

# 气溶胶对利用近红外波段反演CO<sub>2</sub>浓度精度的影响研究

王舒鹏<sup>1</sup> 张兴赢<sup>1</sup> 王维和<sup>1</sup> 陈林<sup>1</sup> 方莉<sup>2</sup>

(1 国家卫星气象中心, 北京 100081; 2 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100101)

**摘要:** 近红外波段CO<sub>2</sub>浓度反演误差主要与气溶胶散射作用引起的吸收光程改变量难以精确估计有关。此外, 不同的气溶胶模式及下垫面反射率条件下吸收光程改变量也不尽相同。针对不同气溶胶模式条件下, 忽略气溶胶散射对CO<sub>2</sub>浓度反演精度的影响进行分析。研究发现, 对乡村型、对流层型和海洋型气溶胶来说, 忽略气溶胶散射效应, 在暗地表时(反射率<0.1)会导致CO<sub>2</sub>浓度反演结果低估; 当地表反射率超过0.1后, CO<sub>2</sub>浓度反演结果均为高估, 且随地表反射率的增加, 反演误差增加。对城市型气溶胶模式来说, 忽略气溶胶影响均会导致CO<sub>2</sub>浓度反演结果低估, 随地表反射率增加, 反演误差递减。在典型观测几何下, 地表反射率(1.6μm)和气溶胶光学厚度(0.55μm)在0.1~0.3范围内时, 忽略气溶胶影响, 城市型、海洋型、乡村型以及对流层气溶胶分别会引入-0.1%~-0.5%、0.22%~1.92%、0.09%~1.46%及0.02%~0.45%的反演误差。在利用GOSAT观测光谱对XCO<sub>2</sub>(干燥空气下CO<sub>2</sub>平均混合比)进行反演时发现, 相比GOSAT发布结果(389.814ppm, 1ppm=10<sup>-6</sup>), 基于地基实测气溶胶特性数据的XCO<sub>2</sub>反演结果(390.95ppm)与地基观测结果(390.737ppm)有更好的一致性。

**关键词:** XCO<sub>2</sub>反演, 近红外波段, GOSAT, 气溶胶

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.01.016

## The Influence of Aerosol Particles on Retrieval Accuracy of CO<sub>2</sub> Concentration Using Near Infrared Bands

Wang Shupeng<sup>1</sup>, Zhang Xingying<sup>1</sup>, Wang Weihe<sup>1</sup>, Chen Lin<sup>1</sup>, Fang Li<sup>2</sup>

(1 National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081

2 Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

**Abstract:** The main difficulty in retrieving CO<sub>2</sub> concentration from near-infrared observations comes from the uncertainty of light path change brought about by scattering of the atmospheric aerosols. The scattering effect described by different aerosol models and surface reflectances may lead to different light path changes. This paper aims to study the influence of neglecting aerosol scattering on CO<sub>2</sub> retrieval accuracy for different aerosol models. It is found that for rural, tropospheric and marine aerosol models, the neglecting of aerosol scattering results in underestimation of CO<sub>2</sub> retrievals at low surface reflectances (<0.1), but overestimation at surface reflectance over 0.1 and the increasing retrieval errors with increasing surface reflectances. For the urban aerosol model, the neglecting of aerosol scattering results in underestimation of CO<sub>2</sub> retrievals at any surface reflection, and the retrieval errors decrease with increasing surface reflectances. For typical observation geometry, a surface reflectance of 0.1-0.3 at 1.6μm and aerosol optical depth (AOD) of 0.1-0.3 at 0.55μm, the neglecting of aerosol scattering leads to retrieval errors of (-0.1%) - (-0.5%), 0.22%-1.92%, 0.09%-1.46% and 0.02%-0.45% for urban, marine, rural and tropospheric aerosol models respectively. XCO<sub>2</sub> (the dry air column averaged mixing ratio of CO<sub>2</sub>) was retrieved from GOSAT observations with in-situ measurements of aerosol properties as input parameters. Comparison with ground-based XCO<sub>2</sub> measurements shows that the retrieved XCO<sub>2</sub> (390.95ppm) is more consistent with the measured XCO<sub>2</sub> (390.737ppm) as compared to that of GOSAT L2 product (389.814ppm).

**Keywords:** retrieval of XCO<sub>2</sub>, near infrared bands, GOSAT, aerosols

### 0 引言

基于近红外高光谱卫星遥感的CO<sub>2</sub>监测, 由于

其高时空分辨率、全球覆盖、低成本以及对近地面CO<sub>2</sub>浓度变化的高敏感性, 逐渐成为监测与人类活动相关的CO<sub>2</sub>源汇信息的重要手段<sup>[1-2]</sup>。2002年搭载于ENVISAT上的SCIAMACHY<sup>[3]</sup>, 2009年发射的近红外波段的高光谱探测仪GOSAT<sup>[4]</sup>和2014年美国发射的OCO-2<sup>[2]</sup>都可以通过观测近红外波段的太阳光反射光谱来反演近地面CO<sub>2</sub>含量。即将发射的下一代近红外

收稿日期: 2015年8月31日; 修回日期: 2015年12月29日  
第一作者: 王舒鹏(1984—), Email: wangsp@cma.gov.cn  
资助信息: 国家高技术研究发展计划(2011AA12A104);  
国家自然科学基金(41306185)

高光谱温室气体载荷,包括欧洲的CarbonSat<sup>[5]</sup>以及中国的TanSat等多个载荷<sup>[6-7]</sup>,都将为更好地获取近地面温室气体的源汇信息提供支持。

