

# CO<sub>2</sub>反演中卫星数据的云污染处理方法研究

江新华 王先华 叶函函 卜婷婷 桑浩 易维宁

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** 在 O<sub>2</sub>-A 波段进行了温室气体卫星数据的云污染问题研究,并从光程的角度分析了散射对 CO<sub>2</sub>反演的影响,提出了一种解决 CO<sub>2</sub>反演中云污染问题的方法。对 GOSAT L1B 数据的处理结果显示晴空、有云、待定像素分别涵盖了 83.58%、9.70%、6.72% 的 L2 数据;像素的 CO<sub>2</sub>反演结果中,晴空、薄卷云像素的结果与 L2 保持较高一致,其余像素的结果普遍低于 L2 结果。O<sub>2</sub>-A 波段云检测有其优势但仍存在一定的局限性,如对薄卷云识别的准确性不足等,而光程法散射校正能有效改善薄卷云散射导致的 CO<sub>2</sub>反演误差,可作为云检测的一个有效补充,两者结合是解决云污染问题的一种有前景的方法,同时在云检测中对薄卷云像素占多数的 I 类待定像素应予以更高重视。

**关键词** 大气光学; 全球变化; 温室气体; 云污染; 大气散射

**中图分类号** P407.4; O433.4

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201535.0801001

## Cloud Contaminated Satellite Data Processing Method in CO<sub>2</sub> Retrieving

Jiang Xinhua Wang Xianhua Ye Hanhan Bu Tingting Sang Hao Yi Weining

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** Cloud contamination of greenhouse gas satellite data is investigated by using O<sub>2</sub>-A band, the scattering effects on CO<sub>2</sub> retrieval from optical path-length is analyzed and a new method for solving cloud contamination problem is proposed. The results show that 83.58%, 9.70%, and 6.72% L2 data are contained in clear, cloud, and undetermined scenes. The CO<sub>2</sub> retrieval of these clear scene and cirrus scene appears highly agreement with L2 product, but the other CO<sub>2</sub> retrieval is generally lower than L2 product. Cloud screening in O<sub>2</sub>-A band has its own advantage but also existing insufficiency like the misidentifying of thin cirrus. Fortunately, the scattering correction method through optical path-length is an effective supplement to O<sub>2</sub>-A band cloud screening as it can improve CO<sub>2</sub> retrieval bias due to cirrus scattering, combining them to account for cloud contamination is a promising method. Simultaneously, undetermined-I scene should be pay more attention since these undetermined scene contained abundance scene covered by cirrus.

**Key words** atmospheric optics; global change; greenhouse gas; cloud contamination; atmospheric scattering

**OCIS codes** 010.1290; 010.1615; 290.1310; 280.4991

## 1 引 言

政府间气候变化专门委员会(IPCC)第4次评估报告指出,大气 CO<sub>2</sub>浓度的上升是造成全球变暖的最重要因素之一<sup>[1]</sup>。CO<sub>2</sub>的全球观测对气候研究具有重要意义,实现全球连续观测、区域尺度上大气柱平均 CO<sub>2</sub>干空气混合比  $X_{\text{CO}_2}$  精度优于 1% 是气候研究的基本要求<sup>[2-5]</sup>。针对全球变化研究的应用需求,国内外开展了相关

收稿日期: 2015-02-06; 收到修改稿日期: 2015-04-14

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 CO<sub>2</sub>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等方面的研究。

E-mail: xhwang@aiofm.ac.cn(通信联系人)

探测器的研发,目前日本温室气体观测卫星(GOSAT)和美国轨道碳观测器2号(OCO-2)已在轨运行,欧洲的碳监测卫星(CarbonSat)、中国的碳卫星(TanSat)以及应用空间外差技术的温室气体监测卫星也将在2015~2016年间发射<sup>[6-12]</sup>。

卫星观测有其独特优势,但同时云污染和大气散射的影响则导致卫星观测在精度上存在不足。地球表面上空大范围被云所覆盖,以GOSAT上分辨率10 km左右的傅里叶变换光谱仪(FTS)圆形视场为例,全球年平均晴空率只有大约11%<sup>[5,13]</sup>,对卫星数据进行云检测以筛选出晴空像素是进行温室气体反演的前提。薄卷云、气溶胶对光的散射作用是影响CO<sub>2</sub>反演精度的重要因素,Aben等<sup>[14]</sup>的研究显示,在反射率为0.05、光学厚度为0.05的卷云在CO<sub>2</sub>反演中所引入的误差可高达8%;Schneising等<sup>[15]</sup>的研究表明,光学厚度为0.03、云高12 km的卷云在CO<sub>2</sub>柱浓度反演中会产生8.8%的反演误差;Mao等<sup>[16]</sup>的敏感性研究指出,薄卷云、海洋型、乡村型、城市型气溶胶对CO<sub>2</sub>反演带来的误差约为 $16\times 10^{-6}$ 、 $12\times 10^{-6}$ 、 $5\times 10^{-6}$ 、 $1.6\times 10^{-6}$ 。薄卷云由于难以准确识别一直以来都是云检测研究的难题<sup>[17]</sup>,而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<sup>[18-21]</sup>。因此,对卫星数据进行云检测以及对薄卷云、气溶胶的大气散射校正是实现CO<sub>2</sub>高精度天基观测的关键。

