

基于统计与光程分布的二氧化碳反演方法

段锋华^{1,2}, 王先华¹, 叶函函¹, 蒋芸^{1,2}, 吴浩^{1,2}

¹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;

²中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026

摘要 为了研究气候变化, 需要实现遥感卫星对二氧化碳(CO₂)的高精度测量。气溶胶和透射率较高的薄卷云的散射是影响大气中 CO₂ 反演精度的主要环境因素。结合主成分分析(PCA)的统计方法和光程概率分布的密度函数(PPDF)方法, 利用 PCA 方法得到大气 CO₂ 反演的先验值, 避免了因偏差过大而导致的运算结果无法接近真值; 基于 3 层 PPDF 模型, 解决了薄卷云和气溶胶散射引起的光子路径变化而导致的吸收谱线变化的问题。结果表明, PCA 方法和 PPDF 方法联合反演的反演精度得到明显提高; 对 2013 年塔克拉玛干沙漠 GOSAT 数据的反演结果进行分析, 采用单一的 PPDF 方法得到的反演结果的方差为 3.5, 两种方法相结合得到的反演结果的方差为 1.4, 优于日本国立环境研究所(NIES)提供的反演方差(1.6)。

关键词 大气光学; 二氧化碳反演; 光程概率分布的密度函数方法; 主成分分析方法; 薄卷云和气溶胶散射

中图分类号 P413 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0501003

Carbon Dioxide Retrieval Method Based on Statistics and Optical Path Distribution

Duan Fenghua^{1,2}, Wang Xianhua¹, Ye Hanhan¹, Jiang Yun^{1,2}, Wu Hao^{1,2}

¹Key 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;

²University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

Abstract In order to study climate change, high-precision measurement for carbon dioxide (CO₂) by remote sensing satellite needs to be achieved. Scattering of aerosol and thin cirrus with high transmittance is the main environmental factor which affects CO₂ retrieval precision. We combine statistical method of principal component analysis (PCA) with optical path probability density distribution function (PPDF). Priori values for CO₂ retrieval can be obtained by PCA method, and large deviation which causes the problem that calculation results deviate from the truth value can be avoided. We also use three-layer PPDF model to approach the change of absorption spectral lines caused by variation of photon path because of scattering of thin cirrus and aerosol. The results show that the combination of PCA method and PPDF method improves the retrieval precision significantly. From the retrieval results of GOSAT data in Taklamakan desert in 2013, we can find that the variance is 3.5 by PPDF method, while the combination of two methods can obtain the variance of 1.4, which is superior to the variance of 1.6 provided by NIES.

Key words atmospheric optics; carbon dioxide retrieval; optical path probability density distribution function method; principal component analysis method; scattering of thin cirrus and aerosol

OCIS codes 010.1290; 100.5070; 280.1310

1 引言

以二氧化碳(CO₂)为代表的温室气体使得全球平均气温升高, 从而引发了一系列气候灾难。在全球范

收稿日期: 2016-12-23; **收到修改稿日期:** 2017-02-06

基金项目: 国家自然科学基金(41175037)、高分辨对地观测系统重大专项(民用部分)(32-Y20A17-9001-15/17)、国家自然科学基金青年科学基金(41601393)

作者简介: 段锋华(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事二氧化碳反演算法方面的研究。E-mail: fh929@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)

围内实现 CO₂ 等主要温室气体的高精度观测对全球气候变化与环境变迁等方面的研究具有重要意义。利用卫星遥感技术获取全球尺度的温室气体浓度是一种高效、有发展前景的监测手段^[1]。相对于浓度背景来说,CO₂ 在时间和空间上的变化梯度较小^[2],研究表明,全球大气中 CO₂ 观测数据的偏差只有低于 1%,才能较好地降低气候研究的不确定性^[3],因此利用卫星遥感技术对大气中 CO₂ 观测的关键在于实现高精度观测。

