

中国大气成分卫星遥感的发展与应用^①

张兴赢^{1,2} 王富³ 王维和^{1,2} 黄富祥^{1,2} 陈炳龙^{1,2} 高玲^{1,2} 王舒鹏^{1,2}
闫欢欢^{1,2} 叶函函⁴ 司福祺⁴ 洪津⁴ 李小英⁵ 曹琼⁶ 李正强⁵

(1 中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室/国家卫星气象中心, 北京 100081;
2 许建民气象卫星创新中心, 北京 100081; 3 中国气象局地球系统数值预报中心, 北京 100081;
4 中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所, 中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 合肥 230031;
5 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094; 6 上海卫星工程研究所, 上海 201109)

摘要: 大气成分 (ACs) 影响着大气圈与其他圈层的相互作用。卫星遥感的全球观测能力在大气成分监测方面发挥着独一无二的作用。我国从20世纪70年代开始实施风云气象卫星等遥感卫星计划。从1988年第一颗气象卫星发射经过了二十年的探索和积累, 2008年风云三号A星的成功发射实现我国自主卫星大气成分探测零的突破。随后, 我国成功实施了多个面向大气成分监测的科学探索和业务卫星计划, 大大促进了卫星遥感在气溶胶颗粒物、痕量气体和温室气体监测领域的研究与应用。其中, 极轨风云三号和静止风云四号两大系列业务卫星搭载的成像仪以及高分五号和大气环境监测卫星等搭载的气溶胶偏振测量仪, 分别提供了高空间覆盖和高时间分辨的气溶胶颗粒物观测。风云三号系列业务卫星和高分五号科学试验卫星上搭载的高光谱探测仪实现了多种痕量气体的监测, 而中国首颗全球大气二氧化碳科学试验卫星、风云三号D星和高分五号科学试验卫星先后实现了大气二氧化碳柱浓度的全球探测能力。同时, 20世纪90年代以来, 卫星大气成分遥感的地面真实性检验工作也取得了显著的进展。2022年4月我国刚刚发射成功的大气环境监测卫星, 在全球首次搭载有二氧化碳探测的主动激光雷达, 这将提供更高精度的大气二氧化碳和气溶胶颗粒物的观测资料, 更好服务于我国大气环境治理和“双碳”战略目标。

关键词: 中国卫星, 大气成分, 气溶胶颗粒物, 痕量气体, 温室气体

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2022.05.009

Development and Application of Satellite Remote Sensing for Atmospheric Compositions in China

Zhang Xingying^{1,2}, Wang Fu³, Wang Weihe^{1,2}, Huang Fuxiang^{1,2}, Chen Binglong^{1,2}, Gao Ling^{1,2}, Wang Shupeng^{1,2}, Yan Huanhuan^{1,2}, Ye Hanhan⁴, Si Fuqi⁴, Hong Jin⁴, Li Xiaoying⁵, Cao Qiong⁶, Li Zhengqiang⁵

(1 Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites (LRCVES/CMA), National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration (NSMC/CMA), Beijing 100081
2 Innovation Center for FengYun Meteorological Satellite (FYSIC), China Meteorological Administration (CMA), Beijing 100081
3 CMA Earth System Modeling and Prediction Centre (CEMC), Beijing 100081
4 Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031
5 State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Aerospace Information Research Institute, CAS, Beijing 100101
6 Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 201109)

Abstract: The variations of atmospheric compositions (ACs) can interfere in the interaction between the atmosphere and the Earth's other spheres. Satellite remote sensing plays a unique role in monitoring ACs by providing a matchless global perspective. Chinese remote sensing missions, including Chinese meteorological satellite mission namely Fengyun (FY) Satellite Programs, have been ongoing since 1970s. Twenty years after the first Fengyun satellite in 1988, the successful launch of FY-3A mission in 2008 marked a breakthrough of Chinese operational satellite missions for ACs monitoring. Since then, several operational satellite missions and pathfinders for ACs monitoring have been implemented, which have greatly promoted the research and application of satellite remote sensing for the measurement of aerosol particles, trace gases, and greenhouse gases (GHG). Among

收稿日期: 2021年12月3日; 修回日期: 2022年8月26日

第一作者: 张兴赢 (1978—), Email: zxy@cma.gov.cn

资助信息: 国家自然科学基金项目(41775028); 国家重点研发计划项目(2016YFB0500705, 2017YFB0504001)

① 首次发表于Zhang X, Wang F, Wang W, et al. The development and application of satellite remote sensing for atmospheric compositions in China. Atmospheric Research, 2020, 245: 105056. 依据 CC BY4.0翻译再出版。

them, imagers including the moderate resolution ones onboard operational polar FY-3 and high-temporal ones onboard operational geostationary FY-4 missions, as well as the directional polarization imagers onboard Gaofen-5 (GF-5) series and Atmosphere Environment Monitoring Satellite (AEMS), provide aerosol observation data with high spatial coverage and high temporal resolution, respectively. A variety of trace gases can also be monitored by the nadir spectrographs onboard the FY-3 series and GF-5 series and AEMS. In addition, hyper-spectrometers onboard FY-3 series, GF-5 series, AEMS and pathfinder mission TANSat are used to map the global distribution of GHG, providing various products such as column concentration of carbon dioxide. Meanwhile, in-situ calibration and validation have made significant progress since the late 1990s, offering insight into the consistency of satellite and ground observations across China. Launched in April 2022, AEMS is the first mission for ACs monitoring that is equipped with an active lidar for carbon dioxide and aerosol monitoring. This novel observation will be able to improve the accuracy of space-borne observations on carbon dioxide and aerosol particles and better serve the national strategic goal of “carbon dioxide peaking and carbon neutrality”.

Keywords: space mission of China, atmospheric compositions, aerosol particle, trace gases, greenhouse gases

0 引言

大气成分在地球生态系统中起着重要的作用，它影响到大气圈层与其他圈层之间的相互作用^[1]。自工业革命以来，人类活动排放加剧了大气成分的变化。其中，排放出的卤化碳破坏平流层臭氧，导致南极地区的“臭氧层空洞”^[2-3]；氮氧化物通过参与光催化作用反应在对流层产生臭氧和光化学烟雾^[4]；二氧化硫(SO₂)、二氧化氮(NO₂)和二氧化碳(CO₂)等酸性气体，则通过酸雨的方式对生物圈产生破坏^[5]。此外，汽车、建筑工业和烹饪等排放的各类气溶胶也影响着空气质量乃至地球辐射平衡的变化^[6]，特别是二氧化碳和甲烷等温室气体的快速增加，吸收了更多地表红外长波辐射而引起全球变暖，并导致了一系列如冰川融化、雪线升高和海平面上升等环境问题^[7]。

20世纪70年代初，气象卫星技术的发展开启了全球大气观测的新时代。最早是搭载在美国国家海洋大气局极轨卫星NOAA系列上的AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometers)首次被用于观测大气气溶胶^[8]。随后的欧美卫星计划还搭载了一系列气溶胶探测仪器，包括中分辨率成像光谱仪(MODIS, Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)^[9]、多角度成像光谱仪(MISR, Multi-Angle Imaging Spectrometer)^[10]、多角度偏振成像观测仪(POLDER)^[11]、气溶胶-云激光雷达(CALIOP, Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization)^[12]和可见红外成像辐射计(VIIRS, Visible Infrared Imaging Radiometer Suite)^[13]。此外，利用紫外波段对微量气体浓度敏感的特点，发展了包括臭氧总量测绘光谱仪(TOMS, Total Ozone Mapping Spectrometer)、太阳后向散射紫外散射光谱仪(SBUV, Solar Backscatter Ultraviolet Radiometer)^[14-15]、全球臭氧监测仪(GOME, Global Ozone Monitoring Experiment)^[16]、大气制图扫描成像吸收光谱仪(SCIAMACHY)^[17]、臭氧监测仪(OMI, Ozone Monitoring Instrument)^[18]、臭氧成像廓线仪(OMPS, Ozone Mapping and Profiler

