

CO₂ 反演中大气散射影响的光程校正方法

江新华 王先华 叶函函 韦秋叶 李志伟 卜婷婷

(中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘要 CO₂ 作为影响气候变化最重要的温室气体,其反演精度达到 1%是气候研究的基本要求。在反演中解决大气散射的影响,是提高 CO₂ 反演精度的关键问题之一。温室气体观测卫星为了实现高光谱分辨率,其光谱带宽通常较窄。高光谱分辨率对 CO₂ 浓度变化敏感,而窄带宽在采用传统差分吸收光谱(DOAS)法以快慢变分离的方式处理散射时难以保证反演精度。针对我国高光谱卫星 CO₂ 反演算法的开发需求,从光程的角度研究了散射对 CO₂ 反演的影响,并与传统 DOAS 方法在沙漠和草地两种区域进行了对比。结果显示相对于传统 DOAS 方法,该方法在沙漠和草地区域的应用均使 CO₂ 的反演精度得到提高,达到或接近 1%的精度需求,反演结果的相关性和数据离散度也得到改善,这表明该方法能有效降低大气散射对 CO₂ 反演的影响。

关键词 大气光学;CO₂ 反演;温室气体;大气散射;光程

中图分类号 P412.1; O433.4; TP79 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0801005

Correction Method of Atmospheric Scattering Effect through Optical Path in CO₂ Retrieval

Jiang Xinhua Wang Xianhua Ye Hanhan Wei Qiuye Li Zhiwei Bu Tingting

(Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization of Chinese Academy of Sciences, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract CO₂ as the most important greenhouse gas effecting climate change, inversion accuracy within 1% is essential requirement in climate research. One of key points to improve CO₂ retrieval precision is account for atmospheric scattering in inversion processing. The spectral range of greenhouse gas monitoring satellite generally is narrow to achieve excellent spectral resolution. High spectral resolution has high sensitivity in CO₂ concentration changing, however, traditional differential optical absorption spectroscopy (DOAS) methods are hard to assure accuracy in scattering atmosphere. Aim to meet inversion algorithm development, the influence of scattering in CO₂ retrieval from path length is studied, compared with traditional DOAS method in desert and meadow. Result indicates that path length method can improve retrieval accuracy and obtain precision close to 1%, and correlation and dispersion of inversion results also can achieve improvement. It is implied that path length method is capable of reducing the impact due to atmospheric scattering in CO₂ retrieval.

Key words atmospheric optics; CO₂ retrieval; greenhouse gas; atmospheric scattering; optical path

OCIS codes 010.1310; 010.5620; 290.1310; 280.4991

1 引言

大气 CO₂ 是最重要的温室气体之一,对气候变化产生着重要的影响^[1]。作为长寿命的温室气体,

因其具有在大气中含量低、浓度梯度小的特点使得观测数据的精度必须很高才能满足应用的要求,1% (即气体体积分数为 3.8×10^{-6}) 的观测精度是公认

收稿日期: 2014-02-11; **收到修改稿日期**: 2014-04-16

基金项目: 国家自然科学基金(41175037)

作者简介: 江新华(1987—),男,博士研究生,主要从事 CO₂ 反演算法与大气散射校正方面的研究。

E-mail: jxh2010@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 王先华(1963—),男,博士,研究员,主要从事光学遥感机理方面的研究。E-mail: xhwang@aiofm.ac.cn

(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

的基本要求^[2]。地基观测虽然精度高,但由于地基站点稀少,如海洋、沙漠、南北极等区域的观测资料非常缺乏,使得人们对 CO₂ 源汇分布和时空变化的掌握存在很大的不确定性,无法精确评估大气与陆地生态系统以及大气与海洋之间的碳循环交换^[3]。而卫星观测方式,具有范围大、实时监测的优点,可以获得 CO₂ 的全球时空分布,恰好弥补了地基观测的缺点。针对卫星观测的这个优势,国外研制了温室气体观测卫星(GOSAT)、轨道碳观测器(OCO)、大气制图扫描成像吸收分光计(SCIAMACHY)以及碳监测卫星(CarbonSat),我国正在发展应用空间外差技术的温室气体监测卫星以及碳卫星(TanSat)^[4-7]。卫星观测有其独特的优势,但与此同时受到的影响因素多且复杂,导致卫星观测在精度上存在不足,而研究大气中 CO₂ 源汇和时空分布又要求很高的探测精度,因此提高卫星观测的精度是一个重要的任务。