利用近红外波段反演 CO₂ 的过程受薄卷云和气溶胶的影响较大,薄卷云和气溶胶的散射会严重影响 CO₂ 的反演精度^[4]。有研究指出,当光学厚度由 0.01 增加到 0.3 时,亮地表条件下 CO₂ 在 1.6 μm 波段反演结果的变化幅度最大可达 50%^[5]; Schneising 等^[6] 也指出光学厚度为 0.03、薄卷云高为 12 km 的薄卷云将给 CO₂ 的混合比带来 8.8% 的偏差。因此,如何有效地校正薄卷云和气溶胶的散射效应是高精度反演 CO₂ 的关键。

目前大气中 CO₂ 的反演方法,无论是差分吸收光谱(DOAS)方法、全物理方法还是光子光程概率分布密度函数(PPDF)方法,都是在对相关物理过程处理后,通过牛顿迭代方法获得反演结果。牛顿迭代方法^[7] 是假设 CO₂ 含量的状态向量在观测信息中为一个已知条件的概率分布,通常假设其服从高斯分布。由于这样的分布假设通常只能在一定范围内成立,因此如何保证假设的合理性成为提高大气中 CO₂ 反演的重要环节。各种反演方法针对散射的处理有所不同,DOAS 方法将气体吸收部分作为光谱的快变成分,而将气溶胶等散射作为慢变成分,并进行二次多项式拟合;PPDF 方法利用 PPDF 因子将气溶胶散射影响光程考虑到快变成分中,从理论上解决 DOAS 方法对散射处理的不足,使得 PPDF 的反演精度比 DOAS 更高。

针对薄卷云与气溶胶对大气 CO₂ 反演的影响,本文从辐射传输中光子光程的分布入手,研究散射效应参数化^[8] 与散射影响的校正方法。同时,针对反演过程中迭代方法对已知条件的依赖,将光子光程分布与大气状态统计技术相结合,通过提高反演过程初始参量精度的方法提高了 CO₂ 的反演精度。

2 反演原理

2.1 辐射传输中的光子路径校正

已有研究表明,大气 CO₂ 反演不确定性的主要来源是光辐射在大气中传输路径的改变。相对于干洁的大气条件,薄卷云与气溶胶散射可以延长或缩短光辐射传输路径^[9-10]。在反演算法中,如果忽略光辐射传输路径的延长或缩短,就会导致对大气中 CO₂ 含量的高估或低估,由此引起的不确定性很可能会超过所需的精度限制。PPDF^[11-15] 主要通过改变大气辐射传输中的光子光程而实现对大气 CO₂ 反演中散射问题的校正。

大气辐射传输过程中的散射介质包括分子、气溶胶和薄卷云,其中薄卷云和气溶胶具有非常大的时空变化特性,是引起大气中 CO₂ 反演误差的主要因素。光子在薄卷云、气溶胶表面反射以及在它们内部散射过程中,光子传输路径会发生缩短和拉伸现象,如图 1 所示。基于光子路径概率分布密度函数的 PPDF 方法,将薄卷云和气溶胶抽象成 2 个分离的散射体,其高度分别设为 h_c 和 h_a ,2 个分离的散射体结合中间非散射体构成 3 层 PPDF 模型。通过在大气透射率模型中引入光子路径修正因子、散射层高度等 PPDF 因子,将散射效应对有效透射率的影响参数化,从而综合考虑薄卷云和气溶胶对反演结果的影响。

由图 1 所示,整个大气层的有效透射率可表示为^[12]

$$T_{\text{eff}} = \alpha_c T_3 + (1 - \alpha_c) T_{12}^c T_a T_3, \quad (1)$$

其中

$$T_3 = \exp(-\Psi\tau_3), \quad (2)$$

$$T_{12}^c = \exp[-\Psi(1 + \sigma_c)\tau_{12}], \quad (3)$$

$$T_a = (1 - \alpha_a)\exp(-\Psi\tau_a\sigma_a) + \alpha_a\exp(\Psi\tau_a), \quad (4)$$

