

地表反照率对短波红外探测大气 CO₂ 的影响

陈洁 张淳民 王鼎益 张兴赢 王舒鹏 栗彦芬 刘冬冬 荣飘

Effects of the surface albedo on short-wave infrared detection of atmospheric CO₂

Chen Jie Zhang Chun-Min Wang Ding-Yi Zhang Xing-Ying Wang Shu-Peng Li Yan-Fen Liu Dong-Dong Rong Piao

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 64, 239201 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.239201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.239201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I23>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[近 50 年来中国东、西部地面太阳辐射变化及其与大气环境变化的关系](#)

[Correlative analysis between the changes of surface solar radiation and its relationship with air pollution as well as meteorological factor in eastern and western China in recent 50 years](#)

物理学报.2015, 64(8): 089201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.089201>

[我国北方不同类型下垫面地表反照率特征](#)

[Study on land-surface albedo over different types of underlying surfaces in North China](#)

物理学报.2014, 63(8): 089201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.089201>

[一级相变时的红外特征辐射 -- 熔融结晶和蒸气冷凝或沉淀](#)

[Infrared characteristic radiation under first order phase transitions--melt crystallization and vapor condensation or deposition](#)

物理学报.2013, 62(7): 079203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.079203>

[梯度计算的集合变分方案及其在大气 Ekman 层湍流系数反演中的应用](#)

[Gradient calculation based ensemble variational method and its application to the inversion of the turbulent coefficient in atmospheric Ekman layer](#)

物理学报.2013, 62(4): 049201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.049201>

地表反照率对短波红外探测大气CO₂的影响*陈洁¹⁾²⁾ 张淳民^{1)†} 王鼎益³⁾ 张兴赢⁴⁾ 王舒鹏⁴⁾ 栗彦芬¹⁾
刘冬冬¹⁾ 荣飘¹⁾

1)(西安交通大学理学院, 西安 710049)

2)(中国人民解放军 63892 部队, 洛阳 471003)

3)(纽布朗什维克大学物理系, 费德尔顿 E3B5A3)

4)(中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室, 国家卫星气象中心, 北京 100081)

(2015 年 5 月 12 日收到; 2015 年 7 月 28 日收到修改稿)

在卫星短波红外遥感二氧化碳的过程中, 表征地表特征的地表反照率是影响探测精度的重要参数之一. 针对温室气体二氧化碳高精度探测的需求, 本文研究了地表反照率对正演模拟光谱和反演近地面二氧化碳平均柱浓度XCO₂的影响. 模拟计算结果显示, 地表反照率数值增大时, 观察的光谱强度也相应增大, 并且在O₂-A波段造成的光谱差异比1.6 μm波段高出一个数量级, 即地表反照率在O₂-A波段的影响比较大. 选取了两个不同地表类型的实际观测光谱, 仅改变O₂-A波段和1.6 μm波段地表反照率数值, 得出草地点在O₂-A波段地表反照率达到0.25的误差时, 会给XCO₂的反演结果造成大于1%的相对误差, 而1.6 μm波段的地表反照率变化对XCO₂的反演结果造成的误差可以忽略不计, 说明了地表反照率在反演XCO₂过程中的重要性主要来自对O₂-A波段的影响. 此研究表明了地表反照率在卫星遥感温室气体过程中的重要性, 为提高遥感探测二氧化碳的精度提供了重要的理论依据和指导.

关键词: 地表反照率, 正演模拟, 反演, 二氧化碳平均柱浓度**PACS:** 92.70.Cp, 92.20.Xy, 92.05.Bc, 92.60.Vb**DOI:** 10.7498/aps.64.239201

1 引言

自人类社会工业化以来, 温室气体增加造成的温室效应越来越严重, 已经影响到了全球环境、经济和社会发展等多个方面, 给人类社会的生存和生活方式带来了很大的挑战和威胁^[1]. 为了弥补地面监测温室气体在空间尺度和覆盖率的不足, 卫星监测温室气体成为了一种重要而有效的方法^[2]. 在利用高光谱卫星遥感探测大气温室气体的研究方面, 国际上的一些发达国家已经获得了一定的成果, 而随着我国的经济不断发展, 卫星遥感探测需求的日益增长, 国内也开始了卫星遥感探测CO₂和CH₄等温室气体的研究^[3,4]. 针对高光谱卫星遥感探测CO₂实时、精确、大尺度和高分辨率的重大需求, 国

内相关研究机构和组织已经开展了全球CO₂实时反演算法的研究, 以便形成在全球尺度的快速精确监测CO₂能力, 填补我国在高光谱卫星遥感探测温室气体的技术空白, 这将为国家环境保护、应对气候变化及碳贸易等重大决策提供数据支持, 具有重要的战略意义^[5].

