

# 大气 CO<sub>2</sub> 浓度卫星遥感进展

陈良富<sup>1</sup>, 张莹<sup>1</sup>, 邹铭敏<sup>1</sup>, 徐谦<sup>2</sup>, 李令军<sup>2</sup>, 李小英<sup>1</sup>, 陶金花<sup>1</sup>

1. 中国科学院遥感与数字地球研究所 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101;

2. 北京市环境保护监测中心, 北京 100048

**摘要:** 大气 CO<sub>2</sub> 是重要的温室气体, CO<sub>2</sub> 浓度及其空间分布是全球气候变化评估中的主要不确定性因素之一。从 1998 年以来, 卫星遥感大气 CO<sub>2</sub> 成为获取全球 CO<sub>2</sub> 的重要手段。本文阐述了现阶段大气 CO<sub>2</sub> 浓度卫星遥感反演进展情况, 包括 CO<sub>2</sub> 探测载荷、反演算法和算法验证等。同时, 论文详细介绍了近红外波段和热红外波段的反演算法特点和不确定因素, 并针对 CO<sub>2</sub> 反演应用需求提出了展望。

**关键词:** CO<sub>2</sub>, 卫星遥感, 热红外高光谱, 近红外高光谱, 最优化算法

中图分类号: P407 文献标志码: A

**引用格式:** 陈良富, 张莹, 邹铭敏, 徐谦, 李令军, 李小英, 陶金花. 2015. 大气 CO<sub>2</sub> 浓度卫星遥感进展. 遥感学报, 19(1): 1-11

Chen L F, Zhang Y, Zou M M, Xu Q, Li L J, Li X Y and Tao J H. 2015. Overview of atmospheric CO<sub>2</sub> remote sensing from space. *Journal of Remote Sensing*, 19(1): 1-11 [DOI: 10.11834/jrs.20153331]

## 1 引言

联合国政府间气候变化专门委员会第五次气候变化评估指出, 人类活动极可能(95%置信度)导致了20世纪50年代以来的大部分(50%以上)全球地表平均气温升高。其中, 温室气体在1951年—2010年间可能贡献了0.5℃—1.3℃(IPCC, 2013)。而人们对陆地和海洋生态系统的固碳机制和空间分布, 以及气候变化对大气、陆地和海洋中碳循环反馈效应的理解还很有限, 导致气候变化的预测存在较大的不确定性。要解决这些问题, 掌握大气 CO<sub>2</sub> 浓度及其空间分布和随时间的变化状况至关重要。CO<sub>2</sub> 是一种稳定气体, CO<sub>2</sub> 的人为排放活动主要发生在底层大气(Crisp等, 2004; Andrews等, 2001)。因此, 如何获取大气边界层 CO<sub>2</sub> 浓度是其监测的核心。

目前, 全球监测温室气体的地面观测站点不足300个, 并且地区分布很不均匀, 大多分布在发达国家和人口稠密地区。虽然观测站点数量仍在不断扩展中, 但是其有限的3维空间代表性, 导致定量理

解大气温室气体的源汇分布仍存在较大问题。卫星遥感资料可以获得温室气体全球连续空间分布和变化, 具有稳定、长时间序列、广空间区域、空间3维监测的优点, 可弥补地基站点的不足, 有助于提高对碳循环和气候变化的认识。由于 CO<sub>2</sub> 的背景浓度较高, 而边界层内 CO<sub>2</sub> 浓度的空间差异相对较小, 所以利用卫星探测大气 CO<sub>2</sub> 要求其空间分辨率至少要达到 2 km × 2 km, CO<sub>2</sub> 浓度精度高于 0.5% (2 ppm) (Bovensmann等, 2010), 才有助于分辨人为排放和地表通量的空间变化(Olsen等, 2004), 并使源于卫星监测地表 CO<sub>2</sub> 通量的碳源汇空间分布信息满足于气候模式的需求。所以, 如何获得近地面高精度的 CO<sub>2</sub> 浓度是卫星遥感监测追求的核心目标。

## 2 卫星探测器进展

### 2.1 热红外高光谱传感器的发展

美国于20世纪70年代设计了高光谱分辨率红外探测器 HIRS(High Resolution Infrared Sounder),

收稿日期: 2013-12-10; 修订日期: 2014-06-19; 优先数字出版日期: 2014-06-25

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 41130528); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05040204)

第一作者简介: 陈良富(1965—)男, 研究员, 现从事大气遥感理论、反演与应用研究, 已发表论文100余篇。E-mail: lfchen@irsa.ac.cn

成为卫星遥感用于大气探测业务化的标志。红外传感器早期主要用于探测大气中温湿廓线。随着传感器技术和大气遥感反演理论的发展与完善以

及人类迫切需要了解大气环境的需求驱动,热红外高光谱传感器开始用于大气痕量气体探测。表1列出了近期以星下点方式探测 CO<sub>2</sub> 的传感器。

表1 以星下点观测方式探测 CO<sub>2</sub> 的红外传感器

Table 1 Summary of space-borne instruments for CO<sub>2</sub> measurement in thermal infrared band

性能指标 传感器	发射时间	传感器 分光类型	光谱范围 (波数)	光谱分辨率	等效噪声温度	空间分辨率 (星下点)/km	幅宽/km
IMG	1998	干涉	600—3030 cm <sup>-1</sup> (3.3—16.7 μm)	0.15—0.25 cm <sup>-1</sup>		22	
AIRS	2002	光栅	3.7—15.4 μm	$\lambda/\Delta\lambda > 1200$	<0.14—0.35 K@250 K	13.5	1650
TES	2004	干涉	650—4350 cm <sup>-1</sup>	0.1 cm <sup>-1</sup>		5.3 × 8.3	182
IASI	2006( Metop-A) 2012( Metop-B)	干涉	3.62—15.5 μm	0.35—0.5 cm <sup>-1</sup>	0.1—0.5 K	12	2200
CrIs	2011	干涉	9.14—15.38 μm 5.71—8.26 μm 3.92—4.64 μm	0.625 cm <sup>-1</sup> 1.25 cm <sup>-1</sup> 2.5 cm <sup>-1</sup>	<0.1—0.25@260 K	14	2200

1996年8月,先进对地观测平台 ADEOS (ADvanced Earth Observing Satellite) 发射升空,搭载了该平台上的温室气体干涉测量计 IMG (Interferometric Monitor for Greenhouse gases) 是第一个采用天底观测方式进行痕量气体探测的星载高光谱傅里叶传感器。IMG 的科学任务主要是精确测定表面温度、大气温度廓线、大气组分 CH<sub>4</sub>、H<sub>2</sub>O、N<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub> 和 O<sub>3</sub> 混合比廓线(Ogawa 等,1994; Shimoda 和 Ogawa 2000)。IMG 证明了星载高分辨率传感器用于痕量气体探测的可行性(Clerbaux 等,1999; Lubrano 等 2000)。

2000年以后,国际上陆续开展了针对高精度气象预报和痕量气体探测的星载高光谱探测器。2002年5月,美国航空航天局(NASA)的 Aqua 卫星发射成功,其上的大气红外垂直遥感器 AIRS (Atmospheric Infrared Sounder) 拥有 2378 个探测通道(同时搭载了 NOAA 的先进微波探测器 AMSU Advanced Microwave Sounding Unit)。AIRS 是摆扫式探测传感器,它采用红外光栅阵分光技术,通道范围覆盖 650—2700 cm<sup>-1</sup> 红外光谱区域。AIRS 的主要目的是用于全球气候研究和天气预报,提高对流层温度廓线测量准确度(1 km 对流层温度准确度达到 1 K),以及提高大气湿度测量准确度(在晴空或部分云覆盖条件下湿度廓线分布达到 10% 的准确度)(Aumann 等,2003)。根据 Strow 和 Hannon(2008) 的研究,AIRS 的 CO<sub>2</sub> 测量通道为 12.6 μm,在轨辐

