化反演的不确定度会大幅下降，同时在载荷工程可实现能力范围内。因此，基于科学需求和工程可实现两方面要求，将下一代碳卫星XCO₂观测精度指标需达到1 ppm。

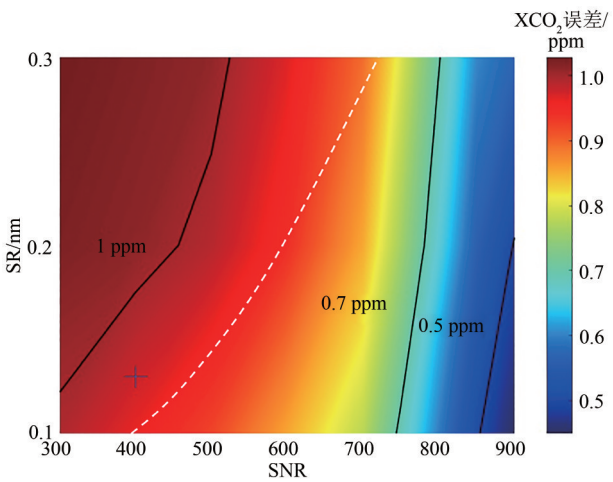


图5 CO₂弱带,XCO₂观测误差与光谱分辨率和信噪比的关系(黑色实线:反演误差线;白色虚线:载荷工程能力线)
Fig.5 Relationship between XCO₂ retrieval error and spectral resolution as well as signal-to-noise ratio for CO₂ weak absorption bands (Black solid line is the retrieval error line , and the white dashed line is payload engineering capability line)

通过将下一代碳卫星观测精度需求所建立的载荷技术指标体系输入给“工程端”，并结合“工程端”反馈的卫星平台和载荷工程研制能力约束、卫星轨道设计方案和有效载荷方案、核心器件等约束条件，以及各要素观测精度需求，完成了载荷空间几何、辐射测量、光谱测量、偏振测量等需求分析，并详细分析了色畸变、谱线弯曲、仪器噪声、定标精度等对各要素反演误差影响及载荷设计需求。通过“科学端”与“工程端”多轮迭代论证，最后优化形成了面向中轨椭圆冻结太阳同步轨道下一代碳卫星设计搭载的有效载荷技术指标体系和卫星使用要求。

3.5 有效载荷配置

下一代碳卫星研制目标是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XCO₂监测载荷，特别是为了满足高精度大气XCO₂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XCO₂卫星反演需求，研制配套的气溶胶监测载荷，以校正XCO₂反演中由气溶胶散射效应引入的误差。第三，为了显著提高碳排放估计的准确性，需研制配套的NO₂和SIF监测载荷，用于优化人为碳排放估算。第四，为了提高卫星对排放烟羽的精细捕捉和刻画能力。为此，下一代

碳卫星配置3个有效载荷,协同实现多要素、多尺度、高时效、高精度探测,支撑实现主要经济体人为排放的核算。具体包括:超大幅宽污碳协同监测仪,采用光栅体制的光谱仪,兼顾污染气体 NO_2 和温室气体 CO_2 、 CH_4 等多要素探测,2900 km超大幅宽,2 km空间分辨率,支撑实现国别尺度温室气体探测和碳排放卫星校核;高分辨空间外差光谱仪,采用空间外差体制的光谱仪,二维摆镜扫描,实现热点区域高空间分辨率的温室气体探测,100 km幅宽,500 m空间分辨率;云与气溶胶探测仪,高光谱偏振载荷,3000 km超大幅宽,2 km空间分辨率,实现多角度云与气溶胶探测。

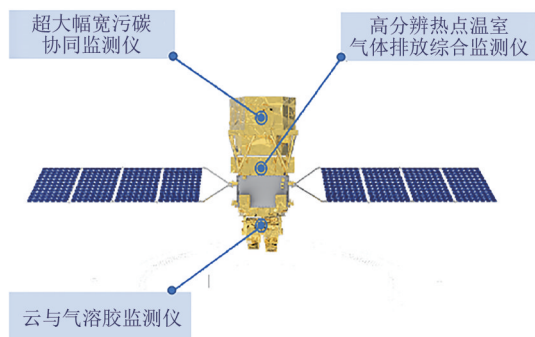


图6 下一代碳卫星构型及有效载荷配置图

Fig.6 The TanSat-2 satellite configuration and its three advanced effective payloads

4 结 语

面向全球碳盘点需求,本文给出了中国下一代碳监测卫星 TanSat-2 的系统性论证技术方案,设计了基于观测系统模拟实验 OSSE 的卫星方案论证框架,构建了涵盖“全球—国别/区域—城市—点源”多尺度的温室气体排放清单校核技术体系。通过分析现有“自下而上”排放清单的不确定度,明确了全球、中国及典型城市 CO_2 和 CH_4 排放卫星校核的不确定度需求指标,为下一代碳卫星的设计提供了科学依据。研究提出了 CO_2 、 CH_4 、 NO_2 、SIF 和气溶胶多参数协同观测的要素需求,构建了“温室气体—示踪气体—植被荧光”多要素约束的人为源分离技术,显著提升了人为碳排放与自然碳源汇的区分能力。

