

临近空间大气中波红外辐射特性的数值分析研究

戴聪明¹ 邓洛凤² 刘 栋^{1,3} 赵凤美^{1,3} 魏合理¹

(1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 中国科学院大气光学重点实验室, 合肥, 230031

2. 北京跟踪通信技术研究所, 北京, 100094; 3. 中国科学技术大学 研究生院科学岛分院, 合肥, 230031)

摘要:介绍了临近空间大气环境特点及其非局域热平衡状态的辐射传输计算方法。利用战略高高度辐亮度代码 SHARC(Strategic high-altitude radiance code), 计算了 3—5 μm 波段不同观测条件、光学现象及大气环境下的临近空间大气背景辐射。分析结果表明:临近空间中波红外辐射随观测天顶角的增大而增强, 随太阳天顶角的增大而减弱; 在 38 km 及 75 km 附近, 临边背景辐射存在极大值; 纬度越高, 临边背景辐射的季节变化特征越明显。OH 夜气辉和极光对背景辐射有重要增强作用。

关键词:临近空间; 红外辐射; 非局域热平衡; 临边背景

中图分类号: P407.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2018)S2-0013-06

Numerical Analysis on Mid-infrared Radiance Characteristic of Atmosphere in Near Space

DAI Congming¹, DENG Luofeng², LIU Dong^{1,3}, ZHAO Fengmei^{1,3}, WEI Heli¹

(1. Key Laboratory of Atmospheric Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, 230031, China; 2. Beijing Institute Tracking and Telecommunications Technology, Beijing, 100094 China; 3. Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei, 230031, China)

Abstract: The atmospheric environment of near space and the methods of radiance transfer calculation are introduced on non-local thermodynamics equilibrium(LTE) condition. With strategic high-altitude radiance code, the radiance of atmosphere is simulated in near space at different observation conditions, optical phenomena and atmospheric environment on 3—5 μm region. It shows that background radiance is strengthened with the observation zenith angle and weakened with solar zenith angle. Close to 38 km and 75 km, the limb radiance profile shows maximum values. At high latitude, the limb radiance varies with seasons clearly. The background radiance of near space is enhanced on OH airglow and aurora environment.

Key words: near space; infrared radiance; non-local thermodynamics equilibrium(LTE); limb background

临近空间是指距离地面 20—120 km 高度的空域, 处于现有航空器的最高飞行高度和航天器的最低轨道高度之间, 包含了大气平流层、中间层、低热层和部分电离层区域。临近空间大气相比低层大气十分稀薄, 导致分子间的热碰撞频次显著降

低, 同时太阳紫外辐射和高能粒子沉降作用, 诱导临近空间大气分子高效地发生化学/光化学反应, 使得辐射分子能级数密度在特定的高度以上开始偏离局域热平衡状态(Local thermodynamics equilibrium, LTE)的玻尔兹曼分布, 称为非局域热

基金项目:国防基础科研计划项目(JCKY2016204C602)和空间目标测量重点实验室开放基金资助项目。

收稿日期:2018-03-23; **修订日期:**2018-05-30

通信作者:戴聪明, 男, 博士, 副研究员, E-mail: cmdai@aiofm, ac. cn。

引用格式:戴聪明, 邓洛凤, 刘栋, 等. 临近空间大气中波红外辐射特性的数值分析研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2018, 50(S2): 13-18. DAI Congming, DENG Luofeng, LIU Dong, et al. Numerical analysis on mid-infrared radiance characteristic of atmosphere in the near space[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2018, 50(S2): 13-18.