本文的目标是结合O<sub>2</sub>-A波段云检测方法和光程法大气散射校正,探索解决温室气体天基观测中的云污染问题。介绍了O<sub>2</sub>-A波段云检测方法和光程法大气散射校正,并利用GOSAT数据对算法进行了测试及验证基于空间外差技术的我国温室气体监测仪,在空间分辨率、光谱分辨率等关键参数上与GOSAT有很大相似性,为了将来能够很好地利用这一卫星遥感数据,基于GOSAT数据进行预先研究是一项非常必要的工作。

## 2 云检测方法

温室气体反演中对卫星观测数据进行云检测主要有两种解决方案,一种是利用其他卫星载荷的多光谱观测数据进行云检测,然后将云检测结果与温室气体观测载荷进行像素匹配来判定目标区域是否有云,以日本GOSAT为代表<sup>[22]</sup>;另一种是本文所采用的O<sub>2</sub>-A波段云检测方法,它的基本原理:将晴空假定的模拟光谱与卫星实测光谱相结合,通过比较反演所得云判定参量的值与判定阈值的关系来进行云检测。由于O<sub>2</sub>-A波段云检测所利用的是温室气体观测载荷自身的观测数据,因此该方法可以规避不同卫星载荷之间像素匹配带来的误差,美国OCO-2根据这一原理发展了氧气A波段(ABO<sub>2</sub>)云检测算法<sup>[17,23]</sup>。

### 2.1 反演方法与判定参量

反演本质上是 minimized 模拟光谱与实测光谱之间的差异,以无云、无气溶胶的晴空假定计算模拟光谱,当结合实测光谱反演得到的大气参量(如表面压力)与先验数据存在较大差异、产生较大的光谱残差时,则表示观测区域违背了晴空假定而被云或高浓度气溶胶所覆盖。反演迭代与代价函数的计算公式分别如下:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + [\mathbf{K}_k^T \mathbf{S}_y^{-1} \mathbf{K}_k]^{-1} \mathbf{K}_k^T \mathbf{S}_y^{-1} [\mathbf{y} - \mathbf{F}(\mathbf{x}_k)], \quad (1)$$

$$\chi^2 = [\mathbf{y} - \mathbf{F}(\mathbf{x}_k)]^T \mathbf{S}_y^{-1} [\mathbf{y} - \mathbf{F}(\mathbf{x}_k)], \quad (2)$$

式中 $\mathbf{x}_k$ 是状态向量, $\mathbf{K}_k$ 是Jacobian矩阵, $\mathbf{S}_y$ 是测量误差协方差矩阵, $\mathbf{y}$ 是观测光谱, $\mathbf{F}(\mathbf{x}_k)$ 是模拟光谱。反演中状态向量包含4个参量:表面压力 $P_s$ 、温度廓线偏移量 $\Delta T$ 、表面反射率 $\alpha_1$ (波段起始处)和 $\alpha_2$ (波段结束处)。

利用逐线积分辐射传输模型(LBLRTM)计算模拟光谱<sup>[24]</sup>,根据(1)、(2)式分别对晴空像素和有云像素进行反演,从反演结果可看出,晴空像素与有云像素得到的表面压力差 $\Delta P$  ( $\Delta P = |P_0 - P_s|$ ,  $P_0$ 为先验表面压力)和代价函数 $\chi^2$ 有明显差异,如图1(a)、(b)所示。

从这个差异中我们可以考虑选择表面压力差 $\Delta P$ 和代价函数 $\chi^2$ 作为云检测的判定参量。当某像素反演结果 $\Delta P < \Delta P_1$ 且 $\chi^2 < \chi_1^2$ 时( $\Delta P_1$ 、 $\chi_1^2$ 分别是云检测中表面压力差 $\Delta P$ 和代价函数 $\chi^2$ 的判定阈值),可判定该像素为晴空的概率非常大;当 $\Delta P > \Delta P_1$ 且 $\chi^2 > \chi_1^2$ 时,可判定该像素为有云的的概率非常大;当 $\Delta P < \Delta P_1$ 且 $\chi^2 > \chi_1^2$ ,或者 $\Delta P > \Delta P_1$ 且 $\chi^2 < \chi_1^2$ 时,则将该像素为标记为待定。这样,通过 $\Delta P$ 和 $\chi^2$ 两个判定参量利用阈值法即可实现O<sub>2</sub>-A波段的卫星数据云检测。