Suite)^[19]以及静止轨道的紫外高光谱仪(GEMS, Geostationary Environmental Monitoring Spectrometer)等仪器，实现了对臭氧(O₃)、二氧化硫(SO₂)、二氧化氮(NO₂)，以及甲醛(CH₂O)、糖醛(C₂H₂O₂)、一氧化溴(BrO)、一氧化碘(IO)和二氧化氯(ClO₂)等大气痕量气体的全球探测^[20]。另外，还发展了专门针对大气CO₂全球监测的碳观测卫星(TANSO-FTS/GOSAT, TANSO-FTS-2/GOSAT-2, OCO-2, OCO-3)^[21-24]。哨兵-5P卫星(Sentinel-5p)搭载的对流层观测仪(TROPOMI)则具备了比上面这些仪器更高的空间和光谱分辨率，在对流层/平流层的痕量气体、部分温室气体以及云和气溶胶监测方面应用广泛^[25]。另外，静止轨道卫星上搭载的多光谱成像仪，如AHI/Himawari-8和ABI/GOES-R等，在观测空气质量日变化特征方面具有独特贡献^[26]，美国和欧洲计划在未来的地球同步轨道卫星(TEMPO, Tropospheric Emissions Monitoring of Pollution; GeoCarb, The Geostationary Carbon Observatory, Sentinel-4)上搭载高光谱探测仪以获取更高时间分辨率的大气成分参数^[27]。

我国学者早在20世纪70年代就开始利用国外卫星资料研究大气^[28]。我国早期卫星计划，包括第一代气象卫星(FY-1和FY-2系列)，主要搭载用于观测云图和地表等的成像仪。2008年FY-3A发射成功，实现了我国气象卫星大气成分的业务监测^[29-31]。其后，风云卫星系列、高分卫星系列^[32]、碳卫星^[33]等计划陆续实施，新观测新仪器不断增加。随着卫星观测资料的极大丰富，反演算法和真实性检验方面也取得了重大进展。本文旨在综述我国大气成分卫星遥感计划及其对理解全球变化的科学贡献。

1 我国卫星大气成分观测现状

1.1 我国大气成分监测卫星计划

我国卫星观测项目始于20世纪70年代。风云气象卫星是最早实施的遥感卫星系列，第一代极轨气象

卫星风云一号 (FY-1) 和第一代静止轨道气象卫星风云二号 (FY-2) 分别于20世纪80年代和90年代实现了从无到有的突破和科学试验, 1999年发射的FY-1C和2004年发射FY-2C实现了业务使用^[34-36]。我国还同时发展了资源调查、海洋监测、环境保护等遥感卫星系列^[37-39]。其中, 资源调查卫星主要包括中巴地球资源卫星 (CBERS, China-Brazil Earth Resources Satellite) 系列, 首颗卫星CBERS-01于1999年发射, 这也是中国和巴西“南南合作”的典范^[38]; 海洋监测包括海洋一号 (HY-1)、海洋二号 (HY-2) 等系列^[40]; 环境保护卫星包环境一号小卫星 (HJ-1) 系列等^[41]。同时, 接收、分发等地面系统建设和数据资料应用也得到了一定发展^[42-43]。

我国第二代极轨气象卫星风云三号 (FY-3) 首颗FY-3A于2008年成功发射, 开启了我国大气成分业务卫星探测时代。FY-1系列仅有单个仪器, 而FY-3A上搭载了11种仪器^[44]。其中, 中分辨率光谱成像仪 (MERSI, Medium Resolution Spectral Imager) 作为主要仪器之一, 是一个覆盖可见光短波和长波红外波段、具有20个通道的成像辐射计^[29]。MERSI作为监测全球空气质量的首颗业务仪器, 已应用在沙尘监测等多个方面^[45]。紫外臭氧总量探测仪 (TOU, Total Ozone Unit) 和紫外臭氧垂直探测仪 (SBUS, Solar Backscatter Ultraviolet Sounder), 可以分别观测臭氧总量和臭氧廓线^[30, 46]。后续卫星计划FY-3B/3C也配置了MERSI、TOU和SBUS三个仪器。而2017年11月发射成功的FY-3D, 不仅升级了MERSI-II成像仪, 还新增了红外高光谱大气探测仪 (HIRAS, Hyperspectral Infrared Atmospheric Sounder) 和近红外高光谱温室气体监测仪 (GAS, Greenhouse-gases Absorption Spectrometer), 可实现CO₂、CH₄、CO、N₂O和NH₃等大气成分的全球监测^[47-48]。我国第二代静止气象卫星风云四号 (FY-4A) 成功发射, 其上搭载的多通道扫描成像辐射计 (AGRI), 与极轨卫星上的MODIS和MERSI等仪器具有类似的通道和性能^[36], 因而AGRI可应用类似的算法监测空气质量, 而时间分辨率高达5分钟的静止卫星观测资料在数值预报同化等领域应用潜力巨大^[49]。此外, FY-4A上搭载的另一个主要载荷干涉式大气垂直探测仪 (GIIRS) 与HIRAS性能接近, 也可以获取NH₃等大气成分信息^[50]。

为进一步科学认识不同大气成分的气候变化强迫, 我国同步实施了碳卫星、高分五号卫星和大气环境监测卫星等专题计划, 与风云气象卫星的业务观测互为补充。前者于2016年12月成功发射, 搭载了高光谱温室气体探测仪 (ACGS, Atmospheric Carbon-

dioxide Grating Spectroradiometer) 和云和气溶胶探测仪 (CAPI, Cloud and Aerosol Polarization Imager) 两个主要仪器^[51]。而高分五号卫星目前已发射两颗卫星, 首颗卫星是中国高分辨率地球观测系统 (CHEOS, China High-resolution Earth Observation System) 的重要组成部分, 于2018年5月发射, 搭载的仪器包括: 大气痕量气体差分吸收光谱仪 (EMI, Environment Monitoring Instrument) 用于探测全球的NO₂和SO₂等痕量气体, 大气温室气体监测仪 (GMI, Greenhouse Gas Monitoring Instrument) 用于监测全球CO₂和CH₄, 大气环境红外甚高光谱分辨率探测仪 (AIUS, Atmospheric Infrared Ultra-spectral Sounder) 用于探测高层大气成分廓线信息, 以及多角度偏振成像仪 (DPC, Directional Polarization Camera) 用于大气气溶胶和云的光学及微物理参数探测^[52]。高光谱观测卫星 (也称为高分五号02星, GF-5 02星) 于2021年9月7日发射, 新增了高精度偏振扫描仪 (POSP, Particulate Observing Scanning Polarimeter) 可与DPC协同观测得到更高精度的大气污染监测。此外, 大气环境监测卫星于2022年4月16日发射, 其上搭载全球首个用于二氧化碳探测的主动激光雷达 (ACDL, Aerosol and Carbon Detection Lidar), 以及DPC, EMI, POSP和宽幅成像光谱仪 (WSI, Wide Spectral Imager) 等4台仪器。