影响 CO₂ 反演精度的因素有许多,如云和气溶胶、表面压力、温度廓线、地表性质、分子吸收谱线等,其中表面压力和温度廓线是影响气体分子吸收强度和展宽线型的主要因素,地表性质影响观测信号的信噪比水平,分子吸收谱线影响吸收强度与吸收位置,这些因素都会对反演精度带来影响^[8-9]。研究表明,云和气溶胶对光的散射是影响 CO₂ 反演精度的一个重要因素^[10-11],其中卷云和大粒子气溶胶的影响最大,可达 4%(换算成 CO₂ 的体积分数约为 15×10^{-6}),在沙漠区域甚至高达 10%,其次为粒子尺度较小的乡村型气溶胶,约为 1%(即 CO₂ 的体积分数约为 4×10^{-6});粒子尺度最小且有较大吸收性的城市型气溶胶的影响最小,它的存在相当于边界层 CO₂ 发生体积分数为 1×10^{-6} 的变化^[9,12]。气溶胶在大气中是广泛分布的,尤其在亚洲区域气溶胶更是高浓度覆盖^[13-16],并且卷云(尤其是不可见卷云)和亚像元云在数据预处理中也难以做到完全滤除,因此,校正云和气溶胶对光的散射是提高 CO₂ 反演精度的必要工作。

本文通过校正光程降低了大气散射作用在天基 CO₂ 观测中对反演精度的影响,并针对空间外差光谱仪(SHS)的技术特点提供一种比传统差分吸收光谱(DOAS)方法具有更高精度的 CO₂ 反演方案。介绍了 SHS 技术原理以及传统 DOAS 方法;从光程角度分析了大气散射对 CO₂ 反演的影响并给出校正方法,同时从原理上对光程方法与传统 DOAS 方法进行了比较;最后用光程方法和传统 DOAS 方法

对实测的 GOSAT 卫星数据进行了处理,并分析对比了两种方法的效果。

2 空间外差技术与传统 DOAS 方法原理

2.1 空间外差技术的原理

我国将要发射的高光谱观测卫星搭载 SHS,包含 $0.76 \mu\text{m}$ (O₂-A 波段)、 $1.58 \mu\text{m}$ (CO₂ 弱吸收)、 $1.64 \mu\text{m}$ (CH₄)和 $2.0 \mu\text{m}$ (CO₂ 强吸收)共 4 个波段,采用空间外差技术进行大气温室气体含量的高精度探测。SHS 以空间调制的方式产生两相干光束,通过改变两出射光束的波面夹角 θ 来获得光程差实现干涉。SHS 的光谱分辨能力与两干涉光束的光程差相关^[17-19],光程差表示为

$$\Delta U = 2W \sin \theta, \quad (1)$$

结合光栅方程:

$$2\sigma \sin \theta = \frac{k}{d}, \quad (2)$$

其光谱分辨率极限 δ_σ 与光谱范围(带宽) $\Delta\sigma$ 表示为

$$\delta_\sigma = \frac{1}{2\Delta U} = \frac{1}{4W \sin \theta} = \frac{\sigma d}{2Wk}, \quad (3)$$

$$\Delta\sigma = \frac{N \cdot \delta_\sigma}{2}, \quad (4)$$

式中 σ 为波数, d 为光栅刻线数目, W 为光栅宽度, k 为衍射级数(通常取 1), N 为探测器像元数。由以上可知,SHS 的分辨能力取决于系统中光栅的分辨能力,它等于光栅分辨率的 2 倍,因此,SHS 具有高光谱分辨率。高光谱分辨率对吸收气体浓度敏感使得空间外差技术适合用于温室气体的高精度观测。

2.2 传统 DOAS 方法的局限

传统 DOAS 方法处理光谱时,将气体吸收当作快变成分,而将气溶胶等影响当作慢变成分对光谱进行分离,从快变成分中提取吸收气体的浓度信息^[20-21]。传统 DOAS 方法快慢变分离产生的误差与光谱带宽之间是存在联系的,仿真结果显示,当光谱带宽较窄时,快慢变的分离存在较大的误差。图 1 是无噪声的参考谱线,对该参考谱线加入随机噪声,然后用传统 DOAS 方法对加入噪声的光谱进行快慢变分离。图 2、3 分别展示了传统 DOAS 方法在宽带宽和窄带宽条件下的分离结果(仅展示包含气体浓度信息、在反演中有用的快变成分)。图 1~3 中纵坐标为辐亮度谱的对数值。对比图 2 和图 3 可知,在宽带宽下,传统 DOAS 方法分离出来的快变成分与参考谱线中快变成分(即真实快变

