

文章编号 2095-1531(2015)05-0725-11

## 星载近红外高光谱 CO<sub>2</sub> 遥感进展

毕研盟, 王倩\*, 杨忠东, 谷松岩, 吴荣华, 刘成保  
(国家卫星气象中心, 北京 100081)

**摘要:** 在应用需求的拉动和高光谱技术发展的驱动下, 利用被动式星载近红外高分辨率光谱仪探测大气 CO<sub>2</sub> 分子柱含量已成为一个相当活跃的研究领域。本文介绍了卫星遥感 CO<sub>2</sub> 在科学和社会发展方面的基本需求, 分析了被动遥感 CO<sub>2</sub> 的优势和不足; 对国际上最新的以美国 OCO-2(2014年7月发射)和日本 GOSAT(2009年1月发射)为代表的专项 CO<sub>2</sub> 遥感任务进行了综述, 包括仪器指标、观测模式和定标模式等方面; 着重对 OCO-2 定标精度需求和多种在轨定标方式进行了阐述; 从应用和数据处理角度, 简要比较了光栅和傅里叶干涉探测技术探测 CO<sub>2</sub> 的主要特点; 最后对定量反演原理进行了概述, 并对这一领域的未来发展进行了展望。

**关键词:** 高光谱; CO<sub>2</sub>; 遥感; 定量反演

**中图分类号:** P412.27 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20150805.0725

## Advances on space-based hyper spectral remote sensing for atmospheric CO<sub>2</sub> in near infrared band

BI Yan-meng, WANG Qian\*, YANG Zhong-dong, GU Song-yan, WU Rong-hua, LIU Cheng-bao  
(National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China)

\* Corresponding author, E-mail: qwang@cma.gov.cn

**Abstract:** Driven by application requirements and the development of hyper spectral technology, atmospheric total column CO<sub>2</sub> monitoring using passive space borne high resolution spectrometry has become a very active research field. In this paper, we introduce the requirements for satellite observation of CO<sub>2</sub> in scientific and social development, and analyze the advantages and disadvantages of space-based CO<sub>2</sub> measurement, and provide an overview of the research mission and progress of the latest international Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2, launched by NASA in July 2014) and Greenhouse Gases Observing Satellite (GOSAT, launched in January 2009), including instrument specifications, observing modes, calibration modes, and especially focus on the requirement accuracy of calibration and several kinds of in-orbit calibration modes. From the perspec-

收稿日期: 2015-03-11; 修订日期: 2015-05-13

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目 (No. 2011AA12A104)

tive of application and data processing, CO<sub>2</sub> detection technology between grating and Fourier transform method for interference are briefly compared. In addition, the quantitative inversion principle and future development of this field are also presented at the end of this paper.

**Key words:** hyper spectral; CO<sub>2</sub>; remote sensing; quantitative inversion

## 1 引言

二氧化碳(CO<sub>2</sub>)是地球大气中最重要的温室气体成分之一,在全球气候变化当中扮演重要的角色。目前,CO<sub>2</sub>主要排放源为人类工业生产活动,作为汇的地球海洋、陆地植被约吸收了人类排放量的一半左右,这些汇限制了CO<sub>2</sub>在大气中的持续累积速率。观测表明,CO<sub>2</sub>浓度已经从20世纪50年代约310 ppm升到目前约400 ppm,平均年增长率约2 ppm<sup>[1]</sup>。但是,人们对于自然源汇分布的了解仍然不够精确,尤其是对这些过程需要多长时间来吸收人类排放的CO<sub>2</sub>仍然不清楚。研究表明,大气CO<sub>2</sub>每年的增长率约在10~70亿吨变化,如此大的变化幅度与人类工业稳定上升的排放增长率不匹配,这些问题令人困惑<sup>[2]</sup>。IPCC评估报告指出<sup>[3]</sup>,60%的温室气体辐射强迫由CO<sub>2</sub>引起,CO<sub>2</sub>浓度的这种快速增长引起了人们对于全球变暖、极端气候的担忧<sup>[4]</sup>。美、欧等发达国家提出利用市场机制,增加碳关税方式限制CO<sub>2</sub>排放,解决全球气候变化问题。因此,监测大气CO<sub>2</sub>浓度变化不仅是气候变化问题,也是社会发展问题。

在全球范围内高精度地监测CO<sub>2</sub>浓度,获取可靠的观测数据,成为研究这一问题的首要方面。地面观测方式具有精度高、时间分辨率高、可靠性高的优点,但是受站点位置限制,空间分辨率不高,而且南北两极以及海洋、沙漠等地区缺少观测站点。TCCON(Total Carbon Column Observing Network)全球仅有约30个站点<sup>[5]</sup>,如此稀少的地面观测数据显然无法充分监测大气CO<sub>2</sub>的变化。因此,需要发展星载CO<sub>2</sub>遥感技术,以提供高精度、高空间分辨率的全球CO<sub>2</sub>观测,这些观测数据应该对大气低层(对流层甚至边界层)CO<sub>2</sub>具有较高的敏感性,测量精度须达到1 ppm(相对于

400 ppm,约0.25%)。

以IASI、AIRS为代表的综合性高光谱探测器,其探测CO<sub>2</sub>的波段设置在热红外波段<sup>[6-7]</sup>,这一波段对大气中高层CO<sub>2</sub>敏感,难以探测到对流层乃至边界层CO<sub>2</sub>浓度变化,而且这一波段对大气温度的变化相当敏感,因此,热红外CO<sub>2</sub>遥感技术无法满足上述需求。目前,新一代被动式高光谱CO<sub>2</sub>遥感器,如美国OCO-2<sup>[8]</sup>和日本GOSAT搭载的TANSO<sup>[9]</sup>,将探测波段设置在了CO<sub>2</sub>近红外吸收波段(1.61 μm带和2.06 μm带),并配合O<sub>2</sub>A吸收带(0.76 μm),实现高精度的CO<sub>2</sub>探测。这一方法的显著优势是对低层CO<sub>2</sub>具有很高的敏感性,但是由于弱吸收带上的CO<sub>2</sub>信号很弱,而且这一波段易受气溶胶、云、地表等其他干扰因素影响,这对仪器本身研制和数据反演都是一个相当大的挑战。