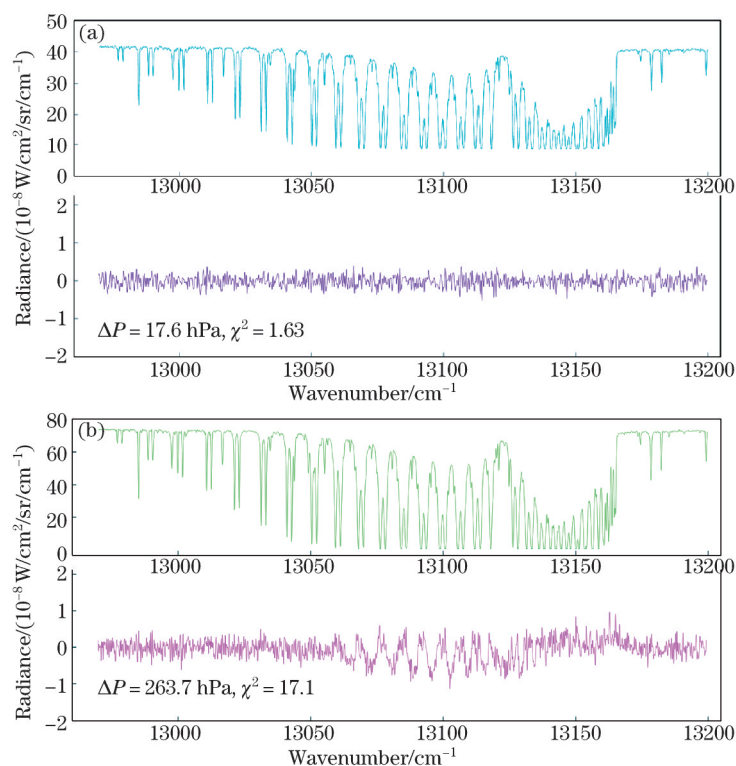


图 1 反演结果

Fig.1 Retrieval result

## 2.2 判定阈值选取

采用阈值判定法进行云检测时,判定阈值的优劣决定着云检测效果的准确性,因此选取合适的判定阈值是关键。为确定出合适的判定阈值,本文选取了2011年GOSAT-FTS在轨道路径8的全年晴空数据,对其进行反演并统计云检测判定参量  $\Delta P$  和  $\chi^2$  的分布特征,结果如图2、3所示。

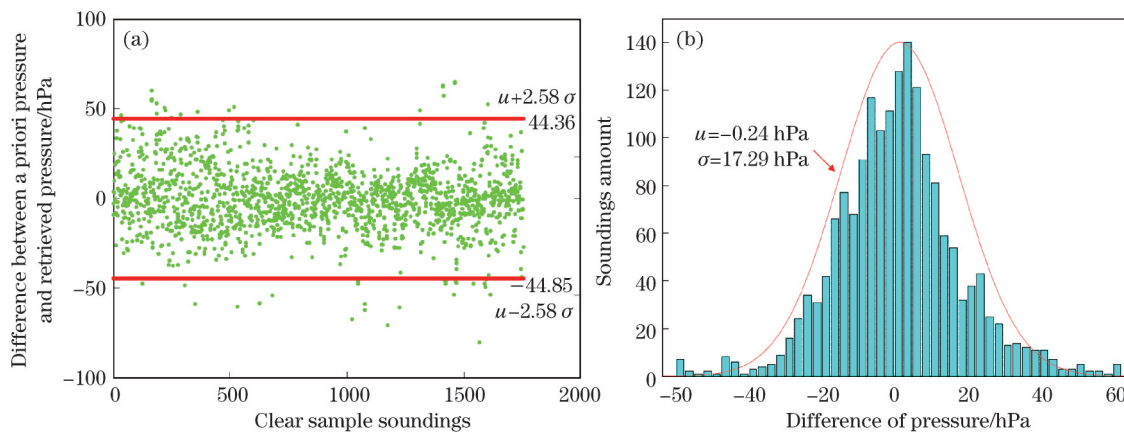


图 2 (a)晴空像素的表面压力差;(b)表面压力差分布特征

Fig.2 (a)  $\Delta P$  of clear scene; (b) distribution of  $\Delta P$

从图2、3中可看出,晴空像素反演得到的表面压力差  $\Delta P$  和代价函数  $\chi^2$  的分布特征基本符合正态分布。正态分布在  $(\mu - 2.58\sigma) \sim (\mu + 2.58\sigma)$  范围内包含了99%的样本数量<sup>[25]</sup>( $\mu$  为均值,  $\sigma$  为标准差)。考虑到反演误差以及极少量样本本身的不准确,表面压力差以  $\max(|\mu - 2.58\sigma|, |\mu + 2.58\sigma|)$ 、代价函数以  $\mu + 2.58\sigma$  作为判定阈值时包含了绝大部分(99%以上)的样本,据此设置判定阈值是合理的。根据图2、3对经验数据的分析,  $\Delta P$  阈值设为44.85 hPa,  $\ln(\chi^2)$  阈值设为1.18。