平衡状态 (non-LTE) 产生一些特殊的光学现象, 如气辉、极光等^[1-2]。

临近空间大气红外辐射特性是此空域众多光电工程应用的基础, 如大气环境的卫星遥感探测、空间天气的预测预报、临近空间目标探测识别等^[3-4]。已有的实测红外辐射数据表明, 基于简单 LTE 假设的辐射传输模式无法准确地模拟临近空间大气红外辐射, 在一些分子谱带模拟背景辐亮度与观测值存在数量级的偏差^[5-6]。因此考虑临近空间的 non-LTE 效应是研究该区域大气辐射特性的必要理论基础。为此, 国际上针对高层大气 non-LTE 效应, 建立了多种 non-LTE 辐射数值模式, 如通用辐射传输模型软件 SHARC/SAMM^[7-8]。

随着科学技术的发展, 各国逐渐加大对临近空间的开发利用, 各种飞行器的临近空间活动越来越频繁, 对临近空间环境辐射特性的认知要求越来越高^[9]。为此, 本文针对临近空间大气环境, 在典型中波红外 3—5 μm 波段, 利用战略高高度辐亮度代码 SHARC (Strategic high-altitude radiance code), 仿真分析了不同观测条件、不同光学现象及大气条件下的临近空间红外辐射特性, 这对具体的临近空间光学探测具有一定的指导意义。

1 非局域热平衡模式概述

在红外波段, 低层大气处于 LTE 状态, 可采用普朗克黑体辐射函数近似表征其发射源函数。随着高度上升, 当临近空间处于 non-LTE 状态时, 普朗克函数不在适用于大气辐射源函数, 需要精确计算辐射分子能级数密度, 同时对分子吸收谱线的线强进行 non-LTE 订正^[10]。如图 1 简要说明 non-LTE 和 LTE 状态下辐射传输计算流程的差异。相比于 LTE 条件, non-LTE 条件下的大气吸收系数和辐射源函数的计算要复杂的多, 后者涉及辐射气体所参与的分子化学动力学过程, 主要包括碰撞、辐射、光化学等过程。

临近空间大气分子完备的 non-LTE 模式, 需要根据影响分子能级分布的动力学-化学机制, 建立分子不同能级数密度的统计平衡方程组, 进而求解出分子所有能级数密度的高度分布, 再计算视线路径上的大气分子吸收系数和源函数, 其与能级数密度分布的关系式为^[2]

$$k_{\nu} = \frac{h\nu}{4\pi} \frac{n_1}{\rho} B_{12} q_{r,a} \cdot \left[1 - \frac{n_2}{n_1} \frac{g_1}{g_2} \exp\left(-\frac{h(\nu - \nu_0)}{kT}\right) \right] \quad (1)$$

$$J_{\nu} = \frac{2h\nu^3}{c^2} \left[\frac{n_1}{n_2} \frac{g_2}{g_1} \exp\left(\frac{h(\nu - \nu_0)}{kT}\right) - 1 \right]^{-1} \quad (2)$$

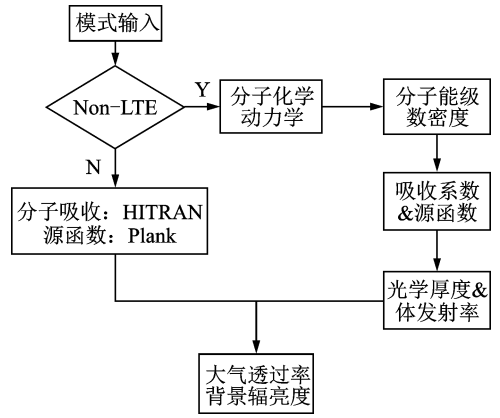


图 1 临近空间大气红外辐射计算流程

Fig. 1 The flow chart of infrared radiance in near space

式中: n_1 为分子下振动能级数密度, n_2 为分子上振动能级数密度, g_1 和 g_2 分别为它们的能级简并度, B_{12} 是分子由下振动能级跃迁到上振动能级的总爱因斯坦吸收系数, $q_{r,a}$ 是考虑转动能级分布和谱线展宽的归一化函数; h 为普朗克常数, k 为玻尔兹曼常数, c 为真空中光速, ν 为频率, T 是分子所在位置的动理学温度, ρ 是分子总数密度。很明显, n_1 、 n_2 决定着源函数 J_{ν} 和吸收系数 k_{ν} 。