卫星探测CO₂的精度取决于辐射传输模型中输入参数的精度, 其中地表反照率是辐射传输模型中的重要输入量^[6]. 叶函等^[7]研究了发现在同一大气顶出射辐亮度变化值情况下, 不同反照率条件对应的二氧化碳变换量相差很大, 如果忽视它的影响, 反演精度将大大下降. Wunch等^[8]指出地表反照率对大气CO₂浓度的反演有着系统性误差的影响. 本研究基于Zhang等发展的卫星遥感温室气

* 国家重大专项(批准号: 32-Y30B08-9001-13/15, E310/1112)、国家高技术研究发展计划(863计划)(批准号: 2011AA12 A104, 2012AA121101)、国家自然科学基金(批准号: 61275184, 41530422) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zcm@mail.xjtu.edu.cn

体的反演算法和系统^[9], 分析了地表反照率对正演模拟光谱和反演结果的影响, 结合实际数据证明了地表反照率准确取值的必要性.

2 理论基础

2.1 地表反照率

地表反照率定义为地表向各个方向反射的全部光通量与总入射光通量的比值. 它表征了地球表面对太阳辐射的反射能力, 是一个广泛应用于地表能量平衡、中长期天气预测和全球变化研究的重要参数^[10]. 地表反照率是地气系统的不确定因子, 不同的地表类型, 地表反照率是不同的. 冰和雪的覆盖状况能引起反照率的显著变化, 例如陆地被雪覆盖或者洋面结冰时, 将使其反照率增大30%—40%, 新雪面更可使反照率增大60%左右. 陆面、土壤的性质和植被类型不同, 也能使反照率改变, 但这些差异一般不超过10%—20%^[11].

2.2 近地面 CO₂ 平均柱浓度 (XCO₂)

要想监测 CO₂ 的汇源分布, 就需要监测全球范围内 CO₂ 的地表通量, 其中的关键就是精确探测出近地面 (高度0—60 km) CO₂ 平均柱浓度, 即 XCO₂, 要求精度达到1.0—10.0 ppm^[12–16]. 在本研究中, 项目指标要求反演 XCO₂ 的相对误差不能超过1%. 大气中的 CO₂ 垂直柱总量主要受地形和气压影响, 垂直柱含量内的微小变化很难探测. 但是可以通过归一化空气柱含量后, 观测相

关柱含量间的微小变化来观测 CO₂ 的平均柱浓度来确定, 而空气柱含量可以通过探测变化更缓慢的气体来确定. 本文采用的算法是用 O₂-A 带光谱反演得到 O₂ 分子柱含量, 然后计算得到干洁空气下空气柱含量, 那么 CO₂ 平均柱浓度可以表示为 $XCO_2 = CO_2^{col} / (O_2^{col} / O_2^{mf})$ 式中, XCO₂ 为 CO₂ 平均柱浓度/ppm; CO₂^{col} 为反演的 CO₂ 的绝对柱总量; O₂^{col} 为反演的 O₂ 的绝对柱总量; O₂^{mf} 为转换常数取值0.2095.

温室气体 CO₂ 短波红外遥感探测主要利用卫星传感器接收地表反射的太阳辐射, 所以卫星观测的反射光谱对地表反照率有很强的依赖性, 不同类型下垫面反照率的明显差异使卫星观测的吸收光谱有显著变化. 因此, 地表反照率是影响大气 CO₂ 浓度探测的一个重要因素.

3 地表反照率对正演光谱辐射强度的影响

因为地表反照率是0—1的值, 所以在0—1的范围内改变地表反照率时模拟过程中, 使用先期开发的 GF_VRTM-V1.0 单点计算模型产生相应的正演模拟光谱. 地理坐标设置为 (40.6N, 71.7E), 太阳天顶角设定为34.52°、视场角为28.73°、方位角为300.45°, 采用球形大气散射模型, 不考虑气溶胶参数和云参数的影响, 选择 O₂-A 波段和1.6 μm 波段, 得到的不同地表反照率取值下的正演模拟光谱如图1所示.

