

大气环境卫星温室气体和气溶胶协同观测综述

李正强¹, 谢一淞¹, 石玉胜¹, 厉青², Cohen Jason^{3,4}, 张羽中⁵,
韩颖慧⁶, 熊伟⁷, 刘毅⁸

1. 中国科学院空天信息创新研究院 国家环境保护卫星遥感重点实验室, 北京 100101;

2. 生态环境部卫星环境应用中心, 北京 100094;

3. 中山大学 大气科学学院, 珠海 519082;

4. 中国矿业大学 环境与测绘学院, 徐州 221116;

5. 西湖大学 工学院 浙江省海岸带环境与资源研究重点实验室, 杭州 310024;

6. 中国科学院大学 资源与环境学院, 北京 100049;

7. 中国科学院合肥物质科学研究院 中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 合肥 230031;

8. 中国科学院大气物理研究所 碳中和研究中心, 北京 100029

摘要: 人类排放的温室气体和气溶胶是造成全球气候变暖和大气环境恶化的主要因素, 也是大气环境卫星遥感的核心探测目标。与传统的单一探测目标卫星相比, 实现同平台的大气温室气体和气溶胶协同监测, 对于提高温室气体卫星反演精度、改善“自上而下”碳源汇估算、提升温室气体和气溶胶的人为/自然源区分能力具有重要意义, 也是各国航天机构积极发展的空间探测手段。本文对欧、日、中、美等具备温室气体和气溶胶协同监测能力的卫星进行系统的介绍, 包括卫星平台、传感器、处理算法和质控验证。按照卫星监测任务和传感器用途, 将其分为大气综合探测卫星和温室气体监测卫星两大类, 并从碳中和行动和大气环境综合治理等需求出发, 提出温室气体和气溶胶协同观测星座(GACOC)的概念及其发展方向, 包括主被动卫星组网观测、温室气体和气溶胶高精度联合反演算法、人为排放源识别和定量监测等应用。

关键词: 温室气体, 气溶胶, 卫星遥感, 二氧化碳, 协同观测星座

引用格式: 李正强, 谢一淞, 石玉胜, 厉青, Cohen Jason, 张羽中, 韩颖慧, 熊伟, 刘毅. 2022. 大气环境卫星温室气体和气溶胶协同观测综述. 遥感学报, 26(5): 795-816

Li Z Q, Xie Y S, Shi Y S, Li Q, COHEN J., Zhang Y Z, Han Y H, Xiong W and Liu Y. 2022. A review of collaborative remote sensing observation of greenhouse gases and aerosol with atmospheric environment satellites. National Remote Sensing Bulletin, 26(5): 795-816 [DOI: 10.11834/jrs.20221387]

1 引言

气候变化是全人类生存和发展面临的最重要的问题, 建立绿色低碳发展之路, 提高气候变化应对能力, 是世界各国亟需解决的燃眉之急。2015年12月《联合国气候变化框架公约》近200个缔约方在巴黎气候变化大会上达成《巴黎协定》(The Paris Agreement), 长期目标是将全球平均气温较前工业化时期上升幅度控制在2°C以内。2018年10月, IPCC报告进一步提出了1.5°C的控温线, 对

今后数十年的地球生态系统和人类至关重要。之后, 中国在2020年9月第七十五届联合国大会上做出了承诺, 提出“努力争取2060年前实现碳中和”的战略目标。准确、客观、空间覆盖的CO₂、CH₄等主要温室气体的定量化监测是实现碳中和评估的重要观测基础; 大型排放源的精准定位和动态监测是进一步开展针对性治理和防控的关键途径 (Gong和Shi, 2021)。

作为全球范围获取空间覆盖的温室气体GHGs (Greenhouse gases) 柱浓度分布的唯一观测手段,

收稿日期: 2021-06-08; 预印本: 2022-01-29

基金项目: 国家杰出青年科学基金(编号:41925019); 国家自然科学基金(编号:42175147); 海南省重点研发计划(编号:ZDYF2020206)

第一作者简介: 李正强, 研究方向为大气环境遥感。E-mail: lizq@aircas.ac.cn

通信作者简介: 谢一淞, 研究方向为大气环境遥感。E-mail: xieys@aircas.ac.cn

卫星遥感已成为破解传统地面探测技术空间不连续、运维高成本等瓶颈问题,实现高精度、高时空分辨率碳排放获取的常规监测手段。世界上多个航天大国发射了温室气体监测卫星,包括日本的GOSAT和GOSAT-2(Kuze等,2009;Suto等,2021)、美国的OCO-2和OCO-3(Eldering等,2017,2019)、中国的TanSat(Liu等,2018)等。此外,欧洲的ENVISAT(Buchwitz等,2005)、Sentinel-5p(Lorente等,2021),中国的GF-5(熊伟,2019)和GF-5(02)、FY-3D(陆其峰等,2019)、DQ-1(Han等,2018)等大气综合探测卫星也搭载了温室气体传感器,具备获取CO₂或CH₄分布信息的能力。在此基础上,各国航天机构进一步规划了多个温室气体探测卫星计划,包括欧洲空间局(ESA)的CO2M计划卫星系列(Kuhlmann等,2019)(拟2025年—2026年发射第一批)、美国宇航局(NASA)的GeoCarb卫星(Moore等,2018)(拟2022年发射)、法国空间研究中心(CNES)的MicroCarb卫星(Bertaux等,2020)(拟2023年发射)、法国CNES与德国航天局(DLR)联合研制的MERLIN卫星(Ehret等,2017)(拟2025年发射)、中国国家航天局(CNSA)的DQ-2卫星(Han等,2018)(2023年发射)等。

除了CO₂、CH₄等温室气体,气溶胶(大气颗粒物)是另一类具有显著辐射效应、对人类生存发展影响深远的大气成分,因此也是大气环境卫星遥感探测的主要目标之一。气溶胶主要来源于人类活动和自然源排放。由于气溶胶成分组成的复杂性和不同成分间光学吸收散射特性的差异,气溶胶具有复杂的辐射效应,对全球气候变化的影响不可忽视(Schuster等,2016)。虽然大部分情况下气溶胶散射作用占主导,但强吸光性的黑碳气溶胶同样能造成正辐射强迫从而加热大气(Cohen和Wang,2014;Olson等,2022)。因此,气溶胶含量及辐射强迫的认知也是辐射收支估算、气候变化贡献评估需要关注的重要问题。

由于工业发展、城市化、人口增长等原因,近几十年中国的温室气体和大气颗粒物排放较高,其中有相当一部分来自相同的排放源(例如,燃煤发电、机动车等)。同时,相关研究指出,大气颗粒物的散射施肥效应能够改变植被生长,进而对陆地生态系统碳汇产生影响(谢晓栋,2020)。然而,气溶胶与温室气体之间的辐射效应存在显

著差异,难以准确定量评估人为排放对地气系统辐射的总体影响。例如,Li等(2016)通过模式研究指出,近几十年中国排放的硫酸盐气溶胶对全球辐射强迫有显著的致冷贡献,有效抵消了黑碳气溶胶及部分化石燃料产生CO₂的增温效应。解决这一问题的根本途径是获得足够多的高精度定量数据(包括浓度、源汇等信息),特别是在同一卫星观测平台上实现温室气体和气溶胶的协同观测。除此之外,气溶胶和薄云的散射效应是影响CO₂、CH₄反演精度和产品数据量的重要因素(Guerlet等,2013)。O'Dell等(2012)指出,忽略气溶胶或薄云散射引起的XCO₂反演误差是不可接受的。将同平台观测提取的真实气溶胶和云信息,用于温室气体反演中的光学路径散射计算,是提高温室气体产品精度、增加产品数据量的有效方案。

基于卫星平台的大气温室气体和气溶胶协同监测,重要性已被科学界广泛认可,并逐渐成为各国开展航天遥感探测的重要手段。温室气体与气溶胶的联合探测传感器组成“温室气体和气溶胶协同观测星座(GACOC)”(图1),为气候变化、大气环境等领域的研究提供重要的基础数据。本文在简要介绍温室气体与气溶胶反演基本原理、分析二者同步观测必要性的基础上,从卫星平台、传感器、数据处理算法、地基验证网络等方面对国内外主要的温室气体与气溶胶协同监测卫星进行了详细介绍,并对协同监测的发展方向进行总结和展望。

2 温室气体和气溶胶卫星反演

2.1 温室气体反演方法

大气CO₂和CH₄的卫星探测基本可分为热红外光谱探测和近红外光谱探测两类。其中,热红外传感器(例如,AIRS/Aqua)主要利用亮温数据进行探测,由于地表和近地面大气温度接近,热发射特性较为相似,热红外探测对近地面及边界层的温室气体含量不够敏感(吴浩,2019),因此目前星载温室气体探测技术主要利用的是近红外高光谱。下面以大气CO₂柱浓度反演为例,对近红外卫星探测反演算法进行简单介绍。

CO₂卫星遥感的基本原理是利用高光谱传感器探测到的CO₂吸收带(主要包括1.6 μm的弱吸收带和2.0 μm的强吸收带)辐射光谱,去除多种影响

因素的干扰后提取 CO₂ 含量信息, 并结合 O₂-A 吸收带 (0.76 μm) 估算的大气分子数浓度进一步计算 CO₂ 干空气柱混合比 XCO₂。

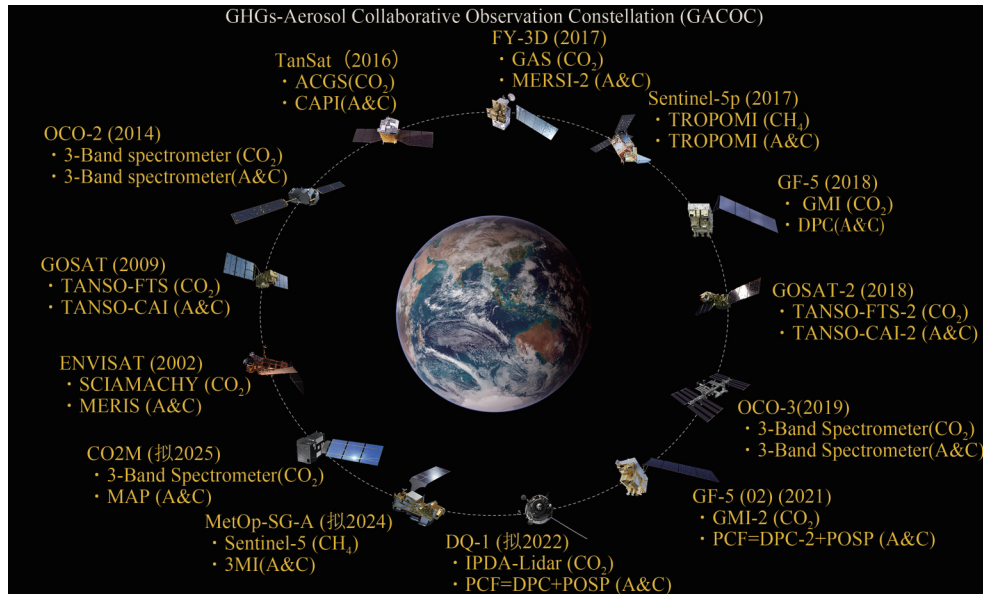


图1 温室气体和气溶胶协同观测星座(GACOC)(A&C表示气溶胶和云)

Fig.1 The concept of “GHGs-aerosol Collaborative Observation Constellation” (GACOC)(A&C denotes aerosol and cloud)

目前已经发展了多种反演算法应用于卫星数据获取 CO₂ 柱浓度, 主要可归为经验统计方法和物理方法两大类。经验统计法的基本思路是基于大量卫星观测数据、辅助资料构建包括不同地理位置和季节变化的庞大训练样本集, 利用统计回归或神经网络算法对 CO₂ 分布进行估算。经验统计方法虽然可避免复杂辐射传输计算, 但受样本集选取、模型简化、缺少误差估计等影响, 反演误差较大, 难以获取可靠的全球 CO₂ 卫星产品, 因此该方法一般用于提供物理算法需要的先验廓线 (赵靛, 2017)。

物理方法是从高精度辐射传输计算出发, 将反演问题转变为求解非线性数学方程最优解的问题, 从而实现 CO₂ 柱浓度的反演。温室气体卫星反演采用的物理方法主要包括基于差分吸收光谱 DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy) 的反演算法和基于最优估计理论的全物理算法 FP (Full Physics) 等。

(1) 差分吸收算法。差分吸收算法的基本原理是利用低阶多项式将消光截面的慢变部分 (消光随波长缓慢变化, 例如气溶胶米散射、分子瑞利散射等) 和快变部分 (消光随波长快速变化, 主要是气体吸收) 进行分离, 从而实现吸收气体浓度的定量获取, 在痕量气体反演中得到广泛应用 (Buchwitz 等, 2000)。近红外通道气体吸收截面随温度、压

强变化较大, 德国不莱梅大学研究团队发展了改进的 DOAS 算法, 包括 WFM-DOAS (Weighting Function Modified-DOAS) 算法 (Schneising 等, 2008) 和 BESD (Bremen Optimal Estimation-DOAS) 算法 (Heymann 等, 2015) 等。WFM-DOAS 算法将模拟的归一化辐射亮度 I^{mod} 表示为线性辐射传输形式:

$$\ln I_i^{mod}(\hat{\mathbf{V}}, \hat{\mathbf{a}}) = \ln I_i^{mod}(\bar{\mathbf{V}}) + \sum_{j=1}^J \frac{\partial \ln I_i^{mod}}{\partial V_j} \bigg|_{\bar{V}_j} \times (\hat{V}_j - \bar{V}_j) + P_i(\hat{\mathbf{a}}) \quad (1)$$

式中, 下标 i 表示第 i 个探元的中心波长, V_j 表示第 j 种吸收气体 (共 J 种) 的柱含量。向量 \mathbf{a} 中的元素为多项式 P_i 的系数。上标 “^” 和 “-” 分别表示反演值和模拟值。WFM-DOAS 在反演过程中通过调整各光谱处的辐射强度模拟值, 基于最小二乘获得模拟光谱 I^{mod} 和观测光谱 I^{obs} 的最佳匹配, 从而实现气体柱浓度的反演:

$$\sum_{i=1}^m (\ln I_i^{obs} - \ln I_i^{mod}(\hat{\mathbf{V}}, \hat{\mathbf{a}}))^2 \equiv \|\mathbf{RES}\|^2 \rightarrow \min \quad (2)$$

式中, \mathbf{RES} 表示拟合光谱残差向量。

(2) 全物理算法。全物理算法的基本原理如图 2 (Crisp 等, 2021) 所示, 利用高精度辐射传输模型 (F), 根据待求状态向量 \mathbf{x} 的初始猜测值 \mathbf{x}_0 , 模拟气体吸收波段观测光谱 \mathbf{y} , 通过最小化代价函数 (式(3)), 并经迭代 (式(4)) 求解非线性问题

