

气溶胶对大气 CO<sub>2</sub> 短波红外遥感探测影响的模拟分析

王倩 毕研盟 杨忠东

Simulation analysis of aerosol effect on shortwave infrared remote sensing detection of atmospheric CO<sub>2</sub>

Wang Qian Bi Yan-Meng Yang Zhong-Dong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 039202 (2018) DOI: 10.7498/aps.20171993

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.20171993>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I3>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[黑碳团簇气溶胶混合生长的红外吸收特性及长波辐射效应](#)

Effect of aggregated black carbon aging on infrared absorption and longwave radiative forcing

物理学报.2017, 66(16): 169201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.169201>

[地表反照率对短波红外探测大气 CO<sub>2</sub> 的影响](#)

Effects of the surface albedo on short-wave infrared detection of atmospheric CO<sub>2</sub>

物理学报.2015, 64(23): 239201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.239201>

[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>

[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>

# 气溶胶对大气CO<sub>2</sub>短波红外遥感探测影响的模拟分析\*

王倩 毕研盟 杨忠东†

(国家卫星气象中心, 北京 100081)

(2017年9月8日收到; 2017年11月7日收到修改稿)

气溶胶引起的光学路径长度改变是影响高分辨率近红外光谱反演大气CO<sub>2</sub>浓度的重要误差源. 本文利用高精度大气辐射传输模式模拟中国碳卫星观测, 结合CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations) 卫星的气溶胶廓线产品研究了不同特性的气溶胶对卫星观测光谱的影响. 模拟结果显示: 气溶胶散射引起的光学路径长度改变与气溶胶类型、模态以及垂直分布密切相关; 城市型和海洋型气溶胶对观测光谱影响很大; 多层分布的积聚模态大陆型和海洋型气溶胶在光学厚度小于0.3时, 会引起5%以内的负辐射变化, 随光学厚度不断增加会引起正的辐射变化; 主要以粗粒子模态存在的气溶胶在不同的垂直分布情况下均会引起辐射的负变化, 从而造成CO<sub>2</sub>浓度的高估; 另外, 随气溶胶分布高度变高, 负的辐射变化程度会逐渐减小.

**关键词:** 二氧化碳, 气溶胶, 短波红外, 高光谱

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

**DOI:** 10.7498/aps.67.20171993

## 1 引言

CO<sub>2</sub>是大气痕量气体, 也是影响地球辐射平衡的主要温室气体. 化石燃料的燃烧和其他人类活动造成大气CO<sub>2</sub>浓度逐年增加, 显著增强了温室效应. 世界气象组织发布2015年温室气体公报称: 2015年全球大气中主要温室气体浓度再次突破有观测记录以来的最高值, CO<sub>2</sub>平均浓度为400.0 ppm, 为工业化前水平的144%. 全球大气CO<sub>2</sub>浓度变化和源汇分布研究受到前所未有的重视. 卫星遥感能在全球尺度上为大陆和海洋提供稳定、时空一致性较好、长时间序列的大气CO<sub>2</sub>观测, 改善地面监测站点分布不均, 观测数据少等不足<sup>[1]</sup>, 因此卫星CO<sub>2</sub>遥感技术的发展势在必行.

自2002年第一个在近红外波段观测大气CO<sub>2</sub>的星载仪器SCIAMACHY (Scanning Imaging

Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography) 成功运行以来<sup>[2,3]</sup>, 利用短波红外波段观测近地表CO<sub>2</sub>浓度的高光谱遥感探测技术逐渐成为一个活跃的研究领域. 2009年1月, 日本JAXA (Japanese Aerospace Exploration Agency) 发射了第一颗专用温室气体观测卫星GOSAT (Greenhouse Gases Observing Satellite) 用于探测CO<sub>2</sub>和CH<sub>4</sub>柱总量<sup>[4]</sup>, 美国NASA (National Aeronautics and Space Administration) 于2014年也发射了用于探测全球CO<sub>2</sub>浓度分布的OCO-2 (The Orbiting Carbon Observatory-2) 卫星<sup>[5,6]</sup>, 中国于2016年12月发射了碳卫星, 提供全球CO<sub>2</sub>监测数据, 为我国科学研究、监测CO<sub>2</sub>排放源提供了技术支持.

以上星载CO<sub>2</sub>探测仪器观测波段都处于太阳短波红外波段, 除SCIAMACHY工作波段设置于1.58 μm外, 其余仪器都在1.61 μm<sup>[7]</sup>. 短波红外波段的观测对整层大气CO<sub>2</sub>敏感, 特别对近地表

\* 国家高技术研究发展计划 (批准号: 2011AA12A104) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yangzd@cma.cn

CO<sub>2</sub> 浓度变化很敏感<sup>[8]</sup>, 所以该谱段的观测更适合用于研究地表碳源汇的估计. 模式研究显示, 在区域尺度上, CO<sub>2</sub> 探测精度达到1—2 ppm 才能显著减小碳通量估算的不确定性<sup>[9–11]</sup>. 但是, CO<sub>2</sub> 作为大气痕量气体, 在大气中绝对浓度低, 且1.6 μm 处于弱 CO<sub>2</sub> 吸收带, 探测器接收的 CO<sub>2</sub> 信号很弱, 因此, 如何高精度处理仪器观测值, 排除云、气溶胶等其他信号的干扰是不可忽视的问题.

气溶胶散射引起的光学路径长度改变是影响 CO<sub>2</sub> 定量反演最重要的误差源<sup>[12–14]</sup>. 目前, CO<sub>2</sub> 反演算法主要依靠大气散射特性的先验信息及 O<sub>2</sub> A 吸收带反演的大气散射特性减小气溶胶散射引入的误差. Butz 等<sup>[14]</sup> 采用简化的气溶胶微物理模型反演气溶胶特性; Nelson 等<sup>[15]</sup> 采用 GEOS-5 (Goddard Earth Observing System Model, Version 5) 的 3D 气溶胶场改进了 OCO-2 气溶胶参数化过于简单的问题, 未来会采用 GEOS-5 的垂直气溶胶廓线修正 OCO-2 反演算法, 并利用 CALIPSO 观测提供的平流层气溶胶成分修正反演偏差. OCO-2 建立的反演算法中, 在反演 CO<sub>2</sub> 时结合相对湿度信息灵活选择 MERRA (Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications) 再分析数据提供的五种类型的气溶胶, 同时反演了气溶胶垂直廓线<sup>[16]</sup>. 本文基于碳卫星高光谱 CO<sub>2</sub> 探测仪技术指标, 从正演的角度探讨不同特性气溶胶(类型、模态、垂直分布)对卫星观测辐射的影响, 为开展高光谱大气 CO<sub>2</sub> 信息的提取, 以及正演模式的建立、反演算法的发展提供重要的参考信息.

## 2 理论基础

### 2.1 气溶胶对短波红外 CO<sub>2</sub> 探测的影响

利用太阳短波红外谱段遥感大气 CO<sub>2</sub> 浓度, 卫星接收的是后向散射和地表反射能量. 气溶胶散射引起的光学路径长度增长或者缩短与气溶胶类型、模态以及高度分布密切相关. 边界层 CO<sub>2</sub> 浓度受人类和自然过程的影响较大, 在边界层以上, CO<sub>2</sub> 在空气中的混合比几乎是常数<sup>[17]</sup>, 在 CO<sub>2</sub> 反演算法中若未考虑多次散射作用引起的光学路径长度增长, 会造成 CO<sub>2</sub> 浓度高估, 而忽略后向散射作用引起的光学路径长度缩短, 会造成 CO<sub>2</sub> 浓度低

估. 因此, 结合地表特性, 确切了解不同特性的气溶胶对卫星观测 CO<sub>2</sub> 吸收光谱的影响是精确反演 CO<sub>2</sub> 的重要环节.

