

文章编号: 1001-8166(2010)01-0007-07

卫星遥感探测大气 CO₂ 浓度研究最新进展^{*}

石广玉¹, 戴 铁^{1,2*}, 徐 娜^{1,2}

(1. 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要: 大气 CO₂ 是一种重要的长寿命温室气体, 用 卫星遥感探测大气 CO₂ 浓度由于可以连续地获得其全球时空分布变化状况, 进而提高对大气 CO₂ 源汇分布及区域和全球碳循环的认识, 因此已经开始成为一个新的遥感研究领域。综合论述了利用 卫星平台遥感探测大气 CO₂ 浓度分布的研究现状: ①简单叙述了现阶段对大气 CO₂ 浓度时空分布和变化情况的直接仪器观测结果; ②在此基础上比较全面地综述了 卫星遥感测量大气 CO₂ 浓度的主要方法及获得的结果, 包括利用近红外反射太阳光谱或地气热红外发射辐射光谱及两者的组合进行的模拟和 卫星实测反演研究; ③最后简单地进行了总结并对未来研究提出了展望。

关 键 词: 卫星; 遥感; 二氧化碳浓度

中图分类号: P407 **文献标志码:** A

1 引 言

政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 第四次科学评估报告指出^[1], 自工业革命以来, 大气组成和地表性质发生的变化已经改变了地气系统的能量收支平衡, 引起了全球气候变化。大气温室气体含量增加可能引起的全球变暖已成为目前最重要、影响最深远的全球环境问题之一。大气 CO₂ 是一种长寿命温室气体, 其浓度增加首先将引起大气对射出红外辐射吸收的增加, 进而产生气候变化的辐射强迫。根据 IPCC 的报告, 1750 年以来大气 CO₂ 浓度增加产生的辐射强迫为 $(1.66 \pm 0.17) \text{ W/m}^2$, 约占所有长寿命温室气体产生辐射强迫的 63%。大气 CO₂ 作为产生温室效应最主要的温室气体, 所带来的全球变暖问题, 正日益受到人们的关注。

确定大气 CO₂ 浓度的自然变化以及人为活动

引起的变化, 对研究大气 CO₂ 气候效应是非常重要的, 同时高精度地测量大气 CO₂ 浓度对了解全球碳循环收支也是必需的。现阶段, 大气 CO₂ 浓度资料主要依赖于分布在世界不同地区的联合采样监测网进行的直接仪器观测。近年来, 虽然取得了大量直接仪器观测的 CO₂ 浓度资料, 但由于观测的成本较高, 站点分布较少, 空间分辨率仍较低, 特别是广阔的海洋、极区、沙漠和人烟稀少的高原等地区的观测资料仍相当缺乏, 依然无法精确地评估大气与陆地生态系统以及大气与海洋间的碳交换量, 对大气 CO₂ 的源汇分布及其时空变化的理解还存在重大的不确定性^[2,3]。

卫星遥感是一种重要的监测大气参数和组成变化的探测手段。King^[4] 和 Kaplan^[5] 首先提出了在卫星上进行三维大气温度、湿度探测。随后, 1960 年美国发射了第一颗 TROS-1 试验气象卫星。经过近

* 收稿日期: 2009-03-10 修回日期: 2009-05-29

* 基金项目: 风云三号卫星应用系统工程研发项目“红外分光计大气二氧化碳浓度卫星反演算法研究及原形软件研发”(编号: 4-5); 国家重点基础研究发展计划项目“中国大气气溶胶及其气候效应的研究”(编号: 2006CB403705)资助。

作者简介: 石广玉 (1942-) 男, 山东淄博人, 研究员, 主要从事大气辐射理论与观测以及卫星遥感探测研究。

E-mail: shig@mail.iap.ac.cn

* 通讯作者: 戴铁 (1984-) 男, 江苏泗阳人, 博士研究生, 主要从事卫星遥感探测研究, E-mail: daitie@mail.iap.ac.cn

半个世纪的发展,以卫星为平台的空基遥感观测已经趋向深入和成熟。目前,卫星遥感手段在测量大气温度、 Q_2 浓度和气溶胶光学特性等大气常变物理参数方面已经起了非常重要的作用,获得了大量仪器直接测量无法获得的宝贵资料,提高了短期天气预报和长期气候变化预测能力^[6]。空基遥感探测大气 CO_2 浓度,可以更好地获得其全球时空分布变化状况,提高对大气 CO_2 源汇分布和大气输送过程以及区域和全球碳循环的认识,增强预测未来大气 CO_2 浓度的能力,进而增加对未来全球气候变化研究和预测的可信度。本文将综述现阶段利用卫星平台遥感探测大气 CO_2 浓度分布的研究状况,包括利用反射太阳光谱或地气热红外辐射光谱及两者的组合进行的模拟、卫星实测反演研究及获得的主要结果,最后简单地进行了总结并对未来研究提出了展望。