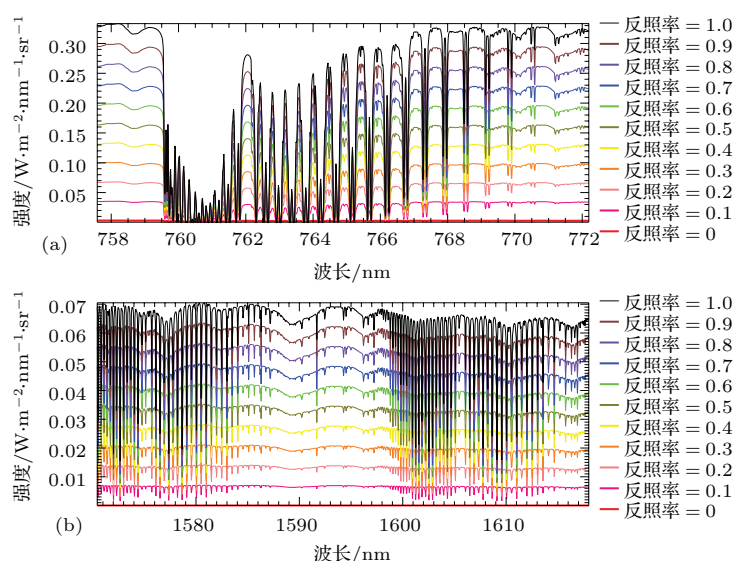


图1 地表反照率对正演光谱辐射强度的影响 (a) O₂-A 波段; (b) 1.6 μm 波段

Fig. 1. Influence of surface albedo on forward spectral radiant intensity: (a) O₂-A band; (b) 1.6 μm band.

从图 1 中可以看出当地表反照率数值增大时, 正演光谱强度也相应的增大, 而正演模拟光谱作为反演 CO_2 平均柱浓度 XCO_2 的输入, 必然会对反演结果造成影响, 所以研究地表反照率对反演 XCO_2 的影响很有必要. 通过对比图 1(a) 和 (b), 可以发现不同的地表反照率在 $\text{O}_2\text{-A}$ (758—775 nm) 波段造成的最大光谱差异比在 CO_2 近红外波段 (1567—1618 nm) 造成的最大光谱差异高出一个数量级, 这说明了地表反照率在 $\text{O}_2\text{-A}$ 波段的对反演结果的影响比较大.

4 地表反照率对反演 XCO_2 的影响

使用 GF_VRTM-V1.0 模型, 输入 GOAST-FTS 观测的不同地表类型的真实光谱, 通过改变地表反照率大小得到不同的 XCO_2 反演结果. 因为地表反照率对卫星遥感的特殊性, 所以不能简单的通过改变地表反照率数值来判断其对 XCO_2 反演的灵敏性. 不同地表类型的相应地表反照率数值是根据 MODIS 地表反照率产品和其他资料统计后设定的 [17–21]. 在实际反演业务的模型参数设置中, 会因为不确定实际观测点的地表类型而导致地表反照率设置错误, 因此在模拟试验中用更换地表类型的方法来改变地表反照率, 进而分析地表反照率对 XCO_2 反演结果的影响.

4.1 沙漠地表类型

采用的是 2009 年 4 月 23 日, 位于撒哈拉沙漠 (Sahara Deserts) 中的一个观测点 (21.7N, 12.1E), 地表类型为沙漠, 根据日本 GOSAT 研究小组 [22] 发布的 L2 数据, GOSAT-FTS 在该观测点的官方 XCO_2 反演结果为 379.59 ppm.

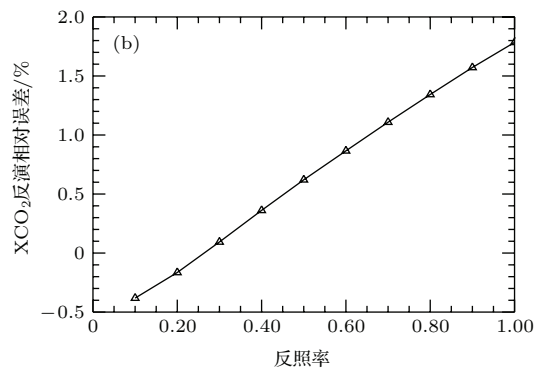
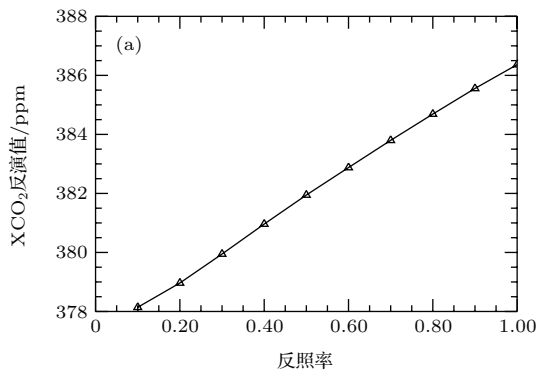