1.2 气溶胶颗粒物监测仪器及其应用

气溶胶监测是卫星遥感数据应用的最重要领域之一, 利用成像仪的可见光通道数据 (表1) 可以反演大气气溶胶光学厚度, 实现对空气质量监测的目的。HJ-1上的电

表1 典型成像仪MERSI、MERSI-II、AGRI、CCD/HJ-1、DPC等用于气溶胶反演的通道
Table 1 Specifications of MERSI, MERSI-II, AGRI HJ, DPC spectral bands for aerosol retrieval

仪器	通道号	中心波长/nm	空间分辨率/m
MERSI/MERSI-II	1	0.470	250
	2	0.550	250
	3	0.650	250
	20	2.13	1000
AGRI	1	0.470	1000
	2	0.650	500
CCD/HJ-1	1	0.475	30
DPC	1	0.443	3300
	2	0.490	3300
	3	0.565	3300
	4	0.670	3300
	5	0.763	3300
	6	0.765	3300
	7	0.865	3300
	8	0.910	3300

荷耦合器(CCD)相机是一种包含4个波段(430~520 nm、520~600 nm、630~690 nm和760~900 nm)、空间分辨率为30 m的宽覆盖相机^[53]。通过建立CCD/HJ-1第1通道和MODIS第3通道之间的线性关系,可联合反演得到更高空间分辨率的气溶胶光学厚度^[54-56]。

FY-3系列搭载的MERSI是我国业务气象卫星上首个用于监测全球气溶胶颗粒物的仪器。FY-3A/FY-3B上搭载的MERSI包括19个可见/近红外通道,以及1个热红外通道,4个可见/近红外通道和1个热红外通道的星下点空间分辨率为250 m,其他通道为1 km;而FY-3D上搭载的MERSI-II则增加了5个热红外通道,通道总数达到25个通道,并增加了1个250 m分辨率的热红外通道。MERSI数据适用暗像元法(DT, Dark-target),通过气溶胶类型等先验信息建立多通道查找表,反演得到气溶胶光学厚度(AOD,图1)等空气质量参数^[57-58]。研究已证明FY-3/MERSI与MODIS的AOD产品精度相当^[59-60],而且在沙尘暴监测^[61]和地表PM_{2.5}反演^[62]等方面得到了应用。由于AGRI/FY-4A的通道设置与MERSI相近,因而也可将DT算法应用于AGRI数据,并得到时间分辨率高达5 min的AOD产品(图2)^[36]。高分五号(GF-5)上搭载的多角度偏振成像仪(DPC),具有3个偏振通道(490, 670和865 nm),5个非偏振通道(443, 565, 763, 765和910 nm),可从多个视角获得相同目标图像^[63]。高光谱探测卫星上搭载了DPC和POSP 2台偏振仪器,DPC的多角度观测能力提升到15个角度,而POSP具有紫外到短波红外共9个偏振通道,也是全球首次采用“偏振交火”探测技术,能与DPC进行地表数据及偏振定标传递。利用偏振和多角度资料不仅能提高AOD反演精度的基础上,还可以得到埃米指数(ANG)和细粒子比(FMF)^[64],实现PM_{2.5}等细颗粒物探测。此外,高光谱探测卫星上还搭载了吸收性气溶胶探测仪(AAS),具有4个紫外通道,将能得到4 km分辨率的全球吸收性气溶胶指

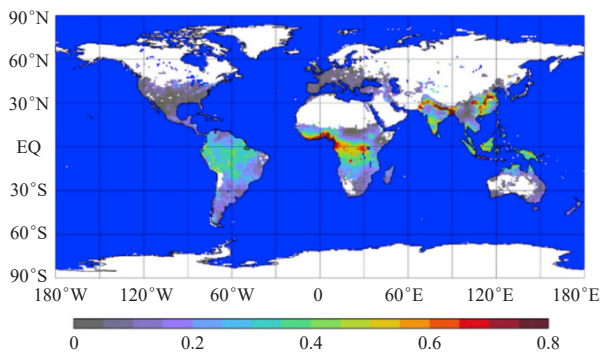


图1 2018年1月FY-3D/MERSI-II全球地面气溶胶光学深度分布^[65]
Fig. 1 Global distribution of terrestrial aerosol optical depth in January 2018 from FY-3D/MERSI-II

数,实现在重霾、有云及亮地表等条件下的雾霾及气溶胶类型监测。此外,大气环境监测卫星搭载的WSI, DPC和POSP三台仪器,同时用于宽幅多光谱成像与多角度偏振成像能力,通过与ACDL协同观测,将能实现更高精度的大气气溶胶监测。

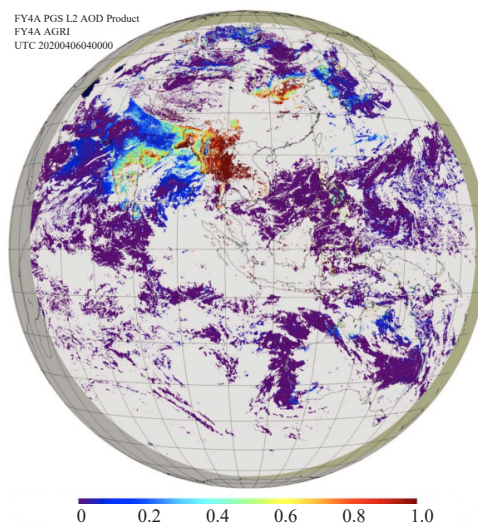


图2 2020年4月6日04时(世界时)由FY-4A/AGRI得出的气溶胶光学厚度的全圆盘分布

Fig. 2 Full disk distribution of terrestrial aerosol optical depth derived from FY-4A/AGRI at 0400 UTC on 6 April 2020

1.3 痕量气体监测仪器及其应用

我国目前共发射了4台大气痕量气体监测仪器,包括第二代业务气象卫星FY-3系列上的紫外臭氧总量探测仪(TOU)和紫外臭氧垂直探测仪(SBUS),高分五号卫星(及高光谱观测卫星)上搭载的大气痕量气体差分吸收光谱仪(EMI)和大气环境红外甚高光谱分辨率探测仪(AIUS)。此外,大气环境监测卫星上也搭载了EMI。

搭载在FY-3A/B/C上的TOU是一台采用固定光栅、狭缝阵列式 Ebert-Fastie单光栅光谱仪,TOU探测波段为6个(表2),每个波段的狭缝函数接近于高斯型,带宽(FWHM)在1.0~1.3 nm。臭氧总量反演算法采用改进后的TOMS V7方法,在不同的纬度带采用不同的通道组合来计算臭氧总量初估值,再分别与360 nm 通道组合对辐射定标的影响进行订正,给出臭氧总量精确值^[35]。从2008年首次利用TOU/FY-3A绘制了全球臭氧分布图^[65]以来,FY-3系列实现了对南极臭氧的长期监测(图3)。FY-3系列的臭氧产品与地面数据集和同类卫星产品交叉检验,结果一致性较好,且均方根误差达4.3%和3.1%^[66]。TOU/FY-3A数据资料也被用于北极臭氧柱总量监测,长期分析结果显示北极臭氧柱总量从2011年3月开始快速下降,其月平均总柱臭氧比