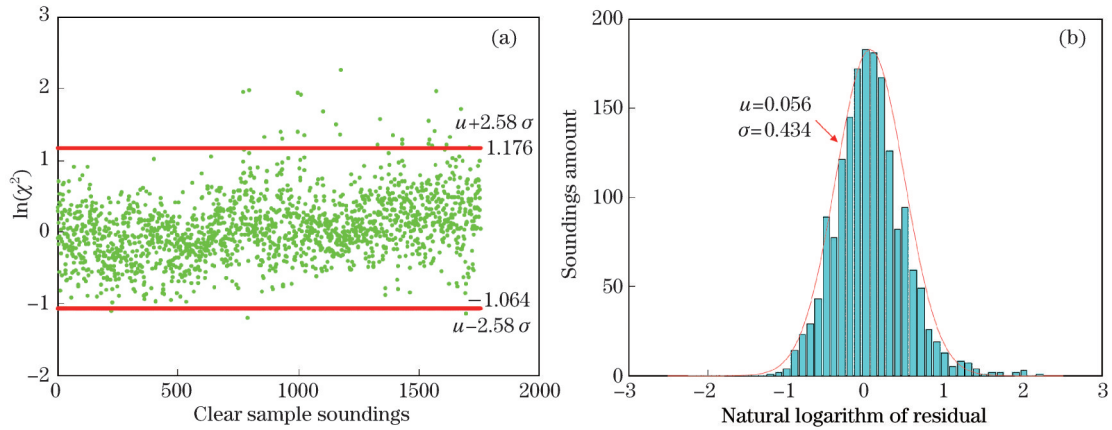


图3 (a)晴空像素的代价函数;(b)代价函数分布特征

Fig.3 (a) Cost function of clear scene; (b) distribution of cost function

### 3 大气散射校正方法

通过了云筛选的卫星观测数据可用于进一步的大气参数反演,但即使经过云筛选,少量的卷云及亚像素尺度的云依然有可能存在。对高精度 CO<sub>2</sub>反演而言,薄卷云、气溶胶的大气散射会带来不可忽视的误差,解决大气散射在反演中带来的误差是提高 CO<sub>2</sub>反演精度的关键。传统的差分吸收光谱(DOAS)方法对散射的处理是直接将其当作缓变成分以多项式拟合的方式消除其影响,精度有限<sup>[26-27]</sup>;全物理方法对散射的处理是将散射介质的光学厚度、单散射反照率、相函数等光学参数考虑进辐射传输模型中计算模拟光谱<sup>[28-29]</sup>,精度高但这些参数难以精确获得,同时传统 DOAS 方法与全物理方法都没有描述散射在 CO<sub>2</sub>反演中引入误差的本质。大气散射在反演中带来误差本质上是改变了光程进而改变光子被 CO<sub>2</sub>吸收的量,从散射的物理本质对其在 CO<sub>2</sub>反演中所带来误差进行校正是一种有前途的方法,定量化描述散射导致的光程改变量并将其反演出来是实现光程法校正反演误差的前提和关键。

#### 3.1 光程改变的量化描述

在无云、无气溶胶的理想大气条件下,光是从大气顶入射到达地面,经过地面反射后再次穿过大气进入卫星探测器。当大气中存在薄卷云、气溶胶等散射介质时,将散射介质模型化为一个散射薄层,此时光的辐射传输过程如图4所示。

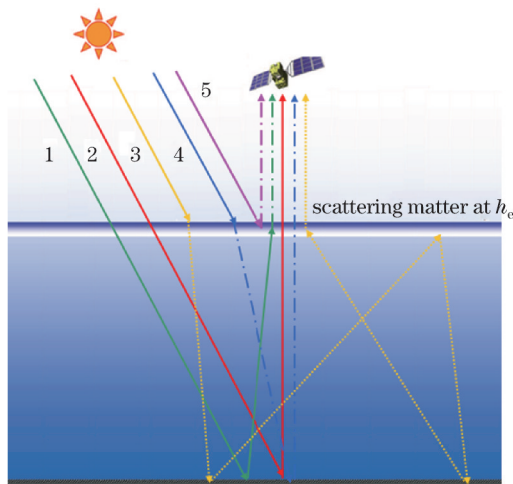


图4 大气散射对光程的影响

Fig.4 Effect of atmospheric scattering on optical path

从图4可看到,相对于理想大气条件下的辐射传输路径(如路径2,几何光程),散射会拉长(如路径1、3)或缩短(如路径4、5)光子的光程,从而增加或减少光被 CO<sub>2</sub>吸收的概率,如果忽略散射改变光程的效应则会在

反演中高估或者低估 CO<sub>2</sub> 的含量。直接计算各个光子的光程显然是难以实现的,考虑以几何光程为参照,以一个参数  $\alpha$  描述散射导致的光程缩短量,一个参数  $\rho$  描述散射导致的光程拉长量,结合模型化的散射层高  $h_e$  和光程概率密度调整因子  $\gamma$  共 4 个参量联合定量化描述大气散射对光程的改变。

按照这种思想,图 4 中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<sup>[30-31]</sup>

$$T_{\text{eff}} = \alpha T_2 + (1 - \alpha) T_1 T_2, \quad (3)$$

式中

$$T_1 = \exp\left[-\left(\frac{1}{\mu} + \frac{1}{\mu_0}\right)(1 + \delta)\tau_1\right], \quad (4)$$

$$T_2 = \exp\left[-\left(\frac{1}{\mu} + \frac{1}{\mu_0}\right)\tau_2\right], \quad (5)$$

$$\tau_1 = \int_0^{h_e} k(h)dh, \quad \tau_2 = \int_{h_e}^{h_a} k(h)dh, \quad \delta = \rho \exp[-\gamma(\tau_1 + \tau_2)], \quad (6)$$

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(卫星)天顶角的余弦,  $\alpha$  表示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,  $\rho$  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,  $\gamma$  描述光程概率密度函数的线型。根据总透射率  $T_{\text{eff}}$  建立的前向模型为

$$Y_\nu = -\ln\left(\langle S \cdot T_{\text{eff}} \rangle_\nu\right) + P^{(2)}(\lambda), \quad (7)$$

式中  $S$  为大气层外太阳光谱,  $\nu$  为波数,尖括号  $\langle \rangle$  表示与仪器线型函数相卷积,

$$P^{(2)}(\lambda) = a_1 + a_2(\lambda_1 - \lambda_j) + a_3(\lambda_1 - \lambda_j)^2, \quad (8)$$

