

高层非局地热力平衡大气对红外临边辐射的影响分析

谭鹏飞 韩玉阁 宣益民

(南京理工大学能源与动力工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要 采用大气逐线辐射传递计算模型——前向参考辐射模型(RFM), 计算了高层大气在局地热力平衡状态(LTE)与非局地热力平衡状态(non-LTE)条件下主要大气分子红外光谱带的临边辐射。以定义的相对偏差为指标, 分析了白天与夜间情况下 non-LTE 大气对红外临边辐射的影响, 确定了 LTE 条件的大气高度适用范围, 并对白天与夜间的临边辐射进行比较。分析结果表明, 高层大气在 non-LTE 与 LTE 条件下的红外临边辐射有显著偏差, 白天太阳抽运作用会增加这两种条件下的偏差。在白天与夜间环境下, 部分光谱带的辐射会有明显差异。除白天 CO_2 $4.3 \mu\text{m}$ 光谱带外, 其他光谱带在 60 km 以下 non-LTE 与 LTE 不会有较明显偏离, 其中 CO_2 $15 \mu\text{m}$ 光谱带能达到 80 km 左右。分析结果可为高层大气辐射计算模型提供理论基础。

关键词 大气光学; 非局地热力平衡状态; 前向参考辐射模型; 高层大气; 红外临边辐射

中图分类号 P407.6 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.1001001

Analysis of the Non-Local Thermodynamic Equilibrium Effect on Infrared Limb Radiances in the Upper Atmosphere

Tan Pengfei Han Yuge Xuan Yimin

(School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract The local thermodynamic equilibrium (LTE) and non-LTE limb radiances in the upper atmosphere are calculated for the main infrared (IR) spectral regions by line-by-line radiative transfer model, which is reference forward model (RFM). According to the relative deviation, the non-LTE effect on IR limb radiance is analyzed under day and night conditions and the altitude range of application of the LTE is identified. The comparison of the limb radiance between day and night is presented. The analysis results show that the non-LTE and LTE IR limb radiances in the upper atmosphere have a significant deviation and solar pumping in the day can increase the deviation. There are significant differences in the limb radiances for some spectral bands between day and night. In addition to the CO_2 $4.3 \mu\text{m}$ spectral band in the day, there isn't significant deviation between the non-LTE and LTE below 60 km for other spectral bands and it can reach about 80 km for CO_2 $15 \mu\text{m}$ spectral band. The results lay the foundation for further study of non-LTE model in the upper atmosphere.

Key words atmospheric optics; non-local thermodynamic equilibrium; reference forward model; upper atmosphere; infrared limb radiance

OCIS codes 010.0280; 010.1030; 010.1290; 010.5620

1 引言

高层大气红外辐射模拟在很多学科都有重要的作用, 如用于气候变化预测的大气热平衡计算、大气

遥感模拟、空间目标红外探测及大气状态参数反演^[1]等。近年来临近空间(20~100 km)的开发逐渐成为关注的热点, 对高层大气辐射的研究也将变

收稿日期: 2014-04-30; 收到修改稿日期: 2014-05-30

作者简介: 谭鹏飞(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事高层大气红外背景辐射方面的研究。

E-mail: pengfeitan5@gmail.com

导师简介: 韩玉阁(1967—), 男, 博士, 教授, 主要从事目标红外辐射特性的模拟与仿真方面的研究。

E-mail: yugehan1111@sina.com(通信联系人)

得更加重要。但由于高层稀薄大气通常处于非局地热力平衡状态(non-LTE),因而适用于局地热力平衡状态(LTE)的低层大气辐射计算模型不再成立,需要考虑稀薄大气特性建立高层大气辐射计算模型。

国外的研究者已经建立了比较成熟的 non-LTE 辐射计算模型,比如 López-Puertas 等^[2]的改良的 Curtis 矩阵方法(MCM)模型, Wintersteiner 等^[3]的大气辐射代码(ARC)模型,以及 Kutepov 等^[4]从天体物理学中引进的加速 Lambda 迭代(ALD)算法。由美国空军物理地球实验室开发的高层大气辐射计算软件(SHARC)^[5],以及适用于高低层大气的 SAMM^[6]软件都能够用于高层大气的辐射计算。另外,一些大气辐射计算模型在已知大气分子能级分布的情况下,也能处理 non-LTE 辐射计算,例如 FASCODE^[7], GENLN2^[8], 前向参考辐射模型(RFM)^[9]等。而目前国内对于高层大气的辐射计算模型研究较少,广泛使用的大气辐射计算软件 LOWTRAN 和 MODTRAN 都不支持高层大气的辐射计算。近年来戴聪明等^[10]采用 SHARC 软件分析了不同版本高分辨率光谱谱线(HITRAN)数据库对高层大气 non-LTE 辐射传递的影响。

