

光学学报

大气甲烷卫星传感器和遥感算法研究综述

何卓^{1,2}, 李正强^{1,2*}, 樊程¹, 张莹^{1,2}, 史正^{1,2}, 郑杨¹, 顾浩然^{1,3}, 麻金继³, 左金辉^{1,2}, 韩颖慧², 张元勋², 秦凯⁴,
张灏^{1,2}, 徐文斌⁵, 朱军⁶

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中国科学院大学, 北京 100049;

³安徽师范大学地理与旅游学院, 安徽 芜湖 241003;

⁴中国矿业大学环境与测绘学院, 江苏 徐州 221116;

⁵北京环境特性研究所, 北京 100143;

⁶航天东方红卫星有限公司, 北京 100094

摘要 全球气候治理和温室气体减排已经到了刻不容缓的地步。自工业革命以来,大气甲烷(CH₄)体积分数一直持续上升,目前全球平均值已达约 1895.7×10^{-9} ,加上CH₄全球变暖潜能值比二氧化碳(CO₂)高约27~30倍,因此对大气CH₄的监测成为碳减排的重点与热点。利用卫星遥感探测速度快、覆盖范围广、获取信息丰富等优势,可以实现高精度、高时空分辨率且全球覆盖的大气CH₄浓度监测。据此,首先对大气CH₄探测卫星及传感器的发展进行梳理与介绍,从早期的被动热红外探测,到对近地CH₄浓度变化更为敏感的被动短波红外探测,再到以甲烷遥感激光雷达任务(MERLIN)为代表的主动型探测,CH₄探测传感器空间分辨率提升至5~10 km,探测精度提升至 10×10^{-9} 以内,并朝着高时空分辨率、高精度和连续观测一体化的目标不断发展;然后,对各类传感器不同算法的原理、适用条件和反演精度等进行归纳总结,其中精度最高、应用最为广泛的全物理算法的反演精度已达到了0.3%;最后,结合大气CH₄卫星遥感发展现状与双碳目标的战略需求,对CH₄卫星遥感和反演研究的发展趋势进行总结与分析,旨在为我国大气CH₄卫星遥感体系建设提供一定的参考。

关键词 大气遥感; 传感器; 碳减排; 温室气体; 甲烷; 反演算法

中图分类号 P412 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/AOS230429

1 引言

近年来,气候变化受到国内外的广泛关注,它产生了一系列环境和社会问题,对人类的生产生活和社会发展造成了严重影响,是全人类共同面临的重大挑战。由温室效应导致的全球变暖正是其主要驱动力^[1-4]。甲烷(CH₄)是一种重要且强效的温室气体,自工业革命以来,大气中CH₄含量一直在持续上升。CH₄含量在21世纪初期相对稳定,但从2007年开始又缓慢增长,2014年以来更是不断加速^[5-7]。2021年,大气中的CH₄体积分数已达到 1895.7×10^{-9} ,比工业革命前的水平高出了约162%^[8]。尽管大气中CH₄体积分数比二氧化碳(CO₂)低两个数量级^[8],但CH₄在100年内的全球变暖潜能值(GWP)是CO₂的27~30倍^[9]。目前,不断上升的体积分数和强烈辐射强迫作用使得CH₄成为仅次于CO₂的第二大温室气体,在世界各主要经济体国家中均受到高度重视。

CH₄在全球大气中的分布并不平均。从整体来看,北半球的CH₄含量明显高于南半球,这是因为多数CH₄源区分布在北半球,尤其是美国、中国、印度和东南亚等国家或地区,人为排放较为突出。此外,热带湿地也是重要的CH₄排放源^[10]。全球大部分CH₄排放来自人为活动,包括水稻种植、畜牧生产、生物质燃烧、化石燃料工业生产、废物处理及垃圾填埋等^[11]。重要的天然CH₄来源则包括湿地排放、内陆水系统排放、地质渗流、野生动物反刍、白蚁、融化的永久冻土以及海洋来源等^[12-14]。虽然大气CH₄来源众多,但是其最主要的汇是在对流层中被羟基自由基(OH)氧化,约占总汇的90%,其他汇则包括平流层中的光化学反应,即被氯原子(Cl)和激发的原子氧O(¹D)氧化,另外还有土壤氧化以及海洋边界层的光化学反应等^[13,15-16]。

面对气候治理的迫切需求,CH₄减排刻不容缓。2021年8月,政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告首次强调了CH₄减排的重要性与必要

收稿日期: 2023-01-02; 修回日期: 2023-03-03; 录用日期: 2023-03-24; 网络首发日期: 2023-05-08

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFE0200700)

通信作者: *lizq@radi.ac.cn

性^[2]。同年 11 月,在第二十六届联合国气候变化框架公约缔约方会议(COP26)期间,近百个国家签署了全球甲烷减排承诺(Global Methane Pledge),旨在到 2030 年削减 CH₄ 的排放量至 2020 年的 70%。同时,中美两国在此期间还发布了《中美关于在 21 世纪 20 年代强化气候行动的格拉斯哥联合宣言》,旨在加强在 CH₄ 减排各方面的合作。该宣言明确提到 CH₄ 排放对于全球变暖的显著影响,认为加大加快 CH₄ 减排行动是 21 世纪 20 年代的必要事项。由此,我国高度重视 CH₄ 减排工作,不仅将其列入“十四五”发展规划,还将其视为 2060 年碳中和目标的关键内容。

大气 CH₄ 探测主要有 3 种方式,即地基、机载和卫星探测。地基探测起步最早,现在已经形成以总碳柱观测网络(TCCON)^[17]和大气成分变化探测网络(NDACC)^[18]为代表的观测体系。机载方面,也发展了一系列探测器,如机载激光红外吸收光谱仪(ALIAS)^[19]和第二代 ALIAS(ALIAS-II)^[20]、机载可见光/红外成像光谱仪(AVIRIS-Classic)^[21]和下一代 AVIRIS(AVIRIS-NG)^[22]、用于大气痕量物质探测的无人机系统色谱仪(UCATS)^[23]等。虽然地基和机载观测精度高,但是空间覆盖范围有限,只能应用于局地观测。卫星观测不受诸多自然条件的限制,能够在全球范围内进行持续稳定的高精度观测,并通过“自上而下”的方法对“自下而上”的排放清单提供验证与支撑^[24-26]。

鉴于卫星观测的诸多优势,卫星遥感逐渐成为大气 CH₄ 探测的主流方式。美国、欧盟国家、日本、加拿

大和中国相继发射了多颗具有 CH₄ 探测能力的卫星,并且探测技术越来越成熟、探测精度越来越高。与此同时,各种类型卫星传感器相应算法的发展也如火如荼。传感器技术及相应算法的飞速进步均将使人们更好地监测大气 CH₄ 的时空变化及其对气候变化的影响。基于 CH₄ 卫星遥感的高速发展,本研究对 CH₄ 卫星遥感及反演进行介绍。首先,对各类典型的 CH₄ 探测卫星与传感器进行梳理;然后,对其典型的反演算法进行说明,并对 CH₄ 卫星遥感和反演研究的发展趋势提出几点思考,旨在为 CH₄ 卫星反演研究工作的后续发展提供一些参考。

2 遥感机理和甲烷卫星传感器

利用卫星遥感技术对大气 CH₄ 进行探测的方法可分为被动遥感和主动遥感。被动遥感主要依赖于 1.65 μm 和 2.3 μm 的短波红外(SWIR)和 8 μm 左右的热红外(TIR)波段^[27]。由此,CH₄ 探测被动传感器也相应地分成热红外传感器和短波红外传感器。短波红外传感器通过测量大气的后向散射获取信息,热红外传感器则通过大气热辐射进行测量。主动遥感方面,以 CH₄ 遥感激光雷达任务(MERLIN)为代表的传感器自主发射辐射,与大气相互作用后被接收,从而进行探测。图 1 展示了这 3 种探测方式的区别。不同探测方式的传感器在各类性能上差异较大,图 2 展示了后文介绍的所有卫星平台和传感器在空间分辨率与光谱分辨率上的区别。

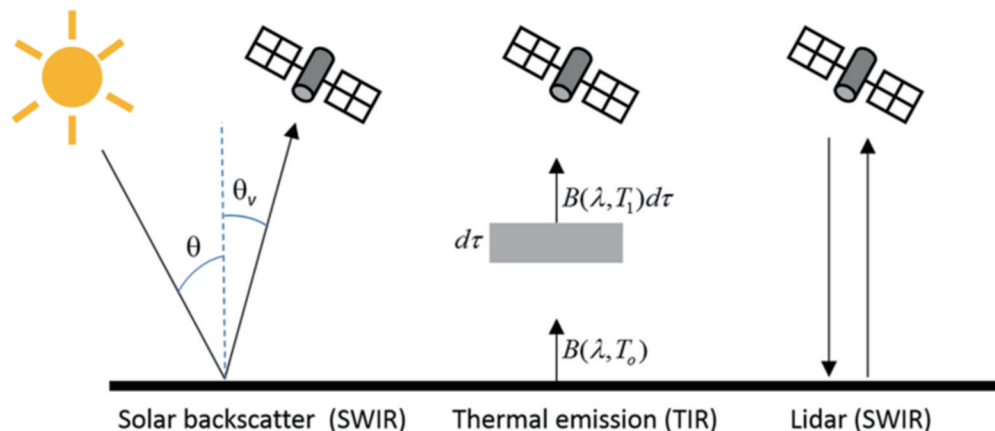


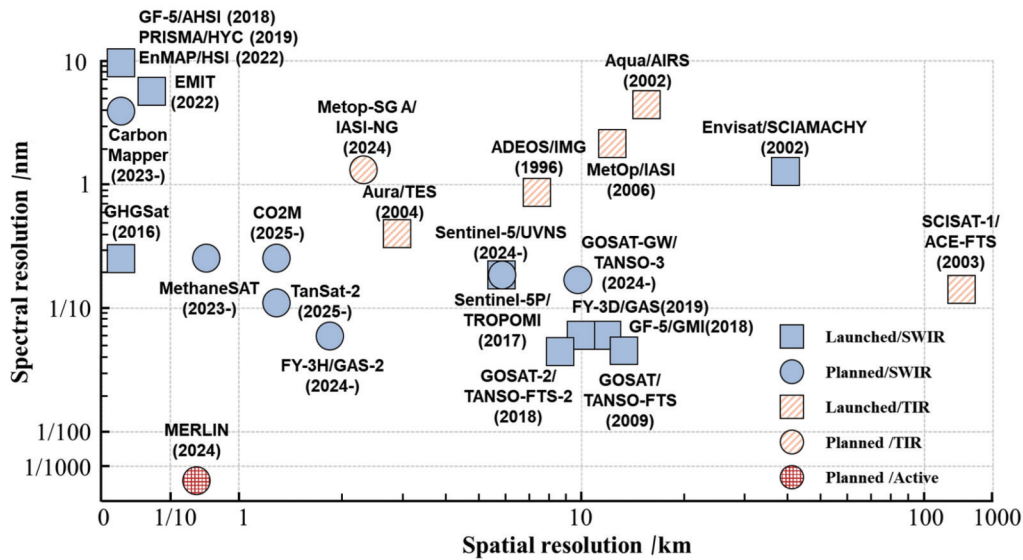
图 1 卫星探测大气 CH₄ 的不同模式比较^[27]

Fig. 1 Comparison of satellite observations of atmospheric methane in different ways^[27]

2.1 热红外卫星和传感器

大气 CH₄ 在 8 μm 左右的多个波段会吸收大气上行辐射,并在较低温度下重新发射。因此 CH₄ 浓度的变化会造成大气温度的变化,通过温度探测可反演 CH₄ 浓度。早期传感器主要基于这一原理进行设计,使其具备 CH₄ 探测能力。表 1 展示了国内外典型的热红外卫星和传感器的性能。

1996 年 8 月,由日本资源观测系统组织(JAROS)开发的高级地球观测卫星(ADEOS)成功发射升空,其上搭载了一个温室气体干涉仪(IMG)。IMG 是一个天底观测的傅里叶变换红外光谱仪(FTIR),可以探测出 CO₂、CH₄、N₂O 等温室气体的水平分布与垂直廓线。IMG 有 3 个波段,覆盖了 3.3~14.7 μm 的光谱范围,其中波段 1 (3.3~4.3 μm) 和波段 3 (5.0~



Notes: when the length and width of sensor pixels are inconsistent, the spatial resolution was drawn by the maximum; the spatial resolution of SCISAT-1/ACE-FTS was drawn on the limb mode.