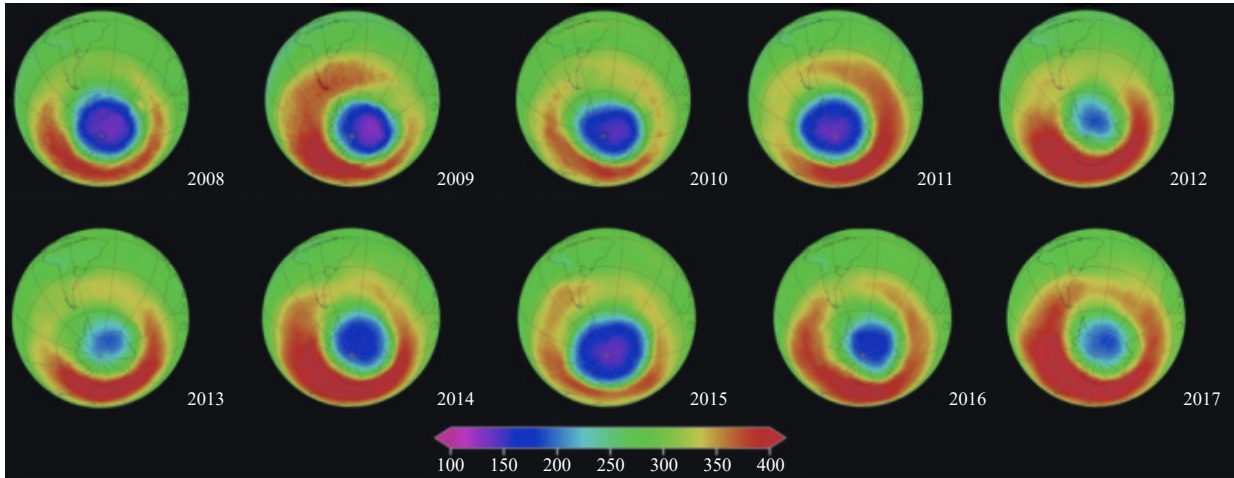


图3 TOU/FY-3观测到的2008—2017年南极地区臭氧年平均值 (填色表示Dobson, 单位: DU)

Fig. 3 Annual average of total ozone over the Antarctic region from 2008 to 2017. The colour represents the ozone thickness in Dobson units (DU)

1979—2010年的平均值低30%^[65]。

搭载在FY-3A/3B上的SBUS是一个双单色仪,它只观测一个方向,但有三种观测模式,即地球观测模式、太阳观测模式和标准灯模式。地球观测模式的SBUS以250~340 nm内的12个通道观测大气紫外后向散射辐射亮度,各通道带宽为1.1 nm,详见表2。当卫星运行达到极区上空时,采用太阳观测模式。利用两种模式下大气后向散射辐射亮度和太阳辐照度比值来估算大气臭氧。产品分析结果显示臭对流层上层到平流层中层的臭氧比正常水平大约低100 DU^[44, 67-68]。FY-3B SBUS还被用于研究2011年3—4月北极地区严重的臭氧损失^[69],以及太阳质子事件期间的极地臭氧消耗^[70]等。

EMI是一种大气痕量气体差分吸收光谱仪,共有4个光谱通道,范围从240~710 nm,光谱分辨率为0.3~0.5 nm(表2)。它的目标是获取全球对流层和平流层等对空气污染有影响的痕量气体(如SO₂、NO₂、O₃)。图4为2018年10月EMI观测得到的全球臭氧月平均分布结果。EMI得到的NO₂产品分辨率与TROPOMI/Sentinel-5p分辨率相。高光谱观测卫星(GF-5 02)星上继续搭载了EMI仪器,将延续高分五号的观测。AIUS是一种傅里叶变换红外光谱仪(表2),能观测平流层和对流层上部的臭氧和其他痕量气体。AIUS可以反演得到大气垂直距离从18~58 km范围内臭氧浓度10%(约0.02~0.4 ppm^①)的变化,15~80 km范围内水汽10%(0~0.5 ppm)的变化,30~60 km范围内盐酸10%(约0.1ppb^②)的变化^[71]。

① 1 ppm=10⁻⁶。

② 1 ppb=10⁻⁹。

表2 痕量气体监测仪器TOU/FY-3、SBUS/FY-3、EMI/GF-5和AIUS/GF-5通道设置

Table 2 Specifications of TOU/FY-3, SBUS/FY-3, EMI/GF-5 and AIUS/GF-5 spectral bands for trace gas monitoring

载荷	波段	中心波长/nm	宽带/nm
TOU/FY-3	1	308.727	1.164
	2	312.638	1.152
	3	317.652	1.171
	4	322.464	1.156
	5	331.375	1.159
	6	360.253	1.140
SBUS/FY-3	1	252.00 ± 0.05	1+0.2
	2	273.62 ± 0.05	1+0.2
	3	283.10 ± 0.05	1+0.2
	4	287.70 ± 0.05	1+0.2
	5	292.29 ± 0.05	1+0.2
	6	297.59 ± 0.05	1+0.2
	7	301.97 ± 0.05	1+0.2
	8	305.87 ± 0.05	1+0.2
	9	312.57 ± 0.05	1+0.2
	10	312.57 ± 0.05	1+0.2
	11	331.26 ± 0.05	1+0.2
	12	339.89 ± 0.05	1+0.2
	光度计	379.00 ± 1.00	3 + 0.3
EMI/GF-5	UV1	240~315	0.3~0.5
	UV2	311~403	0.3~0.5
	VIS1	401~550	0.3~0.5
	VIS2	545~710	0.3~0.5
AIUS/GF-5		750~4100 cm ⁻¹	0.02 cm ⁻¹

1.4 温室气体监测仪器及其应用

碳卫星上的ACGS、风云三号D星上的GAS,以

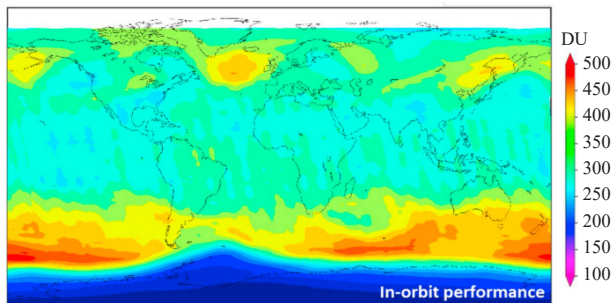


图4 2018年10月 EMI/GF-5观测得到的臭氧总柱全球月平均分布

Fig. 4 Global monthly average of ozone total column distribution acquired from EMI in October 2018

及分别搭载在高分五号及高光谱观测卫星上的2台GMI，都是用于探测温室气体全球分布的高光谱仪器。这些仪器的通道主要覆盖了氧气A吸收带和两个CO₂吸收带（1.61和2.04 μm），但在通道选择上略有差别。其中，ACGS利用光栅技术1.61 μm通道来探测CO₂浓度，GAS通过傅里叶变换的连续光谱可以同时反演CO₂和CH₄，同时还增加了2.3 μm通道用于反演N₂O浓度，二者都是结合氧气A吸收带和2.04 μm消除水蒸气和气溶胶等的干扰，以提高反演精度^[72-74]。GMI则选用了空间外差观测技术，利用1.575和2.05 μm两个通道来反演CO₂浓度，并通过1.65 μm通道反演CH₄浓度（表3）^[75]。当前，碳卫星CO₂产品与OCO-2的交叉检验，以及与地面测量站点的真实性检验结果都反映出其产品反演精度较高（达2.11 ppm）^[33]。GMI也得到了与国际同类仪器接近的CO₂和CH₄柱浓度的全球分布结果（图5）^[76]。

大气环境监测卫星上搭载的大气探测激光雷达，是国际上首次成功发射的双体制激光雷达，可用于探测气溶胶和CO₂。利用主动探测高精度高灵敏度的特点，可实现大气CO₂柱总量的精细化探测，获取大范围、高精度的CO₂浓度变化信息，并提供气溶胶散射系数廓线、消光系数廓线、光学厚度、边界层高度等垂直分布信息，弥补以往被动观测的不足。

1.5 地面真实性检验系统建设

20世纪末以来，中国遥感辐射校正场（CRCS, China Radiation Calibration Site）一直是我国遥感产品定标和真实性检验的标志性设施，长期服务于我国各系列卫星的定标和检验^[40]。本文主要介绍针对大气成分真实性检验的专题地面观测网。中国气象局建设中国气溶胶遥感网络（CARSNET）^[77]和中国科学院等联合建设的太阳辐射计观测网（SONET, Sun/sky-radiometer Observation NETwork），主要用于监测气溶胶光学特性来验证卫星的产品；利用多轴差分光学吸

表3 温室气体监测仪器ACGS/碳卫星、GAS/风云三号D星和GMI/高分五号及高光谱观测卫星的光谱通道设置
Table 3 Specifications of ACGS/TanSat, GAS/FY-3D and GMI/GF-5 (GF-5 02) spectral bands for greenhouse gas monitoring.