大气在红外波段的辐射主要由大气分子的振转光谱带组成,non-LTE 辐射计算模型必须考虑大气的分子辐射、碰撞、化学反应等过程,计算出大气分子的能级分布,这个过程复杂且耗时。LTE 条件下分子的能级分布服从玻尔兹曼定律,不需要求解其能级分布,但 LTE 条件到一定大气高度后不再适用。因此,可以计算出 non-LTE 状态对高层大气辐射的影响大小,以便在误差允许时采用 LTE 条件进行计算。在多种大气探测模式中,高层 non-LTE 大

气对临边模式的影响最为显著。本文将利用 RFM 模型分别对高层大气的重要红外光谱带在 LTE 及 non-LTE 条件下的临边辐射进行模拟,计算两种条件下在不同切线高度的偏差大小,从而确定 LTE 条件的适用高度范围。

2 RFM 辐射计算模型

RFM 是在 GENLN2 基础上发展起来的逐线辐射传递模型,最初用于 ENVISAT 卫星上迈克耳孙干涉式大气垂直探测仪(MIPAS)的辐射模拟计算,后来发展成为一个通用的辐射计算程序。RFM 模型与其他 non-LTE 辐射计算模型比较^[11-12],其可靠性较高,因而应用于 MIPAS 的遥感探测过程中^[13]。RFM 模型处理高层大气 non-LTE 辐射计算时,需要知道大气分子振动能级分布,此能级分布分别由振动温度 T_v 决定,其可表示为

$$T_v = \frac{E_\nu}{k \ln\left(\frac{n_0 g_\nu}{n_\nu g_0}\right)}, \quad (1)$$

式中 n_0 为振动基态的分子数, n_ν 为振动能级 ν 的分子数, g_0 和 g_ν 分别为基态和振动能级 ν 的统计权重, E_ν 为振动能级 ν 处的能量, k 为玻尔兹曼常数。RFM 的 non-LTE 辐射计算模型详见文献^[14],下面对其简单介绍。

根据辐射在大气传播过程中与气体分子的相互作用建立辐射传递方程

$$\frac{dI(\nu, z', z)}{d\tau(\nu, z', z)} = I(\nu, z', z) - J(\nu, z', z), \quad (2)$$

$$\tau(\nu, z', z) = \int_{z'}^z \kappa(\nu, z'') n_a(z'') dz'', \quad (3)$$

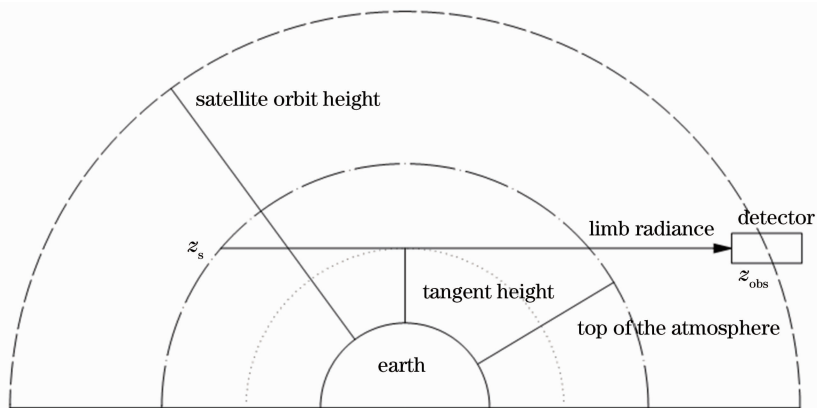


图1 临边辐射几何关系(非实际比例)

Fig.1 Geometry graph of limb radiance (not the actual proportion)

式中 $\tau(\nu, z', z)$ 为光学厚度, $I(\nu, z', z)$ 表示从 z' 点发出的辐射到 z 点方向在波数 ν 的光谱辐射强度, $\kappa(\nu, z)$ 为吸收系数, $n_a(z)$ 为吸收分子数, $J(\nu, z', z)$ 为辐射传递方程源项。

对辐射传递方程积分, 临边辐射的光谱辐射强度:

$$I(\nu, z_s, z_{\text{obs}}) = \int_{z_s}^{z_{\text{obs}}} [J(\nu, z)\kappa(\nu, z)n_a(z)] \times \exp[-\tau(\nu, z, z_{\text{obs}})] dz, \quad (4)$$

