

文章编号: 1672-8785(2012)09-0023-07

高层大气环境对长波红外背景辐射特性的影响分析

戴聪明^{1,2} 陈秀红¹ 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成分与光学重点实验室,
安徽 合肥 230031; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要: 高层大气长波红外背景辐射特性是目标识别和红外辐射特性测量的重要研究课题。根据 NRLMSIS-00 大气经验模型, 分析了高层大气温度和气体浓度对红外辐射的影响。利用高层大气辐射传输模式 SHARC, 在 $6 \sim 15 \mu\text{m}$ 波段对不同观测位置和大气模式条件下的高层大气背景辐射进行了数值计算和理论分析。结果表明, 高层大气长波红外辐射会随临边切线高度的增加而减弱, 随倾斜观测天顶角的增加而增强, 随太阳天顶角的增加而减弱。曙光和极光对高层大气长波红外辐射具有重要的增强作用, 而且高层大气长波红外辐射存在纬度和季节变化特性。高层大气环境对长波红外背景辐射的影响分析结果可供空间目标探测和卫星红外遥感等工程参考。

关键词: 高层大气; 背景辐射; SHARC; 长波红外

中图分类号: P407.6 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2012.09.005

Influence of Upper Atmospheric Environment on Long-wavelength Infrared Background Radiation

DAI Cong-ming^{1,2}, CHEN Xiu-hong¹, WEI He-li¹

(1. Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The characteristics of long-wavelength infrared background radiation from upper atmosphere are the important research topics for target recognition and infrared radiation characteristic measurement. According to the NRLMSIS-00 empirical atmosphere model, the influence of the temperature and gas concentration of upper atmosphere on infrared radiation is analyzed. By using SHARC, the upper atmospheric radiance code, the upper atmospheric background radiation in different observation positions and different atmospheric modes is calculated numerically and analyzed theoretically in the waveband from $6 \mu\text{m}$ to $15 \mu\text{m}$. The result shows that the long-wavelength infrared radiation of upper atmosphere can be attenuated with the increase of limb tangent height, can be enhanced with the increase of observation zenith angle and can be attenuated with the increase of solar zenith angle. The aurora and twilight are of importance to the enhancement of the upper atmospheric long-wavelength infrared radiation and the upper atmospheric long-wavelength infrared radiation can be varied with the change of latitude and season. This analysis is of reference value to the space target sensing and infrared remote sensing.

Key words: upper atmosphere; background radiance; SHARC; long-wavelength infrared

收稿日期: 2012-07-26

基金项目: 国家“863”高技术计划项目

作者简介: 戴聪明(1987-), 男, 江西崇仁人, 博士研究生, 主要从事大气红外辐射传输研究。E-mail: hlwei@aiofm.ac.cn

0 引言

随着航空航天、红外制导以及卫星观测技术的快速发展和广泛应用,人们对空间目标光学特性提取精度的要求也越来越高。 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 长波红外波段是光电探测的重要窗口,包含了大量的大气环境背景信息。高层大气气压低,组分稀薄,而且容易受到太阳地磁活动的影响。这种环境特性对此区域中弱辐射目标的探测与跟踪提出了严重挑战。国外已对高层大气的红外辐射特性开展了一系列的研究。文献 [1-3] 从理论上研究了高层大气辐射传输模式,并用航天飞机及卫星上搭载的红外探测器对高层大气环境进行了多次辐射测量实验 [4-7], 获得了大量高层大气背景辐射信息。例如,由美国导弹防卫组织 (BMDO) 发射的中程空间实验卫星 (MSX) 上搭载的空间红外图像望远镜 (SPIRIT III) 可以在 $6.8 \sim 25.1 \mu\text{m}$ 波长范围内探测天空背景和地球临边红外辐射。

目前国内学者已对高层大气温度分布及原子氧浓度进行了相关研究,同时还开展了对 OH 和 O_2 的夜气辉观测研究 [8-9], 但有关高层大气长波红外辐射特性的理论分析和仪器实地测量工作尚未见诸报道。随着未来临近空间技术开发的兴起 [10], 若要建立高精度的地基、空基和星基红外探测系统, 则须深入了解高层大气环境对高层大气长波红外辐射的影响, 并建立精确的高层大气红外辐射传输模式。