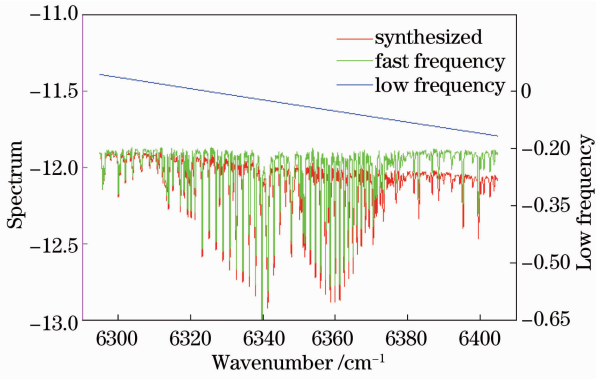


图1 参考谱线
Fig. 1 Reference spectra

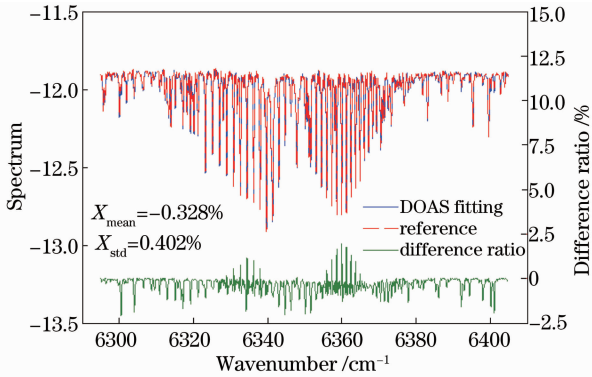


图2 宽带宽下快变成分的分离结果
Fig. 2 Separation results of fast frequency under broad band

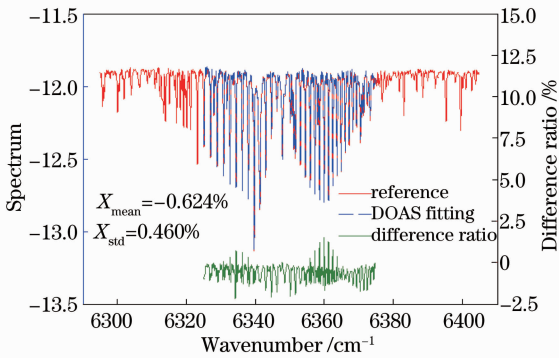


图3 窄带宽下快变成分的分离结果
Fig. 3 Separation results of fast frequency under narrow band

成分)的相对误差均值 X_{mean} 为 -0.328% , 比窄带宽下的结果 -0.624% 要小将近一倍; 相对误差的标准偏差 X_{std} 为 0.402% , 也比窄带宽下的 0.460% 要小。与 SCIAMACHY 这种宽光谱带宽的探测器不同, 超光谱、高精度的 CO₂ 探测方式通常由于探测需求和技术特点, 在光谱带宽上跨度较小, 这时采用传统 DOAS 方法反演气体浓度会带来较大的误差。因此从仪器角度分析, 传统的 DOAS 方法不适用于

我国的高光谱观测卫星反演 CO₂ 含量。

图 1 中绿线和蓝线分别为快变和慢变成分, 红线是快变和慢变的合成。图 2 为宽带宽下 ($6295 \sim 6405 \text{ cm}^{-1}$) 快变成分的分离效果, 图 3 为窄带宽下 ($6325 \sim 6375 \text{ cm}^{-1}$) 快变成分的分离效果, 图 2、3 中的绿线是传统 DOAS 方法分离得到的快变成分与真实快变成分之间的相对误差。

气溶胶分布广泛, 即使经过云筛选, 少量的卷云及亚像元尺度的云依然有可能存在^[22], 当存在散射介质时光的辐射传输过程如图 4 所示。可以看出, 大气散射会导致光子光程相对于几何光程发生改变。传统 DOAS 方法对散射的处理, 是将散射作用当成慢变成分, 以多项式拟合的方式消除其影响。这种对散射的简化处理只考虑了散射的消光作用而忽略了散射会通过改变光程的方式间接改变 CO₂ 吸收, 也就是说虽然散射的消光影响随光谱是慢变的, 但散射会通过改变光程的方式间接影响 CO₂ 吸收这个快变成分, 因此从辐射传输角度分析, 传统 DOAS 方法在高精度 CO₂ 反演中是不适用的。