射的温度误差约为 0.1—0.2 K,CO<sub>2</sub> 精度误差约为 3—7 ppm。2004年6月发射的 Aura 卫星搭载了高分辨率的探测器 TES (Tropospheric Emission Spectrometer) 其主要任务是探测臭氧以及和臭氧产生、消亡有关的痕量气体的全球分布。TES 集成了天底和临边观测两种方式,可以同时监测对流层和平流层痕量气体。目前,它仍处于业务运行中并且发布了大气温度、水汽、O<sub>3</sub>、CO、CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 廓线以及云层有效光学厚度等产品。同时,它还有一些研究性产品例如 NH<sub>3</sub> 和 CH<sub>3</sub>OH(Beer 等,2008) 暂时没有发布。在 2006 年 10 月升空的极地轨道气象卫星 METOP-A 上,搭载了更新一代的超光谱大气探测仪 IASI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer)。传感器是带有成像系统的傅里叶变换光谱仪,其在 3.7—15.5 μm 范围内共有 8461 个通道,光谱分辨率高达 0.25 cm<sup>-1</sup>。在使用 AMSU 对温度廓线信息进行订正后,IASI 可以应用 15 μm 来反演对流层中高层 CO<sub>2</sub> 含量。2011-10-28,美国国家极轨业务环境卫星预备项目 Suomi NPP (National Polar-orbiting Partnership) 发射升空。搭载在该卫星平台上的高光谱红外探测仪 CrIS (Cross-track Infrared Sounder) 提供了 1305 个光谱通道。它是 AIRS 的延续,将为天气和气候应用提供更加精确和详细的大气温度和湿度观测资料。2012 年 9 月, Metop 系列的第二颗卫星发射成功,与 Metop-A 相同,同样搭载了 IASI 和 AMSU 传感器,与 Metop-A 联合,提供更多的气象观测资料。

与欧美先进星载观测技术相比,我国目前还缺少有效的红外星载高光谱温室气体探测仪器。风云三号系列卫星上搭载了我国自行研制的垂直探测红外分光计 IRAS ( InfraRed Atmospheric Sounder), 该传感器设置了 CO<sub>2</sub> 的观测通道, 但光谱范围及分辨率存在不足。戴铁等人(2011)探讨了 IRAS 探测大气 CO<sub>2</sub> 浓度的可行性, 最高可分辨的大气 CO<sub>2</sub> 浓度变化仅为 10 ppm。

## 2.2 近红外高光谱传感器的发展

由于地表和近地大气具有相近的温度, 在热红外波段的发射辐射极为类似, 红外探测难以探测近地层大气参数, 从而制约了星载红外高光谱传感器在近地表的 CO<sub>2</sub> 探测。因此, 2000 年以后, 以近红外波段基于太阳反射辐射为主的专用 CO<sub>2</sub> 探测载

荷得到了快速发展, 如欧洲空间局 ESA ( European Space Agency) 的 SCIAMACHY ( SCanning Imaging Absorption spectroMeter for Atmospheric Cartography)、日本的 TANSO ( Thermal and Near-infrared Sensor for Carbon Observation) 和美国的 OCO ( Orbiting Carbon Observatory) 等短波近红外通道传感器(表 2)。SCIAMACHY ( Burrows 等, 1995; Buchwitz 等, 2006; Buchwitz, 2007; Schneising 等, 2008) 搭载在 ENVISAT ( ENVironmental SATellite) 卫星上, 卫星于 2002-03-01 成功发射。SCIAMACHY 的设计目的是为了改善人们对地球大气(对流层、平流层和中间层)各种物理化学过程的理解, 以及人类活动和自然变化对地球大气的潜在影响。该仪器的光谱覆盖范围包括紫外-可见光-近红外, 近红外波段覆盖了 CH<sub>4</sub>、CO 和 CO<sub>2</sub> 的吸收波段。

表 2 近红外波段 CO<sub>2</sub> 卫星遥感传感器

Table 2 Summary of space-borne instruments for CO<sub>2</sub> measurement in shortwave infrared

性能指标 传感器	发射时间	传感器 分光类型	光谱范围 (波段数)	光谱分辨率	信噪比	空间分辨率 (星下点) /km	幅宽/km
SCIAMACHY	2002	光栅	240—2380 nm	0.22—1.48 nm(近红外)	>240(近红外)	30 × 60	960
TANSO-FTS	2009	干涉	Band1: 758—0775 nm Band2: 1560—1720 nm Band3: 1920—2080 nm Band4: 5.56—14.3 μm	Band1: 0.6 cm <sup>-1</sup> Band2—4: 0.27 cm <sup>-1</sup>	120	10.5	790
OCO-2	预计 2014	光栅	Band1: 758—772 nm Band2: 1594—1619 nm Band3: 2042—2082 nm	Band1: 18000 Band2—3: 21000	>300@ Band2 >240@ Band3	1.29 × 2.25	5.2
CarbonSat	2020 年以前	干涉	Band1: 747—773 nm Band2: 1590—1675 nm Band3: 1925—2095 nm	Band1: 1.7 cm <sup>-1</sup> Band2: 1.2 cm <sup>-1</sup> Band3: 1.4 cm <sup>-1</sup>	未知	2 × 2	240/500

TANSO 传感器搭载于日本的温室气体观测卫星 GOSAT ( Greenhouse gases Observing SATellite) ( Yokota 和 Aoki, 2004; Yokota 等, 2009; Hamazaki 等, 2007), 包含两部分: 一是具有高光谱分辨率、傅里叶变换光谱仪( TANSO-FTS); 另一个是云/气溶胶成像仪 TANSO-CAI ( Cloud and Aerosol Imager)。TANSO-FTS 设计包含了 4 个短波近红外通道和 1 个热红外通道。TANSO 的任务是在发射后至少 5 年内, 在轨观测全球 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 浓度分布信息, 为减排政策的制定提供依据, 协助科研人员进一步了解生态系统究竟能吸收和释放多少 CO<sub>2</sub>。

OCO 源于美国国家航空航天局地球科学研究所的地球系统科学探测计划 ESSP ( Earth System Sci-

ence Partnership) 最初计划将于 2009 年发射上天。OCO 卫星上搭载的有效观测载荷是综合 3 个通道的高分辨率光栅光谱仪( Crisp 等, 2004, 2008; Miller 等, 2005), 中心波长分别是 0.76 μm、1.61 μm 及 2.06 μm。短波近红外通道观测受大气中云、气溶胶等散射影响严重。OCO 设计通过卫星的密集观测来减少影响误差, 对于天底观测, 每个探测元对应地面上 3 km<sup>2</sup> 大小的区域, 这与 GOSAT 约 85 km<sup>2</sup> 观测点的大小相比具有很大的优势。2009 年 OCO 发射失败后, 现计划于 2014 年发射 OCO-2。德国计划在 2020 年之前发射 CarbonSat, 空间分辨率达到 2 km × 2 km, 并且加大空间覆盖率, 提高信噪比, 幅宽有 240 km 和 500 km 两种选择方案, 现在还没有

确定(Buchwitt 等 2013)。

中国当前也在积极开展短波红外碳卫星研制工作。中国科学院长春光学机械与物理研究所在光栅分光技术领域的研究技术基础,以及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)方面开展的先期研究工作等,为中国短波红外星载 CO<sub>2</sub> 监测工作提供了技术支持。中国全球二氧化碳监测科学实验卫星(碳卫星, TanSat) 计划于 2015 年发射,搭载了超高光谱大气 CO<sub>2</sub> 光栅光谱仪和云与气溶胶偏振成像仪。其中 CO<sub>2</sub> 光栅光谱仪具有 3 个光谱通道: CO<sub>2</sub> 弱吸收带通道(1.594—1.624 μm)、CO<sub>2</sub> 强吸收带通道(2.042—2.082 μm) 和 O<sub>2</sub>-A 吸收带通道(0.758—0.775 μm)(刘毅等 2013)。中国高分辨率对地观测系统当中也设计搭载短波红外高光谱传感器。