式中 z_{obs} 为观测者所在点, z_s 为切点前方视线与大气层顶交点, 临边辐射视线位置的几何关系如图 1 所示。低层大气在 LTE 条件下, 辐射传递方程中的源项可以直接用普朗克方程表示, 即

$$J(\nu, T) = B(\nu, T) = 2hc^2\nu^3 \frac{1}{[\exp(hc\nu/kT) - 1]}, \quad (5)$$

式中 h 为普朗克常数, c 为光速。

需求指出的是 non-LTE 条件下黑体辐射的普朗克定律与基尔霍夫定律不再适用, 必须表示出更通用的吸收系数 $\kappa(\nu)$ 和源项 $J(\nu)$ 表达式, 它们与分子或原子处于的激发态能级分布有关。non-LTE 条件下吸收系数与源项的表达式是在 LTE 基础上来表示的, 所以能够同时用于 LTE 和 non-LTE 条件。对于两个振动能级之间的辐射跃迁, non-LTE 条件下的吸收系数与源项可表示为

$$\kappa(\nu) = f_q \bar{\kappa}(\nu) \frac{n_1}{\bar{n}_1} \frac{\left(1 - \frac{n_2 g_1}{n_1 g_2}\right)}{\left[1 - \exp\left(\frac{-hc\nu}{kT}\right)\right]}, \quad (6)$$

$$J(\nu) = 2hc^2\nu^3 \left[\left(\frac{n_1 g_2}{n_2 g_1}\right) - 1\right]^{-1}, \quad (7)$$

式中 f_q 是一个修正因子, 用于修正计算谱线强度的配分方程, $\bar{\kappa}(\nu)$ 和 \bar{n}_1 为 LTE 条件下的吸收系数和处于较低能级的分子数, n_1 和 n_2 分别为 non-LTE 条件下处于较低能级和较高能级的分子数。

3 临边辐射计算结果

文中的大气模式及振动温度数据采用文献[15]中提供的夏季北纬 45° 白天及夜间的 MIPAS IG2^[16] 参考大气中的数据。光谱参数采用 HITRAN2008^[17] 光谱数据库。文献[15]中提供了 48 种 MIPAS 参考大气, 大气范围由水平面每隔 1 km 延伸到 200 km 高度, 包括 13 种大气分子, 覆盖南北高低纬度、四季及昼夜的大气模式, 并利用通用 non-LTE 辐射传递模型 GRANADA (Generic

RAdiative traNsfer AnD non-LTE population Algorithm) 计算了这 48 种大气模式下的振动温度。GRANADA 可以用 López-Puertas 等^[2] 的 MCM 算法, 还可以采用 Lambda 迭代法, 以及混合使用这两种方法求解。

在考虑计算精度及速度的情况下, 将大气分为 111 层, 50 km 以下每隔 1 km 一层, 50~150 km 每隔 2 km 一层, 150~200 km 为 5 km 一层。临边辐射每 2 km 选取一个切线高度, 计算了主要大气分子红外光谱辐射带, 包括 CO_2 15 μm , CO_2 10 μm , CO_2 4.3 μm , O_3 9.6 μm , H_2O 6.3 μm 光谱带, CO_2 4.3 μm 光谱带切线高度从 2~150 km, 其余光谱带从 30~150 km。光谱结果经过 RFM 模型的三角仪器线型函数 (ILS) 处理, ILS 半峰全宽精度为 0.5 cm^{-1} 。

3.1 CO_2 15 μm 光谱带临边辐射

CO_2 是大气辐射中最重要的一种分子, 15 μm 光谱带是维持大气热平衡最重要的辐射带之一。 CO_2 15 μm 光谱带计算范围为 $640\sim 680 \text{ cm}^{-1}$, 光谱间隔为 0.5 cm^{-1} , 考虑了 CO_2 的主要同位素 626, 及其他三种同位素 636、628、627。 CO_2 15 μm 光谱带主要是由 ν_2 振动能级跃迁产生, 计算 non-LTE 辐射考虑的振动能级如表 1 所示。图 2 为不同切线高度 CO_2 15 μm 光谱带临边辐射亮度, 及不同切线高度下 LTE 与 non-LTE 辐射亮度的相对偏差 ϵ , 其定义为

$$\epsilon = \frac{R_{\text{LTE}} - R_{\text{non-LTE}}}{R_{\text{LTE}} + R_{\text{non-LTE}}} \times 100\%, \quad (8)$$

式中 R_{LTE} 与 $R_{\text{non-LTE}}$ 分别表示 LTE 与 non-LTE 条件下光谱带计算范围内的辐射亮度, 根据这个定义可知, 当 ϵ 等于 81.8% 时, R_{LTE} 是 $R_{\text{non-LTE}}$ 的 10 倍, 即相差一个数量级。以下数值计算将以相对偏差 ϵ 等于 5% 作为 non-LTE 与 LTE 开始产生明显偏离的指标。

表 1 CO_2 15 μm 光谱带振动能级

Table 1 Vibrational transitions of the CO_2 15 μm spectral region

Isotope	Upper level	Lower level	Transition energy $\Delta E_i / \text{cm}^{-1}$
626	01101	00001	667.38
626	02201	01101	667.75
626	11102	10002	647.06
626	03301	02201	668.11
626	11101	10001	688.67
636	01101	00001	648.48
628	01101	00001	662.37
627	01101	00001	664.73

