

文章编号: 2096-1618(2017)03-0276-06

基于 SCIATRAN 大气辐射传输模式的 卷云大气短波红外敏感性分析

李姗姗, 邓小波, 丁继烈, 刘海磊

(成都信息工程大学, 四川 成都 610225)

摘要:对于痕量气体二氧化碳浓度的精确测量问题,首先比较大气辐射传输的几种模型,然后选用 SCIATRAN 这种模型在二氧化碳的强吸收带进行晴空大气和卷云大气辐射的模拟计算,接着对计算结果进行敏感性测验,结果表明:晴空时的辐射强度比卷云时的辐射强度小;卷云条件下太阳天顶角和卫星观测角越小时,辐射强度越大;卷云条件下地表反照率越大时,辐射强度越大;卷云条件下光学厚度越小时,辐射强度越大。最后用神经网络的方法对 SCIATRAN 计算的结果进行训练和模拟并与实际结果进行对比分析,以期对于下一步二氧化碳浓度的反演模型和算法提供有力的理论依据和技术支撑。

关键词:大气辐射传输;SCIATRAN 模型;敏感性测验;神经网络

中图分类号:TP79

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2017.03.008

0 引言

近年以来,温室气体排放,气候变暖等问题越来越引起世界的高度关注。而对于碳循环的研究迫切需要进一步提高从空间探测 CO₂ 的精度。目前,美国、日本和欧洲等发达国家对 CO₂ 检测的星载红外高光谱技术的研究开展了一些工作,多颗高光谱探测卫星进入运行轨道并开始发挥重要作用^[1]。

星载大气遥感旨在得到痕量气体、气溶胶、云的特性,以及通过测量大气层顶光谱辐射和反射从而得到地表参数^[2]。这就需要除了高质量光谱,通过大气到达传感器精确的太阳辐射传输模型-正演方法,还需要得到通过测量大气层顶光谱得到构成特性的方法-反演方法。许多痕量气体在紫外-可见光谱范围内有吸收带,以此为出发点通过差分光学吸收光谱法或者类似的方法得到它们的含量。目前科学界普遍认为 CO₂ 浓度的变化是引起全球气候变暖的主要驱动因子,CO₂ 作为一种痕量气体在 1.61 μm(强吸收带)和 2.06 μm(弱吸收带)的短波红外有两个重要吸收带,基于 CO₂ 强吸收带模拟计算和研究大气的辐射传输是非常有意义的。卷云处于对流层中上层及平流层下层,云底一般在 4500 ~ 10000 m,由高空的冰晶组成。卫星观测显示卷云在全球的覆盖率高达 20% ~ 30%。卷云通过影响地球和大气的辐射收支从而影响着天气过程和气候系统。文中主要进行卷云大气条件的正演

模拟计算,开展各种参数的敏感性分析,为短波红外 CO₂ 反演模型和算法提供理论依据和技术支撑。

1 SCIATRAN 大气辐射传输模型的原理和方法

SCIATRAN 是一种可调节性很强的高光谱分辨率的大气辐射传输模型,它是由德国不莱梅大学所开发的。这种辐射传输模式适用于模拟地球大气中的太阳辐射在紫外线、可见光和近红外(紫外-可见-近红外)光谱区的测量,它的光谱为 175 ~ 2400 nm,光谱分辨率为 0.24 ~ 0.5 nm,包括任何在大气中或大气上界观察太阳辐射的几何视角。例如,通过卫星、飞机和气载或地基工具的 limb 临边、nadir 天底、off-nadir 脱离天底、zenith 天顶、off-axis 偏心轴。SCIATRAN 模型与其他大气辐射传输计算模型相比的优势在于,提供了更细致的微量气体和云参数的设置方法,并在地表反照度中引入了双向反射分布函数 BRDF^[3]。SCIATRAN 能够在平面平行大气模式或者球形模式中进行操作。在球形模式中,认为地球大气是关于太阳的主要平面对称的,考虑了太阳天顶角对于大气的成分依赖。本文研究中用的大气模式是平行平面大气模式^[4]。平行平面大气的辐射传输方程中不加任何坐标系的普遍辐射传输方程为

$$\frac{dI}{k_{\lambda}\rho ds} = -I_{\lambda} + J_{\lambda} \quad (1)$$

其中

$$J_{\lambda} = \frac{j_{\lambda}}{k_{\lambda}} \quad (2)$$

式中 I_{λ} 为辐射强度, ρ 是物质的密度, k_{λ} 表示对辐射波长 λ 的质量消光截面, ds 为通过介质的厚度, 质量消光截面等于质量吸收截面与质量散射截面之和。定义源函数系数 j_{λ} , 它具有和质量消光截面 k_{λ} 相同物理意义使由于发射和多次散射造成的强度增大。

