

基于 GOSAT 卫星数据的大气甲烷反演误差分析及校正

卜婷婷, 王先华*, 叶函函, 江新华

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 大气甲烷(CH₄)高精度反演受到多种因素的影响, 其中地表特征和大气状态的不确定性是重要的影响因素, 如地表反射率、温度、湿度和压力廓线。地表反射率受到诸多因素的影响, 难以获得精确的数据, 会给反演结果带来较大误差。温度、湿度和压力廓线的不确定性亦是反演误差的重要来源, 由此产生的系统误差难以避免, 单独利用 CH₄ 吸收带进行反演难以消除此种误差。针对各种参数不确定性的影响, 本文提出比值光谱法和 CO₂ 吸收带校正法进行校正。比值光谱法通过将绝对辐亮度谱转化为比值光谱, 抑制地表反射率在反演过程中的作用。CO₂ 吸收带校正法利用 CO₂ 1.61 μm 吸收带, 将 CH₄ 柱含量转化为 CH₄ 体积混合比, 校正温度、湿度和压力廓线不确定性引起的系统误差。通过将两种校正方法结合, 可同时抑制地表反射率和温度、湿度、压力廓线不确定性产生的影响, 减小反演误差。利用温室气体观测卫星(GOSAT)的观测数据进行大气 CH₄ 反演, 采用比值光谱法和 CO₂ 吸收带校正上述误差, 结果显示校正后的 CH₄ 体积混合比与 GOSAT-Level2 产品相当接近, 反演精度可达-0.24%, 反演结果较为稳健可靠。研究表明, 比值光谱法和 CO₂ 吸收带校正法可有效校正地表特征和大气状态参数不确定性引起的误差, 提高大气 CH₄ 反演精度。

关键词 遥感; CH₄ 反演; 误差校正; 比值光谱法; CO₂ 吸收带

中图分类号: P407 **文献标识码**: A **DOI**: 10.3964/j.issn.1000-0593(2016)01-0186-05

引言

大气 CH₄ 是一种重要的温室气体, 增温作用强, 其浓度变化不仅对大气化学过程具有重要作用, 而且影响着地气系统的辐射平衡, 同时会影响气候和环境的变化。IPCC 第四次评估报告指出, CH₄ 的全球增温潜势是 CO₂ 的 25 倍, 在全球温室效应中所起的作用约占 20%^[1]。自工业革命以来, 大气 CH₄ 浓度迅速增长, 2007 年全球大气 CH₄ 平均浓度(即气体体积百分比)已达 1.789×10^{-9} ^[2], 目前已是工业化前的两倍多。人们现在还没有完全掌握 CH₄ 的源汇分布及时空变化, 因此近年来大气 CH₄ 浓度变化受到国际广泛关注, 各国科学家纷纷采用各种方法监测 CH₄ 浓度变化。研究大气 CH₄ 浓度变化, 对于了解 CH₄ 源汇及其变化规律, 掌握大气 CH₄ 时空分布, 预测全球气候变化具有重要意义^[3]。

传统的地基探测方法具有精度高、可靠性强等优点, 但是受到时间和空间的限制, 缺乏对全球大范围实时探测的能力, 观测结果很难用于全球 CH₄ 浓度分布研究。卫星遥感监

测方式可以进行覆盖全球的观测, 提供稳定连续、全球尺度、时空一致性较好的数据^[4]。针对卫星观测的这一优势, 国际上先后研制了一系列卫星遥感探测平台, 如大气制图扫描成像吸收分光计 SCIAMACHY(scanning imaging absorption spectrometer for atmospheric chartography), 对流层辐射光谱仪 TES(tropospheric emission spectrometer), 红外大气探测干涉仪 IASI(infrared atmospheric sounding interferometer)和碳监测卫星 CarbonSat(carbon monitoring satellite)。2009 年 1 月 23 日, 日本发射了全球首颗专用温室气体观测卫星 GOSAT(greenhouse gases observing satellite)。GOSAT 卫星的任务目标是观测全球 CO₂ 和 CH₄ 的浓度分布, 提高温室气体反演精度, 进而定量分析温室气体源和汇的时空变化^[5]。

在利用遥感数据进行反演的过程中, 不可避免地会受到数据的测量误差及各种参数不确定性的影响。卫星观测面对的大气、地表影响较为复杂, 获取的大气及地表参数很难保证其精确性, 这使得大气 CH₄ 反演易受外界因素干扰, 直接影响反演精度。卫星遥感反演实验表明, 仪器性能、大气参

