

## 中高层大气 CO<sub>2</sub> 临边辐射: 模拟与观测对比分析

刘 栋<sup>1,2</sup>, 戴聪明<sup>1</sup>, 魏合理<sup>1,2,3</sup>

- (1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 中国科学院大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学技术大学 环境光学学院, 安徽 合肥 230026)

**摘 要:** 利用更新的高层大气辐射传输软件(SHARC)中的非局域热平衡辐射传输模式模拟了 SABER 传感器观测的 CO<sub>2</sub> 15 μm、4.3 μm 宽带通道临边辐亮度, 并与相应的 SABER 实测数据进行了对比分析。讨论了 CO<sub>2</sub> non-LTE 辐射传输的一般特性; 验证了 SHARC 的可靠性, 确定了其适用范围。在一定的精度要求下, 利用 SHARC 模式可以较准确地模拟所有中纬度大气条件的 CO<sub>2</sub> 15 μm、4.3 μm 带临边辐射特性。而若要更精确地模拟中高层大气 CO<sub>2</sub> non-LTE 辐射特性并应用到极地夏季等极端大气条件下, 在提高该高度大气参数精度的同时, 改进模式的算法也是必要的。

**关键词:** 大气光学; 临边辐射; CO<sub>2</sub>; non-LTE 模式; SABER

**中图分类号:** O432.1; P351.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0211001

## CO<sub>2</sub> limb radiation in the middle and upper atmosphere: comparison analysis of simulation and measurement

Liu Dong<sup>1,2</sup>, Dai Congming<sup>1</sup>, Wei Heli<sup>1,2,3</sup>

- (1. Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;  
3. School of Environmental Sciences and Optoelectronic Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract:** The profiles of spectral pass bands' limb radiance by SABER (Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry) were simulated in the bands of 15 μm and 4.3 μm emission for CO<sub>2</sub> by using the updated software of SHARC, and the simulated results were compared with corresponding SABER measurements to analyze the CO<sub>2</sub> non-LTE radiative transfer properties and to validate the model. The comparisons show that SHARC can simulate the middle latitude atmosphere condition's CO<sub>2</sub> limb radiation with a reasonable accuracy for applications. However, for some special atmosphere conditions, such as Arctic summer's atmosphere, the model has some deviations because of its algorithm's shortcoming. It is expected to improve the algorithm to contain more sophisticated chemical-kinetic processes and achieve better middle and upper atmospheric parameters, which make more accurate simulation of non-LTE radiative transfer properties.

**Key words:** atmospheric optics; limb radiation; CO<sub>2</sub>; non-LTE model; SABER

收稿日期: 2015-06-25; 修订日期: 2015-07-19

基金项目: 国家自然科学基金(61077081); 国家高技术研究发展计划

作者简介: 刘栋(1991-), 男, 硕士生, 主要从事大气辐射传输方面的研究。Email: ldwl2012@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 魏合理(1965-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事大气红外辐射传输、卷云红外辐射特性方面的研究。Email: hlwei@aiofm.ac.cn

## 0 引言

中高层大气通常指 30~120 km 的平流层上部、中间层和低热层,针对研究对象的不同也会扩展到 300 km 的大气层结;只占地球大气总质量不到百分之十<sup>[1]</sup>。随着探测技术的发展和人类空间活动的扩展,人们逐渐认识到对这一层结大气的辐射传输特性进行专门研究是十分必要且有重要意义的。它不仅具有显著的气候效应,而且稀薄的大气环境也使其成为天然的实验室,通过对其辐射特性的解译可以研究复杂的辐射-物质相互作用机制和大气物理化学过程。在工程应用方面,临近空间目标探测、红外工程设计等也都需要考虑中高层大气辐射传输特性。

然而,由于大气密度随高度增加迅速减小,相比于低层稠密大气的辐射效应,其总的辐射量相当小。因此大多数情况下中高层大气的辐射信号都会淹没于低层辐射信号中难以识别,只有利用专门探测中高层大气辐射的技术,如临边测量,才能全面有效地研究这一层结。早在 20 世纪 40 年代,研究者就指出在大气十分稀薄的条件下,分子的热碰撞作用显著减弱,使得很多辐射分子的能级分布不再满足局域热力学平衡(Local Thermodynamics Equilibrium, LTE)假设<sup>[2]</sup>。这体现在辐射分子在其各能级上的分布偏离局域动力学温度表征的波耳兹曼分布,这时称大气处于非局域热力学平衡(non-Local Thermodynamics Equilibrium, non-LTE)状态。此时对中高层大气辐射传输的精确计算就不能再利用 LTE 假设下的辐射传输模式,而需要建立结合实际大气条件和分子能级跃迁机制详细计算分子能级布居数的 non-LTE 辐射传输模式。

