

卫星遥感大气 CO₂ 的技术与方法进展综述

刘 毅¹, 吕达仁¹, 陈洪滨¹, 杨东旭^{1,2}, 闵 敏^{1,2}

(1. 中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测重点实验室, 北京 100029;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:综合分析了国际上卫星遥感观测大气二氧化碳(CO₂)含量的主要技术与方法,讨论了现有星载大气 CO₂ 探测器(传感器)的主要理论基础、反演方法,归纳了仪器的主要性能指标、观测方式和观测目标,分析了影响 CO₂ 遥感精度的主要因素。具体研究下列 3 类星载 CO₂ 探测器:① 技术相对成熟的、观测要素既包含 CO₂ 也包含其他微量气体的综合性星载被动探测仪器,例如大气红外垂直探测仪(AIRS)、大气制图扫描成像吸收光谱仪(SCIAMACHY)、超高光谱红外大气探测干涉仪(IASI);② 针对大气中 CO₂ 混合比或者对流层下层 CO₂ 含量进行专门观测的星载被动探测器:极轨碳观测卫星(Orbiting Carbon Observatory,OCO)和温室气体观测卫星(Greenhouse gas Observing Satellite,GOSAT)搭载的被动红外探测器;③ ASCENDS 和 A-SCOPE 等国际卫星计划正在研制中的星载主动激光雷达探测器。进一步介绍了我国在高光谱仪器研制方面具备的研究基础。最后初步分析了星载 CO₂ 探测结果的验证、资料同化方法和未来的发展趋势。

关 键 词:卫星遥感;CO₂;GOSAT;OCO;ASCENDS

中图分类号:P 407;TP 79 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-0323(2011)02-0247-08

1 引 言

2007 年 IPCC 评估报告表明,自工业革命以来增加的大气 CO₂ 的正的辐射强迫约为 1.66 W/m²,是造成全球增温的最重要的温室气体^[1]。所以 CO₂ 的全球监测对于全球气候变暖的研究有重要意义。全球气候变暖,极端气候和生态环境日益恶化,引起了国际社会的高度关注。国际社会希望通过碳交易甚至碳关税,以市场机制方式解决由大气 CO₂ 增加导致的全球气候变暖问题。我国为了应对气候变化和未來可能出现的碳贸易,也相应地不断出台和深化低碳经济的产业政策。因此,通过卫星遥感技术进行全球范围、高精度大气碳源汇监测的关键技术和方法,将成为保障国家低碳经济发展的重要手段。

传统的地基大气 CO₂ 探测方法虽然具有精度高、可靠性强的优点,但是都是单点的测量,缺乏对区域和全球大范围实时探测的能力和统一的探测方法,所以发展卫星观测 CO₂ 的方法和技术势在必行。大气中 CO₂ 含量较低(平均仅 380 ppmv),其分子光谱吸收强度随温度和气压变化较大,研究大

气中碳的源与汇以及碳浓度长期变化趋势要求 CO₂ 测量精度达到 1 ppmv(0.3%),这些因素构成了卫星遥感探测大气 CO₂ 技术的主要难题。相对于区域尺度(1 000×1 000 km²),对流层中 CO₂ 混合比的水平梯度通常很小,由于 CO₂ 的主要源和汇都分布在对流层低层的大气边界层中,在月平均区域尺度上边界层内 CO₂ 的水平梯度信息中能够保留地面源和汇的分布特征,因此探测出大气低层 CO₂ 的相对含量变化也是一个技术关键。纵观卫星遥感大气微量成分的发展史,目前还没有卫星探测能力达到如此高的精度。所以 CO₂ 探测传感器和反演算法的研发将是一个巨大的挑战。

到目前为止,还没有业务运行的卫星用于 CO₂ 遥感观测。随着传感器技术和反演方法的不断进步,探测 CO₂ 的卫星遥感技术日渐成熟,美国国家航空和航天管理局(NASA)极轨碳观测卫星(Orbiting Carbon Observatory,OCO)计划于 2009 年 2 月发射,但是由于其整流罩未能分离而导致发射失败。2009 年 1 月 23 日,由日本的环境署(MOE)、日本宇宙航空研究开发机构(JAXA)和日本环境研究

收稿日期:2010-05-08;修订日期:2011-03-18

基金项目:国家自然科学基金项目(41075014),中国科学院战略性先导科技专项(XDA05040000)。

作者简介:刘毅(1961—),男,天津人,研究员,博士生导师,主要从事大气遥感和中层大气过程研究。E-mail:liuyi@mail.iap.ac.cn。

所(NIES)联合研制的一颗名为温室气体观测卫星(Greenhouse Gases Observing Satellite, GOSAT)发射成功,其上搭载的被动红外探测器 TANSO 将成为星载全球 CO₂ 高精度探测的重要载荷。2010 年 6 月 22 日经美国国会批准,NASA 即将启动 OCO 的替代卫星计划(OCO-2),由于其沿用 OCO 的主要技术方案,这一计划将很快进入研制和生产阶段,卫星预计 2013 年 2 月前发射(<http://oco.jpl.nasa.gov/>)。这些卫星观测技术将为全球大气 CO₂ 源和汇的研究提供坚实的数据基础。