图 2 CH₄卫星传感器的空间分辨率和光谱分辨率

Fig. 2 Spatial resolution and spectral resolution of methane satellite sensors

表 1 国内外典型的热红外卫星和传感器性能

Table 1 Performance of typical thermal infrared satellites and sensors at home and abroad

Satellite/ sensor	Launch date	Country / union	Altitude / km	Methane band / μm	Spectral resolution / nm	Spatial resolution	Precision
ADEOS/IMG	August 1996	Japan	803	7.8	0.91	8 km \times 8 km	4% (Clerbaux <i>et al.</i> , 2003)
Aqua/AIRS	May 2002	United States	705	7.6	6.33	H:13.5 km V:1 km	1.5% (Xiong <i>et al.</i> , 2010)
SCISAT-1/ ACE-FTS	August 2003	Canada	650	3.46-3.83, 6.84-8.03	0.12	H:500 km, V:1-2 km	<25% (De Mazière <i>et al.</i> , 2007)
Aura/TES	July 2004	United States	705	7.64-7.74	0.59	0.53 km \times 5.3 km	<3.5% (Wecht <i>et al.</i> , 2012)
MetOp/IASI	October 2006	European Union	827/817	7.14-8.33	2.96	4 km \times 12 km	1.20% (Xiong <i>et al.</i> , 2013)
MetOp -SG A/ IASI-NG	2024	European Union	835	3.7, 7.7	1.48	4 km \times 4 km	—

14.7 μm) 均可用于 CH₄ 探测^[28]。不过, 由于波段 1 的灵敏度有限, 通常依靠波段 3 中 7.8 μm 附近的通道进行探测^[29], 光谱分辨率高达 0.15 cm^{-1} , 测量不确定度为 4%^[30]。作为全球第一个高光谱分辨率红外探测仪, IMG 证明了高光谱卫星传感器探测痕量气体的可行性, 为之后痕量气体遥感探测的发展奠定了基础。

在大气 CH₄ 遥感探测方面, 欧美国家同样走在国际前列。早在 20 世纪 80 年代, 美国国家航空航天局 (NASA) 就发起了地球观测系统 (EOS) 计划。该计划旨在通过一系列极地轨道和低倾角卫星, 对陆地表面、

生物圈、大气和海洋等进行长期全球观测。依托 EOS 计划, 美国的 Aqua 卫星和 Aura 卫星分别于 2002 年 5 月和 2004 年 7 月发射升空。Aqua 卫星上搭载了一个光栅式高光谱红外光谱仪——大气红外探测仪 (AIRS)。AIRS 和同卫星上搭载的先进微波探测器 AMSU-A 代表了当时最先进的大气探测系统, 旨在完成天气预测与气候变化研究^[31]。AIRS 有 2378 个探测通道, 分成 3 个波段, 覆盖了 3.74~15.4 μm 的范围^[32]。其中大气 CH₄ 探测窗口在 7.6 μm 附近, 光谱分辨率 $\lambda/\Delta\lambda = 1200$ ^[33]。该传感器对大气 CH₄ 最敏感的区域

是对流层中上部,对 AIRS 的 CH_4 廓线产品与数千个飞机观测数据进行验证,大部分数据的均方根误差(RMSE)小于 1.5% ^[34]。Aura 卫星上则搭载了对流层发射光谱仪(TES),旨在进一步探究对流层中微量气体(如 CO 、 O_3 、 H_2O 和 CH_4 等)的含量、分布和混合情况的长期变化,包括源、汇、对流层-平流层交换及其对气候和生物圈的影响。TES 是一种高分辨率的傅里叶红外变换光谱仪,可进行临边和天底观测,天底观测的光谱分辨率为 0.1 cm^{-1} ,光谱覆盖范围为 $3.2\sim 15.4\ \mu\text{m}$ ^[35]。TES 传感器的 CH_4 探测窗口为 $7.64\sim 7.74\ \mu\text{m}$,反演算法为非线性最小方差拟合算法^[36-37]。将 TES 的 CH_4 产品 V004 和 V005 与 HIAPER 极点至极点观测(HIPPO)项目的 151 架飞机测量数据进行对比验证,结果表明,V004 的平均偏差为 65.8×10^{-9} ,而 V005 在对流层高层和对流层低层的平均偏差分别为 42.3×10^{-9} 和 $16.9\times 10^{-9}\sim 28.8\times 10^{-9}$ ^[38]。

2003 年 8 月,大气化学实验傅里叶变换红外光谱仪(ACE-FTS)搭载在 SCISAT-1 卫星上发射升空,目的是测量大气微量气体的垂直分布。ACE-FTS 的光谱分辨率高达 0.02 cm^{-1} ,覆盖了 $2.2\sim 13.3\ \mu\text{m}$ 的光谱范围^[39]。ACE-FTS 的 CH_4 探测窗口为 $3.46\sim 3.83\ \mu\text{m}$ 和 $6.84\sim 8.03\ \mu\text{m}$,v2.2 版的 CH_4 产品在对流层上部至平流层下部的精度小于 10% ,而在平流层中高部到中间层底部($<60\text{ km}$)的精度则在 25% 以内^[40]。

随后,法国国家太空研究中心(CNES)和欧洲气象卫星应用组织(EUMETSAT)共同研发了红外大气探测干涉仪(IASI)。IASI 是一台高光谱红外探测仪,搭载在欧洲航天局(ESA)的卫星 MetOp-A/B/C 上,于 2006 年 10 月发射。IASI 的主要目标是通过测量大气温度、水汽、云和痕量气体来支持区域和全球尺度的数值天气预报。该仪器是基于迈克耳孙干涉仪并耦合集成成像系统的傅里叶变换光谱仪,可以提供 $3.6\sim 15.5\ \mu\text{m}$ 波段的精细光谱采样,共有 8461 个通道,光谱分辨率为 0.5 cm^{-1} ^[41]。IASI 通常使用 $7.14\sim 8.33\ \mu\text{m}$ 波段对 CH_4 进行探测与反演。将 IASI 的 CH_4 产品与 HIAPER 极点至极点观测项目的飞机观测数据进行对比分析,结果表明,374~477 hPa 层的偏差和残差标准差分别为 -1.74% 和 1.2% ,596~753 hPa 层的偏差和残差标准差分别为 -0.69% 和 1.07% ^[42]。作为 IASI 的继承,下一代红外大气探测干涉仪(IASI-NG)搭载在 MetOp-SG(MetOp 系列第二代)卫星上,将于 2024 年发射。IASI-NG 依然可以对云、气溶胶、温室气体和其他痕量气体等进行探测,并对 IASI 的光谱与辐射性能进行改进。IASI-NG 在 $3.62\sim 16\ \mu\text{m}$ 波段有 16921 个光谱采样通道,光谱分辨率为 0.25 cm^{-1} , CH_4 探测窗口在 $3.7\ \mu\text{m}$ 和 $7.7\ \mu\text{m}$ 附近。与 IASI 相比,IASI-NG 的辐射噪声预计至少减少一半,其光谱分辨率的提高有利于获得更好的垂直分辨率,而辐射噪声

的减少则会提高 IASI-NG 产品的精度^[43]。

利用热红外卫星和传感器,早期的 CH_4 探测得以顺利发展。但是,热红外仪器观测对流层下部时灵敏度很低,而 CH_4 的源和汇主要存在于地表附近,这使得它们在检测区域 CH_4 排放方面的作用有限^[27],而短波红外传感器则能在很大程度上弥补这一短板。

2.2 短波红外卫星和传感器

在短波红外区域, CH_4 分子存在许多泛频带和组合频带,尤其是在 $1.66\ \mu\text{m}$ 和 $2.3\ \mu\text{m}$ 附近。使用这两个波段,可以对 CH_4 吸收特征进行有效表征,从而获得 CH_4 浓度信息。而且,短波红外对近地 CH_4 浓度变化更为敏感,能弥补热红外的不足。因此,后期发展的星载传感器大多使用短波红外卫星进行 CH_4 探测。典型卫星传感器的主要参数见表 2。

搭载在 ESA 的大型环境监测卫星 ENVISAT 上的扫描成像吸收光谱大气制图仪(SCIAMACHY),是全球首个采用短波红外吸收带作为探测波段的星载探测器,于 2002 年 3 月发射升空。SCIAMACHY 具有天底、掩星、临边等观测模式,能够有效测量地球大气的化学成分。它是一个覆盖了紫外到短波红外的辐射探测器,一共有 8 个通道,波长范围为 $0.24\sim 2.38\ \mu\text{m}$ ^[44]。通道 6 中的 $1.63\sim 1.67\ \mu\text{m}$ 波段和通道 8 中的 $2.26\sim 2.38\ \mu\text{m}$ 波段均可以进行 CH_4 探测,光谱分辨率分别为 1.48 nm 和 0.26 nm ^[45-46]。但是,通道 8 进行 CH_4 反演时会受到探测器冰层的影响,故一般使用通道 6^[47]。Frankenberg 等^[48]使用迭代最大后验差分吸收光谱算法对 CH_4 浓度进行了反演,发现标准偏差为 1.5% 。由于 SCIAMACHY 传感器性能的衰退, CH_4 反演精度自 2005 年底后不断下降^[49]。但是它仍然为后续温室气体传感器的研制奠定了良好的基础,使其朝着高光谱分辨率的方向发展。

随后,日本开启了温室气体观测卫星(GOSAT)系列任务。第一代 GOSAT 卫星于 2009 年 1 月发射到太阳同步轨道,搭载了热红外和近红外碳观测仪(TANSO),旨在对温室气体实现全球监测。TANSO 由傅里叶变换光谱仪(FTS)和云与气溶胶成像仪(CAI)构成。前者用于温室气体探测,后者用于同步收集云和气溶胶信息,进行协同反演。TANSO-FTS 共包含 4 个波段,分别为 $0.758\sim 0.775\ \mu\text{m}$ 、 $1.56\sim 1.72\ \mu\text{m}$ 、 $1.92\sim 2.08\ \mu\text{m}$ 和 $5.56\sim 14.3\ \mu\text{m}$,一般在 $1.6\ \mu\text{m}$ 附近对 CH_4 进行探测与反演,光谱分辨率为 0.2 cm^{-1} 。使用美国国家海洋和大气管理局(NOAA)的飞机测量数据对 GOSAT 反演的大气 CH_4 平均干空气柱浓度(X_{CH_4})进行验证,发现整体结果非常吻合,陆地上的平均偏差为 1.5×10^{-9} ,而海洋上则为 4.1×10^{-9} ^[50]。经过多年的优化更新之后,其精度达到了 0.7% ^[51]。GOSAT-2 卫星于 2018 年 10 月发射,直接对 GOSAT 卫星进行了继承,也搭载了第二代傅里叶

表 2 国内外典型的短波红外卫星和传感器
Table 2 Typical short-wave infrared satellites and sensors at home and abroad

Satellite/ sensor	Launch date	Country/union	Altitude / km	Methane band / μm	Spectral resolution / nm	Spatial resolution	Precision
Envisat/ SCIAMACHY	March 2002	European Union	800	1.63-1.67	1.48	60 km \times 30 km	1.5% (Frankenberg <i>et al.</i> , 2006)
GOSAT/ TANSO-FTS	January 2009	Japan	666	1.6	0.05	10.5 km \times 10.5 km	0.7% (Kuze <i>et al.</i> , 2016)
GOSAT-2/ TANSO-FTS-2	October 2018	Japan	613	1.67	0.05	9.7 km \times 9.7 km	0.26% (NIES, 2021)
Sentinel-5P/ TROPOMI	October 2017	European Union	824	2.3	0.25	7 km \times 5.5 km	0.8% (Lorente <i>et al.</i> , 2021)
GF-5/GMI	May 2018	China	708	1.65	0.07	10.3 km \times 10.3 km	—
FY-3D/GAS	January 2019	China	836	1.65, 2.3	0.07, 0.14	10 km \times 10 km	—
GOSAT-GW/ TANSO-3	2024	Japan	666	1.6	0.2	10 km/1-3 km	0.5% (NIES, 2021)
Sentinel-5/UVNS	2024	European Union	8175	1.67, 2.3	0.25	7 km \times 7 km	—
CO2M	2025	European Union	602	1.65	0.3	2 km \times 2 km	0.53% (Sierk <i>et al.</i> , 2021)
FY-3H/GAS-2	2024	China	836	1.6, 2.3	0.07, 0.10	3 km \times 3 km	—
TanSat-2	2025	China	—	2.3	0.11	<2 km \times 2 km	0.53% (Liu <i>et al.</i> , 2022)
GHGSat	2016/2020/ 2021/2022	Canada	512-550	1.63-1.67	0.3-0.7	25 m \times 25 m	0.95% (Jervis <i>et al.</i> , 2021)
GF-5/AHSI	May 2018	China	708	2.11-2.45	10	30 m \times 30 m	3.3% (Irakulis-Loitxate <i>et al.</i> , 2021)
PRISMA/HYC	March 2019	Italy	615	2.11-2.45	10	30 m \times 30 m	7.8% (Irakulis-Loitxate <i>et al.</i> , 2021)
EnMAP/HSI	April 2022	Germany	653	2.2-2.4	10	30 m \times 30 m	3%-7% (Cusworth <i>et al.</i> , 2019)
EMIT	July 2022	United States	400	2.2-2.4	7-10	60 m \times 60 m	—
MethaneSAT	2023	United States	—	1.60-1.68	0.3	100 m \times 400 m	0.1% (Rohrschneider <i>et al.</i> , 2021)
Carbon Mapper	2023	United States	400	2.3	5	30 m \times 30 m	—