### 2.2 CO<sub>2</sub> 短波红外遥感原理

短波红外 CO<sub>2</sub> 遥感主要利用太阳辐射的短波红外部分, 穿过大气时被 CO<sub>2</sub> 分子吸收形成 CO<sub>2</sub> 吸收谱线, 吸收谱线的深度随着 CO<sub>2</sub> 含量增加而加强, 根据 1.61 μm 谱段的光谱形态, 通过高精度辐射传输模拟计算进行定量反演. 在平面平行大气晴空条件下, 观测的辐射强度可以表示成

$$I(\lambda, \theta, \theta_0, \varphi - \varphi_0) = F_0(\lambda) \cos \theta_0 R(\lambda, \theta, \theta_0, \varphi - \varphi_0) \times \left\langle \exp \left\{ - \int_0^S \sum_{m=1}^M [\sigma_m(\lambda, s) N_m(s)] ds \right\} \right\rangle, \quad (1)$$

式中,  $I(\lambda, \theta, \theta_0, \varphi - \varphi_0)$  是在波长  $\lambda$  处观测的辐射强度;  $\theta$  和  $\varphi$  是观测天顶角和方位角,  $\theta_0$  和  $\varphi_0$  是对应的太阳天顶角和方位角;  $F_0(\lambda)$  是大气顶太阳通量;  $R(\lambda, \theta, \theta_0, \varphi - \varphi_0)$  是地表反射率;  $\sigma_m(\lambda, s)$  和  $N_m(s)$  分别表示光学路径上气体吸收截面和数密度; 积分路径  $S$  表示入射太阳光从大气顶进入大气层后, 由地表反射到空中, 最后到达仪器的路径; “ $\langle \cdot \rangle$ ” 表示所有光学路径的平均<sup>[16]</sup>.

辐射传输模式能在一定观测几何和地表大气状态下计算出高分辨率的模拟光谱, 而仪器实际获得的 CO<sub>2</sub> 吸收光谱的分辨率由 CO<sub>2</sub> 探测仪特征决定<sup>[18]</sup>, 模拟光谱需要通过与仪器线型函数卷积, 修正仪器效应, 才能与观测光谱比较. 因此, 仪器模型将模拟光谱和仪器线形函数 (instrument line shape, ILS) 卷积, 模拟 CO<sub>2</sub> 探测仪观测光谱, 方程如下:

$$I(\lambda) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(\lambda') \times ILS(\lambda, \lambda') d\lambda'. \quad (2)$$

## 3 气溶胶的敏感性实验

### 3.1 气溶胶类型的敏感性实验

气溶胶化学成分的差异很大程度决定了气溶胶物理光学特性. 本节基于多种气溶胶参数化模型, 假设地表为朗伯面, 考虑气溶胶多次散射作用,

探讨大气边界层中三种典型气溶胶类型——海洋型、乡村型和城市型气溶胶对卫星观测 CO<sub>2</sub> 吸收光谱的影响. 选择晴空无气溶胶时的模拟结果  $R_0$  作为标准进行比较, 模拟条件如表 1. 其中, 辐射变化率定义如下:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \frac{R - R_0}{R_0}, \quad (3)$$

方程 (3) 表示辐射变化率 (%), 这是一种相对变化;  $R_0$  表示背景大气条件下仪器接收的辐射,  $R$  表示考虑经气溶胶多次散射作用后仪器接收的辐射.

表 1 SCIATRAN 模型模拟条件列表  
Table 1. Simulation lists of SCIATRAN.

模拟条件	参数
背景 CO <sub>2</sub> 浓度	390 ppm
气溶胶条件	晴空无气溶胶
太阳天顶角	60°
地表反照率	0.15
光谱响应函数	高斯型
光谱分辨率	0.12 nm
光谱范围	1594—1624 nm

CO<sub>2</sub> 反演仅在晴空且气溶胶光学厚度小于 0.3 时进行 [19], 因此, 模拟计算中设置气溶胶光学厚度为 0.1, 0.2 和 0.3 时探讨气溶胶类型对卫星观测光谱的影响. 由图 1 可见, 对城市型气溶胶, 卫星观测光谱的强度随气溶胶光学厚度的增加而减弱, 当气溶胶光学厚度从 0.1 增加至 0.2 和 0.3 时, 卫星观测光谱强度分别减弱 7% 和 12%; 对乡村型气溶胶, 随着气溶胶光学厚度增加卫星观测光谱的强度也略微减弱, 对应光学厚度 0.2 和 0.3 的光谱强度减弱程度约为 5% 和 9%; 而对海洋型气溶胶, 随光学厚度从 0.1 增加到 0.2 和 0.3, 观测的光谱强度反而增强,

增强量约为 1% 和 2%, 与城市型和乡村型气溶胶表现出相反的变化趋势.

上述模拟结果表明, 不同类型和不同光学厚度的气溶胶对卫星观测 CO<sub>2</sub> 吸收光谱影响不同. 表 2 列出了对应气溶胶光学特性参数. 城市型气溶胶的化学组分以硫酸盐、硝酸盐以及含碳气溶胶为主, 从单次散射反照率 (SSA) 来看, 城市型气溶胶具有很强的吸收性 [20], 光学厚度增加增强了其吸收能力, 使太阳短波辐射削弱, 卫星观测光谱的强度明显减弱. 对海洋型气溶胶, SSA 达到 0.98 (如表 2), 表明海洋型气溶胶具有很强的散射特性, 同时, 在近红外波段, 气溶胶光学厚度的增加主要是由其散射作用引起 [21], 因此, 对海洋型气溶胶, 光学厚度增加表明散射作用增强, 其中后向散射增强导致卫星观测光谱强度随光学厚度的增加而增强.

表 2 23 km 能见度条件下 1610 nm 波段对应的气溶胶光学特性  
Table 2. Aerosol properties for 23 km visibility at 1610 nm.

气溶胶类型	SSA	不对称因子 $g$
乡村型	0.88	0.68
海洋型	0.98	0.79
城市型	0.63	0.69

从图 2 可以看出, 对于乡村型、海洋型和城市型三种气溶胶, 城市型气溶胶对卫星观测光谱的影响最大, 最大变化可以超过 13%, 海洋型气溶胶引起卫星观测光谱强度 4.5% 的减小, 乡村型气溶胶引起的辐射变化相对最小, 但也达到 2%. 结合表 2 可知, 因城市型气溶胶含黑炭等吸收性很强的粒子, 其 SSA 为 0.63, 较强吸收性导致大气顶出射辐射很大程度的减小, 因此, 吸收性气溶胶增加, 会

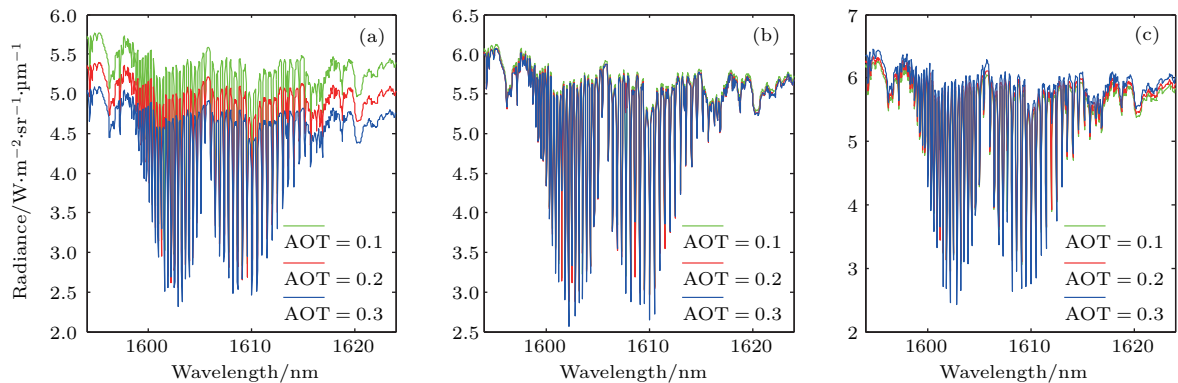


图 1 (a) 城市型、(b) 乡村型和 (c) 海洋型气溶胶存在时, 不同光学厚度条件下卫星观测的 CO<sub>2</sub> 光谱

Fig. 1. Atmosphere CO<sub>2</sub> spectra for (a) urban, (b) rural and (c) maritime aerosols in different aerosol optical thickness (AOT).

