0254-6124/2021/41(6)-905–06 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

ZHANG Bingyan, YAN Zhaoai, GUO Wenjie, HU Xiong. Optimization of atmospheric radiative transfer model LBLRTM based on measured CO_2 data (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2021, **41**(6): 905-910. DOI:10.11728/cjss2021.06.905

基于 CO_2 测量数据的大气辐射传输模型 LBLRTM 优化*

张炳炎[1,2,3] 闫召爱[1,2,3] 郭文杰[1,2] 胡 雄[1,2]

1(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

2(中国科学院空间环境态势感知技术重点实验室 北京 100190)

3(中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 根据 TIMED/SABER 2002—2018 年的 CO_2 观测数据, 分析 CO_2 浓度的变化特征. 依据变化特征给出了 CO_2 浓度随时间、高度、纬度变化的月平均拟合公式, 利用非线性最小二乘拟合法, 对不同高度和不同纬度的 CO_2 浓度数据分别进行拟合, 生成相应的拟合参数. 然后, 将所有拟合参数汇总并生成拟合参数文件, 结合拟合公式构建全球 CO_2 浓度经验计算模块, 并将该模块应用到大气辐射传输模型 LBLRTM 中, 对该模型进行优化. 将优化前与优化后的 LBLRTM 模型模拟结果分别与 TIMED/SABER 观测数据进行比较发现, 优化前的 LBLRTM 模型模拟结果与观测值的均方根误差为 15.4%, 而优化后的 LBLRTM 模型模拟结果与观测值的均方根误差由 15.4% 下降至 8.91%. 结果表明该优化方法可以提高 LBLRTM 模型在红外波段的辐射模拟精度.

关键词 大气辐射传输, 红外辐射, CO_2 浓度

中图分类号 P 351

Optimization of Atmospheric Radiative Transfer Model LBLRTM Based on Measured CO_2 Data

ZHANG Bingyan[1,2,3] YAN Zhaoai[1,2,3] GUO Wenjie[1,2] HU Xiong[1,2]

1(*National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

2(*Key Laboratory of Science and Technology on Environmental Space Situation Awareness, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

3(*University of Chinese Academy of Science of Sciences, Beijing* 100049)

Abstract According to the CO_2 observation data of TIMED/SABER from 2002 to 2018, analyze the variation characteristics of CO_2 concentration, gives the monthly average fitting formula of CO_2 concentration varying with time, height and latitude according to the various characteristics, and uses the nonlinear least square fitting method to fit the CO_2 concentration data of different heights

* 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA17010303) 和国家自然科学基金青年科学基金项目 (41905038) 共同资助

2020-03-20 收到原稿, 2021-01-22 收到修定稿

E-mail: yanza@nssc.ac.cn

and latitudes respectively to generate corresponding fitting parameters, Then, summarize all fitting parameters and generate the fitting parameter file. Combined with the fitting formula, the empirical calculation module of global CO_2 concentration is constructed, and the module is applied to the atmospheric radiative transfer model LBLRTM to optimize LBLRTM. Comparing the simulation results of the optimized LBLRTM model with the TIMED/SABER observation data, the root mean square error between the simulation results of the not optimized LBLRTM model and the observation value is 15.4%, while the root mean square error between the simulation results of the optimized LBLRTM model and the observation value is reduced to 8.91%. The results show that this optimization method can further improve the radiation simulation accuracy of the LBLRTM model in the infrared band.

Key words Atmospheric radiative transfer, Infrared radiation, CO_2 concentration

0 引言

地气系统的辐射收支决定了长期的全球平均气候状态, 太阳辐射能和热辐射能造成了大气水平和垂直层结的不稳定. 大气辐射传输理论的研究加深了对大气科学的认识 [1]. 大气辐射传输模型是基于大气辐射传输理论, 根据大气参数对特定路径或目标的辐射、散射、透射等进行计算的模型. 大气辐射传输模型可以应用于大气科学研究、卫星遥感、大气激光探测、目标识别等领域. 常用的大气辐射模型主要有 6S (Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum), LOWTRAN (LOW resolution TRANsmission), MODTRAN (MODerate resolution atmospheric TRANsmission), FASCODE (Fast Atmospheric Signature Code), LBLRTM (Line-By-Line Radiative Transfer Model) 等 [2]. 中国科学院安徽光学精密机械研究所开发了通用大气辐射软件 CART (Combined Atmospheric Radiative Transfer)[3], 电子科技大学开发了大气临边辐射传输的宽光谱快速计算模型 FALTRAN (Fast Atmospheric Limb TRANsmission)[4]. 这些模型在波段范围、计算方法、输出参数等方面具有各自的特点.