变换光谱仪(TANSO-FTS-2)。它新增了SIF和CO探测通道,提高了信噪比,使得温室气体探测的精度更

高^[52]。该传感器的光谱分辨率小于 0.2 cm^{-1} ,覆盖了 $0.75\sim 0.77\ \mu\text{m}$ 、 $1.56\sim 1.69\ \mu\text{m}$ 、 $1.92\sim 2.38\ \mu\text{m}$ 和

5.6~14.30 μm 的范围, CH_4 的探测窗口在 1.67 μm 附近^[53], 陆地 500 km 格网和海洋 2000 km 格网上空的目标精度为 5×10^{-9} ^[54]。GOSAT 和 GOSAT-2 性能稳定且精度较高, 为全球温室气体监测作出了突出贡献。

随着温室气体探测需求的日益增长, 加上探测技术愈发成熟, 大气 CH_4 探测卫星迎来了更加快速的发展。Sentinel-5P 是 ESA 于 2017 年 10 月 13 日发射的一颗全球大气污染气体监测卫星, 其上搭载了一台技术先进、空间分辨率高的大气监测光谱仪, 即对流层监测仪 (TROPOMI)。该仪器的成像幅宽达 2600 km, 分辨率为 7 km \times 5.5 km, 可以做到每日全球覆盖, 极大地提高了卫星的时空覆盖能力。TROPOMI 是一种推扫式光谱仪, 在三大光谱测量区域开展探测, 这三大区域分别是 270~495 nm 的紫外-可见光光谱区域 (UV-VIS)、675~775 nm 的近红外光谱区域 (NIR) 和 2305~2385 nm 的短波红外光谱区域 (SWIR)。TROPOMI 使用 2.3 μm 附近的光谱信息进行 CH_4 反演, 光谱分辨率为 0.25 nm, 反演精度可达 0.8%^[55-57]。迄今为止, TROPOMI 依然是世界上技术最先进、空间分辨率最高的大气监测光谱仪之一, 其 CH_4 反演产品也得到了广泛应用。

与此同时, 我国也在 CH_4 探测方面发展迅速。2018 年 5 月发射升空的 GF-5 卫星是我国高分重大科技专项中搭载载荷最多、光谱分辨率最高的卫星, 也是世界首颗实现对大气和陆地进行综合观测的全谱段高光谱卫星。其上搭载的温室气体监测仪 (GMI) 采用空间外差光谱技术分光, 具有波段任意选择和超光谱分辨特性, 是国际上首台基于该体制的星载温室气体遥感设备。该仪器针对 O_2 、 CO_2 、 CH_4 等设置了 4 个波段, 覆盖了 0.759~0.769 μm 、1.568~2.058 μm 的光谱范围, 其中 CH_4 的探测通道为 1.642~1.658 μm , 光谱分辨率为 0.27 cm^{-1} , 力求获取全球 CH_4 柱浓度数据产品^[58-59]。2019 年 1 月, 我国又发射了新一代极轨气象卫星 FY-3D, 其上搭载了一台近红外高光谱温室气体监测仪 (GAS)。GAS 是国内首台星载干涉型温室气体传感器, 其探测方式为光栅分光, 设置了 2 个近红外波段和 2 个短波红外波段, 分别为 0.75~0.77 μm 、1.56~1.72 μm 、1.92~2.08 μm 和 2.20~2.38 μm 。其中波段 2 和 4 均可用于 CH_4 的探测, 中心波长分别为 1.6 μm 和 2.3 μm , 光谱分辨率为 0.27 cm^{-1} ^[60]。GF-5 和 FY-3D 均为我国碳监测提供了有效助力^[61-63]。

此外, 还有多颗 CH_4 探测卫星正在规划中。GOSAT 系列的新一代卫星 GOSAT-GW 正是其中的重要代表。GOSAT-GW 将于 2024 年发射, 在 GOSAT 和 GOSAT-2 任务之后继续长期观测温室气体并提供其全球分布数据。GOSAT-GW 将携带第三代热红外和近红外碳观测仪 TANSO-3。与前两代碳观测仪不同, TANSO-3 是一台光栅成像光谱仪, 空间覆盖能力更强, 有效弥补了前两代不能进行空间连续

探测的缺陷。TANSO-3 预计设置 3 个波段, 分别在 0.45 μm 、0.7 μm 、1.6 μm 附近, 光谱分辨率小于 0.2 nm, 目标探测精度优于 10×10^{-9} ^[54]。

作为欧盟哥白尼计划的一部分, Sentinel 系列任务的哨兵五号 (Sentinel-5) 任务的主要目标是在全球范围内对关键微量气体和气溶胶进行探测, 主要数据产品有 O_3 、 NO_2 、 SO_2 、 HCHO 、 CO 、 CH_4 和气溶胶的光学厚度 (AOD)。该任务设计搭载了一台紫外线/可见/近红外/短波红外光谱仪 (UVNS), 这是一种推扫式光谱仪, 计划搭载在 MetOp-SG A 卫星上发射。UVNS 一共设置了 7 个波段, 覆盖了 270~2385 nm 的光谱范围, 能对 CH_4 及多种痕量气体进行观测^[64-65]。UVNS 利用 1.67 μm 和 2.3 μm 两个短波红外波段进行 CH_4 探测, 光谱分辨率为 0.25 nm, 其扫描幅宽、时空分辨率与 TROPOMI 基本一致^[55]。欧盟哥白尼碳监测任务 (CO2M) 是欧洲哥白尼哨兵的扩展任务, 其主要目标是对人为排放的 CO_2 进行探测, 同时也能对 CH_4 、 NO_2 进行探测。CO2M 计划于 2025 年发射 2 颗哨兵 7 号卫星, 能提供高空间分辨率 (2 km \times 2 km) 和高信噪比的精准观测, 其中 CH_4 的探测窗口为 1.65 μm , 光谱分辨率为 0.3 nm, 探测精度预期将达到 10×10^{-9} ^[66-67]。

地球静止轨道碳循环观测站 (GeoCarb) 的任务是 NASA 对 OCO-2 和 OCO-3 的继承, 原计划于 2024 年发射第一颗静止轨道卫星, 开展 CO_2 、 CH_4 等温室气体的高频次观测。GeoCarb 传感器是一台四通道狭缝扫描光谱仪, 可获取 7.57~7.69 μm 、1.60~1.62 μm 、2.04~2.08 μm 和 2.30~2.35 μm 波段吸收光谱的有效信息, 其中 2.3 μm 波段是 CH_4 的探测窗口, 光谱分辨率为 0.2 nm^[68]。当信噪比大于 150 时, CH_4 的测量不确定度上限为 5×10^{-9} ^[69]。GeoCarb 位于美洲上空 35800 km 处, 可对 50°S~50°N 的广大区域进行扫描, 能对美洲主要城市、工业区、农业区、森林等进行观测, 将填补近地轨道卫星时空上的数据空白^[69]。然而, 遗憾的是, 出于技术、成本、新数据源可用性等考量, NASA 已于 2022 年 11 月 30 日宣布取消该任务, 并将寻求新的替代方案。

与此同时, 我国也在加紧碳监测卫星的建设。第二代近红外高光谱温室气体监测仪 GAS-2 将搭载在 FY-3H 卫星上发射。与 GAS 相比, GAS-2 的空间分辨率提升至 3 km, 2.3 μm 探测通道的光谱分辨率提升至 0.1 nm, CH_4 的探测效率与精度将得以显著提高。此外, 第二代碳卫星 (TanSat-2) 预计在第一代碳卫星 (TanSat) 的基础上增加 2.305~2.385 μm 的短波红外通道, 用于 CH_4 和 CO 的探测。同时, TanSat-2 的幅宽预计从 20 km 提升至超过 100 km, 有效提高了时空覆盖度和全球探测能力^[25,70]。

除上述全球或大范围观测卫星之外, 点源探测也成为现阶段的研究热点。近年来, 基于高光谱成像的点源探测卫星和传感器呈现井喷式发展。多个国家,

甚至商业公司均开展了 CH₄ 点源排放监测研究。GHGSat 系列卫星星座是加拿大 GHGSat 公司为开展高空间分辨率全球温室气体探测工作而搭建的卫星,主要针对点源的检测与量化。GHGSat 星座目前由 6 颗卫星组成,分别是 2016 年 6 月发射的 GHGSat-D (Claire)、2020 年 9 月发射的 GHGSat-C1 (Iris)、2021 年 1 月发射的 GHGSat-C2 (Hugo) 以及于 2022 年发射的 GHGSat-C3 (Luca)、C4 (Penny) 和 C5 (Diako)。每颗卫星都配备了广角法布里-珀罗 (WAF-P) 成像光谱仪,能覆盖 1630~1675 nm 的短波红外波段,并据此进行 CH₄ 探测。GHGSat 系列卫星的空间分辨率高达 25 m, X_{CH₄} 反演精度能达到 18×10^{-9} , 对于点源排放的高精度估算具有重大意义^[71-72]。

我国 GF-5 卫星上搭载的可见光短波红外高光谱相机 (AHSI) 也是点源探测的典型代表。它是第一个利用凸光栅分光光度法和改进的三同心镜 (Offner) 配置的星载高光谱传感器,共有 330 个波段,覆盖了 0.4~2.5 μm 的光谱范围, VNIR 和 SWIR 的光谱分辨率分别为 5 nm 和 10 nm。AHSI 的幅宽为 60 km, 空间分辨率高达 30 m。利用 2.11~2.45 μm 的光谱通道,可以对点源 CH₄ 浓度进行探测,精度可达 63×10^{-9} ^[73]。

PRISMA (PREcursore IperSpettrale della Missione Applicativa) 是意大利航天局 (ASI) 于 2008 年开发的中分辨率高光谱成像任务,是已终止的地球观测高光谱卫星 (HypSEO) 任务的后续任务。2019 年 3 月 22 日,与该任务同名的 PRISMA 卫星发射升空,携带了一个高光谱相机 (HYC)。该仪器覆盖了 400~2505 nm 的光谱范围,光谱分辨率优于 10 nm,空间分辨率高达 30 m,能提供可见光、近红外和短波红外波段的高光谱观测^[74-75]。与高分五号上的 AHSI 类似, HYC 利用 2110~2450 nm 的窗口,可对 CH₄ 浓度进行探测,精度为 149×10^{-9} ^[73]。

环境测绘和分析计划 (EnMAP) 是一项德国开发的卫星任务,旨在获取地球大气层和地表的高光谱图像数据。该任务于 2022 年 4 月 1 日发射了同名卫星,并搭载了一台高光谱成像仪 (HSI)。该仪器是一台推扫式成像仪,能对 430~2450 nm 的光谱范围进行观测。EnMAP 在 VNIR 和 SWIR 通道中设置了 228 个光谱波段,光谱分辨率分别为 6.5 nm 和 10 nm。空间分辨率为 30 m,最大幅宽为 30 km^[76]。其中,2200~2400 nm 可作为 CH₄ 的探测窗口,探测精度高达 3%~7%^[77]。

基于 NASA 开展的地表矿物粉尘源调查 (EMIT) 任务,同名载荷 EMIT 于 2022 年 7 月 14 日由 SpaceX 第 25 次商业补给服务任务 (CRS-25) 发射,并被安装在国际空间站上。EMIT 是一台高光谱成像光谱仪,覆盖了 380~2500 nm 的光谱范围,光谱采样间隔为 7.4 nm,空间分辨率为 60 m^[78]。由于具备 2200~