参数	ACGS/碳卫星	GAS/风云三号D星	GMI/高分五号高光谱观测卫星
通道/nm	0.758~0.778	0.75~0.77	0.759~0.729
	1.594~1.624	1.56~1.72	1.568~1.583
	2.042~2.082	1.92~2.08	2.043~2.058
		2.20~2.38	1.642~1.658
光谱分辨率/μm@1.6 μm	0.124	0.073	-
空间分辨率/km	2	13.2	-

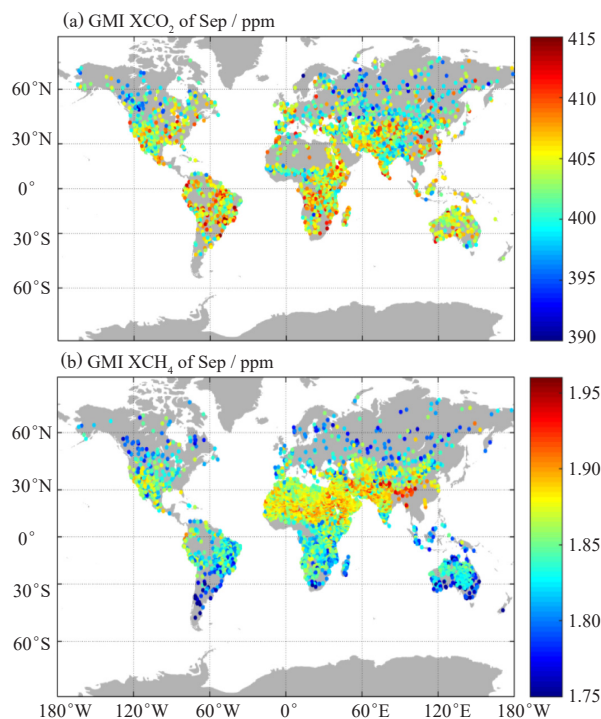


图5 GMI反演得到的2018年9月平均XCO₂ (a)和XCH₄ (b)柱浓度全球分布

Fig. 5 Global distribution map of XCO₂ (a) and XCH₄ (b) column concentration from GMI in September 2018

收光谱仪（MAX-DOAS, MultiAxis Differential Optical Absorption Spectroscopy）实现痕量气体柱总量和垂直廓线的探测，用于验证卫星的痕量产品；中国气象局组建的臭氧探空仪网络可以用于卫星的臭氧柱总量产品验证；国际上组建的总碳柱观测网络（TCCON Fourier Transform Spectrometers）配置了地基傅里叶变换光谱仪（FTS, Fourier Transform Spectrometers）实现高精度大气CO₂柱浓度测量，用于卫星温室气体的遥感验证。

CARSNET是中国气象局从2002年开始建设的全国性地面观测网（图6），最初只包括位于中国北部和

西北部的20个沙尘监测站点，目前已涉及全国80个站，其中有50多个站实现长期观测，可获得高时间分辨率的气溶胶光学特性资料^[78-81]。CARSNET采用的太阳光度计，每年至少一次校准，以中国气象科学院或者瓦里关全球大气本底站（36.28°N，100.09°E，海拔为3816 m）为参考^[81]，而校准后仪器的AOD和水汽含量相对偏差分别为<2%和<5%^[77]。SONET是一个由中国科学院、高校和研究所联合建设的观测网，利用多波长偏振测量仪器（CE318-DP）扩展了CARSNET的探测能力^[82]，而且在中国地区AOD真实性检验方面取得了不少新的发现^[71]。尤其是，利用AERONET和SONET共计215个地面站资料的研究证明了DPC/GF-5的全球3.3 km高分辨率AOD资料与地面观测具有较好的一致性^[83]。

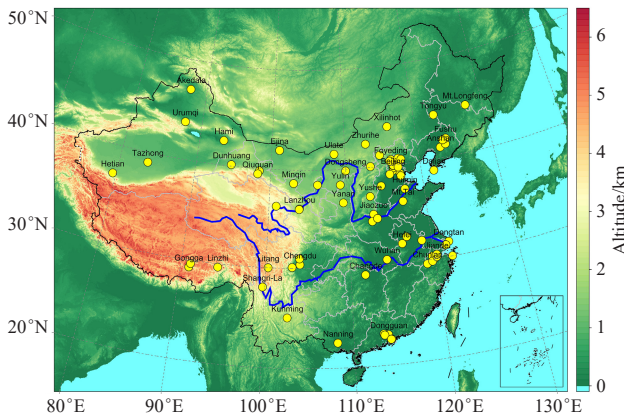


图6 中国气溶胶遥感网络 (CARSNET) 的分布图, 黄点为80个站点位置

Fig. 6 Nation-wide distribution of China Aerosol Remote Sensing Network (CARSNET). The yellow dots denote the locations of the 80 sites of CARSNET

MAX-DOAS利用在不同海拔仰角测量的紫外和可见光散射特征反演对流层痕量气体和气溶胶的垂直廓线。目前，共有27个MAX-DOAS站点可用于相应卫星L2产品的真实性检验，以及为反演提供先验信息^[84]。我国境内的站点主要位于华北平原（包括北京、天津、河北、山东、山西和河南）、长三角（包括上海、江苏、安徽省）、大湾区（包括广东省）和成渝地区（包括重庆和四川省），监测NO₂、SO₂和CH₄等大气成分。利用MAX-DOAS检验EMI/GF5反演结果（图7），当云覆盖范围小于0.3 h，相关系数高达0.946^[85]。

碳柱总量观测网（TCCON）是利用地基FTS观测CO₂的观测站网。作为全球CO₂分布监测的重要手段，TCCON的监测精度可达0.25%^[86]。此外，TCCON还能得到其他温室气体（如CH₄，CO）以及痕量气体

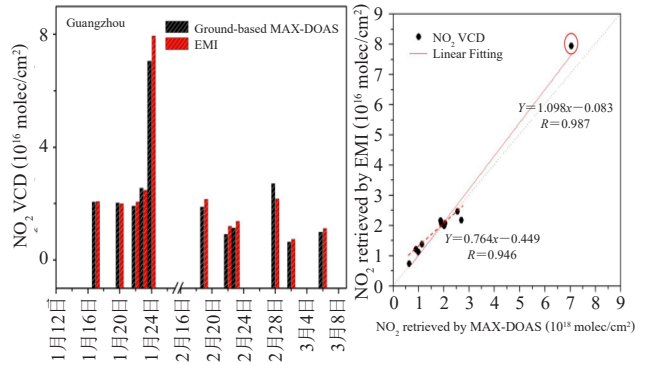


图7 地基MAX-DOAS检验EMI反演NO₂结果
Fig. 7 Comparison of NO₂ columns by ground-based MAX-DOAS and EMI observations

