

大气 CO₂ 卫星遥感中植物叶绿素荧光影响的校正

叶函函, 王先华, 李勤勤, 王晓迪

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 CO₂ 卫星遥感监测的关键在于高精度, 而植物叶绿素荧光存在与大气散射相似的光谱特征, 干扰大气散射相关参数的反演结果, 从而影响 CO₂ 的反演精度。因植物叶绿素荧光强度微弱且影响特征与大气散射高度相关而难以准确校正。鉴于现有大气 CO₂ 卫星遥感精度不足, 以及植物叶绿素荧光对大气 CO₂ 反演存在不可忽视的影响程度和复杂性, 设计了 O₂-A、1.6 和 2.06 μm CO₂ 三个光谱带协同的参数化校正方法。首先通过对大气散射采取基于光子路径长度概率密度函数(PPDF)的参数化建模, 降低叶绿素荧光与大气散射参数的光谱相关性; 其次, 针对叶绿素荧光强度弱, 难以准确反演的问题, 基于轨道碳观测器(OCO-2)的叶绿素荧光产品构建了 5km 分辨率的全球叶绿素荧光先验信息库, 增强 CO₂ 与叶绿素荧光同步反演中对叶绿素荧光的先验约束, 提高叶绿素荧光的反演精度。通过 O₂-A、1.6 和 2.06 μm CO₂ 三个光谱带的协同同时反演大气散射、叶绿素荧光和大气 CO₂, 并结合叶绿素荧光丰富的先验信息, 能够较准确剥离大气散射和叶绿素荧光而提高大气 CO₂ 的反演精度。选择叶绿素荧光强度明显较高的柱总碳观测网络(TC-CON)中的 Park Falls(45.945°N, 90.273°W)站点开展验证, 对该站点近 4 年每年 8 月份的温室气体观测卫星(GOSAT)数据进行反演, 发现植被叶绿素荧光导致 GOSAT XCO₂ 反演结果系统偏低 2×10^{-6} (ppm) 左右, 通过本文的方法进行校正, 反演结果的低估程度有明显改善, 最大低估由 2.58 ppm 降低到 1.49 ppm, 且离散程度也有一定程度的改善, 明显控制了 CO₂ 反演中叶绿素荧光的影响, 对于实现 1% (~4 ppm) 的 CO₂ 反演精度来说, 提供了有力支撑。

关键词 CO₂; 植物叶绿素荧光; 校正; 先验信息库; PPDF

中图分类号: P407 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)02-0368-04

引言

温室气体引起的全球气候变化, 正促进着相关卫星遥感技术的发展。人类活动向大气排放大量的温室气体 CO₂、CH₄ 等, 导致全球平均气温上升、极端天气频发^[1]。卫星可以在全球范围内对温室气体进行持续观测, 有助于提高人们对温室气体与气候变化关系的认识, 也是制定温室气体排放政策、控制全球气候变化最有效的依据。目前国内外正努力发展温室气体卫星观测技术, 现今在轨的有日本 GOSAT 卫星^[2]、美国 OCO-2 卫星^[3] 以及我国的 Tansat^[4]、GMI/GF-5 等卫星, 正在研发并将陆续升空的有欧空局 Carbonsat, 法国航天局的 MicroCarb 等。

大气 CO₂ 卫星遥感监测的关键在于高精度, 而植物叶绿素荧光是影响精度的重要因素之一。全球区域尺度上大气柱

平均 CO₂ 干空气混合比(XCO₂)精度要达到 1% 或更高, 才能满足气候研究需求^[5]。陆地植被中的叶绿素会在红光和近红外波长发射荧光信号, 而温室气体卫星观测的 0.76 μm O₂-A 光谱带是植物叶绿素荧光信号较强的区域^[6]。叶绿素荧光存在与大气散射相似的光谱特征, 干扰大气散射相关参数的反演结果, 从而影响 CO₂ 的反演精度^[7-8]。Frankenberg 等人发现完全晴空条件下, O₂-A 带连续谱强度 1%—2% 的叶绿素荧光会导致 1~2.2 ppm 左右的 CO₂ 误差^[9]。这种影响强烈依赖于观测状态, 有气溶胶影响情况下会变得更加复杂^[10], 阻碍 1% 甚至更高精度的实现。