2400 nm 这一 CH₄ 特征通道, EMIT 也可用于全球 CH₄ 点源探测^[77]。

MethaneSAT 任务由美国与新西兰共同开发,部署了一颗对地观测卫星 MethaneSAT, 预计于 2023 年发射,其主要目标是对占全球石油和天然气产量 80% 以上的地区的 CH₄ 排放进行系统监测。MethaneSAT 卫星具有约 200 km 的幅宽和 100 m×400 m 的高空间分辨率,能够获得 CH₄ 排放的定量观测结果。MethaneSAT 搭载了一个高性能光谱仪 CH₄ 传感系统,覆盖了 1605~1683 nm 的光谱范围,具有 0.1 nm 的光谱采样和 0.3 nm 的光谱分辨率, CH₄ 探测阈值为 2×10^{-9} ^[79]。

Carbon Mapper 是美国 Planet 公司开发的能在全球范围内实现精确定位、量化和跟踪 CO₂ 和 CH₄ 排放点源的高光谱卫星星座。首批卫星有两个,计划于 2023 年发射。其地面分辨率高达 30 m,光谱分辨率为 5 nm,能够实现 400~2500 nm 范围内的高信噪比探测,可提供高精度的 CO₂、CH₄ 点源数据^[80-82]。由于具有高光谱分辨率和高空间分辨率的特性,星载高分辨率成像光谱仪在 CH₄ 点源高精度探测领域具有良好的应用前景^[83]。

2.3 主动探测卫星和传感器

被动遥感探测是当前 CH₄ 卫星遥感的主流,但其依赖自然光源,且易受大气环境状态的干扰,因此探测时间和精度也受到限制。激光雷达探测卫星主动发射光源,不受日照时间限制,能削弱云和气溶胶的干扰,可以有效弥补被动遥感探测的缺陷,进行全天候高精度探测,提升探测效率。

CH₄ 遥感激光雷达 (MERLIN) 任务是由德国航空航天中心 (DLR) 和法国国家太空研究中心 (CNES) 联合开发的一项小卫星气候任务,主要目标是在全球范围内以高精度和高准确度对 CH₄ 进行探测,以获取其时空分布。MERLIN 任务采用一个积分路径差分吸收 (IPDA) 激光雷达探测器,计划于 2024 年发射。IPDA 技术依赖于差分吸收激光雷达 (DIAL) 测量,图 3 展示了双频集成路径差分吸收激光雷达的测量原理:仪器发射的激光被目标 (即地球表面或云顶) 反射到接收器,再被光电探测器转换为电信号,获取信息。该仪器通过获取 1.64 μm 附近两个波长的脉冲激光信息来对 CH₄ 进行反演,一个波长准确锁定在 CH₄ 吸收的特征光谱上,尽可能地减少频率偏移,以降低潜在的系统误差,另一个波长则选择 CH₄ 不吸收的波段,用作参考。两个脉冲测量点相距约 380 m,通过对 50 km 距离内的 CH₄ 柱浓度进行积分,可以确定平均 CH₄ 含量。此种测量方法可以在所有季节、所有纬度进行测量。同时,它还在很大程度上消除了气溶胶和水汽交叉敏感性的影响,因此反演误差很小,预期精度为 27×10^{-9} , 区域系统误差优于 3.7×10^{-9} ^[84-86]。

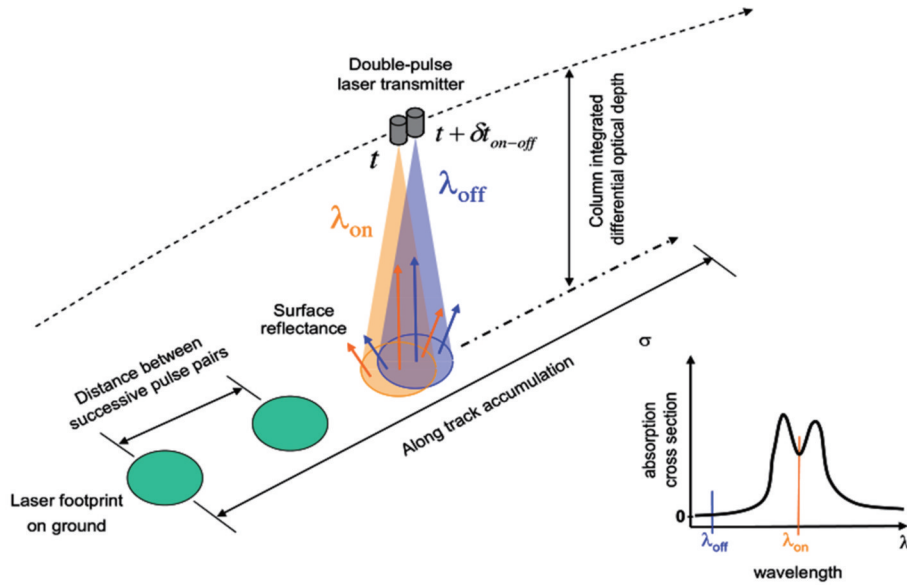


图 3 双频集成路径差分吸收激光雷达测量示意图^[86]

Fig. 3 Schematic of a two-frequency integrated path differential absorption lidar measurement^[86]

3 CH₄遥感算法

针对快速发展的CH₄探测卫星传感器,相应的算法也在不断发展与优化。大气CH₄反演的本质是利用卫星观测的相应波段的吸收光谱,去除其他因素的干扰,得到CH₄廓线或柱总量的有效信息。CH₄反演方法主要包括经验算法、物理算法和神经网络算法。由于回归模型稳定性不佳,因此经验算法的反演精度不高,应用也受到限制。物理算法是现阶段主流的CH₄反演方法,主要包括差分吸收光谱(DOAS)算法、Proxy反演算法、光子路径长度概率密度函数(PPDF)算法和全物理(FP)算法等。它通过对大气辐射传输过程的模拟来求解CH₄浓度,具有较高的精度。神经网络算法是伴随着计算机技术与人工智能的发展而出

现的,目前也取得了不错的成果,但仍有待完善。

3.1 DOAS算法

DOAS算法的本质是通过拟合低阶多项式方法将由大气气体消光引起的波长快速变化部分和由瑞利散射与气溶胶米散射消光作用造成的波长缓慢变化部分进行分离,从而计算气体的浓度^[87]。

在DOAS算法的基础上,Buchwitz等^[88-89]开发了一种针对SCIAMACHY的近红外优化DOAS算法,称为加权函数修正差分吸收光谱(WFM-DOAS)法。该算法在进行差分吸收光谱的拟合时用气体柱总量加权函数代替吸收截面,可以对CH₄、CO、CO₂、H₂O、N₂O等气体的柱浓度进行反演。WFM-DOAS算法在对观测光谱进行精确标定的情况下,对波长λ处的太阳归一化辐射强度取自然对数后进行一阶泰勒展开,表示为

$$\ln I_i^{\text{means}}(V^t, b^t) \approx \ln I_i^{\text{mod}}(\bar{V}, \bar{b}) + \frac{\partial \ln I_i^{\text{mod}}}{\partial V_j} \Big|_{\bar{V}} \times (\hat{V} - \bar{V}) + \sum_{j=1}^F \frac{\partial \ln I_i^{\text{mod}}}{\partial b_j} \Big|_{\bar{b}} \times (\hat{b}_j - \bar{b}_j) + P_i, \quad (1)$$

式中: I_i^{means} 、 I_i^{mod} 分别为 λ_i 处归一化辐射强度的观测值和模拟值; V^t 、 \bar{V} 、 \hat{V} 分别表示大气成分柱总量的真值、模拟值和反演值; b_j 表示大气温度、压强、气溶胶、云参数和地表反照率等参数; P_i 为低阶多项式。通过调整模式输入,基于最小二乘法实现模拟光谱和观测光谱的最佳匹配,即

$$\left\| \ln I_i^{\text{means}}(V^t, b^t) - \ln I_i^{\text{mod}}(\bar{V}, \bar{b}) \right\|^2 \equiv \left\| \eta_{\text{RES}, i} \right\|^2 \rightarrow \min, \quad (2)$$

式中: $\eta_{\text{RES}, i}$ 为模拟光谱和观测光谱的差值。由此即可完成 X_{CH_4} 的反演,精度优于1%。

Frankenberg等^[90]也针对SCIAMACHY开发了一种改进的迭代最大后验概率DOAS算法,即IMAP-

DOAS算法。该算法根据比尔定律直接迭代吸收气体的垂直柱浓度,直到模拟的光学厚度与测量值相符。IMAP-DOAS算法恰当地考虑了由吸收线压力展宽导致的压力测量敏感性,因此避免了经典算法中出现的反演垂直柱浓度偏差。

此类差分吸收光谱法的思想均是通过低阶多项式的拟合去除散射作用,但这并不完全符合大气辐射传输过程,因此会造成一定的误差。与此同时,虽然该算法对光谱分辨率的要求不高,但对光谱定标精度和气象因素的测量精度要求较高,并且受云影响较大。

3.2 Proxy算法

Proxy算法的原理是选取一种含量稳定、准确度

高的大气成分作为参照物,对该成分和 CH₄在共同吸收带上进行浓度反演。由于大多数大气散射和仪器效应基本相似,因此可以使用该成分作为参考来衡量散射引起的光路改变,对 CH₄浓度进行修正^[91-92]。

一般而言,该成分通常选择为 CO₂,这是因为 CO₂和 CH₄在 1.6 μm 处均具有吸收特征。利用此方法反演得到的大气 CH₄的柱平均干空气摩尔分数 X_{CH₄}为

$$X_{\text{CH}_4} = \frac{\kappa_{\text{CH}_4}}{\kappa_{\text{CO}_2}} \times X_{\text{CO}_2}, \quad (3)$$

式中:κ_{CH₄}和 κ_{CO₂}分别为 CH₄和 CO₂的柱总量数密度,二者均是通过无散射的假设推断而来。X_{CO₂}是由先验知识提供的大气 CO₂的柱平均干空气摩尔分数。X_{CH₄}反演精度通常取决于先验知识的准确性以及系统误差消除的准确度,一般为 0.6%~2%^[93]。

英国莱斯特大学提出的针对 GOSAT 卫星的 UoL-Proxy 算法正是 Proxy 反演方法的典型代表^[94],通过此方法反演的 GOSAT 数据产品也在不断迭代更新,V9.0 版本的单次测量精度为 13.72×10⁻⁹^[95]。

3.3 PPDF 算法

PPDF 算法是一种简化的估计方法。大气辐射传输中,薄卷云与气溶胶散射会造成光辐射传输路径的延长或缩短,从而导致光子光程发生变化。PPDF 是光子路径长度概率密度分布方程,主要通过校正光子光程来减少大气 CH₄反演中薄卷云与气溶胶所造成的反演误差。

PPDF 算法将整层大气分为两层:下层大气包含云和气溶胶,太阳光会多次散射,导致光程加长;上层大气不含气溶胶,太阳光经云顶反射后光程缩短。整层大气的有效透过率模型可表示为

$$\bar{T} = \alpha \cdot T_2(h_a) + (1 - \alpha) \cdot T_1(\gamma, \rho, h_a) \cdot T_2(h_a), \quad (4)$$

式中:α为云顶的反射率;T₁和 T₂分别为下层和上层大气的透过率;h_a为下层大气层顶高度;ρ为光子在下层大气中的路径修正因子;γ为下层大气 PPDF 的线型校正因子。α、h_a、ρ和 γ为引入的 4 个描述散射效应的参数因子,即 PPDF 因子,两层大气的透过率 T₁和 T₂均为 PPDF 因子的函数。PPDF 算法的基本原理为通过特定波段反演得到 PPDF 因子,然后据此修正大气有效透过率模型来估算散射影响。

PPDF 参数化和等价定理的应用排除了反演过程中由光散射导致的耗时较长的辐射传输计算^[96-97]。此外,PPDF 算法在路径长度修正方面累积了多种因素,如地表地形、气溶胶和云特征等的净效应,能够减少大气校正所需的参数数量,提高效率。

利用 PPDF 算法可对 GOSAT 数据进行 X_{CH₄}反演,单次测量精度小于 1%^[98]。优化后的 PPDF-S 算法在陆地上的 X_{CH₄}反演偏差与标准偏差仅为 1.4×10⁻⁹和 14.1×10⁻⁹^[99]。