2 大气 CO_2 浓度时空分布特点

Keeling等^[7] 1958年在美国夏威夷冒纳罗亚观象台(19°32'N, 155°35'W)最早开始了大气 CO_2 浓度的连续观测,观测结果第一次指出大气 CO_2 不仅年平均浓度存在不断增长趋势,同时由于陆地生态系统的光合作用,其浓度同时呈现出季节变化。随后,连续进行大气 CO_2 浓度直接仪器观测的站点不断增多。美国国家海洋和大气管理局全球监测部门(NOAA/GMD)20世纪70年代后期开始开展了最广泛的大气 CO_2 浓度全球观测,目前主要包括6个地面观测站点的连续测量和大约50个站点的每周采样测量^[1]。除了地面观测之外,还利用飞机和高空气球等工具进行了空中观测,以便获得大气 CO_2 浓度及其变化的垂直分布。当然,与地面观测相比,空中观测的难度和耗费要大得多,所以有关资料相对缺乏。目前,最完整、系统的资料来自日本东北大学大气与海洋观测研究中心^[8~10]。

通过对近50年大气 CO_2 浓度的直接仪器观测结果分析可以简单地发现其时空分布的若干特点,这些测量结果资料可以方便地由二氧化碳资料分析中心(CDIAC)的数据集获得^[11]。

大气 CO_2 浓度由于陆地生物圈的光合作用呈现出明显的季节变化,每年夏季出现最低值。由于北半球陆地生物圈面积较南半球更为广阔,因此大气 CO_2 浓度季节变化在北半球表现得更为显著。大气 CO_2 年平均浓度呈现出的快速增长趋势,这对全球气候变化研究来说显得更为重要,通常被用作

全球 CO_2 平均浓度代表的夏威夷冒纳罗亚观象台的结果表明,其年平均浓度已经从1958年的 315×10^{-6} ,增加到2008年的近 386×10^{-6} ,这就是说,在约50年的时间里增加了近22% (71×10^{-6}),而且目前正在以每年大约 1.9×10^{-6} (1999—2008年)的速率增加^[12],人类活动大量燃烧化石燃料被认为是导致 CO_2 年平均浓度快速增长的主要原因。大气 CO_2 浓度空间分布的另一个主要特点为南北半球之间存在约 $3 \times 10^{-6} \sim 4 \times 10^{-6}$ 的平均浓度差异^[13],这进一步表明近几十年来大气 CO_2 浓度的增加可能主要源于北半球的人类活动,而且从北半球扩散到南半球大致需要1~2年的时间。目前,对大气 CO_2 浓度垂直分布结构的认识主要依赖于进行的几次飞机和气球采样测量,结果表明不仅大气 CO_2 的地面浓度在增加,整个对流层和平流层的浓度也在增加,但是,随着高度的增加,大气 CO_2 浓度的季节变化幅度减小^[14~16]。

3 卫星遥感测量大气 CO_2 浓度

3.1 模拟研究

卫星遥感测量大气 CO_2 浓度的模拟研究是指利用一定的辐射传输模式模拟计算大气中的辐射传输过程,考查利用卫星平台反演大气 CO_2 浓度的可行性、测量波段和反演精度等的数值试验,进而为卫星探测仪器的发展提供一定的依据。卫星遥感大气气压和温度廓线通常是假定大气 CO_2 浓度在一定时间内为已知的定值,进而利用卫星通道测量的辐射值来反演大气气压和温度廓线。Pauk^[17] 通过实验设计最早提出利用掩星观测方式测量 Q_2 跃迁 A 带内的卫星辐射率测值反演获得大气气压和温度廓线后,再利用 CO_2 吸收带内的辐射测值来反演大气 CO_2 廓线,因为在大约100 km高度以下的地气系统中,大气 O_2 也是一种分布比较均匀的主要大气成分。其选择的 O_2 跃迁 A 带位于可见光区的 $12\ 900 \sim 13\ 166\ \text{nm}^{-1}$, CO_2 吸收带为近红外光区的 $4.3\ \mu\text{m}$ 、 $2.7\ \mu\text{m}$ 和 $2.0\ \mu\text{m}$ 带,反演结果表明利用傅立叶分光计对 $30 \sim 10\ \text{km}$ 高度范围内的大气气压、温度和 CO_2 混合比浓度的误差可分别小于1%、1 K和1%,并指出更好的实验设计,可以获得更高的反演精度和10 km以下的结果。