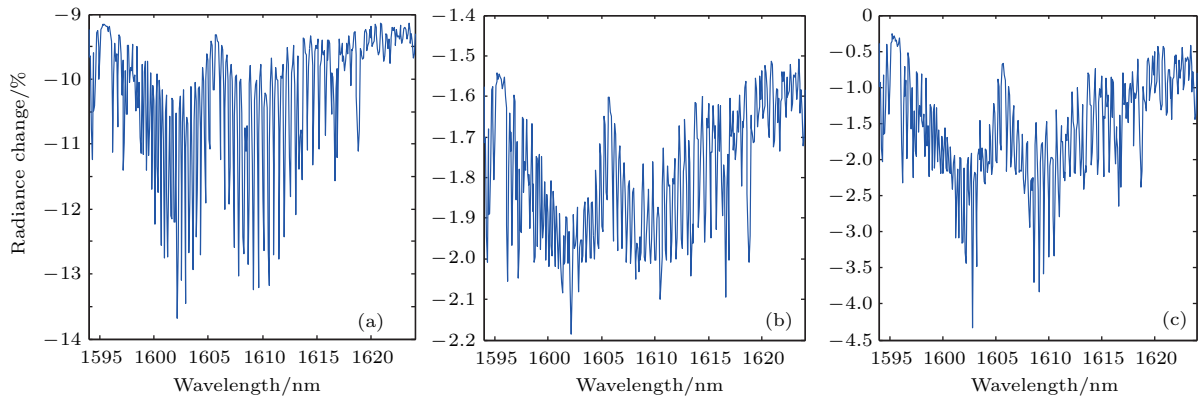


图2 (a) 城市型、(b) 乡村型和 (c) 海洋型气溶胶对仪器观测辐射的影响  
 Fig. 2. Radiance changes from baseline for (a) urban, (b) rural and (c) maritime aerosols.

造成CO<sub>2</sub>浓度的显著高估. 海洋型气溶胶是散射性气溶胶, SSA达到0.98, 表明海洋型气溶胶散射作用很强, 因此导致仪器观测辐射有较大幅度的减小.

综上所述, 在气象能见度为23 km、地表反照率为0.15时, 城市、乡村和海洋型气溶胶对卫星观测CO<sub>2</sub>吸收光谱产生了不同程度的影响, 但辐射变化率都是负值, 这表明在给定条件下, 若不考虑气溶胶的影响, 会造成CO<sub>2</sub>柱浓度的高估.

### 3.2 气溶胶模态的敏感性实验

粒子尺度是描述气溶胶特性最重要的参数. 所有气溶胶特性都与粒子尺度有关, 特别是气溶胶的物理特性<sup>[22]</sup>. 由于气溶胶的直径范围分布很广, 从一纳米到几百微米, 因此, 这里把气溶胶按照直径分成不同的模态, 探讨不同尺度范围的气溶胶对卫星观测光谱的影响.

模拟计算中, 采用高精度大气辐射传输模式SCIATRAN<sup>[23]</sup>, 及广泛应用于遥感科学研究的气溶胶和云光学属性数据集OPAC (Optical Prop-

erties of Aerosols and Clouds)<sup>[24]</sup>. 设置太阳天顶角为40°, 地表反照率为0.15, 选择1602.52 nm和1602.88 nm两个相邻的典型吸收通道, 研究气溶胶引起的辐射强度变化. 考虑气溶胶多次散射作用的模拟计算中, 将整层大气分为四个气溶胶层, 每层层顶高度设定为2, 10, 30, 60 km, 对应相对湿度为70%, 80%, 80%, 80%, 2 km以上的气溶胶层成分固定为一般背景大气情况, 调整2 km以下的气溶胶成分, 结合CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations) 卫星CALIOP (Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization) 激光雷达在532 nm波段的Level 2消光系数垂直廓线产品, 以及气溶胶垂直特征层分布数据提供的气溶胶类型相关信息, 对大陆型气溶胶中矿物质成分和海洋型气溶胶的海盐粒子成分, 改变其存在模态 (积聚模态和粗粒子模态), 模拟计算结果与晴空无气溶胶的标准情况比较, 研究气溶胶存在模态和垂直分布对仪器接收辐射的影响, 敏感性实验流程图如图3.

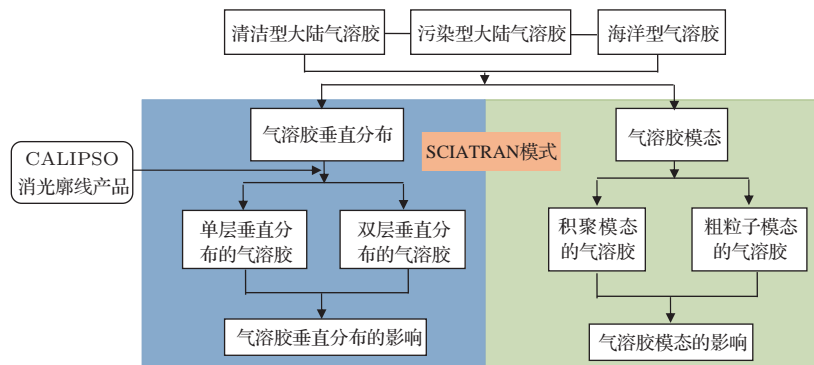


图3 敏感性实验流程图  
 Fig. 3. Flow diagram for sensitivity testing.

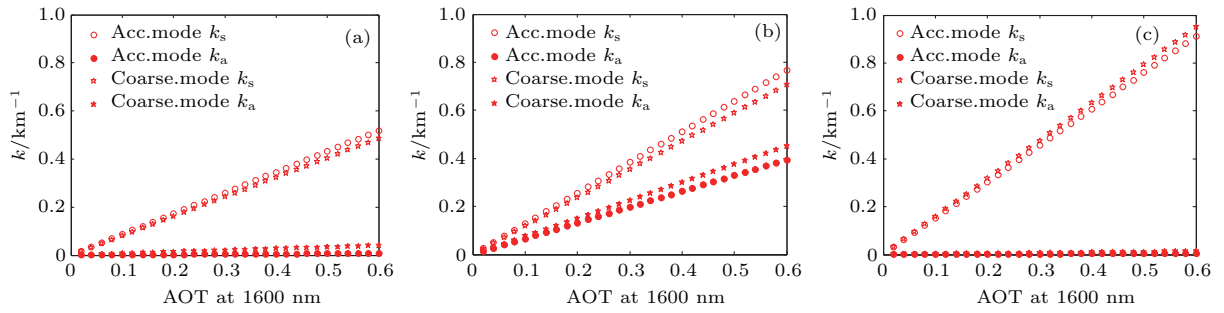


图4 (a) 清洁型、(b) 污染型大陆气溶胶和 (c) 海洋型气溶胶的散射系数  $k_s$  和吸收系数  $k_a$  随光学厚度的变化 (1600 nm)  
 Fig. 4. The changes of scattering coefficient  $k_s$  and absorption coefficient  $k_a$  with AOT for (a) clean continental aerosol, (b) polluted continental aerosol and (c) maritime aerosol.

图4是三种类型的气溶胶在不同模式下吸收系数和散射系数随光学厚度的变化关系. 由图4可见, 积聚模式的气溶胶散射特性略强于粗粒子模式. 污染型大陆气溶胶吸收性显著, 海洋型气溶胶散射性显著. 在1600 nm波段, 气溶胶粒子的散射作用强于吸收作用. 因此, 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对辐射传输路径的改变.

从2011年1月4日清洁型大陆气溶胶主要以积聚模式和粗粒子模式(图5(a), (b), (c))存在时

的模拟结果可见, 在相同垂直分布条件下, 主要以积聚模式存在的气溶胶在光学厚度小于0.6时引起了负辐射变化, 光学厚度大于0.6之后引起了正辐射变化. 主要以粗粒子模式存在的气溶胶随光学厚度增加始终引起负辐射变化. 图5中2011年10月2日的模拟结果(图5(d), (e), (f))显示, 在光学厚度从0变化到0.8的过程中, 以不同模式存在的气溶胶始终引起负辐射变化, 并随光学厚度增加, 负辐射变化不断增强.