### 2.3 主动激光雷达传感器的发展

星载被动式传感器探测 CO<sub>2</sub> 都存在一定的局限,例如采用热红外波段进行探测时,观测数据的最佳信息层主要集中在中高层,而且反演精度受温湿度廓线影响;采用近红外波段进行 CO<sub>2</sub> 探测时,云和气溶胶的多次散射限制 CO<sub>2</sub> 反演精度的进一步提高。美国航天局和欧洲空间局都在进行新一代星载 CO<sub>2</sub> 激光吸收光谱主动遥感技术研究。NASA 计划于 2013 年—2016 年发射 ASCENDS (Active Sensing of CO<sub>2</sub> Emissions over Nights, Days and Seasons) 载荷,探测波段使用 CO<sub>2</sub> 的 1.570 μm 吸收波段,以及 O<sub>2</sub> 的 765 nm 的吸收波段同步进行观测。并且于 2008 年—2011 年进行了 5 次机载激光雷达飞行试验,在飞机平台高度上 CO<sub>2</sub> 的反演精度可以达到 0.3 ppmv。欧洲空间局计划在 2015 年发射 A-SCOPE(Advanced Space Carbon and Climate Observation of Planet Earth),采用 1.57 μm 和 2.05 μm 的 CO<sub>2</sub> 吸收波段,但没有计划进行同步干空气柱浓度的探测。

## 3 卫星遥感 CO<sub>2</sub> 算法进展

大气辐射传输模式是卫星遥感正演的物理基础。在给定大气廓线、光谱数据库、辅助数据情况下,可以全面考虑辐射传输的物理过程,准确快速计算出传感器入瞳处的辐射亮度。假设地表为朗伯体,忽略大气散射,处于局地热力平衡状态时的卫星传感器获得的辐射值可以表达为如下辐射传

输方程形式:

$$R(v_j, \mu) = \varepsilon(v_j, \mu) B(v_j, T_s) \tau(v_j, p_s, \mu) + \int_{p_s}^0 B(v_j, T(p)) \frac{\partial \tau(v_j, p, \mu)}{\partial p} dp + [1 - \varepsilon(v_j, \mu)] \int_{p_s}^0 B(v_j, T(p)) \frac{\partial \tau^*(v_j, p, \mu, \mu')}{\partial p} dp \quad (1)$$

式中  $R(v_j, \mu)$  是中心波长为  $v_j$  和观测天顶角余弦为  $\mu$  时测量的平均光谱辐亮度;  $B(v_j, T_s)$  是地表温度为  $T_s$  时的普朗克函数;  $\varepsilon(v_j, \mu)$  为地表比辐射率;  $\tau(v_j, p_s, \mu)$  为从地表到大气层顶的大气透过率;  $\partial \tau^*(v_j, p, \theta, \theta') = \partial \tau(v_j, p_s, \theta) \partial \tau(v_j, p_s, \theta - \theta') / \partial \tau(v_j, p, \theta)$  为从地面到压力  $p$  高度的大气透过率,  $\partial \tau(v_j, p, \theta)$  为气压  $p$  到大气顶的透过率;  $p_s$  为地表压力;  $\mu'$  入射天顶角余弦值。

由式(1)可以看出,传感器接收的出射辐亮度由 3 部分组成:地表发射、大气自身的上行辐射和大气下行辐射经地表反射到达传感器的辐射。在短波红外波段,卫星传感器接受的主要是经地表反射的太阳辐射。对于大气痕量气体遥感反演,需要准确的地表参数,例如地表温度、比辐射率、反射率等,以及大气温度和湿度廓线,从而求解透过率和痕量气体浓度之间的函数关系。通过对辐射传输方程离散化,得到传感器接收辐亮度和大气痕量气体浓度之间的代数方程。但是求解辐射传输方程属于解第一类 Fredholm 积分方程问题,其本质上是病态问题,没有唯一解(Rodgers, 1976, 2000),且解也是不稳定的,测量值微小的误差在反演中会被放大。目前发布的在轨 CO<sub>2</sub> 卫星产品所采用的反演算法及其精度见表 3。CO<sub>2</sub> 卫星反演算法主要分为经验算法和物理算法两类。

### 3.1 经验算法

经验算法利用大量的观测样本进行训练,避免在反演过程中输入温度廓线和地表比辐射率进行正向辐射传输的计算,具有极高的计算效率。目前的经验算法主要包括统计回归方法和神经网络算法。经验算法的核心问题是:首先如何建立一组能够代表不同季节、不同地点的大气廓线样本库;其次是正向辐射传输模式的精度问题;最后是云的影响。经验算法的不足是无法像最优化算法一样给出平均核函数和误差估算矩阵。这使得在进一步应用时,例如用于资料同化时,难以计算误差传递矩阵。经验算法的反演结果可以作为物理算法的

先验廓线。Smith 和 Woolf (1976) 将统计回归方法引入到大气参数垂直廓线的遥感反演中, 发展了基于经验正交函数(主成分分析)的统计回归方法。相对于一般的回归方法, 此方法减少了观测当中的随机误差对回归系数的影响, 该算法被用于反演大气温度廓线、臭氧廓线和甲烷廓线 (Goldberg 等, 2003; Qu 等, 2001; Zhang 等, 2012)。Sontag (1992) 从理论上证明任何反演问题都可以使用具有两个隐层的多层感知器网络解决。因为这种类型的神经网络可以考虑不连续性和强烈非线性变化, 因此神经网络算法也作为一种常见的经验算法得到广泛应用。使用多层感知器网络反演痕量

气体不需要对辐射传输方程采取线性假设, 也不需要假设随机变量呈正态分布, 是解决非线性问题强有力的工具。但是, 由于云对热红外出射辐射的复杂影响, 因此神经网络只能用于晴空条件下的反演。例如 Crevoisier 等人 (2009) 采用神经网络算法, 利用 IASI 晴空数据反演全球热带地区海洋上空 5° × 5° 的 CO<sub>2</sub> 分布, 并且将 2008 年的反演结果与曾经的 CONTRAIL (Comprehensive Observation Network for TRace gases by AirLiner) 飞行数据进行了比对, 得到相同的时间和空间分布趋势。因为没有同步的飞机观测资料, 还需要进一步验证。

表 3 在轨 CO<sub>2</sub> 卫星产品反演算法及精度Table 3 Algorithm and its accuracy for CO<sub>2</sub> reversed from space-borne instrument

传感器名称	探测对象	反演算法	反演精度/ppm
AIRS	中高对流层 CO <sub>2</sub> (廓线)	SVD 分解方法(最优化估计方法)	0.5% (3° × 3°), Maddy 等 2008
IASI	中高对流层 CO <sub>2</sub> (廓线)	神经网络算法(经验算法)	0.5% (月均值 5° × 5°), Crevoisier 等 2009
TES	中高对流层 CO <sub>2</sub> (廓线)	Levenberg-Marquardt(最优化估计方法)	2.2 ppm(月均值 15° × 15°), Kulawik 等 2010
OCO-2	CO <sub>2</sub> 整层混合比	最优化估计方法	预计 1—2 ppm, Crisp 等 2004
GOSAT	CO <sub>2</sub> 整层混合比	最优化估计方法	3—4 ppm, Yokota 等 2011
SCIAMACHY	CO <sub>2</sub> 整层混合比	WFM-DOAS	14 ppm, Buchwitz 等 2007

## 3.2 物理反演算法

### 3.2.1 最优化算法

大气廓线物理反演方法, 从理论上可以统一到最优化理论框架之下。先确定代价函数, 然后采用不同的最优化策略使得代价函数最小化。Chahine (1970) 的方法主要是比较计算辐射值与观测辐射值之间的差异。只要权重函数有明显的峰值并且能够区分各峰值所对应的压力层, 迭代过程将产生一条廓线使得辐射计算值向观测值无限逼近。但是, 病态问题的反演结果并不是唯一解, 因此很可能收敛到一条不符合经验知识的解。Rodgers (1976) 考察计算辐射值与观测辐射值之间的差别与廓线猜测之间的最小二乘关系, 用先验条件把解约束在一定范围之内, 然后用牛顿迭代方法逐步逼近最大似然估计。Lorenz (1986, 1988) 则从 Bayesian 理论出发, 经过一些假设和推导得到了和 Rodgers 同样的迭代公式, 赋予了该方法更扎实的理论基础。该最优估计方法的一般求解公式为:

$$X_{n+1} = X_n + (K_n^T S_e^{-1} K_n + \gamma S_a^{-1})^{-1} K_n^T S_e^{-1} [Y^m - F(X_n) + K_n (X_n - X_a)] \quad (2)$$