研究中假定大气是平面平行的, 因此只允许辐射强度和大气参数(温度和气体分布廓线)在垂直方向(高度和气压)上变化^[4]。此时, 测量与分层平面垂直的线性距离比较方便, 若用 z 表示这一距离, 则普遍方程转变为

$$\cos \frac{dI_{\lambda}(z;\theta,\varphi)}{k_{\lambda}\rho dz} = -I(z;\theta,\varphi) + J(z;\theta,\varphi) \tag{3}$$

式中 θ 表示相对于向上垂线的倾角, φ 是相对于 x 轴的方位角, 并用到由大气上界向下测量的垂直光学厚度:

$$\tau = \int_z^{\infty} k\rho dz' \tag{4}$$

得到的平行平面中有关多次散射问题的基本方程为

$$v \frac{dI_{\lambda}(\tau;v,\varphi)}{d\tau} = I_{\lambda}(\tau;v,\varphi) - J_{\lambda}(\tau;v,\varphi) \tag{5}$$

其中 $v = \cos\theta$, 另外, 在大气光学厚度的计算中用到的是逐线积分计算(LBL)方法:

$$\tau(v,c) = \sum_i \sum_j S_{ij}cg(v-v_0) \tag{6}$$

式中 i 表示对计算波长点上有吸收贡献的各种分子的求和, j 为所考虑的宽带范围内所有的吸收谱线。 S 为气体吸收线强, v_0 为谱线的中心波长, c 为待测气体的浓度, g 为线型函数, 对不同高度分别采用 Lorentz, Voigt 和 Doppler 线型, 在计算时只考虑吸收线中心 $\pm 20\text{cm}^{-1}$ 范围内的所有谱线的吸收, 并考虑谱线强度和半宽度随温度和气压的变化^[5]。谱线参数及随温度变化参数 n 通过高分辨率大气透过率分子吸收数据库(HITRAN)得到。

SCIATRAN 模型的参数结构如图 1 所示。

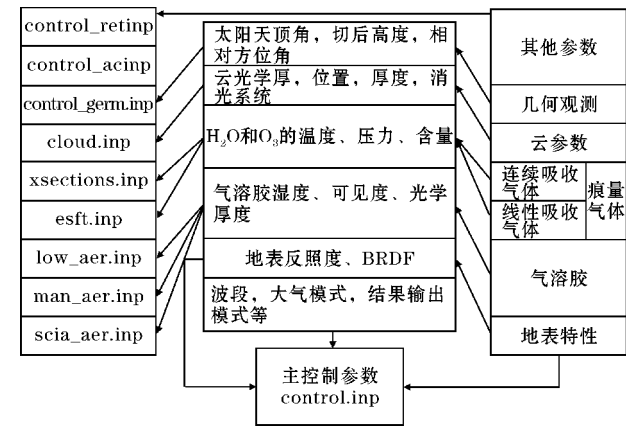


图 1 SCIATRAN 参数结构

SCIATRAN 有一个主控文件 control.inp, 还有云、气溶胶、几何角度、等多个小的控制文件, 在用 SCIATRAN 模拟计算辐射强度时, 需要对模型中的主控文件 control.inp 中的辐射传输模型、计算结果类型、辐射传输方程算法、计算结果是否为绝对量度、太阳光谱文件路径、模拟波段信息、狭缝函数半波长、痕量气体选择、线性气体拟合方法、模拟地区的经纬度和时间、是否由 SCIATRAN 模型自动按经纬度和时间指定地表反照率、地表高度和 MPI 数据等进行设置^[3]。同时还要对几何控制文件如卫星的高度、观测时的太阳天顶角、太阳方位角, 实现方位角及切点高度等数据进行设定, 以及其他十几个控制文件进行设定。