另一方面,对于中高层大气而言,CO<sub>2</sub> 的辐射特性是研究的重点。首先,CO<sub>2</sub> 15 μm 振转带发射辐射是中间层上部和低热层区域最重要的冷却源<sup>[3]</sup>,而其 4.3 μm 带、2.7 μm 带对太阳辐射的吸收则是中间层上部的主要加热源<sup>[4]</sup>,这些辐射的吸收和发射导致的大气加热冷却显著地影响着其能量收支、温度结构,对全球气候的模拟和预测有着重要意义。其次,CO<sub>2</sub> 的振转能级除与辐射相互作用,还通过碰撞过程与其他重要成分相互传递能量,使得各种辐射分子的能级相互耦合,这决定了 CO<sub>2</sub> 成为 non-LTE 辐

射传输模式建立的起点。

文中将利用高层大气辐射传输软件 SHARC (Strategic High-Altitude Radiance Code)<sup>[5]</sup>的 non-LTE 辐射传输模式模拟 SABER(Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry)传感器<sup>[6]</sup>测量的 CO<sub>2</sub> 15 μm 及 4.3 μm 带通道辐亮度并与实测值对比;讨论 CO<sub>2</sub> 的 non-LTE 辐射传输特性,验证模式的可靠性,确定其适用范围。

## 1 CO<sub>2</sub> 的 non-LTE 辐射传输模式

由于中高层大气气溶胶很少,相比于大气分子的辐射作用可以忽略;在影响分子振转能级的中长波红外波段,分子散射也可以忽略;所以中高层大气的 non-LTE 辐射传输模式仅考虑分子吸收和发射辐射。

对于 non-LTE 条件而言,计算分子的能级布居数需要考虑影响分子能级的所有辐射跃迁过程和碰撞弛豫或光化学反应过程。这样建立各能级的统计平衡方程,在获得所有过程的速率系数的前提下,就可以解出能级布居数。而影响能级跃迁的辐射主要来自于其他各层大气发射的辐射或太阳辐射,就需要建立相应的辐射传输方程联立求解。同时,由于分子能级间相互跃迁将其所有能级直接或间接地联系起来,对于 CO<sub>2</sub> 还与其它分子的能级联系起来。这样就形成了包含所有相关能级的庞大的统计平衡和辐射传输联立方程组,对其同时求解可以获得这些能级在各高度层的布居数分布。一般而言这样的计算都是十分复杂的,SHARC 的通用算法可参见参考文献[5]。

另一方面,CO<sub>2</sub> 的主要能级由其三种振动模式形成:对称拉伸、挠曲运动、不对称拉伸;通常使用三个量子数表示它们引起的振动能级,即 CO<sub>2</sub>( $\nu_1, \nu_2, \nu_3$ )。每个振动能级上叠加能量间隔更密的转动能级,因此在各能级间的振转跃迁就形成了 CO<sub>2</sub> 在红外波段丰富的振转带及纯转动带。主要振动能级及重要辐射跃迁在图 1 中详细给出<sup>[7]</sup>。

其中  $\nu_2$  振动模的第一激发态 010 或 01101 (HITRAN 标记法<sup>[8]</sup>)与基态间的辐射跃迁形成了 CO<sub>2</sub> 最重要的 15 μm 谱带的基带,更高激发态间的跃迁形成相对较弱的热谱带; $\nu_3$  振动模的第一激发态 001 或 00011 与基态间的跃迁形成 4.3 μm 带的基带。其他一些高能级的跃迁和组合跃迁也引起较弱的

