

中国二氧化碳科学实验卫星高光谱探测器光谱指标影响分析及优化方案

刘毅, 蔡兆男*, 杨东旭, 段民征, 吕达仁

中国科学院大气物理研究所, 中层大气与全球环境探测重点实验室, 北京 100029

* 联系人, E-mail: caizhaonan@mail.iap.ac.cn

2013-05-03 收稿, 2013-07-08 接受, 2013-08-30 网络版发表

国家高技术研究发展计划重大项目(2011AA12A104)和中国科学院战略性先导科技专项(XDA05040200)资助

摘要 中国第一颗二氧化碳科学试验卫星(碳卫星: TanSat)将搭载高光谱分辨率的光栅光谱仪。信噪比、光谱分辨率、光谱范围和光谱采样频率是决定卫星遥感监测大气二氧化碳精度的核心指标。利用中国科学院大气物理研究所自主研发的碳卫星仪器指标模拟分析系统和短波红外反演算法, 分析和论证了碳卫星二氧化碳探测仪的光谱指标对二氧化碳柱平均混合比(XCO_2)反演精度的影响, 并利用 GOSAT 卫星观测数据进行了 XCO_2 的反演试验。研究表明, 低光谱采样频率主要影响二氧化碳弱吸收带($1.61 \mu m$)观测精度, 可以造成 XCO_2 反演误差达到 $1 ppm$ ($1 ppm=1 \mu L L^{-1}$)。通过降低光谱分辨率, 将光谱采样频率提高至 2.0 以上可以有效降低采样频率的影响, 为提高中国碳卫星的观测精度奠定了理论基础。

关键词

碳卫星
二氧化碳
指标优化
卫星遥感

大气二氧化碳浓度增加导致全球变暖已经成为科学界的共识。如何定量监测和评估人为活动以及生态系统对于大气二氧化碳浓度和源汇的贡献和影响是目前科学界面临重大科学和技术问题, 充分利用卫星遥感监测技术开展全球和区域大气二氧化碳浓度观测有望成为解决这一科学问题的最有效手段。为此, 欧洲(SCIAMACHY, CarbonSat 卫星)^[1,2]、美国(OCO, OCO-2 卫星)^[3,4]和日本(GOSAT, GOSAT-2 卫星)^[5]等地区相继开展了卫星遥感监测温室气体的科学计划, 其中日本 GOSAT 卫星自从 2009 年发射成功后已经连续观测了 4 年, 经过日本、美国和欧洲科学界的合作研究, 对 GOSAT 卫星观测数据质量和反演算法不断改进, 目前二氧化碳柱平均混合

比(XCO_2)的观测精度达到 $1.5 ppm$ ^[6] ($1 ppm=1 \mu L L^{-1}$, 余同)。

中国全球二氧化碳科学实验卫星计划得到国家高技术研究发展计划(863 计划)重大项目和中国科学院战略性先导科技专项共同支持, 计划于 2011~2015 年完成研制与发射。中国碳卫星采用同欧洲、美国及日本类似的原理, 即通过对氧气 A 吸收带、二氧化碳 $1.61 \mu m$ (弱带)和 $2.06 \mu m$ (强

带)吸收带的高光谱、高精度的观测, 实现对 XCO_2 的高精度($1\sim4 ppm$)遥感监测。高光谱分辨率探测仪的信噪比、光谱分辨率、光谱范围和采样频率是卫星遥感监测二氧化碳精度的决定因素。

由于卫星与太阳的相对运动的多普勒效应和温度变化导致卫星观测的太阳参考光谱和对地观测光谱存在一定波长漂移, 因此为了保证光谱观测

表 1 二氧化碳光谱仪初步仪器参数

TanSat	波段范围(nm)	光谱分辨率(nm)	采样间隔(nm)
O ₂ -A	758~778	0.044	0.022
CO ₂ -1.61 μm	1594~1624	0.081	0.081
CO ₂ -2.06 μm	2042~2082	0.103	0.103

引用格式: 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器光谱指标影响分析及优化方案. 科学通报, 2013, 58: 2787-2789
Liu Y, Cai Z N, Yang D X, et al. Optimization of the instrument configuration for TanSat CO₂ spectrometer (in Chinese). Chin Sci Bull (Chin Ver), 2013, 58: 2787-2789, doi: 10.1360/972013-518

精度,OCO-2 和 TanSat 光谱仪需要满足光谱分辨率和光谱采样间隔的比值(光谱采样频率)大于 2,即 Nyquist 采样定律.如表 1 所示,在 TanSat 的初步设计指标中,CO₂ 的强带和弱带的光谱采样频率均为 1.0 左右,因此存在光谱采样频率过低或者欠采样问题.