2 敏感性测验

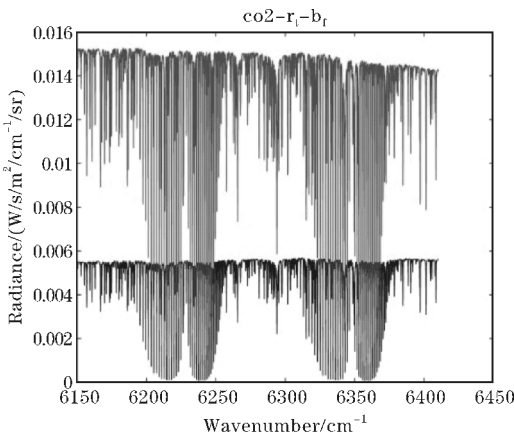


图 2 晴空、卷云敏感性测验

表 1 取 15 个点的辐射量数值对比

波数 Wavenumber/ cm ⁻¹	晴空 Radiance/ (W/m ² /nm/sr)	卷云 Radiance/ (W/m ² /nm/sr)
6150.10000	2.076407729E-002	5.745281779E-002
6167.44000	2.029971876E-002	5.593783013E-002
6184.78000	2.018615444E-002	5.646294407E-002
6202.12000	2.053620886E-002	5.744214121E-002
6219.46000	2.061260814E-002	5.817934314E-002
6236.80000	2.120392607E-002	5.862985386E-002
6254.14000	2.165712698E-002	5.877060077E-002
6271.48000	2.037706793E-002	5.464375492E-002
6288.82000	2.139621950E-002	5.715622941E-002
6306.16000	2.249661374E-002	5.974679113E-002
6323.50000	2.220013712E-002	5.984687429E-002
6340.84000	1.736560092E-002	4.619672246E-002
6358.18000	2.197702846E-002	5.876445416E-002
6375.52000	2.253557028E-002	5.860974811E-002
6392.86000	2.300110997E-002	5.896774942E-002

SCIATRAN 模式的主控文件中,需要设置所选波段 Spectral segment info,按波长来说,是 1560 ~ 1626 nm,按波数设置是 $6150 \sim 6410 \text{ cm}^{-1}$,文中研究是用波数设置的,以下波段选用均在此波段。当其他参数设置相同,只改变有云和无云参数时,太阳辐射光谱如图 2 所示,横坐标为波段所对应的波数,纵坐标为辐射量大小,以下光谱图均如此。图 2 中从上到下第一条光谱为有卷云条件下的光谱,第二条光谱为晴空条件下的光谱。表 1 为取 15 个点对应的晴空和卷云两种条件下的辐射量,结合图 2 和表 1 可以看出,当天空晴朗无云条件的大气辐射量明显低于卷云条件下的大气辐射量,其他条件相同时卷云时的辐亮度是晴空时的两倍多,所以得出卷云对于大气辐射的影响非常巨大。

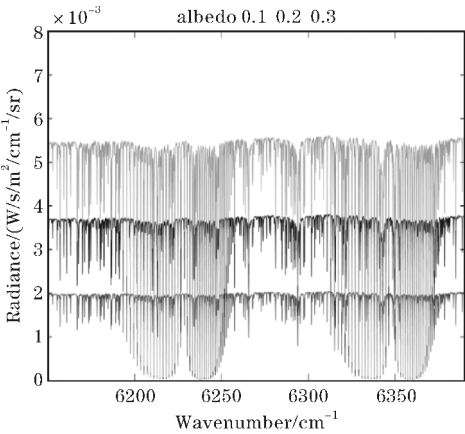


图 3 卷云大气反照率敏感性测验

图 3 为卷云大气条件下改变地表反照率时二氧化碳吸收带的太阳辐射光谱。图中从上到下第一条光谱对应的地表反射率为 0.3,第二条光谱对应的地表反射率为 0.2,第三条光谱对应的地表反射率为 0.1。可以发现,在其他条件都不改变的情况下,随着地表反射率的增高,辐射量的大小也在随之增大。