影响近红外太阳反射光谱反演CO<sub>2</sub>浓度的要素众多<sup>[8]</sup>。但最大的不确定性来自大气中气溶胶的散射作用所带来的光程改变的不确定性<sup>[9]</sup>。气溶胶的散射作用可能增加光程,也可能减小光程。在下垫面反射率较低时,传感器接收到的光子通过大气散射直接进入传感器而不经地表反射,此时的光程是减小的。相反,在下垫面反射率较高时,到达传感器的光子由于气溶胶或云与地表的多次散射作用,光程增加<sup>[10]</sup>。GOSAT官方发布的CO<sub>2</sub>反演产品的地基验证结果表明,忽略气溶胶和云的散射作用对光程的改变,即使在晴空条件下,都可能对CO<sub>2</sub>反演精度带来较大的误差<sup>[11-12]</sup>。研究发现,撒哈拉沙漠的沙尘型气溶胶可以对SCIAMACHY的CO<sub>2</sub>总量反演误差达到10%<sup>[13]</sup>,远超过在区域尺度上(约1000km×1000km)监测碳源汇的需求精度(<1%)<sup>[14]</sup>。以往很多研究基于单次散射假设对气溶胶散射作用引起的CO<sub>2</sub>浓度反演误差进行量化分析。也有研究在气溶胶多次散射假设下,对气溶胶散射引起的CO<sub>2</sub>浓度反演误差进行分析<sup>[10,15]</sup>,但并没有考虑不同下垫面反射对反演精度的影响。考虑到地表反射率是决定有效光程的重要参数,Aben等<sup>[16]</sup>在更大范围的地表反射率条件下,分析了不同气溶胶光学厚度和薄卷云存在条件下的散射误差。杨东旭等<sup>[17]</sup>通过不同气溶胶模式对1.6μm波段强弱吸收带的辐射光谱比的影响来评价气溶胶散射对反演的影响。

考虑到不同气溶胶模式和下垫面反射率条件下,气溶胶散射效应并不相同,本研究重点在不同地表反射率和不同气溶胶模式条件下,对忽略气溶胶散射对XCO<sub>2</sub>反演精度的影响进行分析。此外,本文在实测气溶胶模式和几种典型气溶胶模式假设下,分别利用GOSAT观测光谱分别对XCO<sub>2</sub>进行反演,并对不同气溶胶假设引起的反演误差进行分析。

## 1 正向辐射传输模拟及反演

本文所采用的正向辐射传输模型是SCIATRAN 3.2<sup>[18]</sup>,该辐射传输模式基于离散坐标法对辐射传输方程进行求解,为简便起见,在求解中忽略偏振贡献。在模拟传感器的卷积效应时,采用Boxcar型响应函数,传感器各波段半波宽(HWMF)与GOSAT对应波段参数相同,1.6μm波段和2.05μm波段分别约为0.03512nm和0.054nm。

在计算吸收气体的消光系数时,为了提高计算

精度,采用逐线积分(LBL)的方式计算,采样点间隔为0.001nm。在辐射传输计算时,将整个大气分为20层。在所选波段内存在的吸收气体为CO<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>O。这两种吸收气体每一层的消光系数都通过该层所包含的各子层的消光系数相加得到。每一子层内近似认为压强恒定。太阳吸收光谱来自于Kurucz<sup>[19]</sup>的太阳吸收线表。吸收气体的吸收截面通过HITRAN2008数据库<sup>[20]</sup>中的吸收线参数计算获得。图1给出在GOSAT光谱分辨率下,1.6μm波段使用HITRAN2012<sup>[21]</sup>和HITRAN2008的光谱差异。虽然相比2008版,2012版中CO<sub>2</sub>的吸收线条数增加了许多,但是两者的总线强几乎相同,不同HITRAN数据库版本得到的透过率相差很小,只有在少数CO<sub>2</sub>强吸收的地方存在一些波动,卷积后两者差在整个波段上几乎为0,可以认为2008版和2012版在该波段中对CO<sub>2</sub>的敏感性相同。

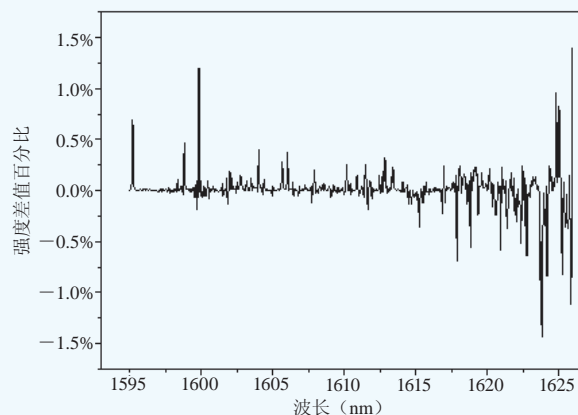


图1 使用HITRAN2008和HITRAN2012光谱库得到的模拟光谱差异(1.6μm波段)

Fig. 1 Difference between the spectrum at 1.6μm simulated using HITRAN2008 and HITRAN2012