用于拟合除散射之外的缓变成分。

大气中 O<sub>2</sub> 的含量已知且稳定, O<sub>2</sub> 在 0.76  $\mu\text{m}$  波段(O<sub>2</sub>-A 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。根据这个性质,在该波段通过(7)式计算模拟光谱,结合卫星观测光谱利用 Levenberg-Marquadt 方法将描述散射影响光程的 4 个参量  $\alpha$ 、 $\rho$ 、 $h_e$ 、 $\gamma$  反演出来<sup>[32]</sup>。

### 3.2 CO<sub>2</sub>反演中的大气散射校正

0.76  $\mu\text{m}$  波段能够用于量化描述散射导致的光程改变量,但 0.76  $\mu\text{m}$  与 1.58  $\mu\text{m}$  在 Rayleigh 散射和地表反射率上的差异使得 0.76  $\mu\text{m}$  波段处获得的参数  $\alpha$ 、 $\rho$  难以准确描述 1.58  $\mu\text{m}$  处的散射性质,需对这两个参数进行修正<sup>[31]</sup>。

Rayleigh 影响修正为

$$\alpha^* = \alpha - \alpha_R, \quad \rho^* = \rho - \rho_R, \quad (9)$$

反射率影响修正为

$$\alpha(\Gamma_{1.58}) = \alpha^*(\Gamma_{0.76})(\Gamma_{0.76}/\Gamma_{1.58}), \quad \rho(\Gamma_{1.58}) = \rho^*(\Gamma_{0.76})\exp(\Gamma_{1.58} - \Gamma_{0.76}), \quad (10)$$

式中  $\Gamma$  为地表反照率,参数  $\alpha_R$ 、 $\rho_R$  通过模拟仿真获得。

经过这两步修正后,即可将  $\alpha(\Gamma_{1.58})$ 、 $\rho(\Gamma_{1.58})$ 、 $h_e$ 、 $\gamma$  用于 1.58  $\mu\text{m}$  波段处的 CO<sub>2</sub> 含量反演。根据(7)式在 1.58  $\mu\text{m}$  处计算模拟光谱,状态向量为大气层各子层的 CO<sub>2</sub> 浓度值,结合 1.58  $\mu\text{m}$  处的卫星实测光谱利用 Levenberg-Marquadt 法反演得到各个子层的 CO<sub>2</sub> 浓度值,最后按压力平均获得<sup>[33]</sup>

$$X_{\text{CO}_2} = \frac{1}{P_0 - P_T} \int_{P_T}^{P_0} x(P)dP, \quad (11)$$

式中  $P_0$  表面压力,  $P_T$  大气顶压力,  $x(P)$  为压力为  $P$  的分层处的 CO<sub>2</sub> 浓度,如此便实现了从光程的角度校正反演中大气散射带来的误差并实现  $X_{\text{CO}_2}$  的反演。

联立(3)、(4)、(5)、(6)式,可得到光程方法中全程透射率的计算公式为

$$T_{\text{eff}} = \alpha \cdot \exp\left\{-\left(\frac{1}{\mu} + \frac{1}{\mu_0}\right)[1 + \rho \exp(-\gamma\tau_1)]\tau_1\right\} + (1 - \alpha) \cdot \exp\left\{-\left(\frac{1}{\mu} + \frac{1}{\mu_0}\right)[1 + \rho \exp(-\gamma\tau_1)]\tau_1\right\} \cdot \exp\left[-\left(\frac{1}{\mu} + \frac{1}{\mu_0}\right)\tau_2\right]. \quad (12)$$

当不考虑大气散射的影响时(即光程参数  $\alpha = \rho = 0$ ),光程方法即退化为传统 DOAS 方法,全程透射率的计算方法退化为

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

从(12)、(13)式可看出,光程方法没有忽略散射改变光程从而间接影响  $\text{CO}_2$  吸收的影响,它利用  $\alpha$ 、 $\rho$  两个参数将这种影响在前向模型中考虑进去,而没有像传统 DOAS 方法那样将散射的影响当作缓变成分在(8)式中拟合掉,这从理论上证明了光程方法相对于传统 DOAS 方法在反演精度上是有优势的,本课题组之前的研究中对实测数据的反演结果也证明了光程方法相对于传统 DOAS 方法的精度优势<sup>[27]</sup>。相比于全物理方法,光程方法通过在前向模型中定量化光程改变量的途径来考虑大气散射对  $\text{CO}_2$  的影响,无需输入散射介质的光学厚度、单散射反照率、散射相函数、粒子尺度分布等难以精确获取的先验信息,而在全物理方法中这些参数都是必不可少的。同时,全物理法中普遍应用离散纵标法辐射传输(DISORT),这种方法对散射的处理比较耗时,而光程方法以解析表达的方式给出了前向模型的计算方法,具有时间高效性,这对海量卫星数据的流程化处理有重要意义。

### 4 结果与分析

大兴安岭区域(经纬度:118°E~130°E,50°N~55°N)为森林所覆盖,下垫面性质相对均匀单一、气溶胶类型也比较相似,适合反演算法的验证。因此选取 GOSAT 卫星在该区域 2012 全年观测数据用于实验,其中 L1B 数据用本文算法进行云检测和  $\text{CO}_2$  反演,L2 数据用于算法验证。根据第 2、3 节中所介绍方法对 L1B 数据进行云检测和  $X_{\text{CO}_2}$  反演,并按云检测结果分成三类:高晴空概率像素( $\Delta P < \Delta P_1$ 且 $\chi^2 < \chi_1^2$ )、高有云概率像素( $\Delta P > \Delta P_1$ 且 $\chi^2 > \chi_1^2$ )、待定像素( $\Delta P < \Delta P_1$ 且 $\chi^2 > \chi_1^2$ ,或者 $\Delta P > \Delta P_1$ 且 $\chi^2 < \chi_1^2$ ),结果如表 1、图 5、图 6、图 7 所示(NIES 为日本的国立环境研究所)。