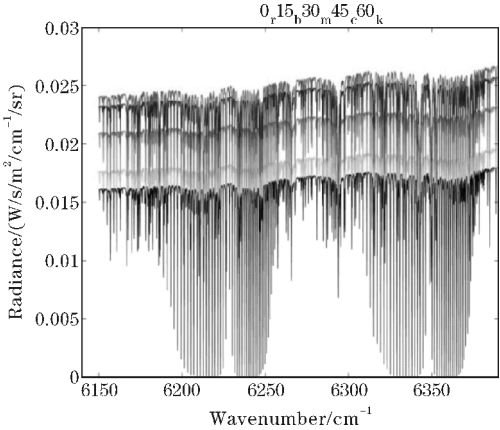


图 4 卷云大气太阳天顶角、卫星观测角敏感性测验

图 4 表示的是当卷云条件下,光学厚度为 0.14 时太阳天顶角和卫星观测角分别为 $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$;方位角为 0° 时的太阳光谱。图中从上到下,第一条光谱对应的太阳天顶角和卫星观测角为 0° ,第二条光谱对应的太阳天顶角和卫星观测角为 15° ,第三条光谱对应的太阳天顶角和卫星观测角为 30° ,第四条光谱对应的太阳天顶角和卫星观测角为 45° ,第五条光谱对应的太阳天顶角和卫星观测角为 60° ,从而也可以得出,当太阳天顶角和卫星观测角的角度越小的时候,太阳辐射量越大。

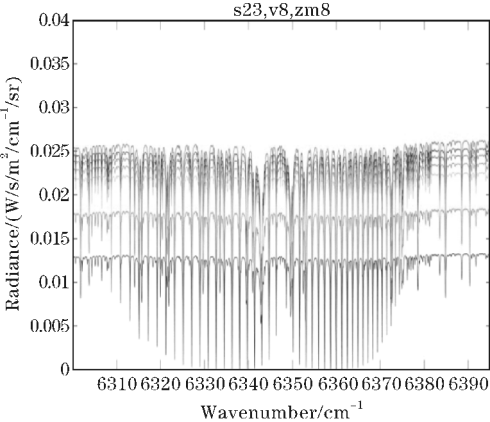


图 5 卷云大气太阳天顶角、卫星观测角敏感性测验

表 2 7 组不同天顶角对应的平均辐亮度

SZA/(°)	0°	15°	20°	25°	30°	45°	60°
Mean Radiance/(W/m²/nm/sr)	0.0237	0.0229	0.0222	0.0214	0.0204	0.0166	0.0121

图 5 表示在卷云条件下,光学厚度为 0.14,在卫星观测角为 15° 保持不变的条件下,从上到下的光谱图对应的太阳天顶角分别为 $0^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 。表 2 为经过计算的 7 组不同天顶角各自的平均辐亮度。结合光谱图以及表 2,可知太阳辐射量随天顶角变大而变小。

图 6 为在卷云的条件下,光学厚度分别为 0.04,

0.08,0.12,0.14 时模拟计算的 CO_2 吸收带太阳光谱。图中从上到下第一条光谱对应的光学厚度为 0.04,第二条光谱对应的光学厚度为 0.08,第三条光谱对应的光学厚度为 0.12,第四条光谱对应的光学厚度为 0.14,表 3 为卷云大气时四组不同的光学厚度对应的平均辐亮度,结合图 6 和表 3 可以发现,当光学厚度越大时,太阳辐射量会越小。