高层大气辐射传输软件 (简称 SHARC) 是由美国空军物理地球实验室开发的一款大气光谱辐射和透过率计算软件。它能根据高层大气碰撞化学动力学过程, 利用单谱线等效带宽近似模拟计算 $30 \sim 300 \text{ km}$ 高空内任意射线路径上的 $2 \sim 40 \mu\text{m}$ 大气光谱辐射和光谱透射率 [9]。该软件所需的大气模式参数由其附带的 SHARC 大气生成器 (SAG) 提供 [10]。通过向其输入特定季节、经纬度、地方时以及日地活动指数等参数, 可以生成与 SHARC 相兼容的大气成分和动力学温度廓线。因此, 本文对不同观测位置和大气环境下

的高层长波红外背景辐射进行模拟分析, 并分析影响高层大气背景辐射的主要参数, 最后得到结果以供相关研究参考。

1 高层大气物理特性

1.1 大气成分垂直分布特性

波长在 $5 \mu\text{m}$ 以上的高层大气红外辐射的外部辐射源主要是地表及低层大气的向上辐射、入射太阳辐射和大气自身热辐射, 它们会影响地面反照光激发速率、太阳光激发速率和大气激发速率。其中, 大气成分及温度垂直结构分布特性对长波红外辐射具有重要影响 [11]。目前, 高层大气的气体浓度值主要来源于历年的高空气球、火箭以及卫星等的实测数据。在此基础上, 通过经验模式耦合得到全球各经纬度上空的大气模式 [12]。图 1 所示为美国空军地球物理实验室常用的北纬 35° 白天大气模式中的各气体成分数密度的垂直分布廓线。由图 1 可知, 作为混合比最大的两种碰撞中性分子, N_2 和 O_2 的第一电离激发态 $\text{N}_2(1)$ 和 $\text{O}_2(1)$ 会直接作用于主动红外辐射气种的碰撞激发; 原子氧主要来自于 O_2 光解离和能量粒子作用离解, 在 90 km 以上的低热层, 原子氧作为主要的碰撞物种, 其浓度严重影响着气体成分的碰撞 (辐射) 过程; 由中间层及其以下区域向上输送到热层的 CO_2 、 H_2O 和 CH_4 , 其数密度均随高度呈指数衰减分布, 影响其红外辐射; O_3 、OH 和 NO 主要来自于化学结合和光化学反应, 其中平流层 O_3 浓度昼夜剧

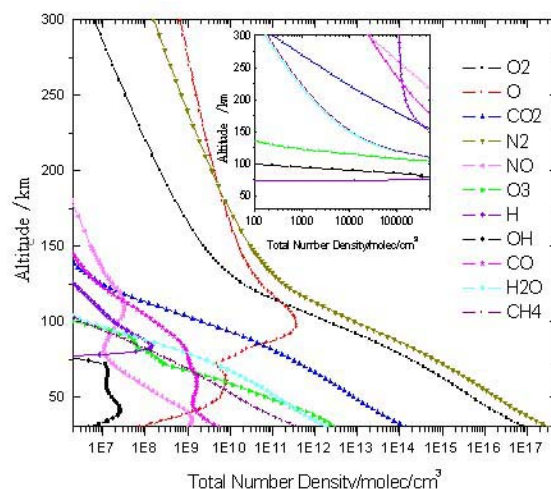


图 1 高层大气成分数密度的垂直分布廓线

烈变化, 白天受太阳光解离作用的影响, 浓度比夜晚时要低。在夜晚条件下, 30 ~ 100 km 处的 OH 自由基数浓度剧烈增加, 其夜气辉较强。而 NO 是 150 km 以上区域内的主要红外气体, 其辐射特性易受地磁空间环境的影响。重力加速度和气压梯度力共同作用于高层大气, 使之产生垂直运动。