本文根据卫星被动遥感探测 CO₂ 技术的发展进程和主要探测器的特征进行综合论述。主要研究内容包括:① 技术相对成熟的、观测要素包括 CO₂ 和其他微量气体的综合性星载探测仪器,例如 AIRS(Atmospheric Infrared Sounder)^[2]、SCIAMACHY (Scan-

ning Imaging Absorption Spectrometer)^[3]、IASI(Infrared Atmospheric Sounding Interferometer)^[4]等;② 针对大气中 CO₂ 混合比进行专门观测的“嗅碳”卫星 OCO(Orbiting Carbon Observatory)^[5]和温室气体观测卫星 GOSAT (Greenhouse gas Observing Satellite)搭载的被动红外探测器 TANSO。③ 星载主动探测 CO₂ 混合比的激光雷达探测器。

2 综合性星载 CO₂ 探测器

AIRS 是搭载在 2002 年 5 月发射的 EOS/Aqua 卫星上的光栅式红外高光谱探测仪^[2],光谱覆盖 317~1 514 μm,有 2 378 个红外光谱通道,高光谱分辨率为 1 200 (λ/Δλ),其中 15 μm CO₂ 强吸收波段中多个通道信息通常用于大气温度廓线的反演。表 1 中归纳了 AIRS 的主要技术指标和参数。Chahine

表 1 星载 CO₂ 探测仪器的技术参数汇总
Table 1 Specification of the satellite-based instruments for CO₂ measurement

属性说明	OCO	GOSAT	SCIAMACHY	AIRS	IASI
可探测的对流层 气体成分	CO ₂ 、O ₂	CO ₂ 、CH ₄ 、 O ₂ 、O ₃ 、 H ₂ O	O ₃ 、O ₄ 、N ₂ O、NO ₂ 、 CH ₄ 、CO、CO ₂ 、H ₂ O、 SO ₂ 、HCHO	CO ₂ 、CH ₄ 、O ₃ 、 CO、H ₂ O、SO ₂	CO ₂ 、CH ₄ 、O ₃ 、CO、 H ₂ O、SO ₂ 、N ₂ O
可探测 CO ₂ 的 高度范围	柱总量 (包括近地层)	柱总量 (包括近地层)	柱总量 (包括近地层)	对流层 中层	对流层 中层
水平分辨率/km *	1.29×2.25/5.2	FTS:10.5/80~790	30 × 60/960	15/1 650	12/2 200
CO ₂ 测量精度/ppm	1~2	4	14	1.5	2
探测仪器	3 通道光栅光谱仪	云与气溶胶成像仪和 傅立叶变换光谱仪	8 通道光栅 光谱仪	光栅光谱仪	傅立叶变换 光谱仪
观测模式	天底、耀斑、目标	天底、耀斑、目标	临边、天底	天底	天底
采样数/d	500 000	18 700	8 600	2 916 000	1 296 000
波长带宽/μm	0.757~0.772	0.758~0.775	0.24~0.44		
	1.59~1.62	1.56~1.72	0.4~1.0	3.74~4.61	3.62~5.0
	2.04~2.08	1.92~2.08	1.0~1.7	6.20~8.22	5.0~8.26
		5.56~14.3	1.94~2.04	8.80~15.4	8.26~15.5
信噪比/dB (天底,5%反照率)	>300			2 000(4.2 μm)	
	(1.59~1.62 μm)	120(1.56~1.72 μm)	<100(1.57 μm)	1 400(3.7~13.6 μm)	1 000(12 μm)
	>240	120(1.92~2.08 μm)		800(13.6~15.4 μm)	500(4.5 μm)
	(2.04~208 μm)				
轨道高度/km	705	666	790	705	820
当地时间	13 : 30 ± 0 : 15	13 : 00 ± 0 : 15	10 : 00	13 : 30	21 : 30
覆盖率	16 d/233 轨	3 d/72 轨	35 d	16 d/233 轨	72 d/1 037 轨
发射时间	2009 年 2 月(发射失败)	2009 年 1 月	2002 年 3 月	2002 年 5 月	2006 年 10 月
设计寿命/a	2	5	7	7	5

注:AIRS 为 Atmospheric Infrared Sounder(大气红外垂直探测仪);CAI 为 Cloud and Aerosol Imager(云和气溶胶成像仪);FTS 为 Fourier Transform Spectrometer (傅立叶变换光谱仪);GOSAT 为 Greenhouse gas Observing Satellite (温室气体观测卫星);IASI 为 Infrared Atmospheric Sounding Interferometer (红外大气垂直探测干涉仪);OCO 为 Orbiting Carbon Observatory (极轨嗅碳观测仪);SCIAMACHY 为 Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Chartography (大气制图扫描成像吸收光谱仪);SWIR 为 Short-Wavelength Infrared (短波红外);TIR 为 Thermal Infrared (热红外)