式中  $X_a$  为初始廓线;  $K$  为观测辐亮度对大气参数变化的一阶导数, 也就是雅各比矩阵;  $S_a$  为初始廓线误差的协方差矩阵;  $S_e$  为观测、模型误差的协方差矩阵;  $Y^m$  为观测辐亮度;  $F(X_n)$  为计算辐亮度。

目前 GOSAT 和 OCO 的高光谱数据反演 CO<sub>2</sub> 都采用了最优估计算法 (O'Dell 等, 2012; Yoshida 等, 2011)。短波近红外探测通道受到气溶胶和云的散射影响。云的影响可以通过云掩码来去除, 气溶胶散射效应则需要在反演过程中估算校正。当前, 利用最优化估计方法反演 CO<sub>2</sub> 时, 通常预先定义 4 种已知的气溶胶类型。在一定气溶胶光学厚度范围内, 建立 4 种气溶胶按不同比例组合的查找表。反演过程中利用具有处理气溶胶多次散射的大气辐射传输模型, 如 DISORT (Discrete Ordinates Radiative Transfer) 将气溶胶与 CO<sub>2</sub> 浓度同时反演, 实现气溶胶散射效应的估算校正。

在热红外波段, 直接采用式 (2) 反演 CO<sub>2</sub> 廓线面临的问题有两个: 首先高斯牛顿方法需要初始廓线接近真值, 也就是小残差的情况下才能保证得到全局最优的解, 其次能够确切描述背景场的协方差矩阵  $S_a$  难以获得。Eguchi 等人 (2010) 给出了一种

计算  $\text{CO}_2$  背景协方差矩阵的方法,但是目前只是在近红外  $\text{CO}_2$  反演中得到了应用。为了克服上述两个缺点,大多对迭代式(2)进行变型来减少对先验知识的依赖性以及增加反演结果的稳定性。Susskind 等人(2003, 2006)为了减少先验背景场的协方差矩阵所引入的误差,对最优估计方法进行了修正,将式(2)中的  $\gamma S_a^{-1}$  项忽略,并且将  $K_n^T S_e^{-1} K_n$  项进行奇异值分解(SVD),对于对角阵中小于一定阈值的特征值进行重新赋值,使得  $K_n^T S_e^{-1} K_n$  的逆矩阵更加稳定。详细的算法细节可以参阅文献(Susskind 等, 2003, 2006; Xiong 等, 2008)。此算法使得反演的结果最大限度地减少对于初始背景场和初始背景误差的依赖,在最佳信息层可以得到更准确的反演结果。但是,在 AIRS 对大气变化不敏感的对流层底层和平流层以上进行了严格的约束,反演结果依赖于初始背景场。Maddy 等人(2008)应用此方法反演了对流层中层的  $\text{CO}_2$  浓度,与飞机观测相比,其在时空变化方面存在很好的一致性。并且发现了平流层和对流层之间的  $\text{CO}_2$  交换,这是过去的 3 维化学传输模型没有充分观测到的现象。Kulawik 等人(2010)则是利用 Levenberg-Marquardt (LM) 方法基于 TES 数据反演  $\text{CO}_2$  廓线并且进行了验证,单点验证精度大概为 10 ppm 左右,  $15^\circ \times 15^\circ$  月均值尺度精度大致为 2.2 ppm。LM 方法的核心是将  $K_n^T S_e^{-1} K_n + \gamma S_a^{-1}$  改写成  $K_n^T S_e^{-1} K_n + S_a^{-1} + \lambda H$ , 其中  $H$  为正定矩阵,弱化对初始背景误差  $S_a$  的依赖,增加反演的稳定性。

### 3.2.2 DOAS 算法

Platt 等人(1979)提出了紫外波段基于地基观测的差分吸收光谱算法 DOAS(Differential Optical Absorption Spectroscopy)来反演痕量气体。随后,这种方法广泛应用于地基对流层和平流层痕量气体总量的反演中。虽然卫星观测的反射太阳光谱比地基观测的入射太阳光谱在大气传输过程中要复杂得多,但差分光学吸收光谱方法仍可成功用于星载仪器(GOME 和 SCIAMACHY)观测数据的分析计算。DOAS 算法的核心在于将大气消光作用分为随波长快速变化的部分和随波长缓慢变化的部分,然后再对随波长快速变化的部分利用 Beer-Lambert 定律,计算气体的浓度(Platt 等, 1979)。

在近红外波段,由于气体的吸收截面随温度、压强变化较大,因此传统的 DOAS 方法并不适用。不莱梅大学的 Buchwitz 等人(2000)针对 SCIAMACHY

传感器提出了近红外波段最优化 DOAS 方法,实现快速反演  $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{N}_2\text{O}$  等温室气体,后来发展成为 WFM-DOAS(Weighting Function Modified Differential Optical Absorption Spectroscopy)方法(Buchwitz, 2007)。这种算法是基于前向模型的快速查找表,通过反演大气中  $\text{O}_2$  和  $\text{CO}_2$  的分子数浓度来计算  $\text{CO}_2$  干空气垂直混合比  $X_{\text{CO}_2}$ 。其他研究小组开发了不同的针对  $\text{CO}_2$  垂直柱浓度和  $X_{\text{CO}_2}$  反演方法,例如 Barkley 等人(2006)提出的 FSI/WFM-DOAS(Full Spectral Initiation WFM-DOAS)算法。FSI/WFM-DOAS 算法考虑了 3 种气溶胶模式的组合,计算过程更为复杂。它利用 SCIAMACHY 传感器观测数据来反演  $\text{CO}_2$  柱浓度,同时使用地表压强的气象分析来决定空气柱浓度。基于差分光谱吸收技术的 WFM-DOAS 算法主要是针对 SCIAMACHY 传感器观测数据来反演  $\text{CO}_2/\text{CH}_4$  等温室气体的垂直柱浓度。SCIAMACHY 传感器的第 6、7 通道包含了  $\text{CO}_2$  的两个吸收波段,其中第 7 通道由于受到仪器漏光、传感器表面结冰以及坏象元等原因,导致该通道观测数据存在严重噪声,因此 WFM-DOAS 方法被用于第 6 通道观测数据的反演。由于第 6 通道的光谱分辨率只有 1.48 nm,使得该通道的观测信息相对较少;利用 WFM-DOAS 迭代反演  $\text{CO}_2$  过程中只考虑  $\text{CO}_2$  气体廓线的倍数变化,再加上受大气温度和湿度、气溶胶和卷云散射以及地表压强反演精度的影响,最终导致反演得到的  $\text{CO}_2$  浓度精度明显降低。Buchwitz 和 Burrows(2004)、Houweling 等人(2005)的研究结果表明:利用 WFM-DOAS 方法在处理 SCIAMACHY 数据时,由于无法有效校正散射效应而导致  $\text{CO}_2$  反演精度降低,产生较大误差。究其原因,一方面主要是由于第 6 通道  $\text{CO}_2$  对观测值权重函数与该通道内气溶胶的权重相关性大,另外是在建立查找表时对诸如地表反射率、气溶胶廓线等因子的依赖,使得反演结果的不确定性增大。

利用星载激光雷达信号反演  $\text{CO}_2$  浓度,采用的同样是差分吸收的思想。全路径差分吸收脉冲激光雷达 IPDA(Integrated Path Differential Absorption Lidar)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(刘毅等, 2011)。对比两束激光的反射信号,通过计算雷达方程比值来反演  $\text{CO}_2$  的密度。在求解过程中,吸收截面随温度、压强的展宽是影响反演精度的重要因素(马昕等, 2012)。

