

应用卫星遥感技术监测大气痕量 气体的研究进展

张兴赢 张 鹏 方宗义 邱 红 李晓静 张 艳

(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)

提 要: 大气污染是全球环境变化的焦点,传统的地面定点监测大气污染技术已经越来越不能满足科学研究和国家决策的需求,大尺度卫星遥感大气污染技术作为一种新兴的研究手段,可以得到大尺度、长时间序列的污染物时空分布特征和变化趋势,进而研究大气化学变化对全球气候和生物地球化学循环的影响。对卫星遥感大气痕量气体科学领域的发展和国际上使用的各类大气痕量气体传感器以及所取得的科研成果进行了全面的综述,结合中国地区的自身特点,提出我国利用卫星遥感技术研究大气成分的思路和未来开展科研工作的方向。

关键词: 卫星遥感技术 大气痕量气体 研究进展

The Progress in Trace Gas Remote Sensing Study Based on the Satellite Monitoring

Zhang Xingying Zhang Peng Fang Zongyi Qiu Hong Li Xiaojing Zhang Yan

(Key Laboratory for Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, China Meteorological
Administration (LRCVES/CMA), National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081)

Abstract: Atmospheric pollution has been the focus for the global environment change. The traditional ground-based monitoring of the atmospheric pollution can not satisfy the demand of science research and decision-making of government. The technology for trace gas remote sensing based on the satellite monitoring has played an important role in pollution monitoring, which can get the temporal and spatial variation of pollution in long - time series and the trend of the trace gas change .

863 计划 ENVISAT 大气痕量气体遥感及在空气质量监测中的应用和科技部—欧洲空间局“龙计划”—ENVISAT 对地观测数据综合应用研究(2005AA132031XZ07),国家重点基础研究计划 973 项目“中国酸雨沉降机制、输送态势及调控原理(2005CB422202)”和“中国大气气溶胶及其气候效应的研究(2006CB403702)”共同资助。

收稿日期: 2007 年 3 月 16 日; 修定稿日期: 2007 年 5 月 30 日

So the study of global biogeochemical cycle and climate change can be done with these technologies and data. The instrument for trace gas monitoring on satellite and the data processing were reviewed. The prospects for trace gas remote sensing by our own satellite instruments and the trace gas research projects are also outlined.

Key Words: satellite remote-sensing technology trace gas monitoring research progress

引 言

近年来的研究表明,全球大气由于人类活动正经历快速变化,大气痕量气体及浓度随着人类活动的发展发生了巨大的变化,各种温室气体通过温室效应导致全球变暖,BrO,NO_x,CH₄等各种痕量气体对大气臭氧的破坏已经引起了全球大气科学家的关注。例如:由来自对流层人类排放的CFCs、HF-Cs和卤代烃类等导致的两极平流层臭氧洞^[1-3],全球对流层臭氧的巨增^[3]、对流层CO₂,CH₄,N₂O,和O₃等温室气体的增加^[4]等。同时痕量气体还可以参与光化学反应,降水化学和在气溶胶中的气-固转化,间接对全球的生态环境以及气候变化造成严重影响。大气中的痕量气体和气溶胶不仅具有化学活性,还具有辐射活性,对太阳辐射和地表红外辐射有很强的吸收作用,它们的浓度虽低,但对地气系统的能量收支及生物圈与大气的相互作用过程却有着不容忽视的作用,影响地气系统的物质循环和能量流动,它们的变化将会引起一系列气候和环境效应。1950—1960年代的局地大气化学污染问题到1970—1980年代的区域及全球大气化学研究,以至在1980年代提出了全球变化问题^[5],大气化学的研究日益受到重视。1990年代初开始,痕量气体的研究成为大气化学研究的重点。

大气中痕量气体的研究,主要包括观测和数据分析、实验室研究、以及模式模拟等几个方面,但是所有的这些方面研究都有赖于

稳定的、精确的、长时间、大范围的、系统的监测得到的痕量气体的信息。目前,传统的大气痕量气体监测主要是基于定点采样观测技术去获得数据,仅能反映取样点很小范围内的空气污染程度,而且通常定点的地面大气痕量气体的观测还要辅助化学分析仪器,分析设备复杂,费用昂贵,而且只能得到近地面很小区域范围内的大气成分信息,在垂直梯度观测的空间分析站点也非常有限,无法得到大气柱总量。光谱遥感技术是近年来迅速发展起来的一门综合性探测技术,与传统的定点取样检测法相比,它主要具有以下特点:(1)远距离对气体排放物进行实时监测;(2)快速分析多组分混合物;(3)无需繁琐的取样手续;(4)可获得地面或高空大区域三维空间数据。由于光谱遥感技术自身的优势,它既可以进行地基遥感,获取定点的大气痕量气体的柱总量,更主要的是可以应用于卫星观测,得到大尺度空间范围内的痕量气体分布,还可以细致地得到不同大气层,如:对流层、平流层的大气痕量气体信息。因此近年来,随着全球环境问题的日益突出,具有全球覆盖、快速、多光谱、大信息量的遥感技术已经成为全球环境变化监测中一种重要的技术手段。

