

# 全球卫星大气成分遥感探测应用进展及其展望

张兴赢<sup>1</sup>,周敏强<sup>2,3</sup>,王维和<sup>1</sup>,李晓静<sup>1</sup>

1. 中国气象局国家卫星气象中心,北京 100081
2. 中国科学院大气物理研究所,中国科学院中层大气与全球环境探测重点实验室,北京 100029
3. 中国科学院大学,北京 100049

**摘要** 随着全球变化的加剧,科学家和各国政府对大气环境日益关注,尤其是大气中的化学成分,不仅影响区域的空气质量,而且对全球气候变化产生不可估量的影响。卫星遥感探测大气中的化学成分是近年来全球对地观测领域的一个新兴分支。本文阐述全球及中国在卫星大气成分遥感探测领域的发展,以及目前已经和正在开展的各类卫星大气成分探测进展,综述大气气溶胶、主要痕量气体、主要温室气体的卫星遥感探测国际和国内现状,以及掩星和临边探测大气成分垂直廓线的进展,展望未来全球在该领域的发展方向。

**关键词** 卫星;大气成分;遥感探测

**中图分类号** P407

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.17.001

## Progress of global satellite remote sensing of atmospheric compositions and its' applications

ZHANG Xingying<sup>1</sup>, ZHOU Minqiang<sup>2,3</sup>, WANG Weihe<sup>1</sup>, LI Xiaojing<sup>1</sup>

1. National Satellite Meteorology Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China
2. Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Along with the global Climate change, the air quality has attracted a great attention from scientists and governments, especially, the atmospheric components, which not only have an impact on the local environment but also have a potential feedback on the global climate change. Recently, the satellite remote sensing, as a new-technical tool for the atmospheric science, plays an important role in monitoring the atmosphere. Here, the status, the progress and the prospective of the international and domestic atmospheric satellites are reviewed in detail, mainly focusing on the aerosols, the trace gases, and the greenhouse gases. In addition, the progress of the occultation and the limb observations of space-based remote sensing is also discussed.

**Keywords** satellite; atmospheric components; remote sensing

随着现代化发展,人类活动造成的化石燃料燃烧、工业排放、土地类型改变使全球大气产生了巨大变化。卤素化合物的排放参与光解反应,导致极地臭氧洞的形成<sup>[1]</sup>;燃烧过程中产生的氮氧化物参与对流层光化学催化反应产生臭氧,形

收稿日期:2015-06-18;修回日期:2015-07-20

基金项目:中国气象局公益性行业(气象)科研专项(GYHY201106045);欧盟FP7 框架国际合作项目(606719);国家科技支撑计划项目(2014BAC16B01);国家自然科学基金项目(40905056);高分辨率对地观测系统重大专项气象应用示范项目(E310/1112);高分辨率对地观测系统重大专项应用共性关键技术项目(Y20A-D23, Y20A-D31);国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2011AA12A104)

作者简介:张兴赢,研究员,研究方向为卫星大气成分遥感及其应用,电子信箱:zxy@cma.gov.cn

引用格式: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[J].科技导报,2015,33(17):13-22.

成光化学烟雾<sup>[2]</sup>;SO<sub>2</sub>和氮氧化物及CO<sub>2</sub>等酸性气体排放至空气中溶于水后形成酸雨,造成生物圈的破坏<sup>[3]</sup>;汽车尾气排放、城市建筑拆建、居民餐饮烹饪等向空气中排放各种类型的气溶胶,造成大气中颗粒物质量浓度增加,能见度降低,同时会引起的辐射强迫,影响地气系统的辐射平衡<sup>[4]</sup>;大量化石燃料的燃烧造成大气中CO<sub>2</sub>的含量急剧升高,CO<sub>2</sub>对地表红外辐射有很强的吸收作用,是主要的温室气体之一,其浓度的升高导致全球变暖、冰川融化、雪线抬升、海平面升高等一系列气候-环境问题<sup>[5]</sup>。20世纪80年代开始,大气痕量气体及气溶胶的研究已经成为地球环境科学的热点问题。

获得长期稳定的大气成分数据对监测大气环境、预测全球变化至关重要。传统的地面观测虽然精度高,但单个站点的代表能力有限,并且在海洋、森林、极地上空站点稀疏,无法获得全球覆盖的观测数据。而卫星观测能够在保证观测精度的条件下,弥补传统观测的不足,获得实时全球大气成分数据<sup>[6]</sup>。卫星大气成分遥感观测是指搭载在卫星平台上的传感器通过接收电磁波,从观测到的光谱中提取大气成分含量、高度等物理信息,卫星观测数据具有全球覆盖、精度高、时间序列长等特点。20世纪70年代至今,已有大量的大气成分遥感卫星产品。本文综述目前全球在该领域取得的一些进展,以及目前正在努力开展的新的探测能力和探测目标。

## 1 全球卫星大气气溶胶探测进展

大气气溶胶主要来自人为源和自然源,其中人为源包括城市工业排放、生物质燃烧、土地类型改变等;自然源包括扬尘、火山喷发、海表起浪等。气溶胶能吸收和散射太阳光,直接影响地气系统的辐射收支平衡,同时又可作为云凝结核参与云微物理过程,间接影响气候变化,气溶胶的辐射强迫存在很大的不确定性<sup>[7]</sup>。大气中的气溶胶变化剧烈,生命仅有几天,卫星观测能够获得全球气溶胶的分布和辐射特性。

### 1.1 国际进展

1) 早期的气溶胶卫星传感器。早期科学家利用AVHRR(advance very high resolution radiometer)进行气溶胶的卫星探测<sup>[8-10]</sup>,第一台AVHRR传感器于1978年搭载于TIROS-N卫星上,后续在NOAA-7(1981)、NOAA-15(1998)都搭载AVHRR传感器,它有4~6个波段,从可见波段到热红外波段,可以对地表和大气进行全天空观测。1978年发射的Nimbus-7卫星上搭载的臭氧观测仪TMOS,虽然它的主要任务是监测臭氧,但也具有气溶胶探测能力,Prospero等<sup>[11]</sup>利用TMOS的观测分析全球气溶胶分布,指出大气中沙尘气溶胶的来源。此外,McGill等<sup>[12]</sup>利用SAM II和SAGE卫星,开展了平流层气溶胶探测研究。

2) MODIS。在卫星气溶胶的反演过程中,地表反射率具有很大影响,陆地上地表类型复杂,各种土地类型差异大,而海洋表面均一、反射率较小,因此,早期的研究主要针对海洋表面的气溶胶反演,无法获得全球的气溶胶分布<sup>[13-15]</sup>。随着光学技术的进步,美国航空航天局(NASA)于1999年和2002

年分别发射的TERRA和AQUA卫星搭载了中分辨率成像光谱仪MODIS(moderate-resolution imaging spectrometer)传感器,它具有36个通道,覆盖了紫外、可见、近红外、红外等通道,波长范围为0.4~14 μm,为反演气溶胶和地表特征提供了丰富信息。MODIS的轨道高度为705 km,采用±55°扫描方式,扫描幅宽为2330 km,每1~2日即可覆盖全球一次。

Kaufman等<sup>[16]</sup>针对MODIS传感器提出了陆地气溶胶光学厚度的暗地表反演算法,随后,Remer等<sup>[17]</sup>、Levy等<sup>[18]</sup>对MODIS的气溶胶算法进行了改进,大大提高了MODIS产品的精度。由于MODIS有许多分级产品可供用户免费下载,并且有十多年长时间序列数据,被国内外学者广泛使用<sup>[19,20]</sup>。

3) MISR。MISR(multi-angle imaging spectro radiometer)多角度成像光谱仪搭载于TERRA卫星上。MISR通过9个角度探测大气,即0°角,前向和后向26.1°、45.6°、60.0°、70.5°共9个视角;探测446、558、672和866 nm共4个光谱通道。也就是说4个光谱通道每个光谱都可获取9个方向的观测图像。但是,探测角度的增加带来轨道探测幅宽和重访周期的降低,MISR探测幅宽为360 km,重访周期2~9 d(不同纬度),每9日覆盖全球1次。

MISR的多角度观测为地表与大气(气溶胶、云)信息分离解析提供了数据源。气溶胶参数反演中引入多角度观测信息,很好地解决了地表反射率参数未知问题,利用地表双向反射特性分离测量信号中地表和大气贡献,提高气溶胶参数反演精度。MISR气溶胶产品提供了沙漠、干旱地区、植被、海洋等多类下垫面背景下高质量气溶胶总量、类型信息,与地基太阳光度计反演的气溶胶光学厚度对比检验说明,MISR气溶胶光学厚度参数精度优于MODIS气溶胶产品精度<sup>[21]</sup>,但是,MISR因观测重访周期较低,在应用领域较少采用。