## 2 国外专用的CO<sub>2</sub>遥感卫星及仪器

IASI、AIRS和SCIAMACHY<sup>[10]</sup>等搭载于综合卫星平台上的仪器虽然具有遥感CO<sub>2</sub>功能,但不属于专门的CO<sub>2</sub>探测仪器,在此不做专门介绍。本文将侧重于专门的CO<sub>2</sub>遥感卫星和仪器,无论从定标观测还是科学观测方面,它们都进行了有针对性的设计,代表了这一领域最先进的思想和技术。2009年,日本GOSAT卫星发射成功并获取数据后,星载近红外高光谱CO<sub>2</sub>遥感领域进入一个快速发展阶段;2014年7月,OCO-2卫星的成功发射,表明这一领域已经成为一个相当活跃的领域;中国、德国等国的相关探测计划也在研究中。

### 2.1 近红外遥感大气CO<sub>2</sub>原理

基于热红外波段遥感大气CO<sub>2</sub>的能量来源是地球大气自身热辐射,与此不同,近红外遥感大气CO<sub>2</sub>的能量来源是太阳辐射的近红外部分,这部

分辐射穿过大气,到达地面后被地面反射回太空,在这一传输过程中,部分能量被 CO<sub>2</sub> 分子吸收,形成特有的 CO<sub>2</sub> 吸收谱线,这些谱线被卫星遥感器所接收并记录下来,根据谱线的深度和形态,结合高精度的反演方法,可以定量反演出大气 CO<sub>2</sub> 浓度,这就是近红外遥感大气 CO<sub>2</sub> 的基本原理。

近红外遥感大气 CO<sub>2</sub> 面对的首要问题之一是谱段选择。在太阳辐射谱区,CO<sub>2</sub> 有许多较弱的泛频带和组合带,一般选择 1.61 μm 作为主要的吸收带<sup>[2]</sup>,主要原因是这一谱区属于 CO<sub>2</sub> 弱吸收带,对近地表 CO<sub>2</sub> 浓度敏感,吸收线不会随 CO<sub>2</sub> 浓度的增加而饱和;另外,没有其他气体的吸收干扰。但是,实际应用中还需要同时观测 0.76 μm 的 O<sub>2</sub> A 带和 2.06 μm 的强 CO<sub>2</sub> 带,这两个吸收带都可以用来限制大气气溶胶影响,另外,O<sub>2</sub> A 带还可以提供地表气压的测量,用于计算柱平均 CO<sub>2</sub> 干空气混合比(the column-averaged CO<sub>2</sub> dry air mole fraction, XCO<sub>2</sub>)。

卫星遥感器需要将上述 3 个谱段的吸收谱线准确可靠的记录下来,用以反演 CO<sub>2</sub> 浓度。OCO

最终采用了光栅衍射分光方案,GOSAT 则采用了干涉分光技术方案。

## 2.2 美国 OCO 计划

The Orbiting Carbon Observatory (OCO) 是美国 NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL) 主导的一项重要计划,其科学任务是观测全球 CO<sub>2</sub> 分布,观测的精度、分辨率和覆盖范围可以描述区域尺度上的源、汇分布,并能定量描述季节变化。通过对 CO<sub>2</sub> 吸收带、O<sub>2</sub> A 吸收带的观测光谱进行高精度定量反演,OCO 得到的关键产品是每月一次的区域尺度(>1 000 km)上的 XCO<sub>2</sub>。

2009 年 2 月,由于运载火箭有效载荷整流罩异常,OCO 发射失败。2010 年,NASA 重启了 OCO 任务,即 OCO-2<sup>[11]</sup>。2014 年 7 月,OCO-2 成功发射,OCO-2 继承了 OCO 的任务和设计,但是对 OCO 试验测试中发现的一些问题进行了改进,主要包括狭缝安装误差,杂散光抑制等,并采用了新的探测器制冷技术。OCO-2 卫星和遥感仪器的相关参数见表 1。

表 1 OCO-2 卫星和光栅光谱仪主要指标

Table 1 Principal specifications of OCO-2 and grating spectrometer

	谱段 1	谱段 2	谱段 3
目标气体	O <sub>2</sub>	弱 CO <sub>2</sub> 吸收带	强 CO <sub>2</sub> 吸收带
谱段范围/μm	0.758 ~ 0.772	1.594 ~ 1.619	2.042 ~ 2.082
信噪比(5% 反照率,60° 太阳天顶角)	310	340	230
光谱分辨力(spectral resolving power)		~ 20 000	
光谱半高宽采样率		2 ~ 3	
光谱通道数		1016	
幅宽/km		10.6	
采样点/时间/(s <sup>-1</sup> )		8 个/0.33	
分辨率/(km × km)		1.29 × 2.25(星下点)	
观测模式		天底,耀斑,目标	
轨道高度/km		705, A train 编队飞行	

OCO-2 仅搭载了一个三波段光栅式高光谱 CO<sub>2</sub> 探测仪,在轨后处于 EOS A-train 序列第一位。加入 A-train 序列,便于 OCO-2 利用其他卫星获取的云、气溶胶信息。为达到设计的任务目标,OCO-2 仪器具有高光谱分辨率、高信噪比、高空间