1 应用卫星遥感在大气成分监测中的发展

1990年代以来,卫星环境遥感应应用领域越来越广,几乎覆盖了环境保护的各个方面。卫星观测的独特优势是:覆盖范围广、实时、连续、分辨率高,可以观测到常规观测手段无

法获得的重要参数,观测大气中微量气体的长期变化趋势及其源和汇;所观测到云和其它要素的分布中,含有大气中正在进行着的动力和热力过程的信息。因此卫星资料为大气物理过程参数化提供重要信息。

随着人们对大气污染及治理问题越来越关注和人为活动对大气环境影响研究的深入,人们急需了解和掌握大气中痕量气体的现状和未来可能的气候效应。早在1978年,Nimbus7卫星上就开始搭载TOMS传感器监测臭氧总量的变化;1979年开始NOAA系列卫星连续监测臭氧廓线(SBUV);从1970年代开始,越来越多的卫星上都开始搭载大气成分观测仪。在1995年4月21日欧洲空间局ESA发射的ERS-2卫星上,装载了全球臭氧监测仪(GOME),其主要任务是监测臭氧以及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_2 、 BrO 、 OCIO 和 SO_2)的全球分布;1999年,美国规划和协调的对地观测系统(EOS)卫星系列的第一颗卫星EOS/AM-1发射,对地球大气进行全方位、长时间的观测研究。近年来,针对全球大气变化和与此相关的大气化学和大气物理过程的研究,美国航空航天局(NASA)和加拿大空间局(CSA)于1999年12月18日发射的TERRA卫星上搭载了对流层污染测量仪(MOPITT)。MOPITT测量大气柱中发射和反射的红外辐射,用于反演大气中CO和 CH_4 的廓线等;随后美国规划和协调的对地观测系统(EOS)卫星系列的EOS/PM-1于2002年发射,欧洲空间局(ESA)在2002年3月1日发射的ENVISAT-1上装载了多台大气化学成分测量仪器,通过对大气吸收光谱、大气发射光谱以及恒星光谱测量,探测大气臭氧层、温室效应示踪气体和气溶胶浓度分布,可研究多种大气痕量气体包

括 O_3 、 H_2O 、 CH_4 、 N_2O 、 HNO_3 、CFC等的成分变化及其对辐射收支和大气状态参数的影响,其中大气制图扫描成像吸收光谱仪(SCIAMACHY),专门用于监测对流层和平流层里 NO_2 和 O_3 等痕量气体;日本国家宇宙发事业团(NASDA)研制的日本的高级地球观测系统ADEOS-1(2002年12月发射成功),搭载了各类遥感器,其中有臭氧总量测绘仪(TOMS),用于臭氧和二氧化硫的浓度和分布观测;温室效应气体干涉监测仪(IMG),用于温室气体(CH_2 、 CH_4 、 N_2O)的浓度分布监测;改进型临边大气分光计(ILAS),用于高纬度区临边大气痕量气体(O_3 、 H_2O 、 CO_2 、 CH_4 、 NO_2 、 N_2O 、 HNO_3)的测量。2004年7月15日美国国家航空航天局(NASA)发射的Aura地球观测系统卫星携带了4个仪器:臭氧监测仪(OMI),微波分支探测仪(MLS),高分辨动力分支探测仪(HIRDLS)和对流层发射分光仪(TES)。其中臭氧监测仪(OMI)由荷兰和芬兰与NASA合作制造,可以获得逐日、直接的全球低层臭氧和其它影响空气质量的污染物的测量结果,并可将结果以空前的空间分辨率传输,这有助于科学家了解污染物的长途输送及其复杂性,OMI的观测结果有助于更好地了解臭氧层空洞怎样对未来平流层冷却做出反应,为科学家对影响平流层臭氧层与气候的物理和化学过程提供新的认识途径,有助于科学家监测全球污染的产生和重新认识气候变化将怎样影响平流层臭氧层的恢复。

目前针对大气成分遥感监测的遥感器有许多,例如:太阳紫外辐射后向散射观测仪(SBUV)、平流层气体和气溶胶试验(SAGE)、上层大气研究卫星(UARS)上的微波临边探测器(MLS),卤素掩星试验、高级平流层和中间层探测(ISAMS)等(详见表1)。

校正。由于较大的光谱范围,其积分时间是高精度光谱的 1/16 倍,因此具有更高的像元分辨率,此特点可用来监测像元上的云覆盖情况。GOME 标准扫描模式像素元分辨率为 $40\text{km} \times 320\text{km}$,像素点重复周期 35 天,但在标准模式下 3 天可基本覆盖全球,高纬度覆盖率更高,在 75°N 的纬圈地表完全覆盖只需 1 天。