图 2 $\text{O}_2\text{-A}$ 波段的地表反照率对 XCO_2 反演的影响 (沙漠观测点) (a) XCO_2 的反演值; (b) XCO_2 反演值的相对误差
Fig. 2. Effect of surface albedo on the XCO_2 inversion in $\text{O}_2\text{-A}$ band (The desert observation point): (a) Inversion values of XCO_2 ; (b) relative error of XCO_2 .

从表 1 中可以看出, 使用沙漠地表反照率即真实的地表反照率时, XCO_2 的反演值与官方提供的数值相差 0.36 ppm, 相对误差只有 0.09%. 如果误判地表类型为雪地时, 反演 XCO_2 的绝对误差达到了 5.10 ppm, 相对误差达到了 1.34%, 超过了系统允许的相对误差 1%, 因此这样的地表反照率的变化是不符合本研究要求的.

基于 GF_VRTM-V1.0 模型, 固定 1.6 μm 近红外波段的地表反照率值为 0.5, 通过改变 $\text{O}_2\text{-A}$ 波段的地表反照率值, 反演得到 XCO_2 结果随地表反照率值的变化情况如图 2 所示. 试验采用的光谱就是 GOAST-FTS 于 2009 年 4 月 23 日在撒哈拉沙漠的实际观测光谱, 此观测点的官方 XCO_2 值为 379.59 ppm, 根据地表反照率的定义设置地表反照率值的范围设定为 0.1—1.0. 由图 2 可以看出, $\text{O}_2\text{-A}$ 波段的地表反照率对 XCO_2 反演结果影响比较大, 当地表反照率值在 0.1—1.0 的范围内变化时, $\text{O}_2\text{-A}$ 波段的地表反照率越接近真实的地表反照率值即 0.3 时, 反演得到的 XCO_2 相对误差越小. 在这个沙漠类型的观测点 (21.7N, 12.1E), 当 1.6 μm 近红外波段地表反照率设置为 0.5 时, $\text{O}_2\text{-A}$ 波段的地表反照率值在 0—0.7 以内所得的反演相对误差能满足本研究的要求.

表 1 不同地表类型的反演结果 (沙漠观测点)
Table 1. Inversion results of the different surface types (The desert observation point).

地表类型	沙漠		草地		雪地	
	O_2	CO_2	O_2	CO_2	O_2	CO_2
地表反照率	0.30	0.50	0.21	0.27	0.80	0.10
反演值/ppm	379.95		379.06		384.69	
绝对误差值/ppm	0.36		-0.53		5.10	
相对误差/%	0.09		-0.14		1.34	

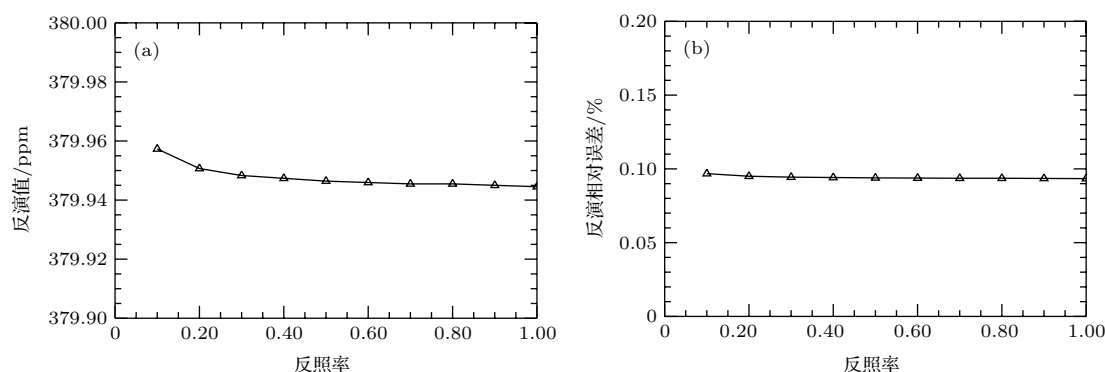


图3 1.6 μm 近红外波段的地表反照率对 XCO₂ 反演的影响 (沙漠观测点) (a) XCO₂ 的反演值; (b) XCO₂ 反演值的相对误差

Fig. 3. Effect of surface albedo on the XCO₂ inversion in 1.6 μm band (The desert observation point): (a) Inversion values of XCO₂; (b) relative error of XCO₂.

