

中高层大气背景红外辐射特性及成像研究

施杰, 史波*, 金峰, 邢世林, 缙伟隆

南京航空航天大学能源与动力学院, 江苏 南京 210016

摘要 以中高层大气背景的红外辐射特性和红外成像为研究目的, 建立中高层大气背景探测模型和红外成像模型, 分析中光谱分辨率大气辐射传输模式(MODTRAN)在红外波段的适用范围, 利用战略高空辐亮度代码(SHARC)仿真分析 3~5 μm 波段不同观测参数下的中高层大气背景红外辐射特性, 并建立相关辐射特性数据库, 完成中高层大气背景红外辐射场景成像仿真。结果表明: 3~5 μm 和 8~12 μm 波段 MODTRAN 分别在切点高度 50 km 和 70 km 以下具有较好的计算精度; 中高层大气背景辐亮度随着切点高度和太阳天顶角的增大而减小, 随着观测天顶角的增大而增大; 短路径和长路径的辐射特性分别由路径长度和处于低层大气的路径大气参数占主导影响; 白天和夜晚的辐亮度分别在 36 km 和 34 km 为最大值, 在 75 km 和 85 km 处为极大值。研究结果可为中高层大气背景红外探测提供理论支持。

关键词 中高层大气; 红外辐射; 临边背景; 红外成像; 数据库

中图分类号 P407.6

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP231310

The Study of Characteristics and Imaging of Infrared Radiation of Middle and Upper Atmosphere Background

Shi Jie, Shi Bo*, Jin Feng, Xing Shilin, Gou Weilong

College of Energy and Power, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, Jiangsu, China

Abstract This study proposes an infrared imaging and detection model to address infrared imaging and radiation characteristics of the middle and upper atmospheric background. The applicability of the medium spectral resolution atmospheric radiation transfer mode (MODTRAN) in the infrared band is analyzed, and the strategic high-altitude radiance code (SHARC) is utilized to simulate and analyze the infrared radiation characteristics of the middle and upper atmospheric background under different observation parameters in the 3–5 μm band. Furthermore, a relevant radiation characteristic database is established to complete imaging simulation for infrared radiation scenes in the middle and upper atmospheric background. The results demonstrate that the MODTRAN in the 3–5 and 8–12 μm bands has good computational accuracy at tangent heights below 50 and 70 km, respectively; middle and upper atmospheric background radiance decreases with the increase in the tangent height and solar zenith angle, however, this increases with the observed zenith angle increase; short and long path radiation characteristics are primarily influenced by the path length and atmospheric parameters in the lower atmosphere, respectively; the radiance during the day and night reaches its global maximum at 36 and 34 km, respectively, and local maximum at 75 and 85 km. The results provide theoretical support for the infrared detection of middle and upper atmospheric backgrounds.

Key words middle and upper atmosphere; infrared radiation; limb background; infrared imaging; database

1 引言

大气临边环境在基础科学、气候环境、国防军事等领域显现出越来越重要的价值^[1], 例如大气动力学^[2]、空间科学、空间天气预报^[3]、飞行器空间导航定位^[4]和中高层大气温度反演研究^[5]等。中高层大气在军事领域中具有极其重要的战略价值^[6], 红外波段具有独特

而重要的作用, 例如弹道导弹红外预警^[7]、卫星遥感探测、目标探测识别等。但是国内相关的测量实验和模拟仿真研究较少, 因此关于中高层大气背景红外辐射特性和其红外成像的研究具有重要意义。

strategic high-altitude radiance code (SHARC) 是美国空军研究实验室开发的专门用于中高层大气红外辐亮度计算的程序, 可在 1~40 μm 范围内, 采用快速

收稿日期: 2023-05-15; 修回日期: 2023-07-21; 录用日期: 2023-08-08; 网络首发日期: 2023-08-21

通信作者: *boshi@nuaa.edu.cn

算法模拟计算 30~300 km 范围内任意视线路径上的大气红外辐亮度和光谱透过率^[8-9]。

刘栋等^[10-11]模拟了 sounding of the atmosphere using broadband emission radiometry (SABER) 传感器观测的中高层大气 CO₂ 15 μm、4.3 μm 宽带通道临边辐亮度,验证了 SHARC 的可靠性,同时进行了 local thermodynamics equilibrium (LTE) 与 non-local thermodynamics equilibrium (non-LTE) 模式的模拟研究,给出了不同计算模式的适用波段和高度区间。戴聪明等^[12]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,研究了中高层大气在不同观测条件、光学现象和大气环境环境下的临近空间大气背景辐射。

目前国内对于红外探测成像模拟的研究相对较少,本文针对该问题:首先分析中光谱分辨率大气辐射传输模式的局限性并验证 SHARC 计算的精确性;然后建立探测视线模型和红外成像模型,在 3~5 μm 波段,利用 SHARC 分析不同观测参数、不同大

气条件下的中高层大气红外辐射特性;最终建立中高层大气红外辐射特性数据库,通过编程实现特定观测参数下的红外辐射背景图像仿真。本文研究结果可为中高层大气背景红外探测提供一定理论支持。

2 中高层大气探测模型

中高层大气背景探测模型如图 1 所示,大气底层和顶层高度分别为 30 km 和 300 km,图中:地球平均半径为 R ,观测点为 H_1 ,观测高度为 H ,观测视线路径为 H_1H_2 , S 为太阳位置;由地心 O 出发与 H_1H_2 的垂线交 H_1H_2 于 H_0 , H_0 与地表的距离为切点高度 D ;地心 O 和 H_1 的连线延长线与 H_1H_2 的夹角称为观测天顶角,与 SH_1 连线的夹角称为太阳天顶角。

图 1 为中高层大气背景探测模型,若视线路径包含切点,则称该路径为长路径,反之则称该路径为短路径。长路径 H_1H_2 称为“临边观测”,短路径 H_1H_3 称为“斜程观测”。

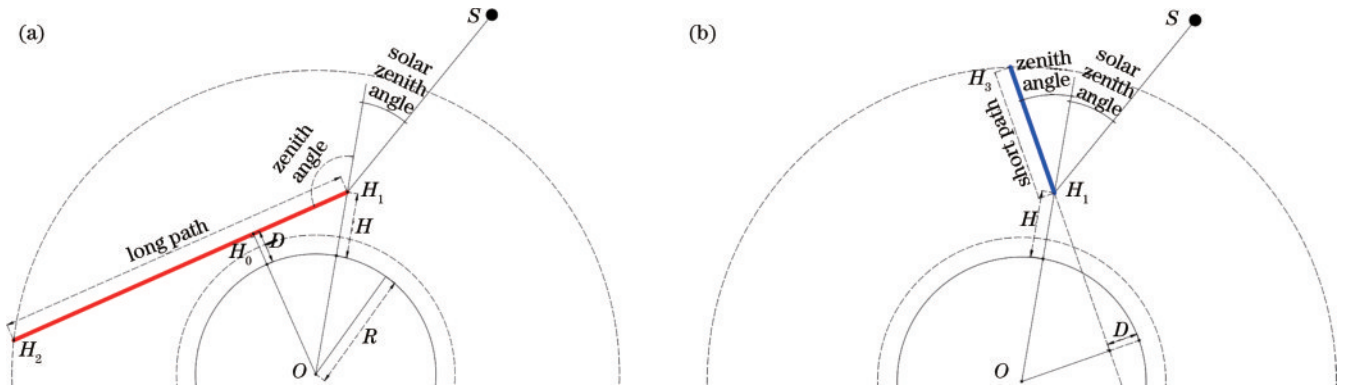


图 1 中高层大气背景探测模型。(a)临边观测;(b)斜程观测

Fig. 1 Middle and upper atmosphere background detection model. (a) Limb view; (b) slant view