SHARC 是美国空军地球物理实验室开发的高层大气辐射传输计算模型, 采用 non-LTE 单谱线等效带宽方法处于分子光谱带, 可在 2—40 μm 范围内, 模拟计算 30—300 km 的高空内任意视线路径上的大气光谱辐射、光谱透射率^[7]。而对于低层大气, 我们利用自主研发的通用大气辐射传输软件 CART^[11], 计算处于 LTE 状态低层大气背景辐射。借助于上述模型软件, 以及 SAG (SHARC/SAMM Atmosphere Generator) 生成的大气模式^[12], 详细研究临近空间在中波红外波段的辐射特性, 掌握典型环境下的背景辐射的时空分布特征。

2 临近空间红外辐射特性分析

2.1 不同观测位置下的背景辐射

(1) 高度分布特性

临边路径是天基探测临近空间大气常用的观测方式, 可有效避开复杂的低层大气, 以较高的垂直分辨形成“切片式”的扫描观测。由于大气分子数密度随高度基本呈指数衰减, 因此讨论临近空间大气背景辐射随高度的变化具有十分重要的意义。选取计算参数为: 35°N 夏季白天大气, 3—5 μm 波段, 临边视线的切线高度分别为 30、50、70、90、110 km。计算的临近空间大气光谱辐射如图 2 所示。左图显示整个谱区存在几个重要的辐射 (吸收) 带。2 050—22 00 cm^{-1} 波段包含 CO ($\Delta v = 1$)

4.7 μm 辐射带;在 2 200—2 400 cm^{-1} 波段包含 CO_2 (ν_3) 振转跃迁,构成 4.3 μm 辐射带。白天太阳光在 2.7 μm 波段上对 CO_2 进行泵浦,而后 CO_2 通过振动-振动碰撞过程以 4.3 μm 向外辐射,这一过程深受 OH 自由基、原子氧 $\text{O}(^1\text{D})$ 及中性碰撞气体 N_2 的影响^[5];大于 2 400 cm^{-1} 的光谱区域,大气分子辐射特性不是很强,只存在在以 3 055 cm^{-1} 和 3 007 cm^{-1} 为中心的 CH_4 3.4 μm 辐射带。因此,在中波红外波段内,4.3 μm 是临近空间大气吸收特性最强的辐射带,且在同波数区域,临边背景辐射强度随高度的升高而减弱。

fer,CART) 计算了 20—29 km 高度区间的临边辐射,其中乡村型气溶胶,能见度 23 km,其他参数和高层大气计算一致。从图 2 右图可看出,30 km 以下区域,昼夜大气辐射差异随高度的下降而增大,尤其是白天辐射随高度的降低迅速增强。在切线高为 30 km 与 29 km 时,两模型计算临边辐射差异较大,这可能和所采用的辐射传输算法、大气参数模式、视线路径长度等有关。相比于高层大气,低层大气中的云、气溶胶及水汽等对太阳光具有很强的散射吸收作用,且存在着昼夜变化特性。使得低层大气昼夜间背景辐亮度差异较大。

(2) 太阳角度分布特性

入射太阳辐射的变化直接影响临近空间大气的受激辐射过程、光化学反应等过程,导致该区域背景辐射存在变化。当观测与太阳方位重合时,计算不同太阳高度角对背景辐射的影响,其中计算参数为:35°N 夏季白天大气,观测高度 30 km,垂直向上观测方式。图 3(a)图显示,在 30 km 以上区域,积分辐亮度随太阳天顶角的增加而逐渐减少。天顶角 110°(夜晚)的辐亮度比天顶角 0°的背景辐射值偏小为 5.85%。图 3(b)则显示,太阳天顶角越大,同切线高度层上的临边背景辐射越大。在 75 km 附近,背景辐射廓线存在一个极大值,此时不同太阳天顶角的背景辐射差异较大,天顶角 0°的背景辐射是天顶角 90°的 6.73 倍,而在辐射廓线的另一极大值区域,如切线高度 36 km,这一比值