GOME 的 1 级和 2 级产品可以从 ESR 通过 FTP 得到离线或者近实时的产品,也可以通过 CD 光盘的形式得到离线产品,其中 1 级辐射产品可以通过 FTP(ftp-ops. de. envisat. esa. int)得到,文件名称格式为:products/level1/YYYY/MM/DD,分别代表:产品名称/1 级/年/月/日;1 级产品中包含有抬头(MPH:main product headers),校正文件,每个地面像元详细的校正参数以及 GOME 的 10 个波段的科学数集。

2 级的痕量气体产品可以通过 FTP(ftp-ops. de. envisat. esa. int)得到,文件名称格式为:products/level2/YYYY/MM/DD,分别代表:产品名称/2 级/年/月/日。2 级产品中包含抬头(MPH:main product headers),总的臭氧柱体积密度,误差校正文件,地理信息以及一些中间输出产品信息。

2.2 扫描成像吸收光谱大气制图仪

扫描成像吸收光谱大气制图仪(SCIAMACHY)^[7]是欧洲空间局(ESA)在 2002 年 3 月 1 日发射的大型环境监测卫星(ENVISAT-1)上搭载的 10 大载荷之一。

SCIAMACHY 由德国政府、荷兰政府以及比利时政府分别通过德国航空宇航中心(DLR)、荷兰宇宙空间方案机构(NIVR)以及比利时空间物理研究所(BIRA-IASB)联合出资设计。它能够在非常大的波长范围内对大气中的各种气体、云团以及灰尘粒子进行监测,从而绘制分布图。采用差分吸收光

谱学的创新性技术,检测出光谱吸收所跟踪的阳光到达范围内、在紫外线、可见光和近红外区内的、被地球大气和地表反射或散射的气体“指纹”。SCIAMACHY 轨道扫描刈幅为 960km ,6 天覆盖一次全球,有 8 个通道,波长覆盖范围为 $240 \sim 2380\text{nm}$,光谱分辨率为 $0.2 \sim 1.5\text{nm}$ 。具体参数如表 3 所示。SCIAMACHY 的首要任务是对流层和平流层痕量气体的全球测量。其观测所选的波段是 $240 \sim 1700\text{nm}$ 和 $2.0 \sim 2.4\mu\text{m}$ 。光谱的分辨率范围为 $0.2 \sim 1.5\text{nm}$ 。反演各气体所用的波段如图 1 所示。

表 3 SCIAMACHY 通道参数表

通道	光谱范围/nm	光谱分辨率/nm
1	240~314	0.24
2	309~405	0.26
3	394~620	0.44
4	604~905	0.48
5	785~1050	0.54
6	1000~1750	1.48
7	1940~2040	0.22
8	2265~2380	0.26

从图中也可明显看出,SCIAMACHY 比 GOME 具有更高的光谱分辨率和更宽的波段范围,使 SCIAMACHY 可反演出更多的痕量气体。

SCIAMACHY 与 GOME 相比,主要的改进有 3 方面:一、光谱覆盖范围扩大到近红外波段,这使其可以观测 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 等温室气体和 CO ;二、SCIAMACHY 有 3 种观测几何模式:天底模式、临边模式和掩星模式(见图 2),使其可以直接观测平流层廓线,从而实现对流层柱总量的反演;三、SCIAMACHY 与 GOME 相比具有高像素分辨率,其地表像素元可达 $30\text{km} \times 15\text{km}$ 。SCIAMACHY 前向扫描分辨率是 GOME 的宽带模式的 16/3 倍,是窄带模式的 16/6 倍。分辨能力大大地提高。SCIAMACHY 的轨道

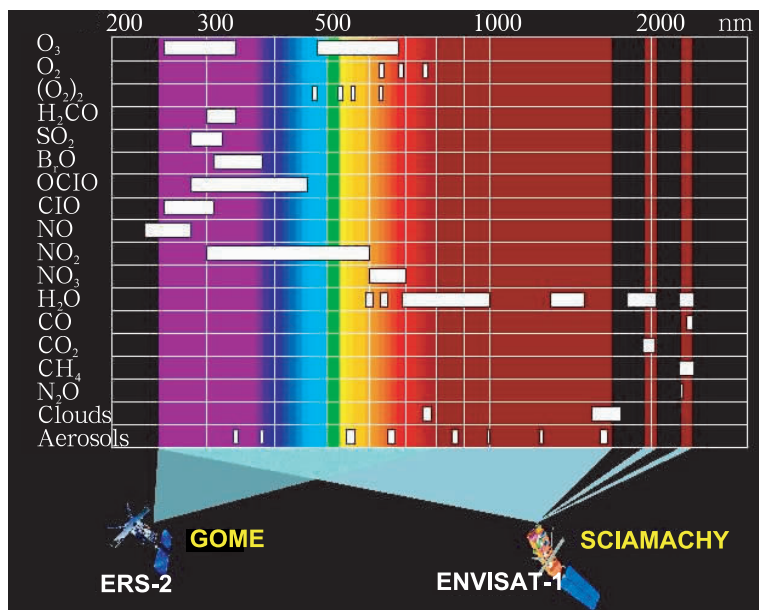


图 1 SCIAMACHY 与 GOME 光谱通道设计^[7]