4.3 μm 热谱带、2.7 μm、2.0 μm、1.6 μm 带,以及通常称为激光谱带的 10 μm 带。

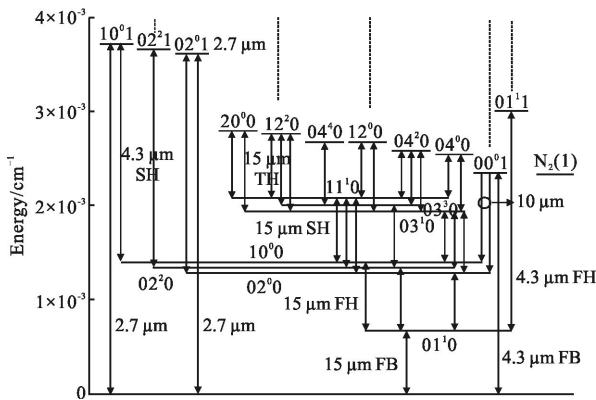


图 1 CO<sub>2</sub> 振动能级及能级跃迁图

Fig.1 Diagram of CO<sub>2</sub> vibrational levels and its transitions

SHACR 选择了三种 CO<sub>2</sub> 同位素: 主同位素 626 和次要同位素 636、628,对每种同位素都计算主要的 28 个振动能级的能级布居数,而认为振动能级上叠加的转动能级都处于 LTE 状态。对于辐射跃迁,考虑了这 28 个能级间的 39 种重要相互跃迁;所选取的能级、能级间辐射跃迁及其光子能量和自发辐射系数的描述详见参考文献[9]。

除了辐射作用影响 CO<sub>2</sub> 的能级布居数外,分子间的碰撞作用也是导致能级弛豫的主要过程。表 1 总结了 SHARC 中采用的影响 CO<sub>2</sub> 振动能级的碰撞过程及其关联过程,各过程的速率系数同样由参考文献[9]给出。这其中过程 1、3、6 在大气低层引起频繁的热碰撞作用主导了 CO<sub>2</sub> 能级分布,保证在大气低层各能级满足 LTE 假设;过程 2、4 则在中间层上部和低热层区域起主要作用,过程 2 正是引起中间层顶 CO<sub>2</sub> 15 μm 带极高的冷却率的原因。过程 5 是影响 CO<sub>2</sub>(v<sub>3</sub>)能级最重要的碰撞机制;通过与 N<sub>2</sub> 的第一振动激发态交换能量,在白天将吸收的太阳辐射能传递出去,在夜晚以 N<sub>2</sub> 为中间桥梁获得来自其他分子的能量。表 1 中过程 7~9 列出影响 N<sub>2</sub>(1)的其他过程,显然求解 N<sub>2</sub>(1)布居数时要同时考虑其他辐射分子的能级分布。由于不同分子的能级相互耦合会极大地增加计算复杂度,因此当前的模式采用 Kumer 和 James 的建模方式<sup>[10-11]</sup>,将 N<sub>2</sub>(1)布居数单独求解,再作为已知量带入 CO<sub>2</sub> 能级的方程中。

文中在实施模拟前,根据最新的实验结果,对

SHARC 中 CO<sub>2</sub> 相关碰撞过程的速率系数进行了更新,以使分析结果更能反映模式本身的问题。其中过程 2 使用 SPIRE 数据的分析结果进行提升<sup>[12]</sup>;过程 5 采用了 MIPAS 数据分析的结果<sup>[13]</sup>;过程 7 则采用了 SABER 数据分析结果<sup>[14]</sup>。

表 1 影响 CO<sub>2</sub> 振动能级的碰撞过程

Tab.1 Collision processes which affect CO<sub>2</sub> vibrational levels

No.	Process	Type
1	CO <sub>2</sub> (v <sub>2</sub> )+M→CO <sub>2</sub> (v <sub>2</sub> -1)+M	V-T
2	CO <sub>2</sub> (v <sub>2</sub> )+O→CO <sub>2</sub> (v <sub>2</sub> -1)+O	V-T
3	CO <sub>2</sub> (v <sub>2</sub> ,v <sub>3</sub> )+M→CO <sub>2</sub> (v <sub>2</sub> +2,3 or 4,v <sub>3</sub> -1)+M	V-T
4	CO <sub>2</sub> (v <sub>2</sub> ,v <sub>3</sub> )+O→CO <sub>2</sub> (v <sub>2</sub> +2,3 or 4,v <sub>3</sub> -1)+O	V-T
5	CO <sub>2</sub> (v <sub>1</sub> ,v <sub>2</sub> ,v <sub>3</sub> )+N <sub>2</sub> →CO <sub>2</sub> (v <sub>1</sub> ,v <sub>2</sub> ,v <sub>3</sub> -1)+N <sub>2</sub> (1)	V-V
6	CO <sub>2</sub> (v <sub>1</sub> ,v <sub>2</sub> ,v <sub>3</sub> )+M→CO <sub>2</sub> (v <sub>1</sub> ,v <sub>2</sub> ,v <sub>3</sub> )+M	V-T
7	N <sub>2</sub> +OH <sup>+</sup> (v≤9)→N <sub>2</sub> (1)+OH <sup>+</sup> (v-1)	V-V
8	N <sub>2</sub> (1)+O→N <sub>2</sub> +O	V-T
9	N <sub>2</sub> (1)+O <sub>2</sub> →N <sub>2</sub> +O <sub>2</sub> (1)	V-V