为了分析光谱采样频率及带宽的影响,参考 Chance 等人^[7]的方法,可以采用光谱仪的仪器线型函数(即狭缝函数)结合高分辨率太阳光谱和模拟卫星观测光谱来分析光谱采样率的影响.本研究采用中国科学院大气物理研究所自主研发的碳卫星仪器指标模拟分析系统^[8],在二氧化碳弱吸收带(1.6 μm)和强吸收带(2.06 μm)分别用半峰宽为 0.081 和 0.103 nm 的高斯函数模拟相应波段狭缝函数,这一半峰宽数值相当于碳卫星初步设计指标^[9].图 1 对比了在假设光谱波长相对漂移为 0.008 nm (TanSat 光谱定标精度)条件下采样频率分别为 1 和 2 时光谱欠采样光学厚度与 CO₂ 浓度 1% 变化光学厚度,可见由于低采样引起的误差严重污染了 1.61 μm 波段观测光谱,对 2.06 μm 波段影响较小.

利用模拟 TanSat 观测光谱进行 CO₂ 浓度反演实验可以进一步评估欠采样的影响,如图 2 所示计算结果表明:CO₂ 1.61 μm 吸收带的光谱欠采样造成的 XCO₂ 反演误差可以达到约 1 ppm,并随太阳天顶角、地表反照率变化(实线).在采样频率增加到 2 以上时,该误差可以减小到 0.1 ppm 以下(虚线).

因此解决碳卫星光谱采样问题的核心是增加光谱的采样频率并保持对 CO₂ 反演的敏感性.通过降低光谱分辨率或者减少带宽可以提高 1.61 μm 波段光谱采样频率,有效降低欠采样的影响.利用模拟反演实验对选取不同光谱分辨率和波段范围方案进行了分析,进一步利用 TanSat 短波红外反演算法对目前唯一在轨的 GOSAT 卫星观测数据进行了 XCO₂ 的反演试验^[10],结果如表 2 所示:保留 1594~1624 nm 带宽、降低光谱分辨率到 0.162 nm 和