LBLRTM 模型是由美国 AER 公司 (Atmospheric and Environmental Research Inc.) 在 FASCODE 模型的基础上开发的. LBLRTM 模型适用于从紫外到微波波段, 各高度上的大气分子光谱使用 Voigt 线型, 并考虑了 H_2O 和 CO_2 连续吸收情况以及高层大气的非局地热平衡情况, 计算精度达到 0.5%[5]. 因此, 该模型通常用于验证其他大气辐射传输软件.

影响大气辐射传输模型准确性的主要因素有: 大气分子吸收谱线的数据, 大气分子吸收谱线处理方法, 大气局地热平衡问题处理方法以及大气状态参数. LBLRTM 模型使用了精确的逐线积分大气分子吸收谱线处理方法, 并处理了高层大气的非局地热平衡问题. 大气分子吸收谱线的最新数据可以从 HITRAN 数据库网站下载. 由于大气状态复杂多变, 其是影响 LBLRTM 模型准确性的最主要因素. 其中, CO_2 分布在大气中各个高度, 是大气红外辐射的主要成分. LBLRTM 模型使用的 CO_2 浓度在 60 km 以下为 367 μmol·mol^{-1}. 根据观测数据显示, 全球大气中的 CO_2 浓度在 2005 年已经达到 379 μmol·mol^{-1}, 并随时间逐渐上升 [6]. 因此, 有必要根据观测数据建立 CO_2 廓线模型, 并应用到 LBLRTM 模型中, 以提高该模型的准确性.

本文通过对 TIMED/SABER 2002−2018 年的 CO_2 浓度数据进行分析, 建立对应的拟合参数表, 构建 CO_2 廓线模型, 然后应用到 LBLRTM 模型中, 并给出应用前后的对比结果.

1 基于 TIMED/SABER 观测数据的 CO_2 廓线建模

TIMED 卫星搭载多通道红外辐射探测器 (SABER) 于 2001 年 12 月升空, 2002 年 2 月开始探测. 从 2002 年到 2018 年积累的 CO_2 浓度廓线超过了 220 万条. 测量的纬度范围为 83°S−54°N 或 54°S−83°N. 本文采用的是 2002−2018 年 SABER 传感器 CO_2 浓度数据, 选取 54°S−54°N 的纬度范围, 研

究其月平均值的变化特征并生成拟合参数表.

将 SABER 探测器观测数据进行网格化处理, 高度范围为 30~140 km, 高度间隔 1 km, 纬度间隔 10°, 共 11 个纬度范围. 然后, 计算各高度格点内各纬度带的 60 d 滑动月平均 CO_2 浓度. TIMED 卫星轨道倾角为 74°, SABER 测量数据的当地时每天都在缓慢变化, 每 60 天可以覆盖 24 h, 通过采用 60 d 的时间范围来计算月平均, 即当月的数据加上与该月相邻的两个月份的各 15 的左右的数据, 再进行平均后作为该月的月平均值. 这样能最大程度地消除当地时的变化对时间序列的影响.

图 1 给出了 CO_2 浓度在不同纬度、不同高度随时间的变化情况, (a)~(f) 依次为 30 km, 60 km, 80 km, 90 km, 110 km, 140 km 高度的 5°N−5°S, 45°N−55°N, 45°S−55°S 的情况. 从图 1 可以看出, CO_2 浓度存在随时间非线性的长期变化、季节变化、年变化以及随太阳活动周期的变化等.

参考文献 [7, 8] 对 CO_2 分布的拟合公式, 使用更多的 SABER 观测数据, 建立对应的拟合参数表, 并构建 CO_2 廓线模型.