注:M 表示分子 N<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>

## 2 模拟与实测的对比分析

该节利用更新后的 CO<sub>2</sub> non-LTE 模式,根据 SABER 反演的大气参数模拟了其观测的 CO<sub>2</sub> 15 μm 和 4.3 μm 通道临边大气背景辐亮度并与实测数据进行对比。

### 2.1 SABER

SABER 是搭载在 TIMED (Thermosphere-Ionosphere-Mesosphere Energetics and Dynamics)卫星平台上,专门用于观测中间层、低热层区域大气分子临边发射辐射以研究这一层结化学、动力、输运等过程的 10 通道宽带辐射计<sup>[6]</sup>;其中通道 1~3、7 是用于观测 CO<sub>2</sub> 15 μm 和 4.3 μm 带辐射的。通道 1 的带宽为 649~698 cm<sup>-1</sup>,称为 15 μm 窄带通道;通道 2、3 带宽范围都在 580~763 cm<sup>-1</sup>,称为 15 μm 宽带通道;通道 7 带宽为 2 320~2 400 cm<sup>-1</sup>,是 4.3 μm 带通道。由于 15 μm 宽带包含了更完整的 CO<sub>2</sub>(v<sub>2</sub>)热谱线,因此在下面的通道模拟中,选择通道 3 和通道 7 分别模拟 15 μm 和 4.3 μm 带临边辐亮度廓线。而考虑到

SABER 在这些通道上的观测信噪比,为了获得真实可靠的结果,将对分析临边切点高度范围统一限定在 40~120 km 之间。

### 2.2 模式输入

在模拟 SABER 观测辐亮度时,除与所选择观测事件的几何路径相匹配外,最重要的是使用接近观测时实际大气的廓线参数。SABER 利用自有的管理模式(SABER operational model)<sup>[15]</sup>近实时地反演了部分大气参数,文中就选用了反演的温度廓线、臭氧浓度廓线、氧原子浓度廓线;其他参数,如 CO<sub>2</sub> 浓度、氢原子浓度及 N<sub>2</sub>、O<sub>2</sub> 等主要成分的浓度则基于 NRLMSISE-00 大气经验模式<sup>[16]</sup>结合观测事件的经纬度、日期和太阳通量等信息产生;通过这样的方法尽可能真实地模拟观测事件对应的大气条件。

对于模式中计算分子吸收和发射所涉及到的光谱数据,文中采用较新的 HITRAN2008 数据库提供的数据库<sup>[17]</sup>。

### 2.3 15 μm 带的模拟与对比分析

文中首先模拟了中纬度夏季白天和夜晚情景下的 15 μm 通道临边辐亮度随切点高度的变化,如图 2 所示。图 2(a)为白天情景,选择 SABER Orbit: 62772 Event: 34 观测事件进行模拟;图 2(b)为夜晚情景,选择 SABER Orbit: 62663 Event: 8 观测事件进行模拟;SABER 实测辐亮度值均采用 2.0 版 Level1B 数据。在两种大气条件下,模拟廓线的变化趋势与实测的辐亮度廓线符合得都比较好。由于高度的增加,CO<sub>2</sub> 数密度随总密度迅速降低,也使得 CO<sub>2</sub> 临边辐射随高度减小。实际上在 90 km 以下由于垂直输运作用,CO<sub>2</sub> 体积混合比基本保持不变;在这一高度以上扩散作用开始占主导地位,作为较重的分子,CO<sub>2</sub> 向下沉淀,体积混合比开始随高度减小,这意味着其分子数密度减小的更快。然而可以看到,在 90 km 以上 CO<sub>2</sub> 的临边发射辐射反而趋于稳定,在 90~110 km 范围内变化较小。这是由于在这一高度,一方面 O 原子的数密度迅速增加,另一方面温度的增加也使得 CO<sub>2</sub>(v<sub>2</sub>)与 O 原子热碰撞交换能量速率更快,这一过程主导了此层节的 CO<sub>2</sub>(v<sub>2</sub>)能级布居,使得尽管其总数密度随高度增加降低,但 15 μm 带的体发射率却趋于稳定。Wintersteiner 和 Sharma 正是根据这一重要的 non-LTE 特征,结合 SPIRE 数据的分析给出 CO<sub>2</sub>(v<sub>2</sub>)-O V-T 过程的速率系数<sup>[12]</sup>。文中使用这一