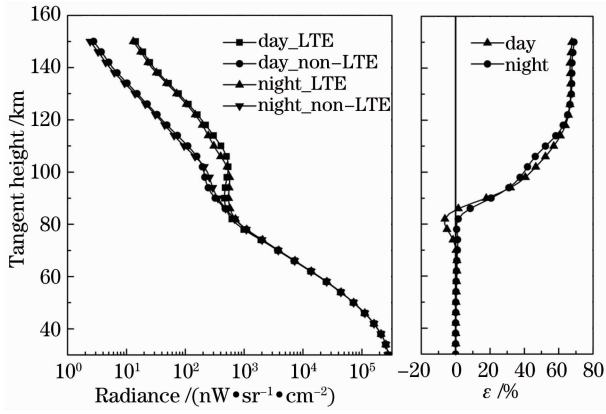


图 2 CO₂ 15 μm 光谱带临边辐射亮度

Fig. 2 Limb radiance of the CO₂ 15 μm spectral region

由图 2 可知,不论是在 LTE 还是 non-LTE 条件下,白天与夜间的辐射亮度曲线都较为接近,即随着高度增加基本呈指数减小。从图 2 可以看出,在白天,从 72~84 km 的切线高度,non-LTE 大于 LTE 条件的辐射亮度,其他切线高度 LTE 的辐射亮度都要大于 non-LTE 条件。相对偏差 ϵ 的绝对值从 78 km 开始超过 5%,86~120 km 相对偏差 ϵ 随高度增长较快,120 km 以后增长缓慢并维持在 65%左右。在夜间,LTE 条件始终要大于 non-LTE 条件下的辐射亮度,相对偏差 ϵ 在 86 km 开始超过 5%,变化趋势与白天相近。

图 3 为白天与夜间在 80 km 切线高度 CO₂ 15 μm 光谱带的 non-LTE 与 LTE 光谱辐射强度。由图可知,在 80 km 处 non-LTE 的影响不是很大,只在几个波峰处能看出差别。白天与夜间环境对 CO₂ 15 μm 光谱带 non-LTE 临边辐射的差别相对较小。

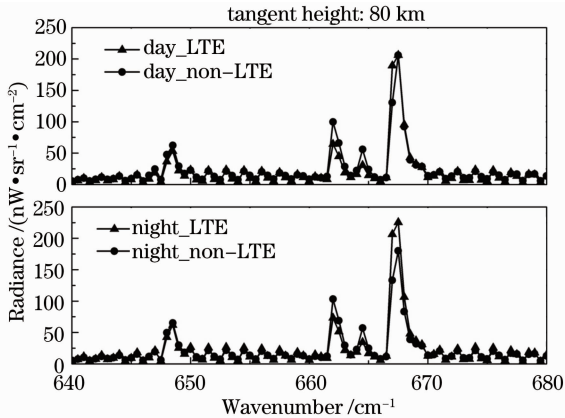


图 3 CO₂ 15 μm 光谱带临边光谱辐射强度

Fig. 3 Limb emission spectra of the CO₂ 15 μm spectral region

3.2 CO₂ 4.3 μm 光谱带临边辐射

CO₂ 4.3 μm 光谱带计算范围为 2200~2400 cm⁻¹,

光谱间隔为 1 cm⁻¹,计算过程考虑了 CO₂ 的主要同位素 626,及其他三种同位素 636、628、627。CO₂ 4.3 μm 光谱带主要是由 ν_3 振动能级跃迁产生,计算 non-LTE 光谱辐射考虑的振动能级如表 2 所示。

表 2 CO₂ 4.3 μm 光谱带振动能级

Table 2 Vibrational transitions of the CO₂ 4.3 μm spectral region

Isotope	Upper level	Lower level	Transition energy $\Delta E_e / \text{cm}^{-1}$
626	00011	00001	2349.14
626	01111	01101	2336.63
626	10012	10002	2327.43
626	02211	02201	2324.14
626	10011	10001	2326.60
626	00021	00011	2324.18
636	00011	00001	2283.49
636	01111	01101	2271.76
628	00011	00001	2332.11
628	01111	01101	2319.74
627	00011	00001	2340.01
627	01111	01101	2327.58

图 4 为 CO₂ 白天与夜间 4.3 μm 光谱带从切线高度 2~150 km 的临边辐射亮度变化曲线,及 LTE 与 non-LTE 辐射亮度的相对偏差 ϵ 。白天情况下,在 2 km 切线高度处 LTE 与 non-LTE 的相对偏差 ϵ 的绝对值为 11%,即表明大气已经偏离 LTE 条件,所以对于 CO₂ 4.3 μm 光谱带在整个大气的临边辐射都处于 non-LTE 条件。在 2~94 km 的切线高度,LTE 的辐射亮度都小于 non-LTE,最大相对偏差绝对值是在 74 km 为 84%,相差一个数量级。94 km 切线高度以上,LTE 辐射强度开始大于 non-LTE 辐射强度,在 116 km 以上 LTE 与 non-LTE 辐射亮度都相差超过一个数量级。夜间与白天的辐