基于 GF_VRTM-V1.0 模型, 固定 O₂-A 波段的地表反照率值为 0.3, 通过改变 1.6 μm 近红外波段的地表反照率值, 反演得到 XCO₂ 结果随地表反照率值的变化情况如图 3 所示. 由图 3 可以看出, 1.6 μm 近红外波段的地表反照率对 XCO₂ 反演结果影响比较小. 在这个沙漠类型的观测点 (21.7N, 12.1E), 当 O₂-A 波段地表反照率设置为 0.3 时, 1.6 μm 近红外波段的地表反照率值在 0.1—1.0 以内变化所得的反演相对误差都能满足本系统的设计要求.

4.2 草地地表类型

选取的是 2013 年 5 月 21 日, 位于美国蒙达纳州的一个观测点 (48.0N, 109.5 W), 地表类型为草地 [9], 根据日本 GOSAT 研究小组发布的 L2 数据, GOSAT-FTS 在该观测点的官方 XCO₂ 反演结果为 400.15 ppm.

表 2 不同地表类型的反演结果 (草地观测点)

Table 2. Inversion results of the different surface types (The grass observation point).

地表类型	沙漠		草地		雪地	
	O ₂	CO ₂	O ₂	CO ₂	O ₂	CO ₂
地表反照率	0.30	0.50	0.21	0.27	0.80	0.10
反演值/ppm	401.82		400.16		408.68	
绝对误差值/ppm	1.67		0.01		8.54	
相对误差/%	0.42		0.00		2.13	

从表 2 中可以看出, 使用实际地表类型的地表反照率时, XCO₂ 的反演值和官方提供的数值仅

相差 0.01 ppm, 相对误差几乎为 0. 如果误判地表类型为雪地时, 反演 XCO₂ 的绝对误差达到了 8.54 ppm, 相对误差达到了 2.13%, 超过了系统允许的相对误差 1%, 因此这样的地表反照率的变化是不符合本研究要求的.

同样是基于 GF_VRTM-V1.0 模型, 固定 1.6 μm 近红外波段的地表反照率值为 0.27, 通过改变 O₂-A 波段的地表反照率值, 反演得到 XCO₂ 结果随地表反照率值的变化情况如图 4 所示. 试验采用的光谱就是 GOAST-FTS 于 2013 年 5 月 21 日在美国蒙达纳州的实际观测光谱, 此观测点的官方 XCO₂ 值为 400.15 ppm. 由图 4 可以看出, O₂-A 波段的地表反照率对 XCO₂ 反演结果影响比较大, 当地表反照率值在 0.1—1.0 的范围内增大时, O₂-A 波段的地表反照率越接近真实的地表反照率值即 0.21 时, 反演得到的 XCO₂ 相对误差越小. 在这个草地类型的观测点 (48.0N, 109.5 W), 当 1.6 μm 近红外波段地表反照率设置为 0.27 时, O₂-A 波段的地表反照率值在 0—0.45 以内所得的反演相对误差能满足本系统的设计要求.

基于 GF_VRTM-V1.0 模型, 固定 O₂-A 波段的地表反照率值为 0.21, 通过改变 1.6 μm 近红外波段的地表反照率值, 反演得到 XCO₂ 结果随地表反照率值的变化情况如图 5 所示. 可以看出, 1.6 μm 近红外波段的地表反照率对 XCO₂ 反演结果影响较小. 在这个草地类型的观测点 (48.0N, 109.5 W), 当 O₂-A 波段地表反照率设置为 0.21 时, 1.6 μm 近红外波段的地表反照率值在 0—1 以内变化所得的反演相对误差都能满足本系统的设计要求.