系数,很好地模拟了此变化趋势。

另一方面,在各切点高度上模拟值与实测值间的相对偏差在 10%~35% 范围内。在 90 km 以上相对偏差有正有负,主要来自这一高度上使用的大气参数有较大的不确定性。90 km 以下则对于不同模式情景,模拟值都整体较观测值偏大,出现这一现象的原因来自两个方面:首先,模拟使用的大气参数如温度值,来源于 SABER 管理模式的反演结果;在反演温度时模式使用的其他参数如 CO<sub>2</sub> 浓度,与当前模拟采用的 NRLMSISE-00 经验参数可能存在系统性偏差。其次,SHARC 模式计算辐亮度的模块为加快运算速度,使用等价线宽的方法代替严格的逐线方法处理谱线积分。参考文献[5]表明这种方法对于计算 15 μm 带谱线叠加较强的情形,临边辐亮度会过高估计 10%~20%;随高度的增加,谱线展宽变窄,这种过高估计会减小。

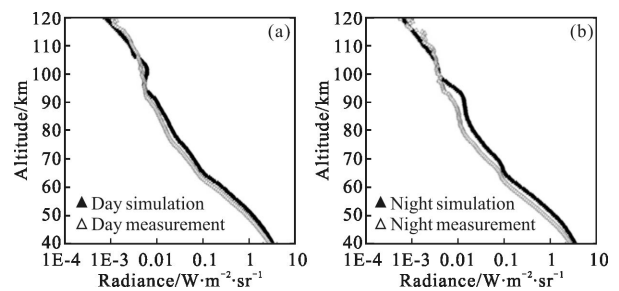
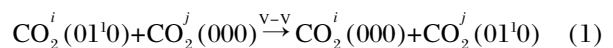


图 2 中纬度夏季的模拟值与实测值对比

Fig.2 Comparison between middle latitude summer's simulation and measurement

从图中可以看出,在 70~90 km 之间模拟值与测量值的相对偏差反而总是比更低层大一些。根据 Wintersteiner 等指出<sup>[12]</sup>,这一层节,CO<sub>2</sub> 次要同位素对 15 μm 带临边发射辐射的贡献可比拟主同位素;主要是因为次要同位素 v<sub>2</sub> 能级在 70~90 km 之间有比主同位素更高的能级布居数;且更容易将发射辐射传递出去。若模式中包括不同同位素间 V-V 交换的碰撞过程,如公式(1)所示:



式中: i, j 标志不同的同位素;则通过这一过程,次要同位素的 v<sub>2</sub> 能级布居数将降低,能量流向主同位素。反之,由于处理统计平衡方程的一般算法不能解这种未知能级的非线性耦合,当前的 SHARC 未包括此类机制;则相比于真实情形,次要同位素的 v<sub>2</sub> 能级布

居数被普遍地过高估计,导致临边辐亮度的过高估计。

但 Kutepuv 等也指出<sup>[18]</sup>,这种过高估计的效应在中纬度等一般大气模式中是很小的,并不影响模式的准确性;只有在一种特殊的大气情景即夏季极区,由于更冷的中间层顶和很大的温度梯度,模拟中间层上部的临边辐射时,这一过程才需要考虑。文中利用当前模式进一步模拟中纬度夏季和极地夏季情形并与实测对比,结果证实了以上分析,如图 3 所示。图 3(a)为中纬度夏季白天情景,选择 SABER Orbit: 62772 Event: 34 观测事件进行模拟;图 3(b)为极地夏季极昼情景,选择 SABER Orbit: 62703 Event: 24 观测事件进行模拟。图中结果也表明若要将模式准确地应用到这种极端大气情景中,就需要提升模式的一般算法以包含类似的更精细的能量交换过程。