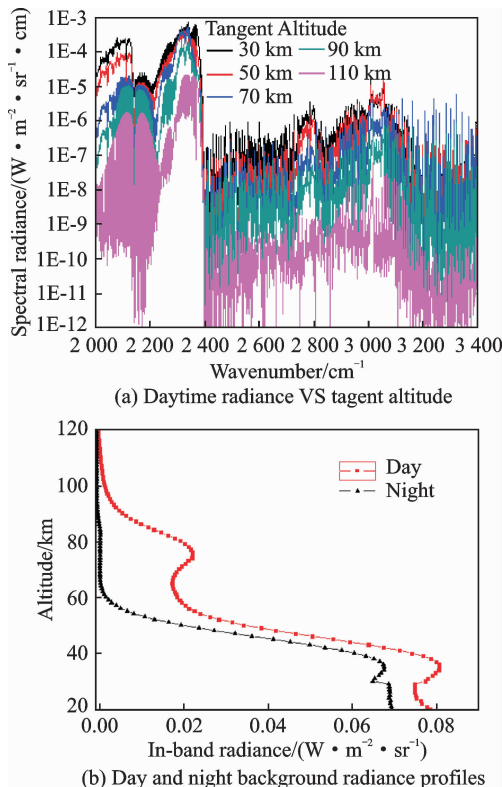


图 2 临近空间临边大气背景辐射廓线
Fig. 2 Limb radiance profile in near space atmosphere

图 2 右图显示了临边背景辐射随切线高度的变化。在 30—120 km 区域,同切线高度层上,白天大气背景辐射均强于夜晚,且在 38 km 附近,昼夜临边背景辐射均呈现一个极大值,表明此区域为临边中波红外辐射最强的层结。这是因为,区域内 O_3 大量吸收太阳紫外辐射并以 4.76 μm 带(泛频和组合带)辐射,且 CO_2 在 2.7 μm 带吸收太阳辐射并以 4.3 μm 向外辐射;在 38—65 km 区域,大气温度随高度的升高先增加后减小,临边辐亮度随高度迅速减小。60 km 以上区域,夜晚大气临边辐亮度基本不变,而白天则在 75 km 附近存在一个辐射极大值,远大于夜晚同高度层的背景辐射。为进一步和低层大气背景辐射比较,采用通用大气辐射传输软件(Combined atmospheric radiative trans-