1.2 大气气压和温度垂直分布特性

辐射和碰撞过程作为高层大气最重要的作用机理, 其碰撞和光化学反应的速率常数依赖于大气温度, 对研究非局域热平衡条件下的气体分子振动能级数目至关重要^[12]。图 2 所示为美国空军地球物理实验室常用的北纬 35° 白天大气模式中的温度和气压廓线。它主要来自于 NRLMSISE-00 经验模型。文献 [13] 将 NRLMSIS-00 经验模型产生的大气模式分别与 MSIS-00 和 Jacchia-70 大气模式进行了比较。结果表明, NRLMSIS-00 经验模型具有较高的可靠性。在 30 ~ 50 km 平流层区域内, 温度随高度的升高而上升, 在平流层顶部达到 270 K 左右; 在 50 ~ 90 km 的中间层区域内存在较强的垂直对流运动, 此时温度随高度的升高而下降; 太阳紫外辐射和高纬地区高能粒子的沉降作用会使 90 km 以上区域内的温度随高度的升高而增加 (在 300 km 高度处, 温度接近于 1000 K)。徐寄遥等人^[14] 对比分析了 NRLMSIS-00 经验模型与 SABER 探测器实测的温度在全球范围内的分布特性。他们发现, 在中间层以下区域, 经验模型与卫星探测的大气温度随高度的分布情况比较一致; 而在低热层区域, 经验模型计算的温度分布与卫星遥感探测结果之间存在较大的差异。在中层顶区域, 经验模型不能给出低纬地区春分季节时中间层逆温的分布特性。因此, 在用由 NRLMSIS-00 经验模型产生的大气模式去模拟低热层以上的大气红外辐射时, 大气参数的不确定性会使计算出的大气红外背景辐射产生一定的偏差。大气气压基本上会随高度的升高而呈指数衰减趋势, 120 km 以上的大气气压递减率比 120 km 以下区域的大得多。在 300 km 高度处, 大气气压小于

10^{-6} Pa, 分子间的碰撞作用远小于分子辐射跃迁及光子交换, 处于典型的非局域热平衡状态。

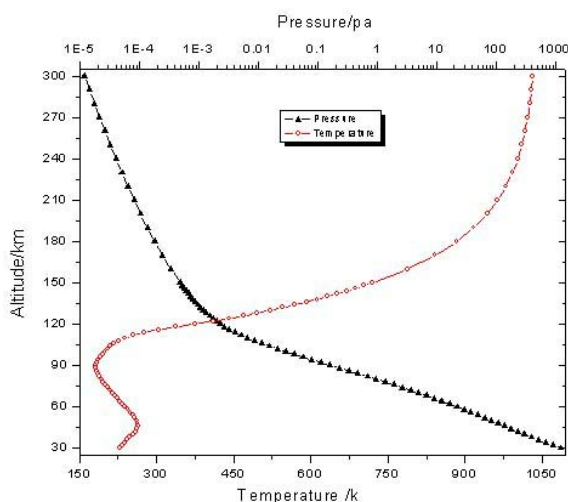


图 2 高层大气温度和压力高度分布廓线

2 不同观测位置的高层大气长波红外辐射特性

为模拟不同大气环境下高层大气的长波红外辐射特性, 用 SAG 生成了相应日地空间环境下的大气参数。表 1 列出了 SAG 默认的各项输入参数数值。以下模拟计算时所涉及的大气参数, 如未作特殊说明, 均是在默认输入参数下生成的。

表 1 SAG 默认输入参数数值

参数	单位	代号	数值
局地太阳时间	小时	白天	12 ^a
		晚上	0 ^a
纬度	度	赤道	5
		中纬度	35
		高纬度	65
一年天数		冬季	66
		春季	157
		夏季	248
		秋季	339