卫星探测通道波段的选择对于反演结果的精度具有重要的作用,大气 CO_2 最重要的2个强吸收带是位于红外光谱的 $15\ \mu\text{m}$ 和 $4.3\ \mu\text{m}$ 带,因此利用红外辐射光谱遥感大气 CO_2 浓度成为一个重要的

研究方向。Engeler等^[18]探究了利用在未来几年内可能使用的空间大气红外探测器反演大气 CO₂ 浓度廓线的可行性, 主要为搭载在气象业务极轨卫星 (METOP) 上的红外大气探测干涉仪 IASI^[19] 和空间观测平台 (EOS-Aqua) 上的大气红外探测器 ARS^[20]。首先利用一个 GCM 模式模拟出大气温度、湿度和 CO₂ 浓度等参数, 然后利用辐射传输模式算出 500 ~ 2 500 cm⁻¹ 波段内光谱分辨率为 1 cm⁻¹ 的大气顶射出辐射率作为卫星测量的辐射值, 进而反演获得大气 CO₂ 廓线。研究结果表明: 对自由对流层内的 CO₂ 浓度可以获得较好的反演精度, 月平均的对流层大气 CO₂ 柱浓度反演精度可达 1×10^{-6} , 但在边界层或平流层反演结果主要依赖于初始假定值, 同时指出薄卷云的影响和辐射传输计算的误差可能会降低反演结果的精度。Clédin等^[21]进一步全面探讨了新一代先进的大气红外探测器对大气 CO₂ 浓度变化的敏感度, 同时考察了大气温度、水汽和微量气体浓度误差可能带来的影响。研究发现: 虽然 CO₂ 信号低于或接近于 IAS 的仪器噪声, 并且对某些卫星通道大气温度和水汽误差作用可能占支配地位, 但对空间分辨率为 500 km × 500 km 半月平均的大气 CO₂ 柱浓度反演可以达到 1% 的精度。戴铁等^[22]通过利用一种快速逐线积分辐射传输模式模拟计算卫星辐射率测值, 提出了 4 个适于用来遥感探测大气 CO₂ 浓度的红外波段, 反演试验表明利用这 4 个卫星通道可以获得自由对流层大气 CO₂ 浓度变化。

分析 CO₂ 吸收光谱可以看出, CO₂ 不仅在红外光区的 15 μm 和 4.3 μm 带具有较强的吸收, 同时也在近红外的 2.0 μm 和 1.6 μm 带也具有一定的吸收能力。O'Brien等^[23]分析了利用 CO₂ 1.61 μm 吸收带内的反射太阳辐射光谱测量大气 CO₂ 柱浓度的可行性及大气气溶胶和云的不确定性可能带来的影响。研究结果表明: 晴空条件下, 测量 CO₂ 1.61 μm 吸收带内 2 个波段的反射太阳辐射, 原则上可以精确地反演获得大气 CO₂ 柱浓度; 但如果存在薄云或气溶胶时, 由于大气粒子的散射作用, 将改变太阳辐射的光学厚度和 CO₂ 总的柱吸收作用, 使得反演精度大大降低, 此时一种较好的方法是同时测量大气 CO₂ 1.27 μm 带内的辐射光谱来获得大气散射光学厚度, 进而去除大气散射作用的影响。基于一个简单的辐射传输模式模拟计算表明, 在含有适度的云和气溶胶条件下, 同时测量 CO₂ 和 CO₂ 吸收带的辐射值可以使 CO₂ 平均柱浓度的反演精度达到

0.5%。Kuang等^[24]指出同时利用近红外 CO₂ 1.58 μm 和 2.06 μm 及 CO₂ 0.76 μm 3 个波段高分辨率的反射太阳光谱可以较好地测量大气 CO₂ 平均柱浓度。模拟试验表明: 在多种大气模式和地表条件下, 晴空时的反演精度可以达到 $0.3 \times 10^{-6} \sim 2.5 \times 10^{-6}$, 并且发现近红外反射太阳光谱表现出对近地面层内 CO₂ 浓度变化的高灵敏性。Mac等^[25]利用 IBIRTM 逐线积分辐射传输模式^[26-27]模拟计算给出: 若卫星探测器达到一定的测量精度和光谱分辨率, 利用近红外 1.58 μm 反射太阳光谱可以测量出近地表层大气 CO₂ 浓度 1% 的变化, 为卫星仪器设计提供一定的参考标准。