3 SHARC 精确性和 MODTRAN 局限性

thermosphere ionosphere mesosphere energetic and dynamic (TIMED) 卫星于 2001 年 12 月 7 日发射,卫星轨道为太阳同步轨道,轨道高度为 625 km,轨道倾角为 74.1°。sounding of the atmosphere using broadband emission radiometry (SABER) 是一个搭载在 TIMED 卫星上的 10 通道辐射计,在近红外和中红外范围扫描临边获得大气红外辐射数据,扫描波段范围为 1.27~17 μm (650~7865 cm⁻¹),高度范围为 5~

400 km。数据经过处理后能够提供垂直高度分辨率为 2 km 的大气温度廓线以及 O₃、H₂O、CO₂ 等大气成分浓度廓线。SABER 辐射计的部分测量参数及应用如表 1 所示^[13]。

在中纬度夏季大气模式下,利用 SABER 第 7 通道 (2320~2400 cm⁻¹) 的测量数据和 SHARC 在同观测参数下的仿真数据进行比较,验证 SHARC 对中高层大气背景红外辐射模拟计算的精确性。图 2 为中纬度夏季条件下 SABER CO₂ 4.3 μm 通道临边背景辐射亮实测廓线与 SHARC 模拟数据对比。可以看出,SHARC

表 1 SABER 测量参数及应用

Table 1 SABER measurements and applications

Parameter	Wavelength λ_0 / μm	Application	Altitude Range h_0 / km
CO ₂	14.9 and 15.0	Temperature, density, non-LTE	10-130
O ₃	9.3	O ₃ conc, cooling rates, solar heating	15-105
CO ₂	4.3	CO ₂ conc, mesosphere solar heating;	85-150
NO	5.3	Thermosphere cooling, NO _x chemistry	90-180
H ₂ O	6.9	HO ₃ source gas, dynamical tracer	15-80

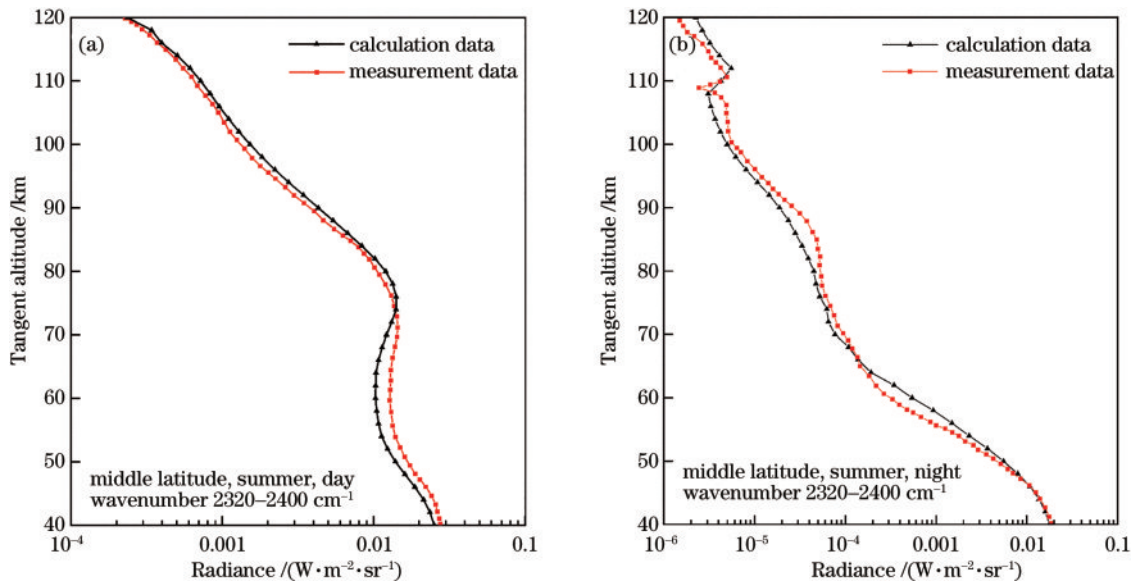


图 2 SHARC 模拟 2320~2400 cm^{-1} 波段临边背景辐亮度廓线与实测背景辐亮度廓线对比。(a) 白天条件; (b) 夜晚条件
Fig. 2 The comparison of 2320~2400 cm^{-1} band limb background radiance profile simulated by SHARC and the measured background radiance profile. (a) Daytime condition; (b) night condition

模拟值和 SABER 实测值在趋势上整体保持一致, 在 50~70 km 范围内辐射亮度存在一定偏差。存在偏差的原因主要可归结于两方面: 一方面是由于 CO_2 4.3 μm 带静态机制目前还没有被系统完善地解决, SHARC 算法在模拟 CO_2 4.3 μm 带静态机制时存在一定偏差; 另一方面是模拟输入的几何参数、大气参数和实际情况参数不完全匹配而产生的误差^[14-17]。因此基于以上分析可以认为在中高层大气背景红外辐射计算方面, SHARC 的精确性满足本研究的需求。

图 3 为中纬度夏季大气模式下 MODTRAN 和 SHARC 在 3~5 μm 和 8~12 μm 波段的辐亮度廓线

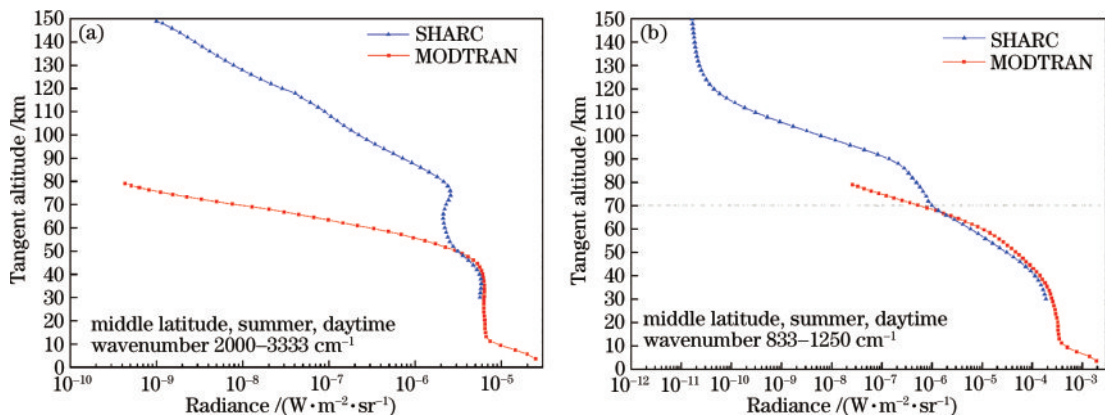


图 3 SHARC 和 MODTRAN 模拟临边背景辐亮度廓线对比。(a) 3~5 μm ; (b) 8~12 μm
Fig. 3 The comparison of limb background radiance profile simulated by SHARC and MODTRAN. (a) 3~5 μm ; (b) 8~12 μm