利用时间 t 的二次函数描述 CO_2 浓度的长期变化, 利用 $F_{10.7}$ 指数的线性关系描述随太阳活动周期的变化, 利用四个正弦和四个余弦函数描述随季节变化. CO_2 浓度的拟合公式为

$$[CO_2](t) = \gamma t + \varepsilon t^2 + \delta F_{10.7}(t) + \alpha_0 + \sum_{k=1}^{4}\left[\alpha_k \cos\left(\frac{2\pi t}{N_k}\right) + \beta_k \sin\left(\frac{2\pi t}{N_k}\right)\right]. \quad (1)$$

在描述季节变化时, 使用一个周期为 12 个月的年循环和其三个谐振周期 (周期为 6 个月、4 个月和

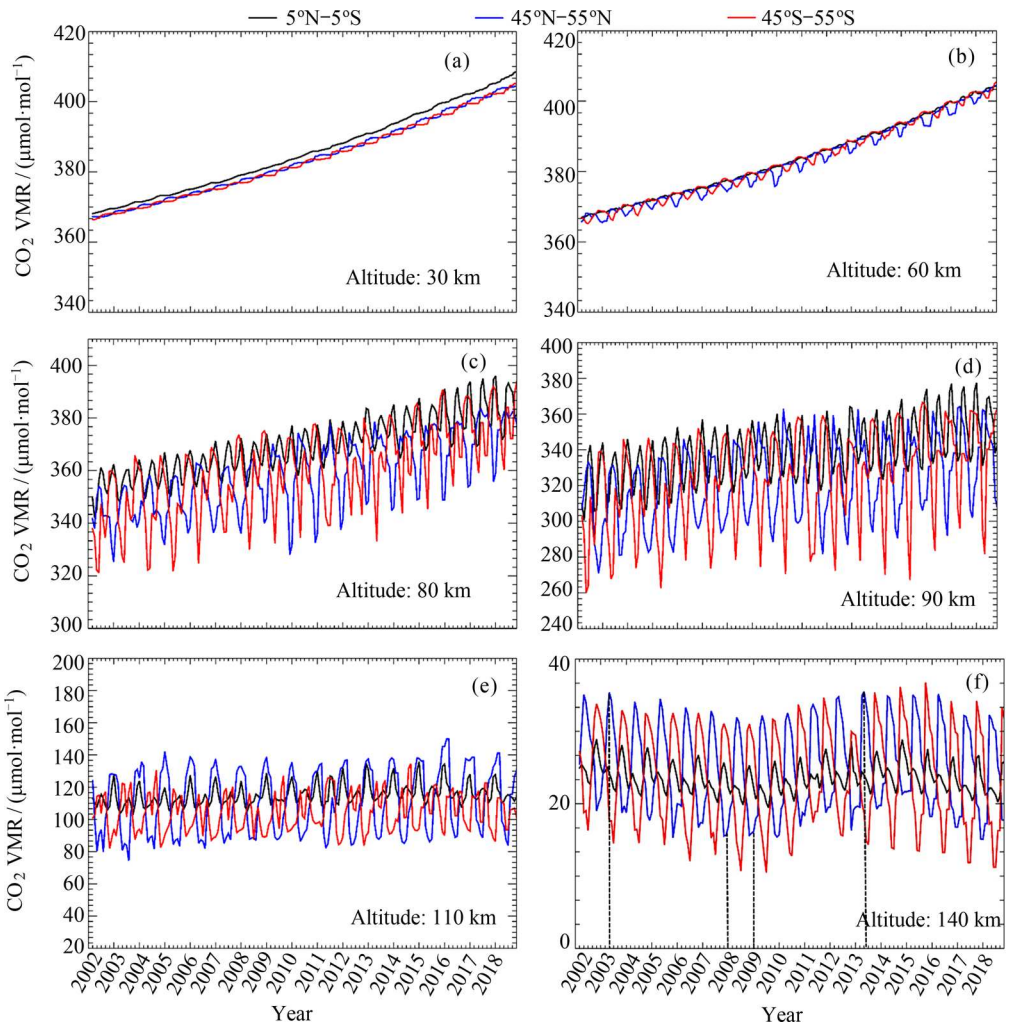


图 1 不同高度与不同纬度的 CO_2 浓度

Fig. 1 CO_2 concentrations at different altitudes and latitudes

3 个月). 式 (1) 中, α_0 为常数, N_k 的值分别为 12, 6, 4, 3. 与文献 [8] 的拟合公式相比, 增加了 εt^2 项, 该项用来表示 CO_2 浓度随时间的非线性变化. 图 2(a) 为去掉平方项后的拟合结果, 可明显看出添加平方项使拟合效果更好.