鉴于现有大气 CO₂ 卫星遥感精度不足的情况^[11], 以及植物叶绿素荧光对大气 CO₂ 反演存在不可忽视的影响程度和复杂性, 需要研究植物叶绿素荧光影响的校正方法, 以改进大气 CO₂ 的反演精度, 提高大气 CO₂ 卫星遥感观测的应用价值。

收稿日期: 2020-01-06, 修订日期: 2020-04-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41601393), 中国科学院合肥物质科学研究院十三五规划重点支持项目(Y73H9P1801)资助

作者简介: 叶函函, 1987 年生, 中国科学院安徽光学精密机械研究所副研究员 e-mail: yehhgo@gmail.com

1 方法设计

1.1 大气 CO₂ 反演及植物叶绿素荧光影响校正方法

在有叶绿素荧光的情况下，卫星观测辐射亮度 y 可表示为

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

式(1)中, F 为前向模型, 描述大气辐射传输过程和探测器测量过程的物理特性; x 是状态向量, 包含大气 CO₂ 含量、大气散射相关参数以及叶绿素荧光; b 为前向模型所需的除 x 外的其他参数, 如温度、湿度和压力廓线地表反射率以及仪器光谱响应函数等; ε 代表测量噪声。

采用基于贝叶斯理论的最大后验概率优化估计算法开展大气 CO₂ 与多参数的同步反演

$$x_{i+1} = x_i + (K_i^T S_\varepsilon^{-1} K_i + S_a^{-1})^{-1} \cdot [K_i^T S_\varepsilon^{-1} (y - F_i) - S_a^{-1} (x_i - x_a)] \quad (2)$$

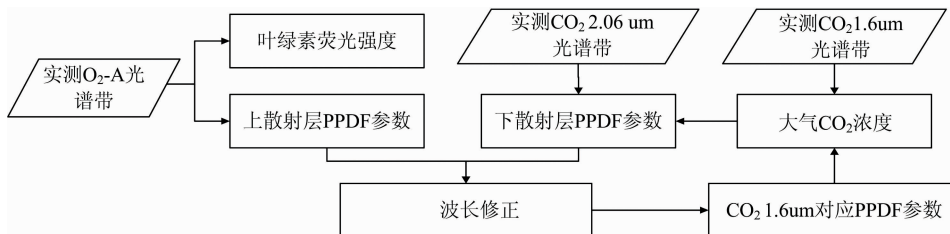


图 1 大气 CO₂ 反演流程图

Fig. 1 Flowchart of atmospheric CO₂ retrieval

利用三个光谱带协同反演大气 CO₂ 浓度、叶绿素荧光强度和 PPDF 参数。O₂-A 带用于反演叶绿素荧光强度与上散射层 PPDF 参数, CO₂ 2.06 μm 带在先验大气 CO₂ 浓度条件下反演下散射层 PPDF 参数, 对上下散射层 PPDF 参数进行波长修正后用于校正 CO₂ 1.6 μm 带的大气散射影响, 获得大气 CO₂ 浓度。大气 CO₂ 浓度反演计算结束后, 继续反馈给 CO₂ 2.06 μm 带, 更新下散射层 PPDF 参数, 流程循环进行直至所有参数达到同步收敛为止。

1.2 植物叶绿素荧光先验信息库的构建

丰富而有效的先验知识可保证大气 CO₂ 反演中叶绿素荧光信号准确提取并校正。本文采用 2015 年—2019 年共五年的 OCO-2 叶绿素荧光产品作为信息源。OCO-2 回访周期为 16 天, 综合考虑叶绿素荧光随时间的变化程度、回访周期和有效数据量, 采用全球月平均叶绿素荧光强度来分析时空分布及变化特征。

先验信息库包含空间位置、时间(年和月)、叶绿素荧光强度(Fs)及其波动程度多维度参量。首先构建一个全球 5km 分辨率的网格; 然后对 OCO-2 的 Fs 产品进行栅格化重组, 开展区域特征统计计算, 对 OCO-2 Fs 异常产品进行优化, 获得每个栅格对应的 Fs 产品; 最后分析 Fs 的时间变化特征, 建立 Fs 的值及波动程度与时间的拟合关系, 如图 3 所示。图 2 是 2019 年 1 月和 7 月栅格化的全球月平均 Fs 分布图, 以及典型季节性草场 Park Falls(45.945°N, 90.273°W) 对应的 Fs 随时间变化规律。2019 年 1 月南半球处于夏季, 巴西雨林区域和非洲中部雨林区域的 Fs 较强, 最高可达 2.1