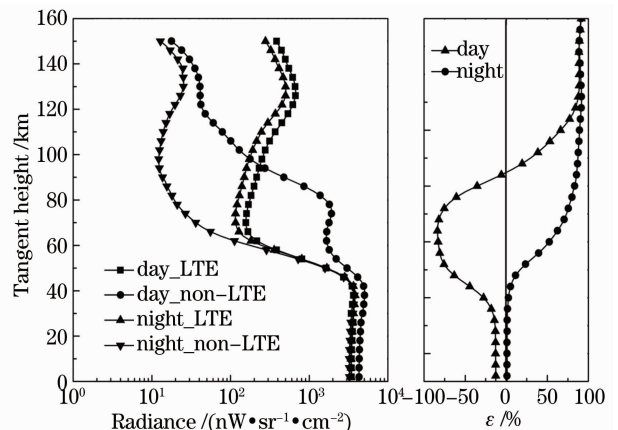


图 4 CO₂ 4.3 μm 光谱带临边辐射亮度

Fig. 4 Limb radiance of the CO₂ 4.3 μm spectral region

射亮度曲线在 non-LTE 条件下差异明显,白天的辐射亮度始终大于夜间辐射亮度,并在 80 km 左右时差别最大,说明白天太阳抽运对于大气辐射有很明显的增强作用。SAMM 的模拟结果与 CIRRIS-1A 火箭的实验数据也证实了在 CO_2 4.3 μm 光谱带白天与夜间环境具有巨大差异的结论^[18]。夜间条件下,在 2 km 处相对偏差 ϵ 约为 1%,在 64 km 时大于 5%。且对于整个计算高度层 LTE 总是大于 non-LTE 的辐射亮度,当切线高度在 100 km 时,相对偏差 ϵ 为 83%,即 LTE 与 non-LTE 辐射亮度相差超过一个数量级。

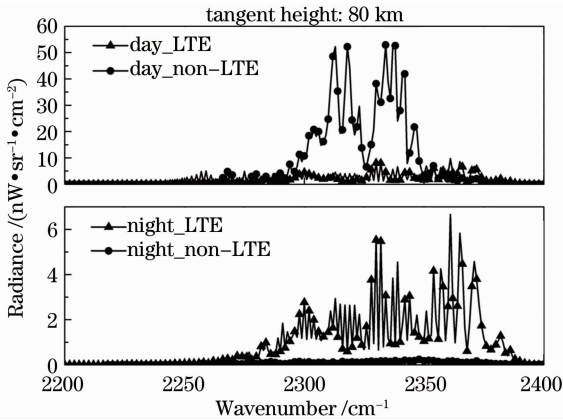


图 5 CO_2 4.3 μm 光谱带临边光谱辐射强度
Fig. 5 Limb emission spectra of the CO_2 4.3 μm spectral region

图 5 为白天与夜间在 80 km 切线高度 CO_2 4.3 μm 光谱带的 non-LTE 与 LTE 光谱辐射强度。在 80 km 处 non-LTE 的影响很大,无论是白天还是夜间,non-LTE 与 LTE 的辐射亮度值都相差一个数量级。夜间 LTE 的辐射强度大于 non-LTE 的辐射强度,但白天由于太阳的抽运作用,non-LTE 的辐射强度要大于 LTE 的辐射强度。且对于白天与夜晚的 non-LTE 辐射强度,两者差别很大。

3.3 O_3 9.6 μm 与 CO_2 10 μm 光谱带临边辐射

O_3 9.6 μm 光谱带计算范围为 900~1100 cm^{-1} ,光谱间隔为 1 cm^{-1} ,由于 CO_2 在 10 μm 光谱带也有很强的辐射,因此在 non-LTE 计算中也考虑了 CO_2 振动能级的跃迁,non-LTE 计算的 O_3 9.6 μm 与 CO_2 10 μm 光谱带振动能级如表 3 所示。

图 6 为 O_3 9.6 μm 和 CO_2 10 μm 光谱带从切线高度 30~150 km 的临边辐射亮度变化曲线,及 LTE 与 non-LTE 辐射亮度的相对偏差 ϵ 。对于白天,在 60 km 处相对偏差 ϵ 的绝对值开始超过 5%,并在 86 km 处迅速增加到 94%,而在 102 km 处相