表 1 云检测结果

Table 1 Result of cloud detection

	Scene amounts	Amounts and proportion of scene's spatio-temporal consistent with L2
L2 product	134	134(100%)
High probability clear	173	112(83.58%)
High probability cloudy	863	13(9.70%)
Undetermined-I	41	8(5.97%)
Undetermined-II	66	1(0.75%)

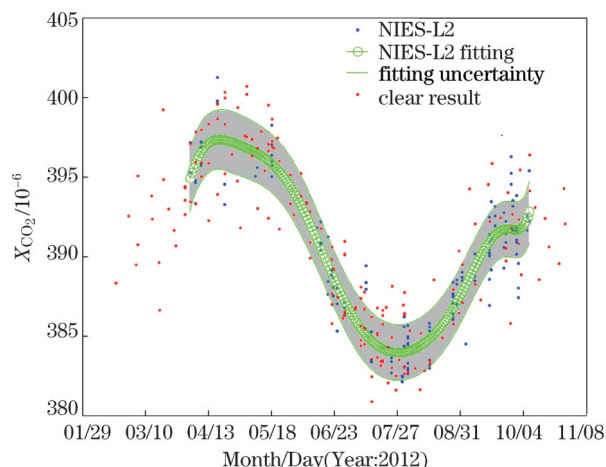


图 5 高晴空概率像素的反演结果

Fig.5 Retrieval result of high probability clear scenes

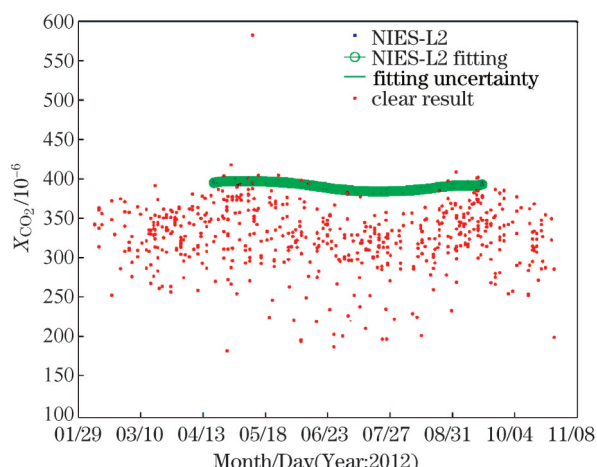


图 6 高有云概率像素的反演结果

Fig.6 Retrieval result of high probability cloudy scenes

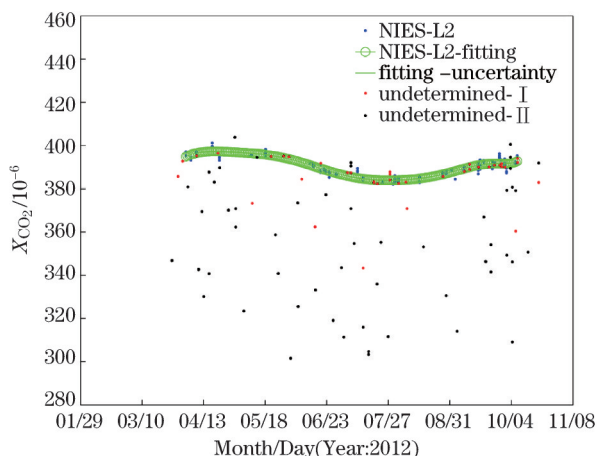


图7 待定像素的反演结果

Fig.7 Retrieval result of undetermined scenes

#### 4.1 高晴空概率像素的分析

高晴空概率像素即云检测结果中  $\Delta P < \Delta P_1$  且  $\chi^2 < \chi_1^2$  的像素,从表1可看到,高晴空概率像素与L2产品有112个同时空坐标的重叠观测点,占L2产品总数的83.6%,也即本文云检测结果覆盖了至少83.6%以上的实际晴空像素,这表明本文云检测方法能够以较高的准确率识别晴空像素;同时从图5可看到,被判定为高晴空概率像素的  $X_{CO_2}$  反演结果在季节变化趋势上与L2产品基本一致,且大部分反演结果落在L2趋势拟合曲线的误差范围内。图5的结果可以说明两个问题:1)显示本文的光程法大气散射校正是有效的,它降低了大气散射(包括薄卷云散射、气溶胶散射)这个反演中最重要的误差源在  $X_{CO_2}$  反演中所引入的误差;2)对不同时间的高晴空概率像素  $X_{CO_2}$  反演结果与L2结果保持较高的一致性,从侧面证明本文云检测算法的是准确可靠的,同时也表明云检测算法偏向于“晴空保守”(即发生误判时,“将晴空判为有云”的可能性高于“将有云判为晴空”)。