式(2)中, x_{i+1} 为第 i 次迭代的状态向量, $K_i = \partial f / \partial x_i$ 为第 i 个状态向量的权重函数, S_ε 是测量误差协方差矩阵; S_a 是先验误差协方差矩阵; y 包含 O₂-A 光谱带、1.6 和 2.06 μm CO₂ 光谱带; x_a 是 x 的先验值。

叶绿素荧光存在与大气散射相似的光谱特征, 两者难以从观测光谱中准确区分及校正。本文采用 Bril 等提出的光子路径长度概率密度函数(PPDF)方法对大气散射影响进行参数化建模, 降低大气散射参数与叶绿素荧光的光谱相关性。该方法将瑞利散射以及云气溶胶分别等效为独立的散射层, 将整层大气分为三个模型化散射层。每层均通过光子反射比 α 、光程长度变化比 ρ 、散射层高 h 和光程概率密度函数调整因子 γ 四类 PPDF 参数来表征大气散射影响^[12]。在此基础上, 开发了大气 CO₂ 反演与叶绿素荧光的校正方法, 流程如图 1 所示。

$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ 。7 月份北半球进入夏季, 美国中部和中国南部地区 Fs 较强, 最高可达 $2.2 W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ 。由图 3 可验证, 草场叶绿素荧光的强度具有明显的季节特征, 冬季弱夏季强, 每年 7、8 月份出现最强值。

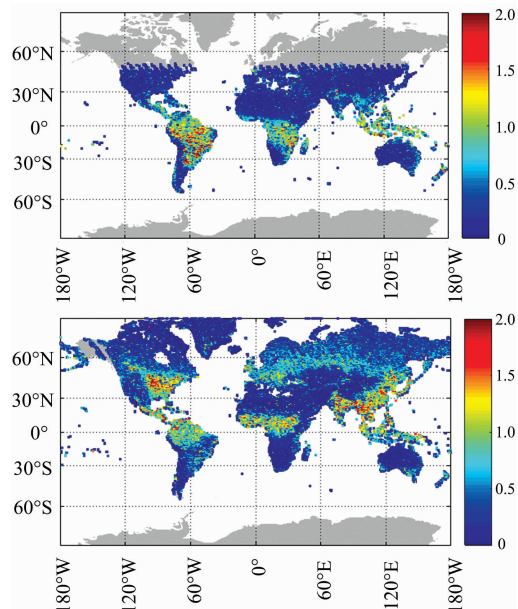


图 2 2019 年 1 月(a)和 7 月(b)栅格化的全球月平均 Fs 分布图

Fig. 2 Global grid of monthly mean plant chlorophyll fluorescence of January 2019 (a) and July 2019 (b)

根据卫星观测视场,融合多个网格内的 F_s 产品。以 GOSAT 为例,取其观测视场中心点周边 2×2 的网格进行信息融合,获得适合其 10 km 视场内的 F_s 信息。其中 F_s 强度的融合采用平均法, F_s 波动程度的融合则取最大范围,保证 F_s 先验信息的合适约束。

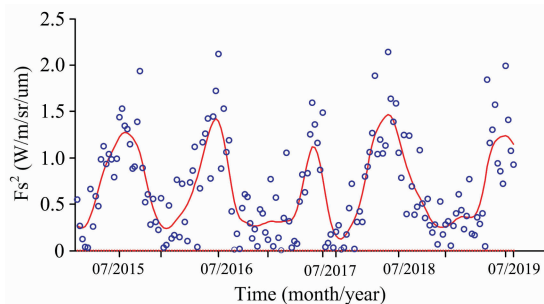


图 3 典型草场 F_s 季节性变化规律

Fig. 3 Seasonal variation of plant chlorophyll fluorescence of typical grassland

2 结果与讨论

2.1 卫星观测数据选择

叶绿素荧光对大气 CO_2 反演的影响在叶绿素荧光信号较强的区域尤为明显,大面积森林和草地上方夏季的卫星观测适于开展本文的反演工作。TCCON 观测站点的实测数据是温室气体反演的可靠参考源,它采用直接的太阳观测几何,可以在一定程度上消除叶绿素荧光和大气散射的影响。本文选择周围是大面积的森林和草地的 Park Falls 站,该站点附近的地表信息如图 4 所示,站点及其周围植被覆盖浓密,在夏季具有较强的叶绿素荧光发射。