$$\tau_a = \int_0^{h_a} k(h) dh, \quad (5)$$

$$\tau_{12} = \int_0^{h_c} k(h) dh, \quad (6)$$

$$\tau_3 = \int_{h_c}^{H_{\text{atom}}} k(h) dh, \quad (7)$$

$$\Psi = \frac{1}{\cos \theta} + \frac{1}{\cos \theta_1}, \quad (8)$$

$$\sigma_a = \rho_a \exp(-\gamma_a \tau_a), \quad (9)$$

$$\sigma_c = \rho_c \exp(-\gamma_c \tau_{12}), \quad (10)$$

式中 θ 和 θ_1 分别为太阳天顶角和卫星观测角; $k(h)$ 为气体吸收系数; H_{atom} 为大气层顶高度; $\alpha_a, \alpha_c, \rho_a, \rho_c, h_a, h_c, \gamma_a, \gamma_c$ 是 8 个 PPDF 参数, 这些 PPDF 参数将薄卷云和气溶胶的散射作用考虑为对光程的延长或缩短, 从而改变整个大气的有效透射率。

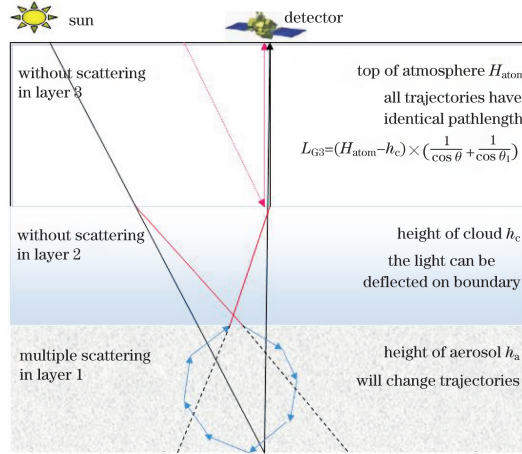


图 1 3 层 PPDF 的模型图

Fig. 1 Model diagram of three-layer PPDF

由于氧气 A(O₂_A, 波数为 12950~13200 cm⁻¹) 波段几乎只有 O₂ 吸收, 并且 O₂ 可以认为在大气中混合均匀且含量稳定, 因此这里选择 O₂_A 波段实现 PPDF 因子的反演。

利用 PPDF 模型给出的有效透射率构建反演过程中的模拟谱 R :

$$R = -\ln \langle ST_{\text{eff}} \rangle - P^2(\lambda), \quad (11)$$

式中 S 为太阳光谱, $P^2(\lambda)$ 为一个与波长有关的二阶多项式, $\langle \rangle$ 表示与仪器线型函数进行卷积。采用高斯-牛顿迭代得到反演结果, 迭代公式为

$$\mathbf{X}(k) = \mathbf{X}(k-1) + [\mathbf{K}^T \mathbf{S}_y^{-1} \mathbf{K} + \mathbf{S}_a^{-1}]^{-1} \{ [\mathbf{K}^T \mathbf{S}_y^{-1} (\mathbf{R}^* - \mathbf{R})] + \mathbf{S}_a^{-1} [\mathbf{X}_a - \mathbf{X}(k-1)] \}, \quad (12)$$

式中 $\mathbf{X}(k)$ 和 $\mathbf{X}(k-1)$ 分别为第 k 和 $k-1$ 次迭代的结果矩阵, \mathbf{R}^* 为实测矩阵, $\mathbf{S}_a, \mathbf{S}_y$ 分别为先验误差和测量误差协方差矩阵, \mathbf{X}_a 为反演初值矩阵, \mathbf{K} 为权重矩阵。权重函数 K_k 可表示为

$$K_k = \frac{\partial(R)}{\partial(X_k)} = - \frac{\left\langle S \frac{\partial(T_{\text{eff}})}{\partial(X_k)} \right\rangle}{\langle ST_{\text{eff}} \rangle}, \quad (13)$$