4 中高层大气辐射特性分析

通过临边和斜程两种观测路径, 分析不同纬度、季节、切点高度、观测高度、观测天顶角、太阳天顶角、方

对比, MODTRAN 计算切点高度变化范围设定为 0~80 km, SHARC 计算切点高度设定为 30~150 km。在 3~5 μm 波段, MODTRAN 计算结果在 50 km 以下较为准确, 而在 8~12 μm 波段 MODTRAN 计算结果在 70 km 以下比较准确, 这是因为切点高度到达一定高度后该区域内的气体热力学状态逐渐由局域热平衡状态向非局域热平衡状态转变, 此时 MODTRAN 采用 LET 算法模式不能准确模拟 non-LET 模式。因此采用 MODTRAN 进行大气临边红外辐射^[18] 计算有一定的局限性, 需要采用 SHARC 对中高层大气背景红外辐射计算进行修正。

位角和不同观测路径对中高层大气背景红外辐射特性的影响。

4.1 临边观测特性

图 4 为中纬度夏季昼夜条件下, 不同切点高度处

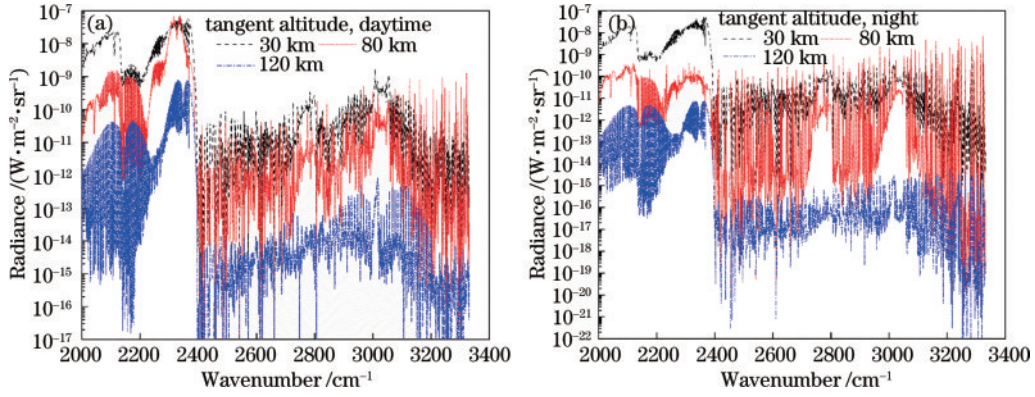


图 4 不同切点高度处的白天和夜晚 3~5 μm 波段临边辐亮度谱。(a) 白天条件; (b) 夜晚条件

Fig. 4 The limb radiance spectra of 3~5 μm band at daytime and nighttime at different tangent altitude. (a) Daytime condition; (b) night condition

的 3~5 μm (2000~3333 cm⁻¹) 临边辐亮度谱。由图 4 可知, 辐亮度的平均强度随切点高度升高而降低, 同一个切点高度下昼夜辐亮度强度的差异随切点高度的增大而增大。图 4(a) 中 3 个明显的波峰分别为 CO 4.7 μm 辐射带 (2050~2150 cm⁻¹)、CO₂ 4.3 μm 辐射带 (2200~2400 cm⁻¹ 波段包含) 和 CH₄ 3.4 μm 辐射带 (3000~3060 cm⁻¹)。其中, CO₂ 4.3 μm 辐射带数量级最大, 在 3~5 μm 占据主导作用。

中高层大气背景红外辐射受到纬度和季节影响呈现出不同的特性。采用 sharc atmosphere generator (SAG) 划分的季节和纬度参数如表 2 所示^[19]。图 5 展示的是在低、中、高等 3 种不同纬度下, 4 种典型季节昼夜的临边背景辐亮度廓线。

表 2 季节和纬度参数

Table 2 Seasonal and latitude parameters

Parameter	Designator	Value
Local solar time /h	Day	12
	Night	0
Day of year	Winter	66
	Spring	157
	Summer	248
	Fall	339
Latitude /N	Equatorial	5
	Mid	35
	High	65

由图 5 可知, 背景辐亮度廓线在整体趋势上都随着切点高度的增加而降低, 但是在切点高度 70~90 km 范围内昼夜都呈现出相反趋势, 这是因为太阳辐射对 CO₂ 4.3 μm 带相关能级的“泵浦”效应直接导致白天 4.3 μm 带辐射增强, 而夜晚振动激发态 OH 能量转化为 4.3 μm 辐射导致该切点高度区间内的辐射在一定程度上增强^[20-21]。对比图 5(a)、(c)、(e) 和图 5(b)、(d)、(f) 可知: 在低纬度, 季节变化对背景辐亮度影响不大, 随着纬度增加, 由季节导致的辐亮度差异

逐渐增大。

太阳辐射强度的变化会导致大气分子光化学反应过程发生变化, 太阳辐射强度可以通过太阳天顶角表征, 图 6 展示了中纬度夏季太阳天顶角随切点高度变化的辐亮度廓线。白天, 背景辐亮度强度整体上随太阳天顶角增大而小幅度减小, 但是切点高度处于 60~90 km 区间的辐亮度强度大幅度减小, 因为 CO₂ 分子能级的“泵浦”效应强度随太阳天顶角的增大而减弱; 夜晚, 太阳辐射没有直接导致分子能级的“泵浦”效应, 可认为夜晚太阳天顶角变化对中高层大气辐亮度变化没有直接影响。

4.2 斜程观测特性

图 7(a)、(b) 展示了斜程观测下短路径大气辐亮度廓线随太阳天顶角和观测天顶角变化的特征。由图 7 可知, 辐亮度随着太阳天顶角的增加而减小, 随着观测天顶角的增加而增加。辐亮度变化和路径长度有关: 当天顶角为 0° 时, 此时路径长度最短, 辐亮度最小; 天顶角 90° 时, 路径长度最长, 辐亮度最大。

4.3 长路径与短路径特性联系

图 8 为辐亮度廓线在长短路径下的变化特征, 定义 L 为观测高度为 150 km 时长路径长度和短路径长度之比:

$$L = \frac{S_{\text{Long}}}{S_{\text{Short}}}, \quad (1)$$

式中: S_{Long} 为长路径长度; S_{Short} 为短路径长度。

当观测高度为 150 km 时, 长路径长度随着切点高度的减小而增大, 短路径则相反。由图 8 可知, 长、短路径对应的辐亮度随着路径长度的增大而增大, 长路径辐亮度变化的幅度远大于短路径。在切点高度为 30 km 时, 长短路径长度之比为 4.93, 但是对应的长、短路径的辐亮度之比却达到 35689, 随着长、短路径长度之比接近 1, 对应的辐亮度数值逐渐接近, 在 150 km 处因为路径长度和大气参数相同所以长短路径辐亮度相等。因此路径辐射需要综合考虑路径长度和大气参数影响。