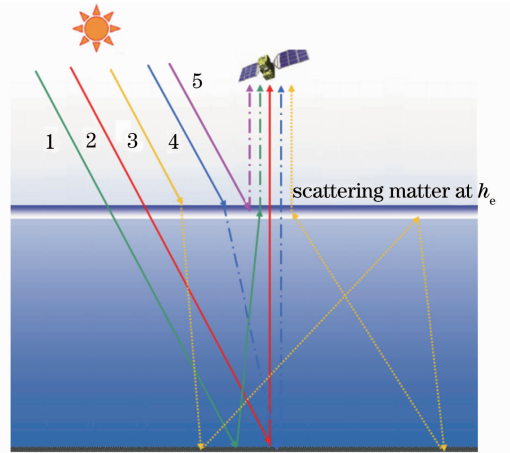


图4 大气散射对光程的影响
Fig. 4 Effect of atmospheric scattering on optical path

3 光程法校正散射的原理与 CO₂ 反演

3.1 基于光程的辐射传输原理

散射通过改变光程而影响气体吸收, 给气体反演带来误差, 因此对大气散射影响的校正可以从光程的角度来考虑。利用光程概率密度函数的方法建立辐射传输模型^[23], 该方法的核心思想是: 将大气散射对光程的影响进行参数量化, 一个描述散射缩短光程作用, 一个描述散射拉长光程作用, 结合模型化的散射层高和光程概率密度函数 (PPDF) 调整因

子($\alpha, \rho, h_e, \gamma$)共4个参数联合描述因大气散射导致的光程改变对气体吸收的影响。基于这个思想,将散射大气按图4所示模型化,散射层上与散射层下的透射率分别表示为 T_1 和 T_2 ,则光从大气层顶到地表再进入到探测器的传输过程中,总的透射率可表示为^[24-25]

$$T_{\text{eff}} = \alpha T_2 + (1 - \alpha) T_1 T_2, \quad (5)$$

式中

$$T_1 = \exp\left[-\left(\frac{1}{\mu} + \frac{1}{\mu_0}\right)(1 + \delta)\tau_1\right], \quad (6)$$

$$T_2 = \exp\left[-\left(\frac{1}{\mu} + \frac{1}{\mu_0}\right)\tau_2\right], \quad (7)$$

$$\tau_1 = \int_0^{h_e} k(h) dh, \quad \tau_2 = \int_{h_e}^{h_a} k(h) dh,$$

$$\delta = \rho \exp[-\gamma(\tau_1 + \tau_2)], \quad (8)$$

式中 h_e 为散射层的层高, h_a 为大气层顶, $k(h)$ 为高度 h 处的气体吸收系数, $\mu(\mu_0)$ 为太阳天顶角(观测天顶角)的余弦。 α 描述散射缩短光程的作用,代表的是被散射层直接散射回探测器中的光子数与探测器接收到的总光子数的比率; ρ 描述散射拉长光程的作用,代表的是散射层下光程改变(相对于散射层下几何光程)的平均量与散射层下几何光程的比率; γ 为PPDF调整因子,描述PPDF的线型。根据总的透射率可建立前向模型:

$$Y_v = -\ln(\langle S \cdot T_{\text{eff}} \rangle_v) + P^{(2)}(\lambda), \quad (9)$$

式中 S 为大气层外太阳光谱,尖括号 $\langle \rangle$ 表示与仪器线型函数相卷积,二阶多项式:

$$P^{(2)}(\lambda) = a_1 + a_2(\lambda_1 - \lambda_j) + a_3(\lambda_1 - \lambda_j)^2, \quad (10)$$

用于拟合除散射之外的其他慢变成分。

3.2 反演方法与步骤

反演采用 Gauss-Newton 迭代^[26]更新状态向量,使模拟谱与实测光谱之间的残差最小化。利用 $0.76 \mu\text{m}$ ($13000 \sim 13180 \text{ cm}^{-1}$)和 $1.58 \mu\text{m}$ ($6325 \sim 6378 \text{ cm}^{-1}$)两个波段,分3个步骤实现 CO_2 体积混合比(XCO_2)的反演。

1) 在 $0.76 \mu\text{m}$ 波段对光程参量的反演。大气中 O_2 的含量已知且稳定, O_2 在该波段有吸收特征且受其他气体的干扰很小,容易将散射消光与气体吸收消光分离,利用这个性质在该波段反演出描述散射影响光程的参量 $\alpha, \rho, h_e, \gamma$ 。

2) 对参数 α, ρ 的修正。由于 Rayleigh 散射和地表反射在两个波段的差异, $0.76 \mu\text{m}$ 反演获得的参数 α, ρ 无法准确描述 $1.58 \mu\text{m}$ 处的散射性质,需要对 α, ρ 进行 Rayleigh 修正和地表反射修正^[24]:

$$\alpha^* = \alpha - \alpha_R, \quad \rho^* = \rho - \rho_R, \quad (11)$$

$$\alpha(\Gamma_{1.58}) = \alpha^*(\Gamma_{0.76})(\Gamma_{0.76}/\Gamma_{1.58}),$$

$$\rho(\Gamma_{1.58}) = \rho^*(\Gamma_{0.76})\exp(\Gamma_{1.58} - \Gamma_{0.76}), \quad (12)$$