3.4 全物理算法

全物理反演算法是现阶段使用最多的一种大气成分反演方法,由正向辐射传输模式和反演过程的迭代更新构成。卫星遥感的正演过程描述了大气参量到观测值之间的物理过程,利用辐射传输物理过程模拟出传感器的辐射亮度。该过程可以表示为

$$y = F(x, b) + \epsilon, \quad (5)$$

式中:向量 x 表示大气 CH₄浓度;b 表示其他参数;ε 表示仪器误差和模型误差;向量 y 表示观测的辐射值;F 表示前向模型,一般采用现有的大气辐射传输模型。反演过程是在最优化理论下建立代价函数,以迭代的形式逐步逼近真值。定义代价函数 J(x)为

$$J(x) = [y - F(x)]^T S_e^{-1} [y - F(x)] + [x - x_a]^T S_a^{-1} [x - x_a], \quad (6)$$

式中:S_e表示观测辐射的误差协方差矩阵;x_a表示未知目标向量的初始值;S_a表示能够确切描述背景场先验值的协方差矩阵。此反演问题的本质是寻求代价函数的最小值。采用 Levenberg-Marquardt(L-M)迭代算法

$$x_{(i+1)} = x_i + \left[(1 + \gamma) S_a^{-1} + K_i^T S_e^{-1} K_i \right]^{-1} \left\{ K_i^T S_e^{-1} [y - F(x_i)] - S_a^{-1} (x_i - x_a) \right\}, \quad (7)$$

式中:x_a为先验估计值;x_i为 x 的第 i 次迭代值;S_e表示卫星探测仪器协方差噪声矩阵;S_a为初始估计值协方差误差矩阵;F(x_i)为前向模型在 x_i处的估计值;K_i为前向模型在 x_i处的 Jacobi 矩阵;γ 为 L-M 系数。在大气 CH₄反演中,反演的状态 x 向量为各层的 CH₄浓度,在迭代收敛后,将各层的 CH₄浓度按压力权重分配后获得 CH₄的柱浓度 X_{CH₄}。全物理算法的精度较高,国际上主流的 CH₄卫星遥感算法均为此算法,如 NIES-FP、UoL-FP、RemoTeC、RemoTAP、FOCAL、IAPCAS 等。

NIES-FP 由日本 NIES 开发,是 GOSAT 的标准算法。该算法包括三步:首先,采用多种云检测方法选取无云观测场景;其次,基于无云场景利用最优估计方法反演 CO₂和 CH₄柱浓度;最后,进行质量检测。在 NIES-FP v01.xx 算法中,为了减少偏振的影响,NIES-FP 用两个正交偏振的测量光谱生成一个总强度谱,并采用双 k 分布的快速标量辐射传输模型进行前向模拟,以降低计算成本。为了避免可能的误差,在反演过程中去掉了受太阳夫琅禾费谱线干扰的光谱通道^[100]。NIES-FP v01.xx 算法有几个主要的误差来源,随后开发的 NIES-FP v02.xx 算法针对这些误差项进行改进:其一,将 v01.xx 使用的 Kurucz 太阳辐照度数据库替换为 Toon 太阳辐照度数据库;其二,对 v01.xx 计算气溶胶光学参数时使用的 SPEINTAS 模式进行优化,并采用更准确的气溶胶廓线对气溶胶进行修正;其三,对通道一的模拟电路进行更为准确的校正。因此,v02.xx 算法反演 CH₄浓度的偏差和标准差由

v01. xx 算法的 -20.4×10^{-9} 和 18.9×10^{-9} 分别提升至 -5.9×10^{-9} 和 12.6×10^{-9} [101]。

UoL-FP 是英国莱斯特大学开发的一种全物理算法。该算法采用 LIDORT 辐射传输模型,通过添加特征矩阵的方法来求解辐射传输方程,并且引入一个快速二阶散射矢量辐射传输模型来修正偏振效应。尽管该算法是针对 OCO 和 OCO-2 的 CO_2 反演而开发的,但它也适用于其他传感器的数据,可进行算法测试和验证 [102]。随后,莱斯特大学又使用该算法对 GOSAT 卫星数据进行 CH_4 反演,并生成相应的 $\text{CH}_4_GOS_OCFP$ 产品。经 TCCON 验证,该产品的陆地反演平均偏差和标准差分别为 -0.31×10^{-9} 和 13.94×10^{-9} [103]。

RemoTeC 算法由荷兰空间研究所 (SRON) 和德国卡尔斯鲁厄理工学院 (KIT) 联合开发 [104-106]。最初是针对 OCO 和 GOSAT 的 CO_2 反演,随后经过改进成为 TROPOMI 的 CH_4 反演的标准算法。RemoTeC 算法使用了 2305~2385 nm 和 757~774 nm (氧 A 波段) 两个波段。正演模型采用线性化辐射传输模型 LINTRAN,充分考虑了多次散射。相关大气痕量气体的吸收截面和气溶胶光学性质根据查找表计算而来。反演过程则使用 Phillips-Tikhonov 正则化方法和 Gauss-Newton 迭代方案。RemoTeC 算法是计算速度最快的 CH_4 反演算法之一,经验证,它在校正气溶胶和卷云的影响方面表现良好。针对晴空和有云场景,在约 80% 的情况下 X_{CH_4} 误差小于 0.5%,约 95% 的情况下误差小于 1% [107]。

RemoTAP 算法是 SRON 针对 CO2M 任务开发的,可以根据其上搭载的多角度多波段偏振仪 (MAP) 和 CO_2 成像仪 (CO2I) 的测量数据进行痕量气体和气溶胶协同反演。RemoTAP 算法起源于基于 MAP 测量的 SRON 气溶胶反演算法 (SRON-MAP 算法),并结合 RemoTeC 算法进行了扩展。RemoTAP 结合了二者的优势,可以灵活地实现多种目的,包括痕量气体和气溶胶的单独反演与协同反演。该算法使用 LINTRAN v2.0 作为正演模型,使用代表大气成分 (痕量气体、气溶胶、云和卷云)、表面反射和观测几何真实组合的场景进行综合模拟和反演。针对 X_{CO_2} 反演,过滤卷云后, RMSE 可达 0.63×10^{-6} [108]。

FOCAL 算法是 Reuter 等 [109-110] 针对 OCO-2 开发的快速大气痕量气体反演算法,用于 CO_2 反演,后来逐渐应用到其他卫星传感器的多种气体反演上。FOCAL 近似描述了由大气中单个散射层的散射引起的光路变化。此外,还考虑了地表的朗伯散射,并且使用了 S 和 P 两个偏振方向的光谱信息 [111]。针对 GOSAT 生产的 FOCAL v3.0 X_{CH_4} 产品,与 TCCON 验证的单站偏差为 4.3×10^{-9} ,平均偏差为 12×10^{-9} ,能满足 ESA 哥白尼地球观测计划的相应需求 [112]。

针对我国碳卫星 TanSat,中国科学院大气物理研

究所开发了 IAPCAS 这一标准算法。该算法引入了矢量线性化离散纵坐标辐射传输模型 (VLIDORT) 来模拟大气中的辐射传输过程。吸收系数采用 LBLRTM 辐射传输模型计算,其中包含瑞利散射。 CO_2 廓线、水汽廓线、温度廓线、地表反照率和波数位移等状态参数可同时反演。将 TanSat 算法运用到 GOSAT 上进行 CO_2 反演, TCCON 验证结果表明,大部分结果的误差在 1% 之内。在中纬度地区, TanSat 算法的反演结果与 GOSAT 和 ACOS V2.9 产品的统计结果相似,而在中高纬度地区, TanSat 算法的误差则略大 [113]。

尽管不同算法在正演模式构建方面差异较大,但它们的理论基础基本一致,反演结果精度也相当。由于能够较为精确地模拟大气辐射传输过程,全物理算法成为现阶段精度最高的算法。

3.5 神经网络算法

在基于最优化估计的全物理算法中,针对每一个测量点反演的计算量很大:一方面,需要对高分辨率光谱的辐射量进行计算;另一方面,需要多次计算模式的 Jacobian 矩阵,耗时长,对算力的要求很高。神经网络能在很大程度上改善这一问题,它是一种高效的数学工具,可用来对复杂的非线性关系进行模拟与计算,对卫星数据进行实时处理。

Turquet 等 [114] 开发了一种基于神经网络的快速算法,针对 IASI 传感器,几乎能够完成 CH_4 浓度的实时反演。图 4 是该算法中神经网络的示意图。以此为例,该网络是两层隐藏层的前向反馈神经网络,包括输入层、两层隐藏层和输出层。输入层由 m 个观测辐亮度和 l 个温度组成,构成了 $m+l$ 个神经元。隐藏层和输出层通过权值和传递函数对输出进行估计。隐藏层传递函数 f 可以采用非线性程度较高的 S 函数式,而输出层传递函数 g 采用线性函数式,即

$$f(x) = \tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}, \quad (8)$$

$$g(x) = x. \quad (9)$$

输出量可以表示为

$$\hat{c}(p) = g \left\{ \sum_{k=1}^{s_2} w_{pk}^3 f \left\{ \sum_{j=1}^{s_1} w_{kj}^2 f \left[\sum_{i=1}^m w_{ji}^1 y(i) + \sum_{i=m+l}^{m+l} w_{ji}^1 \hat{b}(i-m) + \beta_j^1 \right] + \beta_k^2 \right\} + \beta_p^3 \right\}, \quad (10)$$

式中: w 为各层的权值; i 代表输出层元素; j, k 表示隐藏层神经元元素; β 表示各层之间的偏差。对于具体的反演应用,网络元素有所不同。神经网络反演的一个重要过程就是学习训练,即对权值 w 的确定。常采用的方法是基于大量统计数据库的误差反向传播学习算法,即根据网络实际输出和期望输出之间的差值大小来调整权值,直到满足条件。

通过神经网络,可以构造精确快速的前向模式和

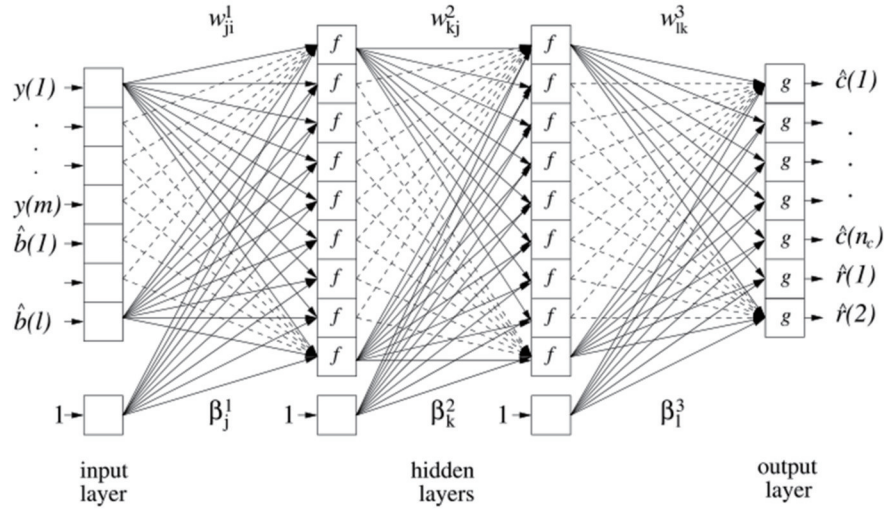


图 4 两层隐藏层的前向反馈神经网络示意图^[114]

Fig. 4 Schematic of a neural network with 2 hidden layers^[114]

精确性好的反演算法,从而实现卫星大气参数的快速反演与实时应用,因此此类方法也得到了一些应用,其精度也能控制在 2% 以内^[114]。不过,神经网络算法对光谱分辨率的要求相对较高,且需要大量统计数据进行模型训练,并对未知的情况缺少处理能力。现阶段,神经网络算法相对不如物理方法成熟和可靠^[114-115]。

4 CH₄卫星遥感发展趋势

近二十年来,全球对大气 CH₄ 卫星遥感探测的热度不断升温,也发射了一系列 CH₄ 探测卫星,探测手段越来越丰富,传感器的性能也在不断优化^[116]。从低轨

到高轨、从被动到主动、从单一到协同,空间分辨率与时间分辨率越来越高,探测通道也越来越丰富。这些均为大气 CH₄ 卫星遥感的全球化、精细化探测奠定了良好的基础。未来,CH₄ 探测卫星传感器将继续朝着高时空分辨率、高精度、高准确性和连续观测一体化的目标迈进。同时,由于单颗卫星仍难以满足 CH₄ 全球高精度探测的需求,因此有必要加快开展卫星组网建设工作。采用多星组网进行观测,能够实现更高的重访率、灵敏度、精确度,提供快速的全球覆盖服务,进一步提升大气 CH₄ 卫星遥感探测能力。图 5 展示了未来几年国际上规划的典型 CH₄ 探测任务或卫星。