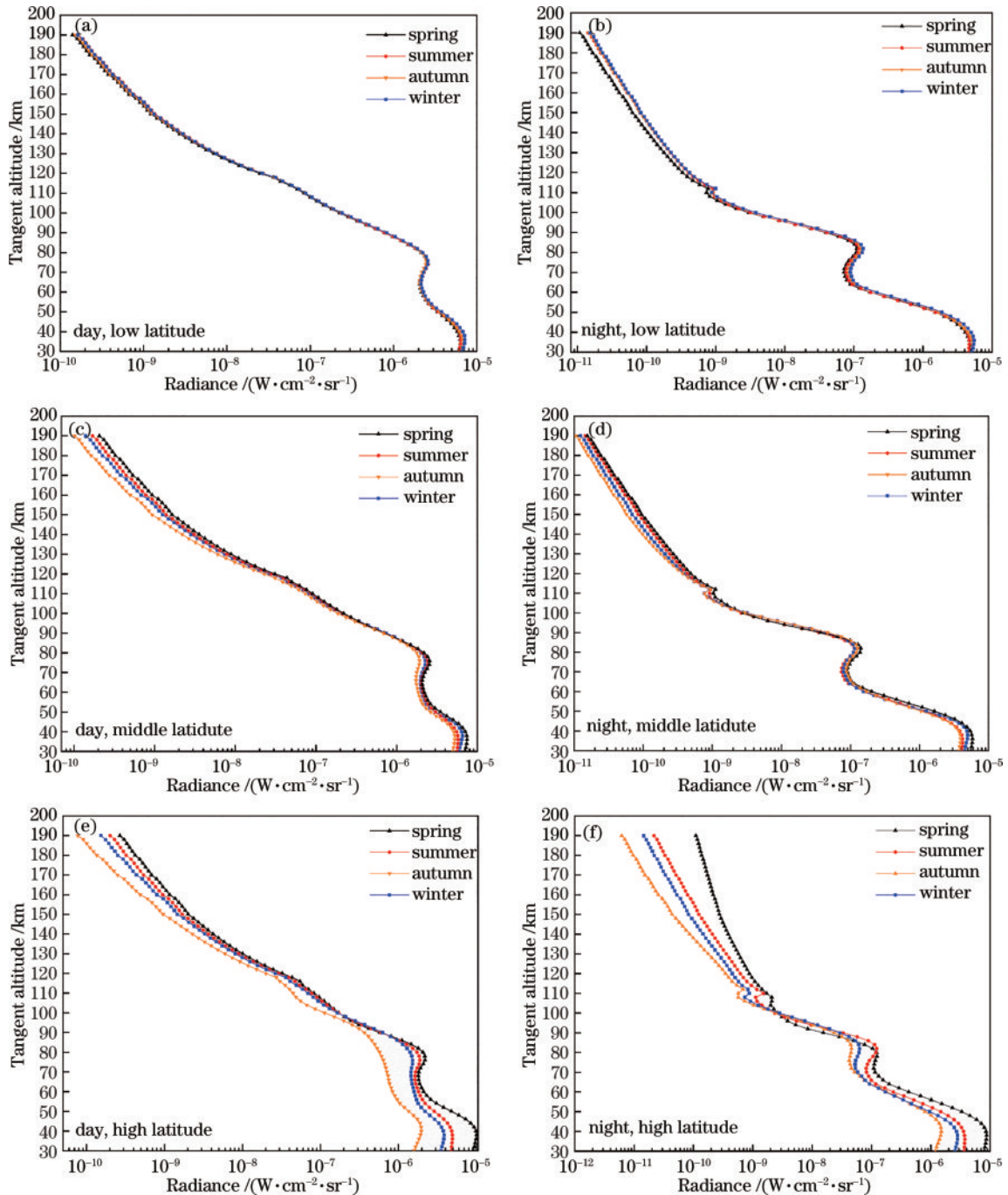


图 5 不同季节 3~5 μm 中高层大气背景辐亮度廓线不同纬度的差异。(a)低纬度白天;(b)低纬度夜晚;(c)中纬度白天;(d)中纬度夜晚;(e)高纬度白天;(f)高纬度夜晚

Fig. 5 The differences of 3-5 μm band middle and upper atmospheric background radiance profiles in different seasons at different latitude. (a) Low latitude daytime; (b) low latitude night; (c) middle latitude daytime; (d) middle latitude night; (e) high latitude daytime; (f) high latitude night

图 9(a)、(b)分别展示了中纬度夏季大气模式,长短路径,不同太阳天顶角和观测方位角下大气背景辐亮度廓线。由图可知,当太阳天顶角一定时,改变观测方位角,辐亮度廓线没有变化,而在不同太阳天顶角下辐亮度廓线变化明显。这是因为仿真中采用大气分层模型,在同一种大气模式下大气廓线只在高度方向变化,因此大气背景的辐亮度在高度方向变化明显。而

由方位角引起的太阳的散射辐射变化相对总的大气背景辐射而言量级很小,最终总辐亮度不随方位角改变而变化。因此太阳天顶角对太阳辐射变化占据主导影响,不同太阳天顶角下大气背景辐亮度变化明显,而不同观测方位角下大气背景辐亮度几乎不变。

图 10 为两种误差参数的变化特征,定义误差参数为

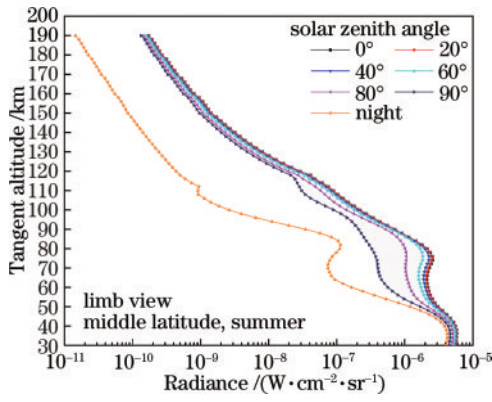


图 6 3~5 μm 中高层大气背景辐亮度廓线在不同太阳天顶角下的对比

Fig. 6 Comparison of 3-5 μm band atmospheric background radiance profiles at different solar zenith angles

$$\epsilon_1 = \frac{I_{Limb}^{300} - I_{Limb}^{150}}{I_{Limb}^{300}} \times 100\%, \quad (2)$$

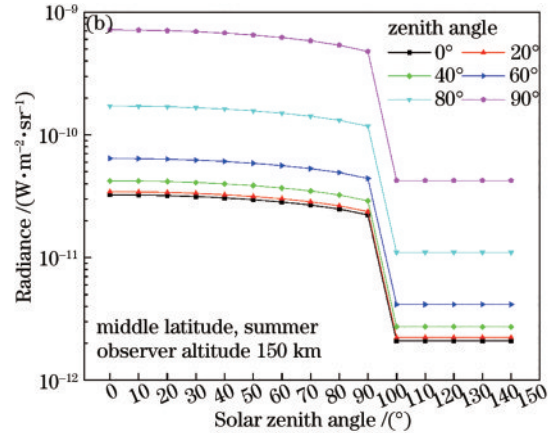
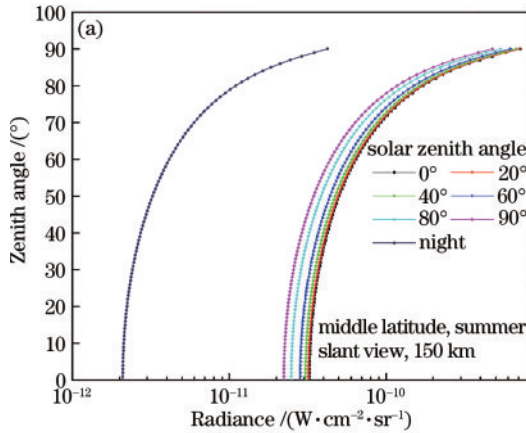


图 7 3~5 μm 中高层大气背景辐亮度廓线在不同太阳天顶角和观测天顶角的对比。(a)不同太阳天顶角;(b)不同观测天顶角

Fig. 7 Comparison of 3-5 μm band atmospheric background radiance profiles at different solar zenith angles and observer zenith angles.