收稿日期: 2014-09-05, 修订日期: 2014-12-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41175037)资助

作者简介: 卜婷婷, 女, 1990 年生, 中国科学院安徽光学精密机械研究所硕士研究生 e-mail: anningjin@126.com

* 通讯联系人 e-mail: xhwang@aiofm.ac.cn

数及地表特征是反演的三大主要误差源^[6]。卫星传感器接收到的信号是大气及地表共同作用的结果,因此地表反射率是影响大气 CH₄ 反演精度的重要因素^[7]。大气状态参数不确定性是反演误差的另一重要来源,由此会给反演结果带来系统误差,单独利用 CH₄ 吸收带进行反演难以消除此种误差。为了抑制地表反射率和大气状态参数不确定性产生的影响,本文提出了比值光谱法和 CO₂ 吸收带校正法进行校正。比值光谱法通过将绝对辐亮度谱转化为比值光谱,抑制地表反射率在反演过程中的作用。CO₂ 吸收带校正法利用 CO₂ 作为参考气体,将 CH₄ 柱含量转化为 CH₄ 体积混合比,校正温度、湿度和压力廓线不确定性引起的系统误差。通过将两种校正方法结合,可同时抑制地表反射率和温度、湿度、压力廓线不确定性对反演结果的影响,减小反演误差,提高反演精度。首先通过模拟光谱反演,研究了地表反射率和大气状态参数不确定性对反演结果的影响,然后介绍了比值光谱法和 CO₂ 吸收带校正法并利用 GOSAT 卫星观测数据进行反演验证,最后将反演结果与 GOSAT-Level2 产品进行了对比分析。

1 反演原理与方法

入射辐射能量在大气传播过程中会被气体分子和气溶胶吸收、散射,到达地面时会被地表反射,经过一系列的能量重新分布,最终被卫星传感器接收。对卫星传感器接收到的信号进行处理,可得到对应的入射光光谱。入射光光谱中包含了 CH₄ 的吸收特征,可从中获取 CH₄ 浓度信息。

大气 CH₄ 反演主要是根据观测光谱反推 CH₄ 含量的过程,其本质是通过比较模拟光谱和实测光谱的差异进行的。根据一定的遥感数据和先验知识,采用 Rodgers^[8] 提出的最优估计方法计算大气 CH₄ 浓度最优解。前向模型 F 是利用大气辐射传输模型计算模拟光谱的函数,它描述了入射辐射经过大气辐射传输,到达遥感器的全过程。卫星观测值 y 与模拟值 $F(x, b)$ 关系如下

$$y = F(x, b) + \varepsilon \quad (1)$$

其中, x 为待反演参数, b 为前向模型参数, ε 为观测误差。

利用高斯-牛顿迭代法最小化代价函数 $J(x)$ 即可获得 CH₄ 浓度的最优估计值。代价函数如下

$$J(x) = [y - F(x)]^T S_\varepsilon^{-1} [y - F(x)] + (x - x_a) S_a^{-1} (x - x_a) \quad (2)$$

其中, x_a 是待反演参数 x 的先验估计值, S_ε 是先验估计值 x_a 的协方差矩阵, S_ε 是观测误差 ε 的协方差矩阵。

2 地表反射率的影响及比值光谱法校正

2.1 地表反射率的影响

自然界中大多数地表是介于粗糙朗伯面和光滑镜面之间的非朗伯面,它们的反射并非各向同性,而是具有明显的方向性。Nicodemus^[9] 首次提出双向反射率分布函数 BRDF (bidirectional reflectance distribution function) 的概念来描述物体的反射辐射分布,反映了地物反射率随太阳入射角和卫星

观测角的变化而变化的特征。在卫星观测 BRDF 过程中,影响因素众多,难以获得精确的地表反射率数据。此外,地表反射率数据仍受其他误差源的影响,如仪器本身的测量误差、大气校正的误差及地表反射率反演算法的误差。