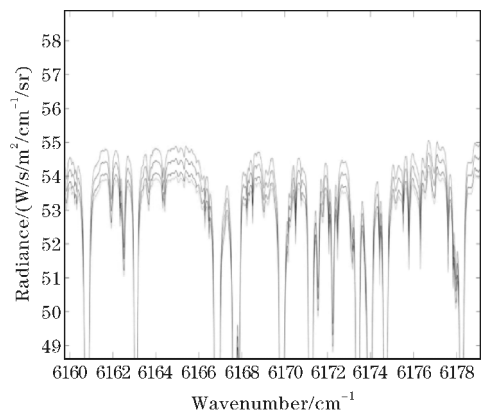


图 6 卷云大气光学厚度敏感性测验

表 3 4 组不同光学厚度对应的平均辐亮度

光学厚度	0.04	0.08	0.12	0.14
Mean Radiance/(W/m²/nm/sr)	0.0201	0.0199	0.0198	0.0197

3 基于 SCIATRAN 计算结果的模拟及对比

采用的模拟方法是神经网络法。神经网络是通过向环境学习获取知识并改进自身性能,现在已经应用到模式识别、图像处理、控制和优化、预报和智能信息管理、通讯、空间科学等各种不同的领域当中,神经网络的学习方式有 3 种:监督学习、非监督学习、强化学习。这里用到的是监督学习的方式,即它可对给定的一组输入提供应有的结果,这组已知的输入-输出数据称为训练样本集,神经网络可根据已知输出与实际输出之间的关系来调节系统参数^[6]。

取 5 组 GOSAT 卫星实测辐亮度数据,将它们分别编号为 t_1, t_2, t_3, t_4, t_5 。5 组实测数据和 SCIATRAN 计算结果如图 7,8 所示。

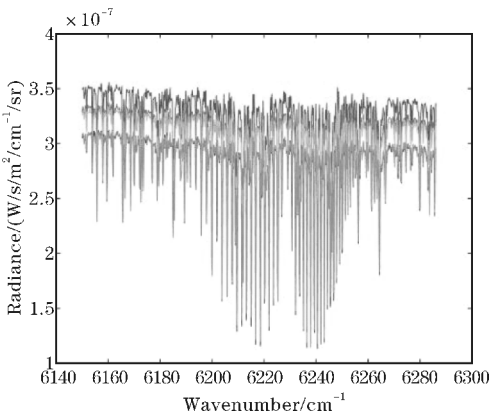


图 7 5 组实测卫星数据

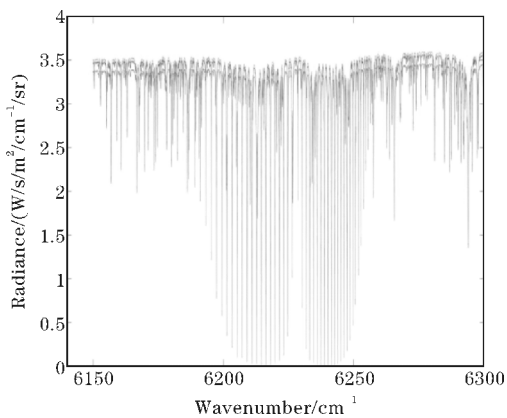


图 8 5 组 SCIATRAN 计算结果

首先,在 SCIATRAN 中设置与已知 5 组数据分别相同的太阳天顶角、卫星观测角、方位角、经纬度,然后经计算得出五组对应的辐亮度的模拟数据 p_1, p_2, p_3, p_4, p_5 。以实验 1 为例,步骤一:进行正向反馈建网。正反馈网是由许多层组成,第一层与输入有关系,之后的每一层都与它前面的一层有关系。最后一层产生神经网络的输出。一个正反馈神经网络只要有一个隐层,隐层里有足够多的神经元就可以拟合出有限的输出-输入的图。步骤二:配置网络输入和输出最佳匹配输入和目标数据,由 SCIATRAN 的计算结果 $m_1 = [p_2, p_3, p_4, p_5]$ 作为输入,实测 $n_1 = [t_2, t_3, t_4, t_5]$ 作为输出。步骤三:将输入和目标输出进行训练,将 $k_1 = [p_1, p_2, p_4, p_5]$ 4 组数据作为训练对象进行神经网络模拟。步骤四:用模拟出的 y_1 与实测 t_1 进行对比拟合,得出结论。(实验 2 的 $m_2 = [p_1, p_3, p_4, p_5]$ $n_2 = [t_1, t_3, t_4, t_5]$ $k_2 = [p_1, p_2, p_3, p_5]$;实验 3 的 $m_3 = [p_1, p_2, p_4, p_5]$ $n_3 = [t_1, t_2, t_4, t_5]$ $k_3 = [p_1, p_3, p_4, p_5]$;实验 4 的 $m_4 = [p_1, p_2, p_3, p_5]$ $n_4 = [t_1, t_2, t_3, t_4]$ $k_4 = [p_1, p_2, p_3, p_4]$;实验 5 的 $m_5 = [p_1, p_2, p_3, p_4]$ $n_5 = [t_1, t_2, t_3, t_4]$ $k_5 = [p_2, p_3, p_4, p_5]$)