这样, 通过最小二乘法的非线性拟合, 获得每一个高度格点的全球平均时间序列或每个纬度带时间序列的解析式. 然后利用该解析式即可给出指定时间、指定纬度的 CO_2 浓度月平均值廓线.

图 2(b) 和图 3 为含平方项的拟合结果与实测数据的对比, 可以看出拟合表达式重构的时间序列与原始测量值时间序列符合较好, 60 km 处相关系数达 0.99, 90 km 处相关系数达 0.97.

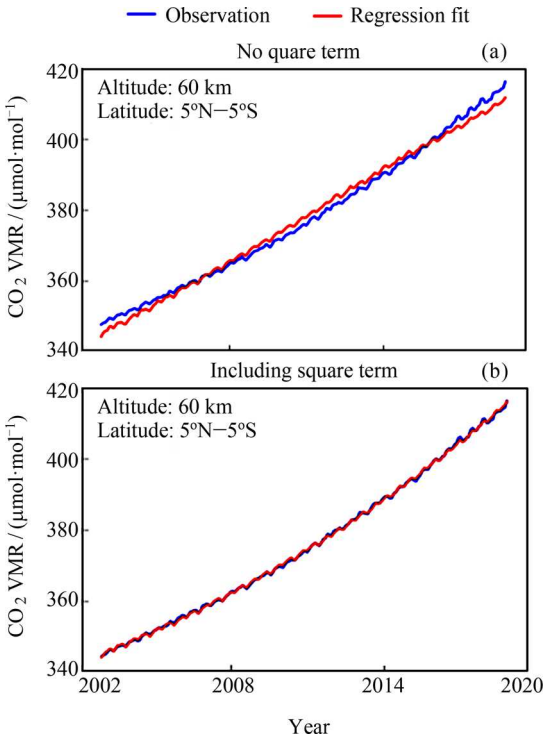


图 2 赤道附近 60 km 处 CO_2 浓度时间序列与对应的拟合时间序列

Fig. 2 Time series of CO_2 concentration and the corresponding fitting time series at 60 km near the equator

2 LBLRTM 程序优化

LBLRTM 模型代码是从 rtweb.aer.com 下载获得的 V12.8 版本, 编译成适用于 Windows 操作环境的两个可行性文件 LNFL.exe 和 LBLRTM.exe. 使用 IDL 编程语言编写代码输入 LBLRTM 模型需要的参数, 调用 LNFL.exe 和 LBLRTM.exe, 获得模拟计算的结果. 如图 4 所示, LBLRTM 模型运行分以下两个步骤.

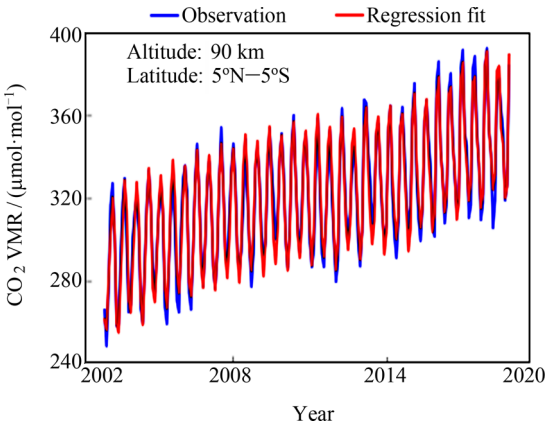


图 3 赤道附近 90 km 处 CO_2 浓度时间序列与对应的拟合时间序列

Fig. 3 Time series of CO_2 concentration and the corresponding fitting time series at 90 km near the equator