* :瞬时视场/扫描宽度

(2005,2008)采用偏导数归零方法(Vanishing Partial Derivatives, VPD)利用 13.87~14.20 μm (704~721 cm^{-1})波段中 11 个红外光谱通道的信息联合反演对流层中层(450 hPa)CO₂ 混合比^[6-7]。为了提高反演精度,采取了在同一颗卫星上搭载的先进微波探测器(Advanced Microwave Sounding Unit, AMSU)的方案,用其反演的温度和湿度廓线信息订正温度和湿度对 CO₂ 反演结果的影响^[8]。利用地基傅立叶变换红外光谱仪(Fourier Transform Infrared Spectrometer, FTIR)对上述反演算法进行验证,并结合化学输送模式对遥感结果的进一步分析表明,AIRS 对于对流层中层 CO₂ 混合比的反演精度可以达到 1.5~2 ppm(<0.5%),其星下点的水平分辨率达到 90×90 km^2 。

IASI 是欧洲 2006 年 10 月发射的第一颗极轨气象卫星 METOP-A 上搭载的新一代超高光谱大气探测仪器。它是一个基于迈克尔逊干涉仪且附有一个成像系统的傅立叶变换光谱仪^[4]。IASI 的迈克尔逊干涉仪在 3.7~15.5 μm 红外光谱范围进行连续的高精度观测,共有 8 461 个通道,通道的光谱分辨率为 0.25 cm^{-1} ,辐射分辨率为 0.1~0.5 K;其成像系统在 10.3~12.5 μm 波段进行同步测量。IASI 的主要观测目标是高精度的大气温度廓线,其反演原理假定 CO₂ 混合比的垂直分布相对不变,利用 CO₂ 在 650~770 cm^{-1} 、2 150~2 250 cm^{-1} 和 2 350~2 420 cm^{-1} 波段的发射特性与温度的对应关系来反演温度廓线。因此利用 AMSU 同步观测的温度廓线信息订正温度影响后,IASI 也利用 CO₂ 在 15 μm 波段的发射特性反演对流层中上层的 CO₂ 含量。为了进一步提高反演的精度,IASI 可以利用 CO₂ 在 15 μm 吸收带中 14 个通道的高分辨率的光谱信息,剔除了其他微量成分吸收的影响。2008 年的初步反演表明:上述对流层中上层 CO₂ 含量的反演方法可以在月平均和 5×5°(经纬度)时空尺度下实现 2.0 ppmv (0.5%)的反演精度^[11]。

3 专用 CO₂ 探测卫星

3.1 大气 CO₂ 的短波红外探测原理

CO₂ 除在中红外具有强吸收带外,在短波红外(1.5~2.1 μm)也具有一定的吸收能力,其中 1.6 μm 更适合遥感 CO₂ 混合比^[5,12],主要是该吸收光谱范围内,大气中其他气体的吸收线很少;其次,在该波段 CO₂ 的吸收线强度不大,吸收线不会因为 CO₂ 含量的变化达到饱和,所以吸收的强度随着

CO₂ 含量的增加近似于线性变化;并且,弱吸收线使部分辐射可以透过大气,到达地面后返回太空,所以卫星接收的辐射谱分布包含低层大气的 CO₂ 信息,因此适用于遥感大气低层的 CO₂ 含量。短波红外遥感主要利用太阳辐射的短波红外部分穿过大气时被 CO₂ 分子吸收,形成特有的 CO₂ 吸收谱线,吸收谱线的深度随着 CO₂ 含量的增加而加强,根据光谱的形态,通过高精度的辐射传输模拟计算进行定量反演。短波红外与中波红外遥感的联合应用可以相辅相成,获得更高的反演精度^[13]。

主动遥感利用激光器发射出的、穿过大气并反射回太空后的辐射进行观测,从而获取 CO₂ 混合比。未来的 CO₂ 主动遥感探测任务是获取全球 CO₂ 源、汇分布。目前进入应用阶段的被动遥感观测不能直接定量反演 CO₂ 的源、汇信息,取而代之的是利用较为成熟的数值模式对卫星遥感观测的 CO₂ 柱浓度进行资料同化,从而获得其源、汇的分布^[14-15]。

3.2 OCO 探测器

3.2.1 探测器要求和主要参数

OCO 的主要观测目标是服务于全球大气碳循环研究的大气低层 CO₂ 的含量和分布,具体的科学要求是监测大气中 CO₂ 的源和汇,因此对于卫星反演 CO₂ 浓度精度提出了 1ppm(<0.3%)要求,以便满足捕获自然界 CO₂ 源和汇非常弱的信号^[5]。为了满足上述需求,OCO 对探测仪器提出了信噪比高、光谱分辨能力强和空间视场小的技术要求,仪器稳定性达到光谱漂移小于 0.05%。OCO 最终采用了光栅衍射方案,单采样点面积小于 3 km^2 ,观测气柱 CO₂ 混合比的精度为 1 ppmv。OCO 第一阶段的观测精度为 4 ppmv,第二阶段将达到 1 ppmv 观测精度。