在卫星系统设计方面,提出了中轨椭圆冻结太阳同步轨道方案,优化了北半球人类活动密集区域的观测覆盖能力,显著提升了重点区域的观测频次。通过多轮“科学需求端”与“工程技术

端”迭代论证,确定了下一代碳卫星的科学产品指标和载荷技术指标。此外,设计了超大幅宽污碳协同监测仪、高分辨空间外差光谱仪和云与气溶胶探测仪3台有效载荷,协同实现多要素、多尺度、高时效、高精度的温室气体监测。

构建的“观测—模拟—反演—同化”数值仿真平台(CH-Tan-OSSE)为全球碳排放清单校核提供了全链路的数值仿真框架,支持多尺度、多模态的碳监测能力优化。研究结果为中国下一代碳卫星的研制和全球碳盘点的实施提供了重要的理论和技术支撑,显著提升了中国在全球气候治理中的话语权和碳排放监测能力。

志 谢 对于国家重点研发计划项目“下一代碳卫星技术方案研究”全体参研人员在此表示衷心的感谢!

参考文献(References)

- Atlas R and Riishojgaard L P. 2008. Application of OSSEs to observing system design//Proceedings of SIPE 7087, Remote Sensing System Engineering. San Diego: SIPE: 708707 [DOI: 10.1117/12.795247]
- 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 CO_2 emissions from large cities. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(2): 681-708 [DOI: 10.5194/amt-11-681-2018]
- Chatterjee A, Bloom A A, Byrne B K, Lovenduski N S, Nelson R R, Parazoo N, Pollock H R, Rais-Zadeh M and Miller C E. 2023. Observing carbon flux anomalies at space and time scales of extreme climate events: design, measurement, and science requirements for the Next Generation Orbiting Carbon Observatory (OCO-neXt)//AGU Fall Meeting Abstracts. San Francisco: AGU: A43R-3027
- Chen S, Chen P, Ding L and Pan D L. 2022. Assessments of the above-ocean atmospheric CO_2 detection capability of the GAS instrument onboard the next-generation Fengyun-3H satellite. *Remote Sensing*, 14(23): 6032 [DOI: 10.3390/rs14236032]
- Crippa M, Solazzo E, Huang G L, Guizzardi D, Koffi E, Muntean M, Schieberle C, Friedrich R and Janssens-Maenhout G. 2020. High resolution temporal profiles in the Emissions Database for Global Atmospheric Research. *Scientific Data*, 7(1): 121 [DOI: 10.1038/s41597-020-0462-2]
- Dou X Y, Hong J, Ciais P, Chevallier F, Yan F F, Yu Y, Hu Y F, Huo D, Sun Y, Wang Y L, Davis S J, Crippa M, Janssens-Maenhout G, Guizzardi D, Solazzo E, Lin X J, Song X R, Zhu B Q, Cui D, Ke