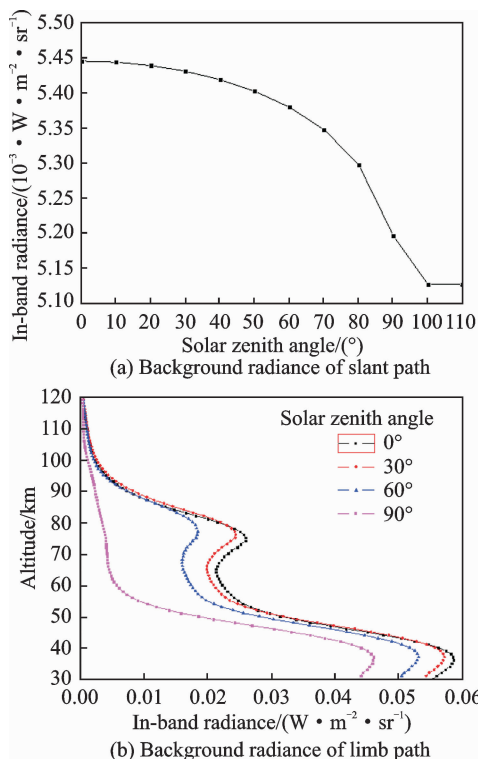


图 3 积分辐亮度随太阳天顶角的变化
Fig. 3 In-band radiance variance with solar zenith angle

为 1.27 倍。这表明在临近空间,太阳入射高度角的变化将显著影响临边背景辐射,而对倾斜向上路径背景辐射影响较小。

(3) 观测角度分布特性

当观测与太阳方位重合时,计算观测高度 30 km 上不同观测角度下的临近空间大气背景辐射。低层大气向上背景辐射采用 CART 软件,大气模式为中纬度夏季,高低层大气的背景辐射随观测天顶角的变化如图 4 所示。图中显示,在观测天顶角 0—90° 范围内,临近空间大气中红外背景辐射由 $5.98 \times 10^{-3} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ 增加到 $2.072 \times 10^{-2} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$,增长 3.64 倍;而在 90—180° 范围内,低层大气中红外背景辐射由 $2.326 \times 10^{-2} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ 增加到 $1.032 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$,增长 44.38 倍。观测天顶角同为 90° 时,两种辐射传输模型计算的大气背景辐射相差 $2.54 \times 10^{-3} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$,为两者平均值的 11.55%,这主要是由辐射传输算法及大气参数误差引起的。低层大气存在着云和气溶胶等颗粒,吸收了地表辐射及其反射太阳辐射,并以热辐射发射出去,而高层大气吸收了部分入射太阳辐射及低层大气向上传输辐射。

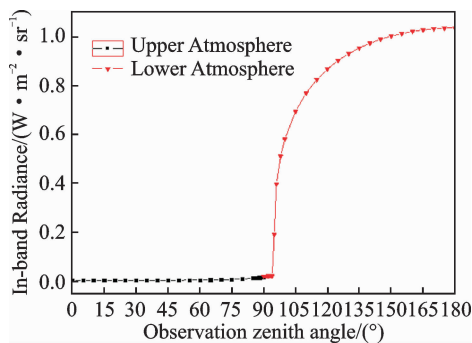


图 4 临近空间大气背景辐射随观测天顶角的变化

Fig. 4 Background radiance variance with observation zenith angle

2.2 不同光学现象下的背景辐射

(1) 夜气辉

气辉是处于激发态的大气分子或原子跃迁到较低能态而辐射的一定波长的光。在中红外波段,夜气辉主要 OH 自由基,它产生于 H 和 O_3 的碰撞过程,是研究大气重力波动力学特性的重要基础。为了解 OH 自由基的辐射特性,选取计算参数为:45°N 昼夜大气,2.6—3.3 μm 波段,计算只含 OH 自由基和包含所有红外辐射气体的昼夜临边背景辐射,结果如图 5 所示。图中显示,在 65 km 附近,白天临边背景辐射呈现一个极大值,辐射值约为夜晚的 2 倍,这是因为白天太阳对 CO_2 2.7 μm 带的激发构成波段内的主要辐射源。在 82

km 附近,夜晚临边辐射存在一个极大值,远大于同高度层的白天背景,这表明 80—85 km 区域是一个最重要的 OH 气辉层,它来源于 $\text{OH}(v_1)$ 自由基,夜晚其浓度远大于白天。