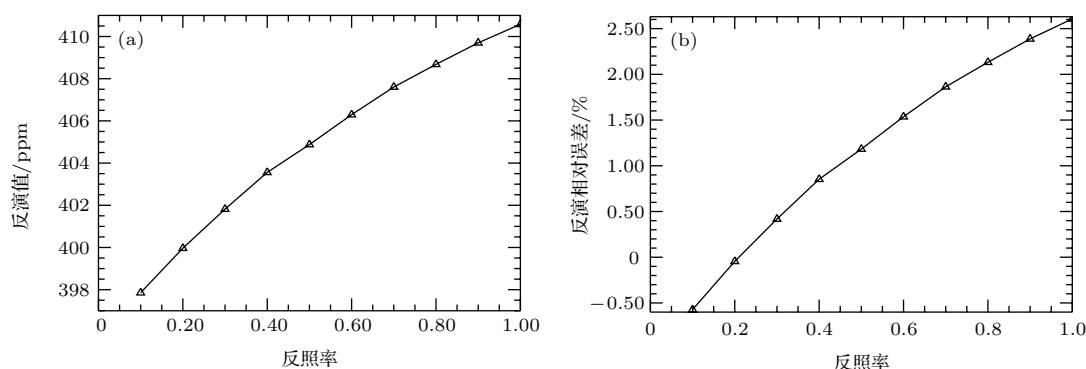


图4 O₂-A波段的地表反照率对XCO₂反演的影响(草地观测点) (a) XCO₂的反演值; (b) XCO₂反演值的相对误差

Fig. 4. Effect of surface albedo on the XCO₂ inversion in O₂-A band (The grass observation point): (a) Inversion values of XCO₂; (b) relative error of XCO₂.

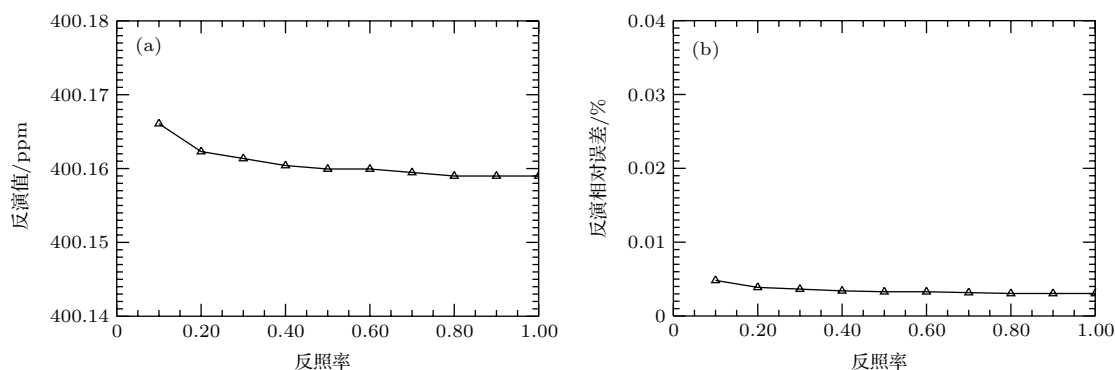


图5 1.6 μm近红外波段的地表反照率对XCO₂反演的影响(草地观测点) (a) XCO₂的反演值; (b) XCO₂反演值的相对误差

Fig. 5. Effect of surface albedo on the XCO₂ inversion in 1.6 μm band (The grass observation point): (a) Inversion values of XCO₂; (b) relative error of XCO₂.

大气CO₂短波红外遥感探测主要利用卫星传感器接收地表反射的太阳辐射,从图6可以看出太阳辐射在O₂-A波段的辐射通量密度要远远大于1.6 μm波段。而两个波段的吸收带强数量级都在10⁻²² [23],因此在大气、地表条件一致时,卫星传感器接收的O₂-A波段的太阳辐射光谱强度要远大于1.6 μm波段的太阳辐射光谱强度。

根据地表反照率的定义,地表反射后的光谱强度是地表反照率与入射光谱强度的乘积,因此O₂-A波段的地表反照率变化引起的光谱强度变化要大于1.6 μm波段的地表反照率变化引起的光谱强度变化,导致反演出O₂的绝对柱总量误差增大,最终引起XCO₂反演结果误差增大。而1.6 μm波段的地表反照率变化引起的光谱强度变化小,对反演的CO₂的绝对柱总量影响小,因此引起的XCO₂反演结果误差可以忽略不计。