式中 K_k 为第 k 次的权重函数, X_k 为某个 PPDF 因子。

2.2 CO₂ 廓线的主成分分析(PCA)方法

由于无法提供足够多的参数, 求解大气中 CO₂ 的辐射传输方程本质上是个病态问题。同时, 观测误差的存在增加了反演误差的可能性。由于反演问题的病态性, 利用先验信息来约束反演值的范围成为目前 CO₂ 反演方法的基本思路。

确定先验信息的取值是最优化估计反演算法中最重要的部分之一, 不准确的初始值将可能难以利用现有方法反演出目标气体含量。在没有同步测量廓线的条件下, 利用多年大气历史观测资料, 将一定条件约束统计值作为初始值, 可提高反演精度。通常情况下, 较难获得同步测量值, 因此对于历史数据的统计具有重要意义。

利用 PCA 方法为 PPDF 提供反演初值,PCA 方法实际上是找到 CO_2 廓线和模拟辐亮度之间的转化关系。根据 CO_2 样本集的协方差矩阵 \mathbf{C}_{cov} 和模拟辐亮度样本集的协方差矩阵 \mathbf{R}_{cov} 的表达式,可得到 CO_2 廓线和模拟辐亮度之间的转化关系。 \mathbf{C}_{cov} 和 \mathbf{R}_{cov} 可分别表示为

$$\mathbf{C}_{\text{cov}} = \Delta\mathbf{C} (\Delta\mathbf{C})^T / N, \quad (14)$$

$$\mathbf{R}_{\text{cov}} = \Delta\mathbf{R} (\Delta\mathbf{R})^T / N, \quad (15)$$

式中 $\Delta\mathbf{C}$ 为 CO_2 廓线与其样本集的相对偏差矩阵, N 为光谱通道数, $\Delta\mathbf{R}$ 为模拟辐亮度光谱与其均值的偏差矩阵。利用 PCA 方法得到 $\Delta\mathbf{R}$ 、 $\Delta\mathbf{C}$ 的转化关系为

$$\Delta\mathbf{C} = \mathbf{S}\Delta\mathbf{R}, \quad (16)$$

式中 \mathbf{S} 为 $\Delta\mathbf{R}$ 和 $\Delta\mathbf{C}$ 之间的转化矩阵。利用 PCA 方法反演得到的 CO_2 的垂直廓线 \mathbf{C}_{re} 为

$$\mathbf{C}_{\text{re}} = \bar{\mathbf{C}} + \mathbf{S}\Delta\mathbf{R}_{\text{obs}}, \quad (17)$$

式中 $\Delta\mathbf{R}_{\text{obs}}$ 为实测谱和模拟谱之间的差值矩阵, $\bar{\mathbf{C}}$ 为 CO_2 样本集的均值矩阵。利用 PCA 方法可以快速得到不同条件下相对真实的 CO_2 廓线,为 PPDF 提供一个较好的先验值,从而提高了 CO_2 的反演精度。

在 PCA 方法中, CO_2 波数范围为 $6300 \sim 6400 \text{ cm}^{-1}$,同时需要对地表反射率、光学厚度等因素进行分类,以尽可能保证统计结果具有代表性。

3 实验结果与讨论

3.1 CO_2 时空分布的不均匀性

CO_2 在时空中的分布并不是均匀的,由于大气参数等条件的变化, CO_2 廓线浓度范围较大,图 2 为 Carbon Track 提供的 2012 年塔克拉玛干沙漠的 10 条 CO_2 廓线,图 3 为 2012 年第 100 天时不同地区(从西经 118.5° 、南纬 79° 开始,经度每隔 5° 、纬度每隔 2.5° 选取一个统计点)塔克拉玛干沙漠的 CO_2 廓线。