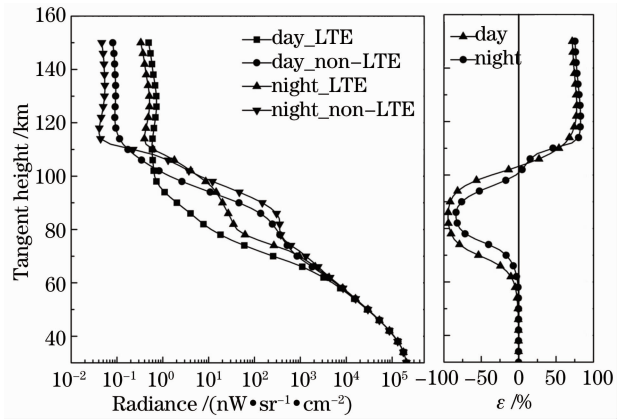


图 6 O_3 9.6 μm 和 CO_2 10 μm 光谱带临边辐射亮度
Fig. 6 Limb radiance of the CO_2 10 μm and O_3 9.6 μm spectral region

表 3 O_3 9.6 μm 和 CO_2 10 μm 光谱带振动能级
Table 3 Vibrational transitions of the CO_2 10 μm and O_3 9.6 μm spectral region

Isotope	Upper level	Lower level	Transition energy $\Delta E_v / \text{cm}^{-1}$
626	00011	10002	1063.73
626	00011	10001	960.96
626	01111	11102	1071.54
626	01111	11101	927.16
666	001	000	1042.08
666	002	001	1015.81
666	003	002	988.20
666	011	010	1025.59
666	101	100	1007.65

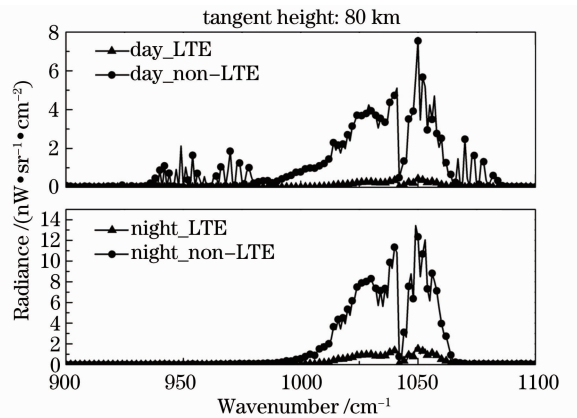


图 7 O_3 9.6 μm 和 CO_2 10 μm 光谱带临边光谱辐射强度
Fig. 7 Limb emission spectra of the CO_2 10 μm and O_3 9.6 μm spectral region

对偏差开始变为正值,并在 102~116 km 之间增加较快,从 116~150 km 相对偏差维持在 70%左右。夜间的相对偏差 ϵ 变化趋势与白天相近,其绝对值超过 5%是在 68 km,并在 86 km 处达到最大偏差,其值为 84%。在 46~110 km 范围内,夜间的 non-

LTE 辐射亮度要大于白天的辐射亮度,这是因为在夜间没有光化学反应的分解, O_3 的含量会明显增加的缘故。另外需要指出的是,此光谱带的临边辐射亮度在白天与夜间都有一个共同点,即在大约 110 km 以下时,辐射亮度随高度的变化都很快,几乎呈指数减小,而在 110 km 以上,辐射亮度变化很小。

图 7 为白天与夜间在 80 km 切线高度 O_3 9.6 μm 和 CO_2 10 μm 光谱带的 non-LTE 与 LTE 光谱辐射强度。由图可以看出在 80 km 处, non-LTE 的影响较为显著,夜间与白天 non-LTE 的光谱辐射强度都要大于 LTE 的光谱辐射强度,都相差一个数量级。在白天的情况下, CO_2 的三个振动辐射带都对总的辐射都有重要贡献。而夜间环境下, CO_2 的贡献较小,其主要是 O_3 振动光谱的作用,使得夜间的辐射强度要大于白天的辐射强度,文献[19]中对 MIPAS 探测数据的分析可以得到类似结果。

3.4 H_2O 6.3 μm 光谱带临边辐射

H_2O 6.3 μm 光谱带计算范围为 1450~1650 cm^{-1} , 光谱间隔为 0.5 cm^{-1} , 考虑了 H_2O 的主要同位素 161, 及其他三种同位素 181、171。 H_2O 6.3 μm 光谱带主要是由 ν_2 振动能级跃迁导致, 本文计算 H_2O 6.3 μm 光谱带 non-LTE 临边辐射的振动能级如表 4 所示。

表 4 H_2O 6.3 μm 光谱带振动能级

Table 4 Vibrational transitions of the H_2O 6.3 μm spectral region

Isotope	Upper level	Lower level	Transition energy $\Delta E_i/\text{cm}^{-1}$
161	010	000	1594.75
161	020	010	1556.88
161	030	020	1515.16
181	010	000	1588.28
171	010	000	1591.32