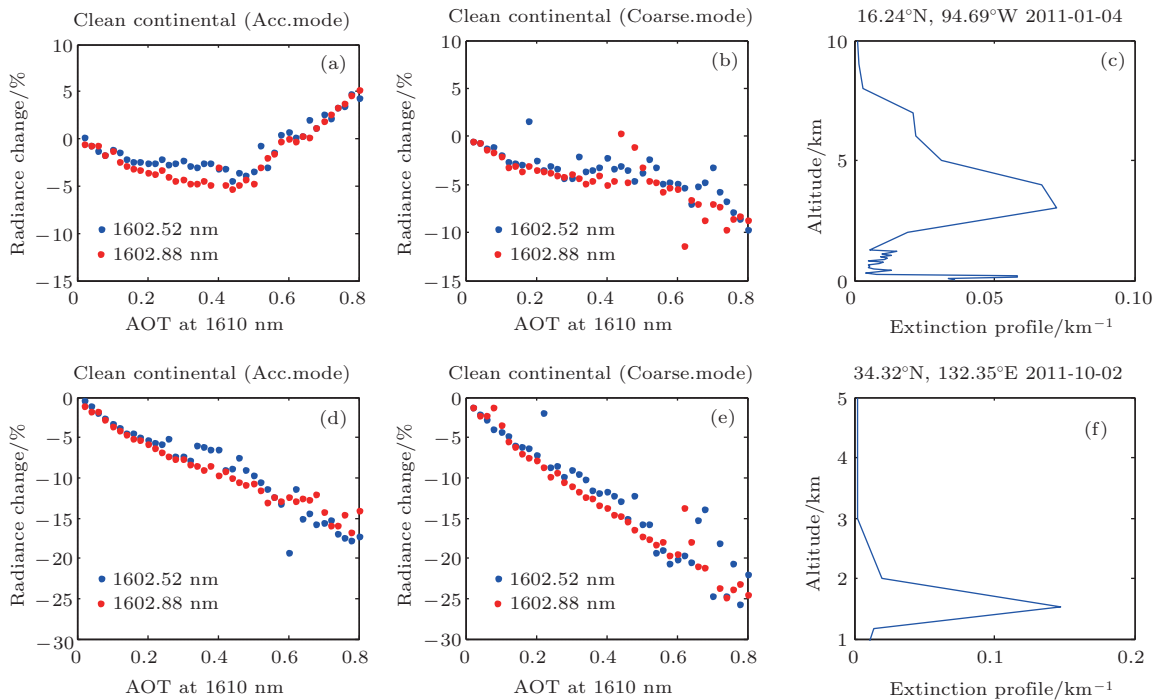


图5 2011年1月4日((a), (b), (c))和2011年10月2日((d), (e), (f))积聚模式((a), (d))和粗粒子模式((b), (e))存在的清洁型大陆气溶胶随光学厚度变化对辐射变化的影响及对应的消光廓线(Acc.mode表示积聚模式, Coarse.mode表示粗粒子模式, 图(c), (f)是模拟时采用的气溶胶垂直廓线)

Fig. 5. Radiance changes (January 4, 2011 and October 2, 2011) from baseline with the AOT for clean continental aerosol in accumulation mode ((a), (d)) and coarse mode ((b), (e)), and panels (c) and (f) are the corresponding aerosol profiles.

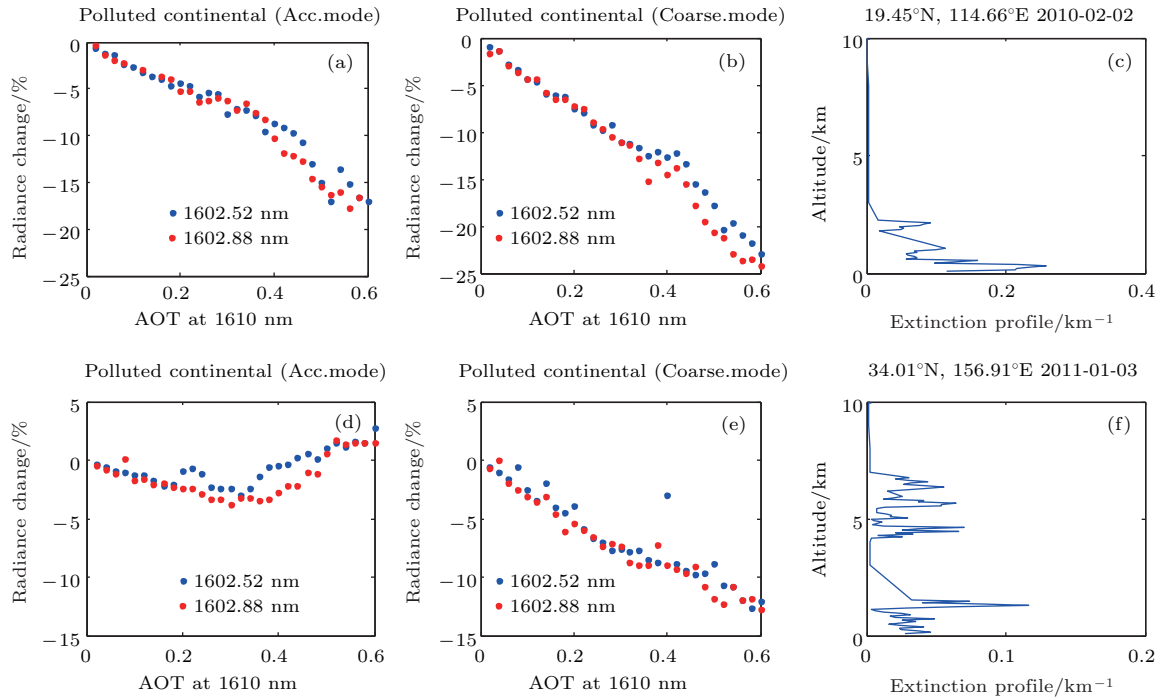


图6 2010年2月2日((a), (b), (c))和2011年1月3日((d), (e), (f))积聚模态((a), (d))和粗粒子模态((b), (e))存在的污染型大陆气溶胶随光学厚度变化对辐射变化的影响及对应的消光廓线(Acc.mode表示积聚模态, Coarse.mode表示粗粒子模态, 图(c), (f)是模拟时采用的气溶胶垂直廓线)

Fig. 6. Radiance changes (February 2, 2010 and January 3, 2011) from baseline with the AOT for polluted continental aerosol in accumulation mode ((a), (d)) and coarse mode ((b), (e)), and panels (c) and (f) are the corresponding aerosol profiles.

对污染型大陆气溶胶, 从2010年2月2日(图6(a), (b), (c))气溶胶垂直分布的模拟情况可见, 光学厚度从0增加到0.6, 不同模态存在的粒子都会引起负的辐射变化, 随光学厚度增加, 辐射变化程度不断增强, 主要以粗粒子模态存在的粒子对仪器接收辐射的影响明显大于积聚模态的粒子. 从2011年1月3日(图6(d), (e), (f))的模拟结果可见, 主要以积聚模态存在的粒子在光学厚度小于0.5时引起了辐射的负变化, 而光学厚度大于0.5之后, 引起了辐射的正变化. 而粗粒子模态的气溶胶始终会引起辐射的负变化.

结合表3可知, 粗粒子模态的气溶胶吸收性强于积聚模态的气溶胶, 导致出射辐射相对较小, 同

时较强的前向散射作用增强了光学路径长度, 使卫星接收辐射减弱, 两方面原因使气溶胶以粗粒子模态存在时仪器接收辐射表现出明显的负变化趋势. 积聚模态的粒子散射性更强, 后向散射作用强于粗粒子模态的气溶胶, 更可能引起辐射的正变化.