分辨率的特点。作为探测的主力波段,弱 CO<sub>2</sub> 吸收带信号非常微弱,高光谱分辨率要确保分辨出带内 CO<sub>2</sub> 吸收特征;高信噪比要确保高精度的探测;高空间分辨率可降低受云影响的机率,并提高源、汇区探测能力。

作为专门的 CO<sub>2</sub> 观测卫星,OCO-2 有 3 种观测模式,当太阳天顶角 < 85° 时,采用星下观测模式,这种模式有最高的空间分辨率,但是在海洋上空,信噪比低;为解决这一问题,当卫星在海洋上空时,观测利用的是太阳光被洋面镜面反射的信号,这种观测方式称之为耀斑模式;为观测全球 CO<sub>2</sub> 分布,以 16 天为周期,两种观测模式将互相转换。目标模式将用于跟踪地面的特殊目标(如地面 FTS 定标站点,源排放区),在约 9 min 的飞越目标区观测期间内,这一模式可提供超过 12 000 次观测。

CO<sub>2</sub> 浓度从观测的吸收线深度推算出来,因此高光谱探测仪的定标精度对于定量反演至关重要。OCO-2 从 3 个不同层面对辐射定标精度进行了约束,分别是:(1)3 个波段上的绝对辐射定标精度优于 5%;(2)3 个波段间的相对定标精度优于 1%;(3)波段内通道间的相对定标精度优于 0.1%<sup>[12]</sup>。在这 3 个指标当中,尤以第三个指标最为重要,这是因为整个波段内的所有通道的观

测值同时进入最优估计反演模式,通道间定量观测的一致性会直接影响整个光谱的拟合程度。

OCO-2 设计有多种星上光谱定标、辐射定标方式(见表 2)。光谱定标采用临边方式观测太阳光谱,太阳光经漫反射板反射后被光谱仪观测,观测角度稳定,且光谱数据受气压加宽较小,没有地表反射的影响,因此,适合于检验光谱仪的线型函数(Instrument Line Shape, ILS)的变化。辐射定标方面,OCO-2 设计有专门的定标灯用作辐射定标,除此之外,星上辐射定标还包括了月亮定标、太阳定标、暗电流定标。另外,在轨运行后可采用替代定标方法进行辐射定标,观测目标包括内华达州的 Railraod 山谷等地表特征良好,并且有充足的地面设备进行绝对辐射观测。图 1 统计了 2015 年 1 月 1 日一天内 OCO-2 每轨科学观测和探元合并定标的时序。OCO-2 多种星上定标方法综合应用来修正定标系数,目标是为了满足数据定量反演要求。

表 2 OCO-2 在轨定标观测描述

Table 2 Description of on-orbit calibration measurements of OCO-2

定标类型	方法	频率	精度
太阳定标	北极点附近通过漫透板观测太阳,提供绝对辐射定标标准	探元合并方式:6 次/天 单探元方式:6 次/天	0.1%
临边定标	北极点附近临边方式透过大气观测太阳,进行 ILS 线型定标	探元合并方式:6 次/天 单探元方式:6 次/天	-
月亮定标	调整轨道和仪器指向观测月亮,提供相对辐射定标	1 次/月球周期	0.1%
灯定标	采用内漫射板观测定标灯(3 个),提供无光谱变化的相对辐射标准	1 号灯探元合并方式:6 次/天 1 号灯单探元方式:6 次/天 2 号灯:12 次/年 3 号灯:3 次/年	慢变
阴影区暗电流定标	阴影区无能量输入时进行,监测仪器暗电流的变化	探元合并方式:12 次/天 单探元方式:12 次/天	<10% 的背景噪音
整轨暗电流定标	卫星轨道处于太阳照射的全部时间内进行,验证暗电流订正模式用于科学观测时的正确性	1 次/月	-
多普勒定标	卫星处于太阳照射时的全部时间内进行,方法同太阳定标,基于多普勒频移验证仪器线型函数的稳定性	1 次/月	ILS 稳定性优于 1%
场地定标	卫星飞过定标场地时进行,检验绝对辐射定标精度	10 次/年(受天气影响)	优于 10%

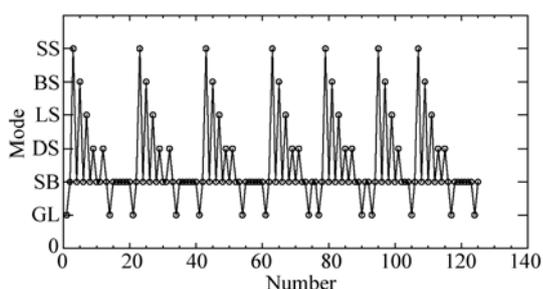


图 1 2015 年 1 月 1 日,OCO-2 每轨科学观测和探元合并时定标观测统计,横坐标代表每一种模式的时序号,纵坐标代表观测模式简写:GL:海洋耀斑;SB:待机;DS:暗电流定标;LS:灯定标;SS:太阳定标;BS:临边定标

Fig. 1 Series of OCO-2 science observation and calibration modes each orbit in Jan. 1, 2015. The horizontal axis shows the series numbers for every modes. The vertical axis represents the observation and calibration modes. GL:; SB:standby; DS:dark current scaling; LS:light scaling; SS: solar scaling; BS:border scaling

OCO-2 卫星运行模式设计复杂,载荷研制难

度较大,在轨后出现了观测光谱旋转,探测器坏探元等问题,但是其整体技术依然代表了当今最前沿的 CO<sub>2</sub>遥感技术。其后续将由 OCO-3 接替,以尽可能延长 CO<sub>2</sub>观测时序<sup>[13]</sup>。