^a 经度设为 0°

2.1 临边切线高度的影响

图 3 所示为卫星临边遥感观测路径。其中, Z_0 为切线高度, ϕ_T 和 θ_T 分别为观测点处的太阳方位角和太阳天顶角。为获得高层大气背景

辐射的垂直分布特性, 选取以下计算参数: $6 \sim 15 \mu\text{m}$; 北纬 35° 局地白天大气; 观测高度为 900 km ; 观测方向和太阳的方位角之差为 0° ; 太阳天顶角为 28.26° ; 射线切线高度分别为 30 km 、 50 km 、 100 km 、 200 km 和 300 km 。图 3 所示为得到的结果。 800 cm^{-1} 以下区域的大气发射辐射非常强, 包含了几个重要的 $\text{CO}_2(\text{v}_2)$ $15 \mu\text{m}$ 光谱带。在 $800 \sim 900 \text{ cm}^{-1}$ 大气窗区, 单条临边射线的路径辐射很弱。 $900 \sim 1200 \text{ cm}^{-1}$ 区域内主要包含 $\text{O}_3(\text{v}_3)$ 光谱带 (1042 cm^{-1}) 和 CO_2 激光光谱带, 前者主要由低层大气向上反射的光所激发, 后者深受太阳光泵浦作用。 $1200 \sim 1600 \text{ cm}^{-1}$ 波段内包含了 $\text{H}_2\text{O}(\text{v}_2)$ 纯转动光谱线和 1311 cm^{-1} 附近的 $\text{CH}_4(\text{v}_4)$ 光谱带。

对 $833 \sim 1250 \text{ cm}^{-1}$ 波段进行积分, 得到昼夜通带辐射随切线高度的变化情况 (见图 4 中的右图)。显然, 昼夜通带辐射基本上是随切线高度的升高而减弱的。昼夜相对平均辐射偏差廓线表明, 60 km 以下区域内的昼夜通带辐射差别不大, $60 \sim 120 \text{ km}$ 内的大气夜晚背景辐射强于

白天, 尤其是在 102 km 附近, 昼夜通带辐射偏差可达到极大值, 因为臭氧 $9.6 \mu\text{m}$ 强辐射带在探测窗口积分辐射中占据主导地位。在白天, 这一区域的臭氧被光解, 其浓度比夜晚时低, 而且大气温度低于夜晚值。在 120 km 以上区域内, 白天太阳紫外光子对 N_2 、 O_2 及原子氧进行光电离、光离解等过程, 大气温度升高, 其长波红外辐射比夜晚时强。对于临边探测的长波红外光电系统, 应考虑高层大气长波红外辐射的高度差异和太阳光照的时间变化。

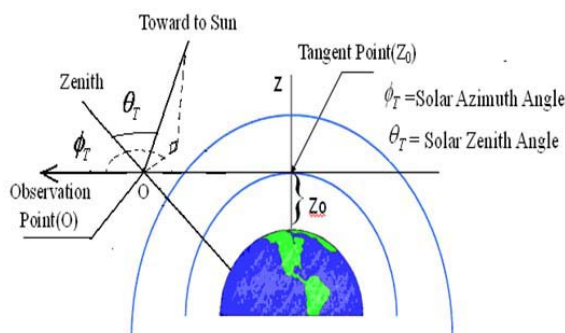


图 3 临边视线观测几何路径

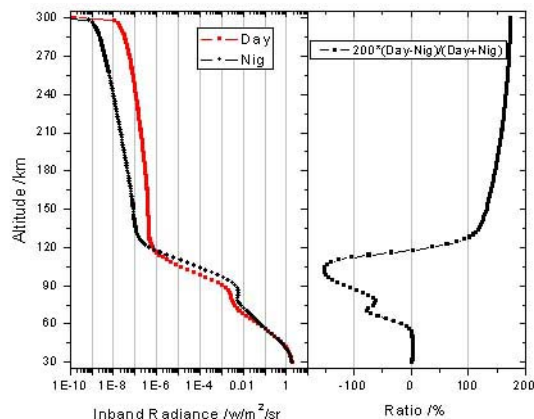
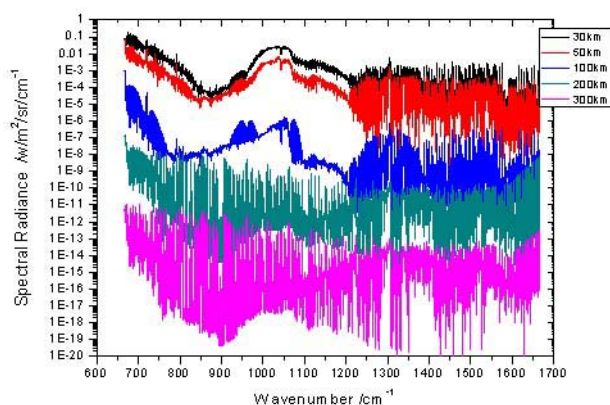