图 8 为 H_2O 6.3 μm 光谱带在白天和夜间从切线高度 30~150 km 的临边辐射亮度变化曲线, 及 LTE 与 non-LTE 辐射亮度的相对偏差 ϵ 。从图 8 可以看出在白天, 相对偏差 ϵ 在 98 km 下一直为负值, 即 LTE 要小于 non-LTE 的辐射亮度。而相对偏差 ϵ 的绝对值在 54 km 开始超过 5%, 在 84 km 处达到最大为 94%, 随后迅速减小并在 98 km 变为正值, 且随高度持续增加, 在 122 km 达到 93%, 而在 122 km 以上逐渐减小。夜间的 non-LTE 辐射亮度始终要小于白天的 non-LTE 辐射亮度, 相对偏差 ϵ 的绝对值从 66 km 大于 5%, 辐射亮度曲线变化趋势与白天相近。

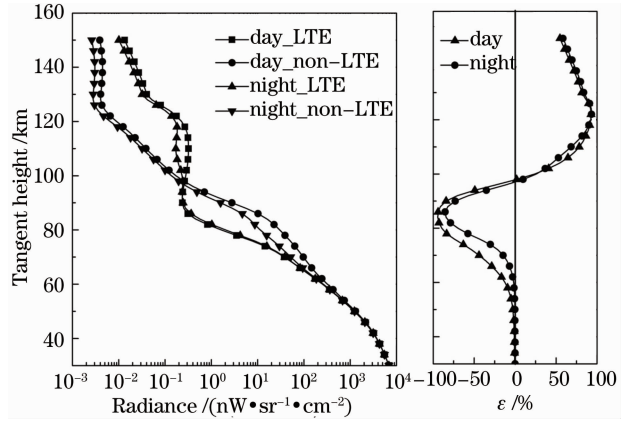


图 8 H_2O 6.3 μm 光谱带临边辐射亮度

Fig. 8 Limb radiance of the H_2O 6.3 μm spectral region

图 9 为白天与夜间在 80 km 切线高度 H_2O 6.3 μm 光谱带的 non-LTE 与 LTE 光谱辐射强度。由图可知, 6.3 μm 光谱带的峰值点较多, 白天与夜晚环境下, 各峰值点处 non-LTE 与 LTE 的辐射强度差别都较为显著, 相差一个数量级。且白天的 non-LTE 辐射强度在各个峰值点处要大于夜晚的辐射强度两倍以上。

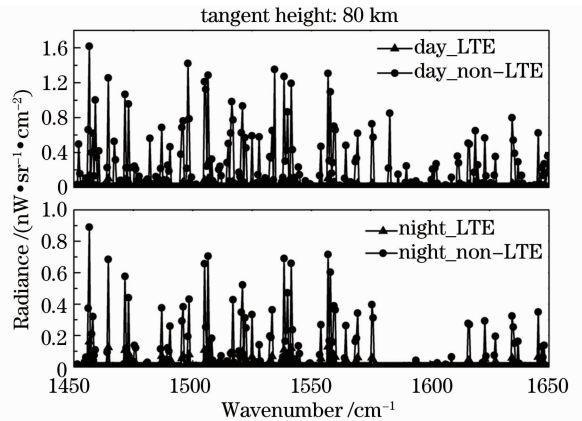


图 9 H_2O 6.3 μm 光谱带临边光谱辐射强度

Fig. 9 Limb emission spectra of the H_2O 6.3 μm spectral region

4 结 论

利用 RFM 大气辐射计算模型, 对大气中主要分子红外光谱带在 non-LTE 及 LTE 条件下的临边辐射进行模拟。结果表明, 高层大气在 non-LTE 与 LTE 条件下的红外临边辐射有显著差异, 在部分光谱带最大偏差会相差一个数量级。白天太阳的抽运作用会明显加强部分光谱带的临边辐射强度, 并增加 non-LTE 与 LTE 条件下大气辐射的偏差。具体结论如下:

1) 对于 CO_2 15 μm 光谱带的临边辐射, 白天

non-LTE 与 LTE 的辐射亮度相对偏差 ϵ 绝对值大于 5% 是在 78 km, 而夜间是在 86 km 处。太阳对 CO_2 15 μm 光谱带的 non-LTE 临边辐射影响相对其他光谱带较小;

2) 白天 CO_2 4.3 μm 光谱带在整个大气层的临边辐射都处于 non-LTE 条件下, 夜间相对偏差在 64 km 时才大于 5%。白天与夜间在 non-LTE 条件下的辐射亮度曲线差异明显, 主要是由于太阳抽运对于 CO_2 4.3 μm 光谱带红外辐射有显著增强作用;

3) CO_2 10 μm 和 O_3 9.6 μm 光谱带在白天 60 km 处相对偏差绝对值大于 5%, 夜间则是在 68 km 处。由于夜间 O_3 含量会大量增加, 因此在 46~110 km 切线高度范围内, 夜间的 non-LTE 辐射亮度要大于白天的辐射亮度;