由图7可见, 对海洋型气溶胶, 主要以积聚模态存在的粒子在光学厚度小于一临界值时(2011年1月2日该临界值为0.6, 2011年10月10日该临界值为0.3)引起辐射的负变化, 光学厚度大于临界值后会辐射的正变化. 而主要以粗粒子模态存在的气溶胶始终会引起负辐射变化, 并随光学厚度增加辐射变化不断变大.

表3 大陆型和海洋型气溶胶在0—2 km时不同模态的SSA和不对称因子( $g$ ) (1600 nm)

Table 3. Single scattering albedo (SSA) and asymmetric factor ( $g$ ) for continental and maritime aerosols in atmospheric boundary layer (0–2 km) at 1610 nm.

气溶胶类型	污染型大陆气溶胶		清洁型大陆气溶胶		海洋型气溶胶	
	SSA	$g$	SSA	$g$	SSA	$g$
积聚模态	0.66	0.76	0.98	0.75	0.99	0.78
粗粒子模态	0.61	0.81	0.92	0.80	0.98	0.82

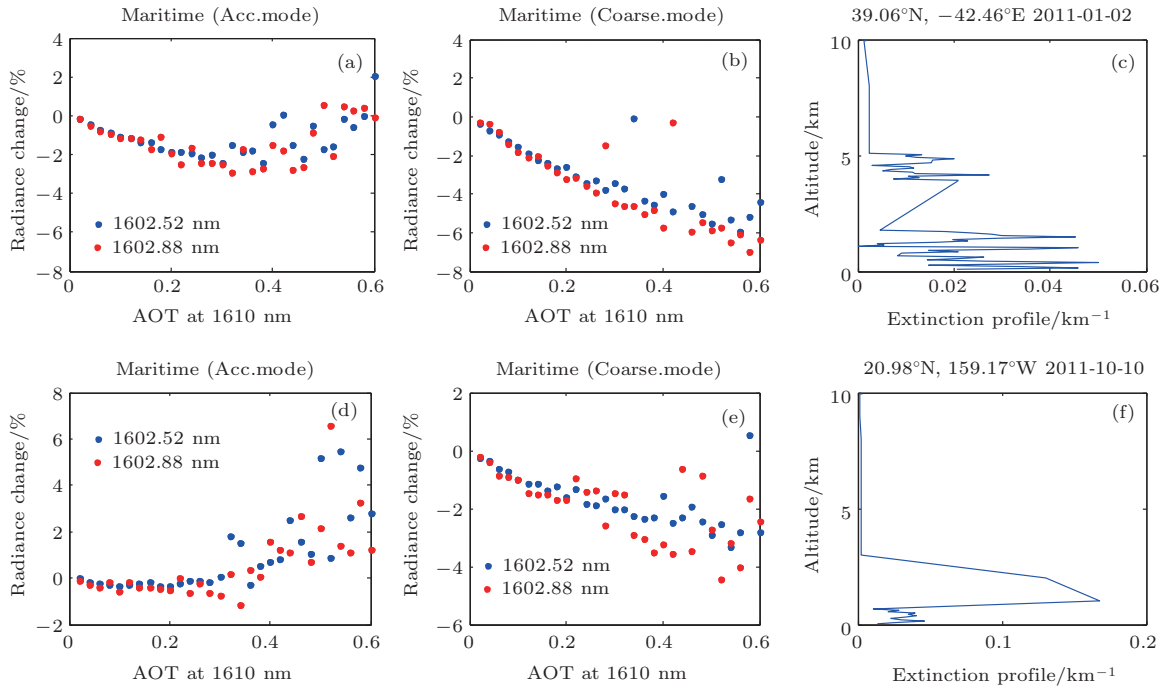


图7 2011年1月2日((a), (b), (c))和2011年10月10日((d), (e), (f)) 积聚模态((a), (d))和粗粒子模态((b), (e))存在的海洋型气溶胶随光学厚度变化对辐射变化的影响及对应的消光廓线(Acc. mode表示积聚模态, Coarse. mode表示粗粒子模态, 图(c), (f)是模拟时采用的气溶胶垂直廓线)

Fig. 7. Radiance changes (January 2, 2011 and October 10, 2011) from baseline with the AOT for maritime aerosol in accumulation mode ((a), (d)) and coarse mode ((b), (e)), and panels (c) and (f) are the corresponding aerosol profiles.

气溶胶的吸收能力主要取决于碳元素含量, 海洋型气溶胶碳元素含量很低, 气溶胶的散射消光作用占主要地位. 在近红外谱段, 气溶胶光学厚度的增加主要由气溶胶对电磁波的散射作用引起. 结合表3可见, 积聚模态的海洋型气溶胶SSA达0.99, 表明散射性很强, 所以前后向散射作用的相对强度影响仪器接收的辐射强度. 对海洋型气溶胶, 随光学厚度增加, 积聚模态的气溶胶散射作用增强, 后向散射的不断增强使仪器接收辐射在光学厚度较大时出现正变化. 而粗粒子模态的气溶胶散射性也很强, 较强的前向散射使多次散射作用造成的消光更显著, 所以主要引起仪器接收辐射的负变化.

综上所述, 在太阳天顶角为 $40^\circ$ , 典型地表反照率0.15的条件下, 粗粒子模态的气溶胶总是引起辐射的负变化. 积聚模态的气溶胶引起的辐射变化因气溶胶类型和垂直分布特征而异: 大陆型气溶胶, 因气溶胶垂直分布特征不同表现出不同的辐射变化趋势, 海洋型气溶胶在光学厚度较小时引起辐射的负变化, 随光学厚度不断增大, 引起辐射的正变化. 特别是对海洋型气溶胶, 由于散射性很强, 光

学厚度大于0.3之后相邻两个吸收通道引起辐射变化的离散度变大, 表明此时气溶胶的存在会显著影响卫星观测光谱的强度, 严重干扰仪器接收的 $CO_2$ 信号, 精确的 $CO_2$ 浓度难以反演出来. 但是, 在光学厚度小于0.3时, 不同类型、不同模态的气溶胶引起的辐射变化都为负值. 所以, 在光学厚度小于0.3时, 反演 $CO_2$ 若不考虑气溶胶的影响, 会造成 $CO_2$ 浓度的高估.

### 3.3 气溶胶垂直分布廓线的敏感性实验

气溶胶的垂直分布特性是影响气溶胶散射的一个重要因素. 它通过改变辐射传输的光学路径长度, 影响卫星观测 $CO_2$ 吸收光谱. 为研究气溶胶高度分布对卫星接收辐射强度的影响, 本节探讨清洁型大陆气溶胶、污染型大陆气溶胶以及海洋型气溶胶在不同气溶胶垂直分布条件下引起的辐射变化情况.

由图8可见, 在2011年1月4日和2011年7月12日, 气溶胶垂直分布特征呈现复杂的双层分布, 对应积聚模态的气溶胶在光学厚度较小时引起了辐射的负变化, 光学厚度超过临界值后引起辐射



的正变化。而2011年1月10日和2011年10月2日的气溶胶表现出简单的单层分布,此时,与背景条件相比,主要以积聚模态存在的气溶胶引起了辐射的负变化。对主要以粗粒子模态存在的气溶胶

(图8(b), (e), (i), (l)), 在不同气溶胶垂直分布条件下, 都表现出明显的负变化趋势, 另外, 单层分布气溶胶在两个相邻吸收通道引起的辐射变化程度和趋势一致性更强。