### 3.3 反演当中的关键问题

#### 3.3.1 热红外波段温度廓线的影响

对于 CO<sub>2</sub> 来说,反演当中的关键问题在于温度和 CO<sub>2</sub> 浓度之间密不可分的联系:温度不仅可以影响 CO<sub>2</sub> 的线强和线型继而造成透过率计算不准确,更重要的是,在热红外波段卫星的测量值就是亮度温度,所以温度的误差会在 CO<sub>2</sub> 浓度反演当中得到进一步扩大。

为了降低反演当中对温度廓线的敏感性,首先要选择合适的反演通道。Crevoisier 等人(2003)提出了最优敏感廓线方法(Optical Sensitivity Profile, OSP)方法针对 AIRS 传感器选择了适合 CO<sub>2</sub> 反演的通道,逐层选择出对 CO<sub>2</sub> 敏感而且对其他大气参数、地表参数不敏感的通道。OSP 方法选择通道时对于权重函数峰值的分布考虑较少,因此选择的通道数目非常多(74个)。AIRSV5 版本选择的反演通道集中在 15 μm 的吸收波段,总共包含 13 个通道。

其次,不同学者也提出了不同的求解策略来减少温度廓线对 CO<sub>2</sub> 反演的影响。例如 Chahine 等人(2004)直接比较观测辐亮度和模拟辐亮度之间的差异,以及这个差异对温度、水汽、臭氧、CO<sub>2</sub> 的一阶偏微分,通过迭代方式使 CO<sub>2</sub> 的一阶偏微分趋近于零来求解 CO<sub>2</sub> 的浓度。在不需要先验廓线和背景信息情况下,通过 AIRS 在 15 μm 附近的系列通道可以反演得到 90 km × 90 km 对流层最佳信息层(在 450 hPa)的 CO<sub>2</sub> 信息。Chahine 等人(2008)对这个算法进行验证,发现与飞机飞行数据和地基 FTS(Fourier Transform Spectrometer)的观测 CO<sub>2</sub> 浓度在时间和空间分布上具有很好的一致性。Strow 和 Hannon(2008)则是利用 AIRS 单一通道来反演晴空条件下 60°N—60°S 海洋上空的 CO<sub>2</sub>。通过调整 CO<sub>2</sub> 廓线来使得模拟辐亮度与观测辐亮度趋近一致,从而获得 CO<sub>2</sub> 的浓度。该方法的优势是通过欧洲中尺度气象预报模式 ECMWF(The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)来判别辐亮度的差值是由温度廓线误差还是由 CO<sub>2</sub> 浓度变化引起的,从而解决了热红外 CO<sub>2</sub> 反演中温度和 CO<sub>2</sub> 分离的难题。Engelen 和 Stephens(2004)将 AIRS 对 CO<sub>2</sub> 敏感通道的观测值同化到欧洲中尺度气象预报中心 ECMWF 4 维变分系统中,但在同化系统中缺少对 CO<sub>2</sub> 传输的约束和垂直方向上的调整,因此最终给出的是热带地区 650 hpa 到对流层顶的 CO<sub>2</sub> 浓度,月均值的估计误差在 3 ppm 左右。

中高纬度地区的 CO<sub>2</sub> 浓度误差较大。

#### 3.3.2 近红外波段云和气溶胶影响的消除

与热红外传感器接收气体的热辐射信息不同,短波红外传感器接收的是经地表反射的太阳辐射,这其中包含了 CO<sub>2</sub> 的吸收信号。热红外观测数据反演过程中,温湿廓线对 CO<sub>2</sub> 浓度的观测反演影响很大,可以忽略大气中散射因子的影响;但在短波近红外通道,由于观测波长较短,气溶胶、云的散射效应对 CO<sub>2</sub> 的观测反演精度影响严重。散射效应的去除是短波近红外通道 CO<sub>2</sub> 反演过程中的关键问题。

短波近红外探测通道受到气溶胶和云的散射影响。云的影响可以通过云掩码来去除,气溶胶散射效应则需要在反演过程中估算校正。当前,利用最优化估计方法反演 CO<sub>2</sub> 时,通常预先定义 4 种已知的气溶胶类型。在一定气溶胶光学厚度范围内,建立 4 种气溶胶按不同比例组合的查找表。反演过程中利用具有处理气溶胶多次散射的大气辐射传输模型,如 DISORT(Discrete Ordinates Radiative Transfer)将气溶胶与 CO<sub>2</sub> 浓度同时反演,实现气溶胶散射效应的估算校正。

此外,在非线性迭代方法基础上发展出了一种具有散射效应估算校正的改进算法—光子路径概率分布函数算法在消除云和气溶胶的影响方面表现出优势。光子路径分布概率函数 PPDF(Photon Path-length probability Density Function)是一种基于等效理论的方法(Bennartz 和 Preusker 2006; Brill 等, 2007 2008; Oshchepkov 等 2008 2009)。它将散射效应对大气有效透过率的影响参数化,用参数化因子(称为 PPDF 因子)来估算散射效应,修正大气透过率模型。根据处理散射因子种类的不同,可将 PPDF 方法分为两种模式。一种是只考虑卷云或气溶胶一种散射因子的二层大气模型。用一套 PPDF 因子( $\alpha_a, h_a, \rho_a, \gamma_a$ )来参数化散射效应。另一种是同时考虑气溶胶和卷云散射效应时的三层大气模型。它需要两套 PPDF 因子来参数化散射效应对整层大气透过率的影响,即用( $\alpha_c, h_c, \rho_c, \gamma_c$ )和( $\alpha_a, h_a, \rho_a, \gamma_a$ )分别参数化卷云和气溶胶的散射影响。

以二层模型为例,只考虑气溶胶散射时,大气被分为接近地表且含有气溶胶的低层 L1, L1 上方不含气溶胶的大气层定义为 L2, A 个因子中,  $\alpha_a$  表示经 L1 层反射进入传感器的光子数(未经地面反射)占入射太阳辐射的比例;  $\rho_a$  表示光子在含有气

溶胶 L1 层大气中传输的路径修正因子,即修正散射而引起的光子传输路径; $h_a$  表示 L1 层顶的高度; $\gamma$  则是 L1 层大气内 PPDF 线型的校正因子。PPDF 方法避开了处理光子散射的复杂物理过程,利用 Monte Carlo 随机方法模拟散射引起的光子路径分布,等效的用参数化形式表示散射效应,方法简单易实现。当前 GOSAT 已经发布了基于 PPDF 方法的 L2 级产品。

#### 4 CO<sub>2</sub> 反演算法验证

全球碳柱总量观测网 TCCON (Total Carbon Column Observing Network) 是利用地基 FTS 观测大气 CO<sub>2</sub> 等痕量气体平均柱浓度的一个全球观测站网。第一个 TCCON 站点位于美国的 Park Falls,至今在全球范围内已经有多个站点。目前,中国的一些大气本底站以及新近在北京、合肥、深圳等地部署的地基 FTS 观测点,都有相应的观测产品,但这些站点暂时没有加入 TCCON 全球网络。TCCON 观测网在亚洲只有日本茨城县筑波市 Tsukuba 站和九州岛佐贺县佐贺市 Saga 站两个点进行常规观测。地基 FTS 跟踪观测提供高光谱分辨率太阳光谱,使用非线性最小二乘光谱拟合方法来反演温室气体柱总量,CO<sub>2</sub> 垂直柱混合比浓度的反演精度可达 0.5%。此外,利用观测数据还可监测大气中 CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、HF、CO、H<sub>2</sub>O 和 HDO 垂直柱浓度。TCCON 全球观测网络可以提供温室气体浓度长时间观测序列,为验证卫星传感器反演结果提供比对标准。