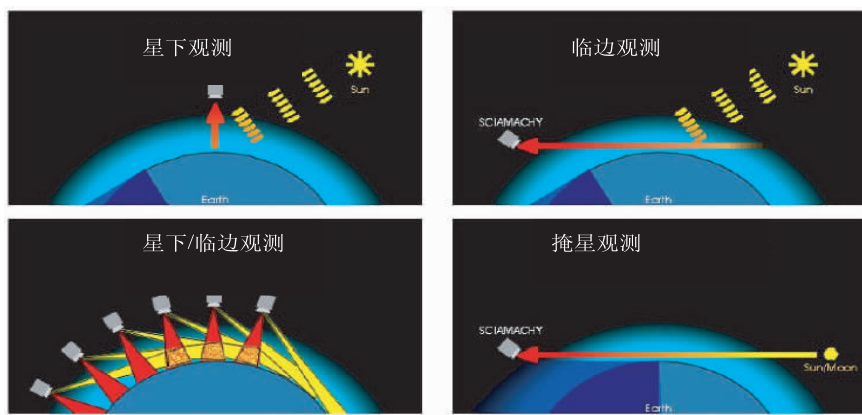


图 2 SCIAMACHY 观测模式示图^[7]

周期约 100 分钟,轨道宽度为 960km,在其标准观测模式—临边/天底交替模式下,在赤道地区 6 天就可以完成整个地球的监测,若只任选其中一种做单一模式观测,在赤道地区 3 天就可以覆盖全球。像素点重覆周期为 35 天。GOME 地表快照的标准像素元模式 (SSM) 扫描幅宽为 960km,分辨率为 $40\text{km} \times 320\text{km}$, GOME 窄带模式 (NSM) 扫描幅宽 240km,分辨率为 $40\text{km} \times 80\text{km}$,SCIAMACHY 轨道扫描

幅度为 960km,地表像元典型分辨率为 $30\text{km} \times 60\text{km}$,相比之下,SCIAMACHY 具有更高精度的分辨能力。

SCIAMACHY 的 2 级产品包含痕量气体柱体积密度,云量和高度以及气溶胶吸收因子等等。可以得到的痕量气体产品包括: O_3 、 O_2 、 O_4 、 H_2CO 、 SO_2 、 BrO 、 OCIO 、 ClO 、 NO 、 NO_2 、 NO_3 、 H_2O 、 CO 、 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 。对增加的红外波段的观测可以实现 CO_2 、

CH₄、N₂O 的反演。

2.3 臭氧监测仪

臭氧监测仪(Ozone Monitoring Instrument, OMI)^[8]是美国国家航空航天局(NASA)于2004年7月15日发射的 Aura 地球观测系统卫星上携带的4个传感器之一。臭氧监测仪(OMI)由荷兰和芬兰与 NASA 合作制造,是继 GOME 和 SCIAMACHY 后的新一代大气成分探测传感器,轨道扫描刈幅为 2600km,空间分辨率是 13km×24km,一天覆盖一次全球,有 3 个通道,波长覆盖范围为 270~500nm,光谱分辨率为 0.5nm(见表 4)。

表 4 OMI 通道参数表

通道	光谱范围/nm	光谱分辨率/nm	光谱采样距离
UV-1	270~310	0.42	0.32nm/pixel
UV-2	3109~365	0.45	0.15nm/pixel
VIS	365~500	0.63	0.21nm/pixel

OMI 的仪器主要有 3 大部分:光学部件(OA)、电子部件(ELU)和界面适配模块

(IAM),可以获得逐日、直接的全球低层 O₃ 以及 NO₂、SO₂、HCHO、BrO、OCIO 等影响空气质量的污染物的测量结果,还包括气溶胶紫外指数和云检测产品等等,并可将结果以空前的空间分辨率传输,这有助于科学家了解污染物的长途输送及其复杂性,OMI 的观测结果有助于我们更好地了解臭氧层空洞怎样对未来平流层冷却做出反应,为科学家对影响平流层臭氧层与气候的物理和化学过程提供了新的认识途径,有助于科学家监测全球污染的产生和重新认识气候变化将怎样影响平流层臭氧层的恢复。

2.4 风云三号紫外臭氧探测仪

2007 年我国即将发射风云三号 01 (FY3-01)试验星,上面将首次搭载大气成分探测仪 TOU/SBUS,可以得到臭氧的总量信息和垂直廓线信息,具体产品指标如表 5。