4) POLDER。地球反射偏振测量仪(POLDER 1)作为第一颗观测偏振探测器搭载在ADEOS-I上,于1996年发射上空,运行8个月后由于卫星太阳能电板问题停止工作。随后在2002年发射的ADEOS-II上搭载了POLDER 2,运行8个月后卫星采集器出现故障。PARASOL上搭载了第3个POLDER载荷于2004年成功上天,在A-Train计划轨道上运行,2009年12月PARASOL离开A-Train轨道,进入了原轨道之下3.9 km的轨道,开始逐渐脱离A-Train轨道,为其后续星Glory让出位置。但Glory在2011年3月由于运载火箭故障,发射失败。

偏振遥感是研究反演大气气溶胶及云微物理特征的有效手段,POLDER除了能够探测偏振信号外,还能对同一个目标进行多角度、多通道的观测,单个轨道内,对同一目标最多可进行16个不同角度的观测,因而能够获得更多的信息。Tanré等<sup>[22]</sup>利用POLDER/ADEOS-I资料研究了气溶胶细粒子的全球分布,发现细粒子气溶胶主要来自于生物质燃烧。Deuze<sup>[23]</sup>利用POLDER/ADEOS-I资料分析了全球陆地和海洋上的气溶胶光学厚度分布,Angstrom指数分布,并与地基观测资料进行了对比验证,证明了POLDER气溶胶反演产品的可

靠性。

5) CALIPSO。传统的卫星被动传感器只能获得整层大气气溶胶物理特性,无法获得气溶胶廓线分布。2006年发射上空的云和气溶胶主动激光雷达 CALIPSO 卫星搭载了激光雷达(CALIOP)、三通道的热红外成像仪(IIR)和可见光成像仪(WFC),可以提供全球 30 m 垂直分辨率的气溶胶廓线和光学厚度观测,有利于分析气溶胶的垂直输送、气溶胶的微生物特性等<sup>[24]</sup>。CALIPSO 也是 A-Train 轨道上成员之一,轨道高度为 705 km,周期为 16 d,云-气溶胶正交极化激光雷达 CALIOP 有 3 个接收通道,一个 1064 nm 的后向散射强度通道和 2 个 532 nm 后向散射信号正交极化分量的通道,偏正信息有助于分析气溶胶粒子的球形度<sup>[25]</sup>。

CALIOP 激光的能量高,具有探测稀薄气溶胶层的能力,能够为其他被动气溶胶遥感提供补充,并且能够提供气溶胶的三维分布,为分析气溶胶的输送、垂直分布都提供了数据支持。Thomason 等<sup>[26]</sup>将 CALIPSO 观测的平流层气溶胶与平流层气溶胶气体实验结果进行对比,证明了 CALIPSO 观测结果的准确性。Huang 等<sup>[27]</sup>利用 CALIPSO 分析了青藏高原夏季沙尘气溶胶,可以用于监测夏季沙尘暴的发生。

6) VIIRS。可见光红外成像辐射仪 VIIRS 是 MODIS 和 AVHRR 的拓展和改进,共有 22 个观测通道,波长从 412 nm 到 12050 nm,覆盖可见波段和红外波段,2011 年搭载于 Suomi-NPP 卫星上并成功发射,轨道高度为 824 km,扫描幅宽 $\pm 56^\circ$ ,约 3000 km,星下点分辨率达 375 m,能够对陆地、大气、冰层和海洋进行遥感探测。

Jackson 等<sup>[28]</sup>详细介绍了 VIIRS 气溶胶的算法及产品,并将 VIIRS 的气溶胶产品与地基 AERONET 观测数据进行对比验证,研究结果表明,其气溶胶光学厚度产品满足精度设计要求。Liu 等<sup>[29]</sup>将 VIIRS 的气溶胶产品与 MODIS 观测产品进行比较,指出 VIIRS 的气溶胶产品可能对植被上方存在略微的高估,对土壤地表上存在低估,同时其全球气溶胶光学厚度的离散程度大于 MODIS 的气溶胶产品,不过大部分产品在合理范围之内。目前,用户可以通过 NOAA 数据库下载 VIIRS 数据(<http://www.class.ngdc.noaa.gov>)。

除了上述传感器外,还有其他载荷也同样具有探测气溶胶的能力,如 SCIAMACHY、OMI 等,由于它们的主要目的不是探测气溶胶,故未在该部分介绍,这些传感器将在其他章节中进行介绍。

## 1.2 国内进展

2008 年,中国成功发射风云三号气象卫星 A 星(FY-3A),首次搭载了中分辨率光谱成像仪(MERSI),性能与美国的 MODIS 相近,在国内第一次实现自主卫星开展全球气溶胶的探测<sup>[30]</sup>。随后,分别在 2010 年和 2013 年先后发射的风云三号 B、C 星上继续搭载了中分辨率光谱成像仪。FY-3A/B/C 3 颗星上搭载可见光红外扫描辐射计(VIRR)与 AVHRR 类似,可以获取海洋区域上空气溶胶信息。在第四颗 FY-3D 卫星上,将把 MERSI 和 VIRR 2 个仪器的功能整合到新一代的

MERSI,气溶胶参数反演也将由 MERSI 集约化完成。

1) MERSI。中国在 2008、2010、2013 年先后发射的 FY-3A/B/C 星上搭载的 MERSI 可以探测来自地球大气系统的电磁辐射,从可见到红外共 20 个通道,能进行高精度定量遥感云特性、气溶胶、陆地表面特性观测。由于 MODIS 的气溶胶产品相对成熟,目前针对 MERSI 传感器进行的气溶胶产品定量分析还比较少,滕维远<sup>[31]</sup>2013 年将 MERSI 与 MODIS 数据气溶胶光学厚度的反演结果与北京及其周边地区的地基 AERONET 观测进行了对比分析,发现 MERSI 反演得到的气溶胶与 MODIS 的气溶胶产品一致性较好,能够反映北京地区气溶胶分布。Zhou 等<sup>[32]</sup>2014 年指出,直接采用 MODIS C005 的气溶胶模型对 FY-3A/MERSI 资料进行海洋上空气溶胶的反演,会产生较大误差,提出了一种沙尘与粗粒子混合的气溶胶模性,提高了 MERSI 定量反演海上沙尘气溶胶的能力。

2) 其他小卫星。1999—2007 年,陆续发射的中巴地球资源系列卫星(CBERS)上搭载 5 谱段 CCD,两谱段宽视场成像仪(WFI),四谱段红外多光谱扫描仪(IRMSS),参考 AVHRR 的反演技术,能够获取气溶胶信息。王中挺等<sup>[33]</sup>2009 年采用暗像元法对南宁市及北京地区附近的 CBERS02B 卫星的 CCD 传感器数据进行陆地气溶胶的反演,并与 MODIS 气溶胶产品进行对比,结果显示,CBERS02B 卫星的 CCD 传感器数据能够较好地反演陆地气溶胶。2002 年发射的海洋一号卫星,搭载的光谱成像仪 CCD,能够获取气溶胶信息。2008 年发射的环境与减灾卫星(HJ-1)搭载高分辨率覆盖的 CCD 相机,也具有遥感气溶胶的能力。王中挺等<sup>[34]</sup>采用改进的暗像元法,对环境一号卫星 CCD 相机的观测数据进行陆地气溶胶反演,发现 AOD 较大时( $>0.2$ )反演结果较好,在 AOD 较小时( $<0.2$ )误差较大。

目前,中国已逐渐形成气象-海洋-环境-资源一体的气溶胶综合卫星观测网络,虽然在仪器性能上与国外仍有差距,但已能够从观测数据中反演得到相对合理的气溶胶产品。同时,中国也正在规划云和气溶胶主动激光雷达,实现气溶胶的垂直结构观测。随着传感器光学技术的进步和卫星平台负载能力的提高,中国的气溶胶卫星监测网会更加成熟。