CO<sub>2</sub> 廓线反演算法验证最有效的数据是飞机飞行途中获得的中高对流层 CO<sub>2</sub> 浓度。CONTRAIL (Comprehensive Observation Network for Trace gases by Airliner) 是一个从 1993 年起由日本商业航线完成的飞行试验项目。在这个项目的第一阶段,主要是采集从日本到澳大利亚对流层高层的 CO<sub>2</sub> 信息,现在每个航班携带了自动采集气体和自动分析仪器,航线也扩展到了自日本到欧洲、南亚、东南亚、夏威夷和北美等。HIPPO (HIAPER Pole-to-Pole Observations) 则是一个纵贯太平洋的飞行试验,为气候研究、大气化学成分和气溶胶组成提供了宝贵资料,是第一个高垂直分辨率的全球大气痕量气体和气溶胶组分的综合观测实验。该实验从 2009 年至 2011 年进行了 5 次,提供了成百条从海洋/冰盖表面至对流层顶的垂直廓线。

为了更系统地开展温室气体等大气成分的长

期观测,逐步形成覆盖全球各纬度带的观测网,世界气象组织 WMO (World Meteorological Organization) 于 1989 年开始组建全球大气观测网 GAW (Global Atmosphere Watch)。到 2005 年,全球 CO<sub>2</sub> 浓度的观测站点已经达到 139 个。目前中国大陆主要对 CO<sub>2</sub> 的监测站点包括瓦里关本底站、临安站、上甸子站、龙凤站 4 个站点。位于中国瓦里关山的全球大气本底基本站 CGAWBO (China Global Atmosphere Watch Baseline Observatory),于 1994 年正式投入运行。GAW 采用的监测方法是按照 WMO 统一要求用 flask 瓶串联采样和实验室集中分析,获得的是近地面 CO<sub>2</sub> 浓度数据,而热红外对近地面的 CO<sub>2</sub> 浓度并不敏感。通过对近地面和对流层中高层的 CO<sub>2</sub> 时空分布比对和分析,可以获得 CO<sub>2</sub> 的垂直和水平传输特点。

#### 5 结论

自工业革命以来,人类活动使得大气中 CO<sub>2</sub> 浓度的迅速增长,导致了全球气候变暖。研究表明大气中 CO<sub>2</sub> 的浓度及其空间分布是碳源/汇研究以及全球气候变化评估中的主要不确定因素之一。本文讨论分析了已有的星载 CO<sub>2</sub> 监测技术,分别介绍了热红外探测器 AIRS、IASI、TES、CrIS 短波近红外探测器 SCIAMACHY、GOSAT 以及 OCO 和主动激光雷达传感器;并总结介绍了相应的卫星(机载平台)观测数据反演方法。

热红外高光谱传感器接收 CO<sub>2</sub> 的热辐射信息,能够反演 CO<sub>2</sub> 的廓线信息,但通道特征决定了热红外观测对近地面 CO<sub>2</sub> 浓度变化不敏感,只能提供中高层 CO<sub>2</sub> 浓度信息。CO<sub>2</sub> 的源和汇主要发生在底层大气,因此对底层大气 CO<sub>2</sub> 具有更高敏感性的短波近红外 CO<sub>2</sub> 探测技术成为当前研究的热点。然而,短波近红外通道卫星观测受大气中云和气溶胶的散射影响严重,散射能严重影响 CO<sub>2</sub> 的卫星观测反演精度,而当前针对大气散射效应,尤其是对气溶胶的散射效应还没有很好的估算校正方法,这成为了短波近红外 CO<sub>2</sub> 卫星遥感研究中的一个重要问题,特别是对气溶胶光学厚度较高的中国来说,散射校正的问题就更为突出。

为了配合短波近红外 CO<sub>2</sub> 卫星遥感观测反演,相关的传感器设计过程都增加了氧气 A 带通道以及 2.0  $\mu\text{m}$  的 CO<sub>2</sub> 和水汽强吸收通道,用以辅助 1.6  $\mu\text{m}$  通道的 CO<sub>2</sub> 反演。如何充分利用已知气体

浓度及通道特征的辅助数据,来校正 CO<sub>2</sub> 观测反演中所受到的影响,这是当前研究的一个热点方向。此外,热红外通道能获取中高层 CO<sub>2</sub> 的廓线信息,而短波近红外通道对底层 CO<sub>2</sub> 浓度敏感,如何综合利用热红外通道与短波近红外通道观测数据,来联合反演 CO<sub>2</sub> 的整层浓度,将是实现 CO<sub>2</sub> 高精度观测反演的一种有效技术手段。

星载主动式激光雷达可以实现全天候高精度的 CO<sub>2</sub> 柱浓度探测,但是对激光发射源的稳定性、光谱的纯度要求较高,目前还在机载试飞验证阶段。

## 参考文献(References)

- Andrews A E, Boering K A, Wofsy S C, Daube B C, Jones D B, Alex S, Loewenstein M, Podolske J R and Strahan S E. 2001. Empirical age spectra for the midlatitude lower stratosphere from in situ observations of CO<sub>2</sub>: quantitative evidence for a subtropical “barrier” to horizontal transport. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106 (D10): 10257 – 10274 [DOI: 10.1029/2000JD900703]
- Aumann H H, Chahine M T, Gautier C, Goldberg M D, Kalnay E, McMillin L M, Revercomb H, Rosenkranz P W, Smith W L, Staelin D H, Strow L L and Susskind J. 2003. AIRS/AMSU/HSB on the Aqua Mission: design, science objectives, data products, and processing systems. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(2): 253 – 264 [DOI: 10.1109/TGRS.2002.808356]
- Barkley M P, Frieß U and Monks P S. 2006. Measuring atmospheric CO<sub>2</sub> from space using Full Spectral Initiation (FSI) WFM-DOAS. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 6(2): 2765 – 2807 [DOI: 10.5194/acpd-6-2765-2006]
- Beer R, Shephard M W, Kulawik S S, Clough S A, Eldering A, Bowman K W, Sander S P, Fisher B M, Payne V H, Luo M Z, Osterman G B and Worden J R. 2008. First satellite observations of lower tropospheric ammonia and methanol. *Geophysical Research Letters*, 35(9): L09801 [DOI: 10.1029/2008GL033642]
- Bennartz R and Preusker R. 2006. Representation of the photon path-length distribution in a cloudy atmosphere using finite elements. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 98(2): 202 – 219 [DOI: 10.1016/j.jqsrt.2005.05.085]
- Bovensmann H, Buchwitz M, Burrows J P, Reuter M, Krings T, Gerilowski K, Schneising O, Heymann J, Tretner A and Erzinger J. 2010. A remote sensing technique for global monitoring of power plant CO<sub>2</sub> emissions from space and related applications. *Atmospheric Measurement Techniques*, 3(4): 781 – 811 [DOI: 10.5194/amt-3-781-2010]
- Bril A, Oshchepkov S, Yokota T and Inoue G. 2007. Parameterization of aerosol and cirrus cloud effects on reflected sunlight spectra measured from space: application of the equivalence theorem. *Applied Optics*, 46(13): 2460 – 2470 [DOI: 10.1364/AO.46.002460]
- Bril A, Oshchepkov S and Yokota T. 2008. Correction of atmospheric scattering effects in space-based observations of carbon dioxide: Model study of desert dust aerosol. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 109(10): 1815 – 1827 [DOI: 10.1016/j.jqsrt.2008.02.012]
- Buchwitz M and Burrows J P. 2004. Retrieval of CH<sub>4</sub>, CO, and CO<sub>2</sub> total column amounts from SCIAMACHY near-infrared nadir spectra: retrieval algorithm and first results. *Proceedings of the SPIE*, 5235: 375 – 388
- Buchwitz M, Rozanov V V and Burrows J P. 2000. 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. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 105(D12): 15231 – 15245 [DOI: 10.1029/2000JD900191]
- Buchwitz M, de Beek R, Noël S, Burrows J P, Bovensmann H, Schneising O, Khlystova I, Bruns M, Bremer H, Bergamaschi P, Körner S and Heimann M. 2006. Atmospheric carbon gases retrieved from SCIAMACHY by WFM-DOAS: version 0.5 CO and CH<sub>4</sub> and impact of calibration improvements on CO<sub>2</sub> retrieval. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6: 2727 – 2751 [DOI: 10.5194/acp-6-2727-2006]
- Buchwitz M. 2007. SCIAMACHY WFM-DOAS methane, carbon monoxide, and carbon dioxide columns: algorithm description and product specification. IUP-SCIA-WFMD-ADPS-0003, Version 2. Bremen, Germany
- Buchwitz M, Reuter M, Bovensmann H, Pillai D, Heymann J, Schneising O, Rozanov V, Krings T, Burrows J P, Boesch H, Gerbig C, Meijer Y and Löscher A. 2013. Carbon Monitoring Satellite (CarbonSat): assessment of atmospheric CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> retrieval errors by error parameterization. *Atmospheric Measurement Techniques*, 6(12): 3477 – 3500 [DOI: 10.5194/amt-6-3477-2013]
- Burrows J P, Hölzle E, Goede A P H, Visser H and W. 1995. SCIAMACHY-scanning imaging absorption spectrometer for atmospheric cartography. *Acta Astronautica*, 35(7): 445 – 451 [DOI: 10.1016/0094-5765(94)00278-T]
- Chahine M T, Chen L K, Dimotakis P, Jiang X, Li Q B, Olsen E T, Pagano T, Randerson J and Yung Y L. 2008. Satellite remote sounding of mid-tropospheric CO<sub>2</sub>. *Geophysical Research Letters*, 35(17): L17807 [DOI: 10.1029/2008GL035022]
- Chahine M T. 1970. Inverse problems in radiative transfer: determination of atmospheric parameters. *Journal of Atmospheric Sciences*, 27(6): 960 – 967 [DOI: 10.1175/1520-0469(1970)027<0960:IPRTD>2.0.CO;2]
- Chahine M T, Barnett C, Olsen E T, Chen L and Maddy E. 2005. On the determination of atmospheric minor gases by the method of vanishing partial derivatives with application to CO<sub>2</sub>. *Geophysical Research Letters*, 32(22): L22803 [DOI: 10.1029/2005GL024165]
- Clerbaux C, Hadji-Lazaro J, Payan S, Camy-Peyret C, Megie G. 1999. Retrieval of CO Columns from IMG/ADEOS Spectra. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(3): 1657 – 1661
- Crevoisier C, Chedin A and Scott N A. 2013. AIRS channel selection for CO<sub>2</sub> and other trace-gas retrievals. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 129: 2719 – 2740
- Crevoisier C, Chédin A, Matsueda H, Machida T, Armante R and Scott N A. 2009. First year of upper tropospheric integrated content of