地表反射率是影响反演精度的重要因素,为了研究它对反演结果的影响,采用逐线积分辐射传输模型 (line-by-line radiative transfer model, LBLRTM) 作为前向模型进行模拟研究,模型参数采用 1976 年美国标准大气廓线。假设标准反射率为 0.3, 其对应的反演结果为标准值,则反射率改变后的反演结果相对于标准值的偏差如图 1 所示。从图 1 中可以看出,地表反射率变化会对反演结果产生较大影响。当地表反射率增大 5% 时,对应的反演结果增大 3.47%,当地表反射率增大 30% 时,对应的反演结果增大 28.26%。由此可知,传统的绝对辐亮度法对反射率的变化较为敏感,地表反射率偏差对反演结果的影响较为明显,因此本文提出比值光谱法来校正这种影响。

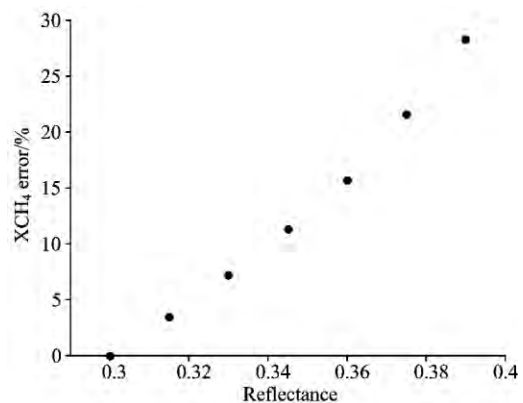


Fig 1 Effects of reflectance variations on CH₄ retrieval

2.2 比值光谱法校正

太阳辐射通过大气层受到气溶胶散射及气体吸收而减弱,假设卫星观测辐亮度与地表反射率近似成线性,则观测辐亮度可近似表示为

$$I_v = \gamma_v(\theta_0, \theta) I_{v0} \exp(-m\tau_{\text{CH}_4}) \exp(-m\tau_{\text{other}}) \quad (3)$$

式中, $\gamma_v(\theta_0, \theta)$ 为地表对 θ_0 方向的入射辐射向 θ 方向反射的反射率, θ_0 为太阳天顶角, θ 为观测天顶角, I_{v0} 为大气顶的太阳辐亮度, m 为大气质量因子, τ_{CH_4} 为 CH₄ 光学厚度, τ_{other} 为气溶胶及其他吸收气体的光学厚度。 τ_{other} 因受气溶胶变化的影响而难以确定, I_{v0} 也存在误差,为抑制这些不确定因子的影响,采用比值光谱法进行校正^[10]。

满足一定条件的两点的卫星观测光谱相比可抵消地表反射率,校正地表反射率不确定性对反演结果的影响。选取光谱曲线中近邻的两段为强吸收通道 ν_j 和近零吸收通道 ν_{j0} , 两通道所对应的仪器性能、大气状态及地表特征近似相同。将强吸收通道辐亮度 I_j 与近零吸收通道辐亮度 I_{j0} 进行比值,光谱比值后地表反射率被消除,其不确定性产生的影响得到校正^[11]。

$$R_j = I_j / I_{j0} = (I_{\text{solar}_j} / I_{\text{solar}_{j0}}) \cdot$$

$$\exp[-m(\tau_{\text{CH}_4-j} - \tau_{\text{CH}_4-j0})] \exp[-m(\tau_{\text{other}-j} - \tau_{\text{other}-j0})] \quad (4)$$

式中下标 j 和 j_0 分别对应通道 ν_j 和 ν_{j_0} 。

以 2013 年 7 月至 2013 年 8 月中国部分地区 (30°N—40°N, 80°E—115°E) 的 GOSAT-FTS 观测数据为例, 采用传统的绝对辐亮度法和比值光谱法分别反演大气 CH₄ 体积混合比, 并与 GOSAT-Level2 数据产品进行对比, 其中绝对辐亮度反演中的反射率来自中等分辨率成像光谱仪 MODIS (moderate-resolution imaging spectroradiometer) 产品, 得到的结果如图 2 所示。

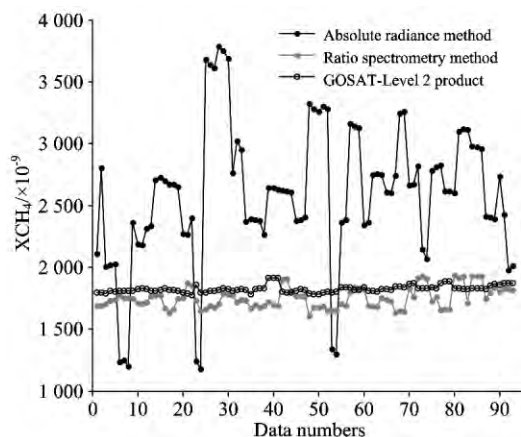


Fig 2 CH₄ mixing ratio retrieved by absolute radiance method and ratio spectrometry method