### 2.3 日本 GOSAT 计划

2009 年 1 月 23 日,日本宇航局成功发射了 GOSAT 这颗用于监测全球温室气体的卫星。它是国际上第一颗专门对温室气体 CO<sub>2</sub>和 CH<sub>4</sub>提供高光谱分辨率探测的全球观测卫星。

GOSAT 的载荷有两部分组成——傅里叶变换光谱仪(TANSO-FTS)和云和气溶胶成像仪(TANSO-CAI),卫星及仪器相关参数见表 3 和表 4。TANSO-FTS 的工作波段在近红外和热红外谱段,能探测地表反射的短波红外辐射,以及地表和大气发射的热红外辐射,几乎能对全球的 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、H<sub>2</sub>O 和 O<sub>3</sub>进行探测。TANSO-CAI 在紫外到近红外区域有四个窄的光谱带(0.38、0.674、0.87 和 1.6 μm),用于描述 TANSO-FTS 视场中的散射干扰,修正其光谱数据中气溶胶散射的影响,它的空间分辨率高于 TANSO-FTS。

表 3 GOSAT 卫星及载荷 TANSO-FTS 主要技术指标

Table 3 GOSAT and TANSO-FTS specifications

	谱段 1	谱段 2	谱段 3	谱段 4
目标气体	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub>
谱段范围/μm	0.758 ~ 0.775	1.56 ~ 1.72	1.92 ~ 2.08	5.56 ~ 14.3
光谱分辨率/cm <sup>-1</sup>	0.2			
单次扫描时间/s	4.0, 2.0 或 1.1			
IFOV/mrad	15.8 (10.5 km)			
观测模式	天底、耀斑、目标			
偏振	P、S	P、S	P、S	非偏振
轨道高度	666 km			

表 4 GOSAT 载荷 TANSO-CAI 主要技术指标

Table 4 GOSAT TANSO-CAI specifications

谱段	谱段 1	谱段 2	谱段 3	谱段 4
谱段范围/μm	0.370 ~ 0.390	0.664 ~ 0.684	0.86 ~ 0.88	1.555 ~ 1.645
扫面宽度/km	1 000	1 000	1 000	750
空间分辨率/km	0.5	0.5	0.5	1.5
探测目标	云和气溶胶			

与 OCO-2 卫星的观测模式相同,GOSAT 卫星也采用了星下观测、目标观测和耀斑观测 3 种观

测模式。其中星下观测方式,在星下点区域,能获得最高的空间分辨率,有利于避免视场内云和气

溶胶的影响。目标观测模式可以对特定目标进行跟踪观测,从而增加有效观测数据,同时可以在一定程度上弥补空间分辨率低造成的特定目标区域的漏扫,进而对卫星资料的验证起到关键作用。耀斑模式的观测是利用海洋上对太阳短波辐射的镜面反射信号,这种观测方式可以大幅提高信噪比,增强仪器高精度的探测能力,填补了海洋上空 $\text{CO}_2$ 观测资料的空缺。但是,受观测积分时间限制,在采样数增加时,观测积分时间减少,信噪比会逐渐降低。另外,受观测几何的限制,GOSAT观测数据中只有小部分来自耀斑模式的观测,这很大程度上限制了海洋上的观测密度。

日本的GOSAT-2卫星是GOSAT卫星的后续计划,计划于2017年发射<sup>[14]</sup>。与GOSAT卫星相同,GOSAT-2卫星携带两个观测仪器——TANSO-FTS-2和TANSO-CAI-2。但GOSAT-2两个观测仪器的谱段宽度和谱段数目都多于GOSAT。

FTS-2每4 s获取一次数据,在重访周期内,数据总量超过100 000次。为了增加有效数据量,应对GOSAT卫星观测有效数据少的问题,FTS-2采用了“智能指向”的新技术,利用来自相机的实时图像自动识别FTS-2视场中的云,并快速操纵指向镜,避免云的干扰。GOSAT-2对 $\text{CO}_2$ 的有效日观测将超过600次,是GOSAT的2倍。另外,针对GOSAT在海洋耀斑模式时观测数据少的问题,GOSAT-2将通过提高信噪比和增大沿轨指向角的方式改善。

TANSO-CAI-2仪器也做了两方面的改进。首先,相比GOSAT CAI,在紫外区域CAI-2有两个紫外谱段,可以更有效描述大陆气溶胶包括城市区域的气溶胶特征。另一方面,CAI-2具备的前视(Forward viewing)/后视(Backward viewing)功能,可以避免海面上耀斑的影响。通过结合前向观测数据和后向观测数据,CAI-2能够监测海洋上的跨区空气污染状态。

#### 2.4 德国 CarbonSat 计划

德国也制定了相应的碳监测任务 Carbon Monitoring Satellite (CarbonSat),作为ESA地球探索项目的候选任务之一,目标是观测地球 $\text{CO}_2$ 和 $\text{CH}_4$ 的源、汇分布,提高人们的认识水平<sup>[15]</sup>。CarbonSat核心仪器是一台高光谱仪器(Imaging

Spectrometer),采用光栅分光来达到高光谱分辨率要求,与OCO-2不同,它的特点是同时拥有宽的覆盖范围(500 km)和高的空间分辨率( $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$ )。利用这些设计指标,研究人员开展了相关的误差分析工作,结果表明<sup>[16]</sup>,单次探测精度为 $\text{XCO}_2 < 1.2 \text{ ppm}$ , $\text{XCH}_4 < 7 \text{ ppb}$ 。卫星预计在2019年左右发射。