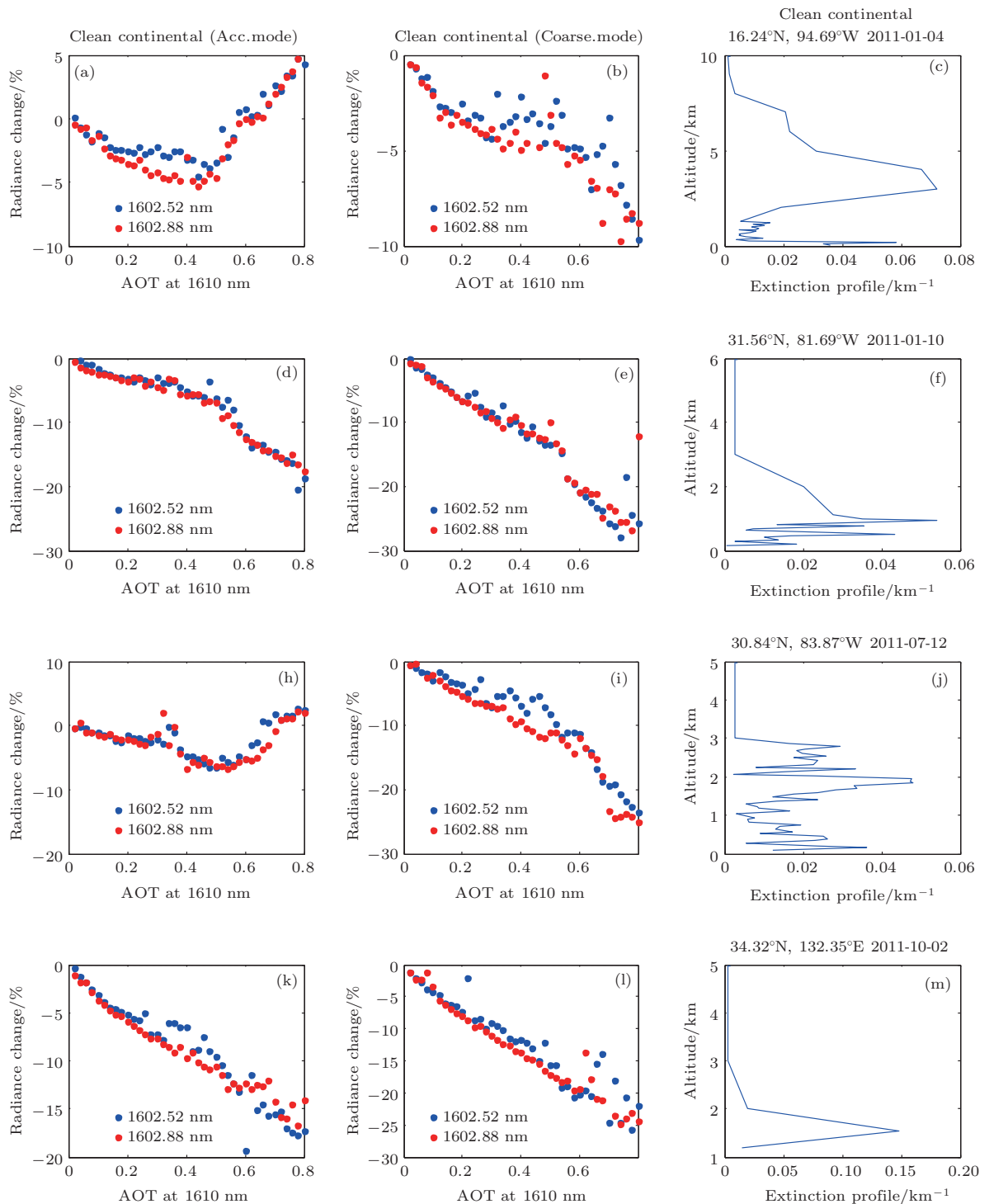


图8 对主要以积聚模态((a), (d), (h), (k))和粗粒子模态((b), (e), (i), (l))存在的清洁型大陆气溶胶, 气溶胶高度分布((c), (f), (j), (m))对仪器接收辐射的影响

Fig. 8. Radiance changes from baseline for clean continental aerosol in different vertical distributions, and panels (c), (f), (j) and (m) are the corresponding aerosol profiles.

由图9可见,与清洁型大陆气溶胶相似,呈复杂双层分布的污染型大陆气溶胶,主要以积聚模态存在时,在光学厚度较小时会引起辐射的负变化,光学厚度超过临界值后,引起辐射的正变化.另

外,2010年2月1日,2010年2月2日以及2011年1月1日的气溶胶垂直分布都呈单层分布,但由于气溶胶分布高度不同,对应的辐射变化程度也有明显差异,例如2011年1月1日气溶胶分布高度在

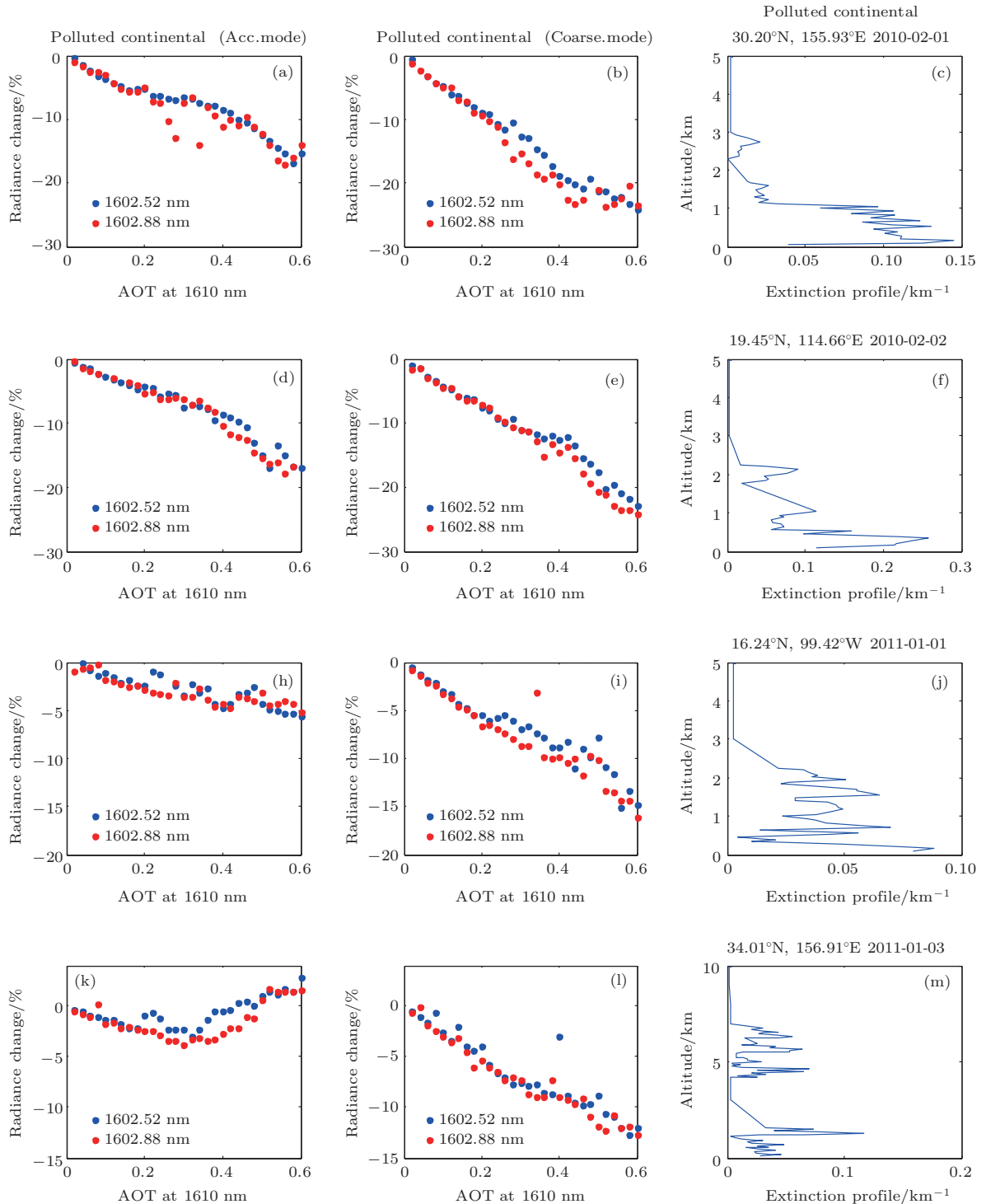


图9 对主要以积聚模态((a), (d), (h), (k))和粗粒子模态((b), (e), (i), (l))存在的污染型大陆气溶胶,气溶胶高度分布((c), (f), (j), (m))对仪器接收辐射的影响

Fig. 9. Radiance changes from baseline for polluted continental aerosol in different vertical distributions, and panels (c), (f), (j) and (m) are the corresponding aerosol profiles.