图 4 不同射线切线高度处的临边辐亮度

2.2 观测天顶角的影响

倾斜观测天顶角的大小会影响气体对热辐射的吸收, 观测辐射也会随之变化。当观测方向与太阳方位角之差为 0° 时, 选取以下计算参数: $6 \sim 15 \mu\text{m}$; 7 月北纬 45° 的大气参数; 观测点的经纬度为 (90°E , 15°N), 高度为 30 km ; 太阳天顶角为 22.5° 。图 5 所示为通带辐亮度随

观测天顶角 ($0^\circ \sim 180^\circ$) 的变化趋势。其中, 天顶角小于 90° 表示向上观测时大气向下的背景辐射; 天顶角大于 90° 表示对地观测时地表和大气向上的背景辐射。 30 km 以下的低层大气处于局域热力学平衡状态, 其热辐射可用我们最近研制的通用辐射大气传输计算软件 (CART) ^[15] 进行计算。计算参数如下: 中纬度夏季模式大气;

乡村型气溶胶; 能见度为 25 km; 观测天顶角为 $90^\circ \sim 180^\circ$ 。

由图 5 中的曲线分布可知, 当观测天顶角在 $0^\circ \sim 60^\circ$ 之间变化时, 高层大气的向下辐射缓慢增加。当观测天顶角为 0° 时, 通带积分辐射为 $0.93 \text{ W/m}^2/\text{sr}$ 。 60° 观测天顶角下的积分辐亮度较 0° 时增强了 38.36 %。当观测天顶角在 $60^\circ \sim 90^\circ$ 范围内变化时, 高层大气的向下辐射显著增强。其中, 90° 观测天顶角下的积分辐亮度是 60° 时的 3.45 倍, 因为在大观测天顶角的略射方向上, 倾斜路径上的气体光学厚度更大, 自发辐射更强。另外, 当观测天顶角在 $90^\circ \sim 120^\circ$ 范围内变化时, 30 km 以下低层大气的向上辐射会随观测天顶角急剧增强。观测天顶角为 120° 时的辐射强度是 90° 时的 10.2 倍, 低层大气的垂直向上辐射较 120° 时增强了 8 %。在水平方向上, 两种辐射传输模型所计算的积分辐射的相对平均偏差为 2.03 %, 因为高低层的大气模式及低层大气向上辐射存在差异。

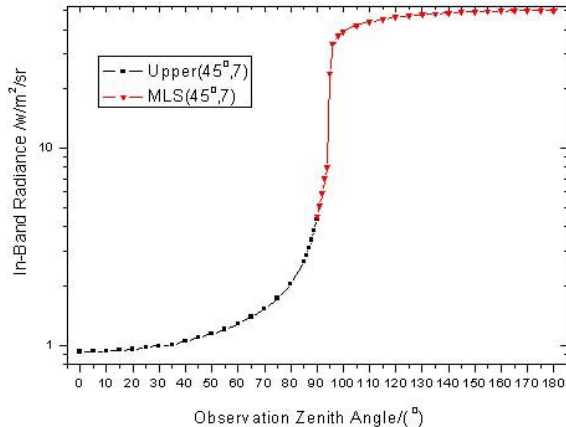


图 5 通带辐射随观测天顶角的变化

2.3 太阳天顶角的影响

高层大气吸收入射太阳辐射后, 诱发热层 N_2 、 O_2 及原子氧发生光电离和光离解过程, 产生的 $\text{O}_2(1)$ 和 $\text{N}_2(1)$ 激发态与 CO_2 、 O_3 、 NO 等进一步发生碰撞, 改变其在各个高度层上的分子激发速率, 影响其振动能级分布。为说明太阳辐射对高层大气热辐射的影响特性, 选取以下计算参数: $6 \sim 15 \mu\text{m}$ 波段; 观测高度为 900 km; 射线切线高度为 50 km; 观测方向与太阳方位角

之差为 0° ; 太阳天顶角分别为 0° 、 10° 、 20° 、 $\dots$ 、 90° 。从图 6 中可以看出, 通带辐射会随太阳天顶角的增加而逐渐减小。当太阳天顶角小于 40° 时, 通带辐亮度随太阳天顶角缓慢变化。太阳天顶角 0° 和 90° 方向上的临边辐亮度大约相差 1.46 %。太阳天顶角的大小对高层大气长波红外辐射有一定影响。