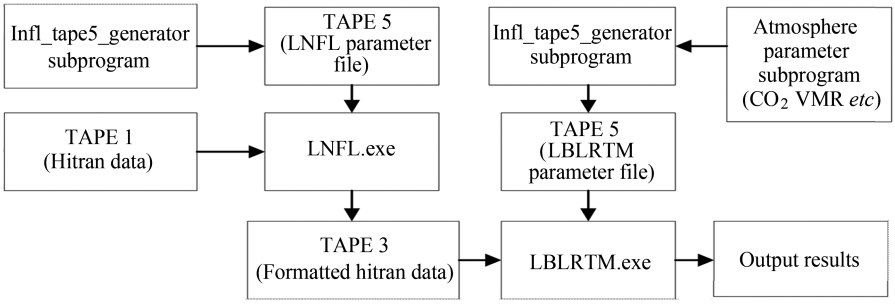


图 4 LBLRTM 模型优化工作流程

Fig. 4 Flow chart of optimization for LBLRTM model

第一步是进行大气分子吸收谱线的数据准备. HITRAN 大气分子吸收谱线的数据文件是 TAPE1, 里面包含了 47 种大气分子及其同位素成份的吸收谱线数据. 其中, 7 种是地球大气的主要吸收气体, 包括: H_2O, CO_2, O_3, N_2O, CO, CH_4, O_2. 利用 IDL 编写 lnfl_tape5_generator 子程序, 输入需要计算的波段范围和使用的大气分子种类及其同位素的情况, 生成一个 TAPE5 文件. 执行 LNFL.exe, 对 TAPE1 和 TAPE5 文件进行处理, 生成 TAPE3 文件.

第二步是计算大气辐射传输结果. 利用 IDL 编写 lblrtm_tape5_generator 子程序, 输入需要计算的参量、大气路径、大气状态参数、观察者位置及角度等, 生成第二个 TAPE5 文件. 执行 LBLRTM.exe, 对 TAPE3 和第二个 TAPE5 文件进行处理, 生成不同的结果文件. 大气状态参数主要包括大气密度、温度、压强、不同分子含量. 其中大气密度、温度、压强等基本参数由大气参数模型 NRLMSISE-00 函数提供. CO_2 分子含量通过全球 CO_2 浓度经验计算模块提供, 该模块由拟合公式和 CO_2 廓线参数库构成. 这些大气参数模型函数和计算模块由子程序 Atmosphere Parameter 进行调用.

这里使用实测的 CO_2 数据建立了 CO_2 参数表来表示 CO_2 的分布廓线, 代替 LBLRTM 模型默认的 CO_2 的分布廓线.

3 比较与分析

利用 LBLRTM 模型模拟计算 TIMED 卫星搭载的 SABER 探测器的辐亮度数据, 并将 LBLRTM 模型优化前后的结果与观测值进行比较 (见表 1). 观测

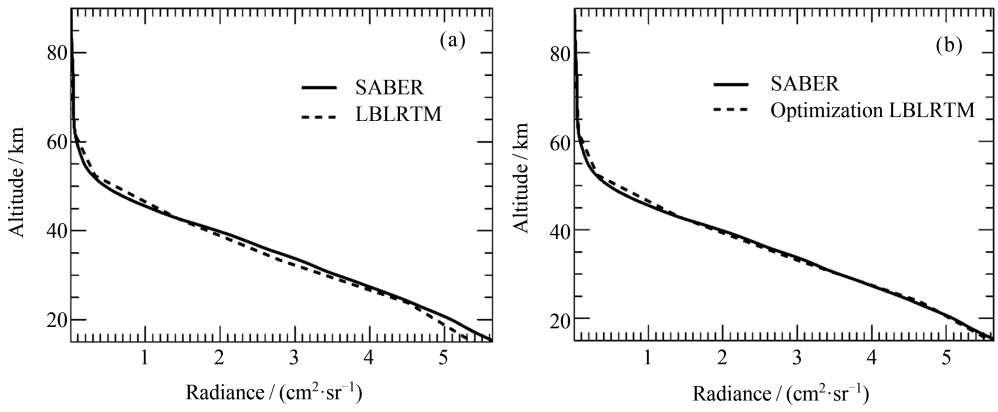


图 5 优化前后模拟结果与实测数据对比

Fig. 5 Comparison of model simulation value and measured value

表 1 模型模拟数值与实测数值对比

Table 1 Comparison of model simulation value and measured value

高度/km	辐射值/(W·cm^{-2}·sr^{-1})			优化前与实测辐射差的绝对值/(W·cm^{-2}·sr^{-1})	优化后与实测辐射差的绝对值/(W·cm^{-2}·sr^{-1})
	实测	优化前	优化后		
14.0934	5.796 31	5.441 45	5.567 57	0.354 86	0.228 74
23.6385	4.583 55	4.507 61	4.646 71	0.075 94	0.063 16
33.1837	3.090 37	2.807 03	2.968 92	0.283 34	0.121 45
42.7289	1.438 78	1.417 74	1.422 11	0.021 04	0.016 67
52.2741	0.304 18	0.327 32	0.312 49	0.023 14	0.008 31
61.8193	0.062 64	0.056 16	0.064 21	0.006 48	0.001 57
71.3645	0.039 69	0.020 86	0.035 11	0.018 83	0.004 58
80.9096	0.019 68	0.010 94	0.022 61	0.008 74	0.002 93
90.4548	0.004 83	0.002 71	0.004 05	0.002 12	0.000 78