从图 2 中可明显看出, 传统的绝对辐亮度法对应的反演结果误差严重, 离散度也很高, 其反演误差平均值为 42.02%, 标准差为 571.93×10^{-9} , 如此大的反演误差和离散程度导致反演结果不可靠, 无法从中获取准确的 CH₄ 浓度信息。而比值光谱法的反演误差平均值为 -4.05%, 标准差为 84.31×10^{-9} 。比值光谱法的反演结果与 GOSAT-Level2 较为接近, 离散度也较低, 反演结果较为可靠。两种方法的反演结果表明, 地表反射率的较大偏差会导致模拟辐亮度与实测辐亮度差异较大, 从而使绝对辐亮度法的反演结果存在较大误差。相比而言, 比值光谱法可有效抑制地表反射率不确定性的影响, 对于反演结果的误差均值和离散程度, 都有很大改善, 使得反演精度大幅度提高。

3 系统误差的影响及 CO₂ 吸收带校正

3.1 系统误差的影响

精确获取每次反演时的大气温度、湿度和压力廓线较为困难, 由此带来的系统误差难以避免, 这种误差在实际反演中难以通过多组数据平均法消除。为了研究大气温度、湿度和压力对反演结果的影响, 以 1976 年美国标准大气廓线为模型参数进行模拟研究, 前向模型采用 LBLRTM。以 1976 年标准大气廓线对应的反演结果为标准值, 在此基础上对温度、湿度和压力廓线进行适当改变, 利用这些数据反演 CH₄ 浓度, 分析相对于 1976 年标准大气状态, 温度、湿度和压力不确定性带来的误差影响。经过模拟研究可知, 当温度增加

5 K 时, 对应的反演误差为 2.90%, 当温度增加 20 K 时, 对应的反演误差为 12.09%。当压力增加 5 hPa 时, 对应的反演误差为 -3.32%, 当压力增加 20 hPa 时, 对应的反演误差为 -11.79%。当湿度增加 1 倍时, 对应的反演误差为 -0.30%, 当湿度增加 5 倍时, 对应的反演误差为 -1.27%。由此可见, 温度、湿度和压力廓线不确定性产生的误差在 CH₄ 反演中不可忽略。这种系统误差制约着 CH₄ 反演精度的提高, 单独利用 CH₄ 吸收带进行反演难以消除此种影响, 因此需用其他波段气体进行校正。

3.2 CO₂ 吸收带校正

温度、湿度和压力廓线不确定性引起的系统误差对波长的依赖较弱, 对其他波段气体的作用机理相似, 因此可以选择其他波段的气体作为参考, 校正系统误差的影响^[12]。CO₂ 在空气中的含量远大于 CH₄, 观测精度可达 1%^[13], 而 CH₄ 的反演精度要求为 2%, 并且 CO₂ 1.61 μm 吸收带与 CH₄ 1.64 μm 吸收带较为接近。若在相同的假设条件下反演 CH₄ 和 CO₂, 则会产生同源误差。利用反演的 CO₂ 柱含量将 CH₄ 柱含量转化为 CH₄ 体积混合比, 就能很大程度地减小系统误差的影响, 提高大气 CH₄ 反演精度。因此, CO₂ 柱含量可以作为 CH₄ 体积混合比的获取手段, CH₄ 的体积混合比可利用如下公式获得

$$X_{\text{CH}_4} = \frac{V_{\text{CH}_4}}{V_{\text{CO}_2}} X_{\text{CO}_2} \quad (5)$$

其中, V_{CH_4} 和 V_{CO_2} 为 CH₄ 和 CO₂ 的柱含量, X_{CH_4} 和 X_{CO_2} 为 CH₄ 和 CO₂ 的体积混合比。

利用与 2.2 节相同的 GOSAT-FTS 观测数据, 采用 CO₂ 吸收带校正法和 CH₄ 单吸收带法分别进行大气 CH₄ 反演, 并将两种方法的反演结果与 GOSAT-Level2 数据产品进行对比分析。