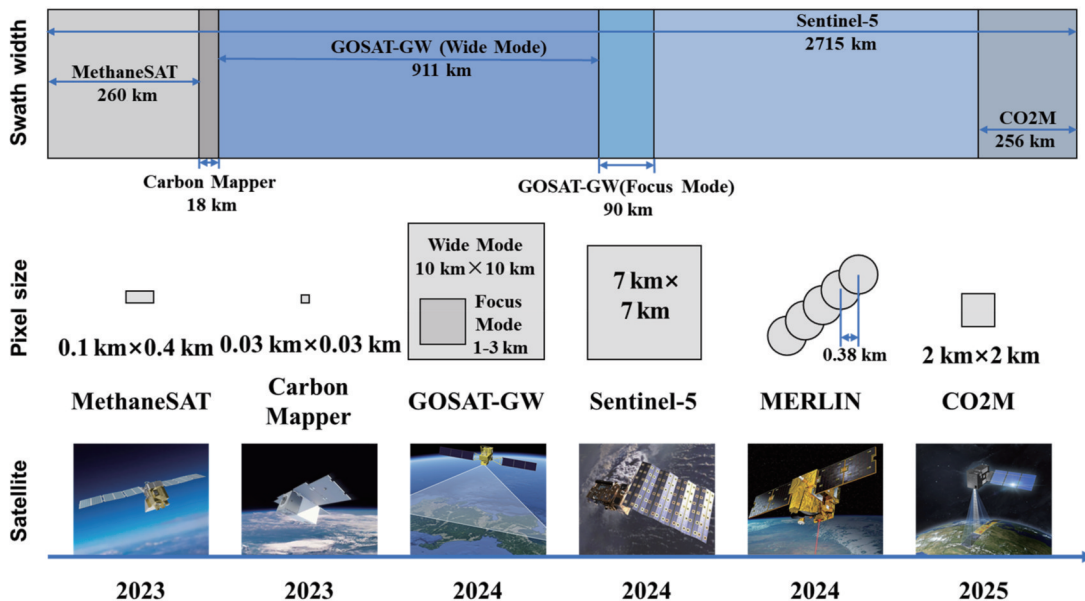


图 5 未来几年国际上规划的典型 CH₄ 探测任务或卫星

Fig. 5 CH₄ missions or satellites planned internationally in the coming years

随着 CH₄ 卫星遥感平台与传感器的快速发展,其对应的算法也在不断发展与优化。目前针对 CH₄ 反演

的主流算法大多是基于最优化估计的物理算法,并在此基础上有针对性地进行各类改进与优化,从而在算

法的精确度、稳定性以及运行时间等方面均得到明显提升。以 NIES-FP、UoL-FP、RemoTeC、RemoTAP、IAPCAS、FOCAL 为代表的全物理算法,其精度已达 6×10^{-9} 。与此同时,各类新型算法如神经网络算法等也不断涌现,这些方法给 CH_4 反演带来了新的突破。但是,为了满足全球碳盘点的需求,对 CH_4 观测数据和反演产品的精度、覆盖率和计算速度等提出了新的要求。就算是目前最为精确的全物理算法,依然有很大的完善空间,如采用更为准确的正演辐射传输模型和先验信息、对气溶胶进行协同反演与校正、采用更为可靠的云识别方法等。同时,面对多星组网的发展趋势,实现多星联合反演与验证也极为重要。

随着全球气候治理与温室气体减排进程的加速,越来越多的国家制定并施行了一系列 CH_4 减排举措。我国在 2020 年 9 月明确提出了“双碳”目标,即 2030 年完成“碳达峰”与 2060 年完成“碳中和”。为达到此目标,我国制定了多个政策与规划,也多次强调了 CH_4 减排的重要性,相关工作也在有条不紊地推进之中。但是,气候治理与碳排放问题非常复杂,甚至在某种程度上上升为各国博弈的焦点^[117]。在此背景下,我国大气 CH_4 卫星遥感的发展更是丝毫不能松懈,应高度重视、大力发展、抢占先机^[118]。我国已部署启动“下一代碳卫星”任务,将实现主被动融合观测,大幅拓宽探测时空范围,提高时空分辨率,增加有效数据量,实现高精度的全方位探测,从而为我国“双碳”目标的实现提供坚实基础与坚强助力^[24-26]。

5 结 论

CH_4 作为第二大温室气体,对地气系统的辐射平衡起着重要作用。准确探测大气 CH_4 的浓度,对全球气候治理与碳排放控制均具有重要意义。在众多探测方法中,卫星遥感因其低成本、高效率的特点成为主流方式之一,其具有高时空分辨率、高精度的大气 CH_4 浓度监测特性,为 CH_4 减排提供了坚实的科学依据。

从早期以 IMG、AIRS 为代表的热红外传感器,到近地 CH_4 浓度变化更为敏感的短波红外传感器,如 SCIAMACHY、TANSO-FTS、TROPOMI、Sentinel-5 等,再到以 MERLIN 为代表的主动型探测载荷, CH_4 探测传感器的性能越来越好,探测精度逐步提升。随着传感器的迅猛发展, CH_4 反演算法也不断改进。从经验算法到高精度物理方法,再到快速运行的神经网络算法;从原始的基本方法,到针对特定传感器进行改进与优化的算法, CH_4 反演算法在各方面均有了巨大飞跃。由于平台传感器和反演算法的高速发展,大气 CH_4 探测精度也迅速提高,以 TROPOMI、MethaneSAT 为代表的平台或载荷已基本达到 GCOS 制定的 10×10^{-9} 的 CH_4 探测精度要求,未来仍有望进一步提升。

近年来,我国在大气 CH_4 卫星遥感方面的发展与

应用也十分迅速,成功发射了以 GF-5、FY-3D 为代表的多颗观测卫星,并开发了相应算法,为 CH_4 监测和减排提供了强有力的支撑。同时,这些成果为实现我国的“双碳”目标提供了科技支持,也为中国的低碳可持续发展奠定了坚实的基础。但仍然亟需加快推进 CH_4 卫星遥感和反演研究,以便更好地为我国的低碳经济 and 环境保护事业作出贡献。

参 考 文 献

- [1] IPCC. Climate change 2022: impacts, adaptation and vulnerability working group II contribution to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[EB/OL]. [2022-11-09]. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>.
- [2] IPCC. Climate change 2021: the physical science basis: contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[EB/OL]. [2022-11-09]. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>.
- [3] Mitchell J F B. The "Greenhouse" effect and climate change[J]. *Reviews of Geophysics*, 1989, 27(1): 115-139.
- [4] van Houtan K S, Tanaka K R, Gagné T O, et al. The geographic disparity of historical greenhouse emissions and projected climate change[J]. *Science Advances*, 2021, 7(29): eabe4342.
- [5] Fletcher S E M, Schaefer H. Rising methane: a new climate challenge[J]. *Science*, 2019, 364(6444): 932-933.
- [6] Schaefer H, Fletcher S E M, Veidt C, et al. A 21st-century shift from fossil-fuel to biogenic methane emissions indicated by $^{13}\text{CH}_4$ [J]. *Science*, 2016, 352(6281): 80-84.
- [7] Cheng C H, Redfern S A T. Impact of interannual and multidecadal trends on methane-climate feedbacks and sensitivity [J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 1-11.
- [8] NOAA. Increase in atmospheric methane set another record during 2021[EB/OL]. [2022-11-09]. <https://www.noaa.gov/news-release/increase-in-atmospheric-methane-set-another-record-during-2021>.
- [9] US EPA O. Understanding global warming potentials[EB/OL]. [2022-11-09]. <https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials>.
- [10] Schneising O, Buchwitz M, Reuter M, et al. A scientific algorithm to simultaneously retrieve carbon monoxide and methane from TROPOMI onboard Sentinel-5 Precursor[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2019, 12(12): 6771-6802.
- [11] Lelieveld J, Crutzen P J, Dentener F J. Changing concentration, lifetime and climate forcing of atmospheric methane[J]. *Tellus B*, 1998, 50(2): 128-150.
- [12] Anderson B, Bartlett K B, Frohling S, et al. Methane and nitrous oxide emissions from natural sources[EB/OL]. [2022-11-09]. https://scholars.unh.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1483&context=earthsci_facpub&httpsredir=1&referer=.
- [13] Saunio M, Stavert A R, Poulter B, et al. The global methane budget 2000 - 2017[J]. *Earth System Science Data*, 2020, 12(3): 1561-1623.
- [14] Ghosh A, Patra P K, Ishijima K, et al. Variations in global methane sources and sinks during 1910-2010[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, 15(5): 2595-2612.
- [15] Wuebbles D J, Hayhoe K. Atmospheric methane and global change[J]. *Earth-Science Reviews*, 2002, 57(3/4): 177-210.
- [16] Isaksen I S A, Bernsten T K, Dalsøren S B, et al. Atmospheric ozone and methane in a changing climate[J]. *Atmosphere*, 2014, 5(3): 518-535.
- [17] Wunch D, Toon G C, Blavier J F L, et al. The total carbon

- column observing network[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 2011, 369(1943): 2087-2112.
- [18] De Mazière M, Thompson A M, Kurylo M J, et al. The Network for the Detection of Atmospheric Composition Change (NDACC): history, status and perspectives[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, 18(7): 4935-4964.
- [19] Webster C R, May R D, Trimble C A, et al. Aircraft (ER-2) laser infrared absorption spectrometer (ALIAS) for in situ stratospheric measurements of HCl, N₂O, CH₄, NO₂, and HNO₃[J]. *Applied Optics*, 1994, 33(3): 454-472.
- [20] Scott D C, Herman R L, Webster C R, et al. Airborne Laser Infrared Absorption Spectrometer (ALIAS-II) for in situ atmospheric measurements of N₂O, CH₄, CO, HCl, and NO₂ from balloon or remotely piloted aircraft platforms[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(21): 4609-4622.
- [21] Vane G, Crisp M, Enmark H T. Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS): an advanced tool for Earth remote sensing[J]. *Remote Sensing: From Res. Towards Operational Use*, 1984, 2: 751-757.
- [22] Thorpe A K, Frankenberg C, Aubrey A D, et al. Mapping methane concentrations from a controlled release experiment using the next generation airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS-NG) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 179: 104-115.
- [23] Hintsä E J, Moore F L, Hurst D F, et al. UAS Chromatograph for Atmospheric Trace Species (UCATS): a versatile instrument for trace gas measurements on airborne platforms[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2021, 14(10): 6795-6819.
- [24] 刘毅, 王婧, 车轲, 等. 温室气体的卫星遥感: 进展与趋势[J]. *遥感学报*, 2021, 25(1): 53-64.
Liu Y, Wang J, Che K, et al. Satellite remote sensing of greenhouse gases: progress and trends[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, 25(1): 53-64.
- [25] 刘良云, 陈良富, 刘毅, 等. 全球碳盘点卫星遥感监测方法、进展与挑战[J]. *遥感学报*, 2022, 26(2): 243-267.
Liu L Y, Chen L F, Liu Y, et al. Satellite remote sensing for global stocktaking: methods, progress and perspectives[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2022, 26(2): 243-267.
- [26] 李正强, 谢一淞, 石玉胜, 等. 大气环境卫星温室气体和气溶胶协同观测综述[J]. *遥感学报*, 2022, 26(5): 795-816.
Li Z Q, Xie Y S, Shi Y S, et al. A review of collaborative remote sensing observation of greenhouse gases and aerosol with atmospheric environment satellites[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2022, 26(5): 795-816.
- [27] Jacob D J, Turner A J, Maasakkers J D, et al. Satellite observations of atmospheric methane and their value for quantifying methane emissions[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, 16(22): 14371-14396.
- [28] Shimoda H, Ogawa T. Interferometric monitor for greenhouse gases (IMG) [J]. *Advances in Space Research*, 2000, 25(5): 937-946.
- [29] Ogawa T, Shimoda H, Hayashi M, et al. IMG, interferometric measurement of greenhouse gases from space[J]. *Advances in Space Research*, 1994, 14(1): 25-28.
- [30] Clerbaux C, Hadji-Lazaro J, Turquety S, et al. Trace gas measurements from infrared satellite for chemistry and climate applications[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2003, 3(5): 1495-1508.
- [31] Aumann H H, Pagano R J. Atmospheric infrared sounder on the earth observing system[J]. *Optical Engineering*, 1994, 33(3): 776-784.
- [32] Thrastarson H T, Fetzer E F, Ray S, et al. Overview of the AIRS mission: instruments, processing algorithms, products, and documentation[EB/OL]. [2022-11-09]. https://docs.eosdis.nasa.gov/public/project/AIRS/Overview_of_the_AIRS_Mission.pdf.
- [33] Xiong X Z, Barnet C, Maddy E, et al. Characterization and validation of methane products from the Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2008, 113(G3): G00A01.
- [34] Xiong X Z, Barnet C, Maddy E, et al. Seven years' observation of mid-upper tropospheric methane from atmospheric infrared sounder[J]. *Remote Sensing*, 2010, 2(11): 2509-2530.
- [35] Beer R, Glavich T A, Rider D M. Tropospheric emission spectrometer for the Earth Observing System's Aura satellite[J]. *Applied Optics*, 2001, 40(15): 2356-2367.
- [36] Bowman K W, Rodgers C D, Kulawik S S, et al. Tropospheric emission spectrometer: retrieval method and error analysis[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(5): 1297-1307.
- [37] Payne V H, Clough S A, Shephard M W, et al. Information-centered representation of retrievals with limited degrees of freedom for signal: application to methane from the Tropospheric Emission Spectrometer[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2009, 114(D10): D10307.
- [38] Wecht K J, Jacob D J, Wofsy S C, et al. Validation of TES methane with HIPPO aircraft observations: implications for inverse modeling of methane sources[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, 12(4): 1823-1832.
- [39] Soucy M A A, Chateaufort F, Deutsch C, et al. ACE-FTS instrument detailed design[J]. *Proceedings of SPIE*, 2002, 4814: 70-81.
- [40] De Mazière M, Vigouroux C, Bernath P F, et al. Validation of ACE-FTS v2.2 methane profiles from the upper troposphere to the lower mesosphere[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, 8(9): 2421-2435.
- [41] Siméoni D, Singer C, Chalou G. Infrared atmospheric sounding interferometer[J]. *Acta Astronautica*, 1997, 40(2/3/4/5/6/7/8): 113-118.
- [42] Xiong X, Barnet C, Maddy E S, et al. Mid-upper tropospheric methane retrieval from IASI and its validation[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, 6(9): 2255-2265.
- [43] Crevoisier C, Clerbaux C, Guidard V, et al. Towards IASI-New Generation (IASI-NG): impact of improved spectral resolution and radiometric noise on the retrieval of thermodynamic, chemistry and climate variables[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2014, 7(12): 4367-4385.
- [44] Burrows J P, Hölzle E, Goede A P H, et al. SCIAMACHY: scanning imaging absorption spectrometer for atmospheric cartography[J]. *Acta Astronautica*, 1995, 35(7): 445-451.
- [45] Buchwitz M, de Beek R, Noël S, et al. Atmospheric carbon gases retrieved from SCIAMACHY by WFM-DOAS: version 0.5 CO and CH₄ and impact of calibration improvements on CO₂ retrieval[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006, 6(9): 2727-2751.
- [46] Frankenberg C, Bergamaschi P, Butz A, et al. Tropical methane emissions: a revised view from SCIAMACHY onboard ENVISAT[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(15): L15811.
- [47] Gludemans A M S, Schrijver H, Kleipool Q, et al. The impact of SCIAMACHY near-infrared instrument calibration on CH₄ and CO total columns[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2005, 5(9): 2369-2383.
- [48] Frankenberg C, Meirink J F, Bergamaschi P, et al. Satellite cartography of atmospheric methane from SCIAMACHY on board ENVISAT: analysis of the years 2003 and 2004[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2006, 111(D7): D07303.
- [49] Frankenberg C, Aben I, Bergamaschi P, et al. Global column-averaged methane mixing ratios from 2003 to 2009 as derived from SCIAMACHY: trends and variability[J]. *Journal of*