式中 Γ 为地表反照率,(11)式中参数 α_R, ρ_R 通过模拟仿真获得。

3) $1.58 \mu\text{m}$ 处进行 XCO_2 的反演。在获得适用于 $1.58 \mu\text{m}$ 波段的PPDF数参数后,在该波段建立前向模型,设置状态向量为大气分层中各个子层的 CO_2 浓度值,反演出各个子层的 CO_2 浓度值,最后按压力平均得到 XCO_2 。

3.3 与传统 DOAS 方法原理的比较

单纯的散射只是能量的重新分布,并不会对光产生衰减作用,大气散射在 CO_2 吸收波段导致光的衰减,本质上是被散射的光子其光程相对于几何光程发生了改变,这种改变间接导致了光在 CO_2 波段吸收量的增大或者减小。如果不考虑散射对光子光程的影响,即 $\alpha = \rho = 0$,则根据(5)~(8)式总透射率变为

$$T_{\text{eff}} = T_1 \cdot T_2 = \exp\left[-\left(\frac{1}{\mu} + \frac{1}{\mu_0}\right)\tau_1\right] \cdot \exp\left[-\left(\frac{1}{\mu} + \frac{1}{\mu_0}\right)\tau_2\right] = \exp\left[-\left(\frac{1}{\mu} + \frac{1}{\mu_0}\right)\tau_{\text{total}}\right]. \quad (13)$$

此时的PPDF方法就退化为传统DOAS方法,散射拉长(缩短)光程导致的 CO_2 吸收增加(减少),将被当作慢变成分在(10)式多项式 $P^{(2)}(\lambda)$ 中被拟合掉。而光程方法没有忽略散射对光程的影响,它利用 α, ρ 两个参数将这种影响间接改变 CO_2 吸收的作用在前向模型中考虑进去,这就从原理上校正了大气散射在 CO_2 反演中带来的误差。同时,光程方法虽然也有多项式拟合项,但光程方法将散射的影响以改变气体吸收的形式转换到快变成分中,将多项式拟合带来的误差进一步减小,这在一定程度上解决了超光谱探测器因光谱带宽较窄而导致拟合误差较大的问题。从以上对两种方法的原理比较可以看出,在利用SHS观测数据高精度反演 CO_2 中,PPDF方法比传统DOAS方法更具有优势,能够消除散射带来的误差。

4 结果与分析

4.1 数据选取

本文选取了内蒙古北部的一片沙漠区域($\text{N}42.7^\circ \sim \text{N}44.0^\circ, \text{E}110.5^\circ \sim \text{E}114.0^\circ$)和张家口以北($\text{N}41.0^\circ \sim \text{N}42.0^\circ, \text{E}113.3^\circ \sim \text{E}116.0^\circ$)的草地区

域在2010年6月10日至2012年6月10日之间的GOSAT-FTS观测数据来验证算法。所选择的两个区域都远离城市和工业厂区,直接受CO₂的排放影响小。沙漠区域的地表反射率较高,其上空可认为是典型的沙漠型气溶胶,气溶胶粒子的颗粒大;草地的反射率则比较低,其上空分布的是典型的乡村型气溶胶,气溶胶粒子的颗粒比较小。用于反演的卫星数据为GOSAT-FTS-Level 1B数据,与之对应Level 2数据产品作为光程方法和传统DOAS方法反演结果的参考标准。前向模型中所需的表面压力、温度和湿度廓线等大气数据从美国国家环境预报中心(NCEP)的6 h再分析数据中获取;太阳数据采用Kurucz太阳光谱,分子吸收线数据从高分辨率光谱谱线(HITRAN)中提取并利用逐线积分辐射传输模型(LBLRTM)计算分子吸收系数。