3.2.2 探测器探测波段选择

为了达到 0.3%的精度,选择合适的探测波段十分重要。在太阳辐射中,CO₂ 存在一系列的线吸收光谱和发射光谱,其中,2.7 μm 波段和水汽吸收波段重合,4.3 μm 的中心波段在太阳辐射范围中相对不是很重要,都不适于高精度的 CO₂ 总量反演。OCO 卫星最终选择了 0.76~0.77 μm 、1.59~1.62 μm 和 2.04~2.08 μm 作为传感器的探测波段^[16]。其中 1.59~1.62 μm 波段作为反演 CO₂ 柱浓度的主要波段,其强度与温度关系不大,并且对地表 CO₂ 浓度敏感性强^[17],有利于对地面源和汇进行较好的观测。在该波长范围内,大气中其他气体吸收很少(不受其他分子的干扰),而且 CO₂ 在这个波

段的透过率与水汽的透过率之比是最大的,能满足探测精度的需求。 $0.76\sim 0.77\text{ }\mu\text{m}$ 波段是氧气分子吸收带(通常称为氧 A 带),可以利用该光谱带减小观测区域内气压、温度和湿度等气象要素对 CO_2 反演带来的系统误差。在对 CO_2 高精度反演过程中,云和气溶胶的影响比较大^[18-19],虽然 $0.76\sim 0.77\text{ }\mu\text{m}$ 波段能够提供水云的光学信息,但是对于气溶胶和冰云的短波红外光谱特征,却无法探测。 $2.04\sim 2.08\text{ }\mu\text{m}$ 波段是 CO_2 强吸收波段,接近饱和的吸收谱线对于 CO_2 的敏感性要比气溶胶和冰云低很多。所以该波段可用于去除云和气溶胶的影响。同时,该波段也会受到大气压和湿度的影响。

3.2.3 影响因素分析

大气中的云和气溶胶的吸收和散射都会对星载传感器探测 CO_2 的精度产生一定的影响,大量的散射辐射将直接影响探测器接收到的辐射值,从而影响 CO_2 的反演精度。卷云对传感器接收到的反射辐射影响最大,而不同类型的气溶胶对 CO_2 反演的影响具有很大不确定性:大颗粒的海洋性气溶胶对辐射的影响最大,其次是尺度次之的乡村型气溶胶,影响最小的是尺度最小的城市型气溶胶^[19]。为了订正卷云、气溶胶和温湿廓线的影响,OCO 借助于 A-train 中其他几颗编队卫星的协同观测数据。例如 MODIS 和 CALIPSO 观测的气溶胶的数据、CALIPSO 和 CLOUDSAT 的云参数、AIRS 的温度和湿度廓线等资料,这些资料的综合利用是 OCO 达到观测精度的基本保障。不同地域、不同海拔和地表压力都将大大影响柱 CO_2 柱总量的反演精度。由于地表测站不能覆盖全球,所以不能通过台站的观测获取准确的地表气压,这就使得气压成为影响 CO_2 反演精度的重要因素。为了减小气压变化对反演的影响,可以利用 O_2 的 $0.76\text{ }\mu\text{m}$ 波段作为参考来辅助计算地表压力,从而减小反演误差。

3.3 GOSAT 探测器

GOSAT 是一个中等大小的卫星,重量 $1\text{ }650\text{ kg}$,2009 年由日本 JAXA 利用 H-2A 火箭发射,它运行

在 666 km 高度的太阳同步轨道,地方时 $13:00$,倾角 98° 。GOSAT 温室气体观测卫星的主要任务是探测全球范围内 2 种最主要的温室气体 CO_2 和 CH_4 ^[20],它的科学目标是通过观测获取人为排放 CO_2 源和汇的全球和区域分布。为了从 CO_2 自然源汇时空变化的背景下甄别出人为活动产生的源和汇,要求 CO_2 混合比的反演浓度精度达到 $1\sim 4\text{ ppm}$ 。上述目标对仪器的通道波长范围和光谱分辨率提出更高的要求,所以 GOSAT 采用了傅立叶变换分光干涉仪的方案。GOSAT 卫星上用于 CO_2 观测的傅立叶变换光谱仪 TANSO(Thermal And Near-infrared Sensor for carbon Observation)热红外和近红外传感器具有高光通和高光谱分辨率,表 1 给出了观测目标、使用的波长、信噪比等多个技术参数。TANSO 的第 1 波段(中心波长 $0.76\text{ }\mu\text{m}$)同样用于探测 O_2 浓度并将 CO_2 的含量转化成混合比,其第 2 通道($1.56\sim 1.72$)比 OCO 相应通道的光谱覆盖范围更宽,其中包含了 CH_4 的吸收带,增加了对 CH_4 的探测能力,第 3 通道与 OCO 的相应通道类似,作为 CO_2 的含量辅助探测通道。另外,TANSO 特有的中长波红外通道($5.5\sim 14.3\text{ }\mu\text{m}$)信息可以用于夜间 CO_2 的观测。