Christ等^[28]初步调查研究了分别利用近红外 1.6 μm 高分辨率的反射太阳光谱和中等分辨率的红外发射光谱反演大气 CO₂ 浓度的优缺点。结果表明: 对于大气对流层中部的 CO₂ 浓度, 利用红外发射光谱的反演结果要优于近红外反射太阳光谱, 但红外辐射光谱对近地面层的 CO₂ 浓度变化不太敏感, 近红外反射太阳光谱对近地面层的 CO₂ 浓度变化则具有较好的反演结果, 同时利用两者组合反演的 CO₂ 浓度结果表现出更好的效果。

3.2 卫星实测研究

自 1978 年以来, NOAA 系列的极轨气象卫星已经提供了连续对地球表面和大气的观测, 其搭载的 TIROS-N 业务垂直探测器 (TOVS) 利用高分辨率红外探测器 (HIRS) 和微波探测装置 (MSU) 测量地气系统红外和微波部分波段的发射辐射^[29], 进而提供连续的全球地表、云、大气温度和水汽廓线等观测资料。Clédin等^[30-31]通过对 NOAA-10 的 HIRS 1987 年 7 月至 1991 年 9 月的观测资料与 4A 辐射传输模式^[32]正向模拟结果的差别研究发现: 由于在模式模拟计算中通常假定大气 CO₂、N₂O 和 CO 等辐射活性气体的浓度为固定值, 而实际这些气体浓度存在季节和年际的变化, 因此对不同时间尺度 (季节、年际) 的亮度温度模拟结果与 TOVS 观测结果的差别进行详细分析, 可以获得这些气体浓度变化的信息。这不仅可以反映出大气 CO₂ 季节变化的特性, 同时由于人类活动导致其浓度不断增加的年际变化趋势也可以获得一定程度的反映, 但由于 TOVS 具有的是中分辨率的光谱通道, 其高度分辨率有限, 并且通常无法分辨出气体重叠吸收的信息。Clédin等^[33]进一步利用 NOAA-10 的 TOVS 1987 年 7 月至 1991 年 6 月的观测资料反演获得了热带地区 (20°N ~ 20°S) 对流层中部的大气 CO₂ 浓度, 这是由于高分

分辨率红外探测器 HIRS 位于 CO_2 吸收带内的通道主要对对流层中部的 CO_2 浓度变化具有探测能力。结果表明: 不仅大气 CO_2 月平均浓度、季节变化和纬度变化幅度与飞机采样观测的结果符合较好, 同时大气 CO_2 年际的增长趋势甚至厄尔尼诺—南方涛动事件对大气 CO_2 浓度变化的影响也清晰可见, 初步估计已获得的水平分辨率为 $15^\circ \times 15^\circ$ 的月平均对流层中部 CO_2 浓度反演精度的标准偏差为 3.6×10^{-6} 。

2002年 5月发射的搭载在空间观测平台 (EOS Aqua) 上的大气红外探测器 AIRS 拥有 2378 个通道, 测量光谱区间为 $3.7 \sim 15.4 \mu\text{m}$ 的红外发射辐射, 具备非常高的分辨率, 且提供了仅对 CO_2 浓度变化较敏感的通道。Crevoisier 等^[34] 利用 AIRS 2003年 4~10月的观测资料反演获得了热带地区海洋上空夜间对流层中部的大气 CO_2 浓度, 其使用的反演方法与 Cléridin 等^[33] 的相似, 均为神经网络非线性回归方法, 与 HIRS 相比, 利用 AIRS 反演精度可达 2.5×10^{-6} 。Engeler 等^[35] 利用资料同化方法分析 AIRS 近 1 年的辐射观测资料来获得全球对流层大气 CO_2 平均浓度分布情况, 结果与飞机采样测量对比发现: 对于 5 天平均的 $6^\circ \times 6^\circ$ 格点, CO_2 浓度反演误差可以达到 1%。Chahine 等^[36] 利用 AIRS 观测资料反演获得的对流层中部 CO_2 浓度与直接采样测量的结果对比发现, 对于 5×10^{-6} 的季节变化反演精度可达 $(0.43 \pm 1.20) \times 10^{-6}$ 。