#### 2.5 不同卫星遥感 $\text{CO}_2$ 的应用比较

单纯载荷技术角度的比较,超出了本文的范围。本文尝试从应用和数据预处理的角度,分析不同遥感体制的优点和不足。OCO-2、CarbonSat采用的技术体制的突出优势表现在多个方面:信噪比远高于GOSAT TANSO-FTS,尤其是暗背景观测场景;就观测数据来说,每一轨的观测数量是GOSAT的48-96倍;从空间分辨率来说,OCO-2高的空间分辨率显著减少了云的影响;从数据预处理(即从原始测量DN值转换为辐射值)角度讲,GOSAT由于测量信号是时域信号,需要经过傅里叶变换才能得到频域信号,这里面需要涉及多项误差改正或订正才能得到可靠的数据,预处理技术复杂。相对而言,OCO-2的预处理直接简单,对数据应用是很有利的。

### 3 国内遥感卫星及仪器

目前,国内有多个部门正在研制被动式近红外高光谱仪器,计划搭载于不同的卫星上,探测全球、区域 $\text{CO}_2$ 浓度分布,这些任务分别是中国风云三号气象卫星02批D星(FY-3D)高光谱温室气体监测仪(Greenhouse gases Absorption Spectrometer, GAS),科技部碳卫星(TanSat)高光谱 $\text{CO}_2$ 探测仪(TanSat  $\text{CO}_2$  Spectrometer, TSCS)<sup>[17-18]</sup>,空间外差光谱仪(Spatial Heterodyne Spectroscopy, SHS)<sup>[19]</sup>。尽管这些任务目标相似,但是他们的遥感探测方法并不相同,分别介绍如下。

#### 3.1 FY-3D GAS

计划于2016年发射的FY-3D卫星将携带高光谱温室气体监测仪开展 $\text{CO}_2$ 观测。其探测目标是测量全球大气温室气体( $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}$ 等)的浓度分布,探测精度可以描述温室气体在区域、全球尺度上空间、时间变化(对边界层浓度变化具

有较强的敏感性)。通过高精度定量反演,高光谱温室气体监测仪可得到以下二级产品:区域尺度上( $\geq 1\ 000\ \text{km}$ )的柱平均 CO<sub>2</sub>干空气混合比 XCO<sub>2</sub>,以及柱平均的 CH<sub>4</sub>干空气混合比 XCH<sub>4</sub>。这些数据将被进一步同化到数值模式中,提高区域尺度上地表温室气体通量的定量估算,分析和监测全球碳源、汇。与 GOSAT 相似,GAS 采用了傅里叶干涉技术获取 0.76  $\mu\text{m}$  的 O<sub>2</sub> A 带、弱 CO<sub>2</sub> 吸收带和强 CO<sub>2</sub> 吸收带吸收光谱,另外,增加了 2.3  $\mu\text{m}$  处的光谱带,以获取 CO、CH<sub>4</sub> 等温室气体浓度。探测模式有星下观测和耀斑观测。由于 FY-3 卫星是综合性探测平台,携带有成像类仪器,因此,并未像 GOSAT 那样设有 CAI 探测仪。GAS 设计有专门的星上光谱定标激光器,用以监测 GAS ILS 变化;另外,还通过漫反射板对太阳进行观测,太阳光谱中特有的吸收线可用来检验 GAS 波长漂移。星上辐射定标通过太阳观测、冷空观测实现。

### 3.2 TanSat TSCS

十二五期间,中国科学院微小卫星工程中心、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、国家卫星气象中心和中科院大气所共同联合申请了科技部碳卫星项目,与 OCO-2 卫星技术体制相似,这是一颗专门的大气 CO<sub>2</sub> 观测卫星,计划于 2016 年发射,搭载两台载荷,分别是高光谱 CO<sub>2</sub> 探测仪(TSCS)、云和气溶胶探测仪(CAPI)。TSCS 与 OCO-2 技术方案相似<sup>[20]</sup>,设计有三个专门谱段,但是由于受探测器限制,两个 CO<sub>2</sub> 谱段光谱分辨率略微低于 OCO-2,这样可以保证每个通道半高宽内采样率大于 2。

TanSat 卫星本身可根据地面发出的指令在主平面(即太阳、地面测点和卫星连成的平面)或非主平面内观测,TSCS 载荷设计有 3 种观测模式,分别是星下观测、耀斑观测、目标观测。太阳观测数据可分为 x 轴对日光谱定标和 z 轴对日辐射定标,在轨辐射定标方式有暗电流、定标灯和太阳观测。

### 3.3 SHS

SHS 是一种空间调制型的 FTS,最早由美国 SHIMMER (Spatial Heterodyne Imager for Mesospheric Radicals) 采用<sup>[21]</sup>,并于 2002 年在航天飞

机上搭载进行验证试验。中国科学院安徽光学精密机械研究所将这一技术首次用于 CO<sub>2</sub> 遥感,目前已研制出 CO<sub>2</sub> 通道的原理样机,并完成了实验室相关测试。在相关计划的资助下,研究还在不断深入。

## 4 反演方法

卫星反演的 XCO<sub>2</sub> 主要应用于 CO<sub>2</sub> 通量研究,准确的通量研究对 XCO<sub>2</sub> 反演精度提出了很高的要求,研究表明,区域尺度上 1 ppm 的偏差可影响地表通量反演精度<sup>[22]</sup>。许多国家都在开展高精度反演算法研究<sup>[23]</sup>,比如德国为 SCIAMACHY 开发的 WFM-DOAS 算法,美国 OCO 团队开发的 ACOS 算法、日本 NIES (National Institute for Environmental Studies) 为 GOSAT 开发的算法、SRON-Netherlands 空间研究所开发的 RemoTec、英国 Leicester 大学开发的 UoL-FP 算法等。国内中科院大气所等相关单位也在研究开发相应的算法,并且这些算法仍然处在不断改进之中。按照这些算法所依据的物理基础,WFM-DOAS 和 ACOS 算法具有一定的代表性。