与 OCO 利用 A-Train 编队卫星的协同观测来订正云和气溶胶的影响有所不同,GOSAT 卫星利用同一颗星上搭载的云与气溶胶成像仪 CAI(Cloud Aerosol Imager)来订正云和气溶胶的影响。表 2 给出了 CAI 的主要技术参数,其中第 1 通道有利于吸收性气溶胶观测,通道 2 和 3 是最常用的可见光气溶胶观测通道,通道 4 可增加对卷云的探测能力。为了模拟分析 GOSAT 温室气体卫星观测的范围和精度,日本国立环境研究所(NIES)发展了一个正向(辐射传输)和反向(温室气体反演)模拟计算模型,估算了不同场景(无云、有云、气溶胶等)的反演精度。

OCO 和 GOSAT 作为 CO_2 的专用观测卫星均采用了天底、目标和耀斑 3 种观测模式^[21]。天底观测模式用于观测仪器下方区域,这种模式提供最高

表 2 云与气溶胶成像仪(CAI)的主要技术参数
Table 2 Specifications of the Cloud and Aerosol Imager (CAI) sensor

技术参数	通道 1	通道 2	通道 3	通道 4
通道波长范围/ μm	$0.370\sim 0.390(0.380)$	$0.664\sim 0.684(0.674)$	$0.860\sim 0.880(0.870)$	$1.56\sim 1.65(1.60)$
观测目标	云和气溶胶			
扫描宽度/ km	1 000	1 000	1 000	750
星下点空间分辨率/ km	0.5	0.5	0.5	1.5

的空间分辨率,同时充分利用星下点狭窄视角的优势,有利于剔除云和气溶胶多次散射的影响,但在掠过海洋上空时不能提供足够的信噪比;目标模式针对特定目标进行跟踪观测,这样可以增加有效观测并且弥补了空间分辨率低的缺陷,进而对于卫星资料的验证起到了关键的作用;耀斑模式利用海洋上空镜面反射太阳直射光的强信号可以大幅度提高信噪比,增强仪器高精度测量的能力,填补了海洋上空 CO₂ 观测资料的空缺。

4 主动 CO₂ 激光探测计划

现行的被动遥感仪器都存在一定的局限性:采用热红外波段进行探测的方案,由于其仅对对流层中层以上的 CO₂ 敏感,所以无法直接观测近地面的 CO₂ 含量;而使用短波红外波段进行探测的方案,云和气溶胶的多次散射的影响限制 CO₂ 反演精度的进一步提高,并且应用该波段无法进行夜间的观测。而基于激光雷达技术的主动遥感方案能够较好地解决以上问题,并且可以获取 CO₂ 的垂直廓线。美国的 NASA、欧洲的 ESA 及日本的 JAXA 等机构都进行了新一代的星载 CO₂ 混合比激光吸收光谱主动遥测技术研究,并计划分别在 2013~2016 年、2015 年和 2014 年发射 CO₂ 主动遥感探测卫星。以下分别简单介绍这些计划。

4.1 美国 NASA 的 ASCENDS 计划

为了深入开展星载大气 CO₂ 源和汇的全球观

测,美国 NASA 正组织实施一个星载主动激光探测计划(Active Sensing of CO₂ Emissions over Nights, Days, and Seasons, ASCENDS)^[22]。计划于 2013~2016 年发射星载激光雷达以便更准确地观测陆地和海洋的 CO₂ 源和汇。其主要目标是将 CO₂ 的观测精度提升至 0.5% 约为 2 ppm,陆地和海洋的空间分辨率分别 100 km 和 200 km。通过观测有望获得高纬地区和南半球海洋上空 CO₂ 源汇数据,填补观测资料的空缺;增加昼夜的观测结果,用于研究植物呼吸过程对碳收支的影响,甚至有可能得到对流层中、下层的 CO₂ 混合比廓线。卫星高度约为 450 km,最大能耗为 500 W,扫描宽度约为 200 m。探测波段同样使用 CO₂ 的 1.57 μm 和 2.06 μm 吸收波段,以及 O₂ 的 0.76 或 1.27 μm 的吸收波段。