（如N₂O，H₂O，HDO和HF）的浓度信息^[87-90]。我国从1998年开始建设了4个FTS站（表4）。其中，北京是我国首个CO₂地面观测站^[91]，近10年又陆续建设了合肥、兴隆和香河等3个站，其中合肥和香河已成为TCCON成员站。这些站点在局部地区的真实性检验、评价卫星观测质量等方面得到很多新的发现^[92-96]。如图8所示，GOSAT XCO₂产品和北京FTS的相关系数为0.88，偏差为1.35 ppm^[95]，合肥FTS站点相关系数也达到0.83，偏差为0.81 ppm。检验OCO-2产品的结果比GOSAT略差，相关系数为0.8^[97]。

表4 中国地基FTS站点及TCCON成员站位置
Table 4 Locations of ground-based FTS sites and TCCON members

站点	坐标	建设时间
北京	39.955°N, 116.334°E	1998
合肥*	31.90°N, 117.17°E	2014
兴隆	40.40°N, 117.59°E	2014
香河*	39.76°N, 116.98°E	2018

注：*为TCCON成员站。

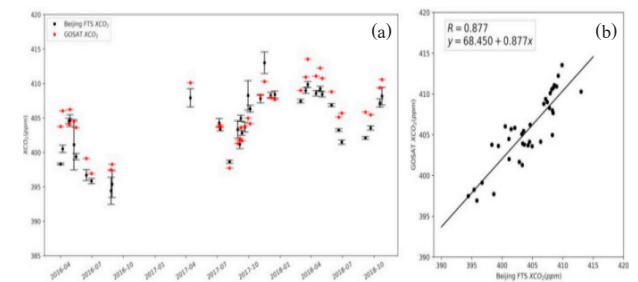


图8 北京地基FTS检验GOSAT反演CO₂结果
(a) GOSAT (红色)和地基FTS (黑色)XCO₂观测的时间序列; (b) 两者相关性

Fig. 8 Comparison of the averaged XCO₂ between GOSAT and Beijing FTS
(a) time series of the XCO₂ observation from GOSAT (red) and ground-based FTS in Beijing site (black), (b) correlation between the above-mentioned observations

2 未来大气成分观测卫星计划

2015年,国家发展改革委、财政部、国防科工局共同发布了《国家民用空间基础设施中长期发展规划(2015-2025年)》,强调不断完善对气溶胶、痕量气体和温室气体等大气成分的卫星观测^[98]。该规划中提到风云三号后续卫星中FY-3F将搭载具备天底和临边观测能力的OMS用于痕量气体的水平和垂直特征观测, FY-3H将搭载GAS用于臭氧和温室气体的持续业务监测。科研卫星方面还包括1颗计划于2024年发射的高精度温室气体监测卫星(HGMS, High-precision Greenhouse gases Monitoring Satellite),该卫星将搭载用于二氧化碳探测的主被动仪器,以及用于痕量气体天底和临边观测的紫外高光谱探测仪。

未来我国将依托以上卫星计划组建大气成分探测的卫星星座,实现对全球大气成分的精密监测,将进一步提升我们对大气的科学认识,以更好服务于气候变化、空气污染治理、“碳达峰、碳中和”等国家战略。

参考文献

- 1] Betts A K, Ball J H, Beljaars A, et al. The land surface-atmosphere interaction: a review based on observational and global modeling perspectives. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101(3): 7209–7225.
- 2] Liang Q E, Susan S E, Fleming E L, et al. Concerns for ozone recovery. *Science*, 2017, 358(6368): 1257–1258.
- 3] Newman P A, Gleason J F, McPeters R D, et al. Anomalously low ozone over the Arctic. *Geophysical Research Letters*. 1995, 24(22): 2689–2692.
- 4] Crutzen P J. The role of NO and NO₂ in the chemistry of the troposphere and stratosphere. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1979, 7(1): 443–472.
- 5] Singh A, Agrawal M, et al. Acid rain and its ecological consequences. *Journal of Environmental Biology*, 2007, 29(1): 15–24.
- 6] Lacis A, Hansen J, Sato M, et al. Climate forcing by stratospheric aerosols. *Geophysical Research Letters*, 1992, 19(15): 1607–1610.
- 7] Manabe S, Wetherald R T, et al. On the distribution of climate change resulting from an increase in CO₂ content of the atmosphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1980, 37(1): 99–118.
- 8] 张兴赢, 周敏强, 王维和, 等. 全球卫星大气成分遥感探测应用进展及其展望. *科技导报*, 2015, 33(17): 10.
- 9] Salomonson V V, Barnes W L, Maymon P W, et al. MODIS: Advanced facility instrument for studies of the Earth as a system. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1989, 27(2): 145–153.
- 10] Diner D J, Bruegge C J, Martonchik J V, et al. MISR: a multiangle imaging spectroradiometer for geophysical and climatological research from Eos. *IEEE*, 1989, 27(2): 200–214.
- 11] Bréon F M, Buriez J C, Couvert P, et al. Scientific results from the Polarization and Directionality of the Earth's Reflectance (POLDER). *Advances in Space Research*, 2002, 30(11): 2383–2386.
- 12] Winker D M, Pelon J, et al. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. *IEEE IGARSS 2*, 2003: 1329–1331.
- 13] Hutchison K D, Cracknell A P, et al. *Visible infrared imager radiometer suite*. CRC Press, 2006.
- 14] Heath D F, Krueger A J, Roeder, Henderson, et al. The solar backscatter ultra-violet and total ozone mapping spectrometer (SBUV/TOMS) for nimbus G. *Optical Engineering*, 1975, 14(4): 323–331
- 15] Herman J R, Hudson R D, McPeters R D, et al. A new self-calibration method applied to TOMS and SBUV backscattered ultraviolet data to determine long-term global ozone change. *Journal of Geophysical Research*, 1991, 96(4): 7531–7545.
- 16] Burrows J P, Richter A, Dehn A, et al. Atmospheric remote-sensing reference data from GOME-2. Temperature-dependent absorption cross sections of O₃ in the 231–794 nm range. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1991, 61: 509–517.
- 17] Bovensmann H, Burrows J P, Buchwitz M, et al. SCIAMACHY: Mission Objectives and Measurement Modes. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1991, 56(2): 127–150.
- 18] Dobber M, Dirksen R, Levelt P F, et al. Ozone monitoring instrument calibration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(5): 1209–1238.
- 19] Flynn L E, Long C S, Wu X, et al. Performance of the ozone Mapping and Profiler Suite (OMPS) products. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, 119(10): 6181–6195.
- 20] Abad G G, Souri A H, Bak J, et al. Five decades observing Earth's atmospheric trace gases using ultraviolet and visible backscatter solar radiation from space. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2019, 19: 30107–30114.
- 21] O'Dell C W, Connor B, Bösch H, et al. The ACOS CO₂ retrieval algorithm—part 1: Description and validation against synthetic observations. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2012, 5(1): 99–121.
- 22] Taylor T E, O'Dell C W, O'Brien D M, et al. Comparison of cloud-screening methods applied to GOSAT near-infrared spectra. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(1): 295–309.
- 23] Nakajima M, Kuze A, Suto H, et al. The Current Status of GOSAT and the Concept of GOSAT-2. *Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering*, 2012, 8533(24): 6–15.
- 24] Eldering A, Taylor T E, Odell C W, et al. The OCO-3 mission: measurement objectives and expected performance based on 1 year of simulated data. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2019, 12(4): 1–54.
- 25] 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. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 120: 70–83.
- 26] Ignatov A, Petrenko B, Kihai Y, et al. JPSS and GOES-R SST Products at NOAA. *American Geophysical Union, 2016 Ocean Sciences Meeting*. American Geophysical Union, Washington, DC, 2016: 2407.
- 27] Gulde S T, Kolm M G, Smith D J, et al. Knowing what we breathe: Sentinel 4: a geostationary imaging UVN spectrometer for air quality monitoring. *Proceedings SPIE*, 2017: 1–9.
- 28] 曾庆存. *大气红外遥测原理*. 北京: 科学出版社, 1974.
- 29] Dong C, Yang J, Zhang W, et al. An overview of a new Chinese weather satellite FY-3A. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2009, 90(10): 1531–1544.
- 30] Zhang P, Yang J, Dong C, et al. General introduction on payloads, ground segment and data application of Fengyun-3A. *Frontiers of Earth Science*, 2009, 3(3): 367–373.
- 31] Yang J, Dong C H, Lu N M, et al. FY-3A: the new generation polar-orbiting meteorological satellite of China. *Acta Meteorologica Sinica*, 2009, 67(4): 501–509.
- 32] Hazem T, Abd El-Hamid, Wenlong Wang, et al. Landscape Evaluation based on Gaofen Satellite in the Southern part of the Nile Delta, Egypt. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 2019, 7(7): 47–60.
- 33] Liu Y, Wang J, Lu Y, et al. The TanSat mission: preliminary global observations. *Science Bulletin*, 2018, 63(18): 38–45.
- 34] Zhang W J. Status and Development of FY Series of Meteorological Satellites. *Aerospace Shanghai* 2, 2001: 8–14.