大气制图扫描成像吸收光谱仪 SCIAMACHY 是紫外—可见—近红外高光谱分辨率探测仪, 搭载于欧洲宇航局 2002年 3月发射的环境监测卫星 ENVISAT 上, 设计用来调查对流层和平流层的大气组成及变化过程^[37], 主要测量太阳后向散射辐射来反演大气 CO_2 平均柱浓度的全球分布。Buchwitz 等^[38-39] 首先利用 SCIAMACHY 观测资料反演获得了 2003 年陆地地区大气 CO_2 平均柱浓度分布, 反演结果第一次表明利用卫星测量结果可以获得区域大气 CO_2 源汇的分布。Buchwitz 等^[40] 利用 SCIAMACHY 2003—2005 年的观测资料第一次从空间探测获得了大气 CO_2 浓度年际变化, 结果与地面观测对比, 误差可以达到 $1 \times 10^{-6} / \text{a}$ 。Barkley 等^[41] 对比了利用 SCIAMACHY 和 AIRS 在 2003 年观测资料反演获得的北美大气 CO_2 平均浓度的结果, 发现反演获得大气 CO_2 浓度在空间分布上具有一致性, 利用 AIRS 和 SCIAMACHY 分别获得对流层中部和底部

的大气 CO_2 浓度呈现出季节变化, 表明利用 AIRS 和 SCIAMACHY 可以获得一定的大气 CO_2 浓度的分布情况, 但由于 AIRS 和 SCIAMACHY 测量光谱波段的不同, AIRS 主要对对流层中上部的 CO_2 浓度变化较敏感, 而 SCIAMACHY 则对近地面层的 CO_2 浓度变化较敏感。Barkley 等^[42] 进一步通过与飞机和地表观测结果的对比, 评估了利用 SCIAMACHY 探测对流层底部和地表大气 CO_2 浓度变化的能力, 反演获得的月平均大气 CO_2 浓度结果表明, SCIAMACHY 具有探测对流层底部大气 CO_2 浓度季节变化的能力。

美国宇航局 (NASA) 计划的轨道碳观测器 (OCO) 是第一颗专门用来探测大气 CO_2 浓度的卫星, 设计采用近极地太阳同步轨道, 三轴定向稳定, 高度为 705 km, 每天绕地球 14.65 圈, 实现周期为 16 天的全球重复探测^[43]。通过测量 $0.76 \mu\text{m}$ 的 O_2 跃迁 A 带及 CO_2 的 $1.61 \mu\text{m}$ 和 $2.06 \mu\text{m}$ 带的反射太阳光谱, 将第一次以空间为基础, 较高精度地探测全球大气 CO_2 平均柱浓度分布, 空间分辨率和测量精度将满足确定区域尺度 CO_2 源汇分布的需求^[44]。

OCO 卫星采用的是最优非线性反演算法^[45], 主要包括一个正演辐射传输模式和一个反演模式, 由卫星辐射率实际测值和正演模式模拟的大气顶出射辐射率, 通过最优估计理论^[46] 同时反演获得大气 CO_2 浓度、地表气压和大气温度等参数。由于 OCO 和 SCIAMACHY 几何观测方式和测量光谱区间相似, Bösch 等^[45] 通过对比, 分别利用 SCIAMACHY 2004 年 6~10 月与 2005 年 2~8 月对美国 Wisconsin 的 Park Falls 地区 (46°N , 90°W) 观测资料和相对应的地面太阳吸收光谱观测资料对大气 CO_2 浓度、地表反照率及地表气压等反演结果, 检验了 OCO 卫星的反演算法, 结果表明 OCO 卫星的光谱和空间分辨率为 SCIAMACHY 的 10~20 倍, 将极大地提高大气 CO_2 浓度的反演精度。遗憾的是 OCO 卫星在 2009 年 2 月发射失败。

4 结语与展望

如上所述, 大气 CO_2 是一种重要的长寿命温室气体, 连续获取大气 CO_2 浓度全球分布和变化对于认识其气候效应具有非常重要的作用。卫星遥感探测大气 CO_2 浓度可以弥补直接仪器观测资料有限的局限性, 已经开始成为一个新的研究领域。研究者们通过利用辐射传输模式进行数值反演模拟试验和分析已有可以利用的卫星实测资料, 已经取得了

一定的成果,主要体现在以下几个方面:①发现适于用来反演大气 CO₂ 浓度的波段主要为红外发射辐射光谱区的 4.3 μm 和 15 μm 带以及近红外反射太阳辐射光谱区的 1.58 μm、1.61 μm 和 2.06 μm 带;②红外发射光谱包含的主要是自由对流层大气 CO₂ 浓度的信息,对边界层 CO₂ 浓度变化几乎没有响应,因此红外辐射光谱主要适于探测自由对流层大气 CO₂ 浓度的变化;③近红外反射太阳辐射光谱包含的主要是对流层底部 CO₂ 浓度的信息,因此其较红外辐射光谱更适用于用来探测地面大气 CO₂ 浓度的分布;④通过对高分辨率红外探测器 (HIRS) 实测资料的分析,发现其可以探测出大气 CO₂ 浓度季节变化,利用 AIRS 观测资料已经反演获得了热带地区海洋上空夜间对流层中部的大气 CO₂ 浓度,利用 SCIAMACHY 观测结果已经可以获得区域大气 CO₂ 源汇的分布。