- CO<sub>2</sub> from IASI hyperspectral infrared observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(14): 4797–4810 [DOI: 10.5194/acp-9-4797-2009]
- Crisp D, Atlas R M, Breon F M, Brown L R, Burrows J P, Ciaia P, Connor B J, Doney S C, Fung I Y, Jacob D J, Miller C E, O'Brien D, Pawson S, Randerson J T, Rayner P, Salawitch R J, Sander S P, Sen B, Stephens G L, Tans P P, Toon G C, Wennberg P O, Wofsy S C, Yung Y L, Kuang Z, Chudasama B, Sprague G, Weiss B, Pollock R, Kenyon D and Schroll S. 2004. The Orbiting Carbon Observatory (OCO) mission. *Advances in Space Research*, 34(4): 700–709 [DOI: 10.1016/j.asr.2003.08.062]
- Crisp D, Miller C E and DeCola P L. 2008. NASA Orbiting Carbon Observatory: measuring the column averaged carbon dioxide mole fraction from space. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2(1): 023508 [DOI: 10.1117/1.2898457]
- Dai T, Shi G Y, Qi C L, Xu N, Zhang X Y and Yang S. 2011. Channel sensitivity analyses for space-based measurement of atmospheric CO<sub>2</sub> concentration by FY-3 satellite/infrared atmospheric sounder. *Climatic and Environmental Research*, 16(5): 577–585 (戴铁, 石广玉, 漆成莉, 徐娜, 张兴赢, 杨溯. 2011. 风云三号气象卫星红外分光计探测大气 CO<sub>2</sub> 浓度的通道敏感性分析. *气候与环境研究*, 16(5): 577–585) [DOI: 10.3878/j.issn.1006-9585.2011.05.04]
- Eguchi N, Saito R, Saeki T, Nakatsuka Y, Belikov D and Maksyutov S. 2010. A priori covariance estimation for CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> retrievals. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 115(D10): D10215 [DOI: 10.1029/2009JD013269]
- Engelen R J and Stephens G L. 2004. Information content of infrared satellite sounding measurements with respect to CO<sub>2</sub>. *Journal of Applied Meteorology*, 43(2): 373–378 [DOI: 10.1175/1520-0450(2004)043<0373:ICOISS>2.0.CO;2]
- Goldberg M D, Qu Y, McMillin L M, Wolf W, Zhou L H and Divakarla M. 2003. AIRS near-real-time products and algorithms in support of operational numerical weather prediction. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(2): 379–389 [DOI: 10.1109/TGRS.2002.808307]
- Hamazaki T, Kaneko Y, Kuze A and Suto H. 2007. Greenhouse Gases Observation from Space with TANSO-FTS on GOSAT//Fourier Transform Spectroscopy/Hyperspectral Imaging and Sounding of the Environment, OSA Technical Digest Series, Optical Society of America, paper FWB1 [DOI: 10.1364/FTS.2007.FWB1]
- Houweling S, Hartmann W, Aben I, Schrijver H, Skidmore J, Roelofs G-J and Breon F-M. 2005. Evidence of systematic errors in SCIAMACHY-observed CO<sub>2</sub> due to aerosols. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 5(3): 3313–3340 [DOI: 10.5194/acpd-5-3313-2005]
- IPCC. 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge, New York, NY, USA: Cambridge University Press
- Kulawik S S, Jones D B A, Nassar R, Irion F W, Worden J R, Bowman K W, Machida T, Matsueda H, Sawa Y, Biraud S C, Fischer M L and Jacobson A R. 2010. Characterization of Tropospheric Emission Spectrometer (TES) CO<sub>2</sub> for carbon cycle science. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10: 5601–5623 [DOI: 10.5194/acp-10-5601-2010]
- Liu Y, Lü D R, Chen H B, Yang D X and Min M. 2011. Advances in technologies and methods for satellite remote sensing of atmospheric CO<sub>2</sub>. *Remote Sensing Technology and Application*, 26(2): 247–254 (刘毅, 吕达仁, 陈洪滨, 杨东旭, 闵敏. 2011. 卫星遥感大气 CO<sub>2</sub> 的技术与方法进展综述. *遥感技术与应用*, 26(2): 247–254)
- Liu Y, Yang D X and Cai Z N. 2013. A retrieval algorithm for Tan Sat XCO<sub>2</sub> observation: Retrieval experiments using GOSAT data. *Chinese Science Bulletin*, 58(13): 1520–1523 (刘毅, 杨东旭, 蔡兆男. 2013. 中国碳卫星大气 CO<sub>2</sub> 反演方法: GOSAT 数据初步应用. *科学通报*, 58(11): 996–999)
- Lorenz A C. 1986. Analysis methods for numerical weather prediction. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 112(474): 1177–1194 [DOI: 10.1002/qj.49711247414]
- Lorenz A C. 1988. Optimal nonlinear objective analysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 114(479): 205–240 [DOI: 10.1002/qj.49711447911]
- Lubrano A M, Serio C, Clough S A. Simultaneous inversion for temperature and water vapor from IMG radiances. 2000. *Geophysical Research Letters*, 27(16): 2533–2536
- Ma X, Lin H, Ma Y Y and Gong W. 2012. Atmospheric pressure broadening correction algorithm of differential absorption atmospheric CO<sub>2</sub> lidar. *Acta Optica Sinica*, 32(11): 1101003 (马昕, 林宏, 马盈盈, 龚威. 2012. 差分吸收大气 CO<sub>2</sub> 激光雷达的大气压力增宽修正算法. *光学学报*, 32(11): 1101003) [DOI: 10.3788/aos201232.1101003]
- Maddy E S, Barnett C D, Goldberg M, Sweeney C and Liu X. 2008. CO<sub>2</sub> retrievals from the Atmospheric Infrared Sounder: methodology and validation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 113(D11): D11301 [DOI: 10.1029/2007JD009402]
- Miller C E, Brown L R, Toth R A, Benner D C and Devi V M. 2005. Spectroscopic challenges for high accuracy retrievals of atmospheric CO<sub>2</sub> and the Orbiting Carbon Observatory (OCO) experiment. *Comptes Rendus Physique*, 6(8): 876–887 [DOI: 10.1016/j.crhy.2005.09.005]
- O'Dell C W, Connor B, Bösch H, O'Brien D, Frankenberg C, Castano R, Christi M, Eldering D, Fisher B, Gunson M, McDuffie J, Miller C E, Natraj V, Oyafuso F, Polonsky I, Smyth M, Taylor T, Toon G C, Wennberg P O and Wunch D. 2012. The ACOS CO<sub>2</sub> retrieval algorithm—Part I: Description and validation against synthetic observations. *Atmospheric Measurement Techniques*, 5: 99–121 [DOI: 10.5194/amt-5-99-2012]
- Ogawa T, Shimoda H, Hayashi M, Imasu R, Ono A, Nishinomiya S and Kobayashi H. 1994. IMG, interferometer measurement of greenhouse gases from space. *Advances in Space Research*, 14(1): 25–28 [DOI: 10.1016/0273-1177(94)90343-3]
- Olsen S C and Randerson J T. 2004. Differences between surface and column atmospheric CO<sub>2</sub> and implications for carbon cycle research. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 109: D02301 [DOI: 10.1029/2003JD003968]
- Oshchepkov S, Bril A and Yokota T. 2009. An improved photon path length probability density function-based radiative transfer model for space-based observation of greenhouse gases. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 114: D19207 [DOI: 10.