## 2 全球卫星大气痕量气体探测进展

当前的人类活动、工业排放、土地类型改变使得大气中痕量气体含量升高,引起大气污染。其中最主要的气体成分为臭氧、二氧化硫、氮氧化物、氧化溴、甲醛等。这些气体可以参与大气光化学反应,降水化学和气溶胶的气-粒转化,能够对全球的生态环境及气候变化造成严重影响。大气痕量气体的分析依赖于长期、稳定、高覆盖、精确的观测数据。传统的地基观测基于定点采样技术,数据的观测精度高,但由于单个采样点主要来自近地表,数据的代表范围小,采样点分布不均匀,海洋和极地地区几乎没有观测站点,无法获得全球的覆盖。卫星观测能够弥补传统地基观测的不足,提供全球整层的大气痕量气体含量,因此许多大气痕量气体的分

析都基于卫星数据开展。

## 2.1 国际进展

1) TOMS。1978年发射的Nimbus-7卫星以及随后发射的Metor-3卫星、Earth Polar卫星上搭载的臭氧观测仪(TOMS),其主要任务是监测大气中臭氧含量,以及火山喷发到平流层的SO<sub>2</sub>监测。

Stolarski等<sup>[35]</sup>利用TOMS的观测资料发现1997—1985年7年中南极上空10月臭氧含量最小值下降了40%,最大值下降了20%,首次利用卫星资料证实了南极臭氧洞的存在。Fishman等<sup>[36]</sup>利用TMOS的观测数据获得了全球对流层臭氧含量分布;Kim等<sup>[37]</sup>根据TMOS观测资料,指出对东太平洋对流层臭氧变化与生物质燃烧和大气运动的影响;Thompson等<sup>[38]</sup>将1998—2000年TMOS赤道地区的臭氧观测数据与地基观测站点进行了对比实验,指出TMOS臭氧观测数据误差约5%。Krueger等<sup>[39]</sup>最早利用TMOS资料探测平流层SO<sub>2</sub>质量浓度,定量获取了火山喷发输送到平流层的SO<sub>2</sub>含量。Krueger等<sup>[40]</sup>和Pyle等<sup>[41]</sup>又先后用TMOS资料分析了由火山喷发输送到平流层的SO<sub>2</sub>含量。目前,NASA大气化学和动力实验室提供1979—2005年TMOS观测的SO<sub>2</sub>质量浓度分布,并且提供资料下载(<http://so2.gsfc.nasa.gov/>)。

2) BUV、SBUV、SBUV/2系列。SBUV系列载荷能提供臭氧的长时间序列观测。利用太阳反射紫外辐射(BUV)进行臭氧检测的传感器最早搭载于Nimbus-4卫星上,于1970年成功发射<sup>[42]</sup>。随后,在1978年发射的Nimbus-7卫星上,搭载了臭氧总量测绘光谱仪(SBUV),其具有7个探测通道,波段范围为252~340 nm,能够获得更高精度的大气臭氧含量。接着,NOAA-9/11/14/16/17/18/19系列都搭载了改进后的SBUV/2。

Herman等<sup>[42]</sup>利用SBUV和TMOS的观测数据进行长时间序列订正,得到全球臭氧变化分布,McPeter等<sup>[44]</sup>将SBUV和SAGEII观测的臭氧廓线互相比较,两者结果接近,全球大部分地区相差±5%,相差最大值出现在南半球,约±10%。Bhartia等<sup>[45]</sup>指出SBUV传感器的杂散光少,具有很高的信噪比,并且选取的通道对臭氧信息敏感,因此在太阳高度角为70°时,臭氧的廓线反演精度仍可以达到1~2 DU。由于SBUV系列的观测持续时间长、精度高,SBUV数据可用于长期监测全球臭氧含量变化<sup>[46]</sup>。

3) GOME。1995年4月欧洲空间局(ESA)发射的ERS-2卫星搭载了全球臭氧监测仪(GOME),其主要任务是监测臭氧以及在对流层和平流层臭氧化学中具有重要影响的痕量气体(如NO<sub>2</sub>、BrO、OCIO、SO<sub>2</sub>等)的全球分布<sup>[47]</sup>。GOME接收来自大气-地表发射的太阳辐射,波长覆盖紫外、可见和近红外(240~790 nm),光谱分辨率为0.2~0.4 nm。GOME观测方式为对地观测,扫描幅宽为120~960 km,3日可以实现全球覆盖,能够获得水平分辨率40 km×40 km至40 km×320 km的大气痕量气体含量产品及垂直分辨率为5 km的臭氧廓线产品。

GOME光谱分辨率高,成为第一个获得大气痕量气体含量的卫星传感器。GOME观测被广泛用于大气痕量气体监

测,Burrows等<sup>[48]</sup>详细地介绍了GOME的仪器性能、工作原理,并且利用GOME产品监测了极地臭氧洞,大气OCIO、BrO、NO<sub>2</sub>含量变化。Richer等<sup>[49]</sup>利用GOME资料分析了1997年北半球春夏季的BrO分布,首次发现在加拿大北部地区对流层BrO含量从3月至5月持续升高,推测是由于当地溴排放造成。Chance等<sup>[50]</sup>利用GOME资料获得了北美地区甲醛的分布。Richer等<sup>[51]</sup>分析了GOME的对流层NO<sub>2</sub>反演算法及其误差,并利用实测资料,发现NO<sub>2</sub>的含量分布与生物质燃烧及闪电过程都有关系。Martin等<sup>[52]</sup>提出了一种改进的NO<sub>2</sub>算法,获得了全球NO<sub>2</sub>分布,并将GOME的观测资料与GEOS-CHEM模式进行比较,两者相关系数可达0.78。

4) SCIAMACHY。扫描成像吸收光谱大气制图仪(SCIAMACHY)搭载在ESA的ENVISAT卫星上,于2002年3月上天后运行至2012年4月停止工作。SCIAMACHY波长范围240~2380 nm,覆盖紫外、可见和短波红外波段,光谱分辨率为0.2~1.5 nm,共有8个通道,其主要任务是测量全球范围内痕量气体含量,同时SCIAMACHY也具有探测温室气体的能力<sup>[53]</sup>。SCIAMACHY的扫描幅宽为960 km,6日覆盖1次全球,具有对地、临边和掩星观测3种观测方式,可以获得对流层、平流层及中间层的大气成分、云和气溶胶信息。

SCIAMACHY采用DOAS方法反演SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、BrO等气体。Blond等<sup>[54]</sup>将SCIAMACHY观测的NO<sub>2</sub>产品与区域大气化学模式进行不同时空尺度的比较,两者具有很好的一致性,从而验证了SCIAMACHY卫星NO<sub>2</sub>产品的可靠性。Zhang等<sup>[55]</sup>利用GOME和SCIAMACHY卫星NO<sub>2</sub>产品首次专门研究了中国区域的NO<sub>2</sub>时空分布特征和长期变化趋势及其与机动车的关系。Rohen等<sup>[56]</sup>根据SCIAMACHY临边臭氧观测,发现35~65 km中间层臭氧含量受太阳活动影响剧烈。Buchwitz等<sup>[57]</sup>开发了基于权重函数的WFM-DOAS方法用于SCIAMACHY上CO<sub>2</sub>和CH<sub>4</sub>的反演。Frankenberg等<sup>[58]</sup>对2003—2009年SCIAMACHY观测的全球CH<sub>4</sub>数据进行分析,发现全球CH<sub>4</sub>含量在2007年之后开始增长。Zhang等<sup>[59]</sup>利用SCIAMACHY观测获得SO<sub>2</sub>数据,分析研究了中国区域大气SO<sub>2</sub>的时空分布特征及其长期变化趋势。Wang等<sup>[60]</sup>利用SCIAMACHY观测,从自然源和人为源两方面解释了中国地区2003—2011年CO<sub>2</sub>含量的季节性变化及年增长趋势。

5) OMI。由荷兰航天计划和芬兰气象研究所合作研制的臭氧探测仪(OMI)搭载在EOS Aura卫星上,于2004年7月成功上天。OMI是一个对地观测光谱仪,波长范围为270~500 nm,光谱分辨率为0.5 nm,共740个波长<sup>[61]</sup>。OMI的扫描角度可达114°,对应地面2600 km的幅宽,因此能够在1日内覆盖全球。在正常的全球运行模式中,OMI星下点像元大小为13 km×24 km,在缩放观测模式下,像元可以提高至13 km×12 km,小的像元能够获得更多晴空像元,同时还能够提供更加精细的大气痕量气体含量分布。OMI主要任务是进行大气臭氧含量监测,同时还能提供NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、BrO、OCIO及气溶胶的信息。