在模拟过程中同时考虑大气分子和气溶胶粒子的散射影响。考虑到在实际CO<sub>2</sub>反演中,有云存在的条件下反演结果可信度往往较低,假定模拟场景为无云情况。通过瑞利散射假设对大气分子散射进行模拟<sup>[22]</sup>,其对应的光学厚度是波长和大气分子数密度的函数。在模拟过程中选择的不同气溶胶模式来自于LOWTRAN气溶胶数据库<sup>[23]</sup>。不同的气溶胶模式为:海洋型气溶胶(能见度:23km,相对湿度:70%),城市型气溶胶(能见度:10km,相对湿度:70%),乡村型气溶胶(能见度:23km,相对湿度:70%)和一般对流层气溶胶(能见度:23km,相对湿度:70%)。气溶胶光学厚度(AOD)的变化范围为0.05~1.0(0.55μm)。气溶胶散射特性模拟基于球形粒子假设,通过Mie散射对其散射相函数进行模拟。假定地表为朗伯体,两个CO<sub>2</sub>吸收波段地表反射率相

同。利用迭代的非线性最小二乘法视线光谱匹配<sup>[24]</sup>，对待反演参数进行反演。表1给出正向模拟时不同场景的参数变化范围。

表1 不同气溶胶模式的单次散射反照率 (SSA) 和不对称因子 (g) (1.536 $\mu\text{m}$ )  
Table 1 The SSA and asymmetry factor of different aerosol models (at 1.536 $\mu\text{m}$ )

气溶胶模型	SSA	g
海洋型	0.99	0.89
对流层型	0.81	0.54
乡村型	0.86	0.64
城市型	0.56	0.90

## 2 忽略气溶胶散射对反演精度影响分析

大气气溶胶对CO<sub>2</sub>反演的主要影响体现在其散射作用会改变到达传感器的入瞳光的光程。虽然在反演波段内气溶胶的散射特性相对一致，该光程改变量的估计误差仍会直接影响CO<sub>2</sub>反演精度。气溶胶的光学特性 (AOD)、微物理特性 (SSA和不对称因子)、气溶胶粒子的垂直分布、下垫面反射率以及观测几何都会影响由散射作用引起的光程改变量，甚至光程改变的符号。

传感器接收到的光强 $I_{\text{tot}}$ 可以表达为<sup>[10]</sup>:

$$I_{\text{tot}} = I_{\text{dir}} + I_{\text{bsct}} + I_{\text{srf}} + I_{\text{rsct}} + I_{\text{msct}} \quad (1)$$

其中， $I_{\text{dir}}$ 代表直射太阳光，即没有经过大气散射、仅经过一次地表反射后直接进入传感器的光强； $I_{\text{bsct}}$ 代表大气后向散射，即仅经过大气中的分子和气溶胶后向散射进入传感器的光强； $I_{\text{srf}}$ 代表大气散射光经地表反射直接进入传感器的光强； $I_{\text{rsct}}$ 代表直射太阳光经地表反射后又经过一次大气散射进入传感器的光强； $I_{\text{msct}}$ 代表经过大气和地表多次散射进入传感器的光强。若没有气溶胶散射存在，传感器接收到的光强以直射光项 $I_{\text{dir}}$ 为主，大气散射项可以忽略。在气溶胶散射存在的情况下，大气散射项不能忽略，与直射光项 $I_{\text{dir}}$ 相比，大气后向散射项 $I_{\text{bsct}}$ 引起吸收光程缩短，而前向散射项 ( $I_{\text{srf}}$ ,  $I_{\text{rsct}}$ ,  $I_{\text{msct}}$ ) 引起吸收光程增加。

考虑到大气散射对短波红外波段光程的改变是气溶胶散射与下垫面反射联合作用的结果<sup>[25]</sup>。图2给出对应于LOWTRAN的不同气溶胶模式 (乡村型、对流层型、海洋型和城市型气溶胶) 在不同AOD (0.55 $\mu\text{m}$ ) 下，太阳天顶角为30°、观测天顶角为0°时，如忽略气溶胶散射，CO<sub>2</sub>柱浓度反演精度随地表反射率的变化。各相关要素的变化范围见表2。