在探测器的研制方面,NASA 布署了 3 个机构开展竞争性的星载 CO₂ 激光器先期研制任务:JPL (Jet Propulsion Laboratory) 针对 CO₂ 的 2.06 μm 吸收带的连续波长光纤激光器,LaRC/ITT (Langley Research Center) 针对 CO₂ 的 1.57 μm 吸收带的可调谐掺镱铒光的纤激光器(Tunable Modulated Ytterbium-Erbium Doped Fiber Laser) 和 GSFC (Goddard Space Flight Center) 针对 CO₂ 的 1.57 μm 吸收带的可调谐脉冲掺铒光纤激光器(Tunable Pulsed Erbium Doped Fiber Laser);针对 O₂ 激光器研制任务安排 LaRC/ITT 研制 O₂-B 带的连续波长激光器、GSFC 研制 O₂-A 带的脉冲激光器。

表 3 NASA 开发的激光器的主要参数
Table 3 Specification of underdeveloped NASA satellite-based Lidar

	JPL 2.06 μm 激光 吸收光谱仪	GSFC1.57 μm 双通道 激光吸收光谱仪	LaRC1.57 μm 激光 吸收光谱仪
CO ₂ 吸收波长/μm	2.06	1.57	1.57
激光器	连续波长激光器	可调谐脉冲钕光纤激光器	可调谐镱钕光纤激光器
可测量谱线数量	2	CO ₂ :8;O ₂ :4	CO ₂ :3;O ₂ :3
接收器	单望远镜外差探测器	单望远镜光子计数器	CO ₂ 和 O ₂ :单筒或多筒望远镜近单光子雪崩光电 二极管计数器;高度和气溶胶:单光子计数器
辅助测量数据			
高度	非直接测量	激光脉冲返回的 时间分布	伪随机调制相关反应 的时间分布
地表气压	非直接测量	O ₂ -A 带两吸收线 之谷值(近 765 nm)	1.27 μm O ₂ 吸收线的 地表权重函数 LAS 测量
气溶胶	非直接测量	后向散射雷达	伪随机调制反回信号 相关的时间分布

4.2 欧洲 ESA 的 A-SCOPE 计划

新一代星载碳和气候观测卫星(Advanced

Space Carbon and Climate Observation of Planet Earth, A-SCOPE)是欧洲空间局(European Space

Agency, ESA) 新的对地探测计划之一^[23], 目标通过星载激光雷达监测全球 CO_2 的分布以及变化, 并利用激光雷达的优势填补高纬地区全年观测和全球范围内夜间观测的空缺。卫星选取近极点的太阳同步轨道, 预计高度为 325~400 km。仪器选用近星下点观测的 CO_2 全路径差分吸收脉冲激光雷达(Integrated Path Differential Absorption Lidar, IPDA)。探测波段选取 1.57 μm 和 2.05 μm 的 CO_2 吸收波段。IPDA 同时发射两束相似波长的短激光脉冲, 一束位于二氧化碳吸收峰值位置、另外一束位于吸收尾翼部位。对比两束激光的反射信号, 通过计算吸收量得出二氧化碳的总体积。这种方法从根本上避免了对接收信号的绝对辐射定标, 而且由于其探测信噪比较高, 所以可以有效地减小由于仪器元件不稳定导致的发射激光脉冲能量不同而引起的误差。

5 我国 CO_2 探测器的研究基础

同世界星载技术先进的欧美等国家相比, 我国至今还未有投入实用的星载高光谱探测仪器, 差距明显。中国科学院上海技术物理研究所、西安光学精密机械研究所长期从事干涉型光谱仪器研制, 他们分别针对风云系列卫星和载人航天工程研制出了干涉型大气光谱探测仪原理样机, 但光谱分辨率仅为 1 cm^{-1} 左右, 距离 $10^{-1}\sim 10^{-2}\text{ cm}^{-1}$ 的光谱分辨率有相当差距和研制难度, 在长寿命高可靠、长行程高稳定度直线动镜运动机构和驱动系统研究与系统研制方面仍需进行关键技术攻关。目前在 863 项目支持下还进行了光谱分辨率达到 0.02 cm^{-1} 的超高光谱分辨率红外光谱仪的原理样机的研制。中国航天技术研究院通过国际合作开展了傅立叶变换红外光谱仪的研制工作, 这种光谱仪是改进型的迈克尔逊干涉仪, 利用太阳跟踪器在太阳被地球大气遮掩期间进行掩星观测, 也可以在地面通过跟踪太阳直射光进行观测, 该仪器具有高信噪比和高光谱分辨率的优点。中国科学院空间科学与应用研究中心在风云系列卫星的紫外和微波探测器以及载人航天工程中承担了重要研究任务。

中国科学院长春光学机械与物理研究所在光栅分光技术方面开展了 30 多年的研究, 通过载人航天工程在空间紫外光学遥感仪器研制方面奠定了工作基础。中国科学院安徽光学精密机械研究所在空间外差光谱技术(SHS)方面开展了先期研究, 这是一

种新型光谱分析技术, 综合了光栅及 FTS 技术的特点, 同时具有干涉仪的高通量和光栅空间衍射特点。在大气 CO_2 的卫星遥感反演算法和资料应用方面, 国家卫星气象中心和中国科学院大气物理研究所、遥感应用研究所都开展了大量的研究工作^[24-25]。国内其他研究机构针对不同类型的星载探测器进行了研制工作, 根据国内外多种卫星资料开展了反演算法的研究, 由于篇幅限制, 不再逐一论述。