Boersma等<sup>[62]</sup>介绍了OMI的数据处理过程,并基于GOME和SCIAMACHY的NO<sub>2</sub>算法,开发了3 h快速反演NO<sub>2</sub>的方法,用于空气质量监测。Boersma等<sup>[63]</sup>和Celarier等<sup>[64]</sup>对OMI的NO<sub>2</sub>产品做了验证工作,发现OMI的对流层NO<sub>2</sub>含量存在15%~30%的低估。Krotkov等<sup>[65]</sup>选取了合适的通道用于OMI上SO<sub>2</sub>的反演,获得全球SO<sub>2</sub>分布,与TMOS的观测相比,反演的灵敏度大大提高。Ziemke等<sup>[66]</sup>将OMI的对流层臭氧含量与全球化学模式的结果进行比较,发现两者一致性很好。Huang等<sup>[67]</sup>利用OMI资料对北京APEC期间的大气污染减排做了评估研究。

6) GOME-2。第二代全球臭氧监测仪(GOME-2)在2006年搭载于METOP-A卫星上成功上天,随后在2012年上天的METOP-B卫星上也搭载了GOME-2传感器。GOME-2的波段设置与GOME基本相同,但具有更大的幅宽扫描(1920 km),星下点分辨率为80 km×40 km,1日就可以实现全球覆盖<sup>[68]</sup>。2013年7月15日之后,METOP-A的扫描幅宽调整为960 km,星下点分辨率变为40 km×40 km。

Loyola等<sup>[69]</sup>分析了GOME-2臭氧含量的反演算法及其误差,获得了全球臭氧含量产品。Theys等<sup>[70]</sup>利用GOME-2的资料分析了全球对流层BrO分布,发现GOME-2观测的结果与地基观测结果及SCIAMACHY的观测接近。Rix等<sup>[71]</sup>利用GOME-2资料分析了埃亚飞亚德拉火山2010年3月向大气中喷发的BrO和SO<sub>2</sub>总量。Valks等<sup>[72]</sup>开发了GOME-2的柱总量NO<sub>2</sub>含量和对流层NO<sub>2</sub>含量的业务算法,并与地基MAX-DOAS进行了对比验证,取得了良好的结果。

7) OMPS。臭氧成像廓线仪(OMPS)搭载于NPP卫星上在2011年10月成功上天,它具有对地和临边2种观测方式,能够获得大气臭氧总量和廓线信息。OMPS对地观测模式有2个传感器,一个传感器波长范围为300~400 nm,星下点像元直径约50 km,扫描幅宽为2800 km,提供全球痕量气体分布;另一个传感器的波长范围为250~310 nm,星下点像元250 km,能提供类似于SBUV/2的臭氧廓线数据,2个传感器的光谱分辨率都为1 nm。

Kramarova等<sup>[73]</sup>利用OMI观测数据和地基观测数据与OMPS观测数据进行比较,验证了OMPS臭氧观测数据的可靠性,同时利用OMPS臭氧观测数据,对2012年南极上空臭氧洞的变化过程进行了分析。Yang等<sup>[74]</sup>首次利用OMPS的数据进行了中国高污染地区SO<sub>2</sub>的观测。Yang等<sup>[75]</sup>提出了利用OMPS的数据进行对流层NO<sub>2</sub>反演的算法,并获得了全球NO<sub>2</sub>分布结果。

目前大气痕量气体的载荷发展方向为更宽的光谱覆盖、更高的光谱分辨率、更多样的观测方式、更高的时空分辨率。

## 2.2 国内进展

2008年风云三号气象卫星发射升空,开创了中国自主卫星探测大气痕量气体的里程碑,具备了自主探测大气臭氧总量和廓线的能力,随后相继在2010年和2013年发射了FY-3B和FY-3C星,都具备上述臭氧探测能力。

1) TOU。紫外臭氧总量探测仪(TOU)是搭载于中国第二代极轨气象卫星FY-3系列上的用于探测大气臭氧总量的光谱仪<sup>[76]</sup>,分别搭载于FY-3A(2008年发射)、FY-3B(2010年发射)和FY-3C(2013年发射),主要的科学目标是探测大气臭氧总量,也用于检测火山灰云,火山SO<sub>2</sub>及吸收性气溶胶。

紫外臭氧总量探测仪的原理是利用臭氧对太阳紫外波段的吸收信息来反演大气臭氧含量,TOU共包括6个带宽为1 nm的通道,利用臭氧总量与不同通道间对紫外线的吸收强度的差异反演臭氧总量<sup>[77]</sup>。测量大气后向散射和大气外界太阳辐照度,从臭氧吸收系数差别显著的2个通道的后向散射辐射中提取臭氧吸收信息,根据臭氧在2个波长上对紫外线吸收的差异与臭氧总量的关系定量反演大气臭氧总量。TOU通过空间扫描系统完成仪器在垂直于卫星轨道平面方向的对地扫描,瞬间视场角为3.6°,相应的星下点地面分辨率为52.6 km。行扫描分31点完成,扫描范围为±54°,行扫描时间8.16 s。2008年FY-3A/TOU发射后首次实现了中国星载全球臭氧总量的监测<sup>[78]</sup>,首次监测了南极臭氧洞发生、发展到消失的全过程。2011年3月,FY-3A/TOU在第一时间成功监测到了北极发生的臭氧消耗过程,于2010年发射的FY-3B/TOU克服了FY-3A/TOU在定标方面的问题<sup>[79,80]</sup>,在产品精度方面更有所提高,臭氧总量的误差约为3%。

2) SBUS。紫外臭氧垂直探测仪(SBUS)是搭载于中国第二代极轨气象卫星FY-3系列上的用于探测大气臭氧垂直廓线的光谱仪<sup>[81,82]</sup>,分别搭载于FY-3A(2008年发射)、FY-3B(2010年发射)和FY-3C(2013年发射),其主要的科学目标是获得短期和长期全球臭氧垂直分布变化。

紫外臭氧垂直探测仪在252~340 nm波段设置12个波长通道,利用臭氧对紫外辐射吸收能力随波长变化的特征,通过不同波长对组合反演得到不同高度层臭氧含量。SBUS的通道带宽约为1 nm,像元为200 km,只在星下点进行观测。2008年发射的FY-3A/SBUS实现了中国首次星载臭氧垂直廓线的反演,2011年3月,利用FY-3B/SBUS描绘了北极臭氧消耗的垂直特征。SBUS臭氧垂直廓线反演的误差约为7%<sup>[83]</sup>。

为了满足对大气环境监测的迫切需求,中国目前已经立项研制紫外高光谱卫星载荷,用于开展主要污染气体(NO<sub>2</sub>和SO<sub>2</sub>)的监测,将分别搭载于2016年即将发射的高分五号卫星和计划2018年发射的FY-3E星上,不仅可以实现对整层大气痕量气体的高精度探测,而且FY-3E星上还设置了临边探测模式,可以获取大气痕量气体的垂直廓线分布信息,为中国的大气环境监测和治理提供重要的科技支撑。

## 3 全球卫星大气温室气体探测进展

大气中温室气体主要为H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、O<sub>3</sub>、NO<sub>2</sub>,其中CO<sub>2</sub>为最主要的人类活动排放气体,根据IPCC(2013)第五次报告指出,大气中CO<sub>2</sub>的含量在2011年达到了391 ppm,比工业革命前的1750年升高40%。CO<sub>2</sub>气体含量与气候变化密切相关。

关,温室气体辐射强迫引起全球温度升高,导致冰川融化、海平面升高、气候异常,威胁人类生存环境<sup>[84]</sup>。卫星遥感能够全球范围内稳定连续地监测大气 CO<sub>2</sub> 含量,已得到了广泛应用。早期卫星监测大气中的 CO<sub>2</sub> 主要依赖于热红外波段,如 AIRS、IASI 等,CO<sub>2</sub> 在热红外波段吸收强,卫星接收到的信号主要来自平流层,而人类活动排放的 CO<sub>2</sub> 主要集中在对流层,因此近年来利用短波红外波段进行 CO<sub>2</sub> 的卫星观测计划越来越多,CO<sub>2</sub> 在短波红外波段吸收相对较弱,近地面的信号能够穿过大气层被卫星传感器接收。本文仅介绍短波红外波段的温室气体卫星传感器。