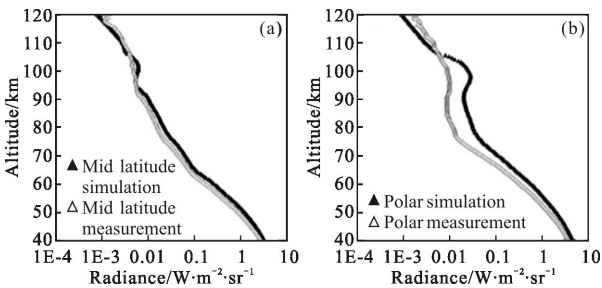


图 3 模拟值与实测值对比

Fig.3 Comparison between simulation and measurement

文中也对中纬度其他季节和日变化的模式情景进行了模拟,如图 4 所示。模拟值与实测值的对比结果与夏季情景保持得相当一致,这验证了之前分析的结果。

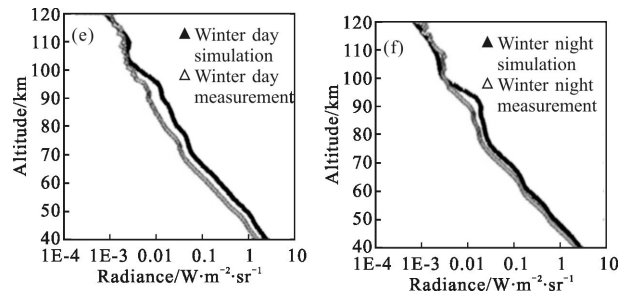
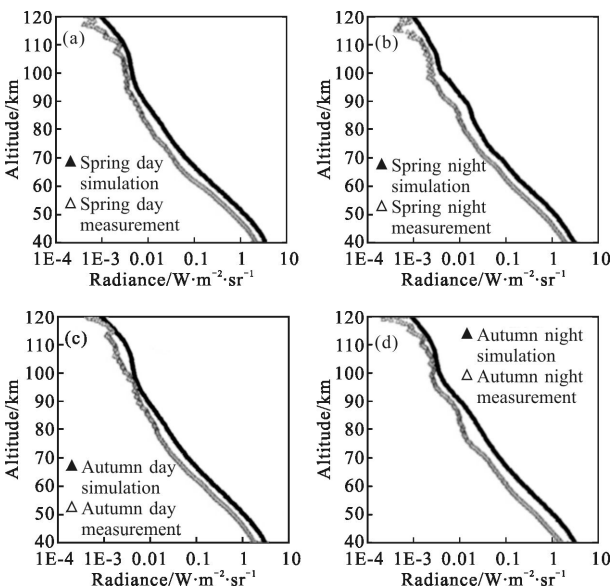


图 4 中纬度其他模式的模拟值与实测值对比;(a)、(b)分别为春季白天和夜晚情形;(c)、(d)分别为秋季白天和夜晚情形;(e)、(f)分别为冬季白天和夜晚情形

Fig.4 Comparison between the other middle latitude conditions' simulations and their measurements; (a), (b) spring day and night; (c), (d) autumn day and night; (e), (f) winter day and night

### 2.4 4.3 μm 带的模拟与对比分析

类似地,模拟了中纬度夏季白天和夜晚的 4.3μm 通道临边辐亮度随切点高度的变化,如图 5 所示。模

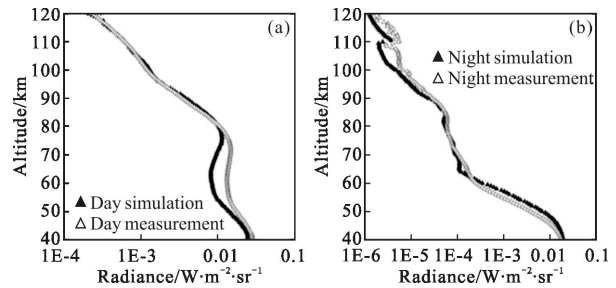


图 5 中纬度夏季的模拟值与实测值对比;(a) 为白天情景;(b) 为夜晚情景;4.3 μm 带各模式情景均选择与 15 μm 带相同的观测事件

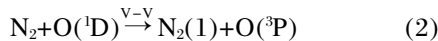
Fig.5 Comparison between middle latitude summer's simulation and measurement; (a) day condition; (b) night condition; all

4.3 μm band measurement events are same as 15 μm band's

拟的辐亮度廓线与实测廓线整体上也符合得比较好。Lopez-Puertas 等指出<sup>[4]</sup>,在白天,太阳中红外波段 2.7 μm、4.3 μm 带辐射对 CO<sub>2</sub>(v<sub>1</sub>, v<sub>2</sub>, 1)能级组的泵浦在 50 km 以上都占据着主导地位,这显著地提高了这些能级的布居数;在大气密度仍较大的中间层可以保持 4.3 μm 带体发射率的稳定,甚至逆增长;模式很好地模拟了这一点。相比较而言,在夜晚,泵浦源来自于低层大气较弱的上行辐射,使得它们的布居数远小于白天情形,4.3 μm 辐射的强度也就远低于白天。