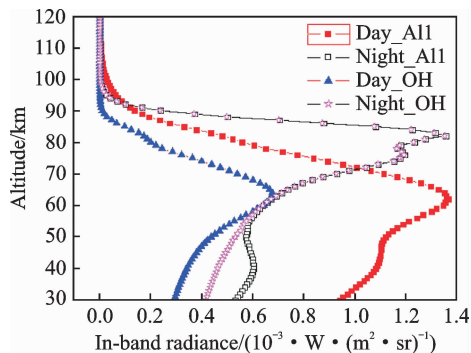


图 5 OH 气辉辐射亮度随高度的分布

Fig. 5 In-band radiance profile of OH airglow

(2) 曙暮光

在太阳明暗边界区域,临近空间的光化学反应将导致辐射分子数密度的变化,如臭氧在黎明时发生光解离,在傍晚时再生产,而 OH 自由基来自于臭氧和原子 H 的结反应。另外,太阳直射将导致分子振动态的变化,如中间层和低热层的 CO_2 在 2.7 μm 和 4.3 μm 谱带吸收太阳辐射。为说明晨昏线上临近空间红外辐射特性,采用经验大气模型生成太阳天顶角分别为 90°、92°、…、110° 时的大气参数,计算切线高度分别为 70、80 和 90 km 的临边背景辐射。

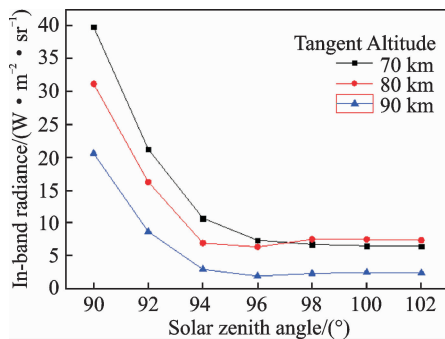


图 6 暮光区域内的临边辐射度

Fig. 6 Limb radiance variance near dawn terminator

图 6 显示,暮光区域内,临边背景辐射随太阳天顶角的增大而逐渐减弱。当天顶角小于 96° 时(大部分处于明亮区域),积分辐射随太阳天顶角的增大而急剧减弱,而当太阳天顶角超过 96° 时,临边辐射随太阳天顶角的变化不大,此时太阳光并未照射到这一区域,大气几乎处于黑暗状态。大气背景辐射从天顶角 90° 时的 $1.563 \times 10^{-2} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ 减少到天顶角 98° 时的 $1.165 \times 10^{-2} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$,减弱近 25.46%。此时,观测视线路径上的

CO₂、OH 自由基的浓度变化较大。当太阳天顶角大于 98°时,大气几乎处于黑暗状态,同高度层上 CO₂、OH 自由基等数密度变化不大,天顶角 110°时的背景辐亮度为 $1.158 \times 10^{-2} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$,比天顶角 90°时背景减弱了 25.91%。

(3) 极光辐射

入射到地球极区高层大气的极光高能粒子,直接或间接参与大气中的 CO₂、NO 的碰撞激发过程。为研究极光在中红外波段的辐射特性,计算参数为:3—5 μm 波段,72°N 局地大气,临边视线切线高度 103 km。极光所在区域为:80—120 km 高度区域,入射极光能量通量为 100 ergs/cm²/s,极光持续和观测时间分别为 100 s 和 25 s。

图 7 左图显示静态和极光大气条件下,临边辐亮度随光谱的分布。从中可知,在小于 3 100 cm⁻¹ 谱区,极光辐射增强作用比较微弱,主要存在 CO₂ 和 NO+ 的 4.3 μm 光谱辐射带;在大于 3 100 cm⁻¹ 谱区,NO 在 5.3 μm 光谱带的辐射增强非常显著,图中显示 P 支光谱带的辐射,源于极光能量粒子和 NO 相互作用。在 80—120 km 区域内,积分辐射随切线高度的变化如右图所示。显然,极积分的辐射强度明显大于静态大气背景辐射。

空间红外辐射的主要参量。为此,基于不同季节及纬度的大气模式,仿真分析了临近空间临边背景辐射廓线,结果如图 8 所示。图中显示,不同季节的低纬度背景辐射差异不大,随着纬度的增加,背景辐射的季节差异逐渐显现。总体上,秋季背景辐射最低,春季背景辐射最强。昼夜辐射廓线的对比显示,夜晚背景辐射明显弱于白天,在 60 km 以上区域相差达到一个数量级,在 60 km 以下区域,昼夜背景辐射差异较小。造成这一现象主要是白天太阳辐射对 CO₂ 的直接泵浦使得 4.3 μm 带的相关能级强烈激发,这一机制显著地增强了白天的 4.3 μm 辐射,这一效应在 60 km 以下 CO₂ 4.3 μm 带回归 LTE 时才消除。而夜晚 70—90 km 内的等辐射层则是由于夜晚 OH 对 CO₂ 的激发占据主导地位导致的。