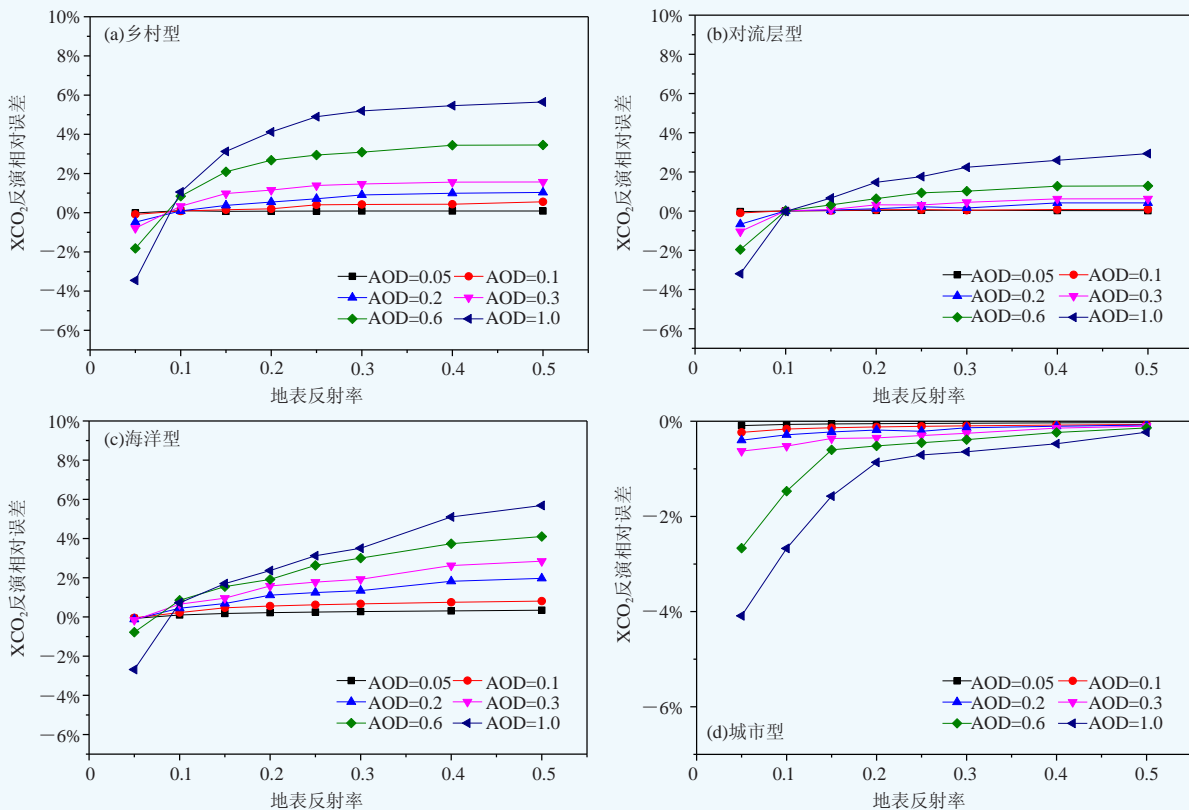


图2 乡村型 (a)、对流层型 (b)、海洋型 (c) 和城市型 (d) 气溶胶模式在不同AOD (0.55 $\mu\text{m}$ ) 情况下，忽略气溶胶存在时，XCO<sub>2</sub>反演相对误差 (真值为385ppm) 随地表反射率的变化

Fig. 2 Variation of the XCO<sub>2</sub> retrieval error introduced by ignoring aerosol scattering with the surface reflectance for different AOD(0.55  $\mu\text{m}$ ) under (a) rural, (b) tropospheric, (c) marine and (d) urban aerosol model

表2 气溶胶对CO<sub>2</sub>反演精度影响分析中各要素的变化范围  
Table 2 The variation range of parameters used in the study on CO<sub>2</sub> retrieval accuracy affected by aerosols

参数	变化范围
地表反射率	0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.4, 0.5
气溶胶模式	海洋型气溶胶, 城市型气溶胶, 乡村型气溶胶, 对流层型气溶胶
AOD (0.55μm)	0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 1.0
观测几何	太阳天顶角 (30°), 观测天顶角 (0°)

在相同AOD和地表反射率情况下, 忽略海洋型和城市型气溶胶散射的反演误差明显大于忽略乡村型和 对流层型气溶胶的误差 (AOD>0.5时, 反演误差可能超过15%)。在海洋型和城市型气溶胶模式下忽略气溶胶散射影响进行反演时, 为了保证反演结果的合理性, 需要对模拟光谱进行多项式校正, 减小由于气溶胶宽通道信号引入的反演误差。

对乡村型、对流层型和海洋型气溶胶模式, 在相同AOD下, 当地表反射率较低 (<0.1) 时, 忽略气溶胶散射影响会导致XCO<sub>2</sub>反演结果低估; 当地表反射率超过0.1时, XCO<sub>2</sub>反演结果高估且随地表反射率的增加反演误差逐渐增加; 在相同地表反射率条件下, 随AOD增加, 反演误差增加。这是由于在暗地表时, 传感器接收到的光强主要来自于大气后向散射项  $I_{bsct}$ , 相比忽略气溶胶散射时的主要贡献项  $I_{dir}$ , 吸收光程缩短, 因此反演的CO<sub>2</sub>含量偏低。随着地表反射率的增加, 大气前向散射逐渐成为传感器入瞳光的主要贡献。此时前向散射项 ( $I_{srfn}$ ,  $I_{rsct}$ ,  $I_{msct}$ ) 的贡献增加, 后向散射项 ( $I_{bsct}$ ) 贡献减弱, 前向散射项对应的吸收光程要大于直射光项, 因此反演的CO<sub>2</sub>含量增加。城市型气溶胶模式与上面三种气溶胶模式不同: 在相同AOD情况下, 忽略气溶胶散射影响, 均导致CO<sub>2</sub>反演结果低估; 随地表反射率增加, 误差递减, 即暗地表反演误差最大。在相同地表反射率条件下, 随AOD增加, 反演误差增加。

当地表反射率 (1.6μm) 和AOD (0.55μm) 在 0.1~0.3时, CO<sub>2</sub>柱总量反演误差对城市型气溶胶为-0.1%~-0.5%, 海洋型气溶胶为0.22%~1.92%, 乡村型气溶胶为0.09%~1.46%, 对流层气溶胶为0.02%~0.45%。本文的结果与Aben等<sup>[16]</sup>得到的结论基本一致。Aben等<sup>[16]</sup>发现强吸收的城市气溶胶会引起反演结果偏低, 而其他气溶胶模式除在暗地表会出现反演结果偏低外, 当地表反射率超过0.1时都会出现反演结果偏高。本文得到的海洋型气溶胶和城市型气溶胶的反演误差范围小于Aben等<sup>[16]</sup>的结果 (分别引入0.1%~2.8%和-1.1%~0的反演误差)。这是由于本