但同时也存在一些问题,主要有:①由于卫星测量辐射率不仅受大气 CO₂ 浓度影响,同时还受大气温度廓线、水汽和臭氧含量等参数的影响,这些参数的测量误差增加了卫星反演大气 CO₂ 浓度的不确定性;②大气 CO₂、H₂O 和 O₃ 等气体吸收谱线资料的误差,在一定程度上造成了对大气中辐射传输过程的模拟计算误差,影响卫星反演大气 CO₂ 浓度的精度;③云和气溶胶粒子通过散射和吸收作用影响太阳短波辐射在大气中的传输特征,对云和气溶胶粒子理化和光学特性认识的不确定性,大大降低了卫星反演大气 CO₂ 浓度的精度。因此,目前可以获得的主要是晴空条件下的反演结果。

综合以上对卫星遥感探测大气 CO₂ 浓度研究现状的分析,未来该领域应当在以下方面加强研究:①进一步探寻仪器在技术方面可以达到的光谱分辨率和探测精度,并作为数值模拟反演试验的参数计算在更高的光谱分辨率和测量精度下可以达到的反演精度;②完善大气分子吸收特性的实验室测量,获取更加精确的分子吸收谱线资料,为提高辐射传输计算的精度提供基础;③进行大气 CO₂ 浓度、大气温度廓线、臭氧和水汽含量等参数的同时联合反演,降低大气温度廓线、臭氧和水汽含量等误差对反演精度的影响;④进行不同反演算法的对比研究,分析各种方法的误差来源,进而不断完善反演算法;⑤进行近红外反射太阳辐射光谱和红外发射光谱的联合探测,弥补利用单一光谱探测大气 CO₂ 浓度的局限;⑥利用高光谱分辨率的卫星辐射率测值,进行大气 CO₂ 廓线的反演,获取大气 CO₂ 浓度的垂直分布

和变化特性;⑦进行已有卫星测量资料的分析,提取大气 CO₂ 浓度变化的信息;⑧进行云和气溶胶影响大气 CO₂ 浓度反演结果的分析,探寻有云和气溶胶条件下卫星探测大气 CO₂ 浓度的方法。

参考文献 (References)

- [1] Foster P, Ramaswamy V, Artaxo P, et al. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. // Solomon S, Qin D, Manning M, et al. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] Bousquet P, Peylin P, Ciais P, et al. Regional changes in carbon dioxide fluxes of land and oceans since 1980. *J. Science* 2000, 290(5495): 1342-1346.
- [3] Fan S, Gloor M, Mahajan S, et al. A large terrestrial carbon dioxide data and model. *J. Science* 1998, 282(5388): 442-446.
- [4] King J I F. Scientific Uses of Earth Satellites. *MJ. Ann Arbor: University of Michigan Press*, 1956.
- [5] Kaplan L D. Inference of atmospheric structure from remote radiation measurement. *J. Journal of the Optical Society of America* 1959, 49: 1004-1007.
- [6] Chen Weimin. Satellite Climatology. Beijing: China Meteorological Press, 2003. [陈渭民. 卫星气象学. 北京: 气象出版社, 2003.]
- [7] Keeling C D, Whorf T P, Wahlen M, et al. Interannual extremes in the rate of rise of atmospheric carbon dioxide since 1980. *J. Nature* 1995, 375: 666-670.
- [8] Nakazawa T, Sugawara S, Inoue G, et al. Aircraft measurements of the concentrations of CO₂, CH₄, N₂O and CO in the troposphere over Russia. *J. Journal of Geophysical Research* 1997, 102(D3): 3843-3859.
- [9] Nakazawa T, Morimoto S, Aoki S, et al. Temporal and spatial variations of the carbon isotopic ratio of atmospheric carbon dioxide in the western Pacific region. *J. Journal of Geophysical Research* 1997, 102: 1271-1285.
- [10] Aoki S, Nakazawa T, Machida T, et al. Carbon dioxide variations in the stratosphere over Japan, Scandinavia and Antarctica. *J. Tellus* 2003, 55: 178-186.
- [11] Tsutsumi Y. The Global Analyses Method by the WDCGG Using the Archived Data. *WMO World Data Centre for Greenhouse Gases Technical Document* 2007.
- [12] NOAA. Trends in Atmospheric Carbon Dioxide [EB/OL]. <http://www.esr.noaa.gov/gnd/co2/trends/>, 2009.
- [13] Enting I G, Pieman G J. Average global distribution of CO₂. // Heimann M. The Global Carbon Cycle. New York: Springer-Verlag, 1993.
- [14] Nakazawa T, Mitsuhashi K, Aoki S, et al. Temporal and spatial variations of upper tropospheric and lower stratospheric carbon dioxide. *J. Tellus* 1991, 43: 106-117.
- [15] Nakazawa T, Morimoto S, Aoki S, et al. Time and space varia-