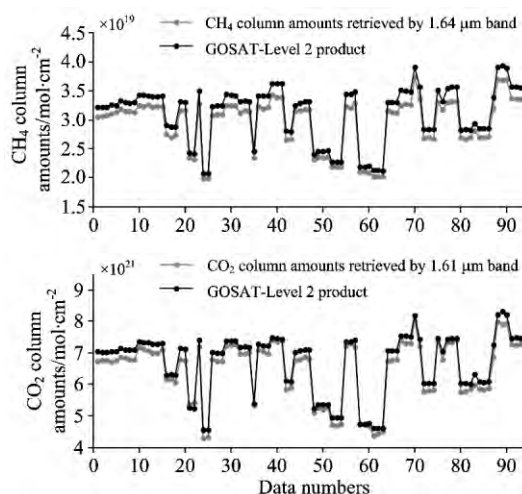


Fig 3 Comparison of CH₄ column amounts, CO₂ column amounts retrieved with GOSAT-Level2 product

图 3 为反演的 CH₄ 柱含量、CO₂ 柱含量与对应的 GOSAT-Level2 产品的对比图, 表 1 为对这些数据进行统计的结果。由图 3 和表 1 可知, CH₄ 柱含量与 GOSAT-Level2 产品存在系统偏差, CH₄ 柱含量比 GOSAT-Level2 产品总体偏

低, 偏差为 -5.14% 。CO₂ 柱含量也相对于 GOSAT-Level2 产品总体偏低, 偏差为 -3.85% 。这种系统偏差可能是由大气状态数据的误差引起的。

Table 1 Statistical results of CH₄ column amounts, CO₂ column amounts retrieved and GOSAT-Level2 product

Column amounts	V _{CH₄} mean value /(mol · cm ⁻²)	V _{CO₂} mean value /(mol · cm ⁻²)
GOSAT-Level2	3.11×10^{19}	6.67×10^{21}
Retrieval result	2.95×10^{19}	6.41×10^{21}
Systematic error/%	-5.14	-3.85

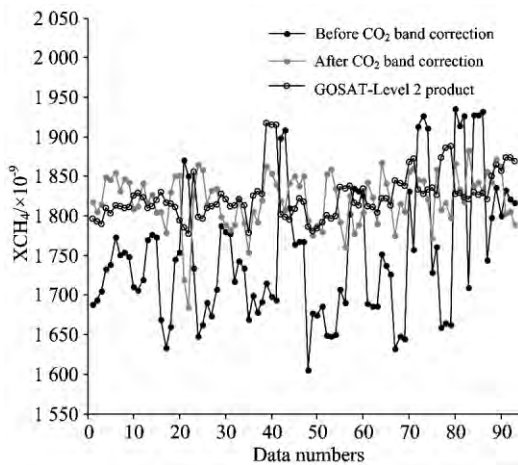


Fig 4 Comparison of CH₄ mixing ratio retrieved with GOSAT-Level2 product

利用 CO₂ 柱含量将 CH₄ 柱含量转化为体积混合比 XCH₄, 并将其与 GOSAT-Level2 产品进行对比, 得到的结果如图 4 所示。通过图 4 可以看出, 校正前 XCH₄ 与 GOSAT-Level2 产品存在系统误差, 校正后 XCH₄ 与 GOSAT-Level2 产品相当接近, 系统误差被消除。GOSAT-Level2 产品的 XCH₄ 平均值(作为参考标准)为 $1.825.01 \times 10^{-9}$, 校正前 XCH₄ 的平均值为 $1.751.26 \times 10^{-9}$, 偏差为 -4.05% , 校正后 XCH₄ 的平均值为 $1.820.62 \times 10^{-9}$, 偏差仅为 -0.24% , 与校正前相比偏差降低了 3.81% , 系统误差得到良好抑制。此外, 通过 CO₂ 吸收带校正, 反演结果的波动性也相对减小, 标准差从校正前的 84.31×10^{-9} 降低至 33.42×10^{-9} 。校正前后的结果表明, CH₄ 单吸收带的反演结果存在系统误差, CO₂ 吸收带的校正效果显而易见, 不仅使总体误差减小, 也使离散程度降低, 反演结果相当可靠。