### 4.1 改进的 DOAS 反演算法

从名称可以看出,WFM-DOAS (Weighting Function Modified Differential Optical Absorption Spectroscopy) 是对 DOAS 方法的改进,在近红外谱段,用吸收气体柱总量对差分光谱的权重函数取代吸收截面进行最小二乘拟合<sup>[24]</sup>。WFM-DOAS 方法直接对气体柱总量进行拟合,去除经典 DOAS 方法中,倾斜柱总量向垂直柱总量大气质量因子的订正过程。除此之外,针对 SCIAMACHY 观测数据,还存在几种以 DOAS 方法为基础的算法。2008 年,Oshchepkov 等人<sup>[25]</sup>提出了能同时反演光学路径长度的概率密度函数的方法,从而修正光学路径长度。2005 年,Frankenberg 等人<sup>[26]</sup>针对甲烷的反演,提出了一种同时反演 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 柱浓度的方法,假设没有气溶胶,用 CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 气柱的比率,去除大部分气溶胶散射的影响。但是,这些算法中都假设了气溶胶场景或者地表反照率,当实际等效的光学路径长度与假设的路径长度有差别时,反演结果就会出现很大的误差。

在晴空条件下,利用 SCIAMACHY 观测数据反演的  $\text{CO}_2$  浓度单次测量精度为 1% ~ 2%。其中,云和气溶胶的散射是主要的误差来源。2005 年, Houweling 等人<sup>[27]</sup>指出,  $\text{CO}_2$  浓度的反演误差有 10% 来自矿物气溶胶的影响。由于 SCIAMACHY 并不是专门用于探测  $\text{CO}_2$  的仪器,同时受到它的空间分辨率和光谱分辨率的限制,  $\text{XCO}_2$  的反演精度和准确度难以满足地表碳源、汇的研究要求。

#### 4.2 全物理反演算法

基于贝叶斯理论的最优估计方法 (Optimal Estimation Method-OEM) 是目前主流的反演算法, GOSAT 和 OCO-2 的反演都采用了这种方法。全物理反演算法由正演模型和反演方法两部分组

成。正演模型通过描述太阳光谱、大气散射和吸收、地表光学特性、辐射传输以及仪器效应,模拟仪器观测的光谱。输入的大气参数、地表特性以及仪器参数要尽可能全面的模拟卫星观测辐射。在反演方法中,通过改变状态向量参数,最小化模拟光谱和测量光谱之间的残差,一旦得到两者的最好匹配,这个算法就会确定  $\text{CO}_2$  浓度和计算误差。

整个反演过程主要包括三个步骤:第一步是云检测,选择出无云观测的情景。第二步以贝叶斯最优估计理论为基础,反演  $\text{XCO}_2$ 。第三步是检验反演参量,剔除低质量和受气溶胶污染的结果。整体反演算法的流程如图 2 所示。

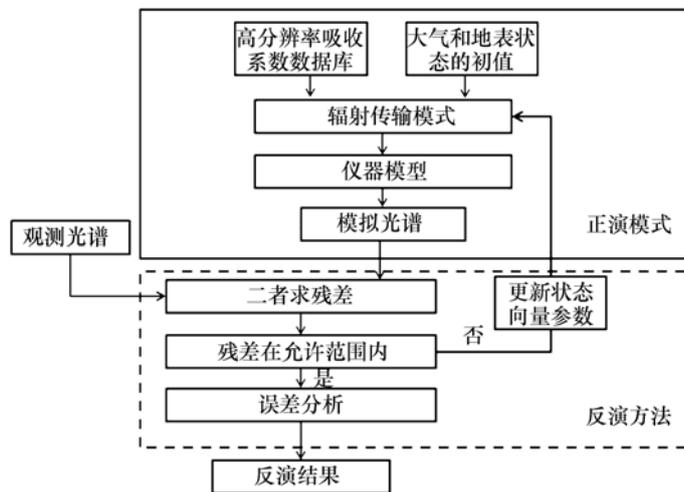


图 2 反演算法流程图

Fig. 2 Flow diagram for retrieval algorithm

对于全物理反演算法,云和气溶胶的散射引起的光学路径长度的改变依然是反演  $\text{XCO}_2$  过程中最主要的误差源<sup>[28-30]</sup>。减小这一误差的方法是利用大气散射特性的先验信息,  $\text{O}_2$  A 带的光谱信息直接反演大气散射特性<sup>[31]</sup>。2008 年, Oshchepkov 等人<sup>[25]</sup>提出了加入光学路径长度概率密度函数 (photon path length probability density function, PPDF) 的方法,这种方法利用了光子路径长度统计特征和等价理论,选取了几个 PPDF 参数,利用  $\text{O}_2$  A 带的观测光谱反演上述参数。OCO-2 卫星采用的反演算法同时反演  $\text{CO}_2$  垂直廓线、地表气压以及气溶胶垂直廓线<sup>[32]</sup>。2009 年, Butz 等人<sup>[33]</sup>针对近红外高光谱观测提出了一种在反

演  $\text{CO}_2$  浓度的同时,利用简单的气溶胶微物理模型反演有效气溶胶特性的方法。另外,不同的星载平台由于搭载了不同的仪器,所以反演算法中对云和气溶胶的处理中也会存在一些差异,例如, OCO-2 卫星借助 A-train 序列中其他几颗卫星的协同观测数据,处理云和气溶胶的影响,而 GOSAT 卫星利用 TANSO-CAI 的观测数据订正云和气溶胶的影响。因此,确切了解不同特性气溶胶的散射引入的不确定性,是获得高精度  $\text{XCO}_2$  的重要环节。

全物理反演算法可以同时得到多种大气、地表产品。以 OCO-2 为例,其反演量多达 50 个,除  $\text{XCO}_2$  外,涵盖气溶胶、温湿度、地表气压和反照