图 4 Park Falls 站点附近的地表信息

Fig. 4 The surface type around Park Fall station

为保证 GOSAT 观测视场在植被覆盖区,以所选站点为中心,选择经纬度相差 1.5° 以内的 GOSAT 观测数据开展反演验证工作。

2.2 反演及校正结果分析

采用 2015 年至 2018 年每年 8 月份 Park Falls 站点上方的 GOSAT 数据开展 CO_2 反演与校正。由图 2 可知,8 月份 Park Falls 站点处于夏季,叶绿素荧光信号较强,基本达到

全球最高值 $2.2 \text{ W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 。未考虑叶绿素荧光校正的 XCO_2 反演结果(蓝色圆圈)与 Park Falls 站点实测(红色星号)比较如图 5 所示,每年 8 月的 XCO_2 反演结果明显低估,低估程度在 $1.85 \sim 2.58 \text{ ppm}$,统计结果见表 1 所示。

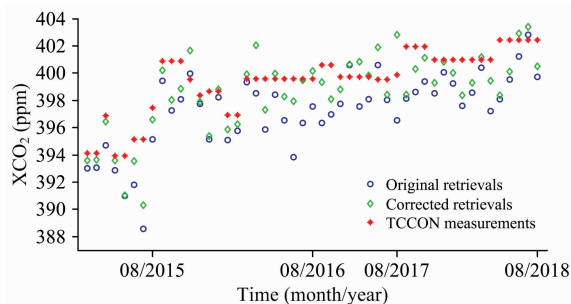


图 5 Park Falls 站点附近 GOSAT 数据 XCO_2 反演结果

蓝圈和绿菱分别为未校正叶绿素荧光和校正叶绿素荧光的反演结果,红星代表 TCCON 实测数据

Fig. 5 XCO_2 retrieval results of GOSAT observations near Park Fall station

Blue circle and green diamond represents uncorrected retrieval results and corrected retrieval results separately, red * star represents TCCON measurements

表 1 XCO_2 反演中叶绿素荧光校正前后的效果对比

Table 1 The effect of plant chlorophyll fluorescence correction on XCO_2 retrievals results

时间	未校正前 XCO_2 反演误差/ppm		校正后 XCO_2 反演误差/ppm	
	均值偏差	标准差	均值偏差	标准差
2015.08	-2.58	1.84	-1.49	1.59
2016.08	-2.08	1.61	-0.61	1.58
2017.08	-1.85	1.84	0.17	1.81
2018.08	-2.37	1.34	-1.41	1.42

利用该文的方法校正后,重新获得的 XCO_2 反演结果如图 5 中绿色菱形所示。反演结果的低估情况有较大改善,最大低估程度是 1.49 ppm,2017 年 8 月份的反演结果的低估被消除。反演结果的标准差整体上也有一定程度的改善,仅 2018 年的标准差略大。

3 结论

针对现有大气 CO_2 卫星遥感精度不足的情况,以及植物叶绿素荧光对大气 CO_2 反演存在不可忽视的影响程度和复杂性,提出了一种三光谱带协同反演大气 CO_2 、 F_s 与大气散射参数来实现叶绿素荧光影响校正的方法。该方法通过采用 PPDF 因子对大气散射进行参数化建模,降低叶绿素荧光与大气散射的光谱相关性,提高两者协同反演的能力,同时,针对植物叶绿素荧光强度微弱、难以准确同步反演的问题,构建了植物叶绿素荧光卫星遥感先验信息库,增强叶绿素荧光强度反演的准确性,从而提高大气 CO_2 的反演精度。