### 3.1 国际进展

1) GOSAT。2009 年日本成功发射了专门用于温室气体 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 探测的 GOSAT 卫星。其中最主要的载荷为傅里叶光谱仪(TANSO-FTS),TANSO-FTS 获取 3 个短波红外波段光谱(band1:0.76 μm 氧气吸收 A 带;band2:1.61 μm 二氧化碳弱吸收带;band3:2.06 μm 二氧化碳较强吸收带),及一个热红外宽通道光谱(5.5~14.3 μm),其中短波红外波段的光谱分辨率高达 0.2~0.5 cm<sup>-1</sup><sup>[85]</sup>。GOSAT 卫星有对地观测、耀斑观测及特定目标观测 3 种观测方式,其中耀斑观测主要用于低反射率地表的温室气体反演(如雪地、海洋),特定目标观测是便于将卫星反演与地基观测进行对比验证。GOSAT 卫星的像元直径约 10 km。

Yokata 等<sup>[86]</sup>首次利用 GOSAT 的观测数据从无云像元中反演得到了 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 的全球分布图,卫星反演的结果显示北半球 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 的含量要高于南半球,与地基观测的分布一致,但数值上存在低估。为了解决这个问题,Yoshida 等从反演算法、仪器定标和与地基验证的角度对卫星观测产品进行了修正<sup>[87-89]</sup>,目前日本 GOSAT 官方给出的产品已经能够获得误差在 1% 的温室气体反演值。由于数据的公开,世界各国多个研究小组针对 GOSAT 卫星观测资料开发了 XCO<sub>2</sub> 和 XCH<sub>4</sub> 的反演算法,不同算法的大气和地表参数有所区别,不过,与地基观测的对比结果显示,几种算法都能获得 1% 的反演精度<sup>[90-94]</sup>。Kadyrov 等<sup>[95]</sup>指出,GOSAT 卫星观测二氧化碳柱含量资料能够减少碳通量估计的不确定性,如果单点的反演误差能小于 2.5 ppm,月平均偏差小于 0.8 ppm,碳通量的不确定性将降低一半。Fraser 等<sup>[96]</sup>利用 GOSAT 资料和地基观测资料评估 CH<sub>4</sub> 的月平均通量,发现在 GOSAT 覆盖率高的地区,将卫星资料加入同化系统能够使得 CH<sub>4</sub> 通量不确定性减少 3 倍,Basu 等<sup>[97]</sup>选取 GOSAT 资料,结合 top-down 的方法,获得了高精度的全球碳通量分布。

1) OCO-2。美国第一颗碳卫星(OCO)由于载荷火箭出现故障在 2009 年发射失败,时隔 6 年后,于 2014 年 7 月成功发射了第二颗二氧化碳观测卫星(OCO-2),目前已经完成在轨测试,成为 A-Train 系列卫星的火车头。OCO-2 是光栅式光谱仪,通道设置与 GOSAT 相似,包含 O2-A 波段(0.76 μm),二氧化碳弱吸收带(1.61 μm)和二氧化碳较强吸收带(2.06 μm),光谱分辨率 0.2~0.7 cm<sup>-1</sup>。OCO-2 与 COSAT 卫星

一样,除了对地观测,还能够进行耀斑观测及特定目标观测。星下点像元直径约 2.5 km,能够获得比 GOSAT 更多的晴空像元,提供更多的有效观测数据。OCO-2 的轨道周期为 16 d,对地观测与耀斑观测按轨道周期交替进行,因此每 32 天能完成 1 次完整的观测。

气溶胶和云散射对短波红外辐射传输有很大影响<sup>[98,99]</sup>,而 OCO-2 作为 A-Train 系列卫星之一,能够利用 CALIPSO、CLOUDSAT、MODIS、AIRS 等其他载荷,获得同步的气溶胶和云的信息,有利于提高温室气体反演精度。在 2009 年 OCO 发射失败后,ACOS 团队利用 GOSAT 观测数据,开发了适用于 OCO-2 的反演算法<sup>[90,100]</sup>。NASA 在 2014 年 12 月 8 日首次发布了 OCO-2 第一张 2014 年 10 月 1 日至 2014 年 11 月 11 日的全球二氧化碳含量分布图。此外,根据 Frankenberg 等<sup>[101,102]</sup>研究成果,NASA 给出了同时期全球的荧光分布,得到全球植被光合作用分布。

### 3.2 国内进展

迄今,中国在轨的卫星还没有能力探测温室气体。为了缓解全球气候变化研究和碳排放的压力,中国先后立项开展卫星温室气体监测研究,先后在 FY-3D 星、全球二氧化碳观测科学试验卫星和高分五号卫星上论证搭载主要温室气体探测仪器,上述 3 颗卫星都计划在 2016 年发射,届时中国将同时有 3 颗卫星具备温室气体探测的能力,可以联合形成全球温室气体探测星座,可以获取高覆盖、高精度的温室气体数据。

## 4 全球卫星掩星临边大气成分廓线探测进展

### 4.1 国际进展

传感器通过直接跟踪太阳、月亮或恒星等目标物进行观测的方式为掩星观测,传感器直接指向大气,接收来自大气散射的方式为临边观测,这两种观测都能够获得高垂直分辨率的微量气体和气溶胶的垂直分布。

由 NASA 组织的平流层气溶胶和气体实验发射的平流层气溶胶观测仪(SAM)和平流层气溶胶和气体实验仪(SAGE) 2 个系列,采用掩星的观测方式进行全球大气探测。其中 SAM 是最早利用太阳掩星观测获取平流层气溶胶含量的传感器,1975 年搭载于阿波罗宇宙飞船上,其后续 SAM II 传感器搭载在 Nimbus-7 卫星上,于 1978 年成功发射。1979 年上天的 AEM-B 卫星上的 SAGE I 同样采用太阳掩星观测方式,进行平流层气溶胶、臭氧、二氧化氮的探测,其后续 SAGE II 和 SAGE III 分别搭载于 1984 年上天的 ERBS 卫星和 2001 年上天的 Meter-3M 卫星上。NASA 预计 2016 年再发射一颗 SAGE III,补充现有的观测网络。搭载在 UARS 平台上的卤素掩星观测仪(HALOE)于 1991 年成功发射,采用太阳掩星观测获取平流层大气成分含量。全球掩星臭氧探测仪(GOMOS)搭载于 Envisat 卫星上于 2002 年成功上天,GOMOS 是利用星光进行对流层至中间层的大气气溶胶、气体探测的传感器,它的波长范围覆盖紫外、可见和近红外,能够获得全球

15~100 km 高度上垂直分辨率达 1.7 km 的臭氧廓线产品<sup>[103]</sup>。

1991 年 NASA 发射 UARS 卫星上搭载了先进的平流层中间层探测器 (ISAMS), 利用热红外波段进行大气痕量气体和气溶胶的探测, 另外该平台上还搭载了微波临边探测仪 (MLS), 是第一台采用临边观测方式的微波探测仪, 用于平流层的臭氧、水气、温度等探测, 由于采用微波波段, 其观测不受云和火山灰的影响<sup>[104]</sup>。2001 年搭载于 Odin 卫星上的光学摄谱仪和红外成像系统 (OSIRIS) 也采用临边观测方式, 波段范围从紫外到近红外, 可进行 7~65 km 的垂直方向观测, 获得 O<sub>3</sub>、NO<sub>2</sub>、气溶胶等信息<sup>[105]</sup>。2002 年发射的 Envisat 卫星上搭载的 MIPAS 传感器是傅里叶红外光谱仪, 波长范围 685~2410 cm<sup>-1</sup>, 光谱分辨率为 0.025 cm<sup>-1</sup>, 采用临边观测, 可以获得 6~68 km 高度上 O<sub>3</sub>、NO<sub>2</sub>、CO 等气体廓线。2003 年加拿大 SCISAT-1 卫星搭载的 ACE-FTS 传感器采用临边观测方式, 观测波长为 750~4400 cm<sup>-1</sup>, 分辨率为 0.02 cm<sup>-1</sup>, 能够获得 O<sub>3</sub>、CH<sub>4</sub>、CO、NO、NO<sub>2</sub> 等多种气体的垂直廓线<sup>[106]</sup>。2004 年发射的 Aura 卫星上, 搭载了 1 台 MLS 和 1 台红外波段对流层发射分光计 (TES)。TES 具有很高的光谱分辨率, 可以对地观测和临边观测, 获得 0~33 km 高度上 O<sub>3</sub>、H<sub>2</sub>O、CO、CH<sub>4</sub>、NO<sub>2</sub> 的廓线<sup>[107]</sup>。