6 结 语

前面讨论了综合性星载 CO_2 探测器 AIRS、SCIAMACHY、IASI 和专用 CO_2 探测卫星 OCO 和 GOSAT 的观测原理、观测方式及其主要性能指标。其中 OCO 和 GOSAT 的 1~2 ppm 观测精度主要是天底观测方式下的瞬时观测精度, 这种高精度卫星遥感观测对于遥感结果的验证提出更高的要求。为此, OCO 和 GOSAT 均设计了地基傅立叶变换红外光谱仪、地基激光雷达和机载在线化学仪器观测等综合性的验证方案, 同时采用卫星的聚焦观测方式可以增加匹配数据的数量。

由于大气低层 CO_2 排放源汇是最终的观测目标, 目前采用的天底观测方式的水平分辨率较低, 无法直接满足观测要求, 所以必须利用大气输送模式和资料同化技术借助于辅助气象资料获得区域平均意义下的排放源汇信息, 因此 GOSAT 卫星在方案设计阶段就组成了日本宇宙航空研究开发机构和日本国立环境研究所联合研制体系。类似地, 在 OCO 卫星发射前, NASA 组织了大量的研究力量对载荷的选取、资料处理和同化技术进行了预先研究。

星载被动红外探测器存在一系列影响探测精度的因素, 并且其无法获取大气中 CO_2 的垂直分布信息, 而基于激光主动遥感的碳观测是能够实现高精度、全天时、全天候监测的新技术, 是未来全球碳观测的发展方向。目前美国、欧洲和日本等国正在开展相关技术研究的计划, 并且预计在未来 10 年中发射观测 CO_2 的激光雷达, 以获取更精确的 CO_2 源汇分布, 同时获取其垂直廓线。随着星载激光雷达探测技术研究的逐步深入, 这些主动激光探测技术有望同前述的被动红外技术有机结合, 成为精确观测二氧化碳“源”与“汇”的重要手段。国际上有关的工作将为我国科学界开展碳监测卫星的载荷研制、验证技术和观测资料的充分利用提供宝贵经验。

参考文献(References):