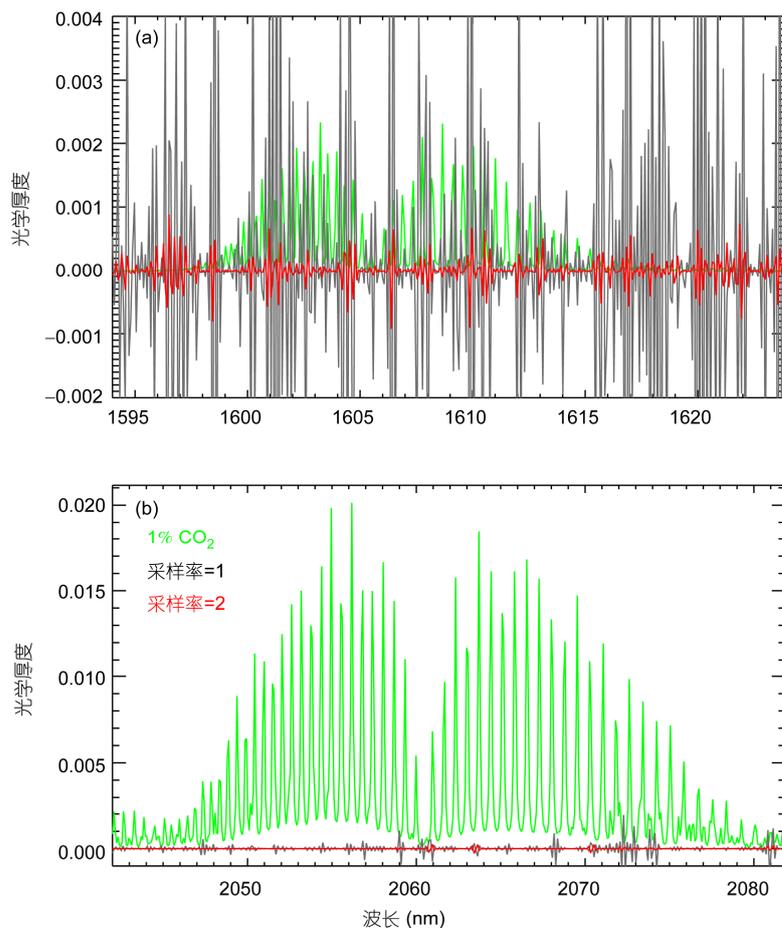


图 1 采样频率误差的光学厚度同 1% CO₂ 光学厚度的对比
(a) 1.61 μm 波段观测光谱; (b) 2.06 μm 波段观测光谱

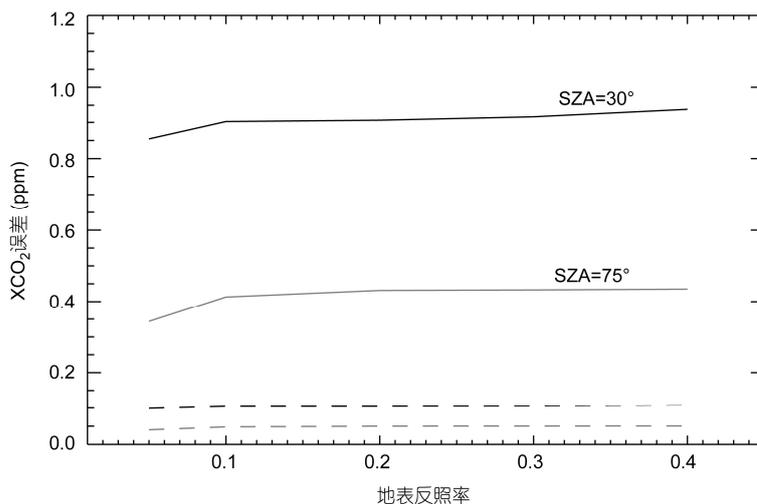


图 2 由光谱采样误差引起的 XCO₂ 反演误差随地表反照率和太阳高度角 (SZA) 的变化

表 2 CO₂ 1.61 μm 指标参数方案

方案	半峰宽(nm)	采样间隔(nm)	波段范围(nm)	采样频率(nm)
1	0.162	0.060	1594~1624	2.7
2	0.081	0.024	1594~1614	2.0

减小带宽到 1594~1614 nm 保留光谱分辨率是两种最佳的替代方案。

目前国际已发射和即将发射的二氧化碳监测卫星均保留了完整的 CO₂ 吸收带, 利用吸收带双峰结构和两翼

窗区将 CO₂ 吸收带和非吸收带勾勒出来, 利用二者的差别约束 CO₂ 的含量和气溶胶、地表等慢变过程. GOSAT 数据的实际反演实验表明, 保证一定的带宽是非常必要的, 同时考虑高光

谱分辨率探测仪的研制和定标技术瓶颈制约, 适当的增加带宽有利于提高仪器的信噪比、降低研制的风险. 所以适当降低分辨率保证观测波段宽度是稳妥的解决方案(表 2 方案 1).

参考文献

- 1 Bovensmann H, Burrows J P, Buchwitz M, et al. *J Atmos Sci*, 1999, 56: 127–150
- 2 Velasco V A, Buchwitz M, Bovensmann H, et al. *Atmos Meas Tech*, 2011, 4: 2809–2822
- 3 Crisp D, Atlas R M, Breon F M, et al. *Adv Space Res*, 2004, 34: 700–709
- 4 O'Dell C W, Connor B, Bösch H, et al. *Atmos Meas Tech*, 2012, 5: 99–121
- 5 Yokota T, Yoshida Y, Eguchi N, et al. *SOLA*, 2009, 5: 160–163
- 6 Crisp D. Recent science updates from GOSAT and OCO₂-GOSAT collaboration. GOSAT Workshop Meeting, 2013
- 7 Chance K, Kurosu T P, Sioris C E. *Appl Optics*, 2012, 44: 1296–1304
- 8 Cai Z N, Liu Y, Yang D X. Sensitivity studies for the retrieval of XCO₂ from simulated Chinese carbon satellite (TanSat) measurements: A linear error analysis. *Sci China Earth Sci*, 2013, 56, doi: 10.1007/s11430-013-4707-1
- 9 Liu Y, Duan M Z, Cai Z N, et al. Chinese carbon dioxide satellite (TanSat) status and plans. In: *Proceeding of American Geophysical Union 2012 Fall Meeting*. American Geophysical Union, 2012
- 10 刘毅, 杨东旭, 蔡兆男. *科学通报*, 2013, 58: 996–999

Optimization of the instrument configuration for TanSat CO₂ spectrometer

LIU Yi, CAI ZhaoNan, YANG DongXu, DUAN MinZheng & LÜ DaRen

Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

The spectral resolution and spectral sampling rate are critical for the design of hyperspectral spectrometer for CO₂ observation satellite. From the original configuration of TanSat spectrometer, it has been found that the spectral sampling rate was too low to keep the high precision of spectral observation in CO₂ 1.61 μm absorption band, for there were undersampling problems in the CO₂ 1.61 μm-band. The CO₂ dry-air column (XCO₂) error due to spectral undersampling could be up to ~1 ppm (1 ppm=1 μL L⁻¹). Reduction of spectral resolution could improve spectral sampling rate with little changes in CO₂ retrieval sensitivity. It was also helpful to increase the signal-to-noise ratio of the instrument.

TanSat, CO₂, optimal selection, satellite remote sensing

doi: 10.1360/972013-518