另一方面,两种大气条件下,除个别切点及接近 120 km 高度 SABER 4.3 μm 通道在夜间信噪比变

差, 绝大多数切点高度上模拟值与实测值相对偏差都在 10% 以内。这些相对偏差主要来自于模拟采用的大气参数的不确定性。只是在白天 50~75 km 这一平流层上部及低中间层区域, 出现了 30% 左右的低估。Lopez-Puertas 等指出<sup>[8]</sup>,  $\text{CO}_2(v_1, v_2, 0)$  除直接吸收光子跃迁到高能级外, 也通过  $\text{CO}_2(v_1, v_2, 1)$  与  $\text{N}_2(1)$  V-V 量子交换间接传递进  $\text{CO}_2$  分子, 这一过程主要在大气密度仍较大的中间层起作用。太阳辐射诱导光化学作用产生的激发态氧原子  $\text{O}({}^1\text{D})$  与  $\text{N}_2$  的能量交换就是这一机制在白天的主要过程:



式中:  $\text{O}({}^1\text{D})$  为激发态氧原子;  $\text{O}({}^3\text{P})$  为基态氧原子。早在 1974 年 Kumer 和 James 对这一机制的研究就表明<sup>[10]</sup>, 这一过程对  $\text{CO}_2(v_1, v_2, 1)$  布居数有一个小的增加作用, 最大值在 55~65 km 之间。但由于  $\text{O}({}^1\text{D})$  浓度具有很大的不确定性, 过程(2)的严格激发机制和激发效率至今仍没有很好的了解, 当前的模式直接没有包含这一机制。这使得  $\text{CO}_2(v_1, v_2, 1)$  能级布居数在这一层被低估, 进而也导致白天的 4.3  $\mu\text{m}$  带临边辐射模拟值小于实测值。

文中也对中纬度其他模式情景进行模拟, 如图 6 所示, 模拟值与实测值的对比同样与夏季模式保持得很一致, 验证了前面的分析结果。这也表明在一定的精度要求下, 当前的模式可以很好的模拟中纬度一般模式情景下  $\text{CO}_2$  4.3  $\mu\text{m}$  带的辐射。若要求更高的精度, 则需要更精细地研究  $\text{O}({}^1\text{D})$  的空间分布特征和过程(2)的作用机制, 并添加到模式的动力学机制中。

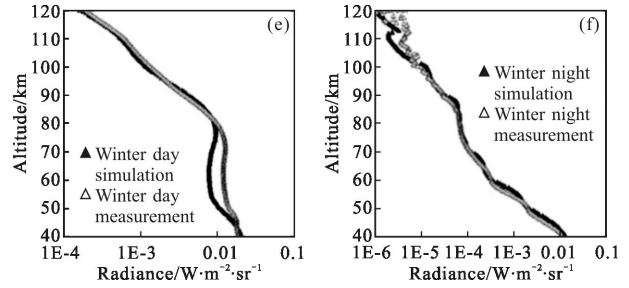
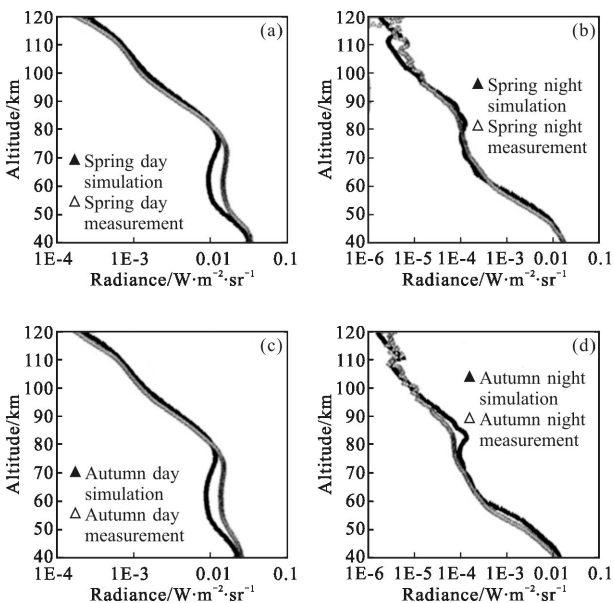


图 6 中纬度其他模式的模拟值与实测值对比; (a)、(b) 分别为春季白天和夜晚情形; (c)、(d) 分别为秋季白天和夜晚情形; (e)、(f) 分别为冬季白天和夜晚情形

Fig.6 Comparison between the other middle latitude conditions' simulations and their measurements; (a), (b) spring day and night; (c), (d) autumn day and night; (e), (f) winter day and night

### 3 结论

文中通过模拟 SABER 传感器观测的  $\text{CO}_2$  15  $\mu\text{m}$ 、4.3  $\mu\text{m}$  通道临边辐亮度廓线并与实测值对比分析, 表明了当前 SHARC 的  $\text{CO}_2$  non-LTE 辐射传输模式在一般的精度要求下, 模拟其中高层大气辐射传输特性是比较好的; 且适用于中纬度的所有大气条件。若要进一步提高计算精度, 或扩展到极地夏季等特殊大气条件的应用, 则一方面需要提高大气参数的精度; 另一方面, 需要对模式的一般算法和相关碰撞机制进行提升。