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007[R]. 2007; 104.
- [2] Aumann H H, Chahine M T, Gautier C, *et al.* AIRS/AMSU/HSB on the Aqua Mission: Design, Science Objectives, Data Products, and Processing Systems[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(2): 253-246.
- [3] Burrows J P, Hölzle E, Goede P H, *et al.* SCIAMACHY-Scanning Imaging Absorption Spectrometer[J]. Acta Astronautica, 1995, 35(7): 445-451.
- [4] Zhang Lei, Dong Chaohua, Zhang Wenjian, *et al.* METOP-on-Board Super-High Spectrum Resolution Infrared Atmospheric Sounding Interferometer (IASI) [J]. Meteorological Science and Technology, 2008, 136(5): 639-642. [张磊, 董超华, 张文建, 等. METOP 星载干涉式超高光谱分辨率红外大气探测仪 (IASI) 及其产品[J]. 气象科技, 2008, 136(5): 639-642]
- [5] Crisp D, Atlas R M, Breon F M, *et al.* The Orbiting Carbon Observatory (OCO) Mission [J]. Advances in Space Research, 2004, 34: 700-709.
- [6] Chahine M T, Barnett C, Olsen E T, *et al.* On the Determination of Atmospheric Minor Gases by the Method of Vanishing Partial Derivatives with Application to CO₂ [J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32(L22803): 1-5.
- [7] Chahine M, Chen L, Dimotakis P, *et al.* Satellite Remote Sounding of Mid-tropospheric CO₂ [J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35(L17807): 1-5.
- [8] Weng F, Zhao L, Ferraro R R, *et al.* Advanced Microwave Sounding Unit Cloud and Precipitation Algorithm[J]. Radio Science, 2003, 38(4): 1-13.
- [9] Buchwitz M, Schneising O, Burrows J P, *et al.* First Direct Observation of the Atmospheric CO₂ Year-to-Year Increase from Space[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2007, 7: 4249-4256.
- [10] Bösch H, Toon G C, Sen B, *et al.* Space-based Near-infrared CO₂ Measurements: Testing the Orbiting Carbon Observatory Retrieval Algorithm and Validation Concept Using SCIAMACHY Observations over Park Falls, Wisconsin[J]. Journal of Geophysical Research, 2006, 111(D23302): 1-41.
- [11] Crevoisier C, Chedin A, Matsueda H, *et al.* First Year of Upper Tropospheric Integrated Content of CO₂ from IASI Hyperspectral Infrared Observations[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2009, 9: 4797-4810.
- [12] Kuang Z M, Margolis J, Toon G, *et al.* Spaceborne Measurements of Atmospheric CO₂ by High-resolution NIR Spectrometry of Reflected Sunlight: an Introductory Study[J]. Geophysical Research Letters, 2002, 29(15): 1716-1719.
- [13] Christy M J, Stephens G L. Retrieving Profiles of Atmospheric CO₂ in Clear Sky and in the Presence of Thin Cloud Using Spectroscopy from the Near and Thermal Infrared: a Preliminary Case Study[J]. Journal of Geophysical Research, 2004, 109(D04316): 1-11.
- [14] Corbin K D, Denning A S, Parazoo N C. Assessing Temporal Clear-sky Errors in Assimilation of Satellite CO₂ Retrievals Using a Global Transport Model[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2009, 9: 3043-3048.
- [15] Baker D F, Bösch H, Doneyl S C, *et al.* Carbon Source/Sink Information Provided by Column CO₂ Measurements from the Orbiting Carbon Observatory[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2010, 10: 4145-4165.
- [16] Haring R, Pollock R, Sutin B, *et al.* The Orbiting Carbon Observatory (OCO) Instrument Optical Design [C]//Current Developments in Lens Design and Optical Engineering V (Proceedings of SPIE), 2004, 5523: 51-62.
- [17] Tolton T B, Plouffe D. Sensitivity of Radiometric Measurements of the Atmospheric CO₂ Column from Space[J]. Applied Optics, 2001, 40(9): 1305-1313.
- [18] Butz A, Hasekamp P O, Frankenberg C, *et al.* Retrievals of Atmospheric CO₂ from Simulated Space-borne Measurements of Backscattered Near-infrared Sunlight: Accounting for Aerosol Effects[J]. Applied Optics, 2009, 48(18): 3322-3336.
- [19] Mao J P, 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.
- [20] Yokota T, Yoshida Y, Eguchi N, *et al.* Global Concentration of CO₂ and CH₄ Retrieved from GOSAT: First Preliminary Results[J]. Scientific Online Letters on the Atmosphere, 2009, 5: 160-163.
- [21] Japan Aerospace Exploration Agency. GOSAT Level 1 Product Format Description Document (Draft Version)[R]. 2009.
- [22] University of Michigan in Ann Arbor, Michigan, USA. Active Sensing of CO₂ Emissions over Nights, Days, and Seasons (ASCENDS) Mission [R]. NASA Science Definition and Planning Workshop Report, 2008: 78.
- [23] Ingmann P, Bensi P, Durand Y, *et al.* ESA SP-1313/1 Candidate Earth Explorer Core Missions-Reports for Assessment: A-SCOPE - Advanced Space Carbon and Climate Observation of Planet Earth[R]. ESA Communication Production Office, 2008: 120.
- [24] Shi Guangyu, Dai Tie, Xu Na. Latest Progress of the Study of Atmospheric CO₂ Concentration Retrievals from Satellite[J]. Advances in Earth Science, 2010, 25(1): 7-13. [石广玉, 戴铁, 徐娜. 卫星遥感探测大气 CO₂ 浓度研究最新进展[J]. 地球科学进展, 2010, 25(1): 7-13.]
- [25] Zhang Xingying, Zhang Peng, Liao Hong, *et al.* On Ground-based Remote Sensing for Atmospheric Species by FTIR Instrument and Retrieval Algorithm[J]. Meteorological Monthly, 2009, 35(1): 9-17. [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[J]. 气象, 2009, 35(1): 9-17.]

**Advances in Technologies and Methods for Satellite
Remote Sensing of Atmospheric CO₂**

LIU Yi¹, LV Da-ren¹, CHEN Hong-bin¹, YANG Dong-xu^{1,2}, MIN Min^{1,2}

(1. *Key Laboratory of middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of
Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;*
2. *Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China*)

Abstract: This paper summarize recent progresses in the technologies and methods of satellite-based instruments for atmospheric CO₂ remote sensing, discuss the basic theory and retrieval method, and analyze the factors debasing the precision of CO₂ measurement. Three kinds of instruments are discussed in detail: ① Currently operating satellite instruments, which observe atmospheric CO₂ and other components, such as Atmospheric Infrared Sounder (AIRS), Scanning Imaging Absorption Spectrometer (SCIAMACHY) and Infrared Atmospheric Sounding Interferometer (IASI); ② Specific instruments for detecting CO₂ content in the lower troposphere, such as Orbiting Carbon Observatory (OCO) and Greenhouse gas Observing Satellite (GOSAT); ③ Satellite projects focus on active instrument-laser lidar, such as Active Sensing of CO₂ Emissions over Nights, Days, and Seasons (ASCENDS) and Advanced Space Carbon and Climate Observation of Planet Earth (A-SCOPE). In addition, we introduce technical basic in hyper spectral instrument in China. Validation, data assimilation and potential development of CO₂ satellite remote sensing are discussed at the end of paper.

Key words: Satellite remote sensing; CO₂; GOSAT; OCO; ASCENDS