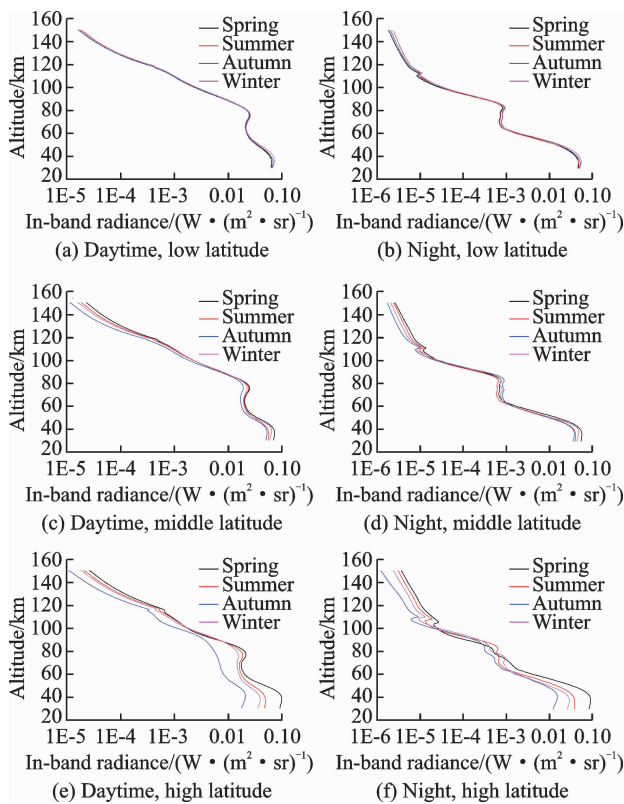


图 8 不同纬度、季节 3—5 μm 昼夜临边辐亮度廓线
Fig. 8 The radiance profiles of 3—5 μm band on the different latitude and seasons

3 结束语

针对临近空间大气的中波红外辐射特性,本文利用高层大气辐射传输软件 SHARC,仿真分析了不同条件下的临近空间大气的背景辐射特性,包括倾斜向上及临边观测路径。结果表明:

(1) 临近空间临边背景辐射随高度变化十分明显,存在明显的辐射层结,如 38 km 和 75 km 附近的辐射大值区域,且这种高度分布趋势在白天更加

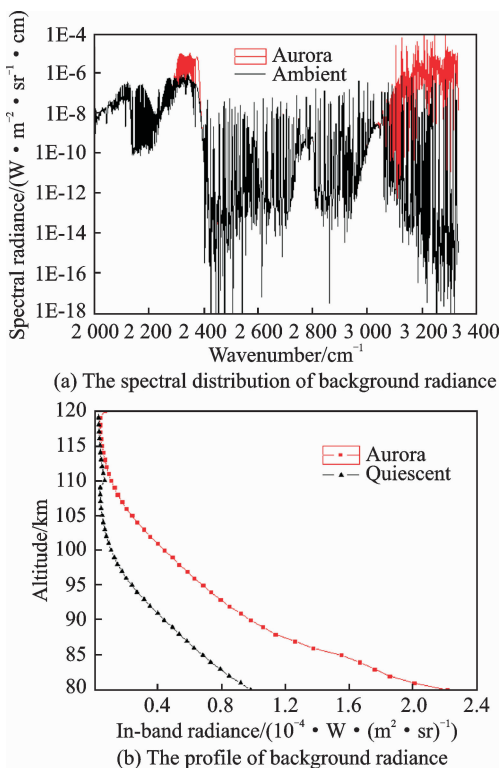


图 7 静态和极光大气条件下的背景辐射

Fig. 7 The background radiance on the conditions of quiescent and aurora region

2.3 不同季节和纬度下的背景辐射

临近空间大气参数(如温度、原子氧、臭氧等)存在着时空变化特征,尤其是大气温度是影响临近

显著;