4 结 论

大气 CH₄ 反演的影响因素复杂多变, 地表反射率和温度、湿度、压力廓线不确定性会给反演结果带来不可忽略的误差, 严重制约着反演精度的提高。针对上述因素的影响, 提出比值光谱法和 CO₂ 吸收带校正法进行校正。采用这两种方法对 GOSAT 卫星观测数据进行反演, 结果显示校正后的 CH₄ 反演精度有较大提高, 反演结果较为稳健可靠。这表明比值光谱法和 CO₂ 吸收带校正法可有效校正地表反射率和大气状态参数不确定性引起的误差, 提高大气 CH₄ 反演精度。本文提出的误差校正方法, 对研究大气 CH₄ 高精度反演和全球 CH₄ 浓度时空分布具有一定的参考价值, 后续工作中将进一步深入研究其他误差源的影响, 继续完善反演方法, 提高反演精度。

References

- [1] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] HE Qian, YU Tao, GU Xing-fa, et al(何茜, 余涛, 顾行发, 等). Remote Sensing Information(遥感信息), 2012, 27(4): 35.
- [3] Schneising O, Buchwitz M, Reuter M, et al. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, 11(6): 2863.
- [4] ZHANG Xing-ying, BAI Wen-guang, ZHANG Peng, et al(张兴赢, 白文广, 张鹏, 等). Chinese Science Bulletin(科学通报), 2011, 56(33): 2804.
- [5] RU Fei, LEI Li-ping, HOU Shan-shan, et al(茹菲, 雷莉萍, 侯姗姗, 等). Remote Sensing Information(遥感信息), 2013, 28(1): 66.
- [6] O'Brien D, Rayner P J. Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984—2012), 2002, 107(D18): 4354.
- [7] Wunch D, Wennberg P O, Toon G C, et al. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, 11(23): 12317.
- [8] Rodgers C D. Inverse Methods for Atmospheric Sounding: Theory and Practice. Singapore: World Scientific, 2000.
- [9] Nicodemus F E, Richmond J C, Hsia J J. US Department of Commerce, National Bureau of Standards, Washington DC, USA, 1977.
- [10] Christi M J, Stephens G L. Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984—2012), 2004, 109(D4).
- [11] YE Han-han, WANG Xian-hua, WU Jun, et al(叶函函, 王先华, 吴军, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2013, 33(8): 2184.
- [12] YE Han-han, WANG Xian-hua, WU Jun, et al(叶函函, 王先华, 吴军, 等). High Power Laser and Particle Beams(强激光与粒子束), 2013, 25(11): 2841.
- [13] Miller C E, Crisp D, DeCola P L, et al. Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984—2012), 2007, 112(D10).

Errors Analysis and Correction in Atmospheric Methane Retrieval Based on Greenhouse Gases Observing Satellite Data

BU Ting-ting, WANG Xian-hua* , YE Han-han, JIANG Xin-hua

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

Abstract High precision retrieval of atmospheric CH₄ is influenced by a variety of factors. The uncertainties of ground properties and atmospheric conditions are important factors, such as surface reflectance, temperature profile, humidity profile and pressure profile. Surface reflectance is affected by many factors so that it is difficult to get the precise value. The uncertainty of surface reflectance will cause large error to retrieval result. The uncertainties of temperature profile, humidity profile and pressure profile are also important sources of retrieval error and they will cause unavoidable systematic error. This error is hard to eliminate only using CH₄ band. In this paper, ratio spectrometry method and CO₂ band correction method are proposed to reduce the error caused by these factors. Ratio spectrometry method can decrease the effect of surface reflectance in CH₄ retrieval by converting absolute radiance spectrometry into ratio spectrometry. CO₂ band correction method converts column amounts of CH₄ into column averaged mixing ratio by using CO₂ 1.61 μm band and it can correct the systematic error caused by temperature profile, humidity profile and pressure profile. The combination of these two correction methods will decrease the effect caused by surface reflectance, temperature profile, humidity profile and pressure profile at the same time and reduce the retrieval error. GOSAT data were used to retrieve atmospheric CH₄ to test and validate the two correction methods. The results showed that CH₄ column averaged mixing ratio retrieved after correction was close to GOSAT Level2 product and the retrieval precision was up to -0.24%. The studies suggest that the error of CH₄ retrieval caused by the uncertainties of ground properties and atmospheric conditions can be significantly reduced and the retrieval precision can be highly improved by using ratio spectrometry method and CO₂ band correction method.

Keywords Remote sensing; CH₄ retrieval; Error correction; Ratio spectrometry; CO₂ band

(Received Sep. 5, 2014; accepted Dec. 20, 2014)

* Corresponding author