4.2 反演结果

对于沙漠区域的结果,传统DOAS方法反演得到的XCO₂均值为 403.50×10^{-6} ,与之对应的GOSAT-FTS-Level 2产品数据(作为参考标准)均值为 384.70×10^{-6} ,偏差为4.89%;光程方法反演得到的XCO₂结果均值为 388.24×10^{-6} ,与Level 2产品结果对比,偏差为0.92%,相比较传统DOAS方法的结果,偏差降低了3.77%。这说明采用光程方法反演XCO₂能够校正大气散射带来的误差影响;对于草地区域,传统DOAS方法反演得到的XCO₂均值为 393.09×10^{-6} ,与Level 2产品均值为 385.14×10^{-6} 偏差2.06%,光程方法反演得到的XCO₂结果均值为 389.95×10^{-6} ,与Level 2结果的偏差为1.25%,与传统DOAS方法相比,偏差降低了0.81%。两种区域的反演结果表明,从散射改变光程的角度考虑建立前向模型反演XCO₂对校正大气散射作用是有效的。光程方法对反演结果的离散度也有一定的改善,在沙漠和草地区域光程方法反演结果的标准偏差分别为 3.41×10^{-6} 和 2.96×10^{-6} ,比传统DOAS方法在这两个区域的标准偏差 4.58×10^{-6} 和 5.36×10^{-6} 要小。

4.3 结果分析

从图5和图6对比可以看出,当利用传统DOAS方法反演XCO₂时,沙漠区域的误差比草地区域的误差要大,这是因为沙漠区域地表反射率较高,散射介质与地表之间的地气耦合作用较强,光子发生多次散射而拉长光程的作用明显,从而导致传统DOAS方法在XCO₂的反演中估计值严重偏高;与此相反的是,草地的地表反射率较低,光子在散射介质与地表之间发生多次散射拉长光程的作用不如沙漠区域强,因此与参考值之间的偏差比沙漠区域小,甚至有少部分像元散射缩短光程占了主导作用,使得反演的XCO₂比参考值偏低。根据对比分析还可以看出,光程方法在沙漠区域对散射的校正效果明显比草地区域的散射校正效果好很多,出现这个现象可能的原因是沙漠上空的气溶胶粒子颗粒尺度大,相对于 $0.76 \mu\text{m}$ 和 $1.58 \mu\text{m}$ 都是属于大粒子,光在这两个波段之间散射性质的光谱变化较小, $0.76 \mu\text{m}$ 处反演得到的散射性质描述参量 α 、 ρ 经过Rayleigh修正和地表反射率修正后,可准确描述 $1.58 \mu\text{m}$ 处的光散射性质,而草地区域则不一样,草地上空的气溶胶为粒子颗粒较小的乡村型气溶胶,光在 $0.76 \mu\text{m}$ 和 $1.58 \mu\text{m}$ 之间散射性质的光谱变化较大,由于散射性质随光谱的变化较大,从 $0.76 \mu\text{m}$

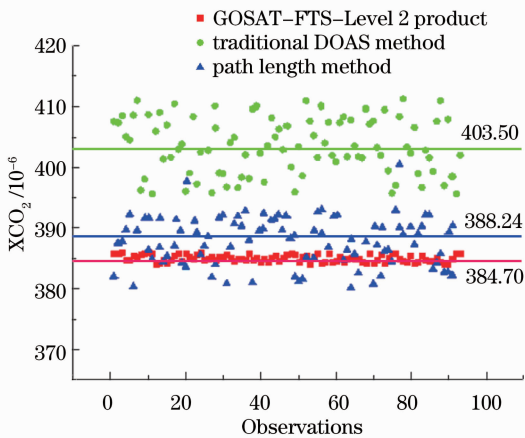


图5 沙漠区域的结果对比

Fig. 5 Comparison of desert region

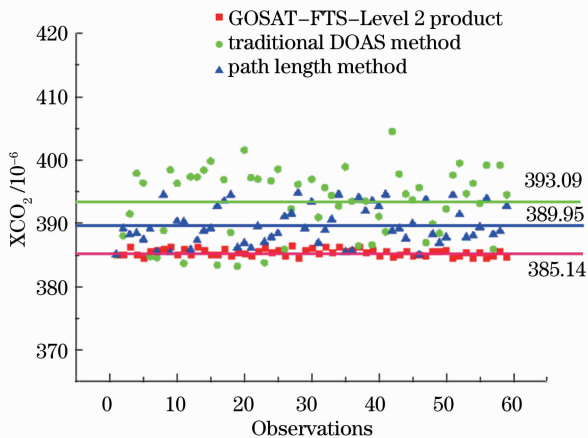


图6 草地区域的结果对比

Fig. 6 Comparison of meadow region

处获得的参量 α 、 ρ 与 $1.58 \mu\text{m}$ 处真实的 α 、 ρ 有一定的差异,这就使得校正效果不明显。

值得注意的是,不论是沙漠还是草地区域,不论是传统 DOAS 方法还是光程方法,与 GOSAT-FTS-Level 2 数据产品相比,反演结果的离散度都比较大(Level 2 产品中沙漠和草地区域标准偏差分别为 0.58×10^{-6} 和 0.55×10^{-6})。导致这种现象可能的原因是反演中所采用的表面压力、温度和湿度廓线等大气数据不够精确,各个像元中大气数据与真实值的差距不一样,有的与真实值差距很大,则反演结果误差大,有的与真实大气数据很接近,则反演结果的误差就小,误差的波动大则导致标准偏差大,在 XCO₂ 反演结果中的表现就是离散度高。