- Geophysical Research: Atmospheres, 2011, 116(D4): D04302.
- [50] Inoue M, Morino I, Uchino O, et al. Validation of X_{CH_4} derived from SWIR spectra of GOSAT TANSO-FTS with aircraft measurement data[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2014, 7(9): 2987-3005.
- [51] Kuze A, Suto H, Shiomi K, et al. Update on GOSAT TANSO-FTS performance, operations, and data products after more than 6 years in space[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2016, 9(6): 2445-2461.
- [52] Yoshida Y, Someya Y, Ohya H, et al. Analysis of the on-orbit instrumental characteristics of TANSO-FTS-2 onboard GOSAT-2 to improve the SWIR L2 Product[C]. AGU Fall Meeting Abstracts, 2021, 2021: A55R-1662.
- [53] Yoshida Y, Oshio H. GOSAT-2 TANSO-FTS-2 SWIR L2 retrieval algorithm theoretical basis document[EB/OL]. [2022-11-09]. https://prdct.gosat-2.nies.go.jp/documents/pdf/ATBD_FTS-2_L2_SWL2_en_00.pdf.
- [54] NIES, GOSAT-GW mission: background, aims, and mission requirements, 2021[EB/OL]. [2022-11-09]. <https://gosat-gw.global-atmos-chem-lab.jp/en/collaboration>.
- [55] Checa-Garcia R, Landgraf J, Galli A, et al. Mapping spectroscopic uncertainties into prospective methane retrieval errors from Sentinel-5 and its precursor[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2015, 8(9): 3617-3629.
- [56] Lorente A, Borsdorff T, Butz A, et al. Methane retrieved from TROPOMI: improvement of the data product and validation of the first 2 years of measurements[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2021, 14(1): 665-684.
- [57] Veefkind J P, Aben I, McMullan K, et al. TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: a GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 120: 70-83.
- [58] 熊伟. 高分五号卫星大气主要温室气体监测仪优化设计及数据分析[J]. 上海航天, 2019, 36(S2): 167-172.
- Xiong W. Optimum design and data analysis of greenhouse gases monitoring instrument on GF-5 satellite[J]. Aerospace Shanghai, 2019, 36(S2): 167-172.
- [59] Chen L F, Letu H S, Fan M, et al. An introduction to the Chinese high-resolution earth observation system: Gaofen-1~7 civilian satellites[J]. Journal of Remote Sensing, 2022, 2022: 1-14.
- [60] 朱爱军, 胡秀清, 林曼筠, 等. 风云三号D气象卫星全球数据获取方法及数据分发[J]. 海洋气象学报, 2018, 38(3): 1-10.
- Zhu A J, Hu X Q, Lin M Y, et al. Global data acquisition methods and data distribution for FY-3D meteorological satellite[J]. Journal of Marine Meteorology, 2018, 38(3): 1-10.
- [61] 吴时超, 王先华, 叶函函, 等. 应用于GF-5卫星的大气CO₂协同反演算法[J]. 光学学报, 2021, 41(15): 1501002.
- Wu S C, Wang X H, Ye H H, et al. Atmospheric CO₂ cooperative inversion algorithm applied to GF-5 satellite[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(15): 1501002.
- [62] 吴浩, 王先华, 叶函函, 等. 用于温室气体反演的云检测算法[J]. 光学学报, 2019, 39(5): 0501001.
- Wu H, Wang X H, Ye H H, et al. Cloud detection algorithm for greenhouse gas retrieval[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(5): 0501001.
- [63] 李勤勤, 王先华, 叶函函, 等. 大气CO₂反演误差分析与精度验证[J]. 光学学报, 2020, 40(6): 0601003.
- Li Q Q, Wang X H, Ye H H, et al. Atmospheric CO₂ inversion error analysis and accuracy verification[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(6): 0601003.
- [64] Irizar J, Melf M, Bartsch P, et al. Sentinel-5/UVNS[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 11180: 1118004.
- [65] Costantino L, Cuesta J, Emili E, et al. Potential of multispectral synergism for observing ozone pollution by combining IASI-NG and UVNS measurements from the EPS-SG satellite[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2017, 10(4): 1281-1298.
- [66] Sierk B, Fernandez V, Bézy J L, et al. The Copernicus CO₂M mission for monitoring anthropogenic carbon dioxide emissions from space[J]. Proceedings of SPIE, 2021, 11852: 118523M.
- [67] Sierk B, Bézy J L, Lošcher A, et al. The European CO₂ monitoring mission: observing anthropogenic greenhouse gas emissions from space[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 11180: 111800M.
- [68] Sawyer K, Clark C, Katz N, et al. GeoCARB design maturity and geostationary heritage[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8867: 88670M.
- [69] Iii B M, Crowell S M R, Rayner P J, et al. The potential of the geostationary carbon cycle observatory (GeoCarb) to provide multi-scale constraints on the carbon cycle in the americas[J]. Frontiers in Environmental Science, 2018, 6: 1-13.
- [70] Yang D X, teamTanSat-2. Tan2Sat: the next generation of Chinese greenhouse gas monitoring satellite mission[C/OL]//IWGGMS-17, June 14, 2021[2022-11-09]. https://cce-datasharing.gsfc.nasa.gov/files/conference_presentations/Talk_Yang_119_25.pdf.
- [71] Ligorini M, Bradbury L M, Spina R, et al. GHGSat constellation: the future of monitoring greenhouse gas emissions[C/OL]//33rd AIAA/USU Conference on Small Satellites, August 6, 2019, Logan[2022-11-09]. <https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?filename=0&article=4388&context=smallsat&type=additional>.
- [72] Jervis D, McKeever J, Durak B O A, et al. The GHGSat-D imaging spectrometer[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2021, 14(3): 2127-2140.
- [73] Irakulis-Loitxate I, Guanter L, Liu Y N, et al. Satellite-based survey of extreme methane emissions in the Permian Basin[J]. Science Advances, 2021, 7(27): eabf4507.
- [74] Preti G, Cisbani A, Cosmo V D, et al. Hyperspectral instruments for earth observation[C/OL]//International conference on Space Optics, October. 2008: 14-17[2022-11-09]. https://www.researchgate.net/profile/Giampaolo-Preti/publication/228857657_Hyperspectral_Instruments_for_Earth_Observation/link/s/0deec533524704acc100000/Hyperspectral-Instruments-for-Earth-Observation.pdf.
- [75] de Cosmo V. Imaging spectrometers developments in Italian space agency[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10566: 1056627.
- [76] Guanter L, Kaufmann H, Segl K, et al. The EnMAP spaceborne imaging spectroscopy mission for earth observation[J]. Remote Sensing, 2015, 7(7): 8830-8857.
- [77] Cusworth D H, Jacob D J, Varon D J, et al. Potential of next-generation imaging spectrometers to detect and quantify methane point sources from space[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2019, 12(10): 5655-5668.
- [78] Green R O, Thompson D R, Team E. NASA's earth surface mineral dust source investigation: an earth venture imaging spectrometer science mission[C]//2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS, July 11-16, 2021, Brussels, Belgium. New York: IEEE Press, 2021: 119-122.
- [79] Rohrschneider R, Wofsy S, Franklin J, et al. The MethaneSAT mission[C/OL]//Small Satellite Conference, June 22, 2021[2022-11-09]. <https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?filename=0&article=5015&context=smallsat&type=additional>.
- [80] Keremedjiev M, Haag J, Shivers S, et al. Carbon mapper phase 1: two upcoming VNIR-SWIR hyperspectral imaging satellites[J]. Proceedings of SPIE, 2022, 12094: 62-68.
- [81] Duren R M, Guido J, Herner J, et al. Carbon Mapper: global tracking of methane and CO₂ point-sources[C/OL]//AGU Fall Meeting Abstracts, 2020, 2020: A247-01[2022-11-09]. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020AGUFMA247...01D/abstract>.