方程的待反演参数的最大似然解, 实现 CO_2 及其他状态向量参数的反演:

$$\delta = (\mathbf{y} - F(\mathbf{x}))^T \mathbf{S}_e^{-1} (\mathbf{y} - F(\mathbf{x})) + (\mathbf{x}_a - \mathbf{x})^T \mathbf{S}_a^{-1} (\mathbf{x}_a - \mathbf{x}) \quad (3)$$

$$\mathbf{x}_{i+1} = \mathbf{x}_i + \left(\mathbf{K}_i^T \mathbf{S}_e^{-1} \mathbf{K}_i + \mathbf{S}_a^{-1} \right)^{-1} \left(\mathbf{K}_i^T \mathbf{S}_e^{-1} (\mathbf{y} - F(\mathbf{x}_i)) + \mathbf{S}_a^{-1} (\mathbf{x}_a - \mathbf{x}_i) \right) \quad (4)$$

式中, \mathbf{S}_a 和 \mathbf{S}_e 分别为先验协方差矩阵和观测协方差矩阵, \mathbf{K} 为 Jacobian 矩阵, 下标 i 表示第 i 次迭代。FP 算法精度较高, 是目前全球在轨 CO_2 卫星普遍采用的反演算法 (刘毅等, 2021), 代表性的包括 FOCAL 算法 (Reuter 等, 2017)、ACOS 算法 (O'Dell 等, 2012)、RemoTeC-FP 算法 (Schepers 等, 2012)、UoL-FP 算法 (Yang 等, 2020)、IAPCAS 算法 (Liu 等, 2018) 等。本文仅作简单列举, 详细介绍可参看上述文献或算法报告。

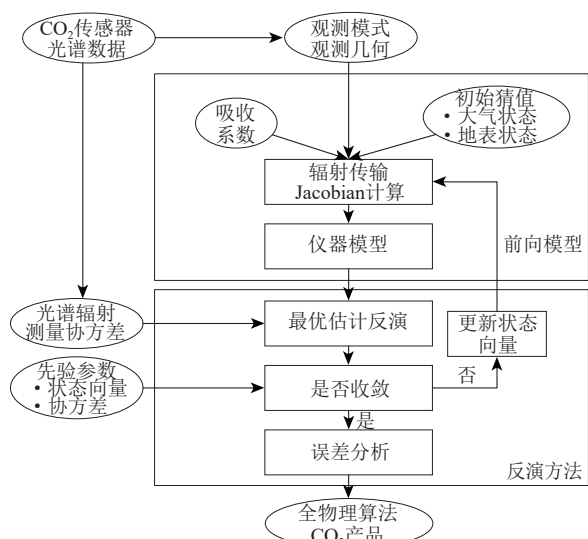


图2 CO_2 全物理反演算法原理和基本过程 (Crisp 等, 2021)

Fig. 2 Algorithm principle and data process of the FP algorithm of CO_2 inversion (Crisp et al., 2021)

2.2 气溶胶反演方法

本文所指的气溶胶卫星反演方法主要针对气溶胶光学厚度 AOD (Aerosol Optical Depth)。根据卫星传感器探测特点的不同, AOD 反演算法主要包括暗目标/深蓝算法 (多通道观测)、非均匀地表算法 (多角度观测)、时间序列算法 (静止卫星观测)、最优化估计算法 (多角度多光谱偏振观测) 等代表性算法。

(1) 暗目标/深蓝算法。暗目标算法 DT (Dark Target) 由 Kaufman 等 (1997) 提出并应用在 Aqua

卫星和 Terra 卫星上搭载的 MODIS 传感器。其基本原理是假设陆地上浓密植被、湿土壤及水体区域为红光 ($0.65 \mu\text{m}$) 和蓝光 ($0.47 \mu\text{m}$) 波段卫星影像上的“暗像元”, 对卫星表观反射率贡献较小, 因此, 在清洁无云的陆地暗像元上空, 表观反射率随 AOD 的增加而增加; MODIS 短波红外通道 ($2.12 \mu\text{m}$) 观测信号中, 除了沙尘外, 绝大多数气溶胶对表观反射率的贡献基本可以忽略。因此, 利用 $2.12 \mu\text{m}$ 观测可以实现暗像元的红、蓝光地表反射率的近似估算 (Tanré 等, 1999), 并进一步采用查找表等方法实现暗像元的 AOD 反演。由于不同波段间反射率的线性关系存在一定偏差, Levy 等 (2007) 引入受大气影响较小的归一化植被指数 (NDVI), 进一步对暗像元地表估算线性关系进行订正, 同时考虑观测几何的影响, 实现地表反射率估算的改进。参考该算法, 葛邦宇等 (2018) 针对 Himawari-8 卫星 AHI 传感器数据, 通过统计短波红外与可见光波段的地表反射率比值关系, 用于地气解耦时的地表反射率估计, 实现陆地上空气溶胶的反演。

对于沙漠等以亮地表为主的区域, MODIS 采用深蓝算法 DB (Deep Blue) 进行 AOD 反演 (Hsu 等, 2004), 解决亮地表区域 DT 算法难以适用的问题。DB 算法假设地表覆盖类型在季节/月尺度上变化较小, 对于一段时期内的卫星观测, 区域内每个像元均可对应一个“最清洁”场景 (即最小表观反射率), 此时不受气溶胶和云的影响, 卫星表观反射率仅由大气分子瑞利散射和地表均一朗伯体表面反射贡献构成。利用大气辐射传输模型建立瑞利散射查找表, 去除大气分子散射影响, 进而获得此像元的地表反射率, 即可用于 AOD 反演。He 等 (2021) 评估了 S-NPP 卫星 VIIRS 传感器的 DB 反演产品, 发现气溶胶卫星产品与地基观测的一致性较高。

(2) 非均匀地表算法。非均匀地表算法 HL (Heterogeneous Land) 是基于 MISR 传感器上 9 个不同角度观测发展的陆地区域 AOD 反演算法 (Diner 等, 2005)。其基本原理是利用多个角度的辐射观测信息描述一定范围的空间非均匀性, 构建经验正交函数 (EOF) 来表示大气层顶表观反射率的角度变化特性, 从而估算大气程辐射, 进而实现 AOD 的反演 (Martonchik 等, 1998)。HL 算法假设在一定的空间 (MISR 设置 $16 \text{像元} \times 16 \text{像元}$ 的范围

为一个反演区域)内满足地表非均匀、大气均一的条件,不依赖于地表类型的准确描述或地表反射率的准确估算,而是通过数学变化用经验正交函数表达目标区域的平均地表辐射贡献,实现地表反射和大气程辐射的有效分离(吴孔逸等,2021)。MISR算法采用粒子形状(球形、沙尘形)、粒径大小(尺度谱均值半径、方差)、光谱吸收特性(复折射指数、单次散射反照率)等参数对气溶胶模型进行描述。通过8种单成分气溶胶粒子类型中2种或3种不同比例的组合,形成74个气溶胶模型,具体可见MISR气溶胶反演算法文档(Diner等,2008)。Zhang等(2017)将该算法移植于同样具有多角度观测的POLDER-3传感器,利用多个波段的标量表观反射率构建经验正交函数从而还原地表反射贡献,最终实现AOD的反演。

(3) 时间序列算法。时间序列算法主要适用于静止卫星凝视成像探测方式(例如COMS卫星上的GOCI传感器和Himawari-8卫星上的AHI传感器),利用短时间内多个时相的影像进行大气和地表信息的解耦合。时间序列算法的基本思路主要基于两个关键假设(Hagolle等,2008):一是气溶胶光学特性在时间维度上变化较快而在空间维度上变化缓慢;二是地表反射率在空间上变化显著而在较短的时间间隔内基本不变。在静止卫星多天连续、同时次的观测场景中,对于下垫面同一地理位置,卫星观测角度基本不变,同一地方时的太阳高度角和方位角变化较小,可以认为相邻两景卫星影像表观反射率的差异主要是由于大气光学特性变化引起的。通过构建描述静止卫星相邻时相多幅影像地表反射率差异的代价函数,结合气溶胶光学厚度查找表,可实现气溶胶光学厚度的反演(使得相邻景地表反射率差异最小时对应的AOD)。

MODIS的多角度大气校正(MAIA)方法(C6版本,Lyapustin等,2018)基于时间序列算法原理,通过0.47 μm 和2.13 μm 波段的地表反射率关系进行动态地气解耦,同时在气溶胶反演中加入蓝-绿波段比值以约束地表双向反射分布的波段间差异,最终实现AOD反演,并且其精度略优于DT和DB产品(Choi等,2019)。

(4) 最优化估计算法。最优化估计算法OE(Optimal Estimation)利用多个卫星观测,通过前向

辐射传输计算,在连续求解空间中寻找最优估计结果,具有较高的理论反演精度。气溶胶与地表通用反演算法GRASP(Generalized Retrieval of Aerosol and Surface Properties)对气溶胶和地表特性进行全局最优化反演(Dubovik等,2014),是较有代表性的最优化估计卫星遥感算法之一。GRASP算法的基本原理如下方程组所示(Dubovik等,2011):

$$\begin{cases} f^* = f(\mathbf{a}) + \Delta f \\ \mathbf{0}^* = (\Delta \mathbf{a})^* = \mathbf{S}\mathbf{a} + \Delta(\Delta \mathbf{a}) \\ \mathbf{a}^* = \mathbf{a} + \Delta \mathbf{a}^* \end{cases} \quad (5)$$

式中, f^* 为观测向量(各波段、各观测角度的强度和偏振观测), f 表示前向模型, Δf 为观测不确定性向量, \mathbf{a} 为状态向量(即未知量向量,包括气溶胶尺度谱分布、体积浓度、形状因子、多波段复折射指数以及地表BRDF和BPDF参数)。求得上述未知参量后可进一步获得AOD等参数。式(5)第2行为先验平滑假设,用于约束状态向量中参数的变化特性(包括尺度谱、复折射指数光谱、BRDF和BPDF光谱等),矩阵 \mathbf{S} 中元素为计算 m 阶导数的系数, $\Delta(\Delta \mathbf{a})$ 为不确定性项。第3行中, \mathbf{a}^* 和 $\Delta \mathbf{a}^*$ 分别表示状态向量的先验估计及其不确定性。GRASP算法对多光谱、多角度、强度和偏振卫星观测(例如POLDER-3传感器)进行统计优化多变量拟合,基于不确定性正态分布假设,结合最大似然原理,对多组观测数据和先验约束进行最小二乘最优拟合,从而实现气溶胶和地表特性的联合反演。郑逢勋等(2021)进一步讨论了最优化估计反演框架下偏振测量误差对气溶胶反演精度的影响。

上述几种气溶胶反演算法在适用性、精度等方面各有优势。暗目标方法利用MODIS短波红外波段估算可见光波段的地表反射率,该方法原理简单,在浓密植被等暗目标区域有较好的精度。其他具有类似波段配置的传感器也可采用该方法进行反演。深蓝算法依赖于基于最小反射率技术建立的地表反射率库,主要应用于地表反射随季节变化较小的干旱/半干旱等地区(Hsu等,2013),能够有效填补暗目标算法在亮地表反演的缺失。非均匀地表算法是基于MISR多角度观测发展的反演方法,与暗目标、深蓝等算法不同之处在于受地表类型限制较小,同时由于多角度观测对地表反射良好的处理,具有较高的气溶胶反演

精度 (Choi 等, 2019)。时间序列算法与深蓝算法类似, 采用最小反射率技术建立地表反射率数据集, 因此通常需要考察一定时间 (例如1个月) 内的观测数据, 计算效率是需要解决的问题。GOCI 传感器 V2 版本的气溶胶算法中, 近实时 (NRT) 反演处理采用地表反射率的气候学统计数据 (5 a) 作为输入 (Choi 等, 2018)。最优化估计算法的优势主要在于能够获取复折射指数、尺度谱分布等气溶胶微物理参数, 但算法涉及到许多数理统计知识, 实现难度较大, 并且迭代计算收敛速度较慢, 应用于卫星业务化产品生产还需进一步提高效率。

2.3 温室气体反演中气溶胶和云散射同步校正

CO₂在大气中的寿命较长, 与CO₂背景浓度相比, 即使是中等到较强的地表源或汇也通常只会导致CO₂垂直柱相对较小的局部发生变化 (Schneising 等, 2008)。针对目前较为关注的全球碳通量估算、近地表源汇探测、人为/自然源区分等研究, 欧空局气候变化倡议 (ESA CCI) 对关键气候变量 (ECV) 中主要温室气体的卫星反演精度进行了说明, 最新的需求报告 (GHG-CCI Project Team, 2020) 提出, XCO₂和XCH₄的系统反演误差需分别优于0.5 ppm和10 ppb。利用卫星高光谱数据反演CO₂、CH₄等温室气体时, 厚云通常能够得到较好的识别和滤除, 而大气中的气溶胶和薄卷云则很难被有效识别, 其散射作用引起有效光程改变, 极大的影响了温室气体的反演精度, 特别是高气溶胶光学厚度和大角度观测几何下, 影响尤其明显 (Eldering 等, 2017)。荷兰空间研究中心 (SRON) 模拟研究 (图3) 显示, 当AOD超过0.4, XCO₂反演误差可能高达4 ppm以上 (Meijer 等, 2020)。

卫星数据的时空覆盖能力也是衡量温室气体卫星产品应用能力的关键要素之一。从卫星观测提取CO₂、CH₄弱信号的过程中, 地表反射、云和气溶胶散射等均是影响温室气体反演精度的重要因素。目前部分在轨运行的温室气体监测卫星 (例如GOSAT等) 虽然搭载了用于气溶胶和云探测的传感器, 但这些传感器难以获取全面的气溶胶和云参数, 导致无法在所有场景下实现高精度的散射校正 (Connor 等, 2016)。目前已发布的温室气体卫星产品大部分将高浓度气溶胶作为数据滤

除的指标之一。例如, OCO-2的CO₂产品采用的滤除标准是光学厚度大于0.35, 经气溶胶和云剔除后有效产品比例仅约为7%—12% (Eldering 等, 2017)。而中国长期地基观测气候学统计数据显示, 京津冀、长三角、珠三角、川渝经济区等重点地区, AOD年均值接近或超过0.7 (Li 等, 2018b), 严重限制了温室气体卫星产品的有效数据量。因此, 迫切需要发展温室气体和气溶胶的卫星协同监测能力, 为温室气体高精度反演提供关键的校正数据。Meijer 等 (2020) 提出, 获得高精度的XCO₂数据需要配套获取多种云和气溶胶参数, 包括光学厚度、层高、气溶胶尺度谱分布和复折射指数等, 可以通过增加多角度和偏振协同观测实现 (Sanghavi 等, 2020)。