5 结 论

为了达到高精度反演大气 CO₂ 含量的目标,结合将来利用我国的高光谱卫星观测数据反演 CO₂ 的实际需求,针对大气散射对天基 CO₂ 反演精度的影响作了必要的研究和校正。分析了光在散射大气中的辐射传输过程以及大气散射改变光程的机理,从光程的角度研究了大气散射影响 CO₂ 反演的本质。在此基础上构建了以 PPDF 为基础的辐射传输前向模型,利用该模型反演了 GOSAT-FTS-Level 1B 卫星观测数据,并与传统 DOAS 方法的结果做了对比,结果显示该方法相比于传统 DOAS 方法,能够有效地校正大气散射给 XCO₂ 反演带来的误差,能够解决超光谱探测器因波段带宽较窄在反演中产生的问题。通过分析校正效果,认为在进一步的研究中可以通过以下途径完善该校正算法。

1) 3 个波段 (0.76 、 1.58 、 $2.06 \mu\text{m}$) 的联合反演。当前的校正算法中,对大颗粒的沙漠型气溶胶能取得较好的散射校正效果,但对于粒子尺度较小的乡村型气溶胶则效果不明显,这主要是由于散射性质随光谱变化而变化所致,因此可以考虑 3 个波段联合反演获得描述散射光程改变的 4 个参量 (α 、 ρ 、 h_e 、 γ), 3 个波段的共同约束将有利于克服这 4 个参数的光谱变化。

2) 获取更高精度的先验大气数据(包括表面压力、温度廓线、湿度廓线)并将其当作状态向量参与反演。当前算法中,大气数据从 NCEP 的 6 h 再分析数据中获取,虽然数据经过二维插值,但是其精度还是有限的。这些参数的误差会给反演带来误差以及增大离散度。因此,如果能够获取更高精度的大气数据,对提高反演精度和降低离散度是有益的;在

状态向量中增加大气参量,让表面压力、温度和湿度廓线同时参与反演,这也是提高大气数据精度从而改善 XCO₂ 反演精度并降低离散度的方法之一。

在以上问题得到解决的情况下,本算法对大气散射的校正将获得更好的效果,XCO₂ 的反演精度也将同步提高,该研究结果对正在进行的我国高光谱温室气体观测卫星高精度 CO₂ 反演算法设计提供了可行的解决方案。

参 考 文 献

- 1 R Pachauri, A Reisinger. IPCC Fourth Assessment Report [R]. IPCC, Geneva, 2007. 5-15.
- 2 C E Miller, D Crisp, P L DeCola, *et al.*. Precision requirements for space-based data [J]. J Geophysical Research: Atmospheres, 2007, 112(D10): D10314.
- 3 P Bousquet, P Peylin, P Ciais, *et al.*. Regional changes in carbon dioxide fluxes of land and oceans since 1980 [J]. Science, 2000, 290(5495): 1342-1346.
- 4 D Crisp, R Atlas, F-M Breon, *et al.*. The orbiting carbon observatory (OCO) mission [J]. Advances in Space Research, 2004, 34(4): 700-709.
- 5 A Kuze, H Suto, M Nakajima, *et al.*. Thermal and near infrared sensor for carbon observation Fourier-transform spectrometer on the Greenhouse Gases Observing Satellite for greenhouse gases monitoring [J]. Appl Opt, 2009, 48(35): 6716-6733.
- 6 H Bovensmann, J P Burrows, M Buchwitz, *et al.*. SCIAMACHY: mission objectives and measurement modes [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1999, 56(2): 127-150.
- 7 Liu Yi, Cai Zhaonan, Yang Dongxu, *et al.*. Optimization of the instrument configuration for TanSat CO₂ spectrometer [J]. Chin Sci Bull, 2013, 58(27): 2787-2789.
刘毅,蔡兆男,杨东旭,等.中国二氧化碳科学实验卫星高光谱探测仪光谱指标影响分析及优化方案[J].科学通报,2013,58(27): 2787-2789.
- 8 Shi Guangyu, Dai Tie, Xu Na, *et al.*. 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,等.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.
- 9 J Mao, S R Kawa. Sensitivity studies for space-based measurement of atmospheric total column carbon dioxide by reflected sunlight [J]. Appl Opt, 2004, 43(4): 914-927.
- 10 D O'Brien, P Rayner. Global observations of the carbon budget. 2: CO₂ column from differential absorption of reflected sunlight in the 1.61 μm band of CO₂[J]. J Geophysical Research, 2002, 107(D18): 4354.
- 11 E Dufour, F-M Bréon. Spaceborne estimate of atmospheric CO₂ column by use of the differential absorption method: error analysis [J]. Appl Opt, 2003, 42(18): 3595-3609.
- 12 S Houweling, W Hartmann, I Aben, *et al.*. Evidence of systematic errors in SCIAMACHY-observed CO₂ due to aerosols [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2005, 5(11): 3003-3013.
- 13 A Benedetti, J-J Morcrette, O Boucher, *et al.*. Aerosol analysis and forecast in the European centre for medium-range weather forecasts integrated forecast system: 2. data assimilation [J]. J Geophysical Research, 2009, 114(D13): D13205.
- 14 J-J Morcrette, O Boucher, L Jones, *et al.*. Aerosol analysis and forecast in the European centre for medium-range weather forecasts integrated forecast system: forward modeling [J]. J