- P Y, Wang H Q, Zhou W W, Huang X, Deng Z and Liu Z. 2023. Near-real-time global gridded daily CO₂ emissions 2021. *Scientific Data*, 10(1): 69 [DOI: 10.1038/s41597-023-01963-0]
- 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]
- Gong S Y and Shi Y S. 2021. Evaluation of comprehensive monthly-gridded methane emissions from natural and anthropogenic sources in China. *Science of the Total Environment*, 784: 147116 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.147116]
- Han G, Huang Y Y, Shi T Q, Zhang H Y, Li S W, Zhang H W, Chen W B, Liu J Q and Gong W. 2024. Quantifying CO₂ emissions of power plants with Aerosols and Carbon Dioxide Lidar onboard DQ-1. *Remote Sensing of Environment*, 313: 114368 [DOI: 10.1016/j.rse.2024.114368]
- Hua J C and Zeng Z C. 2024. Quantifying the scattering effect of dust aerosols on satellite remote sensing retrievals of atmospheric carbon dioxide. *National Remote Sensing Bulletin*, 28(10): 2582-2599 (华健聪, 曾招城. 2024. 沙尘气溶胶散射效应对大气二氧化碳卫星遥感反演误差的影响分析. *遥感学报*, 28(10): 2582-2599) [DOI: 10.11834/jrs.20243305]
- Imasu R, Matsunaga T, Nakajima M, Yoshida Y, Shiomi K, Morino I, Saitoh N, Niwa Y, Someya Y, Oishi Y, Hashimoto M, Noda H, Hikosaka K, Uchino O, Maksyutov S, Takagi H, Ishida H, Nakajima TY, Nakajima T and Shi C. 2023. Greenhouse gases Observing SATellite 2 (GOSAT-2): mission overview. *Progress in Earth and Planetary Science*, 10(1): 33 DOI: 10.1186/s40645-023-00562-2
- IPCC. 2019. 2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>
- Li Z B, Fan M, Tao J H and Xu B B. 2024. Impacts of spatial resolution and XCO₂ precision on satellite capability for CO₂ plumes detection. *Sensors*, 24(6): 1881 [DOI: 10.3390/s24061881]
- Liu G, Peng S S, Lin X, Ciais P, Li X Y, Xi Y, Lu Z H, Chang J F, Sautois M, Wu Y X, Patra P, Chandra N, Zeng H and Piao S L. 2021. Recent slowdown of anthropogenic methane emissions in China driven by stabilized coal production. *Environmental Science and Technology Letters*, 8(9): 739-746 [DOI: 10.1021/acs.estlett.1c00463]
- 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 (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) [DOI: 10.11834/jrs.20221806]
- Lord S J, Masutani M, Woollen J S, Derber J C, Atlas R, Terry J, Emmitt G D, Wood S A, Greco S and Kleespies T J. 2001. Observing system simulation experiments for NPOESS//14th Conference on Numerical Weather. *Lauderdale: AMS*: 167-171
- McDuffie E E, Smith S J, O'Rourke P, Tibrewal K, Venkataraman C, Marais E A, Zheng B, Crippa M, Brauer M and Martin R V. 2020. A global anthropogenic emission inventory of atmospheric pollutants from sector- and fuel-specific sources (1970-2017): an application of the Community Emissions Data System (CEDS). *Earth System Science Data*, 12(4): 3413-3442 [DOI: 10.5194/essd-12-3413-2020]
- Meijer Y, Andersson E, Boesch H, Dubovik O, Houweling S, Landgraf J, Lang R and Lindqvist H. 2023. Editorial: anthropogenic emission monitoring with the Copernicus CO₂ monitoring mission. *Frontiers in Remote Sensing*, 4: 1217568 [DOI: 10.3389/frsen.2023.1217568]
- Moore III B, Crowell S M R, Rayner P J, Kumer J, O'Dell C W, O'Brien D, Utembe S, Polonsky I, Schimel D and Lemen J. 2018. The potential of the Geostationary Carbon Cycle Observatory (GeoCarb) to provide multi-scale constraints on the carbon cycle in the Americas. *Frontiers in Environmental Science*, 6: 109 [DOI: 10.3389/fenvs.2018.00109]
- 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]
- Santaren D, Broquet G, Bréon F M, Chevallier F, Siméoni D, Zheng B and Ciais P. 2021. A local-to national-scale inverse modeling system to assess the potential of spaceborne CO₂ measurements for the monitoring of anthropogenic emissions. *Atmospheric Measurement Techniques*, 14(1): 403-433 [DOI: 10.5194/amt-14-403-2021]
- 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]
- Tanimoto H, Matsunaga T, Someya Y, Fujinawa T, Ohyama H, Morino I, Yashiro H, Sugita T, Inomata S, Müller A, Saeki T, Yoshida Y, Niwa Y, Saito M, Noda H, Yamashita Y, Ikeda K, Saigusa N, Machida T, Frey M M, Lim H, Srivastava P, Jin Y S T K, Shimizu A, Nishizawa T, Kanaya Y, Sekiya T, Patra P, Takigawa M, Bisht J, Kasai Y and Sato T O. 2025. The greenhouse gas observation mission with Global Observing SATellite for Greenhouse gases and Water cycle (GOSAT-GW): objectives, conceptual framework and scientific contributions. *Progress in Earth and Planetary Science*,