文在这两种气溶胶模式下利用二阶多项式对宽通道信号进行校正, 压制了反演误差所致。Mao等<sup>[10]</sup>通过强弱吸收带的辐射光谱比的变化来研究不同气溶胶模式对XCO<sub>2</sub>反演精度的影响, 发现海洋型气溶胶对XCO<sub>2</sub>反演精度影响最大 (~15ppm), 吸收性城市型气溶胶影响最小 (~1ppm)。与本文结论差异的原因在于, 基于强弱吸收带的辐射光谱比的校正可以大幅度削弱地表反射率或气溶胶引入的宽通道信号所导致的误差, 但对由气溶胶散射引起的吸收光程变化造成的误差削弱效果较差, 即对城市吸收型气溶胶 (SSA为0.52) 引入的误差校正最好, 而对在该波段散射性较强的海洋型气溶胶 (SSA为0.98) 引入的误差校正效果较差。该差异也说明, 无论反演误差是由于气溶胶或地表吸收还是由于散射引起的光程改变所引入, 基于二次多项式拟合宽通道信号的校正结果都较好。如果反演中无法获取气溶胶特性信息, 可以考虑用该校正方法提高反演精度。

### 3 反演实例分析

2013年8月在敦煌定标场 (40.19°N, 94.31°E) 开展了针对GOSAT L2级CO<sub>2</sub>产品的精度评价试验。为了进一步说明气溶胶模式的不确定性对CO<sub>2</sub>浓度反演的影响, 在地基实际气溶胶参数和以上不同气溶胶模式假设条件下分别利用GOSAT观测光谱对XCO<sub>2</sub>进行反演。

考虑到CO<sub>2</sub>反演需要无云场景, 采用GOSAT L2级 CAI 云检测产品对无云场景进行辨识。经过比较, 在地基同步观测时间内 (2013年8月19—25日), 仅有8月24日的GOSAT对应点观测光谱数据满足良好的无云场景条件。表3给出观测站位置信息及同步观测的环境参数信息。选择与地基观测站点位置最为接近的曝光点数据进行反演, 利用地基观测数据得到反演时刻附近的环境及大气参数。图3给出2013年8月24日拉曼偏振大气探测激光雷达在测得的GOSAT过境前后0.532μm大气消光系数廓线。图4和图5给出0.532μm消光系数时空演化图和0.532μm偏振系数时空演化图。可以看出试验当日, 敦煌地区大气洁净, 上午9:00—夜间20:00, 0.532μm的大气光学厚度在0.1以下, 且整日比较稳定。GOSAT过境时 (15:30前后), 大气中气溶胶粒子浓度较上午有所增长。整日大气偏振系数大多在0.15以下, 大气中气溶胶主要为规则的细粒子。14:00以后3km以下空气中有较薄的沙尘传输。由消光系数廓线可以看出, 当日敦煌地区大气边界层约为3km, 峰值在1.5km处。图6为2013年8月24日10:00—19:00 10km高度内大气粒子有效半径时空

演化图, 结果显示GOSAT过境前后, 地面到3km之间  
粒子有效半径主要集中在1~1.5 $\mu\text{m}$ 。图7给出基于地

基CE318观测数据反演得到的GOSAT过境前后气溶胶  
粒子体积谱分布。

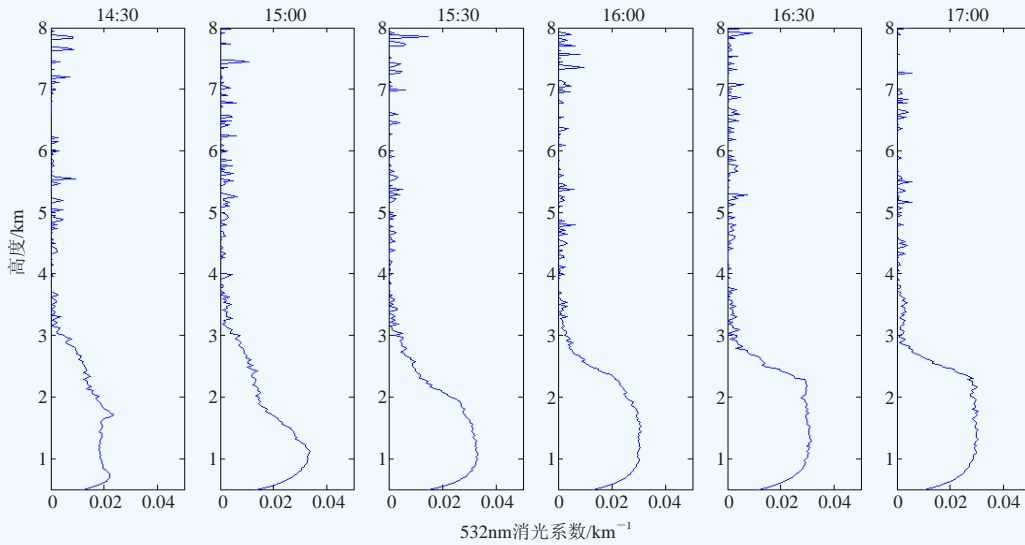


图3 2013年8月24日GOSAT过境前后敦煌站0.532 $\mu\text{m}$ 大气消光系数廓线

Fig. 3 The atmospheric extinction profiles at 0.532  $\mu\text{m}$  measured at Dunhuang near GOSAT overpass on August 24th, 2013