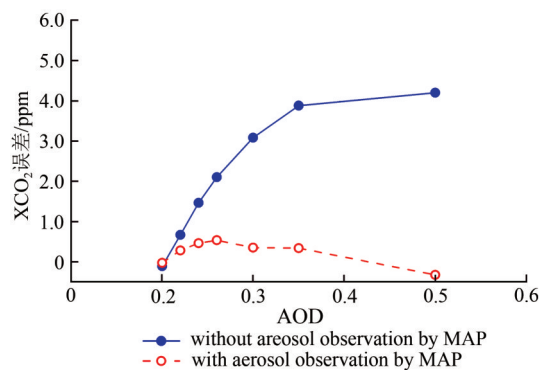


图3 气溶胶多角度偏振仪 (MAP) 同步观测与无同步观测的XCO₂反演误差模拟 (Meijer 等, 2020)

Fig. 3 Simulated inversion error of XCO₂ with and without aerosol observation by Multi-Angle Polarimeter (MAP) (Meijer et al., 2020)

3 温室气体和气溶胶协同监测卫星

根据卫星主要监测任务和传感器用途的不同, 本文将具有大气温室气体和气溶胶协同监测能力的卫星分为大气温室气体和气溶胶综合探测卫星和温室气体监测卫星两大类。

3.1 温室气体和气溶胶综合探测卫星

温室气体和气溶胶综合探测卫星是能够分别独立探测温室气体与气溶胶、获得相应卫星产品的多用途大气环境卫星, 可提供CO₂或CH₄定量监测和时空分布, 同时也可获得气溶胶含量或光学—微物理—成分等综合信息。表1列出了国内外大气温室气体与气溶胶综合探测卫星及传感器的详细参数。

表1 大气温室气体与气溶胶综合探测卫星
Table 1 Atmospheric GHGs-aerosol joint observation satellites

参数	卫星												
	ENVISAT	Sentinel-5P	FY-3D	GF-5(GF-5(02)) ^{b)}	DQ-1(DQ-2) ^{c)}	MetOp-SG-A	GHG观测	GHG观测	GHG观测	GHG观测	GHG观测		
发射时间	2002-03	2017-10	2017-11	2018-05	2022-04	拟2024	气溶胶观测	气溶胶观测	气溶胶观测	气溶胶观测	气溶胶观测		
轨道类型	太阳同步极轨	太阳同步极轨	太阳同步极轨	太阳同步极轨	太阳同步极轨	太阳同步极轨	被动光栅	主动	被动光栅	被动光栅	多光谱、多偏振		
轨道高度/km	790	817	830	705	705	817	可见-热红外	空间外差	多光谱、多偏振	多光谱、多偏振	多光谱、多偏振		
交点地方时	降轨 10:00	升轨 13:30	升轨 14:00	升轨 13:30	升轨 13:30	降轨 09:30	高分辨成像	光谱技术	多偏振	多偏振	多偏振		
重复周期/d	35	17	6	51	51	29	0.25;1	0.07	0.35	1.7	3.5		
传感器	SCIAMACHY	MERIS	TROPOMI	TROPOMI	GAS	MERSI-2	GMI	DPC	IPDA Lidar	DPC	POSP	Sentinel-5 (UVNS)	3MI
探测	两种分辨率	被动光栅	被动光栅	被动光栅	4通道	可见-热红外	空间外差	多光谱、多偏振	多光谱、多偏振	多光谱、多偏振	多光谱、多偏振	多光谱、多偏振	多光谱、多偏振
技术特点	近红外高光谱	高采样模式	高光谱成像	高光谱成像	高光谱成像	高分辨成像	光谱技术	多光谱、多偏振	差分吸收	多偏振	多偏振	多偏振	多偏振
幅宽/km	960	1150	2600	2600	1200	2900	865	1850	0.07	1700	1700	2715	2200
空间分辨率/km	30×60—120	0.26—0.39×0.29	7	7	10	0.25;1	10.3	3.3	0.35	1.7	3.5	7.5	2
光谱通道 ^{a)}	595—812 (0.48)	443 (10)	675-725&	270-300&	750-770	470 (50)	759-769	443 (20)	532	443 (20)	380p (20)	745-773 (0.4)	410p (20)
	971—1773 (1.48)	665 (10)	725-775 (0.5)	300-320 (0.5)	(0.04)	650 (50)	(0.035)	490p (20)	1064	490p (20)	410p (20)	1590-1675 (0.25)	443p (20)
			2305-2345&	320-405&	1560-1720	2130 (50)	1568-1583	565 (20)	1572	565 (20)	443p (20)	2305-2385 (0.25)	490p (20)
			2345-2385 (0.23)	405-500 (0.5)	(0.073)	12000 (1000)	(0.067)	670p (20)		670p (20)	490p (20)		555p (20)
					1920-2080		1642-1658	865p (40)		865p (40)	670p (20)		670p (20)
					(0.24)		(0.074)			865p (40)			865p (40)
					2200-2380		2043-2058			1380p (40)			1370p (40)
					(0.3)		(0.11)			1610p (60)			1640p (40)
										2250p (80)			2130p (40)
观测角度数	—	—	—	—	—	—	—	9-12	—	>15	—	—	14
探测参数	XCO ₂ 、XCH ₄	Ångström 波长指数	XCH ₄	紫外气溶胶指数、气溶胶层高度	XCO ₂ 、XCH ₄	双波段光学厚度	XCO ₂ 、XCH ₄	光学厚度、尺度谱分布、气溶胶类型	XCO ₂	光学厚度、尺度谱分布、气溶胶类型、气溶胶高度、PM _{2.5} 浓度等	XCH ₄	XCH ₄	光学厚度、尺度谱分布、气溶胶类型

注: a) 表示高光谱通道显示光谱范围(xx-xx), 括号内的数值为光谱分辨率; 多光谱通道显示中心波长, 括号内的数值为光谱宽度; p 表示偏振通道。

b) 表示主要差异: GF-5(02) 交点地方时为降轨 10:30, 其上探测气溶胶的传感器为 DPC-2 与 POSP 组成的偏振交叉(PCF), 与 DQ-1 相似。

c) 表示主要差异: DQ-2 探测气溶胶的传感器为 Lidar 和云与气溶胶成像仪。

(1) ENVISAT。欧洲空间局于2002年3月发射的ENVISAT卫星,是全球首个具备温室气体(CO_2 、 CH_4)和气溶胶综合监测能力的卫星。ENVISAT为近极地太阳同步轨道,轨道高度800 km,重访周期35 d。ENVISAT主要用于对陆地、海洋和大气进行连续观测,搭载了6个载荷,其中包括用于 CO_2 、 CH_4 等温室气体和 SO_2 、 NO_2 等痕量气体监测的大气制图扫描成像吸收光谱仪SCIAMACHY(Scanning Imaging Absorption spectroMeter for Atmospheric ChartographY)和可用于气溶胶探测的中等分辨率成像光谱仪MERIS(Medium Resolution Imaging Spectrometer)。

SCIAMACHY采用星下点或临边观测模式。星下点观测模式幅宽约960 km,像元空间分辨率为30 km(沿轨方向) \times 60—120 km(穿轨方向,不同波段存在差异)。SCIAMACHY继承于GOME/ERS-2传感器,设置了从紫外到短波红外光谱范围(240—2380 nm)的8个波段,其中用于温室气体探测的波段为channel 6(971—1773 nm),channel 7和channel 8由于受到探测器结冰的影响(Grundemann等,2005),不用于气体反演。SCIAMACHY温室气体反演采用WFM-DOAS算法,分别利用1558—1594 nm、1629—1671 nm的光谱信息,结合 O_2 -A吸收带(755—775 nm)观测,实现 XCO_2 和 XCH_4 的获取(Schneising等,2008,2009)。

MERIS采用2D阵列探测器对可见光—近红外范围的光谱波段(412—900 nm)进行探测,该范围内共15个波段,各波段带宽变化范围为3.75—20 nm。MERIS幅宽为1150 km,沿轨方向空间分辨率为0.26 km(星下点)变化至0.39 km(图景边缘),穿轨方向空间分辨率为0.29 km。MERIS支持全分辨率和降分辨率两种采样模式,后者对应的分辨率为1.2 km。MERIS具备在轨星上定标功能,周期性执行辐射定标和光谱定标,并更新定标系数。MERIS反演陆地气溶胶参数主要包括光学厚度和Ångström波长指数。在地气解耦方面,对于浓密植被地表采用一组浓密植被双向反射函数BRDF模型对地表反射进行估算(Santer等,2007);对于亮地表区域则利用地表光谱反射特性与抗大气植被指数ARVI的线性相关性估算地表。在气溶胶模型方面,采用荣格谱分布和固定的复折射指数描述。最终反演输出包括443 nm的AOD、443—665 nm的Ångström指数(de Leeuw等,2015)。

(2) Sentinel-5p。2017年10月发射的Sentinel-5p是欧洲哥白尼计划“哨兵”系列中第一颗用于大气环境监测的卫星,其科学目标为探测高时空分辨率的空气质量、臭氧、紫外辐射和气候监测与预报,从而填补SCIAMACHY和OMI等传感器结束观测任务之后的空白。Sentinel-5p采用太阳同步极地轨道,轨道高度为824 km,重访周期为17 d。Sentinel-5p的主要载荷为对流层监测仪TROPOMI(TROPOspheric Monitoring Instrument),由欧空局和荷兰KNMI、SRON等多个研究机构联合研发完成,承担Sentinel-5p的 CH_4 和气溶胶联合观测任务,以及 O_3 、 SO_2 、 NO_2 、CO、HCHO等痕量气体的探测和反演。

TROPOMI为被动光栅成像光谱仪,采用天底方向推扫的探测方式获取地表和大气的反射辐射,星下点空间分辨率为7 km,幅宽达到2600 km,可实现全球的每日覆盖。TROPOMI由4个光谱仪(各2个波段)构成,探测光谱分别为270—300 nm和300—320 nm(UV)、320—405 nm和405—500 nm(UVIS)、675—725 nm和725—775 nm(NIR)、2305—2345 nm和2345—2385 nm(SWIR),其中除SWIR光谱分辨率为0.23 nm外,其他波段分辨率均为0.5 nm。

TROPOMI采用物理方法反演大气 XCH_4 ,通过拟合NIR的 O_2 -A吸收通道和SWIR的2.3 μm 通道的高光谱观测,实现甲烷柱浓度 XCH_4 和其他状态向量参数(例如CO、 H_2O 和 O_2 柱浓度、气溶胶参数和地表反照率等参数)的反演(Hasekamp等,2019)。

TROPOMI的气溶胶产品包括紫外气溶胶指数UVAI(UV Aerosol Index)和气溶胶层高度ALH(Aerosol Layer Height)。UVAI计算的基本原理是根据瑞利散射随波长的变化特性(Zweers,2018),对于给定的一组紫外波段(例如340/380 nm或354/380 nm),利用TOA反射率观测值和假设仅存在瑞利散射的理论值进行求比计算,该比值用于指示大气中是否存在吸收性气溶胶(汤付颖等,2021)。ALH反演算法利用的是TROPOMI在 O_2 -A吸收带的光谱观测,在气溶胶单层均匀分布、层顶和层底压强差固定、气溶胶体消光系数和单次散射反照率均为常数等假设下,通过最优化拟合气溶胶层中部压强和气溶胶光学厚度,获得气溶胶层压强,并进一步利用温度廓线转换为气溶胶

层高度 (de Graaf等, 2019)。由于气溶胶 UVAI 随气溶胶层高度发生变化, 因此 ALH 信息也有助于理解气溶胶吸收特性。

(3) FY-3D。风云三号 D 星于 2017 年 11 月发射, 采用太阳同步轨道, 是中国低轨道下午气象观测的主业务卫星, 与风云三号 C 星形成组网探测能力。FY-3D 上搭载了 10 台遥感设备, 其中包括高光谱温室气体监测仪 GAS (Greenhouse-gases Absorption Spectrometer) 和用于气溶胶探测的中分辨率光谱成像仪 MERSI-2 (Medium Resolution Spectral Imager-2)。

GAS 是温室气体探测科学试验性光栅光谱仪, 设置了 4 个气体吸收探测通道, 分别为 750—770 nm (O_2)、1560—1720 nm (CO_2)、1920—2080 nm (CO_2) 和 2200—2380 nm (CH_4 、 CO 、 N_2O), 其中在 CO_2 吸收波段的光谱分辨率达到 0.073 nm。GAS 采用天底观测和耀斑观测两种模式, 空间分辨率 (足迹直径) 约为 10 km, 重访周期约 6 d。

MERSI-2 是 FY-3D 的主载荷之一, 是风云三号系列卫星的常规仪器, 在 MERSI-1/FY-3A 的基础上进行了大幅改进, 以实现的云、气溶胶、水汽、陆地表面特性、海洋水色等地球参量的探测。MERSI-2 设置了可见光至短波红外波段的 19 个光谱通道 (412—2130 nm) 和中长波红外波段的 6 个通道 (3.80—12.0 μm)。MERSI-2 不同波段的分辨率分别为 250 m 和 1000 m, 幅宽 2900 km, 可见光至短波红外波段约每天覆盖一次全球, 中红外至热红外波段约每天覆盖两次。MERSI-2 主要利用可见光至近红外波段观测进行气溶胶反演。陈辉等 (2020) 提出了一种结合暗目标算法 (DT) 和简化气溶胶算法 SARA (Bilal 等, 2014) 的方法, 测试了 MERSI-2 的气溶胶反演能力, 发现 470 nm 的 AOD 与地基观测一致性较高。

(4) GF-5/GF-5 (02)。高分五号卫星于 2018 年 5 月发射, 搭载了 6 台先进载荷, 主要用于地球大气、陆地和海洋环境的监测与评估, 是中国高分卫星系列中的环境监测旗舰卫星。大气主要温室气体探测仪 GMI (Greenhouse gas Monitoring Instrument) 用于探测 CO_2 和 CH_4 柱浓度, 多角度偏振成像仪 DPC (Directional Polarimetric Camera) 用于气溶胶和云特性的探测。GF-5 为太阳同步轨道卫星, 轨道高度约 705 km, 升交点地方时 13:30。