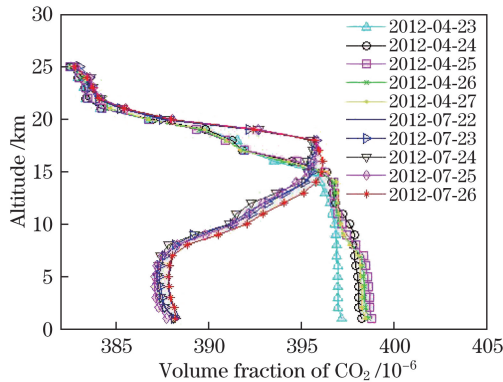


图 2 不同时间同一地区塔克拉玛干沙漠的 CO_2 浓度随高度的变化

Fig. 2 Variations in CO_2 concentration with altitude of Taklimakan desert at different time and in same region

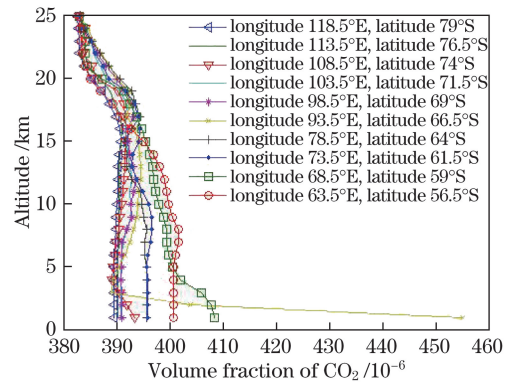


图 3 不同地区同一时间塔克拉玛干沙漠的 CO_2 浓度随高度的变化

Fig. 3 Variations in CO_2 concentration with altitude of Taklimakan desert in different regions and at same time

由图 2 和图 3 可得,同一地区不同时间塔克拉玛干沙漠的 CO_2 廓线仍然有较大的波动,而不同地区同一时间塔克拉玛干沙漠的 CO_2 廓线存在较大差异。由此可以看出,若要给出测量时的 CO_2 廓线,需要进行同步廓线测量,利用辐射传输软件或历史上某天的 CO_2 廓线存在着偏离较大的风险。同步廓线测量难以实现,若对不同地区和若干环境条件进行统计,给出统计值,就可以在很大程度上减小 CO_2 廓线的偏差,其残余偏差则可以通过 CO_2 反演进行进一步的校正。

3.2 初始廓线对反演结果的影响

利用 $\text{O}_2\text{-A}$ 波段反演 PPDF 因子,在反演 CO_2 时需要利用 CO_2 的 $1.6 \mu\text{m}$ 弱吸收带,考虑到这两个波段的瑞利散射和地表反射率的影响不同,地表反射率对地气耦合过程中的散射影响较大,直接利用在 $\text{O}_2\text{-A}$ 波段处反演所得的参数 α 和 ρ 来描述 $1.6 \mu\text{m}$ 处的散射性质时会存在偏差,故需对这两个参数进行瑞利散射影响修正和地表反射率影响修正。

瑞利散射影响校正可表示为

$$\alpha^*(\Gamma_x) = \alpha(\Gamma_x) - \alpha_R(\Gamma_x), \rho^*(\Gamma_x) = \rho(\Gamma_x) - \rho_R(\Gamma_x), \quad (18)$$

地表反射率影响校正可表示为

$$\alpha(\Gamma_{1.6}) = \alpha^*(\Gamma_{0.76})(\Gamma_{0.76}/\Gamma_{1.6}), \rho(\Gamma_{1.6}) = \rho^*(\Gamma_{0.76})\exp(\Gamma_{1.6} - \Gamma_{0.76}), \quad (19)$$

式中 $\alpha^*(\Gamma_x)$ 为消除瑞利散射影响的光程缩短因子; $\alpha(\Gamma_x)$ 为光程缩短影响因子; $\alpha_R(\Gamma_x)$ 为瑞利散射对光程缩短因子的影响; $\rho^*(\Gamma_x)$ 为消除瑞利散射影响的光程拉伸因子; $\rho(\Gamma_x)$ 为光程拉伸影响因子; $\rho_R(\Gamma_x)$ 为瑞利散射对光程拉伸因子的影响; Γ_x 为地表反射率, 下标 x 和数字为对应的波段。