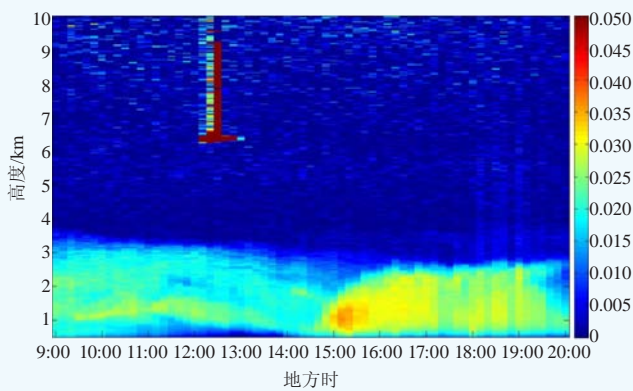


图4 2013年8月24日敦煌站0.532 $\mu\text{m}$ 消光系数时空演化图  
Fig. 4 The space-time diagram of atmospheric extinction at 0.532  $\mu\text{m}$  measured at Dunhuang on August 24th, 2013

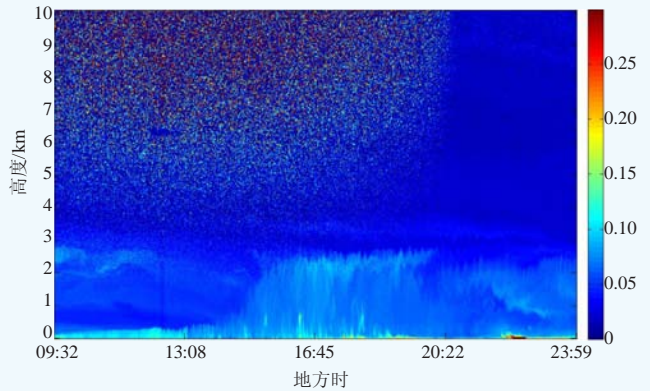


图5 2013年8月24日敦煌站0.532 $\mu\text{m}$ 偏振系数时空演化图  
Fig. 5 The space-time diagram of aerosol polarization coefficient at 0.532  $\mu\text{m}$  measured at Dunhuang on August 24th, 2013

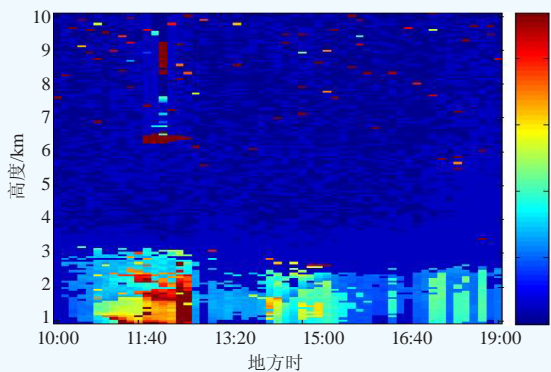


图6 2013年8月24日敦煌站粒子有效半径时空演化图  
Fig. 6 The space-time diagram of aerosol effective radius measured at Dunhuang on August 24th, 2013

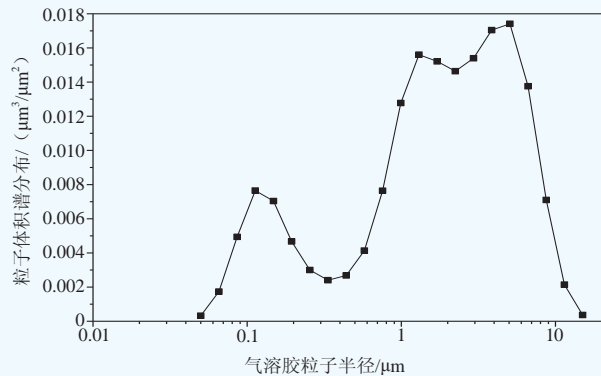


图7 基于CE318观测数据反演得到的GOSAT过境前后气溶胶  
粒子体积谱分布  
Fig. 7 The aerosol volume size distribution during the GOSAT overpass retrieved from CE-318 measurements

表3 观测站位置信息及同步观测的环境参数

Table 3 The location of the ground observation station and simultaneous environmental parameters

观测站点参数	参数值
观测站点经纬度及高程	40.14°N, 94.32°E, 1.14km
卫星过境时刻	2013-08-24 15:08 (北京时间)
观测数据时刻	卫星过境前后20分钟内
卫星过境时段地表气压	867.99hPa
相对湿度	28.22%
卫星过境时段地面温度	30.78°C
大气垂直柱水汽含量	1.89g/cm <sup>2</sup>
气溶胶参数 (1.6μm)	AOD: 0.06, SSA: 0.87 Ratioshape: 24.67
地表反射率	1.6μm: 0.31; 2.06μm: 0.34
试验场区域	10km×10km矩形同步观测区内11个测点, 每个测点多次测量, 左上角 (94.26°N, 40.18°E), 右下角 (94.38°N, 40.09°E), 中心点 (94.32°N, 40.14°E)
GOSAT对应曝光点经纬度	40.19°N, 94.31°E
气象条件描述	试验时段内, 观测时段的平均温度在30°C左右, 敦煌场地的温度日变化过程稳定, 上午温度迅速上升, 最高温度出现在下午14时以后, 温度变化不大, 高温可以持续到19时左右。相对湿度小于30%, 较为干热, 相对湿度的日变化也比较稳定, 在14时左右降到最低值。试验场地风速基本在5 m/s以下的微风