发射成功后,我国有望得到自主开发的大气成分产品,实现对全球和区域范围内的大气成分进行监测和研究。

表 5 FY3-01 紫外臭氧监测仪主要产品指标

编号	产品名称	覆盖范围	分辨率	信息量/日	精度	频次	时效/小时	资料来源
TOU201L	臭氧总量	区域	50km×50km	5M	20%	1次/日	3	TOU/SBUS
TOU202G	臭氧总量	全球	50km×50km	200M	20%	1次/日	24	
SBU201L	臭氧廓线	区域	200km×200km	10M	10%	1次/日	3	
SBU202G	臭氧廓线	全球	200km×200km	400M	10%	1次/日	24	

3 卫星遥感几种痕量气体的初步结果

3.1 NO_x

各种燃烧过程产生的氮氧化物参与光化学催化臭氧产生从而导致夏季的光化学烟雾和对流层臭氧的增加,而且由氮氧化物生成的硝酸与氧化硫生成的硫酸等一起将形成酸雨,会对对流层化学结构造成重要影响,因此在对流层化学当中扮演着重要的角色。传统

的地面监测网的数据来外推全球尺度上的排放数据由于统计的不确定性导致误差较大,而现在卫星遥感观测可以大空间尺度、长时间序列在全球范围内直接测量氮氧化物的排放。全球对流层 NO₂ 的分布已经通过搭载在不同卫星上的传感器测量得到一系列的结果。图 3 是 ERS-2 卫星上的全球臭氧监测仪(GOME)对流层 1996—2001 年 NO₂ 平均值^[9],从图上我们可以看出高的 NO₂ 的浓度和工业区(人为源)相关,东亚特别是中国的部分城市属于严重污染的地区。

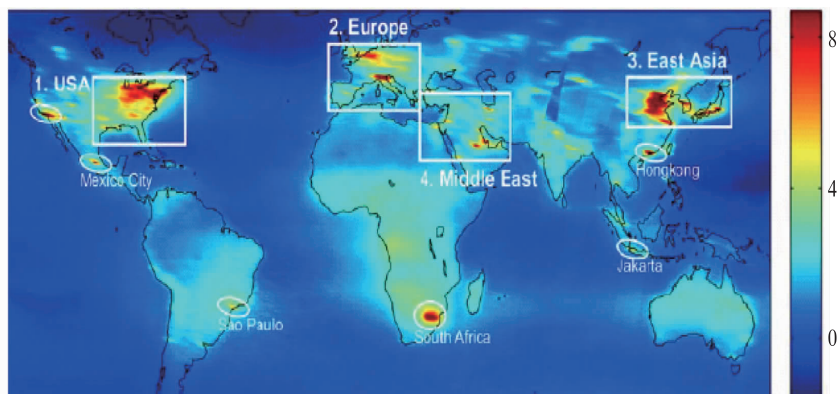


图3 全球对流层 NO_2 1996—2001 年平均垂直柱密度(单位: $10^{15} \text{ molecules} \cdot \text{cm}^{-2}$)。方框中地区是严重污染地区:1、美国东海岸;2、欧洲;3、东亚;4、中东地区;5、一些大城市^[9]

3.2 O_3

平流层 O_3 对紫外辐射有吸收作用,这对人类及其生存环境起到了极重要的保护作用。从物理性质来讲,不同气体分子对太阳辐射具有不同的吸收特性,臭氧分子对 200~290nm 及 600nm 附近的太阳紫外辐射有强吸收作用,因此臭氧在大气中含量虽少,却吸收了来自太阳 99% 的高强度紫外辐射,阻挡了强紫外辐射到达地面,其对紫外辐射的吸收对全球气候系统也有重大影响。对流层中的 O_3 在 9.6 μm 的大气红外窗区有一个很

强的红外吸收带,因此,具有让太阳短波透射到在地面,但却吸收地表发射的长波辐射从而使大气增温的作用——即温室效应。因此,对流层 O_3 同水汽、 CO_2 等气体一样是影响近地层气温的温室气体。对流层 O_3 的增加将带来地表和低层大气的升温。

目前,国外科学家已经利用先进的卫星传感器,得到了 O_3 全球分布的一系列结果,不仅得到整层大气臭氧的柱总量,而且通过临边观测模式和先进的反演技术结合扣除了平流层部分,得到了与人类生活息息相关的对流层的臭氧柱总量(如图4),在北半球的