通过上面的数据和理论分析,在1.6 μm近红外波段,地表反照率的变化对XCO₂反演结果的影响

可以忽略不计,但是在O₂-A波段,地表反照率对XCO₂反演影响较大,变化此波段的地表反照率超过一定的范围后,相对误差会超过了本研究要求的1%,所以在实际全球反演中,一定要加入实际的地表反照率数据,尤其是在O₂-A波段。

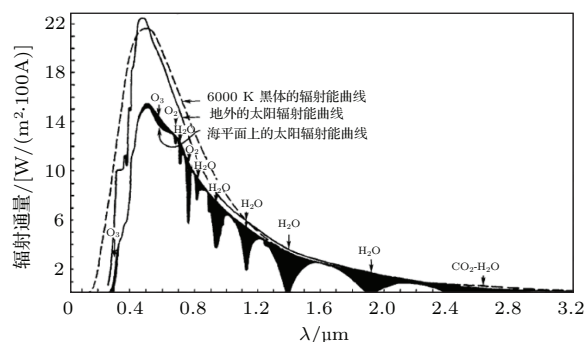


图6 太阳辐射吸收光谱图(涂黑部分代表大气的吸收) [23]

Fig. 6. The absorption spectrum of the solar radiation (black part represents the atmospheric absorption) [23].

5 结 论

基于高光谱矢量辐射传输模式和遥感反演系统,通过正演模拟,分析了地表反照率在 O_2 -A波段和 $1.6\ \mu\text{m}$ 波段对正演模拟光谱强度的影响,结果表明随着地表反照率的增加,光谱强度也相应的增大,并且 O_2 -A波段地表反照率的变化对模拟光谱的影响较大,为进一步研究地表反照率对反演结果的影响提供了重要的理论指导.结合GOAST实测光谱和数据,选取了两种地表类型,在仅变换地表反照率数值的条件下,定量分析了地表反照率对 XCO_2 反演结果的影响.结果表明在文中设定的情况下,地表反照率对反演结果造成的最大绝对误差能达到 $8.54\ \text{ppm}$,相对误差达到 2.13% ,证明了地表反照率对 CO_2 反演结果的影响不容忽视.本文用实际数据证明了地表反照率在遥感反演系统中的重要性,为下一步改进算法及系统、提高反演精度和速度提供了重要的数据基础和指导.

参考文献

- [1] Ballantyne A P, Alden C B, Miller J B 2012 *Nature* **488** 70
- [2] Liu Y, Lv D R, Chen H B 2011 *Remote Sens. Technol. Appl.* **26** 247 (in Chinese) [刘毅, 吕达仁, 陈洪滨 2011 遥感技术与应用 **26** 247]
- [3] Qu Y, Zhang C M, Wang D Y 2013 *Int. J. Remote Sens.* **34** 3938
- [4] He J, Zhang C M 2005 *J. Opt. A-Pure Appl. Op.* **7** 613
- [5] Bousquet P, Peylin P, Ciais P 2000 *Science* **290** 1342
- [6] Harries J E, Russell J E, Hanafin J A 2005 *B Am. Meteorol. Soc.* **86** 945
- [7] Ye H H, Wang X H, Wu J, Fang Y H, Xiong W, Cui F X 2011 *J Atmos. Environ. Opt.* **06** 208 (in Chinese) [叶函, 王先华, 吴军, 方勇华, 熊伟, 崔方晓 2011 大气与环境光学学报 **06** 208]
- [8] Wunch D, Wennberg P O, Toon G C 2011 *Atmos. Chem. Phys.* **11** 12317
- [9] Qu Y, Zhang C M, Wang D Y 2013 *Int. J. Remote Sens.* **34** 3938
- [10] Liang S L 2014 *Global land table feature parameters (GLASS) product algorithm, verification and analysis*(Beijing:Higher Education Press) p84 (in Chinese) [梁顺林 2014 全球陆表特征参量(GLASS)产品算法,验证与分析(北京:高等教育出版社)第84页]
- [11] Schaaf C B, Gao F, Strahler A H 2002 *Remote Sens. Environ.* **83** 135
- [12] Baker D F, Doney S C, Schimel D S 2006 *Tellus. B* **58** 359
- [13] Feng L, Palmer P I, Bösch H 2009 *Atmos. Chemphys.* **9** 2619
- [14] Chevallier F, Bréon F M, Rayner P J 2007 *J. Geophys. Res.* **112** 139
- [15] Houweling S, Hartmann W, Aben I 2005 *Atmos. Chemphys.* **5** 3003
- [16] Rayner P J, O'Brien D M 2001 *Geophys. Res. Lett.* **28** 175
- [17] Zhang Y F, Wang X P, Pan Y X 2011 *J. Desert Res.* **05** 1141 (in Chinese) [张亚峰, 王新平, 潘颜霞 2011 中国沙漠 **05** 1141]
- [18] Sun Z A, WENG D M 1994 *J. Appl. Meteor. Sci.* **04** 394 (in Chinese) [孙治安, 翁笃鸣 1994 应用气象学报 **04** 394]
- [19] Feng C, Gu S, Zhao L 2010 *Plateau Meteor.* **01** 70 (in Chinese) [冯超, 古松, 赵亮 2010 高原气象 **01** 70]
- [20] Hu L Q, Li J F 1993 *Arid Zone Res.* **01** 33 (in Chinese) [胡列群, 李江凤 1993 干旱区研究 **01** 33]
- [21] Yao T, Zhang Q 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 084601 (in Chinese) [姚彤, 张强 2014 物理学报 **63** 084601]
- [22] Hild L, Richter A, Rozanov V 2002 *Adv. Space Res.* **29** 1685
- [23] Shi G Y 2007 *Atmospheric Radiation Science* (Beijing:Science Press) p203 (in Chinese) [石广玉. 大气辐射学(北京:科学出版社)第203页]