GMI 采用空间外差光谱技术 (SHS) 定量探测

陆地与海洋上空温室气体 (吴时超等, 2021), 设置有 4 个气体吸收光谱通道, 分别是 759—769 nm (O_2 -A 带)、1568—1583 nm (CO_2 弱吸收)、1642—1658 nm (CH_4 吸收) 和 2043—2058 nm (CO_2 强吸收), 光谱分辨率为 0.6 cm^{-1} 和 0.27 cm^{-1} 。GMI 具有天底 (陆地区域) 和耀斑 (海洋区域) 两种在轨观测模式, 星下点足迹直径为 10.3 km, 在默认的穿轨方向 5 点采样模式下, 形成约 750 km 的幅宽, 沿轨方向的采样间隔约为 102 km。GMI 的 CO_2 和 CH_4 反演采用的是最优估计物理方法 (Shi 等, 2021), 利用辐射传输模型模拟各气体吸收通道的光谱, 结合观测光谱进行优化迭代求解 (叶函函等, 2021), 实现包括 CO_2 、 CH_4 柱浓度信息的大气状态参量反演。

DPC 是中国首个具有多波段 (覆盖可见光至近红外)、多角度 (9—12 个角度成像)、偏振 (探测 3 个偏振分量) 的星载宽视场成像仪 (幅宽 1850 km), 星下点空间分辨率为 3.3 km, 比法国同类载荷 POLDER-3/PARASOL 高 1 倍 (Li 等, 2018a)。DPC 共 8 个波段, 覆盖可见光—近红外范围, 能够探测气溶胶、云、水汽等大气成分和陆地、海洋环境信息。其中 490 nm、670 nm、865 nm 为偏振通道, 偏振方向为 0° 、 60° 、 120° 。DPC 采用先进的多角度加偏振的探测模式, 与传统卫星观测相比, 偏振信号对气溶胶粒子的形状和尺寸较敏感, 多角度信息则能有效改善方向性观测和数据等效信噪比, 提高气溶胶反演能力 (谢一淞等, 2019)。DPC 反演气溶胶产品包括多波段气溶胶光学厚度、细粒子气溶胶光学厚度 FAOD (Fine-mode Aerosol Optical Depth) 等。Ge 等 (2020) 提出了一种基于地表偏振反射率光谱不变性的 FAOD 反演算法 (SNOSPR), 实现 FAOD 和地表偏振反射率的同时反演。葛邦宇 (2020)、黄红莲等 (2020) 分别发展了 DPC 陆地上空气溶胶光学厚度的查找表类反演算法, 并与地面观测验证数据进行了对比。

2021 年 9 月发射的 GF-5 (02) 上搭载了改进的温室气体探测仪 GMI-2, 其 CO_2 主探测通道的信噪比、辅助探测通道的光谱带宽等关键指标得到进一步的提升。气溶胶探测载荷升级为 DPC-2 与高精度偏振扫描仪 POSP (Particulate Observing Scanning Polarimeter) 共同组成的“偏振交火” PCF (Polarimetry Cross-Fire) 传感器组合。DPC-2

与前一代载荷相比在观测角度数等方面有进一步提升。新研制的POSP传感器采用穿轨扫描方式成像,与DPC-2以PCF方式进行联合观测。POSP近紫外至短波红外的380—2250 nm的9个波段全部为偏振波段,偏振方向为 0° 、 90° 、 45° 、 135° 。POSP设计了星上定标器,具备在轨偏振定标、太阳漫反射板辐射定标等功能,可获取更高精度的偏振及辐射探测数据,还能通过PCF对DPC-2实现精度传递,改善前一代DPC缺乏星上定标的问题。另一方面,POSP具有近紫外波段的偏振探测能力,对气溶胶层高、气溶胶吸收等信息较为敏感(Qie等,2015),加上DPC-2的气溶胶、细粒子气溶胶光学参数反演能力,利用大气细颗粒物遥感估算PMRS模型(Zhang和Li,2015),PCF可为基于物理途径实现大气细颗粒物PM_{2.5}近地面浓度的卫星遥感估算提供所需的多维度气溶胶参数。

(5) DQ-1/DQ-2。大气一号(DQ-1)是国家空间基础设施中全球首颗搭载主动激光雷达二氧化碳探测传感器的大气环境监测卫星,于2022年4月16日发射。DQ-1上搭载的用于CO₂和气溶胶监测的传感器包括路径积分差分吸收激光雷达(IPDA Lidar)、多角度偏振成像仪(DPC)、高精度偏振扫描仪(POSP),DPC和POSP组成PCF,用于获取空间覆盖的污染颗粒物分布。DQ-1为太阳同步极轨卫星,轨道高度约705 km,轨道重复周期约51 d。DQ-1及后续DQ-2等系列卫星的主要探测目标是动态监测大气环境污染情况,包括PM_{2.5}、NO₂、SO₂、O₃等,同时获取CO₂高精度浓度分布,为全球气候变化研究提供科学支撑。

相比被动探测,星载激光雷达主动探测具有不依赖于光照条件(全天时)、高空间分辨率、出色的垂直探测能力、受气溶胶和云散射影响较小等优势,通过沿轨进行大气垂直探测,实现精细尺度、高精度的温室气体分布信息获取,为碳源汇(特别是人为源)、温室气体通量、全球碳循环研究提供关键数据。有研究表明,激光雷达探测XCO₂的精度可优于1 ppm(Abshire等,2018),XCH₄的精度可优于3.7 ppb(Ehret等,2017)。虽然激光雷达探测足迹较小(IPDA Lidar为0.07 km),不同轨道间可能有较大空隙,但太阳同步极地轨道卫星每天运行14—15圈,结合激光雷达优秀的夜间观测能力,可实现包括高纬地区的全球有效

覆盖。

IPDA Lidar设置了1572 nm的CO₂弱吸收通道,采用双脉冲差分吸收机制探测CO₂柱浓度,其主要原理是利用CO₂中心吸收线(on-line:1572.024 nm)和吸收翼参考线(off-line:1572.085 nm,CO₂分子对该波长激光的吸收截面较小)上反射的激光信号差异(反映大气透过率的变化),估算差分大气光学厚度;当CO₂吸收线和参考线足够接近时,可认为其他大气物质影响很小,大气透过率的变化主要由CO₂含量决定,即可根据差分吸收原理获得CO₂柱浓度(Han等,2018)。此外,借鉴星载激光雷达传感器CALIOP/CALIPSO的波段配置,IPDA Lidar上还设置了532和1064 nm的气溶胶和云探测通道,其中532 nm为高光谱偏振通道,具备气溶胶和云的垂直剖面探测能力。

(6) MetOp-SG-A。MetOp-SG是欧洲新一代极轨气象卫星,由一对地球低轨卫星(MetOp-SG-A星和B星)组成,共规划3代。MetOp-SG-A星搭载了6台科学观测仪器,其中,“哨兵”5号(Sentinel-5)传感器(又称UVNS)可定量探测温室气体和污染气体分布,多角度多波段多偏振成像仪3MI(Multi-Viewing Multi-Channel Multi-Polarisation Imaging)用于获取气溶胶和云的信息。Sentinel-5同时也是欧空局哥白尼项目(Copernicus)地球观测计划的名称,其主要任务目标是开展具有高时空分辨率、全球每日覆盖的大气测量,包括空气质量、气候强迫、臭氧和紫外线辐射。MetOp-SG轨道高度约817 km,降轨过境时间为当地时上午09:30,轨道重复周期约为29 d。

UVNS配置了7个波段,包括2个紫外波段(270—300 nm和300—370 nm)、1个可见光波段(370—500 nm)、2个近红外波段(685—710 nm、745—773 nm)和2个短波红外波段(1590—1675 nm、2305—2385 nm)。各波段的气体吸收线光谱可用于反演获得温室气体CH₄和痕量气体O₃、NO₂、CO等。Sentinel-5采用太阳同步轨道的天底推扫模式进行观测,穿轨方向视场角108°,对应地面约2700 km的幅宽,基本可实现每日对全球表面的覆盖。空间分辨率方面,紫外波段的分辨率为50 km,其他波段的分辨率为7.5 km。

3MI是一种被动光学成像仪,能够测量不同观测几何下从可见到短波红外波段所反射的偏振辐射,进而获取高质量的气溶胶参数,为气候监测、

大气化学和数值天气预报应用提供高精度数据。3MI 继承于法国 POLDER-3/PARASOL 传感器(2004年—2013年), 具有更高的空间分辨率(4 km)、更大的幅宽(2200 km)和更多的偏振探测波段(9个)。3MI 配置了从410—2130 nm的12个观测波段, 各波段FWHM为10—40 nm, 其中除763 nm、765 nm、910 nm的3个波段外, 均为偏振波段(偏振方向为 -60° 、 0° 、 60°)。3MI沿轨方向飞行时快速成像, 通过滤光片轮和偏振片轮耦合获取目标像元14个观测角度的辐射和偏振反射信息, 实现多角度探测。3MI气溶胶反演采用法国里尔大学为近实时(NRT)反演开发的增强型气溶胶反演算法(Dubovik等, 2018), 该算法基于GRASP算法框架, 主要包括前向模拟和数值反演两大部分, 通过多源数据统计优化和多像元约束策略实现复折射指数、尺度谱分布等参数的同时反演。

根据上述介绍可以看出, 大气综合探测卫星基本具备温室气体、气溶胶和部分痕量气体的探测能力。其中, 温室气体传感器主要利用 CO_2 、 CH_4 的近红外吸收通道结合 $\text{O}_2\text{-A}$ 吸收通道观测, 采用物理方法或WFM-DOAS方法进行柱浓度定量反演; 其探测方式由被动遥感向结合激光雷达的主被动联合观测发展, 能够实现更高精度的温室气体探测。在气溶胶传感器方面, 则是由多光谱探测(MERIS、MERSI-2等)向较先进的多角度、多光谱、强度加偏振探测(DPC、3MI等)以及更全面的“偏振交火”探测(PCF)等方式转化; 同时, 可反演参数也在气溶胶光学厚度基础上逐步增加了细粒子光学厚度(或细粒子比例)、复折射指数、气溶胶高度等参数。可见, 观测手段多元化是大气综合探测卫星的重要发展趋势, 并且随着观测技术的丰富, 不断发展的卫星遥感反演算法能够提供更高精度、更多维度的温室气体和气溶胶特性数据。

3.2 温室气体监测卫星

温室气体监测卫星的主要探测目标是 CO_2 、 CH_4 等, 并通过同平台观测提供 CO_2 和 CH_4 反演所需的气溶胶和云信息, 进行散射效应校正。除了OCO-2、OCO-3通过 $\text{O}_2\text{-A}$ 波段观测光谱提取云和气溶胶信息(Eldering等, 2017)外, 大多温室气体卫星额外搭载了云和气溶胶同步观测传感器。表2列出了主要的温室气体监测卫星和传感器参数。

(1) GOSAT/GOSAT-2。GOSAT是日本宇宙航空开发机构(JAXA)研制的全球温室气体探测高光谱卫星, 于2009年1月成功发射。GOSAT卫星上搭载了用于 CO_2 、 CH_4 探测的傅里叶变换光谱仪TANSO-FTS(Fourier Transform Spectrometers)和同步获取视场内气溶胶和云信息的云与气溶胶成像仪TANSO-CAI(Cloud and Aerosol Imager)。

TANSO-FTS在近红外波段设置有3个通道, 分别是1563—1724 nm的 CO_2 、 CH_4 吸收通道(主要用于反演温室气体柱浓度)、1923—2083 nm的 CO_2 和 CH_4 吸收通道(辅助温室气体探测以及判断是否存在云和高层气溶胶)、758—775 nm的 $\text{O}_2\text{-A}$ 吸收通道(用于精确获取地表气压参数)。另外5.56—14.3 μm 的热红外波段用于反演大气 CO_2 和 CH_4 廓线。TANSO-CAI传感器在近紫外到短波红外的波段范围设置4个探测通道, 主要用途包括两方面: 一是判断FTS观测视场内是否存在云或高层气溶胶, 从而对FTS有效光谱数据进行筛选; 二是利用辐射观测数据对无云像元进行气溶胶光学特性的探测, 并进一步用于 XCO_2 和 XCH_4 的反演过程中。

在TANSO-FTS温室气体反演正向模型建立过程中, 需要输入的气溶胶数据包括每个FTS观测对应的气溶胶类型和尺度谱分布, 用于计算气溶胶散射特性(光学厚度、单次散射反照率、散射相函数)。气溶胶模型由粗模态和细模态构成, 每层平均的气溶胶散射特性由两个模态各自的散射特性加权求和获得。另外, 除了CAI观测, GOSAT也采用气溶胶传输模型(SPRINTARS)数据对无CAI观测的区域(例如海表太阳耀斑区)进行气溶胶散射计算(Yoshida等, 2017)。

2018年10月发射的第二代卫星GOSAT-2, 与GOSAT载荷配置相似, 所搭载的TANSO-FTS-2和TANSO-CAI-2均是前一代传感器的改进版。FTS-2在FTS光谱设置的基础上增加了 CO 的2.3 μm 弱吸收通道, 视场更大(穿轨方向达到 $\pm 40^\circ$, 超过FTS的 $\pm 20^\circ$), 具有更高的信噪比, 并且增加了全编程可控的指向系统以扩展观测控制功能(Suto等, 2021)。CAI-2的前、后向观测形成紫外到短波红外7个波段, 覆盖常见的云与气溶胶探测通道, 同时CAI-2的SWIR波段空间分辨率提升至920 m, 比CAI的云和气溶胶观测能力有所提升。

表2 主要温室气体监测卫星
Table 2 Greenhouse gas monitoring satellites

参数	卫星							
	GOSAT(GOSAT-2 ^b)		OCO-2(OCO-3 ^c)		TanSat		CO2M ^d	
发射时间	2009-01		2014-07		2016-12		拟2025-2026	
轨道类型	太阳同步极轨		太阳同步极轨		太阳同步极轨		太阳同步极轨	
轨道高度/km	666		705		708		602	
交点地方时	降轨 13:00		升轨 13:30		升轨 13:30		降轨 11:30	
重复周期/d	3		16		16		11	
传感器	GHG 观测	气溶胶观测	GHG 观测	气溶胶观测	GHG 观测	气溶胶观测	GHG 观测	气溶胶观测
	TANSO-FTS	TANSO-CAI	三波段 光栅光谱仪	三波段光栅 光谱仪	ACGS	CAPI	近红外—短波 红外光谱仪	MAP
探测技术 特点	迈克尔逊 干涉分光	UV-SWIR 扫描成像	高分辨率 光栅分光	高分辨率 光栅分光	CO2 双通道 高光谱分辨率	多光谱、 偏振	CO2 与排放伴随 气体联合探测	多角度、偏振、 多光谱观测
幅宽/km	790	750 (SWIR) 1000 (其他)	10.6	10.6	18	400	>250	—
空间 分辨率/km	10.5	1.5 (SWIR) 0.5 (其他)	1.29×2.25	1.29×2.25	2	1	SR _{alt} ×SR _{act} <4 km ² 0.5≤Asp.Rat≤2.0	SR _{alt} ×SR _{act} < 16 km ²
光谱 通道 ^a /nm	758—775 (0.03)		758—772 (0.042)		758—778 (0.04)		747—773 (0.12)	
	1563—1724 (0.07)		1594—1619 (0.076)		1594—1624 (0.13)		380 (43) 670p (50)	
	1923—2083 (0.11)		2042—2082 (0.097)		2042—2082 (0.16)		1590—1675 (0.3)	
	5556—14286 (2.14)						870 (30) 1375 (30)	
							1990—2095 (0.35)	
							1640p (20) 753 (9) 865p (40)	
观测 角度数	—		—		—		—	
探测参数	XCO ₂ 、XCH ₄	云污染 气溶胶光学厚 度	XCO ₂	气溶胶散射	XCO ₂	云污染 气溶胶光学 厚度	XCO ₂	气溶胶光学厚 度、气溶胶散 射、云污染