将 Carbon Track 提供的不同 CO₂ 廓线作为初始廓线, 对 2013 年 2 月塔克拉玛干沙漠的一条 GOSAT 卫星观测光谱进行 PPDF 反演, 结果如图 4 所示。其中虚线代表初始值, 实线代表反演值。这里采用 PPDF 方法在 CO₂ 的 1.6 μm 近红外吸收带对 CO₂ 进行反演, 依然采用(2)式构建模拟谱, 此时波数范围为 6300~6400 cm⁻¹, 同时采用(3)式进行高斯-牛顿迭代, 其中权重由(1)、(4)式给出。

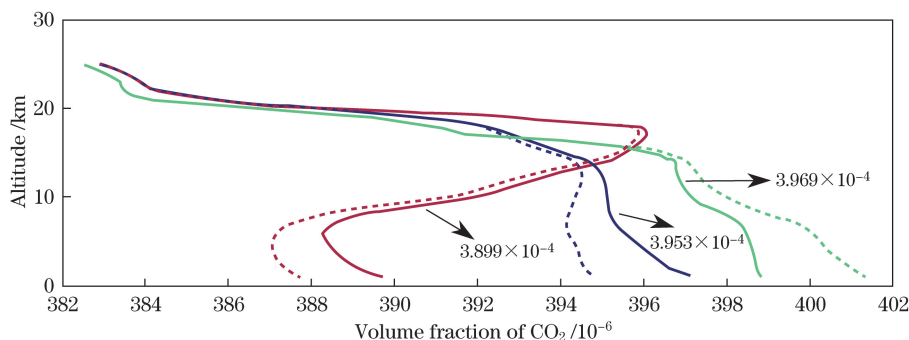


图 4 不同 CO₂ 初始廓线下的反演结果

Fig. 4 Retrieval results with different initial CO₂ profiles

由图 4 可以看出, 利用 PPDF 方法对 CO₂ 的反演过程是在一定程度上对已有廓线偏差的校正, 与其他 CO₂ 反演方法一样, 只能在一定限度内进行调整, 例如使偏大的 3.969×10^{-4} 减小, 使偏小的 3.899×10^{-4} 增大, 而无法达到实际的真实值。实验结果也表明, 现有的反演方法基于条件概率分布的假设, 通常只能在一定范围内成立, 即在一定范围内寻找出最佳值。

3.3 塔克拉玛干沙漠的反演论证

利用 PCA 方法将范围为 0~1 的光学厚度按 0.05 的间隔分为 21 类, 将 0~0.6 的地表反射率按 0.05 的间隔分为 13 类, 得到 273 种条件下不同 CO₂ 的初始廓线。根据实测谱中的观测条件找到对应的 CO₂ 初始廓线。

将 2012—2013 年 Carbon Track 提供的塔克拉玛干沙漠的 CO₂ 廓线作为样本集, 通过逐线积分辐射传输模型 (LBL) 计算不同条件下的模拟辐亮度光谱, 利用 PCA 方法得到 273 条 CO₂ 廓线, 根据日本国立环境研究所 (NIES) 提供的实测谱中的光学厚度和地表反射率等大气信息, 选取与 PCA 方法中最接近的廓线, 以此作为反演初值。反演结果如图 5 所示, 图 5(a) 为采用不同反演方法得到的 CO₂ 廓线的反演结果, 图 5(b) 为采用不同反演方法得到的和 NIES 提供的 CO₂ 柱浓度的反演结果比较。利用 PCA 和 PPDF 共同反演的结果和 NIES 的反演结果更接近, DOAS、PPDF、PPDF 结合 PCA 以及 NIES 4 种方法得到的反演结果的均值及方差如表 1 所示。

从表 1 及图 5 可以看出, 相对于 NIES 提供的反演结果, 采用 DOAS 方法得到的反演结果的偏差为 2%~7%, 采用 PPDF 方法得到的反演结果的偏差为 0.5% 左右, 利用 PCA 方法和 PPDF 方法联合反演得到