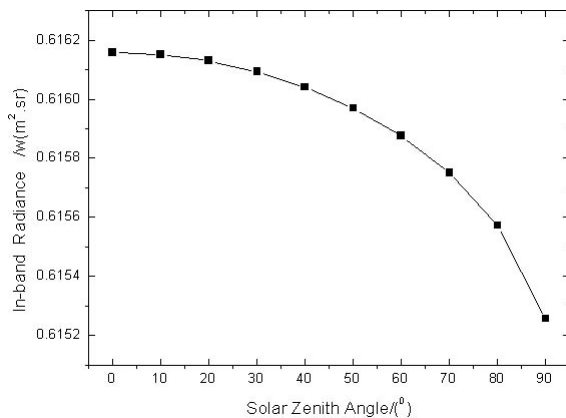


图 6 通带辐射随太阳天顶角的变化

3 不同大气条件下的高层大气背景辐射特性

3.1 曙暮辉的影响

由于分子的瑞利散射、振动激发和碰撞作用机理的存在, 太阳明暗边界区域呈现微弱发光现象, 影响大气热辐射。用 SAG 生成太阳天顶角为 91° 、 94° 、 97° 、 99° 、 102° 、 105° 和 108° 时的大气参数。在 900 km 高度处, 计算 50 km 切线高度时的临边通带辐射, 其结果见图 7。在靠近夜晚的明边界区域, 50 ~ 110 km 区域内的臭氧浓度随太阳天顶角的增大而迅速增加, 通带辐射也随之增强。例如, 102° 太阳天顶角下的通带辐射较 91° 时增加了 3.73 %; 当太阳天顶角在 $102^\circ \sim 108^\circ$ 之间时, 大气几乎处于黑暗状态, 同一高度层上的气体分子含量 (尤其是臭氧浓度) 和大气温度随太阳天顶角的变化不大, 通带辐射随太阳天顶角的变化缓慢。 108° 太阳天顶角下的通带辐亮度比 91° 时增加了 3.95 %。因此, 在曙光区域中, 太阳辐射的增强会导致臭氧浓度降低, 使其 $9.6 \mu\text{m}$ 光谱带的辐射减弱。