高晴空概率的像素数量比L2产品数量要多39个,其原因一方面是L2的生成过程中“后续筛选”流程将反演质量不好的晴空像素剔除掉了<sup>[28]</sup>;另一方面,有研究显示  $O_2-A$  波段云检测算法对光学厚度较小(小于0.2)的薄卷云在检测上存在一定难度<sup>[17]</sup>,因此图5中可能薄卷云覆盖的像素被判为晴空像素。 $X_{CO_2}$  的反演离散度普遍比L2偏大,原因可能是输入大气参数(如温度、压力等)精度上的不足;离散度较大的现象在春、冬季尤其明显,这可能是这些时间段中太阳天顶角太大导致观测数据的信噪比水平低且光程较长,增大了反演的随机误差。

#### 4.2 高有云概率像素的分析

高有云概率像素即云检测结果中  $\Delta P > \Delta P_1$  且  $\chi^2 > \chi_1^2$  的像素,表1中高有云概率像素与L2产品有13个同时空坐标的重叠观测点,占L2产品总数的9.70%,本文云检测存在一定的概率将晴空误判为有云。图6所展示的  $X_{CO_2}$  反演结果总体均值远低于L2结果,这是因为有云像素反演得到的结果是云层以上而非整层大气中的  $CO_2$  含量,这间接证明这些像素确实被云覆盖、本文云检测算法是可靠的;  $X_{CO_2}$  反演结果离散度很大,这是云顶高度分布各有不同所导致的。

#### 4.3 待定像素的分析

待定像素为云检测中  $\Delta P < \Delta P_1$  且  $\chi^2 > \chi_1^2$  (I类待定)、 $\Delta P > \Delta P_1$  且  $\chi^2 < \chi_1^2$  (II类待定)的像素,与L2产品同时空坐标的待定像素共有9个,占L2像素数的6.7%,这个结果显示本文云检测算法存在将晴空像素误判为待定像素的可能性。

对于41个I类待定像素,其中有26个反演结果落在L2的误差范围内,占I类待定像素总量的63.4%;I类待定像素存在两种可能:一种是光学厚度小的薄卷云,薄卷云的透射率高、散射强且云高较高,透射率高使得大部分光都经历了全程辐射传输,因此反演得到的表面压力与先验地表压力接近( $\Delta P$ 较小),而散射效果

强外加云层高度高,使得薄卷云散射会导致剧烈的光程改变,这种改变在光谱上的表现就是不同吸收强度之间的差异更加明显,这就导致反演后的光谱拟合残差较大( $\chi^2$ 较大),这种情况体现在前面提到的26个待定像素中;另一种就是低云情况,低云由于云高较低以致反演得到的 $\Delta P$ 较小,同时输入参数的误差以及算法中还存在有待进一步完善的地方使得代价函数高于判定阈值 $\chi^2$ 。而66个II类待定像素中,只有2个的反演结果落在L2的误差范围内,占II类待定像素总量的3.03%,其余绝大部分反演结果都比L2要小,这说明II类待定像素的绝大部分是被云覆盖的,这部分像素的结果分析与高有云像素类似。

以上对I类、II类待定像素的结果分析表明,I类待定像素中可能存在较高比例的薄卷云,而薄卷云散射的影响可以在光程法大气散射校正中得到修正,使得反演结果接近L2产品的精度,在后续的工作中对I类待定像素应予以比II类待定像素更多的重视,而II类待定像素可考虑当作有云像素舍弃。

## 5 结 论

针对全球气候变化研究对大范围、高精度CO<sub>2</sub>浓度反演的需求,结合O<sub>2</sub>-A波段云检测方法和光程法大气散射校正,提出了一种解决CO<sub>2</sub>反演中云污染问题的新方法,并利用GOSAT卫星的L1B数据和L2产品对该方法进行了测试和验证。对高晴空概率像素、高有云概率像素、I类和II类待定像素的反演结果分析表明:1) O<sub>2</sub>-A波段云检测算法具有较高的准确性,但仍存在一定的不足,如对于低云、薄卷云存在误判的可能性;2) 光程法大气散射校正能有效降低薄卷云等大气散射介质引起的 $X_{\text{CO}_2}$ 反演误差,使得晴空像素、薄卷云覆盖像素的 $X_{\text{CO}_2}$ 反演结果与L2结果保持较高的一致性;3) 云检测算法对薄卷云存在误判的可能性,如低云、卷云等,而光程法能一定程度地校正卷云散射引起的 $X_{\text{CO}_2}$ 反演误差,因此O<sub>2</sub>-A波段云检测与光程法大气散射校正的相结合是提升 $X_{\text{CO}_2}$ 反演精度、增加可用数据量的一种有前景的手段,同时,鉴于光程法大气散射校正对薄卷云散射的校正效果,在进一步工作中对薄卷云、低云占多数的I类待定像素应予以更高的重视。温室气体反演中的云污染处理是一个具有挑战性的工作,有待于更深入地研究,该方法对我国基于空间外差技术的温室气体观测卫星的云污染数据处理具有科学探索和技术积累意义。