注：a 表示高光谱通道显示光谱范围(xx-xx)，括号内的数值为光谱分辨率；多光谱通道显示中心波长，括号内的数值为光谱宽度；p 表示偏振通道。

b 表示主要差异：GOSAT-2 的 FTS-2 增加了 CO 的 2.3 μm 弱吸收通道；CAI-2 观测拓展到紫外至短波红外的 7 个波段。

c 表示主要差异：OCO-3 安置在国际空间站上，采用 ISS 轨道（高度 400 km），空间分辨率为 1.6 km×2.2 km，幅宽 13 km，同时增加双轴指向镜模块，可进行“快照区域地图”模式观测，实现中纬度地区加密观测，重访周期变为 1 d。

d 表示 CO2M 参数为设计指标。

(2) OCO-2/OCO-3。2014 年 7 月美国 NASA 发射的轨道碳观测卫星 OCO-2 (Orbiting Carbon Observatory-2) 聚焦于碳排放、碳循环的高精度测量，提高对人为排放温室气体的定量监测能力。OCO-2 观测模式主要包括天底模式 (nadir mode)、耀斑模式 (sun-glint mode) 和目标模式 (target mode)。天底模式在陆地区域具有高分辨率特点，在部分云覆盖区域、复杂地形区域能获得有效数

据，而耀斑模式在海洋区域具有较高的信噪比，这两种观测模式以 16 d 为周期进行切换。目标模式下，OCO-2 通过沿轨方向小角度 (±0.23°) 的调整，实现对地面目标周边矩形范围的高密度探测，一般用于地面定标或验证，或提高特定目标（例如大型城市）的空间覆盖度 (Crisp 等, 2021)。

OCO-2 主载荷仅有一个，由 3 台高分辨率光栅光谱仪构成，探测波段分别为 O₂-A 吸收通道

(758—772 nm)、CO₂弱吸收通道(1594—1619 nm)和CO₂强吸收通道(2042—2082 nm),光谱分辨率最高达到0.04 nm。其中, O₂-A波段观测光谱的主要用途是将CO₂分子数柱浓度转变为XCO₂。OCO-2上未搭载用于气溶胶和云探测的专用传感器,而是采用O₂-A波段的观测去除受厚云和高浓度气溶胶影响的数据(Taylor等, 2016),并估算薄云和气溶胶散射引起的大气光学厚度路径变化。OCO-2的XCO₂反演算法为全物理算法(O'Dell等, 2018),其前向模型中气溶胶和云参数处理采用提前计算好的5类散射体(包括水云、冰云、对流层2类气溶胶和平流层硫酸盐气溶胶)的单个散射光学特性进行处理(Crisp等, 2021)。

OCO-3于2019年4月发射,安装在国际空间站(ISS)上,在低倾角(51°)轨道上从早晨到傍晚(太阳光照时段)收集全球CO₂观测数据。与OCO-2的观测模式相比,OCO-3增加了一种“快照区域地图”观测模式(SAMs),与目标模式类似,但具有二维扫描能力,能够实现观测目标区域100 km×100 km范围的探测(Eldering等, 2019)。

(3) TanSat。2016年12月成功发射的中国碳卫星(TanSat)是中国第一颗用于监测全球大气CO₂含量的科学实验卫星,也是继日本GOSAT卫星和美国OCO-2卫星后世界上第三颗专用的温室气体探测卫星。TanSat以大气二氧化碳光栅光谱仪ACGS(Atmospheric Carbon dioxide Grating Spectrometer)和云与气溶胶偏振成像仪CAPI(Cloud and Aerosol Polarimetry Imager)为主要载荷。

ACGS在轨观测模式主要有天底、耀斑和目标3种模式。天底模式是对陆地区域观测最常用的模式,仪器沿卫星轨道运行时记录数据;由于海洋表面反射率较低,在海洋上空TanSat卫星跟踪太阳耀光区域,采用耀斑模式进行探测;目标模式是对地面静止目标进行观测,主要目的是支持地面测量验证,也可以获取和记录地面目标像元的多角度观测。ACGS设置有3个光谱通道,分别是CO₂弱吸收带通道(1594—1624 nm)、CO₂强吸收带通道(2042—2082 nm)和O₂-A吸收带通道(758—778 nm),光谱分辨率最高可达0.04 nm。TanSat上搭载的CAPI设置有可见光至近红外范围(380—1640 nm)5个通道,用于进行云检测和气溶胶光学参数反演。其中,670和1640 nm两个通

道设置有0°、60°、120°共3个方向的偏振观测,可以更好的探测气溶胶粒径信息,从而实现对气溶胶光学参数波长依赖特性的约束。此外,1375 nm通道观测还可用来改进卷云的筛选、沙尘气溶胶特性的研究。

相关学者开展了CAPI气溶胶反演算法测试研究(Shi等, 2014; Chen等, 2017),但尚未发布数据产品。在实际处理中,一些研究选择利用模型数据估算气溶胶散射。例如, Yang等(2020)采用哥白尼大气监测服务CAMS(Copernicus Atmosphere Monitoring Service)模型随场景变化的动态设置进行气溶胶散射的估算。

(4) CO2M。大气二氧化碳监测系统CO2M(CO₂ Monitoring)是欧洲哥白尼扩展任务计划之一,其目标是发射多颗搭载近红外—短波红外CO₂探测光谱仪的卫星组成星座(Kuhlmann等, 2019),用于探测人为活动产生的CO₂,降低国家和区域尺度人为排放二氧化碳的不确定性。CO2M较明确的提出以人为CO₂排放为主要监测目标,相关技术方法、数据成果对于评估碳减排政策有效性,追踪国家减排目标有重要作用。CO2M重点关注欧洲国家和地区碳排放情况,计划于2025年—2026年发射。

根据CO₂人为排放监测需求,欧洲空间局地球与任务科学部给出了CO2M的设计指标(Meijer等, 2020):(1) CO₂光谱仪波段包括近红外弱吸收通道(1590—1675 nm)、短波红外强吸收通道(1990—2095 nm)和近红外O₂-A吸收通道(747—773 nm),光谱分辨率达到0.12—0.35 nm。(2) CO₂光谱仪的空间分辨率为4 km²,空间覆盖能力达到7 d内可有效覆盖陆地区域(纬度±40°)。(3) XCO₂反演精度需优于0.7 ppm(系统误差小于0.5 ppm)。此外,针对大型排放源和典型CO₂羽流特征,也对幅宽、采样频率、长期观测稳定性等指标需求进行了估算和设计。同时,为提高CO₂人为排放源识别和定量监测能力,CO2M也同步获取NO₂或CO浓度分布,作为人为排放CO₂羽流(例如电厂、城市排放)的示踪气体,辅助识别人为源CO₂。

CO2M任务需求报告同时指出,实现CO₂高精度探测,需要基于同平台、高精度、多参数的气溶胶观测能力支持。CO2M卫星计划同平台搭载多角度偏振仪MAP(Multi-Angle Polarimeter),用于获得同步气溶胶和薄云观测,使得在高气溶胶负

载、大角度观测条件下仍能获得满足精度要求的 XCO_2 。MAP的设计指标如下:(1)可见—近红外范围的6个偏振波段(410、443、490、555、670、865 nm)和1个非偏波段(753 nm);(2)空间分辨率优于 16 km^2 ; (3)沿轨方向多角度观测数超过40。MAP可获取的气溶胶特性参数包括光学厚度、光谱变化特征、尺度谱分布、复折射指数、气溶胶层高(或廓线)(Dubovik等, 2019), 这些观测/参数可以提供较准确的气溶胶含量和模型信息, 改善光学路径散射计算和 XCO_2 反演精度。

4 卫星反演验证和质控观测网

基于地基平台的整层大气温室气体和气溶胶被动遥感观测具有高精度和高信噪比的特点, 能够有效避免复杂地表对反演参数的影响, 获得高精度的温室气体柱含量和气溶胶光学—微物理特性参数, 为卫星产品提供良好的真实性检验数据。本节主要介绍用于卫星反演验证和质控的温室气体和气溶胶地基观测网络。

4.1 全球总碳柱观测网

2004年由美国加州理工大学主持建立的全球总碳柱观测网TCCON(The Total Carbon Column Observing Network)最初获取地基高精度 CO_2 柱总量数据, 之后逐步扩展了 CH_4 、 CO 、 N_2O 、 H_2O 、 HF 、 HDO 等其他气体的观测能力, 目前已经成为GOSAT、OCO-2等卫星 CO_2 、 CH_4 柱浓度产品的标准验证地基观测网络(Liang等, 2017)。TCCON也是全球大气监测网络GAW(Global Atmosphere Watch)的贡献网络, 为气候变化研究提供了高精度、长期稳定的观测数据。TCCON制定了非常严格的建站规则, 目前在全球范围仅有28个站点运行, 另有一部分正在筹建或已失效。

TCCON采用高分辨率傅里叶变换光谱仪(FTS)作为标准观测仪器(Bruker 125HR型), 通过直接测量近红外波段太阳辐射光谱中 CO_2 、 CH_4 等温室气体的吸收线, 实现气体柱总量的获取(张兴赢等, 2018)。为确保数据质量和标准的一致性, TCCON各站点观测数据采用同一版本软件进行处理和反演(GGG2014, Wunch等, 2015): 首先将原始干涉图像转换为光谱数据; 其次利用NCEP/NCAR再分析资料获取气压、温度、位势高度、水汽先验廓线, 并进一步基于经验模型获取

其他痕量气体廓线; 之后通过非线性最小二乘光谱拟合实现正向模拟光谱和观测光谱的最优匹配, 获得气体的柱平均干空气摩尔分数; 最后通过地表压力的水汽影响订正、大气质量订正和WMO原位廓线测量订正, 得到气体柱含量的地基观测结果。

4.2 全球气溶胶自动观测网

(1) AERONET。AERONET(Aerosol Robotic Network)是美国NASA联合多家研究机构自1993年起建立的全球气溶胶自动观测网(Holben等, 1998), 提供长期、连续、稳定、高质量的观测数据, 服务于气溶胶光学—微物理—辐射特性观测、卫星算法和产品验证、模式协同等多个领域。目前AERONET在全球分布站点600多个, 其中观测时长大于5 a的长期站点超过300个。

AERONET站点统一采用法国CIMEL公司生产的太阳—天空辐射计(CE318)作为标准观测仪器。CE318标准型在紫外到近红外的光谱范围内共有8个光谱通道, 分别是340、380、440、500、675、870、936和1020 nm, 扩展型加入了近红外通道1640 nm。CE318主要有两种观测模式: 太阳直射辐射观测用来计算达到地表的太阳辐射强度、整层大气透过率、气溶胶光学厚度和水汽柱总量等信息; 天空散射辐射用来反演获得气溶胶复折射指数、尺度谱分布、单次散射反照率和散射相函数等参数。自2015年起, AERONET逐步布设CE318-T型仪器(太阳—天空—月亮3种模式), 开展昼夜连续的气溶胶光学厚度观测(临时性产品)。

AERONET采用标准化的地基气溶胶观测数据处理流程和反演算法, 最新的算法和产品版本是Version 3.0(Giles等, 2019; Sinyuk等, 2020)。所有站点的数据产品经过严格的质控, 分为Level 1.0(未质控)、Level 1.5(云屏蔽和数据质控)、Level 2.0(质量保证)3个级别, 其中Level 2.0级的光学—微物理—辐射参数可用于气溶胶特性分析、卫星产品验证和数据协同等应用。

(2) CARSNET。为提高中国北方地区沙尘气溶胶监测能力, 中国气象局于2002年起主导建设了气溶胶地基观测网络CARSNET(China Aerosol Remote Sensing Network)。CARSNET最初包含20个站点, 主要分布于中国北方和西北地区, 之后,

站点分布逐步在全国范围得到扩展。

CARSNET采用与AERONET一致的太阳一天空辐射计进行观测,应用于气溶胶特性观测、卫星验证和模式研究等(Che等,2015)。CARSNET将经过AERONET朗利法定标的主仪器(master sunphotometer)作为参考,对其他仪器进行直射通道的对比定标,并将经过定标后的观测数据进行处理,获取AOD和Ångström波长指数等数据。

(3) SONET。2010年起,中国科学院组织建立中国太阳一天空辐射计观测网络SONET(Sun-sky radiometer Observation Network, [http://www.sonet.ac.cn/\[2021-06-08\]](http://www.sonet.ac.cn/[2021-06-08])),用于获取整层大气气溶胶的综合特性参数,为中国气溶胶本地化建模、卫星遥感产品真实性检验、气候变化研究和环境影响分析等领域提供基础数据(李正强等,2015)。SONET在中国的城市、乡村、山地、海洋、荒漠、盆地、高原等多种典型地区布设了20个观测站点,大部分持续观测超过7 a。

与AERONET、CARSNET相比,SONET所有站点均采用偏振型太阳一天空辐射计(CE318-DP)进行气溶胶地基观测。观测数据采用近实时的定标、反演、质控、发布流程进行标准化处理,质控标准和产品精度与AERONET保持一致(Li等,2018b)。基于偏振观测,SONET进一步扩展了线偏振度参数反演方案,并且形成包括光学、微物理、成分和辐射4大类共20余种参数的气溶胶产品。

CO₂太阳辐射计(CO₂ Sunphotometer)是法国CIMEL公司研制的地基CO₂自动观测仪器(原型系统),安置在SONET北京站点,自2010年开始观测。基于差分吸收原理,CO₂太阳辐射计通过楔形滤光片实现1.57 μm弱吸收通道附近14个波段的连续观测,利用吸收波段和参考波段观测的太阳辐射差异,获得CO₂吸收光学厚度(Xie等,2015)。相比FTS设备,辐射计具有的稳定性、便携性、抗干扰等特点,使其可较好的用于野外长期观测。