(a) Different solar zenith angles; (b) different observer zenith angles

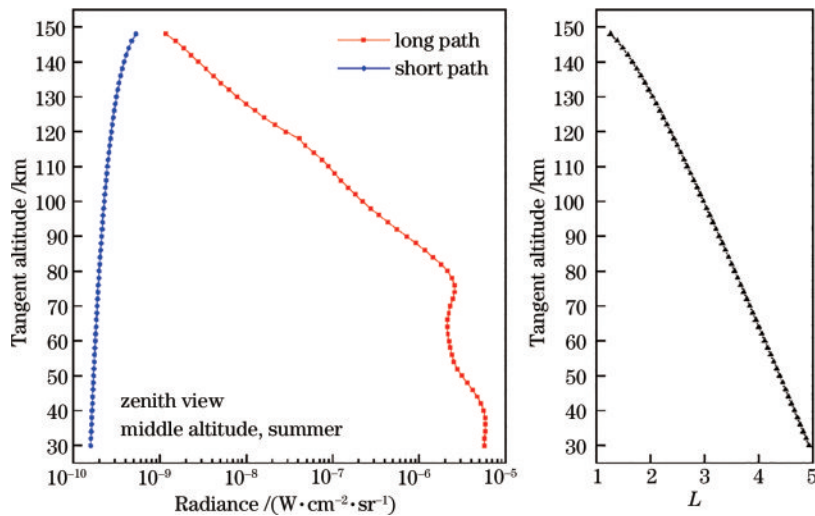


图 8 长、短路径辐亮度和路径长度之比的关系

Fig. 8 The relationship between long and short path radiance and the ratio of path length

$$\epsilon_2 = \frac{I_{Limb}^{300} - (I_{Limb}^{150} + I_{Slant}^{150})}{I_{Limb}^{300}} \times 100\%, \quad (3)$$

式中: I_{Limb}^{300} 为观测高度 300 km 临边观测路径的辐亮度; I_{Limb}^{150} 为观测高度 150 km 临边观测路径的辐亮度; I_{Slant}^{150} 为观测高度 150 km 斜程观测路径的辐亮度。

图 10 表明: 在切点高度 100 km 以下, ϵ_1 和 ϵ_2 都近似于 0%; 在切点高度 100 km 以上, 误差 ϵ_2 仍近似等于 0%, 而误差 ϵ_1 逐渐增大, 最大增加至 30%。

由图 10 可知, 路径的辐亮度受到路径长度和路径大气参数(大气密度、温度、辐射气体浓度)的共同影响。短路径一般处于高层大气范围, 高层大气相对中低层大气密度低, 在短路径下, 大气参数对辐亮度的影响很小, 因此路径长度占主导影响, 辐亮度随着路径长度增大而增大。而对于长路径而言, 由于长路径包含大气密度较大、切点高度较低的中低层大气, 因此处于低层大气的路径大气参数占主导影响。

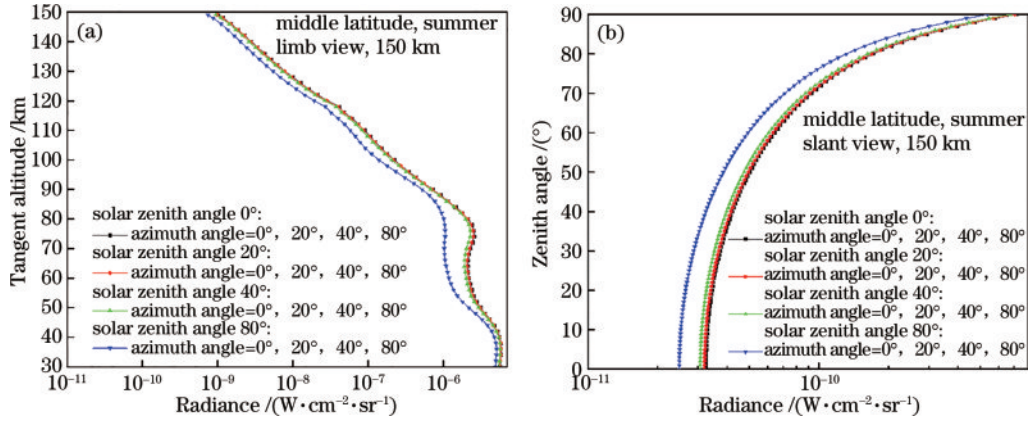


图 9 不同太阳天顶角和观测方位角下大气背景辐亮度廓线。(a)长路径;(b)短路径

Fig. 9 Atmospheric background radiance profiles under different solar zenith angles and azimuth angles. (a) Long path; (b) short path

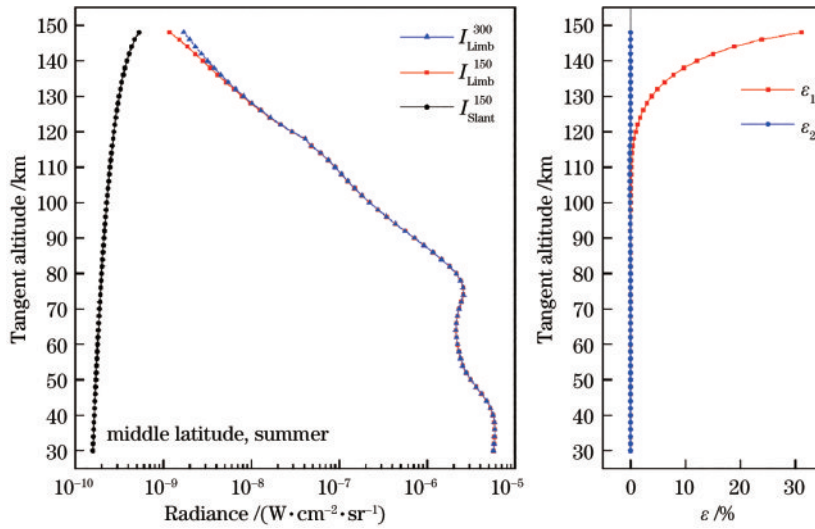


图 10 长、短路径辐射特性

Fig. 10 Radiation characteristics of long path and short path

5 红外辐射探测场景生成

5.1 辐射特性数据库

场景仿真存在计算量大、计算时间长的问题,通过建立辐射特性数据库的方式达到减小计算量和快速仿真的目的。

首先计算出特征参数(大气模式、波段、切点高度、观测高度、天顶角和太阳天顶角)对应的大气背景辐亮

度数据,提前建立特征参数与辐亮度数据一一对应的辐射特性数据库。在进行仿真计算时,结合探测器红外成像模型通过特征参数检索辐射特性数据库,获得当前计算工况下所需的仿真数据,然后将该数据用于后续计算最终完成仿真。