0—2 km (图9(j)), 对应辐射变化值在-6到0之间(图9(h)), 而2010年2月1日气溶胶主要分布在0—1 km (图9(c)), 此时对应的辐射变化在-20到0之间(图9(a)), 负变化程度明显大于气溶胶分布在0—2 km 的情况. 主要以粗粒子模态存在的污

染型大陆气溶胶在不同的垂直分布条件下引入的辐射变化均为负值. 此外, 随气溶胶分布高度提升, 负辐射变化程度逐渐减小.

由图10可见, 主要以积聚模态存在的海洋型气溶胶, 在不同气溶胶垂直分布条件下, 随着光学

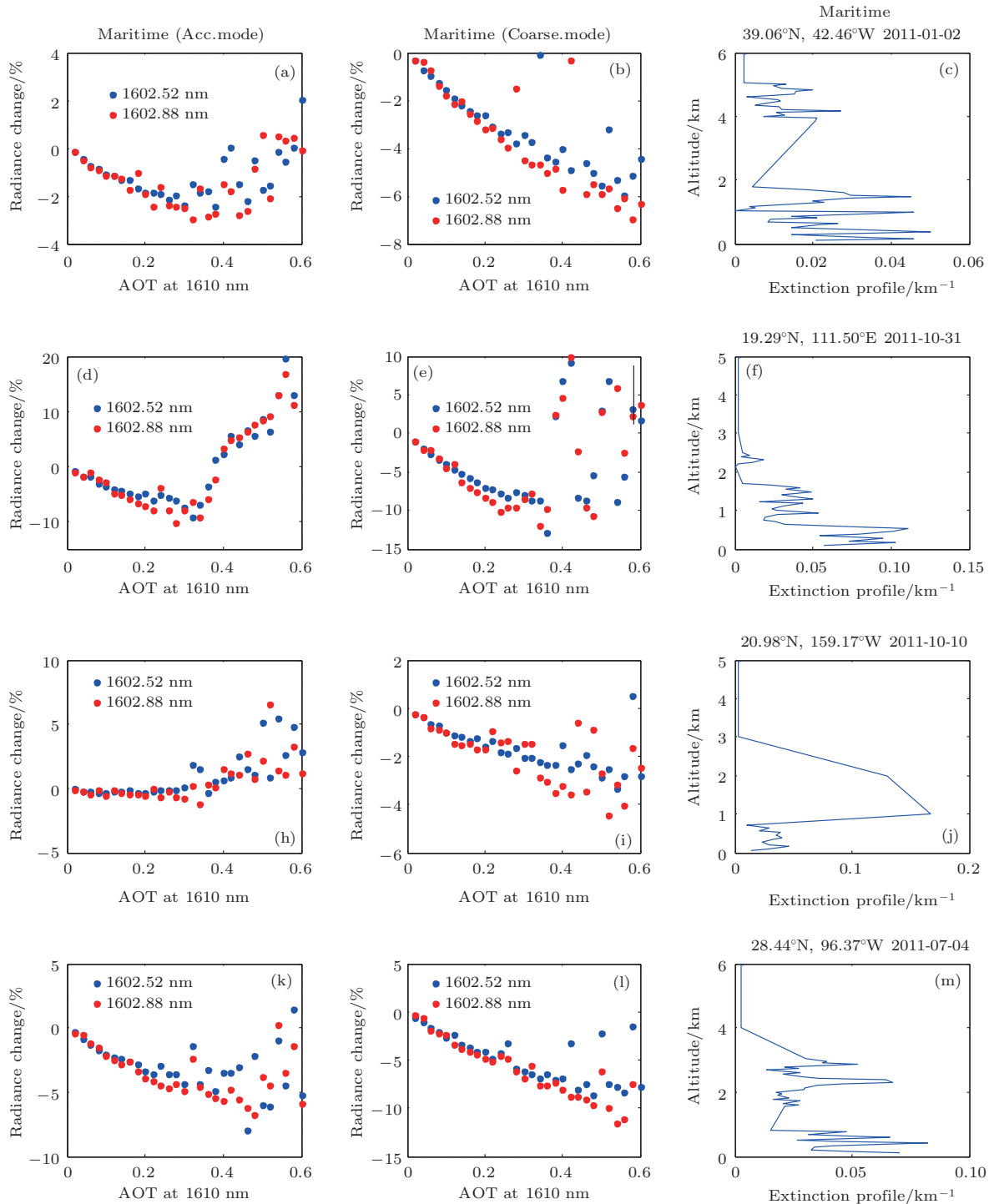


图10 对主要以积聚模态((a), (d), (h), (k))和粗粒子模态((b), (e), (i), (l))存在的海洋型气溶胶, 气溶胶高度分布((c), (f), (j), (m))对仪器接收辐射的影响

Fig. 10. Radiance changes from baseline for maritime aerosol in different vertical distributions, and panels (c), (f), (j) and (m) are the corresponding aerosol profiles.

厚度的增加, 辐射变化都是由负变为正. 气溶胶分布高度越高, 负辐射变化程度越弱. 另外, 在2011年1月2日(图10(c))和2011年7月4日(图10(m))气溶胶呈现出复杂双层分布, 此时, 在光学厚度大于0.3之后, 相邻两个吸收通道引起的辐射变化离散度变大. 而对粗粒子模态海洋型气溶胶, 与对应的大陆型气溶胶相似, 在不同气溶胶垂直分布条件下, 主要以粗粒子模态存在的海洋型气溶胶引入的辐射变化均为负值. 但是, 与粗粒子模态的城市型气溶胶相比, 海洋型气溶胶引起负的辐射变化明显更小.

综上所述, 呈简单的单层分布的气溶胶, 以不同模态存在的粒子引起的辐射变化均为负值; 粗粒子模态的气溶胶在不同垂直分布条件下, 引入的辐射变化均为负值, 随分布高度提升, 负辐射变化趋势逐渐减小. 这是因为气溶胶分布高度越高, 更多太阳短波辐射未经整层大气 $\text{CO}_2$ 吸收就被后向散射作用返回仪器, 导致仪器接收辐射增强, 从而造成 $\text{CO}_2$ 浓度的低估. 对于呈复杂双层分布的气溶胶, 主要以积聚模态存在的气溶胶引起的辐射变化在光学厚度较小时为负值, 随着光学厚度增加, 引起的辐射变化变为正值. 这是因为对强散射性的粒子而言, 高层气溶胶使太阳短波辐射未经整层大气吸收就经后向散射返回仪器, 导致仪器接收辐射增强.

## 4 结 论

利用高精度大气辐射传输模式SCIATRAN精确模拟了我国碳卫星高光谱 $\text{CO}_2$ 探测仪的观测光谱, 结合CALIPSO卫星的气溶胶廓线产品, 研究了可能在 $\text{CO}_2$ 反演中引入误差的气溶胶对碳卫星观测辐射的影响, 主要研究结论如下.

1) 气溶胶引起的光学路径长度的改变与气溶胶类型密切相关. 典型地表反照率和大气条件下, 气溶胶的影响体现为负效应, 城市型气溶胶对仪器观测辐射产生的影响最大, 海洋型气溶胶影响次之, 乡村型气溶胶影响相对最小.

2) 气溶胶引起光学路径长度改变与粒子模态密切相关. 主要以粗粒子模态存在的气溶胶会引起辐射的负变化, 而积聚模态的气溶胶引起的辐射变化趋势因气溶胶类型和垂直分布特征而异. 积聚模态的海洋型气溶胶在光学厚度较小时引起辐射的

负变化, 随光学厚度不断增大, 会引起辐射的正变化. 对清洁型和污染型大陆气溶胶, 积聚模态的粒子因气溶胶垂直分布特征不同表现出不同的辐射变化趋势.