- tions of the carbon isotopic ratio of tropospheric carbon dioxide over Japan. *J. Tellus* 1993 45: 258-274
- [16] Nakazawa T, Machida T, Sugawara S, et al. Measurements of the stratospheric carbon dioxide concentration over Japan using a balloon-borne cryogenic sampler. *J. Geophysical Research Letters* 1995 22: 1 229-1 232.
- [17] Park J H. Atmospheric CO₂ monitoring from space. *J. Applied Optics* 1997 36: 2 701-2 712.
- [18] Engelen R, J Deming A, S Gurney K R, et al. Global observations of the carbon budget: Expected satellite capabilities for emission spectroscopy in the EOS and NPOESS eras. *J. Journal of Geophysical Research* 2001 106(17): 20 055-20 068.
- [19] Cayla F, Javelle P. ASI instrument overview: Advanced and next generation satellite. *J. Proceedings of SPIE* 1995 2: 583, 271-281.
- [20] Aumann H, Pagano R. The atmospheric infrared sounder on EOS. *J. Optical Engineering* 1994 32: 776-784.
- [21] Clé din A, Saunders R, Hollingsworth A, et al. The feasibility of monitoring from high-resolution infrared sounders. *J. Journal of Geophysical Research* 2003 108 (D2), 4064. doi: 10.1029/2001JD001443.
- [22] Dai Tie, Zheng Youfei, Shi Guangyu. Theoretic study on the retrieval of atmospheric CO₂ concentrations from infrared emitting spectrum. *J. Meteorological and Environmental Science* 2008 31(1): 1-5 [戴铁, 郑有飞, 石广玉. 利用红外辐射光谱反演大气 CO₂ 浓度的理论研究. *J. 气象与环境科学*, 2008 31(1): 1-5.]
- [23] O'Brien D M, Rayner P J. Global observations of the carbon budget: CO₂ column from differential absorption of reflected sunlight in the 1.61 band of CO₂. *J. Journal of Geophysical Research* 2002 107(D18): 4354. doi: 10.1029/2001JD000617.
- [24] Kuang Z M, Margolis J, Toon G, et al. Spaceborne measurement of atmospheric CO₂ by high-resolution NIR spectrometry of reflected sunlight: An introductory study. *J. Geophysical Research Letters* 2002 29(15), 1716. doi: 10.1029/2001GL014298.
- [25] 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.
- [26] Clough SA, Iacono M J, Mcnet J L. Line-by-line calculation of atmospheric fluxes and cooling rates: Application to water vapor. *J. Journal of Geophysical Research* 1992 97: 15 761-15 785.
- [27] Clough SA, Iacono M J. Line-by-line calculations of atmospheric fluxes and cooling rates: 2. Applications to carbon dioxide, ozone, methane, nitrous oxide, and halocarbons. *J. Journal of Geophysical Research* 1995 100: 16 519-16 535.
- [28] Christi M J, Stephens G L. Retrieving profiles of atmospheric 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. doi: 10.1029/2003JD004058.
- [29] Smith W L, Woolf H M, Hayden C M, et al. The TIROS-N operational vertical sounder. *J. Bulletin of the American Meteorological Society* 1979 60: 1 177-1 187.
- [30] Clé din A, Serrar S, Amanie R, et al. Signatures of annual and seasonal variations of CO₂ and other greenhouse gases from NOAA/TOVS observations and model simulations. *J. Journal of Climate* 2002 15: 95-116.
- [31] Clé din A, Hollingsworth A, Scott A, et al. Annual and seasonal variations of atmospheric CO₂, N₂O and CO concentrations retrieved from NOAA/TOVS satellite observations. *J. Geophysical Research Letters* 2002 29 (8), 1269. doi: 10.1029/2001GL014082.
- [32] Scott N A, Clé din A. A fast line-by-line method for atmospheric absorption computations: The automated atmospheric absorption atlas. *J. Journal of Applied Meteorology* 1981 20: 801-812.
- [33] Clé din A, Serrar S, Scott N A, et al. First global measurement of midtropospheric CO₂ from NOAA polar satellite: Tropical zone. *J. Journal of Geophysical Research* 2003 108 (D18), 4581. doi: 10.1029/2003JD003439.
- [34] Crevoisier C, Heilliette S, Clé din A, et al. Midtropospheric CO₂ concentration retrieval from AIRS observations in the tropics. *J. Geophysical Research Letters* 2004 31, L17106. doi: 10.1029/2004GL020141.
- [35] Engelen R, J McNally A P. Estimating atmospheric CO₂ from advanced infrared satellite radiances within an operational four-dimensional variational (4D-Var) data assimilation system: Results and validation. *J. Journal of Geophysical Research* 2005 110 D18305. doi: 10.1029/2005JD005982.
- [36] Chahine M, Baret 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. doi: 10.1029/2005GL024165.
- [37] Bovensmann H, Burrows J P, Buchwitz M, et al. SCIAMACHY-Mission objectives and measurement modes. *J. Journal of the Atmospheric Sciences* 1999 56: 127-150.
- [38] Buchwitz M, de Beek R, Burrows J P, et al. Atmospheric methane and carbon dioxide from SCIAMACHY satellite data: Initial comparison with chemistry and transport models. *J. Atmospheric Chemistry Physics* 2005 5: 941-962.
- [39] Buchwitz M, de Beek R, Noel S, et al. Carbon monoxide, methane and carbon dioxide columns retrieved from SCIAMACHY by WM-DOAS: Year 2003 initial data set. *J. Atmospheric Chemistry Physics* 2005 5: 3 313-3 329.
- [40] Buchwitz M, Schneising O, Burrows J P, et al. First direct observation of the atmospheric year-to-year increase from space. *J. Atmospheric Chemistry Physics* 2007 7: 4 249-4 256.
- [41] Barkley M P, Monks P S, Engelen R J. Comparison of SCIAMACHY and AIRS measurement over North America during the summer and autumn of 2003. *J. Geophysical Research Letters* 2006 33 L20805. doi: 10.1029/2006GL026807.
- [42] Barkley M P, Monks P S, Hewitt A J, et al. Assessing the near surface sensitivity of SCIAMACHY atmospheric CO₂ retrieved using (FS) WM-DOAS. *J. Atmospheric Chemistry Physics* 2007 7: 3 597-3 619.