(2) 太阳高度角的变化对倾斜向上观测的背景辐射的影响不超过 5.9%, 而对临边观测辐射的影响存在数倍的差异; 倾斜观测时, 观测高度角对 30 km 以上临近空间大气的影响明显小于 30 km 以下低层大气;

(3) 在 2.6~3.3 μm 波段, 昼夜临边辐射廓线存在明显的高度层节, 白天极大值位于 61 km 附近, 主要由 CO_2 2.7 μm 带贡献, 夜晚辐射极大值位于 84 km 附近, 主要由 OH 自由基的贡献; 由白天向夜晚过度的晨昏区域, 临边背景辐射急剧减弱; 而极光存在时, 其背景辐射显著增强。

(4) 纬度越高, 临边背景辐射的季节变化特征越明显。

参考文献:

- [1] REE M H. Physics and chemistry of the upper atmosphere[M]. U. K. : Cambridge University Press, 1989.
- [2] LOPEZ-PUERTAS M, TAYLOR F W. Non-LTE radiative transfer in the atmosphere[M]. [s. n.]: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, Singapore, 2003.
- [3] FOMICHEV V I. The radiative energy budget of the middle atmosphere and its parameterization in general circulation models[J]. J Atmos Sol Terr Phys, 2009, 71(14-15): 1577-1585.
- [4] FEOFILOV A G, KUTEPOV A A. Infrared radiation in the mesosphere and lower thermosphere: Energetic effects and remote sensing[J]. Surveys in Geophysics, 2012, 33(6): 1231-1280.
- [5] NEBEL H, WINTERSTEINER, PICARD R H, et al. CO_2 Non-local thermodynamic equilibrium radiative excitation and infrared dayglow at 4.3 μm : Application to spectral infrared rocket experiment data[J]. Journal of Geophysical Research, 1994, 9910: 409-419.
- [6] WINTERSTEINER P P, PICARD R H, SHARMA R D. Line-by-line radiation excitation model for the non-equilibrium atmosphere; application to CO_2 15 μm emission[J]. J Geophys Res, 1992, 97(D16): 18083-18117.
- [7] SHARMA R D, RATKOWSKI A J, SUNDBERG R L, et al. Description of SHARC, the strategic high-altitude radiance code[R]. GL-TR-89-0229, 1989.
- [8] PANFILI R, DOTHE H, JOHN G. All-altitude atmospheric radiation transport with SAMM2[J]. AIP Conf Proc, 2009, 1100: 77-80.
- [9] 吕达仁, 陈泽宇, 郭霞, 等. 临近空间大气环境研究现状[J]. 力学进展, 2009, 39(6): 674-682.
- LU Daren, CHEN Zeyu, GUO Xia, et al. Recent progress in near space atmospheric environment study[J]. Advances in Mechanics, 2009, 39(6): 674-682.
- [10] 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特性的影响研究[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 1-8.
- DAI Congming, WEI Heli, HU Shunxing. Analysis on upper atmospheric radiance transfer characteristic to different HITRAN database[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 1-8.
- [11] 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, 2(6): 446-450.
- WEI Heli, CHEN Xiuhong, RAO Ruizhong. The introduction to the combined atmospheric radiative transfer (CART) software[J]. Journal of atmospheric and environmental optics, 2007, 2(6): 445-450.
- [12] SHOLL R M, ALDER-GOLDEN S, DUFF J W, et al. User's manual for SAG-2: SHARC/SAMM atmospheric generator[M]. Burlington Ma: Spectral Sciences Inc, 2003.

(编辑: 张蓓)