- [35] Wang W H, Zhang X Y, Wang Y M, et al. Introduction to the FY-3A Total Ozone Unit(FY-3A/TOU): Instrument, Performance and Several Results. *International Journal of Remote Sensing*, 2011, 32(17): 4749–4758.
- [36] Zhang P, Zhu L, Tang S, et al. General Comparison of FY-4A/AGRI with Other GEO/LEO Instruments and its potential and challenges in Non-meteorological applications. *Frontiers in Earth Science*, 2019, 6(224): 1–13.
- [37] Pan D L. Satellite marine remote sensing in China. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering* 4892, 2003: 1–16.
- [38] Guo J N, Yu. Study on the relative radiometric correction of CBERS satellite CCD image. *Science in China Series E Technological Science*, 2005, 48 (2): 12–28.
- [39] 徐祎凡, 李云梅, 王桥, 等. 基于环境一号卫星多光谱影像数据的三湖一库富营养化状态评价. *环境科学学报*, 2011, 31(1):81-93.
- [40] Sun Q. Technical Performance and Operational Mode of HY-1 a Satellite. *Aerospace China*, 2003, 4: 12–14.
- [41] Wang X, Wang G, Guan Y, et al. Small satellite constellation for disaster monitoring in China. *Proceedings. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2005, IGARSS Seoul, South Korea.
- [42] 胡秀清, 张玉香, 张广顺, 等. 中国遥感卫星辐射校正场气溶胶光学特性观测研究. *应用气象学报*, 2001, 12(3): 257-266.
- [43] Gong S Q, Hagan D F T, Zhang C J, et al. Analysis on Precipitable Water Vapor over the Tibetan Plateau using FengYun-3A Medium Resolution Spectral Imager Products. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 2019: 1–12.
- [44] Huang F X, Zhao M X, Yang C J, et al. The retrieval algorithm of ozone profiles from measurements of Solar Backscatter Ultraviolet Sounder (SBUS) on FY-3 satellite and its comparison retrieval trial. *Progress in Natural Science: Materials International*, 2008, 18(10): 1136–1142.
- [45] Bao Y S, Zhu L H, Qin G, et al. Assessing the impact of Chinese FY-3/MERSI AOD data assimilation on air quality forecasts: sand dust events in Northeast China. *Atmospheric Environment*, 2019, 205: 78–89.
- [46] 张兴赢, 张鹏, 方宗义, 等. 应用卫星遥感技术监测大气痕量气体的研究进展. *气象*, 2007, 33(7): 3–14.
- [47] Lu Q F, Zhou F, Qi C L, et al. Spectral performance evaluation of high-spectral resolution infrared atmospheric sounder onboard FY-3D. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(10): 2105–2115.
- [48] Zhang P, Lu Q F, Hu X Q, et al. Latest Progress of the Chinese Meteorological Satellite Program and Core Data Processing Technologies. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2019, 36(9): 1027–1045.
- [49] Saide P E, Kim J, Song C H, et al. Assimilation of next generation geostationary aerosol optical depth retrievals to improve air quality simulations. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41: 9188–9196.
- [50] Lieven Clarisse, Martin Damme, Daniel Hurtmans, et al. The diel cycle of NH₃ observed from the FY-4A Geostationary Interferometric Infrared Sounder (GIIRS). *Geophysical Research Letters*, 2021, 48: e2021GL093010.
- [51] Yang D X, Liu L, Cai Z N, et al. First global carbon dioxide maps produced from Tansat measurements. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2018, 35(6): 621–623.
- [52] Zhou C Y, Bian Z J, He Y X, et al. Introduction of GF-5 Satellite and Ability of monitoring NO₂ and O₃ Column Density from EMI. *IGARSS*, 2019: 8796–8798.
- [53] 孙中平, 熊文成, 魏斌, 等. 环境一号卫星CCD影像质量评价研究. *红外*, 2010, 31(9): 7.
- [54] Wang Z T, Li Q, Wang Q, et al. HJ-1 terrestrial aerosol data retrieval using deep blue algorithm. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, 116 (3): 596–610.
- [55] Sun L, Sun C K, Liu Q H, et al. Aerosol optical depth retrieval by HJ-1/CCD supported by MODIS surface reflectance data. *Science China Earth Sciences*, 2010, 53(S1): 74–80.
- [56] Li Y J, Xue Y, He X W, et al. High-resolution aerosol remote sensing retrieval over urban areas by synergetic use of HJ-1 CCD and MODIS data. *Atmospheric Environment*, 2012, 46: 173–180.
- [57] Han W H, Tong L, Chen Y P. Aerosol Retrieval over Urban Area by Synergetic Use of Feng Yun-3C MERSI and Terra MODIS Data. *2015 IEEE International Conference on Smart City/SocialCom/SustainCom (SmartCity)*, 2015: 108–111.
- [58] Ge Q, Hu Y Q, Zhang L, et al. Retrieval of Aerosol over Land Surface from FY-3C/MERSI with DDV Algorithm. *Remote Sensing. Information*, 2017, 32 (3): 34–38.
- [59] 唐维尧, 鲍艳松, 张兴赢, 等. FY-3A/MERSI, MODIS C5.1和C6气溶胶光学厚度产品在中国区域与地面观测站点的对比分析. *气象学报*, 2018, 76(3):12.
- [60] Xia X L, Min J Z, Shen F F, et al. Aerosol Data Assimilation using Data from Fengyun-3A and MODIS: Application to a Dust storm over East Asia in 2011. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2019, 36 (1): 1–14.
- [61] Mei L L, Xue Y, Guang J, et al. Aerosol optical depth retrieval over land using FY-3A data and its application in dust monitoring. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, 2011, (5): 361–372.
- [62] Zeng Q L, Wang Z F, Tao J H, et al. Estimation of ground-level PM_{2.5} concentrations in the major urban areas of Chongqing by using FY-3C/MERSI. *Atmosphere*, 2017, 9(1): 1–14.
- [63] Li Z Q, Hou W Z, Hong J, et al. Directional Polarimetric Camera (DPC): monitoring aerosol spectral optical properties over land from satellite observation. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2018, 218: 21–37.
- [64] Li Z Q, Xie Y S, Hou W Z, et al. Global haze aerosol distribution: a direct view by Gaofen-5 satellite with 3.3 km spatial resolution. *Atmospheric and Oceanic Physics*, 2019: 1–15.
- [65] Zhang Y, Wang W H, Li X J, et al. Anomalous low ozone of 1997 Arctic spring: Monitoring results and analysis. *Advances in Polar Science*, 2012, 23 (2): 82–86.
- [66] Wang W H, Lawrence F, Zhang X Y, et al. Cross-calibration of the total ozone unit (TOU) with the ozone monitoring instrument (OMI) and SBUV/2 for environmental applications. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50 (12): 4943–4955.
- [67] Huang F X, Liu N Q, Zhao M X, et al. Vertical ozone profiles deduced from measurements of SBUS on FY-3 satellite. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(10): 943–948.
- [68] Huang F X, Huang Y, Flynn L E, et al. Radiometric calibration of the Solar Backscatter Ultraviolet Sounder and validation of ozone profile retrievals. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(12): 4956–4964.
- [69] 刘年庆, 黄富祥, 王维和. 2011年春季北极地区臭氧低值事件的卫星遥感监测. *科学通报*, 2011, 56(27): 4.
- [70] Huang C, Huang F, Zhang X, et al. The possible responses of Polar ozone to Solar Proton events in March 2012 by FengYun-3 Satellite Observations. *Space Weather*, 2019, 17 (12): 1628–1638.
- [71] Li C, Li J, Xu H, et al. Evaluating VIIRS EPS Aerosol Optical Depth in China: an intercomparison against ground-based measurements and MODIS. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2019, 224: 368–377.
- [72] Liu Y, Yang D X, Cai Z N. A retrieval algorithm for the Chinese carbon dioxide observation satellite TanSat: preliminary retrieval experiments using TANSO-FTS/GOSAT data. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(13): 1520–1523.
- [73] Liu Y, Cai Z N, Yang D X. Effects of spectral sampling rate and range of CO₂ absorption bands on XCO₂ retrieval from TANSAT hyperspectral spectrometer. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59(14): 1485–1491.
- [74] Wang Q, Yang Z D, Bi Y M. Bi Y M. Spectral parameters and signal-to-noise ratio requirement for Tansat hyper spectral remote sensor to measure atmospheric CO₂. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2014, 5: 600–609.
- [75] 熊伟. 星载超光谱大气主要温室气体监测仪载荷. *航天返回与遥感*, 2018, 39(3): 11.
- [76] Xiong W. Greenhouse gases monitoring Instrument(GMI) on GF-5 satellite (invited). *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(3):