为方便起见,取下面 2 组实验结果图时单位均换为 $W/m^2/cm^{-1}/sr$ 。

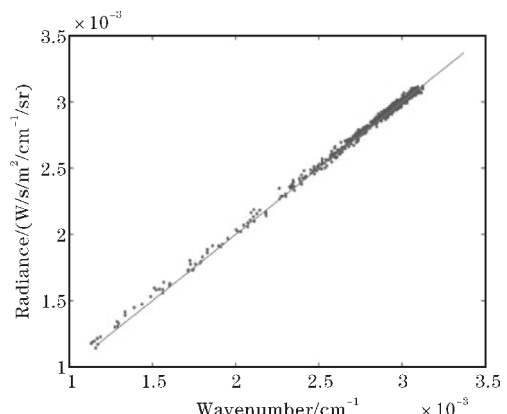


图 9 实测 t_4 与模拟 y_4

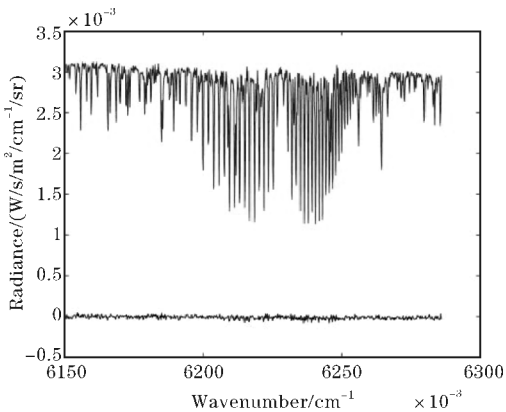


图 10 实测 t_4 与模拟 y_4 的对比和残差

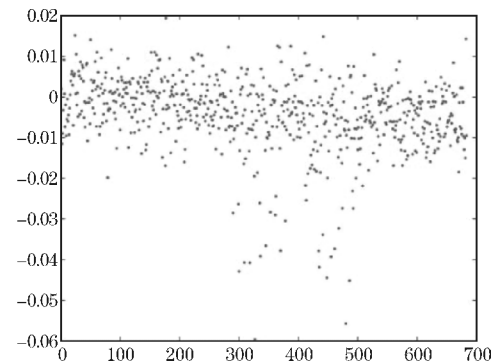


图 11 实测 t_4 与模拟 y_4 的相对误差

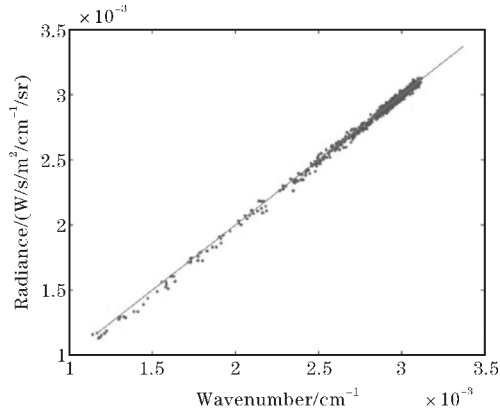


图 12 实测 t_5 与模拟 y_5

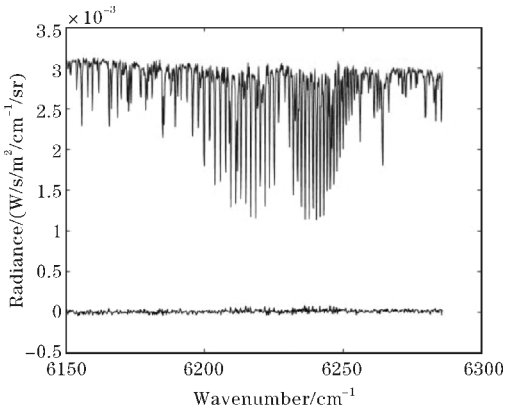


图 13 实测值 t_5 与模拟值 y_5 的对比和残差

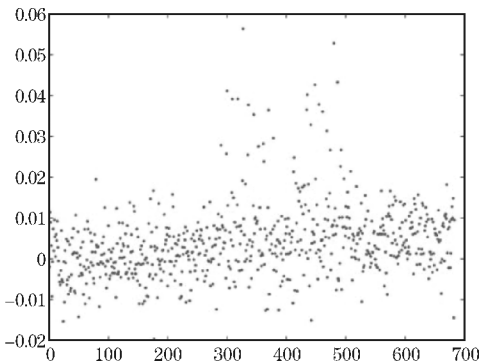


图 14 实测值 t_5 与模拟值 y_5 的相对误差

由图 9-图 14 可得,由 SCIATRAN 模拟计算出的数据经过神经网络的训练和模拟,并通过与实测结果的对比,它们的相对误差绝大多数控制在 ± 0.01 ,与实测数据符合的相对较好,但是还存在一些误差。除了上部分提到的,反照率影响还可能存在网格点高度的选取,气溶胶的影响,机器噪声的影响等等。这种 SCIATRAN 的模拟计算方法在未来会进一步对数据进行验证,并希望为 CO_2 浓度的精确反演打好基础。

4 结束语

基于 SCIATRAN 大气辐射传输模式,通过对卷云大气条件下 CO_2 强吸收带的大气辐射的模拟计算,得出:晴空时的辐射强度比卷云时的辐射强度小;卷云条件下太阳天顶角和卫星观测角越小时,辐射强度越大;卷云条件下地表反照率越大时,辐射强度越大;卷云条件下光学厚度越小时,辐射强度越大。最后用神经网络的方法对 SCIATRAN 计算的结果进行了训练和模拟并与实际结果进行了对比分析,以期对于下一步 CO_2 浓度的反演模型和算法提供有力的理论依据和技术支撑。

参考文献:

[1] 李双,裴桢炜,王相京. 星载大气主要温室气体监测仪杂光模拟分析[J]. 红外与激光工程, 2015,44(2):616-619.

[2] 张兴赢,张鹏,方宗义,等. 应用卫星遥感技术监测大气痕量气体的研究进展[J]. 气象,2007,33(7):3-14.

[3] 张恭正,陈圣波,王明常,等. 基于 SCIATRAN 模型的 Limb 大气辐射传输模拟[J]. 科学技术与工程,2010,10(6):1506-1509.

[4] 何荣. 用信息法研究天空亮度分布[D]. 重庆: 重庆大学,2008.

- [5] 胡振华,黄腾,王颖萍,等. 太阳光谱对高分辨吸收光谱反演大气 CO₂ 浓度影响的研究[J]. 光谱学与光谱分析,2011,(6):1683-1687.
- [6] 周姝春. CMAC 神经网络的泛比性能研究及其在 IVSC 控制中的作用[D]. 成都:电子科技大学,2005.

The Sensitivity Analysis of Cirrus Cloud Atmospheres Short Wave Infrared based on SCIATRAN Atmospheric Radiative Transfer Model

LI Shan-shan, DENG Xiao-bo, DING Ji-lie, LIU Hai-lei
(Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: For accurate measurement of trace gases CO₂ concentrations, at first, this paper compares several of atmospheric radiation transmission models, then choose the SCIATRAN model to simulate the cloudless atmospheric radiation and cirrus atmospheric radiation in the strong absorption band of carbon dioxide, next do some sensitivity experiments with calculation data, the results show that: The intensity of clear sky is smaller than cirrus sky; Under the cirrus atmosphere, the smaller of sun zenith angles and satellite viewing angles, the stronger of the radiation intensity; Under the cirrus atmosphere, the bigger of ground albedo, the stronger of radiation intensity; Under the cirrus atmosphere, the smaller of Optical thickness, the stronger of radiation intensity. Finally, we use the method of neural network to train and the simulate the results of calculation, and compare with the real results of calculation, analyze the bias. In order for the carbon dioxide concentration inversion model and algorithm provide strong theoretical basis and technical support.

Keywords: atmospheric radiation; SCIATRAN model; sensitivity experiments; neural network