对 2015 年至 2018 年每年 8 月份 Park Falls 站点上方的

GOSAT 数据开展 CO₂ 反演与校正。受植物叶绿素荧光的影响, 每年 8 月 GOSAT 数据反演的 XCO₂ 均存在低估, 低估程度在 2 ppm 左右。利用本文方法进行校正, 反演结果的低估程度有较大改善, 最大低估由 2.58 ppm 降低到 1.49

ppm, 甚至 2017 年 8 月的低估得以完全改善。本文提出的校正方法对于实现 1% (~4 ppm) 的 CO₂ 反演精度来说, 提供了有力支撑。

References

- [1] Hewitson B, Janetos A C, Carter T R, et al. Regional context. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2014, 1133.
- [2] GOSAT Project Pamphlet, 6th Edition 2nd Revision, Feb. 2012, http://www.gosat.nies.go.jp/eng/GOSAT_pamphlet_en.pdf.
- [3] Frankenberg C, Pollock R, Lee R A M, et al. *Atmos. Meas. Tech. Discuss.*, 2014, 7: 7641.
- [4] LIU Yi, CAI Zhao-nan, YANG Dong-xu, et al(刘毅, 蔡兆男, 杨东旭, 等). *Chinese Science Bulletin(科学通报)*, 2013, 58(27): 2787.
- [5] Houweling S, Breon F, Aben I, et al. *Atmos. Chem. Phys.*, 2004, 4: 523.
- [6] Krause G, Weis E. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.*, 1991, 42: 313.
- [7] Frankenberg C, Butz A, Toon G C. *Geophys. Res. Lett.*, 2011, 38: L03801.
- [8] Joiner J, Guanter L, Lindstrom R, et al. *Atmos. Meas. Tech.*, 2013, 6: 2803.
- [9] Frankenberg C, O'Dell C, Guanter L, et al. *Atmos. Meas. Tech.*, 2012, 5: 2081.
- [10] JIANG Yun, YE Han-han, WANG Xian-hua, et al(蒋芸, 叶函函, 王先华, 等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2018, 38(3): 864.
- [11] Data_Quality_Statement_ACOS_v2.9, http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/acdisc/documentation/Data_Quality_Statement_ACOS_v2.9.pdf.
- [12] Sergey Oshchepkov, Andrey Bril, Tatsuya Yokota, et al. *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*, 2012, 117: D12305.

Correction the Effect of Plant Chlorophyll Fluorescence on Atmospheric Carbon Dioxide Satellite Monitoring

YE Han-han, WANG Xian-hua, LI Qin-qin, WANG Xiao-di

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

Abstract For atmospheric Carbon dioxide (CO₂) satellite monitoring, high precision is the most important. However, because of the high similarity of spectra between plant chlorophyll fluorescence and atmospheric scattering effects, the atmospheric scattering effects were always misinterpreted and CO₂ retrieval errors were caused. The minor radiance and high spectral similarity of the plant chlorophyll fluorescence made it hard to retrieve and correct. Considering the non-negligible effects of plant chlorophyll fluorescence on CO₂ retrieval, we designed a correction method based on atmospheric scattering effects parameterization using three spectral bands of O₂-A band, 1.6 and 2.06 μm CO₂ band to retrieve chlorophyll fluorescence, photonpath-length probability density function (PPDF) parameters and CO₂ simultaneously. Firstly, atmospheric scattering effects were parameterized using the PPDF model to reduce its spectral similarity with the plant chlorophyll fluorescence. Secondly, the prior information database with 5 km resolution of plant chlorophyll fluorescence was built using plant chlorophyll fluorescence products from the Orbiting Carbon Observatory(OCO-2), which can strength the prior constraints on chlorophyll fluorescence retrievals and improves its retrieval precision. Through disentangling and quantifying the atmospheric scattering and plant chlorophyll fluorescence, CO₂ will be retrieved more accurate. Park Falls station covered with dense plant location in 45.945°N and 90.273°W of Total Carbon Column Observing Network (TCCON) was selected for validation. CO₂ retrievals of Greenhouse Gases Observing Satellite (GOSAT) without chlorophyll fluorescence correction are about 2 ppm under bias, which was corrected obviously through the method of this paper, as the largest bias reduces from 2.58 ppm to 1.49 ppm. In the same time, the standard deviations are also improved. From the validation results we can see that the effect of plant chlorophyll fluorescence on CO₂ retrieval is corrected effectively.

Keywords Carbon dioxide; Plant chlorophyll fluorescence; Correction; Prior information database; PPDF

(Received Jan. 6, 2020; accepted Apr. 18, 2020)