

Monitoring Greenhouse Gases from Space (2025)

Y. Liu¹, D. Yang¹, J. Wang¹, S. Zhu¹, L. Yao¹, Z. Cai¹, L. Feng^{2,3}, P. Palmer^{2,3}, J. Tamminen⁴, H. Lindqvist⁴, J. Hakkarainen⁴, H. Boesch⁵, A. Di Noia⁵

1. Carbon Neutrality Research Center and Key Laboratory of the Middle Atmosphere and Global Environmental Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China,

2. School of GeoSciences, University of Edinburgh, Edinburgh, UK,

3. National Centre for Earth Observation NCEO, University of Edinburgh, UK,

4. Finnish Meteorological Institute, Helsinki and Sodankylä, Finland,

5. University of Bremen, Bremen, Germany.

气候变化受到人为排放的温室气体（GHG）影响。由于缺乏可用的全球二氧化碳（CO₂）和甲烷（CH₄）观测数据，很难准确估算它们的排放量。研究表明，精度优于 2 ppm 的二氧化碳柱平均干空气摩尔分数（X_{CO₂}）观测对理解全球二氧化碳通量分布非常有帮助。我们这项研究的主要目标之一是结合对二氧化碳和甲烷的地基测量数据以及当前卫星观测（碳卫星（TanSat）、日本温室气体观测卫星（GOSAT）及其后续卫星 GOSAT-2、美国轨道碳观测卫星（OCO）-2 及其后续卫星 OCO-3 以及对流层监测仪（TROPOMI））的数据，通过反演结果之间的相互比较来验证和评估卫星反演结果，依据模型计算对其进行评估，并将这些数据纳入反演方法中，以评估二氧化碳和甲烷的地表通量估算值。

全球盘点的目标给未来的卫星计划提出了更严苛的需求，即更准确、覆盖范围更广的观测。我国下一代碳卫星任务，即 TanSat-2，已于两年前启动。为了提高测量覆盖范围和重访频率，TanSat-2 将幅宽提升至 1500 千米，像元大小为 3×3 千米，因此在可实现近单日的全球覆盖观测。TanSat-2 搭载光谱仪利用太阳反射辐射进行的近红外（NIR）/ 短波红外（SWIR）高光谱测量包括 0.4 微米（紫外线）、0.76 微米（氧气 A 波段）、1.61 微米（二氧化碳）和 2.0 微米（二氧化碳）波段观测。此外，还将测量气溶胶光学属性，以提高 X_{CO₂} 和 X_{CH₄} 的反演精度，其中 X_{CO₂} 的精度设计为逐像元 1 ppm。

全球和区域尺度的观测系统模拟实验（OSSE）表明，TanSat-2 在降低自上而下的通量估算误差方面具有很高的效率。我们还开发了一种新方法分离生态系统和人为排放，这将有助于全球盘点目标的大气反演校核应用。

为评估 TanSat-2 在每周尺度上估算地表甲烷通量的潜力，我们使用现有的集合卡尔曼滤波框架设计了一系列观测系统模拟实验（OSSE）。重点关注通量估算对 X_{CH_4} 测量中的系统误差（ μ ）和随机误差（ σ ）的敏感性，以及卫星扫描带宽度的影响。我们的研究表明，在目标精度为 8 ppb 的情况下，全球反演的甲烷通量精度为 $5.1 \pm 1.7\%$ ，先验不确定性降低了 $86.6 \pm 11.2\%$ 。北半球中纬度地区的精度达到 $1.9 \pm 1.6\%$ 。将时间分辨率从 1 个月提高到 1 周，可减少大多数地区的通量差异，但非洲除外，非洲对 X_{CH_4} 偏差也高度敏感。特别是全球 μ 每增加 1 ppb，北非反演的甲烷通量精度就会下降 20.4%。这导致全球总差异增加 2.3%。 σ 值会影响优化通量的精度和准确性，尤其是在北美北方森林地区和热带亚洲地区，但通过将卫星幅宽从 1000km 扩大到 3000km，可以减轻这些影响。欧亚大陆温带地区和北美温带地区的甲烷通量对扫描带宽度和测量不确定性的变化表现出更高的可靠性和适应性。对于像非洲这样对 μ 敏感的地区，仅扩大扫描带宽度带来的改善有限，这凸显了需要其他平台的补充观测。

为了解碳 TanSat-2 任务对热点排放的测量能力，我们开发了一个参数模型和一个数据库，以便快速评估卫星的量化能力，并针对特定的探测目标配置卫星技术特征。我们得到了卫星观测检出阈值，发现高空间分辨率对于监测甲烷排放比测量精度更为重要。对于量化排放而言，提高测量精度是一种更有效的方法。在评估卫星对低强度排放的量化能力时，需要更准确的模拟模型和估算方法。