4) H_2O 6.3 μm 光谱带白天相对偏差绝对值在 54 km 处超过 5%, 夜晚则是从 66 km 处开始。对于 H_2O 6.3 μm 光谱带, 夜间的 non-LTE 辐射亮度始终要小于白天的 non-LTE 辐射亮度, 并在 60~80 km 差距较为明显。

根据以上分析可知对于 non-LTE 与 LTE 条件下临边辐射开始明显偏离的高度, 白天都要低于夜间, 除白天 CO_2 4.3 μm 光谱带在整个大气层的临边辐射都处于 non-LTE 条件外, 其他光谱带在 60 km 以下 non-LTE 与 LTE 都不会有较明显偏离, 其中 CO_2 15 μm 光谱带能达到 80 km 左右。

参 考 文 献

- 1 Wang Hong, Liu Xuebin, Feng Yutao, *et al.*. A new reduction technique for thermospheric wind and temperature measurement with Fabry-Perot interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(11): 1130003.
王宏, 刘学斌, 冯玉涛, 等. 基于法布里-珀罗干涉仪反演大气风速和温度的简化算法[J]. *光学学报*, 2013, 33(11): 1130003
- 2 M López-Puertas, F W Taylor. Non-LTE Radiative Transfer in the Atmosphere [M]. Singapore: Mainland Press Scientific, 2001. 127-156.
- 3 P P Wintersteiner, A J Paboojian, R A Joseph. Studies of Non-LTE Atmospheric Emissions: Modeling and Data Analysis [R]. Arcon Corp Waltham MA, 1996.
- 4 A A Kutepov, O A Gusev, V P Ogibalov. Solution of the non-LTE problem for molecular gas in planetary atmospheres: superiority of accelerated lambda iteration [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1998, 60(2): 199-220.
- 5 J H Gruninger, R L Sundberg, P K Acharya, *et al.*. User's

- Manual For SHARC-4 the Strategic High-Altitude Radiance Code [R]. Philips Lab Hanscom AFB MA, 1997.
- 6 H Dothe, J W Duff, J H Gruninger, *et al.*. SAMM2, SHARC-4 and MODTRAN4 Merged (User's Manual) [R]. Spectral Sciences INC Burlington MA, 2004.
- 7 H J P Smith, D J Dube, M E Gardner, *et al.*. FASCODE-Fast Atmospheric Signature Code (Spectral Transmittance and Radiance) [R]. Visidyne INC Burlington MA, 1978.
- 8 D P Edwards. GENLN2: A General Line-by-Line Atmospheric Transmittance and Radiance Model. Version 3.0: Description and Users Guide [R]. NCAR, Tech Rep; NCAR/TN-367+STR, 1992.
- 9 A Dudhia. Reference Forward Model [OL]. <http://www.atm.ox.ac.uk/RFM/index.html>, 2014-4-23.
- 10 Dai Congming, Wei Heli, Hu Shunxing. Analysis on upper atmospheric radiance transfer characteristic to different HITRAN databases [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0501001.
戴聪明, 魏合理, 胡顺星. 不同版本 HITRAN 数据库对高层大气辐射传输影响特性分析 [J]. *光学学报*, 2013, 33(5): 0501001.
- 11 T Von Clarmann, A Dudhia, D P Edwards, *et al.*. Intercomparison of radiative transfer codes under non-local thermodynamic equilibrium conditions [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 2002, 107(D22): ACH12.
- 12 N Glatthor, M Hoepfner, G P Stiller, *et al.*. Intercomparison of the KOPRA and the RFM radiative transfer codes [C]. SPIE, 1999. 348-363.
- 13 T von Clarmann, M Birk, H Bovensmann, *et al.*. Advanced MIPAS Level 2 Data Analysis (AMIL2DA) Final Report [R]. Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Tech Rec; Project EVG1-CT-1999-00015, 2003.
- 14 D P Edwards, M López-Puertas, M A López-Valverde. Non-local thermodynamic equilibrium studies of the 15 μm bands of CO_2 for atmospheric remote sensing [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 1993, 98(D8): 14955-14977.
- 15 B Funke, M López-Puertas, M Garcia-Comas, *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.
- 16 P Raspollini, C Belotti, A Burgess, *et al.*. MIPAS level 2 operational analysis [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006, 6(12): 5605-5630.
- 17 L S Rothman, I E Gordon, A Barbe, *et al.*. The HITRAN2008 molecular spectroscopic database [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2009, 110(9-10): 533-572.
- 18 S Adler-Golden, D R Smith, J Vail, *et al.*. Simulations of mesospheric and thermospheric IR radiance measured in the CIRRI-1A shuttle experiment [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 1999, 61(18): 1397-1410.
- 19 M López-Puertas, B Funke, M Garcia-Comas, *et al.*. Advanced MIPAS Level 2 Data Analysis Report on the Climatology of Vibrational Temperatures [R]. Instituto de Astrofísica de Andalucía, Tech Rec; Project EVG1-CT-1999-00015, 2002.