- [82] Duren R, Cusworth D, Ayasse A, et al. Carbon Mapper: on-orbit performance predictions and airborne prototyping[C/OL]//AGU Fall Meeting Abstracts. 2021, 2021: A53F-05[2022-11-09]. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2021AGUFM.A53F..05D/abstract>.
- [83] Guanter L, Irakulis-Loitxate I, Gorroño J, et al. Mapping methane point emissions with the PRISMA spaceborne imaging spectrometer[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 265: 112671.
- [84] Pierangelo C, Millet B, Esteve F, et al. MERLIN (methane remote sensing lidar mission): an overview[J]. *EPJ Web of Conferences*, 2016, 119: 26001.
- [85] Ehret G, Kiemle C, Wirth M, et al. Space-borne remote sensing of CO₂, CH₄, and N₂O by integrated path differential absorption lidar: a sensitivity analysis[J]. *Applied Physics B*, 2008, 90(3): 593-608.
- [86] Ehret G, Kiemle C, Wirth M, et al. The French-German climate mission MERLIN[J]. *Applied Physics B*, 2008, 90(3/4): 593-608.
- [87] Giovanelli G, Kostadinov I, Palazzi E, et al. UV-visible differential optical absorption spectroscopy (DOAS) [C/OL]. [2022-11-09]. https://www.researchgate.net/profile/John-Plane-2/publication/227555901_UV-Visible_Differential_Optical_Absorption_Spectroscopy_DOAS/links/5a13eb8f07e9b1e5730a9d3/UV-Visible-Differential-Optical-Absorption-Spectroscopy-DOAS.pdf.
- [88] Buchwitz M, Rozanov V V, Burrows J P. 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[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2000, 105 (D12): 15231-15245.
- [89] Barkley M P, Friess U, Monks P S. Measuring atmospheric CO₂ from space using Full Spectral Initiation (FSI) WFM-DOAS[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006, 6(11): 3517-3534.
- [90] Frankenberg C, Platt U, Wagner T. Iterative maximum a posteriori (IMAP)-DOAS for retrieval of strongly absorbing trace gases: model studies for CH₄ and CO₂ retrieval from near infrared spectra of SCIAMACHY onboard ENVISAT[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2005, 5(1): 9-22.
- [91] Frankenberg C, Meirink J F, van Weele M, et al. Assessing methane emissions from global space-borne observations[J]. *Science*, 2005, 308(5724): 1010-1014.
- [92] Parker R J, Boesch H, Byckling K, et al. Assessing 5 years of GOSAT Proxy X_{CH₄} data and associated uncertainties[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2015, 8(11): 4785-4801.
- [93] Butz A, Hasekamp O P, Frankenberg C, et al. CH₄ retrievals from space-based solar backscatter measurements: performance evaluation against simulated aerosol and cirrus loaded scenes[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2010, 115 (D24): D24302.
- [94] Parker R, Boesch H, Cogan A, et al. Methane observations from the Greenhouse Gases Observing SATellite: comparison to ground-based TCCON data and model calculations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(15): L15807.
- [95] Parker R J, Webb A, Boesch H, et al. A decade of GOSAT Proxy satellite CH₄ observations[J]. *Earth System Science Data*, 2020, 12(4): 3383-3412.
- [96] Oshchepkov S, Bril A, Yokota T. PPDF-based method to account for atmospheric light scattering in observations of carbon dioxide from space[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, 113(D23): D23210.
- [97] Parameterization of aerosol and cirrus cloud effects on reflected sunlight spectra measured from space: application of the equivalence theorem[EB/OL]. [2022-07-04]. <https://opg.optica.org/ao/abstract.cfm?uri=ao-46-13-2460>.
- [98] Bril A, Oshchepkov S, Yokota T, et al. Retrievals of atmospheric CO₂, CH₄ and optical path modifications from the GOSAT observations[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8890: 889008.
- [99] Iwasaki C, Imasu R, Bril A, et al. Validation of GOSAT SWIR X_{CO₂} and X_{CH₄} retrieved by PPDF-S method and comparison with full physics method[J]. *SOLA*, 2017, 13: 168-173.
- [100] Yoshida Y, Ota Y, Eguchi N, et al. Retrieval algorithm for CO₂ and CH₄ column abundances from short-wavelength infrared spectral observations by the Greenhouse gases observing satellite [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2011, 4(4): 717-734.
- [101] Yoshida Y, Kikuchi N, Morino I, et al. Improvement of the retrieval algorithm for GOSAT SWIR X_{CO₂} and X_{CH₄} and their validation using TCCON data[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, 6(6): 1533-1547.
- [102] Boesch H, Baker D, Connor B, et al. Global characterization of CO₂ column retrievals from shortwave-infrared satellite observations of the orbiting carbon observatory-2 mission[J]. *Remote Sensing*, 2011, 3(2): 270-304.
- [103] Boesch H, Anand J, Di Noia A. Product User Guide and Specification (PUGS)-ANNEX A for products 410 CO₂_GOS_OCFP, CH₄_GOS_OCFP & CH₄_GOS_OCFR (v7. 2, 2009-2018), 3-Nov-2019[EB/OL]. [2022-11-09]. https://www.iup.uni-bremen.de/carbon_ghg/docs/C3S/CDR5_2003-mid2020/C3S_D312b_Lot2.3.2.3-v3.0_PUGS-GHG_ANNEX-A_v5.0.pdf.
- [104] Wu L, Hasekamp O, Hu H, et al. Carbon dioxide retrieval from OCO-2 satellite observations using the RemoTeC algorithm and validation with TCCON measurements[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2018, 11(5): 3111-3130.
- [105] Butz A, Guerlet S, Hasekamp O, et al. Toward accurate CO₂ and CH₄ observations from GOSAT[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(14): L14812.
- [106] Butz A, Hasekamp O P, Frankenberg C, et al. Retrievals of atmospheric CO₂ from simulated space-borne measurements of backscattered near-infrared sunlight: accounting for aerosol effects[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(18): 3322-3336.
- [107] Hu H L, Hasekamp O, Butz A, et al. The operational methane retrieval algorithm for TROPOMI[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2016, 9(11): 5423-5440.
- [108] Lu S, Landgraf J, Fu G L, et al. Simultaneous retrieval of trace gases, aerosols, and cirrus using RemoTAP: the global orbit ensemble study for the CO₂M mission[J]. *Frontiers in Remote Sensing*, 2022, 3: 914378.
- [109] Reuter M, Buchwitz M, Schneising O, et al. A fast atmospheric trace gas retrieval for hyperspectral instruments approximating multiple scattering: part 1: radiative transfer and a potential OCO-2 XCO₂ retrieval setup[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(11): 1159.
- [110] Reuter M, Buchwitz M, Schneising O, et al. A fast atmospheric trace gas retrieval for hyperspectral instruments approximating multiple scattering: part 2: application to X_{CO₂} retrievals from OCO-2[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(11): 1102.
- [111] Noël S, Reuter M, Buchwitz M, et al. X_{CO₂} retrieval for GOSAT and GOSAT-2 based on the FOCAL algorithm[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2021, 14(5): 3837-3869.
- [112] Noël S, Reuter M, Buchwitz M, et al. Retrieval of greenhouse gases from GOSAT and GOSAT-2 using the FOCAL algorithm [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2022, 15(11): 3401-3437.
- [113] Liu Y, Yang D X, Cai Z N. A retrieval algorithm for TanSat X_{CO₂} observation: retrieval experiments using GOSAT data[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(13): 1520-1523.

- [114] Turquety S, Hadji-Lazaro J, Clerbaux C, et al. Operational trace gas retrieval algorithm for the Infrared Atmospheric Sounding Interferometer[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2004, 109(D21): D21301.
- [115] Fenwick R, Boesch H, Tyukin I. Neural networks for the retrieval of methane from the sentinel-5 precursor satellite[C]// 2020 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), July 19-24, 2020, Glasgow, UK. New York: IEEE Press, 2020.
- [116] Jacob D J, Varon D J, Cusworth D H, et al. Quantifying methane emissions from the global scale down to point sources using satellite observations of atmospheric methane[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2022, 22(14): 9617-9646.
- [117] 张岑, 李伟. 欧美甲烷减排战略与油气行业减排行动分析[J]. *国际石油经济*, 2021, 29(12): 16-23.
- Zhang C, Li W. Analysis of methane emission reduction strategies in Europe and America and actions of oil and gas industry[J]. *International Petroleum Economics*, 2021, 29(12): 16-23.
- [118] Sun Y W, Yin H, Wang W, et al. Monitoring greenhouse gases (GHGs) in China: status and perspective[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2022, 15(16): 4819-4834.

Satellite Sensors and Retrieval Algorithms of Atmospheric Methane

He Zhuo^{1,2}, Li Zhengqiang^{1,2*}, Fan Cheng¹, Zhang Ying^{1,2}, Shi Zheng^{1,2}, Zheng Yang¹,
Gu Haoran^{1,3}, Ma Jinji³, Zuo Jinhui^{1,2}, Han Yinghui², Zhang Yuanxun², Qin Kai⁴,
Zhang Hao^{1,2}, Xu Wenbin⁵, Zhu Jun⁶

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

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³School of Geography and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241003, Anhui, China;

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

⁵Beijing Institute of Environmental Features, Beijing 100143, China;

⁶DFH Satellite Co., Ltd., Beijing 100094, China

Abstract

Significance Global climate governance and greenhouse gas emission reduction are of great urgency. The volume fraction of atmospheric methane (CH₄) has been rising continuously since the industrial revolution and is now averaging about 1895.7×10^{-9} globally. In addition, since the global warming potential of CH₄ is about 27–30 times higher than that of carbon dioxide (CO₂), the monitoring of atmospheric CH₄ becomes the focus and hotspot of carbon emission reduction.

Satellite remote sensing features fast detection speed, wide coverage, and rich information. It can conduct continuous and stable observations of atmospheric CH₄ with high temporal and spatial resolution and high precision on a global scale and can provide verification and support for the "bottom-up" emission inventory.

Relying on the rapid development of satellite detection technology and the urgency to reduce greenhouse gas emissions, a large number of satellites with CH₄ detection capabilities have emerged in the past two decades. The detection technology has become more mature with increasingly higher detection accuracy. Additionally, corresponding algorithms of various satellite sensors have also made a huge leap forward. Rapid advances in both sensors and algorithms enable us to better monitor the temporal and spatial variability of atmospheric CH₄ and its impact on climate change.

With the purpose to promote the further development of CH₄ satellite remote sensing and retrieval research and realize the dual carbon target, it is necessary to summarize and discuss the existing research progress and future development trends, which can provide scientific and technological support for China's low-carbon sustainable development.

Progress Firstly, the development of atmospheric CH₄ satellites and sensors is reviewed and introduced. Early sensors mainly rely on the thermal infrared band of about 8 μm for CH₄ detection, and typical representatives include IMG, AIRS, and IASI (Table 1). Subsequently, a series of passive short-wave infrared sensors represented by SCIAMACHY, TANSO-FTS, and TROPOMI are developed. They rely on CH₄ characteristic bands near 1.6 μm and 2.3 μm for detection and are more sensitive to changes in near-surface CH₄ concentration. Among them, the high-resolution imaging spectral sensors and platforms represented by GHGSat, AHSI, and MethaneSAT also take advantage of their high spectral resolution and high spatial resolution to monitor the CH₄ point source emissions. There is no doubt that new energy is injected into the development of CH₄ satellite remote sensing (Table 2). In recent years, active detection represented by the methane remote sensing lidar mission (MERLIN) has also developed rapidly, effectively making up for

the shortcomings of passive remote sensing detection with improved detection efficiency.

Subsequently, the principles, application conditions, and retrieval accuracy of different sensor algorithms are summarized. From the early DOAS algorithm, proxy algorithm, and PPDF algorithm, to the most commonly employed full-physical algorithm with the highest precision at this stage, the physical algorithms have been continuously improved with enhanced efficiency and accuracy. The full-physical algorithms represented by NIES-FP, UoL-FP, RemoTeC, RemoTAP, IAPCAS, and FOCAL have an accuracy of 6×10^{-9} . At the same time, with the rapid development of computer technology and artificial intelligence, various new algorithms, such as neural network algorithms, are also emerging, which can almost complete the real-time retrieval of CH_4 . These methods have also brought breakthroughs to CH_4 retrieval.

Conclusions and Prospects In the future, CH_4 detection satellite sensors will continue to develop toward the goal of high temporal and spatial resolution, high precision, high accuracy, and continuous observation. Many high-performance satellites such as MethaneSAT, Sentinel-5, and CO2M are under planning (Fig. 5). Furthermore, the construction of the satellite network should be stepped up to meet the demands of CH_4 global high-precision detection. Correspondingly, new requirements are put forward for the accuracy, coverage, and calculation speed of CH_4 observation data and retrieval products. For the most accurate full-physical algorithm at present, the adoption of more accurate forward radiative transfer models and prior information, collaborative retrieval and correction of clouds and aerosols, and multi-satellite joint retrieval and verification are all important means for algorithm improvement.

With the accelerated global climate governance and reduced greenhouse gas emissions, more and more countries have formulated and implemented a series of CH_4 emission reduction measures, and China has also proposed the dual carbon target, which is steadily advancing. However, the issues of climate governance and carbon emissions are very complex, and to some extent have even become the focus of competition among countries. In this context, the development of China's atmospheric CH_4 satellite remote sensing cannot be slackened and should be highly valued and vigorously developed to seize opportunities. China has deployed the launch of the next-generation carbon satellite task, which will implement the main passive observation, and significantly broaden the range of detection time and space. Finally, the spatial and temporal resolution is improved to promote an effective amount of data and realize the full range of high-precision detection, thus providing a solid foundation and strong support for realizing a dual carbon target.

Key words atmospheric remote sensing; sensors; carbon emission reduction; greenhouse gas; methane; retrieval algorithms