[43] Crisp D, Atlas R M, Breon F M, et al. The Orbiting Carbon Observatory (OCO) mission. *J. Advance in Space Research* 2004, 34(4): 700-709

[44] Crisp D, Johnson C. The orbiting carbon observatory mission. *J. Acta Astronautica* 2005, 56: 193-197.

[45] Belschi 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. doi: 10.1029/2006JD007080.

[46] Rodgers CD. Inverse Methods for Atmospheric Sounding: Theory and Practice. *MJ. Singapore: World Science Publishing* 2000.

Latest Progress of the Study of Atmospheric CO₂ Concentration Retrievals from Satellite

SHI Guangyu¹, DAI Tie², XU Na²

(1. State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;
2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Atmospheric carbon dioxide is an important and long-lived greenhouse gas. Satellite measurements of the distribution of the global atmospheric CO₂ would get its continuous change. Improved quantitative understanding of the distribution and variability of the sources and sinks of CO₂ and the global carbon cycle would be done. Furthermore, the research and prediction on the global climate change would be enhanced. The remote sensing of the atmospheric CO₂ from instrumentation aboard satellite has been a new area of research. The research on the remote measurement of the distribution of the atmospheric CO₂ from satellite is summarily commented. Firstly, the temporal and spatial distribution and variability of atmospheric CO₂ concentration monitored by direct instrument observations is presented. Then the main methods and results of satellite remote sensing measurements of atmospheric CO₂ concentration are reviewed, including the measurements of the near infrared reflected sunlight or the thermal infrared emission spectroscopy and the combination of both measurement. Finally the summary and prospects are discussed briefly.

Key words: Satellite Remote sensing, Carbon dioxide concentration

2010年第 2 期要目

楚科奇海融冰过程中的海水结构研究..... 赵进平, 史久新, 金明明, 李超伦, 矫玉田, 卢勇
 牡蛎壳体的同位素贝壳年轮研究 范昌福, 王宏, 裴艳东, Koeniger Pau, 李延河
 东海冷涡中心位置及季节性变化的初步研究 王刚, 兰健, 孙双文
 我国南方早古生代聚煤过程中硫的生物地球化学行为及成矿效应..... 姚素平, 海, 胡凯, 焦堃
 日本南海海槽俯冲增生楔前缘的构造变形特征..... 李春峰, 苏新, 姜涛,
 Ujiie K, Fabbri Q, Yamaguchi A, Chester FM, Kimura G. IODP Expedition 316 Scientists