### 参考文献:

- [1] Chen Hongbin. An overview of the space-based observations for upper atmospheric research [J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(3): 229-241. (in Chinese)  
陈洪滨. 中高层大气研究的空天探测 [J]. *地球科学进展*, 2009, 24(3): 229-241.
- [2] Spitzer Jr L. The terrestrial atmosphere above 300 km[C]//The Atmospheres of the Earth and Planets, 1949, 1: 211.
- [3] Lopez-Puertas M, Rodrigo R, Molina A, et al. A non-LTE radiative transfer model for infrared bands in the middle atmosphere. I. Theoretical basis and application to  $\text{CO}_2$  15  $\mu\text{m}$  bands [J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1986, 48(8): 729-748.
- [4] López-Puertas M, Rodrigo R, López-Moreno J J, et al. A non-LTE radiative transfer model for infrared bands in the middle atmosphere. II.  $\text{CO}_2$  (2.7 and 4.3  $\mu\text{m}$ ) and water

- vapour(6.3  $\mu\text{m}$ ) bands and  $\text{N}_2(1)$  and  $\text{O}_2(1)$  vibrational levels [J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1986, 48(8): 749–764.
- [5] Sundberg R L, Duff J W, Gruninger J H, et al. SHARC, a Model for Calculating Atmospheric Infrared Radiation Under Non-Equilibrium Conditions [M]. New York: American Geophysical Union, 1994.
- [6] Remsberg E E, Marshall B T, Garcia-Comas M, et al. Assessment of the quality of the Version 1.07 temperature versus pressure profiles of the middle atmosphere from TIMED/SABER [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, 113: D17101.
- [7] Funke B, López-Puertas M, García-Comas M, et al. GRANADA: A generic radiative transfer and non-LTE population algorithm[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2012, 113(14): 1771–1817.
- [8] López-Puertas M, Taylor F W. Non-LTE Radiative Transfer in the Atmosphere [M]. London: World Scientific, 2001.
- [9] Robertson D C, Acharya P K, Adler-Golden S M, et al. Investigations into atmospheric radiative processes in the 50–300 km regime [R]. Burlington MA: Spectral Sciences INC, 1991.
- [10] Kumer J B, James T C.  $\text{CO}_2$  (001) and  $\text{N}_2$  vibrational temperatures in the  $50 \leq z \leq 130$  km altitude range [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1974, 79(4): 638–648.
- [11] Kumer J B. Atmospheric  $\text{CO}_2$  and  $\text{N}_2$  vibrational temperatures at 40 to 140 km altitude [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1977, 82(16): 2195–2202.
- [12] Wintersteiner P P, Picard R H, Sharma R D, et al. Line-by-line radiative excitation model for the non-equilibrium atmosphere: Application to  $\text{CO}_2$  15  $\mu\text{m}$  emission [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1992, 97 (D16): 18083–18117.
- [13] López-Puertas M, Funke B, Gil-López S, et al. Atmospheric non-local thermodynamic equilibrium emissions as observed by the Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding (MIPAS)[J]. *Comptes Rendus Physique*, 2005, 6(8): 848–863.
- [14] López-Puertas M, García-Comas M, Funke B, et al. Evidence for an OH ( $\nu$ ) excitation mechanism of  $\text{CO}_2$  4.3  $\mu\text{m}$  nighttime emission from SABER/TIMED measurements [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, 109: 10.1029/2003JD004383.
- [15] Mertens C J, Mlynczak M G, López-Puertas M, et al. Retrieval of mesospheric and lower thermospheric kinetic temperature from measurements of  $\text{CO}_2$  15  $\mu\text{m}$  Earth Limb Emission under non-LTE conditions [J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(7): 1391–1394.
- [16] Picone J M, Hedin A E, Drob D P, et al. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues [J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2002, 107(A12): SIA 15–1–SIA 15–16.
- [17] Rothman L S, Gordon I E, Barbe A, et al. The HITRAN2008 molecular spectroscopic database [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2009, 110(9): 533–572.
- [18] Kutepov A A, Feofilov A G, Marshall B T, et al. SABER temperature observations in the summer polar mesosphere and lower thermosphere: Importance of accounting for the  $\text{CO}_2$   $\nu_2$  quanta V–V exchange [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(21): 10.1029/2006GL026591.