## 参 考 文 献

- 1 R Pachauri, A Reisinger. IPCC Fourth Assessment Report[R]. IPCC, Geneva, 2007: 5-15.
- 2 P J Rayner, D M O'Brien. The utility of remotely sensed CO<sub>2</sub> concentration data in surface source inversions[J]. Geophysical Research Letters, 2001, 28(1): 175-178.
- 3 S Houweling, F M Breon, I Aben, *et al.*. Inverse modeling of CO<sub>2</sub> sources and sinks using satellite data: A synthetic inter-comparison of measurement techniques and their performance as a function of space and time[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2004, 4: 523-538.
- 4 S C Olsen, J T Randerson. Differences between surface and column atmospheric CO<sub>2</sub> and implications for carbon cycle research[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2004, 109(D2).
- 5 C E Miller, D Crisp, P L DeCola, *et al.*. Precision requirements for space-based  $X_{\text{CO}_2}$  data[J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112(D10): D10314.
- 6 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]. Applied Optics, 2009, 48(35): 6716-6733.
- 7 D Crisp, R M Atlas, F-M Breon, *et al.*. The orbiting carbon observatory (OCO) mission[J]. Advances in Space Research, 2004, 34(4): 700-709.
- 8 M Buchwitz, M Reuter, H Bovensmann, *et al.*. Carbon monitoring satellite (CarbonSat): Assessment of atmospheric CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> retrieval errors by error parameterization[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2013, 6(12): 3477-3500.
- 9 Y Liu, D X Yang, Z N Cai. A retrieval algorithm for TanSat  $X_{\text{CO}_2}$  observation: Retrieval experiments using GOSAT data[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(13): 1520-1523.
- 10 Shi Hailiang, 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.
- 11 Li Zhiwei, Xiong Wei, Shi Hailiang, *et al.*. Study on laboratory calibration of spatial heterodyne spectrometer[J]. Acta Optica Sinica,



- 2014, 34(4): 0430002.  
李志伟, 熊 伟, 施海亮, 等. 空间外差光谱仪实验室定标技术研究[J]. 光学学报, 2014, 34(4): 0430002.
- 12 Li Zhiwei, Xiong Wei, Shi Hailiang, *et al.*. Correction of detector response error for hyperspectral spatial heterodyne interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(5): 0530001.  
李志伟, 熊 伟, 施海亮, 等. 超光谱空间外差干涉仪探测器响应误差校正[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0530001.
- 13 N Eguchi, T Yokota. Investigation of clear-sky occurrence rate estimated from CALIOP and MODIS observations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(23): L23816.
- 14 I Aben, O Hasekamp, W Hartmann. Uncertainties in the space-based measurements Of CO<sub>2</sub> columns due to scattering in the Earth's atmosphere[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2007, 104(3): 450-459.
- 15 O Schneising, M Buchwitz, J P Burrows, *et al.*. Three years of greenhouse gas column-averaged dry air mole fractions retrieved from satellite-Part 1: Carbon dioxide[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, 8(14): 3827-3853.
- 16 J Mao, S R Kawa. Sensitivity studies for space-based measurement of atmospheric total column carbon dioxide by reflected sunlight[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(4): 914-927.
- 17 T E Taylor, C W O'Dell, D M O'Brien, *et al.*. Comparison of cloud-screening methods applied to GOSAT near-infrared spectra[J]. *Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(1): 295-309.
- 18 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]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114(D13): D13205.
- 19 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]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114(D6): D06206.
- 20 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.
- 21 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.
- 22 Y Yoshida, Y Ota, N Eguchi, *et al.*. 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[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2011, 4(4): 717-734.
- 23 C W O'Dell, B Connor, H Bosch, *et al.*. The ACOS CO<sub>2</sub> retrieval algorithm-Part 1: Description and validation against synthetic observations[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2012, 5(1): 99-121.
- 24 M J Alvarado, V H Payne, E J Mlawer, *et al.*. Performance of the line-by-line radiative transfer model (LBLRTM) for temperature, water vapor, and trace gas retrievals: Recent updates evaluated with IASI case studies[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, 13(14): 6687-6711.
- 25 M H DeGroot, M J Schervish. *Probability and Statistics*[M]. 4th edition. Boston: Addison Wesley, 2012: 302-314.
- 26 U Platt, D Perner, H Pätz. Simultaneous measurement of atmospheric CH<sub>2</sub>O, O<sub>3</sub>, and NO<sub>2</sub> by differential optical absorption[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978 - 2012)*, 1979, 84(C10): 6329-6335.
- 27 Jiang Xinhua, Wang Xianhua, Ye Hanhan, *et al.*. Correction method of atmospheric scattering effect through optical path in CO<sub>2</sub> retrieval [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(8): 0801005.  
江新华, 王先华, 叶函函, 等. CO<sub>2</sub>反演中大气散射影响的光程校正方法[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0801005.
- 28 Y Yoshida, N Eguchi, Y Ota, *et al.*. Algorithm Theoretical Basis Document(ATBD) for CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> Column Amounts Retrieval from GOSAT TANSO-FTS SWIR[R]. Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies, 2010: 29-63.
- 29 D Crisp, H Boesch, L Brown, *et al.*. Orbiting Carbon Observatory (OCO)-2 Level 2 Full Physics Retrieval Algorithm Theoretical Basis Document[R]. Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, 2014: 39-43.
- 30 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]. *Applied Optics*, 2007, 46(13): 2460-2470.
- 31 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]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2008, 109(10): 1815-1827.
- 32 C D Rodgers. *Inverse Methods for Atmospheric Sounding: Theory and Practice*[M]. Singapore: World Scentic, 2000: 81-99.
- 33 S Oshchepkov, A Bril, T Yokota. PPDF-based method to account for atmospheric scattering in observations of carbon dioxide from space[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984 - 2012)*, 2008, 113(D23): D23210.