探测器红外成像模型如图 11 所示,成像平面分辨率为 $n \times m$,视场角为 $\alpha \times \alpha_1$, O 点为视点,以 O 为坐标系原点建立右手坐标系。那么成像平面可以划分为

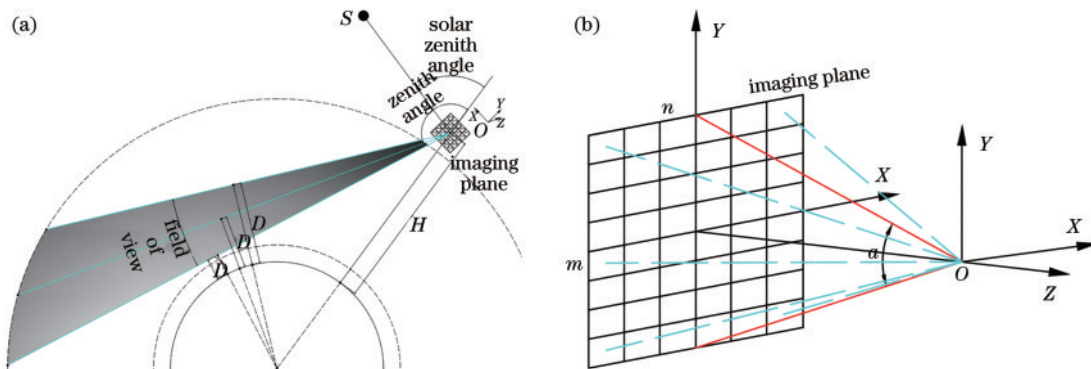


图 11 探测器红外成像模型。(a)整体示意图;(b)成像平面坐标系

Fig. 11 Infrared imaging model of detector. (a) Overall schematic diagram; (b) imaging plane coordinate system

$n \times m$ 个网格, 网格的坐标用 (i, j) 表示, 例如左上角的网格坐标为 $(-\frac{n}{2}, \frac{m}{2})$ 。

因此所求探测视线方程为坐标系的原点 O 到每个网格中心的方程, 则对应于网格 (i, j) 的探测视线方程为

$$\frac{x}{a} = \frac{y}{b} = \frac{z}{c}, \quad (4)$$

$$a = \frac{(2i - 1) \tan(\frac{\alpha}{2})}{n}, \quad (5)$$

$$b = \frac{(2j - 1) \tan(\frac{\alpha_1}{2})}{m}, \quad (6)$$

$$c = -1. \quad (7)$$

由探测视线方程求得计算工况对应的特征参数, 通过检索辐射特性数据库得到仿真数据。

5.2 仿真结果分析

中高层大气背景红外辐射场景仿真图像(临边观测, 观测高度 150 km)如图 12 所示。图 12(a)(b)、(c)

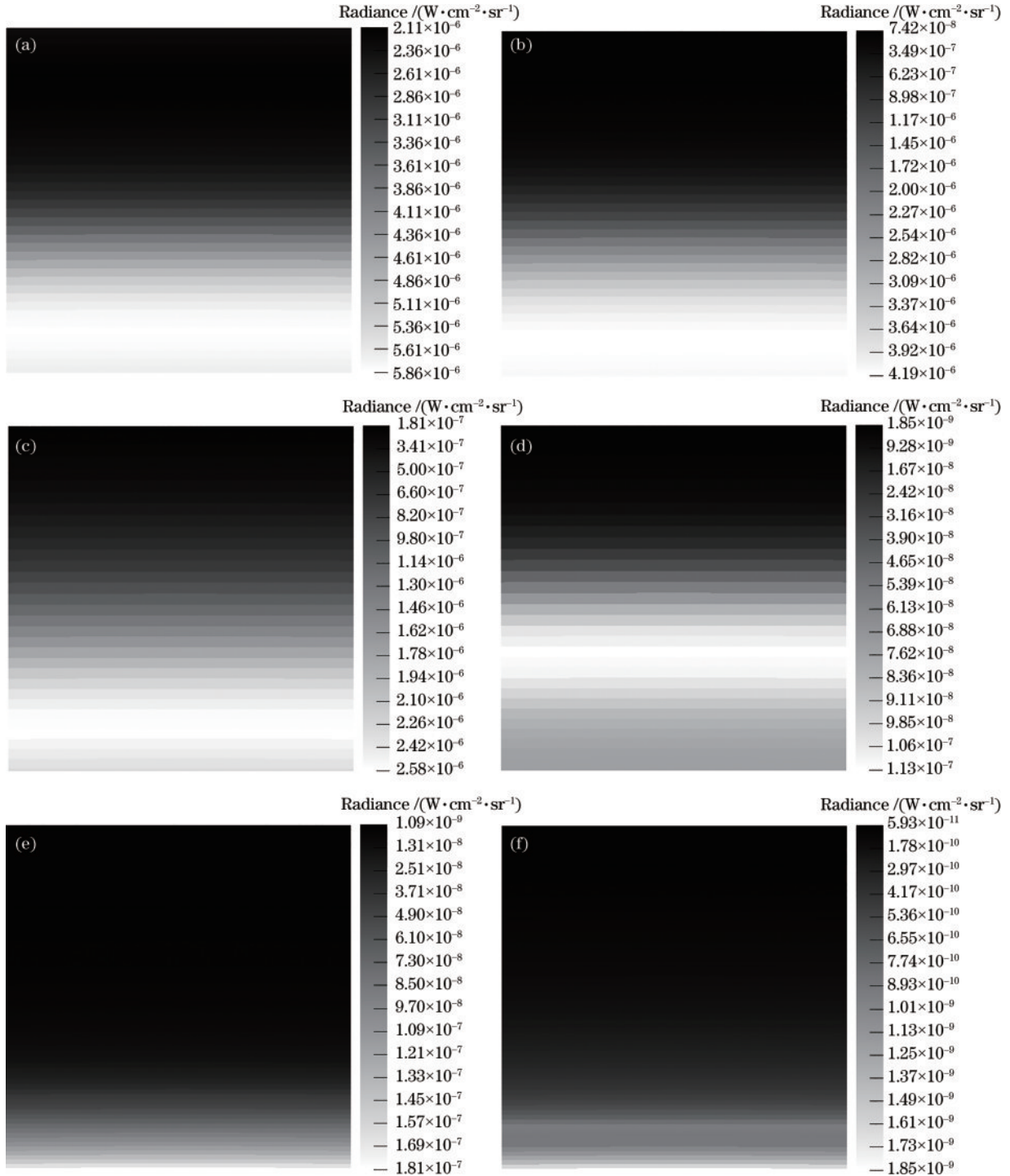


图 12 中纬度夏季 3~5 μm 白天红外辐射场景仿真结果(临边观测, 150 km)。(a)(b)31~70 km;(c)(d)70~102 km;(e)(f)102~149 km

Fig. 12 Simulation results of 3-5 μm band daytime infrared radiation scene in middle latitude summer (limb view, 150 km).