3) 对于呈简单单层分布的气溶胶, 不同模态存在的粒子引起的辐射变化均为负值. 对于呈现复杂双层分布的气溶胶, 主要以积聚模态存在的气溶胶, 引起的辐射变化在光学厚度较小时为负值, 随着光学厚度增加, 引起的辐射变化为正值. 另外, 粗粒子模态的气溶胶在不同的气溶胶垂直分布条件下引入的辐射变化也为负值, 随气溶胶分布高度提升, 负辐射变化程度会逐渐减小.

感谢不莱梅大学遥感研究所提供的SCIATRAN辐射传输模式软件包, 以及NASA提供的CALIPSO卫星气溶胶数据产品.

## 参考文献

- [1] Baker D F, Bosch H, Doney S C, O'Brien D, Schimel D S 2008 *Atmos. Chem. Phys.* **10** 4145
- [2] Buchwitz M, Beek R D, Noel S, Burrows J P, Bovensmann H, Schneising O, Khlystova I, Bruns M, Bremer H, Bremer H, Bergamaschi P, Korner S, Heimann M 2006 *Atmos. Chem. Phys.* **6** 2727
- [3] Barkley M P, Frieß U, Monks P S 2006 *Atmos. Chem. Phys.* **6** 2765
- [4] Yokota T, Yoshida Y, Eguchi N, Ota Y, Tanaka T, Watanabe H, Maksyutov S 2009 *Sci. Lett. Atmos.* **5** 160
- [5] Crisp D 2015 *Proc. SPIE* **9607** 960702
- [6] Frankenberg C, Pollock R, Lee R A M, Rosenberg R, Blavier J F, Crisp D, O'Dell C W, Osterman G B, Wennberg P O, Wunch D 2014 *Atmos. Meas. Tech. Discuss.* **7** 7641
- [7] Butz A, Guerlet S, Hasekamp O, Schepers D, Galli A, Aben I, Frankenberg C, Hartmann J M, Tran H, Kuze A, Keppel A G, Toon G, Wunch D, Wennberg P, Deutscher N, Griffith D, Macatangay R, Messerschmidt J, Notholt J, Warneke T 2011 *Geophys. Res. Lett.* **38** L14812
- [8] Christi M J, Stephens G L 2004 *J. Geophys. Res.* **109** D04316
- [9] Jiang X, Crisp D, Olsen E T, Kulawik S S, Miller C E, Pagano T S, Yung Y L 2016 *Earth Space Sci.* **3** 78
- [10] Fraser A, Palmer P I, Feng L, Bösch H, Parker R, Dlugokencky E J, Krummel P B, Langenfelds R L 2014 *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* **14** 15867
- [11] Rayner P J, O'Brien D M 2001 *Geophys. Res. Lett.* **28** 175
- [12] Jung Y, Kim J, Kim W, Boesch H, Lee H, Cho C, Goo T Y 2016 *Remote Sens.* **8** 322

- [13] Oshchepkov S, Bril A, Maksyutov S, Yokota T 2011 *J. Geophys. Res. Atmos.* **116** D14304
- [14] Butz A, Hasekamp O P, Frankenberg C, Aben I 2009 *Appl. Opt.* **48** 3322
- [15] Nelson R R, O'Dell C W, Taylor T E, Mandrake L, Smyth M 2015 *Atmos. Meas. Tech. Discuss.* **8** 13039
- [16] Crisp D, Bösch H, Brown L [https://discscigsfcnasagov/information?page=1&keywords=OCO%20\(Orbiting%20Carbon%20Observatory\)-2%20Level%202%20Full%20Physics%20Retrieval%20Algorithm/documentation/](https://discscigsfcnasagov/information?page=1&keywords=OCO%20(Orbiting%20Carbon%20Observatory)-2%20Level%202%20Full%20Physics%20Retrieval%20Algorithm/documentation/) [2014-12-17]
- [17] Mao J, Kawa S R 2004 *Appl. Opt.* **43** 914
- [18] Natraj V 2008 *Ph. D. Dissertation* (Pasadena: California Institute of Technology)
- [19] Boesch H, Baker D, Connor B, Crisp D, Miller C 2011 *Remote Sens.* **3** 270
- [20] Li H, Sun X J, Tang L P 2011 *J. Infrared Millim. Waves* **30** 328 (in Chinese) [李浩, 孙学金, 唐丽萍 2011 红外与毫米波学报 **30** 328]
- [21] Dong W 2009 *M. S. Thesis* (Qingdao: China Ocean University) (in Chinese) [董文 2009 硕士学位论文 (青岛: 中国海洋大学)]
- [22] Hinds W C 1999 *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles* (2nd Ed.) (New York: John Wiley & Sons, Inc.) pp8-11
- [23] Rozanov V V, Diebel D, Spurr R J D, Burrows J P 1997 *J. Geophys. Res. Atmos.* **102** 16683
- [24] Hess M, Koepke P, Schult I 1998 *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **79** 831

# Simulation analysis of aerosol effect on shortwave infrared remote sensing detection of atmospheric CO<sub>2</sub>\*

Wang Qian Bi Yan-Meng Yang Zhong-Dong<sup>†</sup>

(National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081, China)

( Received 8 September 2017; revised manuscript received 7 November 2017 )

## Abstract

The research of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) sources and sinks within the carbon cycle is significant for enhancing our understanding of global climate change. Space based measurement of CO<sub>2</sub> concentration in lower atmosphere by reflected sunlight in near infrared (NIR) band has become a hot research topic at present. The global characteristic of atmospheric CO<sub>2</sub> retrieval from NIR is studied using the expected measurement performance of Tansat (Tan Satellite) mission. With the development of CO<sub>2</sub> retrieval algorithms, the light-path modification due to multiple scattering by aerosol is identified as a major source of error when retrieving CO<sub>2</sub> from high resolution near-infrared spectrum. The present study focuses on atmospheric CO<sub>2</sub> retrieval sensitivity to aerosol properties such as aerosol types, aerosol modes, and profiles aiming at the demands for retrieval accuracy of CO<sub>2</sub> no larger than 0.3%–0.5% on a regional scale. Here, we carry out the aerosol scattering effects analysis on retrieving atmospheric CO<sub>2</sub> near 1610 nm using the simulated nadir observation for Tansat based on CALIPSO aerosol profile products and SCIATRAN radiative transfer model. The results show that light path modification due to aerosol scattering is closely related to their types, modes and vertical distributions. For aerosol types, on the one hand, urban aerosol has the most significant influence on the measured radiance, followed by maritime aerosols, and has a much smaller influence for rural aerosol, which will lead to overestimated CO<sub>2</sub> concentration for the typical surface albedo. On the other hand, the measured radiance will decrease with the increase of aerosol optical thickness (AOT) for urban and rural aerosols, but exactly the opposite to maritime aerosols. For aerosol modes and vertical distributions, aerosols in accumulation mode, the continental aerosols with multilayer aerosol vertical distribution and maritime aerosols with AOT less than 0.3 will bring about less than 5% of negative radiance changes, and will cause positive changes with the increase of AOT. However, aerosols in coarse mode will always cause negative changes of radiance regardless of aerosol vertical distribution, and thus resulting in an overestimation of CO<sub>2</sub>. In addition, the higher the aerosol layer distributed, the smaller the negative radiance change is. If aerosol profiles can be successfully retrieved as a state vector, then it can be expected that satellite measurement can lead to tremendous improvement in CO<sub>2</sub> retrieval precision. This study provides important information about estimations of the influence of aerosol property on CO<sub>2</sub> retrieval algorithm. All these results can contribute to improving the accuracy of CO<sub>2</sub> retrieval.

**Keywords:** CO<sub>2</sub>, aerosol, shortwave infrared, hyperspectral

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

**DOI:** 10.7498/aps.67.20171993

\* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2011AA12A104).

† Corresponding author. E-mail: yangzd@cma.cn