#### 4.2 国内进展

目前中国在轨卫星尚不具备掩星临边探测大气成分的能力, 为了加快开展全球变化的研究, 急需获取全球大气成分的廓线变化信息, 尤其是高层大气中的微量化学成分变化信息以及极区的大气成分变化特征, 这对研究全球变化具有重要的意义。目前中国在研的高分五号卫星上即将搭载类似加拿大 ACE-FTS 的红外高光谱掩星探测仪器, 计划 2016 年发射, 将可以获取中国南极地区上空大气成分垂直变化信息, 目前国家卫星气象中心正在领衔开展数据处理关键技术攻关。另外, 计划于 2018 年发射的 FY-3E 星上将搭载紫外临边探测仪器, 可以获取全球主要痕量气体的垂直廓线分布信息。

### 5 全球卫星大气成分探测展望

#### 5.1 静止卫星痕量气体探测

为了进行更高时间分辨率的大气成分遥感观测, 目前欧洲、美国、韩国都提出了利用静止卫星进行痕量气体观测的计划。韩国计划在 2017—2018 年发射的 MP-GEOSAT 静止卫星上搭载环境监测光谱仪 (GEMS), 它是由一个扫描的紫外-可见光谱仪、先进的光谱成像仪和静止卫星海色图像仪组成, 对太平洋区域进行静止观测<sup>[108]</sup>。欧洲提出了 GMES 计划, 在 Sentinel-4 搭载 UVN 平台, 用于观测对流层的 O<sub>3</sub>、NO<sub>2</sub>、HCHO、SO<sub>2</sub> 气体含量<sup>[109]</sup>; 在 MTG 上搭载 IRS 平台, 用于对流层的 O<sub>3</sub> 和 CO 观测, 预计于 2017/2018 年发射。美国 NASA 提出的 GEO-CAPE 计划, 预计 2020 年发射<sup>[110]</sup>。

中国自主的风云四号气象卫星, 正在规划在 FY-4B 静止气象卫星上搭载类似的载荷。虽然静止卫星痕量气体观测方式存在很大的优越性, 但由于其轨道高, 导致了卫星接收到的能量弱, 产品的精度低, 空间分辨率低, 因此静止卫星大

气成分观测对卫星的接收镜筒提出了很高的要求。

#### 5.2 主动激光雷达二氧化碳探测

目前全球在卫星探测二氧化碳上只有日本和美国利用光学被动遥感开展监测, 为了获取更加精细的大气二氧化碳含量信息, 美国在 2008 年提出利用星载主动激光雷达 CO<sub>2</sub> 观测的 ASCENDS 计划, 预计 2023 年发射上天<sup>[111]</sup>。它不依赖于太阳光, 可以进行全天候观测, 反演的原理采用差分吸收的思想, 激光器同时发射两束波长相近的脉冲, 一束位于 CO<sub>2</sub> 吸收峰值位置, 另一束在吸收翼区, 根据两束脉冲信号的比值可以获得大气中的 CO<sub>2</sub> 含量。

中国目前正在推动的空间基础设施规划里的“大气环境及其污染物监测卫星”, 也将搭载上述类似的主动激光雷达, 开展大气二氧化碳的高精度探测。

#### 参考文献 (References)

- [1] Newman P A, Gleason J F, McPeters R D, et al. Nominally low ozone over the Arctic[J]. *Geophysical Research Letters*, 1995, 24(22): 2689-2692.
- [2] Crutzen P J. The role of NO and NO<sub>2</sub> in the chemistry of the troposphere and stratosphere[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1979, 7(1): 443-472.
- [3] Singh A, Agrawal M. Acid rain and its ecological consequences[J]. *Journal of Environmental Biology*, 2007, 29(1): 15-24.
- [4] Laci A, Hansen J, Sato M. Climate forcing by stratospheric aerosols[J]. *Geophysical Research Letters*, 1992, 19(15): 1607-1610.
- [5] Manabe S, Wetherald R T. On the distribution of climate change resulting from an increase in CO<sub>2</sub> content of the atmosphere[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1980, 37(1): 99-118.
- [6] 张兴赢, 张鹏, 方宗义, 等. 基于卫星遥感技术的大尺度大气成分监测研究进展[J]. *气象*, 2007, 33(7): 3-14.  
Zhang Xingying, Zhang Peng, Fang Zongyi, et al. Progress in trace gas remote sensing study based on satellite monitoring[J]. *Meteorological Monthly*, 2007, 33(7): 3-14.
- [7] IPCC. Climate change 2013: The physical science basis. Working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. New York, NY: Cambridge University Press, 2014.
- [8] Rao C R N, McClain E P, Stowe C C. Remote sensing of aerosols over the oceans using AVHRR data theory, practice and applications[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1989, 10(45): 743-749.
- [9] Holben B, Vermote E, Kaufman Y J, et al. Aerosol retrieval over land from AVHRR data-application for atmospheric correction[J]. *Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(2): 212-222.
- [10] Rudolf B H, Joseph M P, Larry L S. Characterization of tropospheric aerosols over the oceans with the NOAA advanced very high resolution radiometer optical thickness operational product[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1997, 102(D14): 16889-16909.
- [11] Prospero J M, Ginoux P, Torres O, et al. Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the nimbus 7 total ozone mapping spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product [J]. *Reviews of Geophysics*, 2002, 40: 21-31.
- [12] McGill M J, Vaughan M A, Trepte C R, et al. Airborne validation of