5 结 语

本文主要对21世纪以来欧洲、日本、中国、美国发射的具备大气温室气体和气溶胶协同监测能力的十余颗卫星进行了回顾和介绍,包括卫星平台、传感器、处理算法和验证网络。根据卫星

主要监测任务和传感器用途,温室气体和气溶胶协同监测卫星主要可分为两大类。

第1类是具备温室气体和气溶胶综合探测能力的多用途大气环境卫星,包括欧洲的ENVISAT、Sentinel-5P、MetOp-SG-A卫星和中国的FY-3D、GF-5/GF-5(02)、DQ-1/DQ-2等卫星。从其探测特点和发展历程可以看出,观测手段多样化(例如,温室气体的主被动探测、气溶胶的多角度多波段偏振探测)及配套卫星定量反演算法的发展,是大气综合探测卫星发展的重要趋势,也是获得更高精度、更多维度的温室气体和气溶胶参数的关键途径。

第2类是温室气体监测卫星,主要包括日本的GOSAT/GOSAT-2、美国的OCO-2/OCO-3、中国的TanSat、欧洲的CO2M等卫星。相关研究指出,气溶胶和云散射是温室气体卫星反演最大的误差来源之一(Wunch等,2017),因此在提高温室气体传感器探测精度和分辨率的同时,也需要注重气溶胶和云探测能力的同步提升。例如,欧洲新一代大气二氧化碳监测卫星CO2M明确了实现CO₂高精度(优于0.7 ppm)探测需具备的气溶胶探测能力。

面向碳中和行动评估、大气环境综合治理等国家重大需求,迫切需要发展温室气体和气溶胶卫星协同监测能力:

(1) 温室气体和气溶胶协同监测是提高大气环境综合观测能力的有效途径,也是实现人为排放源识别和定量监测的大气环境卫星的重要发展方向。大型工业生产和燃烧排放的气溶胶和CO₂(以及NO_x等其他示踪物)具有同源性特点,排放源环境和气象条件相近,因此排放强度和浓度扩散随时空变化具有一定的相似性,可利用高分辨率的温室气体和气溶胶协同监测卫星更高效的实现大型源的识别、追踪和定量化监测。由于大气变化较快,不同卫星的像元匹配难度大、精确度低,导致有效匹配数据量小,而同平台卫星能够有效克服上述问题,实现排放源的精细、准确探测。

(2) 利用卫星获取空间连续的CO₂、CH₄浓度信息,结合气象观测资料,通过大气化学传输模式和全球/区域碳同化系统,区分和估算人为源、自然源碳通量,实现“自上而下”的碳源汇时空变化动态监测(Jiang等,2021),是碳中和路径评

估的重要手段。其中, 温室气体卫星产品的精度是整个链路的基础, 但严重受限于气溶胶和薄云散射等影响因素。多维度气溶胶观测(多角度、多波段、偏振)获得高精度的光学厚度和其他光学-微物理参数, 可为同平台的温室气体反演提供基于实测的气溶胶模型参数(散射特性、粒径分布等), 而非传统上使用模式数据的气候学统计结果, 从而实现大气温室气体和气溶胶的高精度联合反演。

(3) 极轨卫星每天最多过境1—2次, 由于幅宽有限、云污染影响以及卫星产品的严格质控, 单独一颗卫星无法获得覆盖全球海陆区域的大气温室气体和气溶胶监测数据。主、被动卫星组网是满足业务化监测需求的关键途径。本文介绍的十余颗卫星以及各国未来发射的协同观测卫星, 根据轨道特点、覆盖通道、探测技术等方面的异同, 可在观测、数据、产品及应用等不同层面组建如图1所示的“温室气体和气溶胶协同观测星座”, 有效填补空间、时间尺度上的数据空白, 形成包含完整历史观测资料的温室气体和气溶胶全球时空连续数据集, 为气候变化准确评估、大气环境动态监测等科学目标的实现提供坚实基础。

参考文献(References)

- Abshire J B, Ramanathan A K, Riris H, Allan G R, Sun X L, Hasselbrack W E, Mao J P, Wu S, Chen J, Numata K, Kawa S R, Yang M Y M and DiGangi J. 2018. Airborne measurements of CO₂ column concentrations made with a pulsed IPDA lidar using a multiple-wavelength-locked laser and HgCdTe APD detector. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(4): 2001-2025 [DOI: 10.5194/amt-11-2001-2018]
- Bertaux J L, Hauchecorne A, Lefèvre F, Bréon F M, Blanot L, Jouglot D, Lafrique P and Akaev P. 2020. The use of the 1.27 μm O₂ absorption band for greenhouse gas monitoring from space and application to MicroCarb. *Atmospheric Measurement Techniques*, 13(6): 3329-3374 [DOI: 10.5194/amt-13-3329-2020]
- Bilal M, Nichol J E and Chan P W. 2014. Validation and accuracy assessment of a Simplified Aerosol Retrieval Algorithm (SARA) over Beijing under low and high aerosol loadings and dust storms. *Remote Sensing of Environment*, 153: 50-60 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.07.015]
- Buchwitz M, de Beek R, Burrows J P, Bovensmann H, Warneke T, Notholt J, Meirink J F, Goede A P H, Bergamaschi P, Körner S, Heimann M and Schulz A. 2005. Atmospheric methane and carbon dioxide from SCIAMACHY satellite data: initial comparison with chemistry and transport models. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 5(4): 941-962 [DOI: 10.5194/acp-5-941-2005]
- Buchwitz M, Rozanov V V and Burrows J P. 2000. A near-infrared optimized DOAS method for the fast global retrieval of atmospheric CH₄, CO, CO₂, H₂O, and N₂O total column amounts from SCIAMACHY Envisat-1 nadir radiances. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 105(D12): 15231-15245 [DOI: 10.1029/2000JD900191]
- Chen H, Li Q, Wang Z T, Ma P F, Li Y and Zhao A M. 2020. Retrieval of aerosol optical depth using FY3D MERSI2 data. *Journal of Geo-Information Science*, 22(9): 1887-1896 (陈辉, 厉青, 王中挺, 马鹏飞, 李营, 赵爱梅. 2020. 一种基于FY3D/MERSI2的AOD遥感反演方法. *地球信息科学学报*, 22(9): 1887-1896) [DOI: 10.12082/dqxxkx.2020.190206]
- Che H, Zhang X Y, Xia X, Goloub P, Holben B, Zhao H, Wang Y, Zhang X C, Wang H, Blarel L, Damiri B, Zhang R, Deng X, Ma Y, Wang T, Geng F, Qi B, Zhu J, Yu J, Chen Q and Shi G. 2015. Ground-based aerosol climatology of China: aerosol optical depths from the China Aerosol Remote Sensing Network (CARS-NET) 2002-2013. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(13): 7619-7652 [DOI: 10.5194/acp-15-7619-2015]
- Chen X, Wang J, Liu Y, Xu X G, Cai Z N, Yang D X, Yan C X and Feng L. 2017. Angular dependence of aerosol information content in CAPI/TanSat observation over land: effect of polarization and synergy with A-train satellites. *Remote Sensing of Environment*, 196: 163-177 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.05.007]
- Choi M, Kim J, Lee J, Kim M, Park Y J, Holben B, Eck T F, Li Z Q and Song C H. 2018. GOCI Yonsei aerosol retrieval version 2 products: an improved algorithm and error analysis with uncertainty estimation from 5-year validation over East Asia. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(1): 385-408 [DOI: 10.5194/amt-11-385-2018]
- Choi M, Lim H, Kim J, Lee S, Eck T F, Holben B N, Garay M J, Hyer E J, Saide P E and Liu H Q. 2019. Validation, comparison, and integration of GOCI, AHI, MODIS, MISR, and VIIRS aerosol optical depth over East Asia during the 2016 KORUS-AQ campaign. *Atmospheric Measurement Techniques*, 12(8): 4619-4641 [DOI: 10.5194/amt-12-4619-2019]
- Cohen J B and Wang C E. 2014. Estimating global black carbon emissions using a top-down Kalman Filter approach. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(1): 307-323 [DOI: 10.1002/2013JD019912]
- Connor B, Bösch H, McDuffie J, Taylor T, Fu D J, Frankenberg C, O'Dell C, Payne V H, Gunson M, Pollock R, Hobbs J, Oyafuso F and Jiang Y B. 2016. Quantification of uncertainties in OCO-2 measurements of XCO₂: simulations and linear error analysis. *Atmospheric Measurement Techniques*, 9(10): 5227-5238 [DOI: 10.5194/amt-9-5227-2016]
- Crisp D, O'Dell C, Eldering A, Fisher B, Oyafuso F, Payne V, Drouin B, Toon G, Laughner J, Somkuti P, McGarragh G, Merrelli A, Nelson R, Gunson M, Frankenberg C, Osterman G, Boesch H, Brown L, Castano R, Christi M, Connor B, McDuffie J, Miller C, Natraj V, O'Brien D, Polonski I, Smyth M, Thompson D and

- Granat R. 2021. Orbiting Carbon Observatory (OCO) -2: Level 2 Full Physics Algorithm Theoretical Basis Document [OCO D-55207]
- de Graaf M, de Haan J and Sanders A. 2019. TROPOMI ATBD of the Aerosol Layer Height [S5P-KNMI-L2-0006-RP]
- de Leeuw G, Holzer-Popp T, Bevan S, Davies W H, Descloitres J, Grainger R G, Griesfeller J, Heckel A, Kinne S, Klüser L, Kolmonen P, Litvinov P, Martynenko D, North P, Ovigneur B, Pascal N, Poulsen C, Ramon D, Schulz M, Siddans R, Sogacheva L, Tanré D, Thomas G E, Virtanen T H, von Hoyningen Huene W, Vountas M and Pinnock S. 2015. Evaluation of seven European aerosol optical depth retrieval algorithms for climate analysis. *Remote Sensing of Environment*, 162: 295-315 [DOI: 10.1016/j.rse.2013.04.023]
- Diner D J, Abdou W A, Ackerman T P, Crean K, Gordon H R, Kahn R A, Martonchik J V, McMuldroch S, Paradise S R, Pinty B, Verschaeve M M, Wang M H and West R A. 2008. MISR: Level 2 Aerosol Retrieval Algorithm Theoretical Basis [JPL D-11400]
- Diner D J, Martonchik J V, Kahn R A, Pinty B, Gobron N, Nelson D L and Holben B N. 2005. Using angular and spectral shape similarity constraints to improve MISR aerosol and surface retrievals over land. *Remote Sensing of Environment*, 94(2): 155-171 [DOI: 10.1016/j.rse.2004.09.009]
- Dubovik O, Herman M, Holdak A, Lapyonok T, Tanré D, Deuzé J L, Ducos F, Sinyuk A and Lopatin A. 2011. Statistically optimized inversion algorithm for enhanced retrieval of aerosol properties from spectral multi-angle polarimetric satellite observations. *Atmospheric Measurement Techniques*, 4(5): 975-1018 [DOI: 10.5194/amt-4-975-2011]
- Dubovik O, Lapyonok T, Litvinov P, Herman M, Fuertes D, Ducos F, Torres B, Derimian Y, Huang X, Lopatin A, Chaikovskiy A, Aspetsberger M and Federspiel C. 2014. GRASP: a versatile algorithm for characterizing the atmosphere. *SPIE Newsroom*, 25 [DOI 10.1117/2.1201408.005558]
- Dubovik O, Li Z Q, Mishchenko M I, Tanré D, Karol Y, Bojkov B, Cairns B, Diner D J, Espinosa W R, Goloub P, Gu X F, Hasekamp O, Hong J, Hou W Z, Knobelspiesse K D, Landgraf J, Li L, Litvinov P, Liu Y, Lopatin A, Marbach T, Maring H, Martins V, Meijer Y, Milinevsky G, Mukai S, Parol F, Qiao Y L, Remer L, Riethjens J, Sano I, Stammes P, Stammes S, Sun X B, Tabary P, Travis L D, Waquet F, Xu F, Yan C X and Yin D K. 2019. Polarimetric remote sensing of atmospheric aerosols: instruments, methodologies, results, and perspectives. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 224: 474-511 [DOI: 10.1016/j.jqsrt.2018.11.024]
- Dubovik O, Litvinov P, Poustomis F, Vinuesa J, Fuertes D and Ducos F. 2018. ERA - Enhanced Retrieval of Aerosol properties: reference and NRT algorithm prototype for 3MI mission
- Ehret G, Bousquet P, Pierangelo C, Alpers M, Millet B, Abshire J B, Bovensmann H, Burrows J P, Chevallier F, Ciais P, Crevoisier C, Fix A, Flamant P, Frankenberg C, Gibert F, Heim B, Heimann M, Houweling S, Hubberten H W, Jöckel P, Law K, Löw A, Marshall J, Agusti-Panareda A, Payan S, Prigent C, Rairoux P, Sachs T, Scholze M and Wirth M. 2017. MERLIN: a French-German space lidar mission dedicated to atmospheric methane. *Remote Sensing*, 9(10): 1052 [DOI: 10.3390/rs9101052]
- Eldering A, O'Dell C W, Wennberg P O, Crisp D, Gunson M R, Viatte C, Avis C, Braverman A, Castano R, Chang A, Chapsky L, Cheng C, Connor B, Dang L, Doran G, Fisher B, Frankenberg C, Fu D J, Granat R, Hobbs J, Lee R A M, Mandrake L, McDuffie J, Miller C E, Myers V, Natraj V, O'Brien D, Osterman G B, Oyafuso F, Payne V H, Pollock H R, Polonsky I, Roehl C M, Rosenberg R, Schwandner F, Smyth M, Tang V, Taylor T E, To C, Wunch D and Yoshimizu J. 2017. The Orbiting Carbon Observatory-2: first 18 months of science data products. *Atmospheric Measurement Techniques*, 10(2): 549-563 [DOI: 10.5194/amt-10-549-2017]
- Eldering A, Taylor T E, O'Dell C W and Pavlick R. 2019. The OCO-3 mission: measurement objectives and expected performance based on 1 year of simulated data. *Atmospheric Measurement Techniques*, 12(4): 2341-2370 [DOI: 10.5194/amt-12-2341-2019]
- Ge B Y. 2020. Retrieval of Aerosol Optical Parameters Based on Directional Polarimetric Camera (DPC) Onboard the GF-5 Satellite. University of Chinese Academy of Sciences (葛邦宇. 2020. 高分卫星多角度偏振相机(DPC)气溶胶参数反演算法研究. 北京, 中国科学院大学)
- Ge B Y, Mei X D, Li Z Q, Hou W Z, Xie Y, Zhang Y, Xu H, Li K T and Wei Y Y. 2020. An improved algorithm for retrieving high resolution fine-mode aerosol based on polarized satellite data: application and validation for POLDER-3. *Remote Sensing of Environment*, 247: 111894 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.111894]
- Ge B Y, Yang L K, Chen X F, Li Z Q, Mei X D and Liu L. 2018. Study on aerosol optical depth retrieval over land from Himawari-8 data based on dark target method. *Journal of Remote Sensing*, 22(1): 38-50 (葛邦宇, 杨磊库, 陈兴峰, 李正强, 梅笑冬, 刘李. 2018. 暗目标法的Himawari-8静止卫星数据气溶胶反演. 遥感学报, 22(1): 38-50) [DOI: 10.11834/jrs.20187033]
- GHG-CCI Project Team. 2020. GHG-CCI: User Requirements Document for the GHG-CCI+ project of ESA's Climate Change Initiative, Version 3.0
- Giles D M, Sinyuk A, Sorokin M G, Schafer J S, Smirnov A, Slutsker I, Eck T F, Holben B N, Lewis J R, Campbell J R, Welton E J, Korkin S V and Lyapustin A I. 2019. Advancements in the Aerosol Robotic Network (AERONET) Version 3 database - automated near-real-time quality control algorithm with improved cloud screening for Sun photometer aerosol optical depth (AOD) measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*, 12(1): 169-209 [DOI: 10.5194/amt-12-169-2019]
- Gloude-mans A M S, Schrijver H, Kleipool Q, van den Broek M M P, Straume A G, Lichtenberg G, van Hees R M, Aben I and Meirink J F. 2005. The impact of SCIAMACHY near-infrared instrument calibration on CH₄ and CO total columns. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 5(9): 2369-2383 [DOI: 10.5194/acp-5-2369-2005]
- Gong S Y and Shi Y S. 2021. Evaluation of comprehensive monthly-gridded methane emissions from natural and anthropogenic sources