- 16–22.
- [77] Che H Z, Gui K, Chen Q L, et al. Calibration of the 936 nm water-vapor channel for the China aerosol remote sensing NETWORK (CARSNET) and the effect of the retrieval water-vapor on aerosol optical property over Beijing, China. *Atmospheric Pollution Research*, 2016, 7(5): 743–753.
- [78] Che H Z, Wang Y Q, Sun J Y. Aerosol optical properties at Mt. Waliguan Observatory, China. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(33): 6004–6009.
- [79] Che H Z, Qi B, Zhao H J, et al. Aerosol optical properties and direct radiative forcing based on measurements from the China Aerosol Remote Sensing Network (CARSNET) in eastern China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, 18(1): 405–425.
- [80] Zhao H J, Che H Z, Xia X G, et al. Multiyear Ground-based Measurements of Aerosol Optical Properties and Direct Radiative effect over Different Surface Types in Northeastern China. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2018a, 123 (24): 13887–13916.
- [81] Che H Z, Zhang X Y, Chen H B, et al. Instrument calibration and aerosol optical depth validation of the China Aerosol Remote Sensing Network. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2009, 114 (D3): 1–12.
- [82] Li L, Li Z, Li K, et al. A method to calculate Stokes parameters and angle of polarization of skylight from polarized CIMEL sun/sky radiometers. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2014, 149: 334–346.
- [83] Ma Y, Li Z Q, Li Z Z, et al. Validation of MODIS Aerosol Optical Depth Retrieval over Mountains in Central China Based on a Sun-Sky Radiometer Site of SONET. *Remote Sensing*, 2016, 8 (2): 111–124.
- [84] Wang Y, Beirle S, Lample J, et al. Validation of OMI, GOME-2A and GOME-2B tropospheric NO₂, SO₂ and HCHO products using MAX-DOAS observations from 2011 to 2014 in Wuxi, China: investigation of the effects of priori profiles and aerosols on the satellite products. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, 17 (8): 5007–5033.
- [85] Zhao M J, Si F Q, Zhou H J, et al. Preflight calibration of the Chinese Environmental Trace Gases Monitoring Instrument (EMI). *Atmospheric Measurement Techniques*, 2018, 11 (9): 5403–5419.
- [86] Wunch D, Toon G C, Blavier J F L, et al. 2011. The Total Carbon Column Observing Network. *Philosophical Transactions of The Royal Society*, 2011, 369: 2087–2112.
- [87] Toon G C, Blavier J F L, Washenfelder R A, et al. Total Column Carbon Observing Network (TCCON), in *Advances in Imaging, OSA Technical Digest (CD)*. Optica Publishing Group, 2009: JMA3.
- [88] Le K, Wunch D, Shia R L, et al. Vertically constrained CO₂ retrievals from TCCON measurements. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2012, 113 (14): 1573–1761.
- [89] Buschmann M, Deutscher N M, Sherlock V, et al. Retrieval of XCO₂ from ground-based mid-infrared (NDACC) solar absorption spectra and comparison to TCCON. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2016, 8 (10): 10523–10548.
- [90] Kivi R, Heikkinen P. Fourier transform spectrometer measurements of column CO₂ at Sodankylä, Finland. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 2016, 5: 271–279.
- [91] 张兴赢, 张鹏, 廖宏, 等. 地基傅立叶红外高光谱遥感观测大气成分平台建设及其反演技术研究. *气象*, 2009, 35(1):9.
- [92] 张淼, 张兴赢, 刘瑞霞. 卫星高光谱大气 CO₂ 遥感反演精度地基验证研究. *气候变化研究进展*, 2014, 10 (6): 427–432.
- [93] 周敏强, 张兴赢, 王普才, 等. 2015. 二氧化碳柱浓度的卫星反演试验及地基验证. *中国科学(地球科学)*, 45(6): 856–863.
- [94] 张兴赢, 孟晓阳, 周敏强, 等. 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*, 2018, 14(6): 602–612.
- [95] 孟晓阳, 张兴赢, 周敏强, 等. GOSAT 卫星二氧化碳遥感产品的验证与分析. *气象*, 2018, 44(10):12.
- [96] 周敏强. 二氧化碳等温室气体的地基 FTS 红外高光谱遥感应用研究. 北京: 中国科学院大学, 2017.
- [97] Bi Y M, Wang Q, Yang Z D, et al. Validation of Column-Averaged Dry-Air Mole Fraction of CO₂ Retrieved from OCO-2 using Ground-based FTS Measurements. *Journal of Meteorological Research*, 2018, 32 (3): 433–443.
- [98] 国家发展改革委, 财政部, 国防科工局. 国家民用空间基础设施中长期发展规划(2015—2025年). 北京: 国家发展改革委, 财政部, 国防科工局, 2015.