表 1 不同反演方法的均值与方差

Table 1 Mean and variance of different retrieval methods

	DOAS	PPDF	PPDF and PCA	NIES
Mean / 10 ⁻⁶	401.9	392.4	395.7	394.2
Variance / 10 ⁻⁶	7.2	3.5	1.4	1.6

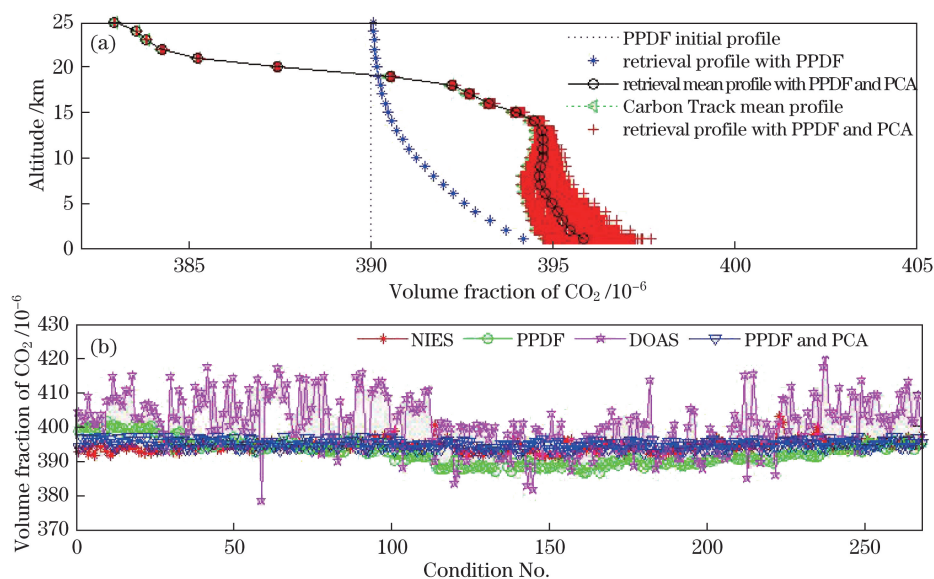


图 5 (a)不同反演方法得到的 CO₂ 廓线的反演结果;(b)不同反演方法得到的和 NIES 提供的 CO₂ 柱浓度的反演结果

Fig. 5 (a) Inversion results of CO₂ profiles obtained by different retrieval methods;

(b) inversion results of CO₂ infusion concentration obtained by different retrieval methods and NIES

的反演结果的偏差为 0.38%，这两种方法联合反演得到的反演结果的方差明显低于仅采用 PPDF 方法得到的反演结果的方差。由图 5(a)可以看出，对于 CO₂ 的垂直分布，仅用 PPDF 方法并不能准确进行 CO₂ 反演，特别是在高层，CO₂ 的反演特别依赖于初值的设定。因此，仅用 PPDF 方法虽然可以考虑薄卷云和气溶胶的整体散射效应，但并不能很好地体现 CO₂ 的垂直分布，从而降低了 CO₂ 的反演精度。PCA 方法和 PPDF 方法联合反演可以很好地解决 PPDF 方法的不足，并充分利用 PPDF 的优势，从而使 CO₂ 反演精度得到明显提高。

4 结 论

相对准确的 CO₂ 廓线对于采用 PPDF 方法进行 CO₂ 反演是至关重要的，而实时 CO₂ 廓线的获取通常较为困难。通过对不同地区不同条件下的 CO₂ 廓线进行统计，得到相对准确的初值。利用 PCA 方法进行 CO₂ 廓线统计，能够得到一定条件下具有代表性的 CO₂ 初始廓线。