- es in China. *Science of the Total Environment*, 784: 147116 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.147116]
- Guerlet S, Butz A, Schepers D, Basu S, Hasekamp O P, Kuze A, Yokota T, Blavier J F, Deutscher N M, Griffith D W T, Hase F, Kyro E, Morino I, Sherlock V, Sussmann R, Galli A and Aben I. 2013. Impact of aerosol and thin cirrus on retrieving and validating XCO₂ from GOSAT shortwave infrared measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(10): 4887-4905 [DOI: 10.1002/jgrd.50332]
- Hagolle O, Dedieu G, Mougnot B, Debaecker V, Duchemin B and Meygret A. 2008. Correction of aerosol effects on multi-temporal images acquired with constant viewing angles: application to Formosat-2 images. *Remote Sensing of Environment*, 112(4): 1689-1701 [DOI: 10.1016/j.rse.2007.08.016]
- Han G, Xu H, Gong W, Liu J Q, Du J, Ma X and Liang A L. 2018. Feasibility study on measuring atmospheric CO₂ in urban areas using Spaceborne CO₂-IPDA LIDAR. *Remote Sensing*, 10(7): 985 [DOI: 10.3390/rs10070985]
- Hasekamp O, Lorente A, Hu H L, Butz A, de Brugh J and Landgraf J. 2019. Algorithm Theoretical Baseline Document for Sentinel-5 Precursor Methane Retrieval [SRON-S5P-LEV2-RP-001]
- He L J, Wang L C, Li Z Q, Jiang D Y, Sun L, Liu D, Liu L, Yao R, Zhou Z G and Wei J. 2021. VIIRS Environmental Data Record and Deep Blue aerosol products: validation, comparison, and spatiotemporal variations from 2013 to 2018 in China. *Atmospheric Environment*, 250: 118265 [DOI: 10.1016/j.atmosenv.2021.118265]
- Heymann J, Reuter M, Hilker M, Buchwitz M, Schneising O, Bovensmann H, Burrows J P, Kuze A, Suto H, Deutscher N M, Dubey M K, Griffith D W T, Hase F, Kawakami S, Kivi R, Morino I, Petri C, Roehl C, Schneider M, Sherlock V, Sussmann R, Velasco V A, Warneke T and Wunch D. 2015. Consistent satellite XCO₂ retrievals from SCIAMACHY and GOSAT using the BESD algorithm. *Atmospheric Measurement Techniques*, 8(7): 2961-2980 [DOI: 10.5194/amt-8-2961-2015]
- Holben B N, Eck T F, Slutsker I, Tanré D, Buis J P, Setzer A, Vermote E, Reagan J A, Kaufman Y J, Nakajima T, Lavenu F, Jankowiak I and Smirnov A. 1998. AERONET—a federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Remote Sensing of Environment*, 66(1): 1-16 [DOI: 10.1016/S0034-4257(98)00031-5]
- Hsu N C, Jeong M J, Bettenhausen C, Sayer A M, Hansell R, Seftor C S, Huang J and Tsay S C. 2013. Enhanced Deep Blue aerosol retrieval algorithm: the second generation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(16): 9296-9315 [DOI: 10.1002/jgrd.50712]
- Hsu N C, Tsay S C, King M D, Herman J R. 2004. Aerosol properties over bright-reflecting source regions. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(3): 557-569 [DOI: 10.1109/TGRS.2004.824067]
- Huang H L, Ti R F, Zhang D Y, Fang W, Sun X B and Yi W N. 2020. Inversion of aerosol optical depth over land from directional polarimetric camera onboard Chinese Gaofen-5 satellite. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 39(4): 454-461 (黄红莲, 提汝芳, 张冬英, 方薇, 孙晓兵, 易维宁. 2020. 高分五号卫星偏振遥感陆地上空气溶胶光学厚度. *红外与毫米波学报*, 39(4): 454-461) [DOI: 10.11972/j.issn.1001-9014.2020.04.010]
- 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]
- Kaufman Y J, Tanré D, Remer L A, Vermote E F, Chu A and Holben B N. 1997. Operational remote sensing of tropospheric aerosol over land from EOS moderate resolution imaging spectroradiometer. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D14): 17051-17067 [DOI: 10.1029/96JD03988]
- 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]
- Kuze A, Suto H, Nakajima M and Hamazaki T. 2009. Thermal and near infrared sensor for carbon observation Fourier-transform spectrometer on the Greenhouse Gases Observing Satellite for greenhouse gases monitoring. *Applied Optics*, 48(35): 6716-6733 [DOI: 10.1364/AO.48.006716]
- Levy R C, Remer L A, Mattoo S, Vermote E F and Kaufman Y J. 2007. Second-generation operational algorithm: retrieval of aerosol properties over land from inversion of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer spectral reflectance. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112: D13211 [DOI: 10.1029/2006JD007811]
- Li B G, Gasser T, Ciais P, Piao S, Tao S, Balkanski Y, Hauglustaine D, Boisier J P, Chen Z, Huang M T, Li L Z, Li Y, Liu H Y, Liu J F, Peng S S, Shen Z H, Sun Z Z, Wang R, Wang T, Yin G D, Yin Y, Zeng H, Zeng Z Z and Zhou F. 2016. The contribution of China's emissions to global climate forcing. *Nature*, 531(7594): 357-361 [DOI: 10.1038/nature17165]
- Li Z Q, Hou W Z, Hong J, Zheng F X, Luo D G, Wang J, Gu X F and Qiao Y L. 2018a. Directional Polarimetric Camera (DPC): monitoring aerosol spectral optical properties over land from satellite observation. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 218: 21-37 [DOI: 10.1016/j.jqsrt.2018.07.003]
- Li Z Q, Li D H, Li K T, Xu H, Chen X F, Chen C, Xie Y S, Li L, Li L, Li W, Lv Y, Qie L L, Zhang Y and Gu X F. 2015. Sun-sky radiometer observation network with the extension of multi-wavelength polarization measurements. *Journal of Remote Sensing*, 19(3): 495-519 (李正强, 李东辉, 李凯涛, 许华, 陈兴峰, 陈澄, 谢一淞, 李莉, 李雷, 李伟, 吕阳, 伽丽丽, 张莹, 顾行发. 2015. 扩展多波长偏振测量的太阳—天空辐射计观测网. *遥感学报*, 19(3): 495-519) [DOI: 10.11834/jrs.20154129]
- Li Z Q, Xu H, Li K T, Li D H, Xie Y S, Li L, Zhang Y, Gu X F, Zhao

- W, Tian Q J, Deng R R, Su X L, Huang B, Qiao Y L, Cui W Y, Hu Y, Gong C L, Wang Y Q, Wang X F, Wang J P, Du W B, Pan Z Q, Li Z Z and Bu D. 2018b. Comprehensive study of optical, physical, chemical, and radiative properties of total columnar atmospheric aerosols over China: an overview of sun - sky radiometer observation network (SONET) measurements. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99(4): 739-755 [DOI: 10.1175/BAMS-D-17-0133.1]
- Liang A L, Gong W, Han G and Xiang C Z. 2017. Comparison of satellite-observed XCO₂ from GOSAT, OCO-2, and ground-based TC-CO₂. *Remote Sensing*, 9(10): 1033 [DOI: 10.3390/rs9101033]
- 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]
- Liu Y, Wang J, Yao L, Chen X, Cai Z N, Yang D X, Yin Z S, Gu S Y, Tian L F, Lu N M and Lyu D. 2018. The TanSat mission: preliminary global observations. *Science Bulletin*, 63(18): 1200-1207 [DOI: 10.1016/j.scib.2018.08.004]
- Lorente A, Borsdorff T, Butz A, Hasekamp O, aan de Brugh J, Schneider A, Wu L H, Hase F, Kivi R, Wunch D, Pollard D F, Shiomi K, Deutscher N M, Velazco V A, Roehl C M, Wennberg P O, Warneke T and Landgraf J. 2021. Methane retrieved from TROPOMI: improvement of the data product and validation of the first 2 years of measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*, 14(1): 665-684 [DOI: 10.5194/amt-14-665-2021]
- Lu Q F, Zhou F, Qi C L, Hu X Q, Xu H L and Wu C Q. 2019. Spectral performance evaluation of high-spectral resolution infrared atmospheric sounder onboard FY-3D. *Optics and Precision Engineering*, 27(10): 2105-2115 (陆其峰, 周方, 漆成莉, 胡秀清, 徐寒列, 吴春强. 2019. FY-3D 星红外高光谱大气探测仪的在轨光谱精度评估. *光学精密工程*, 27(10): 2105-2115) [DOI: 10.3788/OPE.20192710.2105]
- Lyapustin A, Wang Y J, Korkin S and Huang D. 2018. MODIS Collection 6 MAIAC algorithm. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(10): 5741-5765 [DOI: 10.5194/amt-11-5741-2018]
- Martonchik J V, Diner D J, Kahn R A, Ackerman T P, Verstraete M M, Pinty B and Gordon H R. 1998. Techniques for the retrieval of aerosol properties over land and ocean using multiangle imaging. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(4): 1212-1227 [DOI: 10.1109/36.701027]
- Meijer Y, Boesch H, Bombelli A, Brunner D, Buchwitz M, Ciais P, Crisp D, Engelen R, Holmlund K, Houweling S, Janssens-Maenhout G, Marshall J, Nakajima M, Pinty B, Scholze M, Bezy J, Drinkwater M, Fehr T, Fernandez V, Loescher A, Nett H and Sierk B. 2020. Copernicus CO₂ Monitoring Mission Requirements Document [EOP-SM/3088/YM-ym]
- Moore B III, 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 (Geo-Carb) to provide multi-scale constraints on the carbon cycle in the Americas. *Frontiers in Environmental Science*, 6: 109 [DOI: 10.3389/fenvs.2018.00109]
- O'Dell C W, Connor B, Bösch H, O'Brien D, Frankenberg C, Castano R, Christi M, Eldering D, Fisher B, Gunson M, McDuffie J, Miller C E, Natraj V, Oyafuso F, Polonsky I, Smyth M, Taylor T, Toon G C, Wennberg P O and Wunch D. 2012. The ACOS CO₂ retrieval algorithm - Part 1: description and validation against synthetic observations. *Atmospheric Measurement Techniques*, 5(1): 99-121 [DOI: 10.5194/amt-5-99-2012]
- O'Dell C W, Eldering A, Wennberg P O, Crisp D, Gunson M R, Fisher B, Frankenberg C, Kiel M, Lindqvist H, Mandrake L, Merrelli A, Natraj V, Nelson R R, Osterman G B, Payne V H, Taylor T E, Wunch D, Drouin B J, Oyafuso F, Chang A, McDuffie J, Smyth M, Baker D F, Basu S, Chevallier F, Crowell S M R, Feng L, Palmer P I, Dubey M, Garcia O E, Griffith D W T, Hase F, Iraci L T, Kivi R, Morino I, Notholt J, Ohyama H, Petri C, Roehl C M, Sha M K, Strong K, Sussmann R, Te Y, Uchino O and Velazco V A. 2018. Improved retrievals of carbon dioxide from Orbiting Carbon Observatory-2 with the version 8 ACOS algorithm. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(12): 6539-6576 [DOI: 10.5194/amt-11-6539-2018]
- Olson M R, Wang Y Q, de Foy B, Li Z Q, Bergin M H, Zhang Y X and Schauer J J. 2022. Source attribution of black and Brown carbon near-UV light absorption in Beijing, China and the impact of regional air-mass transport. *Science of the Total Environment*, 807: 150871 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.150871]
- Qie L, Li D H, Li Z Q, Zhang Y, Hou W Z and Chen X F. 2015. A sensitivity study of atmospheric reflectance to aerosol layer height based on multi-angular polarimetric measurements//Proceedings Volume 9678, AOPC 2015: Telescope and Space Optical Instrumentation. Beijing: SPIE [DOI: 10.1117/12.2199671]
- Reuter M, Buchwitz M, Schneising O, Noël S, Bovensmann H and Burrows J P. 2017. A fast atmospheric trace gas retrieval for hyperspectral instruments approximating multiple scattering—Part 2: application to XCO₂ retrievals from OCO-2. *Remote Sensing*, 9(11): 1102 [DOI: 10.3390/rs9111102]
- Sanghavi S, Nelson R, Frankenberg C and Gunson M. 2020. Aerosols in OCO-2/GOSAT retrievals of XCO₂: an information content and error analysis. *Remote Sensing of Environment*, 251: 112053 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.112053]
- Santer R, Ramon D, Vidot J and Dilligeard E. 2007. A surface reflectance model for aerosol remote sensing over land. *International Journal of Remote Sensing*, 28(3/4): 737-760 [DOI: 10.1080/01431160600821028]
- Schepers D, Guerlet S, Butz A, Landgraf J, Frankenberg C, Hasekamp O, Blavier J F, Deutscher N M, Griffith D W T, Hase F, Kyro E, Morino I, Sherlock V, Sussmann R and Aben I. 2012. Methane retrievals from Greenhouse Gases Observing Satellite (GOSAT) shortwave infrared measurements: performance comparison of proxy and physics retrieval algorithms. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D10): D10307 [DOI: 10.1029/2012JD017549]