- Geophysical Research, 2009, 114(D6): D06206.
- 15 Zhang Zhaoyang, Su Lin, Chen Liangfu, *et al.*. Retrieval and analysis of aerosol lidar ratio at several typical regions in China [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0513002.
张朝阳, 苏林, 陈良富, 等. 中国典型地区气溶胶激光雷达比反演与分析 [J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0513002.
- 16 Shi Jianzhong, Cao Nianwen. Tropospheric aerosol measurements by lidar in northern suburbs of Nanjing [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(10): 100101.
施建中, 曹念文. 南京北郊对流层气溶胶激光雷达观测 [J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(10): 100101.
- 17 Ye Song, Fang Yonghua, Hong Jin, *et al.*. Experimental study on spatial heterodyne spectroscopy [J]. Opto-Electronic Engineering, 2007, 34(5): 84–88.
叶松, 方勇华, 洪津, 等. 空间外差光谱技术实验研究 [J]. 光电工程, 2007, 34(5): 84–88.
- 18 Shi Hailiang, Fang Yonghua, Wu Jun, *et al.*. Study on spectral calibration of a novel interferometric spectrometer with super-resolution capability [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(5): 0528002.
施海亮, 方勇华, 吴军, 等. 新型超分辨干涉型光谱仪光谱定标研究 [J]. 光学学报, 2012, 32(5): 0528002.
- 19 Shi Hailing, Xiong Wei, Li Zhiwei, *et al.*. Phase error correction of spatial heterodyne spectrometer [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 0330003.
施海亮, 熊伟, 李志伟, 等. 空间外差光谱仪相位误差修正 [J]. 光学学报, 2013, 33(3): 0330003.
- 20 U Platt, D Perner, H Pätz. Simultaneous measurement of atmospheric CH₂O, O₃, and NO₂ by differential optical absorption [J]. J Geophysical Research: Oceans (1978–2012), 1979, 84(C10): 6329–6335.
- 21 Liu Jin, Si Fuqi, Zhou Haijin, *et al.*. Measurement of atmospheric water vapor column density with passive differential optical absorption spectroscopy technology [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0801002.
刘进, 司福祺, 周海金, 等. 被动差分吸收光谱技术测量大气中水汽垂直柱浓度 [J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0801002.
- 22 Y Yoshida, Y Ota, N Eguchi, *et al.*. Retrieval algorithm for CO₂ and CH₄ column abundances from short-wavelength infrared spectral observations by the greenhouse gases observing satellite [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2011, 4(4): 717–734.
- 23 A Bril, S Oshchepkov, T Yokota, *et al.*. Parameterization of aerosol and cirrus cloud effects on reflected sunlight spectra measured from space: application of the equivalence theorem [J]. Appl Opt, 2007, 46(13): 2460–2470.
- 24 A Bril, S Oshchepkov, T Yokota. Correction of atmospheric scattering effects in space-based observations of carbon dioxide: model study of desert dust aerosol [J]. J Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2008, 109(10): 1815–1827.
- 25 S Oshchepkov, A Bril, T Yokota. PPDF-based method to account for atmospheric light scattering in observations of carbon dioxide from space [J]. J Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012), 2008, 113(D23).
- 26 C D Rodgers. Inverse Methods for Atmospheric Sounding: Theory and Practice [M]. Singapore: World Scientific, 2000. 81–99.

栏目编辑: 王晓琰