介绍了基于光子路径概率分布密度函数的 PPDF 估算方法，依据等效理论将薄卷云和气溶胶散射效应参数化，通过与 PCA 方法获取初始 CO₂ 廓线方法相结合，利用塔克拉玛干沙漠 2013 年 GOSAT 观测光谱进行反演实验。实验结果表明，利用 PCA 方法和 PPDF 方法联合反演不仅在反演结果上与 NIES 提供的反演结果更为接近，且反演结果离散程度更小；对 CO₂ 柱浓度结果分别进行统计分析，利用 PCA 方法和 PPDF 方法联合反演，使得 CO₂ 的平均反演偏差和方差分别只有 0.38% 和 1.4，优于单一使用 PPDF 方法的 0.5% 和 3.5。由此可见，利用 PCA 方法和 PPDF 方法联合反演可取得更高的反演精度。

参 考 文 献

- [1] Liu Yi, Lü Daren, Chen Hongbin, *et al.* Advance in technologies and methods for satellite remote sensing of atmospheric CO₂ [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2011, 26(2): 247-254.
刘毅, 吕达仁, 陈洪滨, 等. 卫星遥感大气 CO₂ 的技术与方法进展综述 [J]. 遥感技术与应用, 2011, 26(2): 247-254.
- [2] Dufour E, Breon F M. Spaceborne estimate of atmospheric CO₂ column by use of the differential absorption method: Error analysis [J]. Applied Optics, 2003, 42(18): 3595-3609.
- [3] Houweling S, Hartmann W, Aben I, *et al.* Evidence of systematic errors in SCIAMACHY-observed CO₂ due to aerosols [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2005, 5(11): 3003-3013.
- [4] Zou Mingmin, Chen Liangfu, Tao Jinhua, *et al.* Accuracy analysis of PPDF-based method to aerosol scattering

- effect[J]. *Science China: Earth Science*, 2013, 43(12): 2062-2071.
- 邹铭敏, 陈良富, 陶金花, 等. 基于 PPDF 方法的气溶胶散射效应参数化模型精度评估[J]. *中国科学: 地球科学*, 2013, 43(12): 2062-2071.
- [5] Connor B J, Boesch H, Toon G, *et al.* Orbiting carbon observatory: Inverse method and prospective error analysis[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113(D5): 79-88.
- [6] Schneising O, Buchwitz M, Burrows J P, *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.
- [7] Jiang Deming, Dong Chao-hua. A review of optimal algorithm for physical retrieval of atmospheric profiles[J]. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(2): 133-139.
- 蒋德明, 董超华. 大气廓线物理反演的最优化方法进展[J]. *地球科学进展*, 2010, 25(2): 133-139.
- [8] Oshchepkov S, Bril A, Yokota T, *et al.* Effects of atmospheric light scattering on spectroscopic observations of greenhouse gases from space: Validation of PPDF-based CO₂ retrievals from GOSAT[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117(D12): D12305.
- [9] Jiang Xinhua, Wang Xianhua, Ye Hanhan, *et al.* Cloud contaminated satellite data processing method in CO₂ retrieving[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(8): 0801001.
- 江新华, 王先华, 叶函函, 等. CO₂ 反演中卫星数据的云污染处理方法研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(8): 0801001.
- [10] Jiang Xinhua, Wang Xianhua, Ye Hanhan, *et al.* Correction method of atmospheric scattering effect through optical path in CO₂ retrieval[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(8): 0801005.
- 江新华, 王先华, 叶函函, 等. CO₂ 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.
- [11] Bril A, Oshchepkov S, Yokota T. Application of a probability density function-based atmospheric light-scattering correction to carbon dioxide retrievals from GOSAT over-sea observations[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 117(2): 301-306.
- [12] Oshchepkov S, Bril A, Yokota T. An improved photon path length probability density function-based radiative transfer model for space-based observation of greenhouse gases[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114(D19): D19207.
- [13] Bril A, Oshchepkov S, Yokota T. 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.
- [14] Oshchepkov S, Bril A, Yokota T. PPDF-based method to account for atmospheric light scattering in observations of carbon dioxide from space[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113(D23): D23210.
- [15] Oshchepkov S, Bril A, Maksyutov S, *et al.* Detection of optical path in spectroscopic space-based observations of greenhouse gases: Application to GOSAT data processing[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(D14): D14304.