- Schneising O, Buchwitz M, Burrows J P, Bovensmann H, Bergamaschi P and Peters W. 2009. Three years of greenhouse gas column-averaged dry air mole fractions retrieved from satellite - Part 2: methane. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(2): 443-465 [DOI: 10.5194/acp-9-443-2009]
- Schneising O, Buchwitz M, Burrows J P, Bovensmann H, Reuter M, Notholt J, Macatangay R and Warneke T. 2008. Three years of greenhouse gas column-averaged dry air mole fractions retrieved from satellite - Part 1: carbon dioxide. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8(14): 3827-3853 [DOI: 10.5194/acp-8-3827-2008]
- Schuster G L, Dubovik O and Arola A. 2016. Remote sensing of soot carbon - Part 1: distinguishing different absorbing aerosol species. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(3): 1565-1585 [DOI: 10.5194/acp-16-1565-2016]
- Shi G M, Li C C and Ren T. 2014. Sensitivity analysis of single-angle polarization reflectance observed by satellite. *Chinese Science Bulletin*, 59(14): 1519-1528 [DOI: 10.1007/s11434-014-0213-x]
- 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]
- Sinyuk A, Holben B N, Eck T F, Giles D M, Slutsker I, Korokin S, Schaffer J S, Smirnov A, Sorokin M and Lyapustin A. 2020. The AERONET Version 3 aerosol retrieval algorithm, associated uncertainties and comparisons to Version 2. *Atmospheric Measurement Techniques*, 13(6): 3375-3411 [DOI: 10.5194/amt-13-3375-2020]
- Suto H, Kataoka F, Kikuchi N, Knuteson R O, Butz A, Haun M, Buijs H, Shiomi K, Imai H and Kuze A. 2021. Thermal and near-infrared sensor for carbon observation Fourier transform spectrometer-2 (TANSO-FTS-2) on the Greenhouse gases Observing SATellite-2 (GOSAT-2) during its first year in orbit. *Atmospheric Measurement Techniques*, 14(3): 2013-2039 [DOI: 10.5194/amt-14-2013-2021]
- Tang F Y, Zhou H J, Wang W H, Yang T P and Si F Q. 2021. Absorbing aerosol index inversion algorithm of TROPOMI and its application. *Acta Optica Sinica*, 41(16): 1601001 (汤付颖, 周海金, 王维和, 杨太平, 司福祺. 2021. TROPOMI吸收性气溶胶指数反演算法及其应用. *光学学报*, 41(16): 1601001 [DOI: 10.3788/AOS202141.1601001])
- Tanré D, Remer L A, Kaufman Y J, Mattoo S, Hobbs P V, Livingston J M, Russell P B and Smirnov A. 1999. Retrieval of aerosol optical thickness and size distribution over ocean from the MODIS airborne simulator during TARFOX. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 104(D2): 2261-2278 [DOI: 10.1029/1998jd200077]
- Taylor T E, O'Dell C W, Frankenberg C, Partain P T, Cronk H Q, Savtchenko A, Nelson R R, Rosenthal E J, Chang A Y, Fisher B, Osterman G B, Pollock R H, Crisp D, Eldering A and Gunson M R. 2016. Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) cloud screening algorithms: validation against collocated MODIS and CALIOP data. *Atmospheric Measurement Techniques*, 9(3): 973-989 [DOI: 10.5194/amt-9-973-2016]
- Wu H. 2019. Influence of Cloud and Aerosol in Atmospheric CO₂ Inversion and its Correlation Method. Hefei: University of Science and Technology of China (吴浩. 2019. 大气CO₂反演中云和气溶胶的影响及其校正方法. 合肥: 中国科学技术大学)
- Wu K Y, Hou W Z, Shi Z, Xu H and Wen Y N. 2021. Research progress of aerosol remote sensing retrieval algorithm based on satellite multi-angle observation. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 16(4): 283-298 (吴孔逸, 侯伟真, 史正, 许华, 温亚南. 2021. 基于卫星多角度观测的气溶胶遥感反演算法研究进展. *大气与环境光学学报*, 16(4): 283-298 [DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2021.04.001])
- Wu S C, Wang X H, Ye H H, Li C, An Y and Wang X D. 2021. Atmospheric CO₂ cooperative inversion algorithm applied to GF-5 satellite. *Acta Optica Sinica*, 41(15): 1501002 (吴时超, 王先华, 叶函函, 李超, 安源, 王晓迪. 2021. 应用于GF-5卫星的大气CO₂协同反演算法. *光学学报*, 41(15): 1501002 [DOI: 10.3788/AOS202141.1501002])
- Wunch D, Toon G C, Sherlock V, Deutscher N M, Liu C, Feist D G and Wennberg P O. 2015. Documentation for the 2014 TCCON Data Release, CaltechDATA [DOI: 10.14291/tcon.ggg2014.documentation.R0/1221662]
- Wunch D, Wennberg P O, Osterman G, Fisher B, Naylor B, Roehl C M, O'Dell C, Mandrake L, Viatte C, Kiel M, Griffith D W T, Deutscher N M, Velasco V A, Notholt J, Warneke T, Petri C, De Maziere M, Sha M K, Sussmann R, Rettinger M, Pollard D, Robinson J, Morino I, Uchino O, Hase F, Blumenstock T, Feist D G, Arnold S G, Strong K, Mendonca J, Kivi R, Heikkinen P, Iraci L, Podolske J, Hillyard P W, Kawakami S, Dubey M K, Parker H A, Sepulveda E, Garcia O E, Te Y, Jeseck P, Gunson M R, Crisp D and Eldering A. 2017. Comparisons of the Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) XCO₂ measurements with TCCON. *Atmospheric Measurement Techniques*, 10(6): 2209-2238 [DOI: 10.5194/amt-10-2209-2017]
- Xie X D. 2020. Study on the Interactions of Air Pollution, Vegetation and Carbon Dioxide in China. Nanjing: Nanjing University (谢晓栋. 2020. 中国地区大气污染—植被—二氧化碳的相互影响研究. 南京: 南京大学)
- Xie Y S, Li Z Q, Hou W Z, Zhang Y, Qie L L, Li L, Li K T and Xu H. 2019. Retrieval of fine-mode aerosol optical depth based on remote sensing measurements of Directional Polarimetric Camera onboard GF-5 satellite. *Aerospace Shanghai*, 36(S2): 219-226 (谢一淞, 李正强, 侯伟真, 张洋, 伽丽丽, 李莉, 李凯涛, 许华. 2019. 高分五号卫星多角度偏振成像仪细粒子气溶胶光学厚度遥感反演. *上海航天*, 36(S2): 219-226 [DOI: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2019.S.033])
- Xie Y S, Li Z Q, Zhang X Y, Xu H, Li D H and Li K T. 2015. A new ground-based differential absorption sunphotometer for measuring atmospheric columnar CO₂ and preliminary applications//Proceedings Volume 9678, AOPC 2015: Telescope and Space Optical Instrumentation. Beijing: SPIE [DOI: 10.1117/12.2199379]
- Xiong W. 2019. Greenhouse gases Monitoring Instrument(GMI) on GF-5 satellite (invited). *Infrared and Laser Engineering*, 48(3):

- 0303002 (熊伟. 2019. “高分五号”卫星大气主要温室气体监测仪(特邀). 红外与激光工程, 48(3): 0303002) [DOI: 10.3788/IR-LA201948.0303002]
- Yang D, Boesch H, Liu Y, Somkuti P, Cai Z, Chen X, Di Noia A, Lin C, Lu N, Lyu D, Parker R J, Tian L, Wang M, Webb A, Yao L, Yin Z, Zheng Y, Deutscher N M, Griffith D W T, Hase F, Kivi R, Morino I, Notholt J, Ohyama H, Pollard D F, Shiomu 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: Atmospheres*, 125(22): e2020JD032794 [DOI: 10.1029/2020JD032794]
- 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]
- Zhang X Y, Meng X Y, Zhou M Q, Bai W G, Zhou L H, Hu Y M and Yu X. 2018. Review of the validation of atmospheric CO₂ from satellite hyper spectral remote sensing. *Climate Change Research*, 14(6): 602-612 (张兴赢, 孟晓阳, 周敏强, 白文广, 周丽花, 胡玥明, 余骁. 2018. 卫星高光谱大气 CO₂ 探测精度验证研究进展. *气候变化研究进展*, 14(6): 602-612) [DOI: 10.12006/j.issn.1673-1719.2018.070]
- Zhang Y and Li Z Q. 2015. Remote sensing of atmospheric fine particulate matter (PM_{2.5}) mass concentration near the ground from satellite observation. *Remote Sensing of Environment*, 160: 252-262 [DOI: 10.1016/j.rse.2015.02.005]
- Zhang Y, Li Z Q, Qie L L, Hou W Z, Liu Z H, Zhang Y, Xie Y S, Chen X F and Xu H. 2017. Retrieval of aerosol optical depth using the empirical orthogonal functions (EOFs) based on PARASOL multi-angle intensity data. *Remote Sensing*, 9(6): 578 [DOI: 10.3390/rs9060578]
- Zhao L. 2017. Remote Retrieval of Atmospheric CO₂ and CH₄ using GOSAT. Changchun: Jilin University (赵靓. 2017. 基于 GOSAT 卫星的大气 CO₂ 和 CH₄ 遥感反演研究. 长春: 吉林大学)
- Zheng F X, Zhu J Y, Hou W Z and Li Z Q. 2021. Effect analysis of using different polarization quantities in aerosol retrieval from satellite observation. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 41(7): 2212-2218 (郑逢勋, 朱家乙, 侯伟真, 李正强. 2021. 卫星遥感中不同偏振量对气溶胶反演的影响分析. *光谱学与光谱分析*, 41(7): 2212-2218) [DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)07-2212-07]
- Zweers D C S. 2018. TROPOMI ATBD of the UV aerosol index [S5P-KNMI-L2-0008-RP]

A review of collaborative remote sensing observation of greenhouse gases and aerosol with atmospheric environment satellites

LI Zhengqiang¹, XIE Yisong¹, SHI Yusheng¹, LI Qing², COHEN Jason^{3,4}, ZHANG Yuzhong⁵, HAN Yinghui⁶, XIONG Wei⁷, LIU Yi⁸

1. State Environmental Protection Key Laboratory of Satellite Remote Sensing, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. Ministry of Ecology and Environment Center for Satellite Application on Ecology and Environment, Beijing 100094, China;

3. School of Atmosphere Sciences, Sun Yat-Sen University, Zhuhai 519082, China;

4. School of Environment and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

5. Key Laboratory of Coastal Environment and Resources of Zhejiang Province, School of Engineering, Westlake University, Hangzhou 310024, China;

6. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

7. Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

8. Carbon Neutrality Research Center, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

Abstract: Climate change is the most critical issue related to human survival and economic development currently being faced by the whole world. Greenhouse gases (GHGs) and aerosol are the main factors contributing to global warming and atmospheric environmental degradation caused by anthropogenic emissions; thus, they are the core detection targets of satellite remote sensing platforms. Compared with traditional single-target satellites, the collaborative monitoring of GHGs and aerosol on the same airborne platform, “Greenhouse gases and Aerosol Collaborative Observation Constellation” (GACOC), could significantly improve the accuracy of CO₂ and CH₄ retrieval. This way could improve the ability to estimate the carbon source and sink via the “top-down” method, as well as the ability to distinguish anthropogenic/natural sources of CO₂, CH₄, and atmospheric particulate matters. The GACOC has become an important spatial detection approach actively developed by aerospace agencies of various countries.

This study introduces the satellites launched by the European Union, Japan, China, and the United States that can monitor GHGs and aerosol in one space-borne platform. These satellites are further divided into two categories according to their missions. The first one is the

comprehensive atmospheric sounding satellites that independently detect GHGs and aerosol. These satellites can provide the temporal and spatial distribution of columnar CO₂ or CH₄ concentration and aerosol properties in the global context. The representative satellites of this category include ENVISAT, Sentinel-5P, FY-3D, and GF-5, as well as GF-5(02), DQ-1, DQ-2, and MetOp-SG-A that are about to launch in 1–3 years. The second category is the GHG monitoring satellites. Synchronous aerosol and cloud observations on the same platform provide necessary information for high-precision inversion of GHGs. The typical GHG satellites include GOSAT, GOSAT-2, OCO-2, OCO-3, TanSat, and the ESA-planned CO2M series.

Focusing on the significant national demands such as assessment of carbon neutrality pathways and atmospheric environmental governance, this study also discusses the development tendencies of monitoring GHGs and aerosol within the framework of a collaborative observation constellation.

(1) Identification and quantitative monitoring of large anthropogenic emission sources. The anthropogenic CO₂/CH₄ and aerosol particles (and other tracers such as NO₂) emitted from large-scale industrial areas or cities have some similarities in source, environment, and meteorological condition. Therefore, the high-resolution GHGs and aerosol observation by collaborative satellites can be employed to improve the ability to identify, track, and monitor large-scale, fixed, anthropogenic sources more efficiently.

(2) High-precision joint inversion of atmospheric GHGs and aerosol. The scattering of aerosol and cloud greatly impact the inversion accuracy of CO₂/CH₄ satellite products. The advanced spaceborne technology that combines multi-angle, multi-band, and polarimetric measurements obtain high-precision aerosol optical and microphysical parameters. These parameters can be used to generate observation-based aerosol models when dealing with aerosol scattering during GHG's inversion, and these models are more appropriate than the traditional models from modeling data.

(3) Active – passive satellite networking. No single satellite can acquire a daily, global-coverage GHG or aerosol product due to the issues such as limited swath width, large number of cloudy pixels, and strict data quality criteria. Therefore, active – passive satellite networking is an essential approach to satisfy the demands of operationally observing the earth. The GACOC could fill in the data gap effectively and generate a spatially – temporally continuous global dataset of GHGs and aerosol. These data can provide a solid foundation for scientific research such as accurate assessments of climate change and dynamic monitoring of the atmospheric environment.

Key words: greenhouse gases, aerosol, satellite remote sensing, carbon dioxide, collaborative observation constellation

Supported by The National Science Fund for Distinguished Young Scholars (No. 41925019); National Natural Science Foundation of China (No. 42175147)