数据为 2016 年 1 月 5 日 SABER 的第二通道辐亮度数据, 辐射路径切点位于北京 (120.006°E, 40.2632°N) 上空. 该条辐亮度廓线是从很多北京上空数据中随机挑选的. 利用 LBLRTM 模型输出 20~90 km 高度范围内的 10 层模拟结果.

图 5 是对 LBLRTM 模型进行优化前后的运行结果. 由图 5 可以看出, 优化后的结果与实测值更为接近. 优化前, 20~40 km 高度范围内模拟值明显低于实测值; 优化后, 模拟值与实测值几乎完全吻合. 40~60 km 高度范围内的模拟结果与实测值还存在一定的偏差, 其主要原因是模拟计算时选取的大气分层层数较少. 优化前模型的模拟值与实测值的均方根误差为 15.4%, 优化后的均方根误差由 15.4% 下降至 8.91%. 对 LBLRTM 模型进行优化有效地提高了 LBLRTM 模型在红外波段的模拟精确度.

4 结论

利用 TIMED 卫星搭载的 SABER 探测器的 2002−2018 年 20~140 km 范围内 54°S−54°N 的 CO_2 浓度廓线数据集, 统计分析 CO_2 浓度在不同纬度带和不同高度的月变化特性. 根据不同特性建立了拟合公式, 得到了较好的拟合结果; 建立拟合参数表, 并将 CO_2 拟合参数表应用到 LBLRTM 模型中, 提高了在红外波段的辐射模拟精度.

下一步将利用实测数据对 H_2O, O_3, N_2O, CO, CH_4, O_2 等大气分子的含量分布进行建模, 进一步优化 LBLRTM 模型.

参考文献

[1] SHI Guangyu. Atmospheric Radiation [M]. Beijing: Science Press, 2007 (石广玉. 大气辐射学 [M]. 北京: 科学出版社, 2007)

[2] RAO Ruizhong. Modern Atmospheric Optics [M]. Beijing: Science Press, 2012 (饶瑞中. 现代大气光学 [M]. 北京: 科学出版社, 2012)

[3] WEI Heli, CHEN Xiuhong, RAO Ruizhong. Introduction to the combined atmospheric radiative transfer software CART [J]. *J. Atmos. Environ. Opt.*, 2007, **6**: 446-450 (魏合理, 陈秀红, 饶瑞中. 通用大气辐射传输软件 CART 介绍 [J]. 大气与环境光学学报, 2007, **6**: 446-450)

[4] GUO Jing, YANG Chunping, ZENG Dandan, *et al.* Wide spectrum and rapid calculation model for atmos pheric radiative transfer in limb remote sensing [J]. *J. Remote Sens.*, 2015, **19**(1): 93-107 (郭晶, 杨春平, 曾丹丹, 等. 临边遥感大气辐射传输的宽光谱快速计算模型 [J]. 遥感学报, 2015, **19**(1): 93-107)

[5] CLOUGH S A, SHEPHARD M W, MLAWER E J, *et al.* Atmospheric radiative transfer modeling: a summary of the AER codes [J]. *J. Quant. Spectrosc. Ra.*, 2005, **91**(2): 233-244

[6] EMMERT J T, STEVENS M H, BERNATH P F, *et al.* Observations of increasing carbon dioxide concentration in Earth's thermosphere [J]. *Nat. Geosci.*, 2012, **5**(12): 868-869

[7] YUE Jia, RUSSELL James, JIAN Yongxiao, *et al.* Increasing carbon dioxide concentration in the upper atmosphere observed by SABER [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2015, **42**(17): 7194-7199

[8] LIU Dong. The Study of Characteristics of Infrared Radiation of Middle and Upper Atmosphere and Its Application Based on Model [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018 (刘栋. 中高层大气红外辐射特性数值模拟研究及其应用 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018)