- spatial properties measured by the CALIPSO lidar[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007; doi: 10.1029/2007JD008768.
- [13] Griggs M. Measurements of atmospheric aerosol optical thickness over water using ERTS-1 data[J]. *Journal of Air Pollution Control Association*, 1975, 25: 622-626.
- [14] Mekler Y H, Quenzel G O, Marcus I. Relative atmospheric aerosol content from ERTS observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1977, 82: 967-972.
- [15] Koepke P, Quenzel H. Turbidity of the atmosphere determined from satellite calculation of optimum viewing geometry[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1979, 84(C12): 7847-7855.
- [16] Kaufman Y J, Tanre D, Remer L A, et al. Operational remote sensing of tropospheric aerosol over land from EOS moderate resolution imaging spectroradiometer[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 27(D14): 17051-17067.
- [17] Remer L A, Kaufman Y J, Tanre D, et al. The MODIS aerosol algorithm, products, and validation[J]. *Journal of the Atmospheric Science*, 2005, 62(4): 947-973.
- [18] Levy R C, Remer L A. Second-generation operational algorithm: Retrieval of aerosol properties over land from inversion of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer spectral reflectance[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, 112(D13); doi: 10.1029/2006JD007811.
- [19] Savtchenko A, Ouzounov D, Ahmad S, et al. Terra and Aqua MODIS products available from NASA GES DAAC[J]. *Advances in Space Research*, 2004, 34(4): 710-714.
- [20] 李晓静, 张鹏, 张兴赢, 等. 中国区域MODIS陆上气溶胶光学厚度产品检验[J]. *应用气象学报*, 2009, 20(2): 147-156.  
Li Xiaojing, Zhang Peng, Zhang Xingying, et al. Validation of aerosol optical thickness product over China with MODIS data operated at NSMC[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2009, 20(2): 147-156.
- [21] Liu J, Xia X, Li Z, et al. Validation of multi-angle imaging spectroradiometer aerosol products in China[J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2010, 62B: 117-124.
- [22] Tanré D, Bréon M F, Deuzé L J, et al. Global observation of anthropogenic aerosols from satellite[J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28: 4555-4558.
- [23] Deuzé L J, Bréon M F, Devaux C, et al. Remote sensing of aerosols over land surfaces from POLDER-ADEOS-1 polarized measurements [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2001, 106(D5): 4913-4926.
- [24] Winker D M, Hunt W H, McGill M J. Initial performance assessment of CALIOP[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34; doi: 10.1029/2007GL030135.
- [25] Sassen K. The polarization lidar technique for cloud research: A review and current assessment[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1991, 72(12): 1848-1866.
- [26] Thomason L W, Pitts M C, Winker D M. CALIPSO observations of stratospheric aerosols: A preliminary assessment[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2007, 7(20): 5283-5290.
- [27] Huang J, Minnis P, Yi Y, et al. Summer dust aerosols detected from CALIPSO over the Tibetan Plateau[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34; doi: 10.1029/2007GL029938.
- [28] Jackson J M, Liu H, Laszlo I, et al. Suomi-NPP VIIRS aerosol algorithms and data products[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(22): 12673-12689.
- [29] Liu H, Remer L A, Huang J, et al. Preliminary evaluation of S-NPP VIIRS aerosol optical thickness[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, 119(7): 3942-3962.
- [30] 杨军, 董超华. 新一代风云极轨气象卫星业务产品及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010.  
Yang Jun, Dong Chaohua. The operational products of the new generation Fengyun Polar orbit meteorological satellite and its application[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [31] 滕维远. 北京及其周边地区MERSI与MODIS数据气溶胶光学厚度反演研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2013.  
Teng Weiyuan. The study of aerosol retrieval from MERSI and MODIS at Beijing and near-by field[D]. Beijing: Capital Normal University, 2013.
- [32] Zhou Y B, Bai J, Zhou Z H, et al. Aerosol optical depth retrieval from FY-3A/MERSI for sand-dust weather over ocean[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2014, 18(4): 771-787.
- [33] 王中挺, 陈良富, 巩慧, 等. CBERS02B 卫星 CCD 传感器数据反演陆地气溶胶[J]. *遥感学报*, 2009(6): 1047-1059.  
Wang Zhongting, Chen Liangfu, Gong Hui, et al. Modified DDV method of aerosol optical depth inversion over land surfaces from CBERS02B[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2009(6): 1047-1059.
- [34] 王中挺, 厉青, 陶金花, 等. 环境一号卫星 CCD 相机应用于陆地气溶胶的监测[J]. *中国环境科学*, 2009(9): 902-907.  
Wang Zhongting, Li Qing, Tao Jinhua, et al. Monitoring of aerosol optical depth over land surface using CCD camera on HJ-1 satellite [J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(9): 902-907.
- [35] Stolarski R S, Krueger A J, Schoeberl M R, et al. Nimbus 7 satellite measurements of the springtime Antarctic ozone decrease[J]. *Nature*, 1986, 322: 808-811.
- [36] Fishman J, Watson C E, Larsen J C, et al. Distribution of tropospheric ozone determined from satellite data[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1990, 95(D4): 3599-3617.
- [37] Kim J H, Newchurch M J. Climatology and trends of tropospheric ozone over the eastern Pacific Ocean: The influences of biomass burning and tropospheric dynamics[J]. *Geophysical Research Letters*, 1996, 23(25): 3723-3726.
- [38] Thompson A M, Witte J C, McPeters R D, et al. Southern hemisphere additional ozonesondes (SHADOZ) 1998-2000 tropical ozone climatology 1. Comparison with total ozone mapping spectrometer (TOMS) and ground-based measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, 108(D2); doi: 10.1029/2001JD000967.
- [39] Krueger A J. Sighting of El Chichon sulfur dioxide clouds with the nimbus 7 total ozone mapping spectrometer[J]. *Science*, 1983, 220: 1377.
- [40] Krueger A J, Walter L S, Bhartia P K, et al. Volcanic sulfur dioxide measurements from the total ozone mapping spectrometer (TOMS) instruments[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1995, 100(D7): 14057-14076.
- [41] Pyle D M, Beattie P D, Bluth G J S. Sulphur emissions to the stratosphere from explosive volcanic eruptions[J]. *Bulletin of Volcanology*, 1996, 57: 663-671.
- [42] Heath D F, Krueger A J, Roeder H A, et al. The solar backscatter ultraviolet and total ozone mapping spectrometer (SBUV/TOMS) for Nimbus G[J]. *Optical Engineering*, 1975, 14(4): 1443-23.
- [43] Herman J R, Hudson R, McPeters R, et al. A new self-calibration method applied to TOMS and SBUV backscattered ultraviolet data to determine long-term global ozone change[J]. *Journal of Geophysical*

- Research: Atmospheres, 1991, 96(D4): 7531–7545.
- [44] McPeters R D, Miles T, Flynn L E, et al. Comparison of SBUV and SAGE II ozone profiles: Implications for ozone trends[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1994, 99(D10): 20513–20524.
- [45] Bhartia P K, McPeters R D, Flynn L E, et al. Solar backscatter UV (SBUV) total ozone and profile algorithm[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, 6(10): 2533–2548.
- [46] McPeters R D, Bhartia P K, Haffner D, et al. The version 8.6 SBUV ozone data record: An overview[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118: 8032–8039.
- [47] European Space Agency. GOME global ozone measuring experiment users manual[M]. ESA SP 2–1182, Noordwijk: ESA/ESTEC, 1995.
- [48] Burrows J P, Weber M, Buchwitz M, et al. The global ozone monitoring experiment (GOME): Mission concept and first scientific results[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1999, 56(2): 151–175.
- [49] Richter A, Wittrock F, Eisinger M, et al. GOME observations of tropospheric BrO in northern hemispheric spring and summer 1997[J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(14): 2683–2686.
- [50] Chance K, Palmer P I, Spurr R J D, et al. Satellite observations of formaldehyde over North America from GOME[J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(21): 3461–3464.
- [51] Richter A, Burrows J P. Tropospheric NO<sub>2</sub> from GOME measurements. *Advances in space research*[J]. 2002, 29(11): 1673–1683.
- [52] Martin R V. An improved retrieval of tropospheric nitrogen dioxide from GOME[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2002, 107(D20): doi: 10.1029/2001JD001027.
- [53] Bovensmann H, Burrows J P, Buchwitz M, et al. SCIAMACHY: Mission objectives and measurement modes[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1999, 56(2): 127–150.
- [54] Blond N, Boersma K F, Eskes H J, et al. Inter-comparison of SCIAMACHY nitrogen dioxide observations, in situ measurements and air quality modeling results over Western Europe[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, 112(D10): doi: 10.1029/2006JD007277.
- [55] Zhang X, Zhang P, Zhang Y, et al. The trend, seasonal cycle, and sources of tropospheric NO<sub>2</sub> over China during 1997–2006 based on satellite measurement[J]. *Science in China, Series D*, 2007, 50(12): 1877–1884.
- [56] Rohen G. Ozone depletion during the solar proton events of October/November 2003 as seen by SCIAMACHY[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2005, 110: doi: 10.1029/2004JA010984.
- [57] Buchwitz M, Beek R D, Bramstedt K, et al. Global carbon monoxide as retrieved from SCIAMACHY by WFM–DOAS[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2004, 4(7): 1945–1960.
- [58] 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): doi: 10.1029/2010JD014849.
- [59] Zhang X Y, Geffen J V, Liao H, et al. Spatiotemporal variations of tropospheric SO<sub>2</sub> over China by SCIAMACHY observations during 2004–2009[J]. *Atmospheric Environment*, 2012, 60: 238–246.
- [60] Wang X, Zhang X Y, Zhang L Y, et al. Interpreting seasonal changes of low-tropospheric CO<sub>2</sub> over China based on SCIAMACHY observations during 2003–2011[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 103: 180–187.
- [61] Levelt P F, van den Oord G H J, Dobber M R, et al. The ozone monitoring instrument[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(5): 1093–1101.
- [62] Boersma K F, Eskes H J, Veeckind J P, et al. Near-real time retrieval of tropospheric NO<sub>2</sub> from OMI[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2007, 7(8): 2103–2118.
- [63] Boersma K F, Jacob D J, Bucsela E J, et al. Validation of OMI tropospheric NO<sub>2</sub> observations during INTEX–B and application to constrain NO<sub>x</sub> emissions over the eastern United States and Mexico[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(19): 4480–4497.
- [64] Celarier E A, Brinksma E J, Gleason J F, et al. Validation of ozone monitoring instrument nitrogen dioxide columns[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, 113(D15): doi: 10.1029/2007JD008908.
- [65] Krotkov N A, Carn S A, Krueger A J, et al. Band residual difference algorithm for retrieval of SO<sub>2</sub> from the Aura Ozone Monitoring Instrument (OMI)[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(5): 1259–1266.
- [66] Ziemke J R, Chandra S, Duncan B N, et al. Tropospheric ozone determined from Aura OMI and MLS: Evaluation of measurements and comparison with the Global Modeling Initiative's Chemical Transport Model[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2006, 111(D19): doi: 10.1029/2006JD007089.
- [67] Huang K, Zhang X Y, Lin Y F. The "APEC Blue" phenomena: Regional emission control effects observed from space[J]. *Atmospheric Research*, 2015: 164: 65–75.
- [68] Callies J, Corpaccioli E, Eisinger M, et al. GOME–2–Metop's second-generation sensor for operational ozone monitoring[J]. *ESA Bulletin*, 2000, 102: 28–36.
- [69] Loyola D G, Koukoulis M E, Valks P, et al. The GOME–2 total column ozone product: Retrieval algorithm and ground-based validation[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2011, 116(D7): doi: 10.1029/2010JD014675.
- [70] Theys N, Roozendael M V, Hendrick F, et al. Global observations of tropospheric BrO columns using GOME–2 satellite data[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, 11(4): 1791–1811.
- [71] Rix M, Valks P, Hao N, et al. Volcanic SO<sub>2</sub>, BrO and plume height estimations using GOME–2 satellite measurements during the eruption of Eyjafjallajökull in May 2010[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, 117(D20): doi: 10.1029/2011JD016718.
- [72] Valks P, Pinardi G, Richter A, et al. Operational total and tropospheric NO<sub>2</sub> column retrieval for GOME–2[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2011, 4(7): 1491–1514.
- [73] Kramarova N A, Nash E R, Newman P A, et al. Measuring the antarctic ozone hole with the new ozone mapping and profiler suite (OMPS)[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, 14(5): 2353–2361.
- [74] Yang K, Dickerson R R, Carn S A, et al. First observations of SO<sub>2</sub> from the satellite Suomi NPP OMPS: Widespread air pollution events over China[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(18): 4957–4962.
- [75] Yang K, Carn S A, Ge C, et al. Advancing measurements of tropospheric NO<sub>2</sub> from space: New algorithm and first global results from OMPS[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(13): 4777–4786.
- [76] Wang Y M, Wang Y J, Wang W H, et al. FY–3 satellite ultraviolet total ozone unit[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(1): 84–89.
- [77] Wang W H, Zhang X Y, An X Q, et al. Analysis for retrieval and validation results of FY–3 total ozone unit (TOU)[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 66(26): 3037–3043.