3.2 极光的影响特性

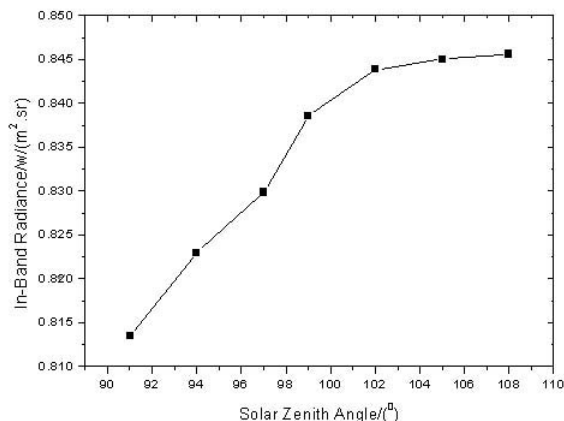


图 7 曙光区域中通带辐亮度随天顶角的变化

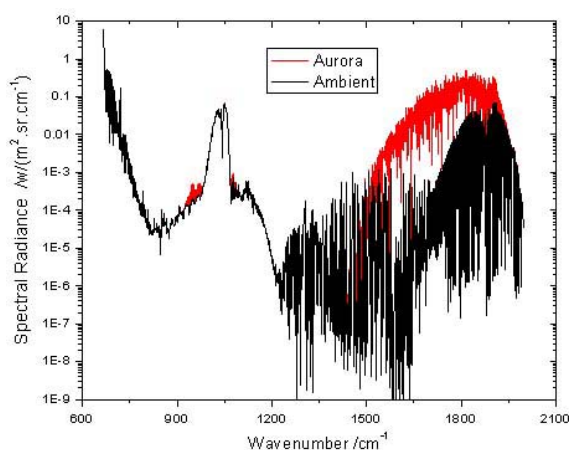


图 8 静态和极光大气条件下的光谱辐亮度

磁层带电粒子沉降到高层大气中,与中性气体发生碰撞并使之电离。为说明极光条件下高层大气的长波红外辐射特性,选取 72°N 局地夜晚大气为参数,以 MSX 中程空间卫星 1996 年 11 月 10 日观测到的极光事件^[16]为例,在 900 km 处模拟 103 km 切线高度处 5~15 μm 波段的临边光谱辐射。极光存在区域为: 80~120 km, 横跨的经纬度为 (10°E, 70°N)、(10°E, 73°N)、(25°E, 73°N)、(25°E, 70°N)。极光的持续和观测时间分别为 100 s 和 25 s。入射极光的能量通量为 30 ergs/cm²/s。图 8 所示为极光存在和静态大气条件下的临边光谱辐射。在 1500 cm⁻¹ 以下波段,极光背景辐射增强作用不明显。在 1500~1950 cm⁻¹ 波段,极光大气下的通带积分辐射为 8.55E-2 W/m²/sr,静态大气下的通带积分辐射为 5.36E-3 W/m²/sr,即极光存在条件下的大气背景辐射比静态大气要强近 15 倍。在静态大气条件

下, NO 5.3 μm 辐射主要包含了 NO 基本振转光谱带^[17]。即 5.3 μm 光谱带中的 P 和 R 支光谱来源于静态 NO(v=0) 和原子氧的碰撞及反应方程式 $N(^4S)+O_2 \rightarrow NO+O$ 。在极光事件中, $N(^4S)$ 原子浓度增强,而且新生成了 $N(^4D)$ 原子。大量 $N(^4S)$ 、 $N(^4D)$ 原子和 O_2 反应生成了高转动和振动的 NO 激发态,导致 5.3 μm 光谱带中 P 支和 R 支光谱均比静态大气条件下要强。

3.3 纬度的影响

在中等太阳和地磁活动条件下,利用 SAG 生成北半球夏季不同纬度下的大气模式,分别为赤道地区 (Tropical, 太阳天顶角为 1.7°)、中纬度地区 (Midlatitude, 太阳天顶角为 28.24°) 和高纬度地区 (Subarctic, 太阳天顶角为 58.23°) 大气模式。模拟不同纬度地区下的临边辐射廓线,其结果见图 9。

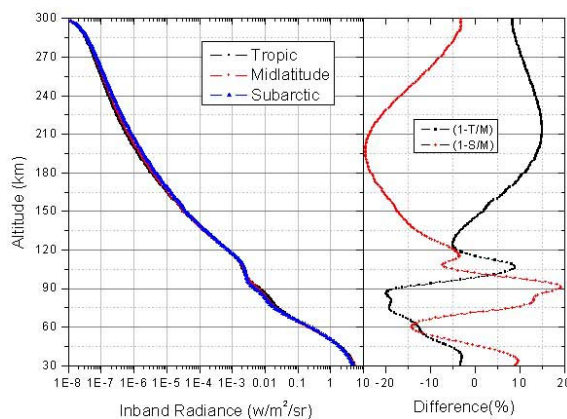


图 9 高层大气背景辐射随纬度的变化特性

由图 9 可知,不同纬度下同切线高度的临边辐射不尽相同。在 150 km 以上区域内,纬度越高,大气临边辐射越强。这可能是由于高纬度地区的电子、离子浓度比较高,主动红外辐射气体的离解作用更强造成的。在 150 km 以下区域内,大气临边辐射随切线高度的变化情况较为复杂。在 100~125 km 区域内,高纬度地区与低纬度地区的背景辐射偏差均在 10% 以内,表明此高度区域内大气背景辐射的纬向分布不明显。在 70~100 km 区域内,大气背景辐射满足纬度越低辐射越强的纬向分布特性。在 50~70 km 区域内,中纬度地区的大气临边辐射最弱。在 50 km 以下区域内,大气背景辐射满足纬度越