(a) (b) 31-70 km; (c) (d) 70-102 km; (e) (f) 102-149 km

(d)、(e)(f)分别展示了中纬度夏季白天和夜晚切点高度在 31~70 km、70~102 km、102~149 km 这 3 个范围内的红外辐射场景仿真图像。仿真采用大气分层模型,在同一种大气模式下大气廓线只在高度方向变化。因此大气背景的辐亮度在高度方向变化明显,而在不同观测方位角下大气背景辐亮度几乎不变。

由图 12 可知,在整体趋势上,辐亮度随着切点高度的增大而减小,昼夜辐亮度差异随着切点高度的增大而增大。结合图 12(a)、(b)和辐亮度廓线可知,白天和夜晚的辐亮度分别在切点高度 36 km 和 34 km 处取得最大值。这是因为区域内的 O_3 和 CO_2 吸收太阳辐射发生

光化学反应向外辐射,导致这一区域背景辐亮度增大。图 12(c)、(d)表明,白天和夜晚的辐亮度分别在切点高度 75 km 和 85 km 处取得极大值。图 12(g)、(h)表明,夜晚的辐亮度极大值在 110 km 处,而白天却不明显。

观测天顶角处于 $77^\circ\sim 89^\circ$ 时的红外辐射场景仿真图像如图 13 所示,这种视线模型观测的都是高层大气,相比中低层大气高层大气密度十分稀薄,辐亮度强度由视线路径长度决定,因此当观测天顶角增大时,路径长度增大,辐亮度随之增大。

中高层大气红外辐射场景仿真图像(临边观测,观测高度 300 km)如图 14 所示。

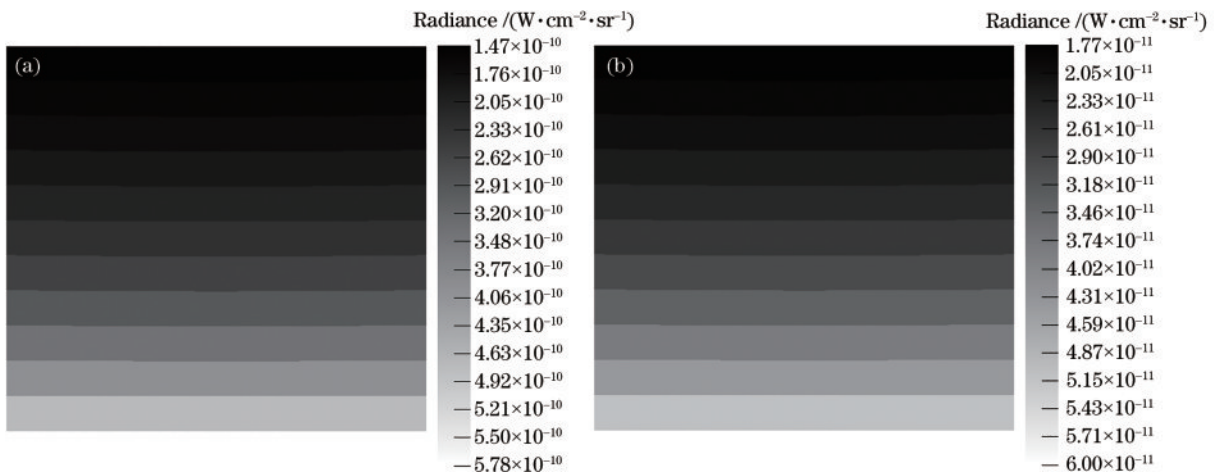


图 13 观测天顶角 $77^\circ\sim 89^\circ$ 红外辐射场景仿真结果图(斜程观测, 150 km)。(a) 白天条件; (b) 夜晚条件

Fig. 13 Simulation results of the observer zenith angle between $77^\circ\sim 89^\circ$ infrared radiation scene (slant view, 150 km).

(a) Daytime condition; (b) night condition

图 14(a)(b)、(c)(d)分别展示了中纬度夏季白天和夜晚切点高度在 52~112 km、139~188 km 两个高度范围内的红外辐射场景仿真图像。图 14(a)、(b)表明,辐亮度分别在 75 km 与 85 km 附近出现极大值,且白天的辐亮度强度比夜晚大将近一个数量级。图 14(b)、(d)说明,在切点高度处于更高的高度区间内,辐亮度随着切点高度的增加呈现出逐渐减小的趋势。

6 结 论

通过比较 MODTRAN 和 SHARC 的计算结果分析 MODTRAN 计算模式的局限性。针对中高层大气背景红外辐射特性和红外成像,建立探测视线模型和红外成像模型,在临边观测和斜程观测两种探

测模型下,利用 SHARC 仿真分析不同观测参数下的中高层大气背景红外辐射特性:中高层大气背景辐亮度随着季节、纬度、观测高度、切点高度、观测天顶角和太阳天顶角变化呈现出不同的特性;视线路径的辐亮度受到路径长度和路径大气参数共同影响,短路径和长路径的辐亮度分别由路径长度和处于低层大气的路径大气参数占主导影响;太阳天顶角对太阳辐射变化占主导影响,不同太阳天顶角下大气背景辐亮度变化明显,而不同观测方位角下大气背景辐亮度不变。依据大气背景辐亮度的主要影响因素建立中高层大气背景红外辐射特性数据库,完成不同观测高度、切线高度、观测角度和观测时间的红外辐射场景仿真。研究结果可为中高层大气背景红外探测提供理论支持。