- [78] Wang W H, Zhang X Y, Wang Y M, et al. Introduction to the FY-3A total ozone unit: Instrument, performance and results[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2011, 32(17): 4749-4758.
- [79] Zhang Y, Wang W H, Li X Y, et al. Anomalous low ozone of 1997 and 2011 Arctic spring: Monitoring results and analysis[J]. *Advances in Polar Science*, 2012, 2(23): 82-86.
- [80] Wang W H, Flynn L E, 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[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(12): 4943-4955.
- [81] Huang F X, Liu N Q, Zhao M X, et al. Vertical ozone profiles deduced from measurements of SBUS on FY-3 satellite[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(10): 943-948.
- [82] Huang F X, Huang Y, Flynn L E, et al. Radiometric calibration of the solar backscatter ultraviolet sounder and validation of ozone profile retrievals[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(12): 4956-4964.
- [83] Liu N Q, Huang F X, Wang W H. Monitoring of the 2011 spring low ozone events in the arctic region[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(27): 2893-2896.
- [84] Myhre G, Highwood E J, Shine K P, et al. New estimates of radiative forcing due to well mixed greenhouse gases[J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(14): 2715-2718.
- [85] Kuze A, Suto H, Nakajima M, et al. Thermal and near infrared sensor for carbon observation Fourier-transform spectrometer on the greenhouse gases observing satellite for greenhouse gases monitoring [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(35): 6716-6733.
- [86] Yokota T N, Eguchi Y Y, Ota Y, et al. Global concentrations of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> retrieved from GOSAT: First preliminary results[J]. *Scientific Online Letters on the Atmosphere*, 2009, 5: 160-163.
- [87] Yoshida Y, Kikuchi N, Morino I, et al. Improvement of the retrieval algorithm for GOSAT SWIR XCO<sub>2</sub> and XCH<sub>4</sub> and their validation using TCCON data[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, 6(6): 1533-1547.
- [88] Yoshida Y, Kikuchi N, Yokota T. On-orbit radiometric calibration of SWIR bands of TANSO-FTS onboard GOSAT[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2012, 5(10): 2515-2523.
- [89] Yoshida Y, Ota Y, Eguchi N, et al. Retrieval algorithm for CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> column abundances from short-wavelength infrared spectral observations by the Greenhouse gases observing satellite[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2011, 4(4): 717-734.
- [90] O'Dell C W, Connor B, Bösch H, et al. The ACOS CO<sub>2</sub> retrieval algorithm-Part I: Description and validation against synthetic observations[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2012, 5(1): 99-121.
- [91] Crisp D, Fisher B M, O'Dell C, et al. The ACOS CO<sub>2</sub> retrieval algorithm and ash. Part II: Global XCO<sub>2</sub> data characterization[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2012, 5(4): 687-707.
- [92] Butz A, Guerlet S, Hasekamp O, et al. Toward accurate CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> observations from GOSAT[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(14): doi: 10.1029/2011gl047888.
- [93] Liu Y, Yang D, Cai Z. A retrieval algorithm for TanSat XCO<sub>2</sub> observation: Retrieval experiments using GOSAT data[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(13): 1520-1523.
- [94] Zhou M Q, Zhang X Y, Wang P C, et al. XCO<sub>2</sub> satellite retrieval experiments in short-wave infrared spectrum and ground-based validation[J]. *Science in China, Series D*, 2015, 58(7): 1191-1197.
- [95] Kadyrov N, Maksyutov N S, Eguchi T, et al. Role of simulated GOSAT total column CO<sub>2</sub> observations in surface CO<sub>2</sub> flux uncertainty reduction[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2009, 114(D21): doi: 10.1029/2008JD011597.
- [96] Fraser A, Palmer P I, Feng L, et al. Estimating regional methane surface fluxes: The relative importance of surface and GOSAT mole fraction measurements[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, 13(11): 5697-5713.
- [97] Basu S, Guerlet S, Butz A, et al. Global CO<sub>2</sub> fluxes estimated from GOSAT retrievals of total column CO<sub>2</sub>[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, 13(17): 8695-8717.
- [98] Butz A, Hasekamp O P, Frankenberg C, et al. Retrievals of atmospheric CO<sub>2</sub> from simulated space-borne measurements of backscattered near-infrared sunlight: Accounting for aerosol effects[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(18): 3322-3336.
- [99] Mao J, Kawa S R. Sensitivity studies for space-based measurement of atmospheric total column carbon dioxide by reflected sunlight[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(4): 914-927.
- [100] Taylor T E, O'Dell C W, O'Brien D M, et al. Comparison of cloud-screening methods applied to GOSAT near-infrared spectra[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(1): 295-309.
- [101] Frankenberg C, Butz A, Toon G C. Disentangling chlorophyll fluorescence from atmospheric scattering effects in O<sub>2</sub>A-band spectra of reflected sun-light[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(3): doi: 10.1029/2010gl045896.
- [102] Frankenberg C, Fisher J B, Worden J, et al. New global observations of the terrestrial carbon cycle from GOSAT: Patterns of plant fluorescence with gross primary productivity[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(17): doi: 10.1029/2011gl048738.
- [103] Kyrölä E, Tamminen J, Leppelmeier G W, et al. GOMOS on Envisat: An overview[J]. *Advances in Space Research*, 2004, 33(7): 1020-1028.
- [104] Barath F T, Chavez M C, Cofield R E, et al. The upper atmosphere research satellite microwave limb sounder instrument[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1993, 98(D6): 10751-10762.
- [105] Llewellyn E J, Lloyd N D, Degenstein D A, et al. The OSIRIS instrument on the Odin spacecraft[J]. *Canadian Journal of Physics*, 2004, 82(6): 411-422.
- [106] Clerbaux C, George M, Turquety S, et al. CO measurements from the ACE-FTS satellite instrument: Data analysis and validation using ground-based, airborne and space-borne observations[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, 8(9): 2569-2594.
- [107] Beer R. TES on the Aura mission: Scientific objectives, measurements, and analysis overview[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(5): 1102-1105.
- [108] Lee S, Hong Y, Song C K, et al. Plan of Korean geostationary environment satellite over Asia-Pacific region[C]//EGU General Assembly Conference Abstracts. 2010, 12: 7595.
- [109] European Space Agency, ESA. GMES Sentinels 4 and 5 Mission requirements document[R]. EOP-SMA/1507, 2007: 87.
- [110] GEO-CAPE. Geostationary coastal and air pollution events[R]. GEO-CAPE Mission NASA Workshop Report, 2008: 50.
- [111] Abshire J B, Riris H, Allan G R, et al. A lidar approach to measure CO<sub>2</sub> concentrations from space for the ASCENDS Mission[J]. *Remote Sensing*, 2010, 7832: 78320D-78320D-13.

(责任编辑 王媛媛)