根据表3所列的环境参数先验值, 反演XCO<sub>2</sub>。表4给出反演结果、GOSAT L2产品和地基观测结果的比较。在反演中除了XCO<sub>2</sub>, 还对地表反射率, 大气垂直柱水汽含量、温度和压强廓线修正量进行反演。根据反演结果, 地表反射率和先验观测值差异明显, 在1.6μm和2.0μm波段分别为0.289和0.291。这是由于地表反射率实际观测值是在垂直方向上观测获得的, 没有考虑地表的方向反射特性。

表4 XCO<sub>2</sub>反演结果比较  
Table 4 Comparison of XCO<sub>2</sub> results

曝光点经纬度	40.19°N, 94.31°E	
曝光点时间	2013-08-24 07:08 UTC	
XCO <sub>2</sub> 值	反演结果	390.950ppm
	GOSAT L2	389.814ppm
	地基观测结果	390.737ppm

为了进一步说明不同气溶胶模式对XCO<sub>2</sub>反演结果的影响, 图8给出在实测AOD情况下, 不同LOWTRAN气溶胶模式和实测气溶胶模式情况下XCO<sub>2</sub>反演结果。此时观测几何及其他环境参数均采用地基实测数据。相同AOD, 不同气溶胶模式下, 城市型和海洋型气溶胶引入的XCO<sub>2</sub>反演误差最大, 分别为-1.97ppm和1.58ppm; 乡村型气溶胶引入的反演误差最小(0.48ppm)。这可能是由于乡村型气溶胶与实际气溶胶模式的差异相对较小, 特别是SSA差异为0.01, 而海洋型气溶胶和城市型气溶胶的SSA与实

际偏差分别为0.12和-0.31。此时城市型气溶胶模式假设下XCO<sub>2</sub>反演结果偏低与上文的分析结论是一致的。

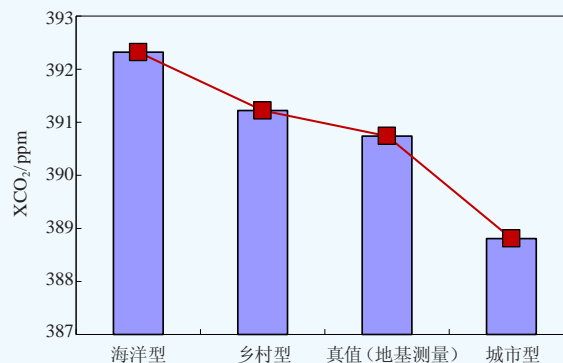


图8 不同气溶胶模式和实际观测条件下XCO<sub>2</sub>反演结果  
Fig. 8 The XCO<sub>2</sub> retrievals with different assumed aerosol types and the ground-based measured aerosol model.

## 4 结论

本文主要研究了不同气溶胶模式条件下, 忽略气溶胶散射对近地面CO<sub>2</sub>浓度反演精度的影响。

对乡村型、对流层型和海洋型气溶胶模式来说, 在相同AOD条件下, 在低地表反射率(<0.1)时, 忽略气溶胶散射影响会导致XCO<sub>2</sub>反演结果低估; 当地表反射率超过0.1时, XCO<sub>2</sub>反演结果高估, 且随地表反射率的增加, 反演误差逐渐增加。而对城市型气溶胶模式来说, 在相同AOD条件下, 忽略气溶胶影响, 均会导致XCO<sub>2</sub>的反演结果低估; 且随地表反射率增加, 误差递减。

忽略海洋型和城市型气溶胶散射影响, XCO<sub>2</sub>反演误差明显大于其他两种气溶胶(AOD>0.5条件下反演误差可能超过15%)。采用二次多项式拟合宽通道信号校正观测光谱后可以取得较好的反演结果, 在反演中如果无法精确获取气溶胶特性信息可以采用该校正方法提高反演精度。

在不同气溶胶模式假设条件下利用GOSAT观测光谱对XCO<sub>2</sub>进行反演。通过反演结果对比发现, 基于地基实测气溶胶特性数据的XCO<sub>2</sub>反演结果与地基观测结果有更好的一致性。此外, 在实测AOD、不同气溶胶模式下, 城市型和海洋型气溶胶假设下引入的XCO<sub>2</sub>反演误差最大, 分别为-1.97ppm和1.58ppm; 而乡村型气溶胶引入的反演误差最小(0.48ppm), 这主要是由于乡村型气溶胶与实际气溶胶模式的SSA差异相对较小所致。

## 参考文献

- [1] IPCC. Climate Change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY: Cambridge University Press, 2007.