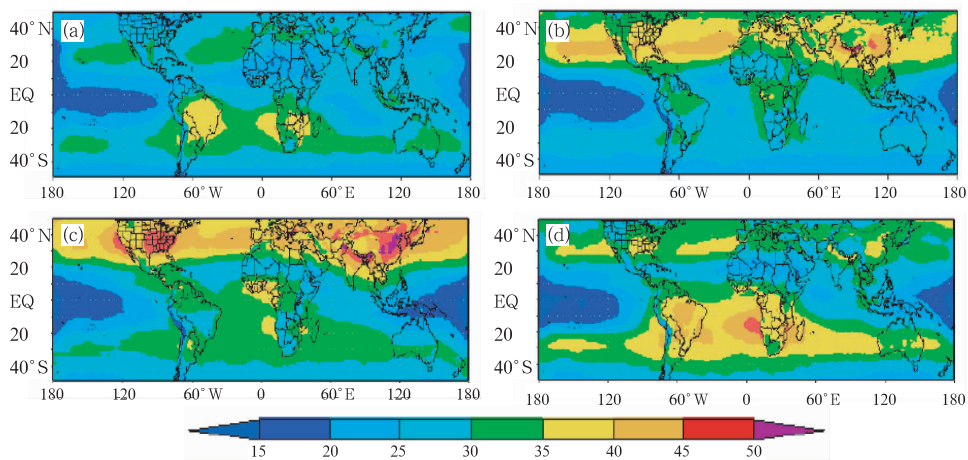


图4 全球对流层 O_3 的 20 年平均(1979—2000)垂直柱密度(单位:DU)分布图^[10]
a. 冬季, b. 春季, c. 夏季, d. 秋季

夏季对流层的臭氧柱总量达到最大值,同时还可以明显地看出,在印度的东北部、美国的东部、中国的东部以及非洲的西部与南部地区是臭氧污染比较严重的地区^[10]。

3.3 CH₄

CH₄ 是除 CO₂ 以外的最主要的温室气体之一,研究表明在工业革命以来 CH₄ 在大气中的浓度增大了 1 倍多,在过去 20 年中以平均每年 0.9% 的惊人速度增长,远远高于 CO₂ 浓度的增长值,大气 CH₄ 的快速增长趋

势引起了各国政府和科学家的重视。卫星遥感为了解全球 CH₄ 的分布提供了可能,因为地基的定点观测存在许多局限,无法得到大范围的分布和变化,最早利用卫星遥感得到甲烷数据的是 ADEOS 上搭载的 IMG,近年来随 ENVISAT 卫星上的 SCIAMACHY 传感器升空后,利用 SCIAMACHY 已经成功地得到比较可靠的数据,绘制出了全球 CH₄ 分布图(见图 5),可以发现在中国的南部、南美以及中非地区是 CH₄ 排放比较严重的地区^[11]。

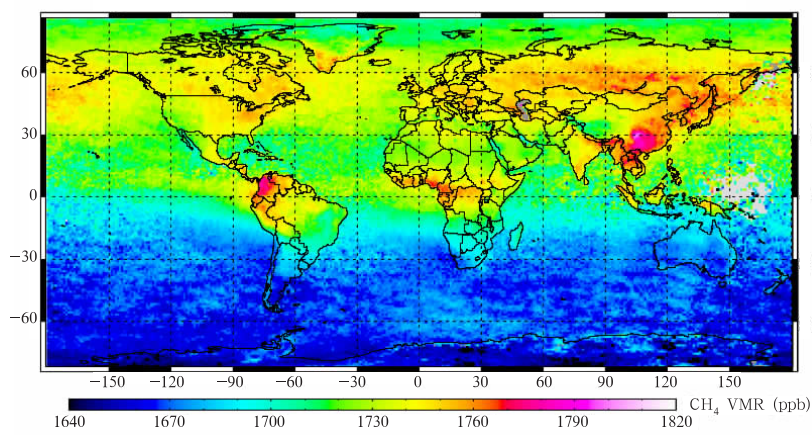


图5 全球 CH₄ 2003—2004 两年平均垂直混合比分布图(单位:ppb)^[11]

4 国内外卫星观测大气成分研究进展

4.1 国外卫星观测大气成分研究进展

国外用卫星数据对大气痕量气体的研究已做了很多工作。许多学者在对流层 O₃ 的反演方面做了工作^[12-14],对反演得到的对流层 O₃ 数据的应用也有很多研究,例如:全球及部分区域对流层 O₃ 的时空分布及变化研究^[15];对流层 O₃ 与厄尔尼诺、北大西洋涛动等气候因子的相关分析^[16-17];以及大陆间污染物的输送等^[17]。

从卫星观测柱总量计算大气对流层 NO₂ 柱总量数据研究国外也有很多, Martin, Richter 等^[18-19]利用 GOME 卫星反演对流层 NO₂ 的方法研究, Boersma 等^[20]对对流层 NO₂ 反演的误差研究,一些科研组织对 SCIAMACHY 对流层 NO₂ 的反演结果的校验^[21-22]以及对反演所得的对流层 NO₂ 数据的应用等^[23]。Velders 等^[24]利用 GOME 资料 and 三维模式研究了全球对流层 NO₂ 柱总量分布的情况。Jagele 等^[25]应用 GOME 卫星资料研究了由于生物质燃烧产生的 NO_x 的时空分布和季节变化。Boersma 等^[26]利