- 1029/2009JD012116]
- Oshchepkov S , Bril A and Yokota T. 2008. PPDF-based method to account for atmospheric light scattering in observations of carbon dioxide from space. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* ( 1984—2012 ) , 113: D23210 [DOI: 10.1029/2008JD010061]
- Platt U , Perner D and Pätz H W. 1979. Simultaneous measurement of atmospheric CH<sub>2</sub>O , O<sub>3</sub> , and NO<sub>2</sub> by differential optical absorption. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* ( 1984—2012 ) , 84 ( C10 ) : 6329 – 6335 [DOI: 10.1029/JC084iC10p06329]
- Qu Y , Goldberg D M and Divakarla M. 2001. Ozone profile retrieval from satellite observation using high spectral resolution infrared sounding instrument. *Advances in Atmospheric Sciences* , 18 ( 5 ) : 959 – 972
- Rodgers C D. 1976. Retrieval of atmospheric temperature and composition from remote measurements of thermal radiation. *Reviews of Geophysics* , 14 ( 4 ) : 609 – 624 [DOI: 10.1029/RG014i004p00609]
- Rodgers C D. 2000. *Inverse Methods for Atmospheric Sounding: Theory and Practice*. Singapore: World Scientific Publishing
- Schneising O , Buchwitz M , Burrows J P , Bovensmann H , Reuter M , Notholt J , Macatangay R and Warneke T. 2008. Three years of greenhouse gas column-averaged dry air mole fractions retrieved from satellite—Part 1: Carbon dioxide. *Atmospheric Chemistry and Physics* , 8: 3827 – 3853 [DOI: 10.5194/acp-8-3827-2008]
- Shimoda H and Ogawa T. 2000. INTERFEROMETRIC MONITOR FOR GREENHOUSE GASES ( IMG ) . *Advances in Space Research* , 25 ( 5 ) : 937 – 946 [DOI: 10.1016/S0273-1177(99)00926-6]
- Smith W L and Woolf H M. 1976. The use of eigenvectors of statistical covariance matrices for interpreting satellite sounding radiometer observations. *Journal of the Atmospheric Sciences* , 33 ( 7 ) : 1127 – 1140 [DOI: 10.1175/1520-0469(1976)033<1127:TUOEOS>2.0.CO;2]
- Sontag E D. 1992. Feedback stabilization using two-hidden-layer nets. *IEEE Transactions on Neural Networks* , 3 ( 6 ) : 981 – 990 [DOI: 10.1109/72.165599]
- Strow L L and Hannon S E. 2008. A 4-year zonal climatology of lower tropospheric CO<sub>2</sub> derived from ocean-only Atmospheric Infrared Sounder observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* , 113 ( D18 ) : D18302 [DOI: 10.1029/2007JD009713]
- Susskind J , Barnet C D and Blaisdell J M. 2003. Retrieval of atmospheric and surface parameters from AIRS/AMSU/HSB data in the presence of clouds. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* , 41 ( 2 ) : 390 – 409 [DOI: 10.1109/TGRS.2002.808236]
- Susskind J , Barnet C , Blaisdell J , Iredell L , Keita F , Kouvaris L , Molnar G and Chahine M. 2006. Accuracy of geophysical parameters derived from Atmospheric Infrared Sounder/Advanced Microwave Sounding Unit as a function of fractional cloud cover. *Journal of Geophysical Research* , 111: D09S17 [DOI: 10.1029/2005JD006272]
- Xiong X Z , Barnet C , Maddy E , Sweeney C , Liu X P , Zhou L and Goldberg M. 2008. Characterization and validation of methane products from the Atmospheric Infrared Sounder ( AIRS ) . *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* ( 2005—2012 ) , 113: G00A01 [DOI: 10.1029/2007JG000500]
- Yokota T , Yoshida Y , Eguchi N , Ota Y , Tanaka T , Watanabe H and Maksyutov S. 2009. Global Concentrations of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> retrieved from GOSAT: first preliminary results. *SOLA* , 5: 160 – 163 [DOI: 10.2151/sola.2009-041]
- Yokota T and Aoki T. 2004. Test measurements by a BBM of the nadir-looking SWIR FTS aboard GOSAT to monitor CO<sub>2</sub> column density from space. *Proceedings of the SPIE* , 5652: 182 [DOI: 10.1117/12.578497]
- Yoshida Y , Ota Y , Eguchi N , Kikuchi N , Nobuta K , Tran H , Morino I and Yokota T. 2011. 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. *Atmospheric Measurement Techniques* , 4: 717 – 734 [DOI: 10.5194/amt-4-717-2011]
- Zhang Y , Chen L Y , Yao J H , Su L , Yu C and Fan M. 2012. Retrieval of methane profiles from spaceborne hyperspectral infrared observations. *Journal of Remote Sensing* , 16 ( 2 ) : 232 – 247

## Overview of atmospheric CO<sub>2</sub> remote sensing from space

CHEN Liangfu<sup>1</sup> , ZHANG Ying<sup>1</sup> , ZOU Mingmin<sup>1</sup> , XU Qian<sup>2</sup> , LI Lingjun<sup>2</sup> ,  
LI Xiaoying<sup>1</sup> , TAO Jinhua<sup>1</sup>

1. *The State Key Laboratory of Remote Sensing Science , Institute of Remote Sensing and Digital Earth , Chinese Academy of Science , Beijing 100101 , China;*
2. *Beijing Municipal Environmental Protection Monitoring Center , Beijing 100048 , China*

**Abstract:** Atmospheric carbon dioxide ( CO<sub>2</sub> ) is a primary greenhouse gas , whose concentration and geographic distribution are the key points in global change research. Since 1998 , space-based observation has been an important technique for the remote sensing of CO<sub>2</sub> concentration. We present an overview of the advances in space-based remote sensing of CO<sub>2</sub> , including the development of remote sensors and inverse algorithms , as well as the calibration of retrieved results. We analyze the uncertainties in inverse methods from observations of both thermal infrared and shortwave infrared techniques. The potential development of CO<sub>2</sub> retrieval is discussed at the end of this paper.

**Key words:** CO<sub>2</sub> , satellite remote sensing , thermal infrared hyperspectral , shortwave infrared hyperspectral , optimal estimation method