- [2] Boland S, Bösch H, Brown L, et al. The need for atmospheric carbon dioxide measurements from space: Contributions from a Rapid Reflight of the Orbiting Carbon Observatory. Technical Report, OCO Science Team, NASA Jet Propulsion Laboratory, 2009.
- [3] Schneising O, Buchwitz M, Bovensmann H, et al. Three years of SCIAMACHY carbon dioxide and methane column-averaged dry air mole fraction measurements. Proceedings ENVISAT Symposium. 2007.
- [4] Yokota T, Yoshida Y, Eguchi N, et al. Global concentrations of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> retrieved from GOSAT: First preliminary results. Sola, 2009, 5: 160-163.
- [5] Bovensmann H, Buchwitz M, Burrows J P, et al. A remote sensing technique for global monitoring of power plant CO<sub>2</sub> emissions from space and related applications. Atmos Meas Tech, 2010, 3: 781-811.
- [6] 刘毅, 吕达仁, 陈洪滨, 等. 卫星遥感大气CO<sub>2</sub>的技术与方法进展综述. 遥感技术与应用, 2011, 26(2): 247-254.
- [7] 施海亮, 熊伟, 罗海燕, 等. 新型超光谱大气CO<sub>2</sub>遥感探测技术. 光电工程, 2013 (8): 36-41.
- [8] 邹铭敏, 陈良富, 陶金花, 等. 短波红外通道CO<sub>2</sub>观测的温度敏感性分析. 红外与毫米波学报, 2012, 31(5): 455-462.
- [9] 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 CO<sub>2</sub> retrievals from GOSAT. Journal of Geophysical Research, 2012, 117: D12305-D12305.
- [10] Mao J, Kawa S R. Sensitivity studies for space-based measurement of atmospheric total column carbon dioxide by reflected sunlight. Applied Optics, 2004, 43(4): 914-927.
- [11] Reuter M, Buchwitz M, Schneising O, et al. A method for improved SCIAMACHY CO<sub>2</sub> retrieval in the presence of optically thin clouds. Atmos Meas Tech, 2010, 3: 209-232.
- [12] Qu Y, Zhang C M, Wang D Y, et al. Comparison of atmospheric CO<sub>2</sub> observed by GOSAT and two ground stations in China. International Journal of Remote Sensing, 2012, 34: 3938-3946.
- [13] Houweling S, Hartmann W, Aben I, et al. Evidence of systematic errors in SCIAMACHY-observed CO<sub>2</sub> due to aerosols. Atmos Chem Phys, 2005, 5: 3003-3013.
- [14] Patra P K, Maksyutov S, Sasano Y, et al. An evaluation of CO<sub>2</sub> observations with solar occultation FTS for inclined-orbit satellite sensor for surface source inversions. J Geophys Res, 2003, 108.
- [15] Buchwitz M, Burrows J P. Retrieval of CH<sub>4</sub>, CO, and CO<sub>2</sub> total column amounts from SCIAMACHY near-infrared nadir spectra: retrieval algorithm and first results. Proceedings of SPIE 5235, remote sensing of clouds and the atmosphere VIII, 2004.
- [16] Aben I, Hasekamp O, Hartmann W. Uncertainties in the space-based measurements of CO<sub>2</sub> columns due to scattering in the Earth's atmosphere. J Quant Spectrosc Radiat. Transfer, 2007, 104: 450-459.
- [17] Yang D X, Liu Y, Cai Z N. Simulations of aerosol optical properties to top of atmospheric reflected sunlight in the near infrared CO<sub>2</sub> weak absorption band. Atmos Oceanic Sci Lett, 2013, 6: 60-64.
- [18] Rozanov V V, Rozanov A V, Kokhanovsky A A, et al. Radiative transfer through terrestrial atmosphere and ocean: software package SCIATRAN. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2014, 133: 13-71.
- [19] Kurucz R L. New atlases for solar flux, irradiance, central intensity, and limb intensity. Memorie della Società Astronomica Italiana Supplement, 2005, 8: 189.
- [20] Rothman L S, Gordon I E, Barbe A, et al. The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2009, 110: 533-572.
- [21] Rothman L S, Gordon I E, Babikov Y, et al. The HITRAN2012 molecular spectroscopic database. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2013, 130: 4-50.
- [22] Bodhaine B A, Wood N B, Dutton E G, et al. On Rayleigh optical depth calculations. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1999, 16: 1854-1861.
- [23] Shettle E P, and R W Fenn. Models of the atmospheric aerosols and their optical properties, in AGARD Conference Proceedings No. 183, ADA028-615, 1976.
- [24] Crisp D, Bosch H, Brown L, et al. OCO (Orbiting Carbon Observatory)-2 Level 2 full physics retrieval algorithm theoretical basis, Tech Rep OCO D-65488, NASA Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, CA, version 1.0 Rev 4. available at: [http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/acdisc/documentation/OCO-2\\_L2\\_FP\\_ATBD\\_v1\\_rev4\\_Nov10.pdf](http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/acdisc/documentation/OCO-2_L2_FP_ATBD_v1_rev4_Nov10.pdf) (last access: January 2012), 2010. 13042, 13045.
- [25] Dubuisson P, Borde R, Schmechtig, C, et al. Surface pressure estimates from satellite data in the Oxygen A-band: Applications to the MOS sensor over land. J Geophys Res, 2001, 106: 27277-27286.

## CGMS发表气象卫星价值评价的指导文件

### 本刊编辑部

包括中国气象局在内的16个环境卫星相关组织参加的气象卫星协调组织 (the Coordination Group for Meteorological Satellites, CGMS) 的目标, 是协调全球业务气象卫星系统。CGMS通过保护轨道资源、出台应急计划、改进数据质量、支持用户、促进资料共享和在关键领域开发卫星产品等实现其宗旨。

2013年, CGMS在其第41届全会上成立了社会经济利益专家组 (Socioeconomic Benefits Tiger Team, SETT), 以获得卫星观测系统社会经济利益评价的可靠方法, 探索与利益相关者交流的有效途径。

SETT成立后, 完成了主题文献调研, 搜集了CGMS成员、世界气象组织和其他相关机构社会经

济评估方面的实践信息。在这些工作的基础上, 2015年10月发表了这份评估气象卫星价值的指导文件。

这份文件给出了评价问题的背景、研究设计、评价方法、一般框架、汲取教训、关键术语和个例研究等内容。

未来, SETT还将在已有基础上, 对概念注释完善和社会化, 从业务分析和经济分析两个方面确定社会经济利益研究可依据的资源, 同时对与外界交流这项研究的结果做出规划。