用 GOME 资料和模式模拟比较研究了闪电在对流层产生的 NO_2 的时空分布。Andreas Richter 等^[27]利用 1996—2004 年的 GOME 和 SCIAMACHY 的对流层 NO_2 资料研究了全球的 NO_2 变化趋势,结果表明,中国东部地区以及香港地区有显著的增长。Vander 等^[28]利用 1996—2005 的资料也发现中国东部一些工业发达的地区 NO_2 的浓度有明显增加。

4.2 我国卫星观测大气成分研究进展

随着我国环境保护工作力度的不断加大,环境保护对遥感技术的需求也越来越多。目前,我国已发射的对地观测卫星有 FY-1、FY-2、资源一号卫星(ZY-1)、资源二号卫星(ZY-2)、海洋一号卫星(HY-1)。但是到目前为止,我国在轨运行的各类卫星还没有能力得到大气成分的资料和数据,但卫星观测大气成分的研究则已经起步。2004 年,国家卫星气象中心作为中国国家科技部与欧洲航天局(ESR)合作开展“龙计划”项目中方的首席研究单位,在国内进一步开展关于卫星监测大气成分领域的合作研究,开展了相关卫星数据的反演算法和软件开发,几年来累积了大量的资料,得到不少成果。中国科学院大气物理研究所、北京大学等一些科研小组也在这个领域开展研究工作,利用地基 DOAS 观测反演的 NO_2 柱总量与 SCIAMACHY 卫星 NO_2 数据的比较及 NO_2 时空分布进行了相关的研究^[29],中国气象科学研究所的学者也着手这个领域,并利用 GOME 卫星资料对北京大气中的 NO_2 做了初步的分析^[30]。

我国当前的环境污染物排放总量不断增加,污染范围继续扩大,必须密切监测大气污染物的变化,掌握大气质量现状及未来的变

化趋势,因此建立我国环境卫星监测与预报系统,与地面监测网络共同监测大气成分的变化、大气污染与污染来源势在必行。2007 年我国即将发射的 FY-3 气象卫星将首次搭载臭氧探测仪,将有望得到臭氧的全球分布和垂直廓线以及气溶胶的光学厚度等大气成分信息;同时 2007 年也将发射环境一号卫星,将得到近地面层的系列大气成分分布和污染来源信息。

5 结束语

政府间气候变化专门委员会(IPCC)第三次评估报告指出,全球气候变化的众多影响因子中,最不确定、亟待解决的是大气痕量气体和气溶胶的作用。中国地区作为全世界发展最快的地区之一,近年来由于工业化进程的加快和机动车的激增,带来的大气痕量气体污染问题已经不容忽视。我国政府迫切需要了解我国大气痕量气体和气溶胶的分布、变化和形成机制,定量了解中国痕量气体和气溶胶排放量对亚洲的贡献,以及对全球和中国未来气候的影响。回答这些政府决策者及科学界关注的重要问题,必须阐明痕量气体以及气溶胶的源汇、理化特性、光学特性、时空分布、输送及转化机理、辐射强迫、气候和环境效应等问题。因此开展卫星遥感大气成分的科研业务工作对大气环境研究、空气质量控制以及可持续发展等方面都有现实的指导意义和重大的科学研究价值,同时地基观测也亟待系统地开展来验证卫星遥感的真实性。

参考文献

- [1] Newman, P. A., J. F. Gleason, R. D. McPeters, et al. Nominally low ozone over the Arctic[J]. Geophys. Res. Lett., 1995, 24: 2689-2692.