Effects of the surface albedo on short-wave infrared detection of atmospheric CO₂*

Chen Jie¹⁾²⁾ Zhang Chun-Min^{1)†} Wang Ding-Yi³⁾ Zhang Xing-Ying⁴⁾ Wang Shu-Peng⁴⁾
Li Yan-Fen¹⁾ Liu Dong-Dong¹⁾ Rong Piao¹⁾

1) (School of Science, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

2) (Unit 63892 of PLA, Luoyang 471003, China)

3) (Physics Department, University of New Brunswick, Fredericton E3B5A3, Canada)

4) (Key Laboratory for Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China)

(Received 12 May 2015; revised manuscript received 28 July 2015)

Abstract

The greenhouse gas carbon dioxide, for which short-wave infrared remote sensing detection is carried out by using satellite sensors to measure the Earth's atmosphere scattering solar radiation, and makes use of the inversion algorithm to achieve measurements. Most of the solar radiation enter the satellite sensors after surface reflection, so the surface albedo which reflects the surface features is one of the important parameters which affect the accuracy of the detection. Aiming at the great demands of high precision carbon dioxide for greenhouse gas, this study first investigate the effects of the Earth's surface albedo on the observed spectra. Simulation results show that the increase in the surface albedo will enhance the observed spectral intensity, especially larger in the O₂-A band than in the 1.6 μm band. In other words, the surface albedo has a greater impact on O₂-A band. In the actual satellite inversion, the surface types of actual observation point are uncertain, which will result in the error of surface albedo. Effect of surface albedo on the inverted XCO₂ is analyzed when the surface albedo is changed by changing the type of surface. Two observation cases are analyzed in detail. One is on April 23, 2009 for the desert surface, and another on May 21, 2013 for the grass surface. Results show that when the O₂-A band surface albedo approximates to the real surface albedo value, the relative error of the inverted XCO₂ is the smaller. If the relative changes of the O₂-A band surface albedo exceed 0.25 in the grass surface or 0.35 in the desert surface, the relative error of the inverted XCO₂ will be greater than 1%, not satisfying the design requirement of the inversion system. In contrast, the changes in 1.6 μm band surface albedo have negligible effect on the inverted XCO₂. This study shows the importance of surface albedo in the process of satellite remote sensing, and provides an important theoretical basis and guidance for improving the accuracy of remote sensing detection. All these are significantly contributed to the hyperspectral satellite observation of the greenhouse gas, the investigation of global CO₂ distributions, and the prediction and monitoring of the climate change.

Keywords: albedo, forward model, inversion, column-averaged CO₂ mole fraction

PACS: 92.70.Cp, 92.20.Xy, 92.05.Bc, 92.60.Vb

DOI: 10.7498/aps.64.239201

* Project supported by the National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China (Grant Nos. 32-Y30B08-9001-13/15, E310/1112), the National High Technology Research and Development Program of China (Grant Nos. 2011AA12 A104, 2012AA121101), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61275184, 41530422).

† Corresponding author. E-mail: zcm@mail.xjtu.edu.cn