率、海面风速等。其不足之处是算法复杂,计算量巨大。

## 5 结束语

本文在介绍高光谱 CO<sub>2</sub>遥感探测原理的基础上,给出了国内外在被动式近红外高光谱 CO<sub>2</sub>遥感探测的最新进展,详细介绍了卫星观测模式和代表性仪器的主要性能指标、光谱定标和辐射定标方式,并讨论了以美国 OCO-2 为代表的光栅分光体制和以日本 GOSAT 为代表的 FTS 体制探测 CO<sub>2</sub>的优势和不足。

以全物理反演算法为代表的方法在反演 XCO<sub>2</sub>的同时,可同时反演多种大气未知参量,但

是,云和气溶胶的影响将是反演中最有挑战性的问题之一。这一领域的研究已经带动了一大批相关学科的发展,典型的如太阳光谱中相关谱段的研究,CO<sub>2</sub>分子光谱学,云和气溶胶的散射影响研究、反演产品精度验证、CO<sub>2</sub>遥感产品在碳循环研究中的应用等。

展望未来的发展,近红外高光谱探测 CO<sub>2</sub>仍将保持着非常活跃的程度,遥感仪器将进一步朝着高光谱分辨率、高空间分辨率和高信噪比的“三高”方向发展,并且宽的覆盖范围和短的覆盖周期也是追求的目标之一<sup>[34]</sup>。紧随国际研究趋势,国内正将多种技术体制应用于近红外 CO<sub>2</sub>遥感探测,但是,面对 1 ppm 的 XCO<sub>2</sub>精度需求,近红外 CO<sub>2</sub>遥感仍面临着诸多科学问题。

## 参考文献:

- [1] Carbon Dioxide Information Analysis Center. [EB/OL]. [2014-03-28]. <http://cdiac.ornl.gov>.
- [2] CRISP D, ATLAS R, BREON F M, et al. The orbiting carbon observatory (OCO) mission [J]. *Advances in Space Research*, 2004, 34: 700-709.
- [3] SOLOMON S. *Climate Change 2007-the Physical Science Basis; Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [4] 丁一汇,任国玉,石广玉,等. 气候变化国家评估报告( I ): 中国气候变化的历史和未来趋势 [J]. *气候变化研究进展*, 2006, 2: 3-8.  
DING Y H, RENG G Y, SHI G Y, et al. National assessment report of climate change( I ): climate change in China and its future trend [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2006, 2: 3-8. (in Chinese)
- [5] TOON G, BLAVIER J F, WASHENFELDER R, et al. Total column carbon observing network (TCCON) [J]. *Optical Society of America*, 2009, JMA: JMA3.
- [6] ENGELEN R J, MCNALLY A P. Estimating atmospheric CO<sub>2</sub> from advanced infrared satellite radiances within an operational four-dimensional variational (4D-Var) data assimilation system: Results and validation [J]. *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 2005, 110( D18 ): 1984-2012.
- [7] MADDY E, BARNET C, GOLDBERG M, et al. CO<sub>2</sub> retrievals from the atmospheric infrared sounder: methodology and validation [J]. *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, 113( D11 ): 1984-2012.
- [8] FRANKENBERG C, POLLOCK R, LEE R A M, et al. The Orbiting Carbon Observatory (OCO-2): spectrometer performance evaluation using pre-launch direct sun measurements [J]. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 2014, 7( 7 ): 7641-7670.
- [9] 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 ): 1-6.
- [10] HOUWELING S, HARTMANN W, ABEN I, et al. Evidence of systematic errors in SCIAMACHY-observed CO<sub>2</sub> due to aerosols [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2005, 5( 11 ): 3003-3013.
- [11] ELDERING A, BOLAND S, SOLISH B, et al. High precision atmospheric CO<sub>2</sub> measurements from space: the design and implementation of OCO-2 [C]. Aerospace Conference, IEEE, Big Sky, MT, USA, 3-10 March 2012.
- [12] O'DELL C W, DAY J O, POLLOCK R, et al. Preflight radiometric calibration of the orbiting carbon observatory [J]. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions*, 2011, 49( 6 ): 2438-2447.
- [13] ELDERING A, KAKI S, CRISP D, et al. The OCO-3 Mission [J]. *AGUFM*, 2013, A21G: 0134E.