- [2] Muller, R., P. J. Crutzen, J. U. Grob, et al. Severe chemical ozone loss in the Arctic during the winter of 1995-1996[J]. *Nature*, 1997, 389: 709-712.
- [3] WMO, Global ozone research and monitoring project, scientific assessment of ozone depletion 1994[R]. WMO Rep. 1995: 37.
- [4] IPCC, Climate Change 1995: The Science of Climate Change[M]. Cambridge University Press, 1999: 572.
- [5] 王明星. 大气化学(第二版)[M]. 北京:气象出版社, 1999: 340-342.
- [6] European Space Agency, GOME Global Ozone Measuring Experiment Users Manual[M], ESA SP-1182, ESA/ESTEC, Noordwijk. 1995.
- [7] Bovensmann, H. et al., SCIAMACHY—Mission objectives and measurement modes[J]. *J. Atmos. Sci.* 1999, 56: 127-150.
- [8] P. F. Levelt (Editor), R. Noordhoek (Layout), OMI Algorithm Theoretical Basis Document: Volume I: OMI Instrument, Level 0-1b processor[M]. Calibration & Operations ATBD-OMI-01, Version 1.1, August 2002.
- [9] Beierle, S., U. Platt, M. Wenig, and T. Wagner. Weekly cycle of NO_2 by GOME measurements: A signature of anthropogenic sources[J]. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 2003, 3: 3451-3467.
- [10] J. Fishman, A. E. Wozniak, and J. K. Creilson, Global distribution of tropospheric ozone from satellite measurements using the empirically corrected tropospheric ozone residual technique: Identification of the regional aspects of air pollution[J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2003, 3: 893-907.
- [11] C. Frankenberg, J. F. Meirink, P. Bergamaschi, et al. Satellite cartography of atmospheric methane from SCIAMACHY on board ENVISAT: Analysis of the years 2003 and 2004[J]. *J. Geophys. Res.*, 2006, 111, D07303, doi:10.1029/2005JD006235.
- [12] Fishman, J., Brackett, V. G., Browell, E. V., et al. Tropospheric ozone derived from TOMS/SBUV measurements during TRACE A[J]. *J. Geophys. Res.*, 1996, 101(24): 069-069.
- [13] Kim, J. H., Hudson, R. D., and Thompson, A. M., A new method of deriving time-averaged tropospheric column ozone over the tropics using Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) radiances: Intercomparison and analysis using TRACE—A data[J]. *J. Geophys. Res.*, 1996, 101(24): 317-330.
- [14] Ziemke, J. R., Chandra, S., and Bhartia, P. K., Two new methods for deriving tropospheric column ozone from TOMS measurements: Assimilated UARS MLS/HALOE and convective-cloud differential techniques[J]. *J. Geophys. Res.*, 1998, 103(22): 115-127.
- [15] Fishman, J., Wozniak A. E., and Creilson J. K. Global distribution of tropospheric ozone from satellite measurements using the empirically corrected tropospheric ozone residual technique: Identification of the regional aspects of air pollution[J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2003, 3: 893-907.
- [16] Fishman, J., Creilson J. K., Wozniak A. E., et al. The relationship between air pollution and El Niño: Global and regional perspectives derived from two decades of satellite measurements[R]. presented at National Space Science and Technology Center, Huntsville, AL, February 2003. (invited talk).
- [17] Creilson A. E., Fishman, J. J. K., Wozniak R. B. Intercontinental transport of tropospheric ozone: a study of its seasonal variability across the North Atlantic utilizing tropospheric ozone residuals and its relationship to the North Atlantic Oscillation[J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2003, 3: 2053-2066.
- [18] Martin, R. V. et al., An improved retrieval of tropospheric nitrogen dioxide from GOME[J]. *J. Geophys. Res.*, 2002, 107: 4437-4456.
- [19] Richter, A., and Burrows, J. P., Retrieval of tropospheric NO_2 from GOME measurements[J]. *Adv. Space Res.* 2002, 29: 1673-1683.
- [20] K. F. Boersma, H. J. Eskes, and E. J. Brinksma, Error analysis for tropospheric NO_2 retrieval from space[J]. *J. Geophys. Res.*, 2004, 109: D04311.
- [21] K. P. Heue, A. Richter, T. Wagner, et al., Validation of SCIAMACHY tropospheric NO_2 -columns with AMAXDOAS Measurements [J]. *Atmos.*

- Chem. Phys. Discuss., 2004, 4: 7513-7540.
- [22] A. Bracher, M. Sinnhuber, A. Rozanov, and J. P. Burrows, Using a photochemical model for the validation of NO₂ satellite measurements at different solar zenith angles[J]. Atmos. Chem. Phys., 2005, 5: 393-408.
- [23] Martin, R. V. et al., Gloabal inventory of nitrogen oxide emission constrained by space-based observation of NO₂ columns [J], J. Geophys. Res., 2003, 108: 4357-4548.
- [24] Guus J. M. Velders et al., Global tropospheric NO₂ column distributions: comparing three-dimensional model calculations with GOME measurements[J]. J. Geophys. Res., 2001, 106: 12643-12660.
- [25] Jagele, L. et al., Satellite mapping of rain-induces nitric oxide emission from soils[J]. J. Geophys. Res., 2004, 109, D21310, doi: 10. 1029/2004JD004787.
- [26] Boersma et al., Estimates of lighting NO_x production from GOME satellite observations[J]. Atmos. Chem. Phys. Disc., 2005: 53047-3104.
- [27] Richter, A., Burrows, J. P., Nüß, H., Granier, C., Niemeier, U., Increase in tropospheric nitrogen dioxide over China observed from space[J]. Nature, 2005, 437: 129-132.
- [28] R. J. Vander A. et al., Detection of the trend and seasonal variation in tropospheric NO₂ over China [J]. J. Geophys. Res., 2006, 111, D12317, doi: 10.1029/2005JD006594.
- [29] 李莹. 地基 DOAS 观测反演的 NO₂ 柱总量与 SCI-AMACHY 卫星 NO₂ 数据的比较及 NO₂ 时空分布研究[D]. 2006, 北京大学硕士论文.
- [30] 江文华, 马建中, 颜鹏, 等. 利用 GOME 卫星资料分析北京大气 NO₂ 污染变化[J], 应用气象学报, 2006, 17(1): 67-72.