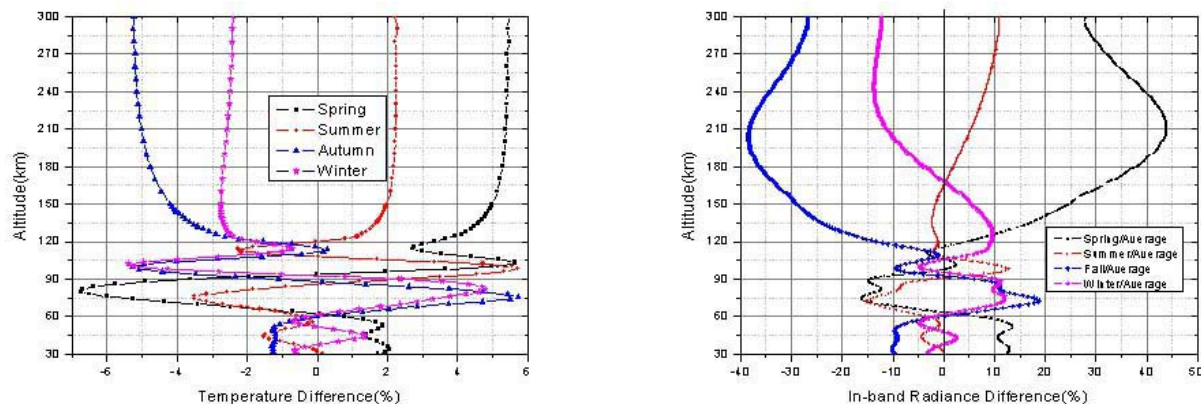


图 10 高层大气温度(左)和长波红外背景辐射(右)的季节变化特性

低辐射越强的纬向分布特性。

3.4 季节的影响

利用 SAG 生成 35°N 地区不同季节的大气模式, 模拟高层大气背景辐射随当地季节的变化特性。其中, 大气模式分别为中纬度冬季(太阳天顶角为 50°)、春季(太阳天顶角为 20°)、夏季(太阳天顶角为 30°)和秋季(太阳天顶角为 60°)。在 900 km 观测高度上, 模拟相同观测路径上的临边热辐射, 其结果见图 10。其中, 左图所示为各季节的温度与四季平均温度的相对偏差曲线, 右图所示为各季节的临边辐射与四季平均辐射的相对偏差曲线。

从图 10 中可以看出, 在 125 km 以上区域内, 大气热辐射随季节的变化非常明显。尤其是在 180 km 以上区域内, 同切线高度层上的临边辐射随季节的变化与温度随季节的变化基本一致, 即春季温度最高, 背景辐射最强; 秋季温度最低, 背景辐射最弱。在 210 km 附近, 春秋季节的大气临边辐射差值超过 60%。90 ~ 120 km 中间层顶部和低热层区域内的大气临边辐射表现出同样的季节变化特性。在 114 km 附近的大气温度随季节的变化值约为 5% 左右。在 75 ~ 90 km 区域内, 秋季相同大气层的温度最高, 春季最低, 冬季则高于夏季。而此区间内临边辐射随季节的变化特性与温度随季节的变化特性是一致的。在 30 ~ 60 km 中间层, 春季的大气背景辐射最强, 秋季的最弱, 冬季和夏季的大气背景辐射随切线高度的升高而呈现交替变化态势。

4 结束语

本文利用高层大气经验模型 NRLMSIS-00 和高层大气辐射传输软件 SHARC, 对不同观测位置和大气模式下的高层长波红外辐射进行了数值模拟。结果表明, 对于临边遥感而言, 高层大气长波红外辐射会随切线高度的增加而近似呈指数衰减。倾斜向下辐射会随观测天顶角的增加而增强。曙暮光及极光对高层大气红外辐射具有重要的增强作用。另外, 高层大气长波红外辐射存在季节和纬度的变化特性。分析高层大气环境对其长波红外背景辐射的影响特性, 有助于加深人们对高层大气能量动力过程的理解和提高对大气温度及气体组分浓度的遥感探测水平, 对高空红外光电系统探测器的设计及性能评估具有非常重要的参考价值。

参考文献

- [1] Adler-Golden S M, Berk A, Acharya P K, et al. Infrared Airglow and Contamination Modeling, ADA405178 [R]. Burlington: Spectral Sciences Inc, 1999.
- [2] Hansen P, Lauzzana R, Hajime S, et al. Theoretical Study of Background Radiance in Upper Stratosphere, ADA057249 [R]. Amherst: Massachusetts Univ, 1977.
- [3] Wintersteiner P P, Paboojian A J, Joseph R A. Studies of NON-LTE Atmospheric Emission: Modeling and Data Analysis, ADA325464 [R]. Waltham: Arcon Corp, 1996.

(下转第 40 页)