- 12(1): 8 [DOI: 10.1186/s40645-025-00684-9]
- Tong D, Zhang Q, Davis S J, Liu F, Zheng B, Geng G N, Xue T, Li M, Hong C P, Lu Z F, Streets D G, Guan D B and He K B. 2018. Targeted emission reductions from global super-polluting power plant units. *Nature Sustainability*, 1(1): 59-68 [DOI: 10.1038/s41893-017-0003-y]
- 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 Q S, Luo H Y, Li Z W, Shi H L, Ding Y and Xiong W. 2023. Research progress of spaceborne passive remote sensing detection payload of greenhouse gases. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(4): 857-870 (汪钱盛, 罗海燕, 李志伟, 施海亮, 丁毅, 熊伟. 2023. 温室气体星载被动遥感探测载荷研究进展. *遥感学报*, 27(4): 857-870) [DOI: 10.11834/jrs.20211149]
- Wu K, Yang D X, Liu Y, Cai Z N, Zhou M Q, Feng L and Palmer P I. 2023. Evaluating the ability of the pre-launch TanSat-2 satellite to quantify urban CO₂ emissions. *Remote Sensing*, 15(20): 4904 [DOI: 10.3390/rs15204904]
- Yang D X, Liu Y, Boesch H, Yao L, Di Noia A, Cai Z N, Lu N M, Lyu D R, 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]
- Yao L, Yang D X, Jiang Z, Liu Y, Chen L X, Tian L F, Hakkarainen J, Cai Z N, Wang J and Ren X Y. 2024. Towards supporting satellite design through the top-down approach: a general model for assessing the ability of future satellite missions to quantify point source emissions. *Remote Sensing*, 16(23): 4503 [DOI: 10.3390/rs16234503]
- 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]
- Zhang Y Z, Mao H Q, Chen C H and Liang R S. 2024. Application of satellite observations to verify methane emission inventories. *National Remote Sensing Bulletin*, 28(8): 1940-1954 (张羽中, 毛慧琴, 陈翠红, 梁若思. 2024. 卫星观测在甲烷排放清单校核中的应用. *遥感学报*, 28(8): 1940-1954) [DOI: 10.11834/jrs.20243350]

Requirements and design of TanSat-2 Mission

FAN Meng¹, CHEN Liangfu¹, TIAN Longfei², YANG Dongxu³, MAO Huiqin⁴, CHEN Lin⁵,
TAO Jinhua¹, JIANG Fei⁶, LIU Liangyun¹, ZHANG Meigen³, LIU Guohua², YIN Zengshan²,
CHEN Cuihong⁴, WANG Jun⁶, YAO Lu³, DU Shanshan¹, YU Chao¹, ZHANG Ying¹,
HU Denghui², ZHOU Guanhua⁷, KONG Yawen¹, WU Yirong¹

1. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;
2. Innovation Academy for Microsatellites, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201203, China;
3. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;
4. Satellite Application Center of Ecology and Environmental Protection, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100094, China;
5. National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;
6. International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China;
7. School of Instrumentation Science and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract: Global climate change has become a significant challenge facing human society, with greenhouse gas (GHG) emissions being one of its primary driving factors. To effectively assess global progress in greenhouse gas reduction, the Paris Agreement established the Global Stocktake (GST) mechanism, which requires independent verification of national GHG emission inventories. However, existing “bottom-up” emission inventories face significant uncertainties in compilation methods, data completeness, and verifiability, making it difficult to meet the need for high-precision, standardized carbon emission data for the GST. Therefore, it is urgent need to develop “top-down” satellite monitoring methods to enhance the transparency and scientific rigor of carbon emission inventory verification.

This study focused on the requirement analysis and design for China’s next-generation carbon monitoring satellite (TanSat-2). Based on Observing System Simulation Experiments (OSSE), an evaluation framework for satellite program assessment was constructed, and a carbon satellite design proposal aimed at GST needs is presented. First, a satellite verification technology system for GHG emission inventories at multiple scales (“global-regional-hotspot”) was established, defining key technological requirements for inventory verification at different scales and proposing uncertainty constraints for the next-generation carbon satellite inventory verification. Second, a multi-component synergistic observation and anthropogenic emission source separation technology system was developed by integrating “greenhouse gases-pollutant gases-vegetation fluorescence”. The system was applied to evaluate the ability of satellite carbon monitoring to

distinguish between ecosystem carbon cycles and anthropogenic carbon emissions, leading to the development of a scientific product indicator system. Additionally, we assessed the impact of various payload technical parameters (spectral resolution, signal-to-noise ratio, wavelength range, etc.) on the retrieval errors of each observation element. The technical indicators for GHG, pollutant gas, aerosol, and Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence (SIF) detection payloads was qualified, aligned with the engineering capabilities and constraints of satellite platforms and payloads.

Based on this, a design for the TanSat-2 platform was completed, incorporating multi-component, high-temporal, multi-scale, and high-precision capabilities. A mid-orbit elliptical frozen sun-synchronous orbit satellite scheme was proposed. The TanSat-2 was designed to equipped with three advanced effective payloads: (1) the Ultra-wide-field Carbon Pollution collaborative monitoring Instrument (UCPI), (2) the Hotspot Greenhouse gas Emission Tracker (HGET), (3) the Cloud Aerosol Polarization Imager (CAPI). With a coverage capacity of up to a thousand kilometers, UCPI was designed for monitoring carbon emissions at the national and regional scales. HGET was specially designed for detailed monitoring of major emission sources, capable of high spatial resolution for hotspot area investigation. And CAPI was designed to optimize GHG inversion accuracy and reduce the uncertainty of aerosol scattering in the remote sensing inversion of CO₂, CH₄, and other gases.

Key words: TanSat-2, Global Stocktake, carbon emission, satellite retrieval, assimilation

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2022YFB3904800)