- [14] GLUMB R, DAVIS G, LIETZKE C. The TANSO-FTS-2 instrument for the GOSAT-2 greenhouse gas monitoring mission [C]. Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Quebec City, Canada, 13-18 July, 2014.
- [15] BOVENSMANN H, BUCHWITZ M, BURROWS J P. Carbon Monitoring Satellite (CarbonSat): Mission Overview [EB/OL]. [2013-04-02]. [http://cache2.nmic.cn/files/2243000001E3343/www.iup.uni-bremen.de/carbonsat/CarbonSat\\_FactSheet\\_v3.pdf](http://cache2.nmic.cn/files/2243000001E3343/www.iup.uni-bremen.de/carbonsat/CarbonSat_FactSheet_v3.pdf).
- [16] BUCHWITZ M, REUTER M, BOVENSMANN H, *et al.*. Carbon Monitoring Satellite (CarbonSat): assessment of scattering related atmospheric CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> retrieval errors by error parameterization [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, 6(12): 3477-3500.
- [17] BI Y M, YANG Z D, GU S Y, *et al.*. Impacts of aerosol and albedo on TanSat CO<sub>2</sub> retrieval using the near infrared CO<sub>2</sub> bands [J]. *SPIE*, 2014, 9259: 925915.
- [18] 王倩, 杨忠东, 毕研盟. CO<sub>2</sub> 高光谱遥感仪器的光谱参数和信噪比需求 [J]. *应用气象学报*, 2014, 25(5): 600-609.  
WANG Q, YANG Z D, BI Y M. Spectral parameter and signal-to noise ratio requirement for CO<sub>2</sub> hyper spectral remote sensor [J]. *J. Applied Meteorological Science*, 2014, 25(5): 600-609. (in Chinese)
- [19] 施海亮, 熊伟, 罗海燕, 等. 新型超光谱大气 CO<sub>2</sub> 遥感探测技术 [J]. *光电工程*, 2013, 40(8): 36-41.  
SHI H L, XIONG W, LUO H Y, *et al.*. Novel hyper-spectral technology for atmospheric carbon dioxide detection [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2013, 40(8): 36-41. (in Chinese)
- [20] 郑玉权. CO<sub>2</sub> 探测仪光学系统设计 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(12): 2645-2653.  
ZHENG Y Q. Optical system design of a CO<sub>2</sub> sounder [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(12): 2645-2653. (in Chinese)
- [21] HARLANDER J M, ROESLER F L, CARDON J G, *et al.*. SHIMMER: a spatial heterodyne spectrometer for remote sensing of the Earth's middle atmosphere [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(7): 1343-1352.
- [22] MILLER C E, CRISP D, BOESCH H, *et al.*. Precision requirements for space-based XCO<sub>2</sub> data [J]. *J. Geophysical Research*, 2007, 112(D10): 185-194.
- [23] OSHCHEPKOV S, BRIL A, YOKOTA T, *et al.*. Effects of atmospheric light scattering on spectroscopic observations of greenhouse gases from space. Part 2: Algorithm intercomparison in the GOSAT data processing for CO<sub>2</sub> retrievals over TC-CON sites [J]. *J. Geophysical Research Atmospheres*, 2013, 118(3): 1493-1512.
- [24] BUCHWITZ M, ROZANOV V, BURROWS J P. A near - infrared optimized DOAS method for the fast global retrieval of atmospheric CH<sub>4</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, and N<sub>2</sub>O total column amounts from SCIAMACHY Envisat-1 nadir radiances [J]. *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 2000, 105(D12): 15231-15245.
- [25] OSHCHEPKOV S, BRIL A, YOKOTA T. PPDF - based method to account for atmospheric light scattering in observations of carbon dioxide from space [J]. *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, 113(D23): 2036-2044.
- [26] FRANKENBERG C, PLATT U, WAGNER T. Iterative maximum a posteriori (IMAP)-DOAS for retrieval of strongly absorbing trace gases: Model studies for CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> retrieval from near infrared spectra of SCIAMACHY onboard ENVISAT [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2005, 5(1): 9-22.
- [27] HOUWELING S, HARTMANN W, ABEN I, *et al.*. Evidence of systematic errors in SCIAMACHY-observed CO<sub>2</sub> due to aerosols [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2005, 5(11): 3003-3013.
- [28] O'BRIEN D M, RAYNER P J. Global observations of the carbon budget-2, CO<sub>2</sub> column from differential absorption of reflected sunlight in the 1.61 μm band of CO<sub>2</sub> [J]. *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 2002, 107(D18): ACH 6-1-ACH 6-16.
- [29] DUFOUR E, BRÉON F M. Spaceborne estimate of atmospheric CO<sub>2</sub> column by use of the differential absorption method: error analysis [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(18): 3595-3609.
- [30] ABEN I, HASEKAMP O, HARTMANN W. Uncertainties in the space-based measurements of CO<sub>2</sub> columns due to scattering in the Earth's atmosphere [J]. *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2007, 104(3): 450-459.
- [31] 王倩. 大气 CO<sub>2</sub> 遥感探测仪器的关键指标和敏感性分析研究 [D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2014.  
WANG Q. Key instrument specifications and sensitivity studies for remote sensing of atmospheric CO<sub>2</sub> [D]. Beijing: China

nese Academy of Meteorological Sciences,2014. (in Chinese)

- [32] CONNOR B J,BOESCH H,TOON G,*et al.*. Orbiting carbon observatory:inverse method and prospective error analysis [J]. *J. Geophysical Research:Atmospheres*,2008,113(D5):79-88.
- [33] 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.
- [34] 郑玉权. 温室气体遥感探测仪器发展现状[J]. 中国光学,2011,4(6):546-561.  
ZHENG Y Q. Development status of remote sensing instruments for greenhouse gases[J]. *Chinese Optics*,2011,4(6):546-561. (in Chinese)

#### 作者简介:



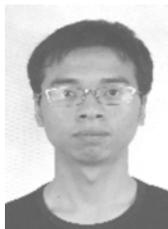
毕研盟(1979—),男,博士,副研究员,主要从事卫星遥感温室气体方面的研究。E-mail:biym@cma.gov.cn



谷松岩(1962—),女,辽宁鞍山人,博士,研究员,主要从事微波遥感应用方面的研究。E-mail:gusy@cma.gov.cn



王倩(1989—),女,新疆五家渠人,硕士,研究实习员,2011年于兰州大学获得学士学位,2014年于中国气象科学研究院获得硕士学位,主要从事大气成分遥感方面的研究。E-mail:qwang@cma.gov.cn



吴荣华(1984—),男,吉林人,博士研究生,工程师,主要从事大气遥感定标方面的研究。E-mail:wurh@cma.gov.cn



杨忠东(1964—),男,新疆乌鲁木齐人,博士,研究员,主要从事地面应用系统工程设计、建设和遥感科学研究应用方面的研究。E-mail:yangzd@cma.gov.cn



刘成保(1985—),男,山东淄博人,博士,助理研究员,2013年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事风云极轨气象卫星遥感图像地理定位方面的研究。E-mail:liuchb@cma.gov.cn