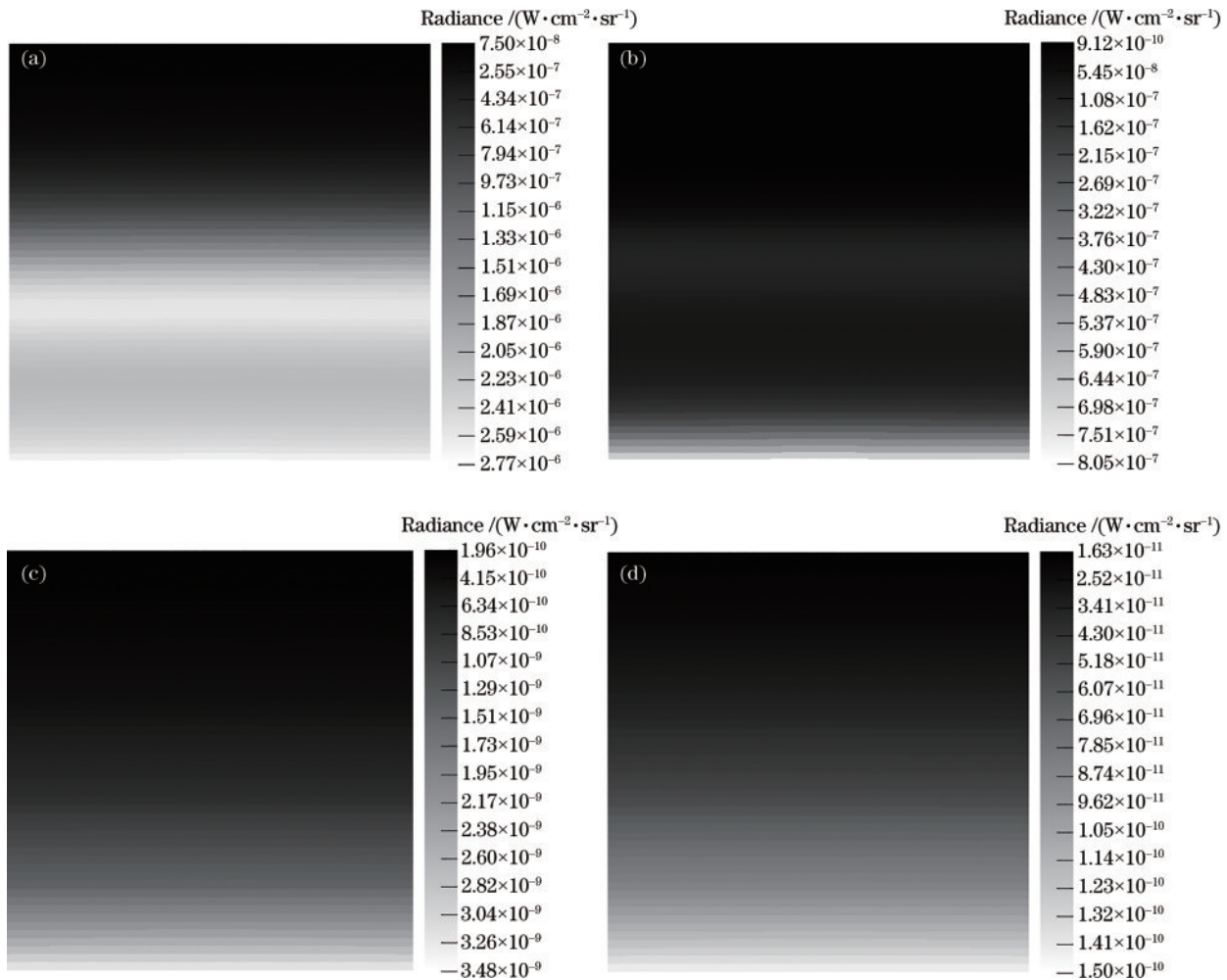


图 14 中纬度夏季 3~5 μm 白天和夜晚红外辐射场景仿真结果图(临边观测, 300 km)。(a)白天 52~112 km;(b)白天 139~188 km;
(c)夜晚 52~112 km;(d)夜晚 139~188 km

Fig. 14 Simulation results of 3~5 μm band daytime and night infrared radiation scene in middle latitude summer (limb view, 300 km).
(a) 52~112 km daytime; (b) 139~188 km daytime; (c) 52~112 km night; (d) 139~188 km night

参 考 文 献

- [1] 王鹏飞, 罗畅, 白炎. 临近空间高超声速飞行器进展及防御策略分析[J]. 现代防御技术, 2021, 49(6): 22-27, 48.
Wang P F, Luo C, Bai Y. Development of near space hypersonic vehicles and defense strategies analysis[J]. Modern Defence Technology, 2021, 49(6): 22-27, 48.
- [2] 冯玉涛, 傅頔, 赵增亮, 等. 星载被动光学遥感大气风场探测技术进展综述[J]. 光学学报, 2023, 43(6): 0601011.
Feng Y T, Fu D, Zhao Z L, et al. An overview of spaceborne atmospheric wind field measurement with passive optical remote sensing[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(6): 0601011.
- [3] 龚少华, 陈伟鹏, 杨国韬, 等. 基于 Rayleigh 激光雷达实验观测的中层大气温度反演与重力波事件识别[J]. 光学学报, 2023, 43(24): 2428006.
Gong S H, Chen W P, Yang G T, et al. Retrieval of temperature structure and identification of gravity wave events in the middle atmosphere from Rayleigh lidar observations[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(24): 2428006.
- [4] 杨玉峰, 宋宁宁, 韩香. 基于 NCEP 数据库的星光大气折射修正模型研究[J]. 光学学报, 2023, 43(18): 1801002.
Yang Y F, Song N N, Han X. Corrected starlight atmospheric refraction model based on NCEP database [J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(18): 1801002.
- [5] 胡向瑞, 李发泉, 王后茂, 等. MIGHTI/ICON 卫星的中高层大气温度反演与验证[J]. 光学学报, 2023, 43(12): 1201006.
Hu X R, Li F Q, Wang H M, et al. Retrieval and verification of mid-upper atmospheric temperature from MIGHTI/ICON satellite[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(12): 1201006.
- [6] 张献中, 钟凯, 吴同, 等. 瑞利激光雷达临近空间环境探测研究进展[J]. 空天技术, 2023(1): 19-42.
Zhang X Z, Zhong K, Wu T, et al. Progress of Rayleigh lidar environmental detection in near space[J]. Aerospace Technology, 2023(1): 19-42.
- [7] 杨森, 张厚庆. 基于成像/光强变化响应的中/短波红外辐射校准系统设计[J]. 光学学报, 2022, 42(6): 0611001.
Yang S, Zhang H Q. Design of medium/short wave

- infrared radiation calibration system based on imaging/light intensity change response[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(6): 0611001.
- [8] Sundberg R L, Duff J W, Gruninger J H, et al. SHARC, a model for calculating atmospheric infrared radiation under non-equilibrium conditions[M]//Johnson R M, Killeen T L. *The upper mesosphere and lower thermosphere: a review of experiment and theory*. Washington, D. C.: American Geophysical Union, 2013: 287-295.
- [9] Gruninger J, Sundberg R, Acharya P, et al. User's manual for SHARC-4 the strategic high-altitude radiance code[R]. Bedford: Phillips Lab Hanscom Afb Ma, 1997.
- [10] 刘栋, 戴聪明, 魏合理. 中高层大气 CO₂ 临边辐射: 模拟与观测对比分析[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(2): 0211001.
Liu D, Dai C M, Wei H L. CO₂ limb radiation in the middle and upper atmosphere: comparison analysis of simulation and measurement[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(2): 0211001.
- [11] 刘栋, 戴聪明, 魏合理. 中高层大气临边红外辐射的 LTE 与 non-LTE 模拟对比[J]. *大气与环境光学学报*, 2019, 14(5): 337-344.
Liu D, Dai C M, Wei H L. Comparison of LTE and non-LTE model for limb infrared radiation simulation of middle and upper atmosphere[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2019, 14(5): 337-344.
- [12] 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 C M, Deng L F, Liu D, et al. Numerical analysis on mid-infrared radiance characteristic of atmosphere in near space[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2018, 50(S2): 13-18.
- [13] Russell J M, Mlynczak M G, Gordley L L, et al. Overview of the SABER experiment and preliminary calibration results[J]. *Proceedings of SPIE*, 1999, 3756: 277-288.
- [14] Sharma R D, Wintersteiner P P, Kalogerakis K S. A new mechanism for OH vibrational relaxation leading to enhanced CO₂ emissions in the nocturnal mesosphere[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(11): 4639-4647.
- [15] Kalogerakis K S, Matsiev D, Sharma R D, et al. Resolving the mesospheric nighttime 4.3 μm emission puzzle: laboratory demonstration of new mechanism for OH(ν) relaxation[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(17): 8835-8843.
- [16] Panka P A, Kutepov A A, Kalogerakis K S, et al. Resolving the mesospheric nighttime 4.3 μm emission puzzle: comparison of the CO₂(ν_3) and OH(ν) emission models[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, 17(16): 9751-9760.
- [17] 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: 35-40.
Liu D. Numerical simulation of infrared radiation characteristics in the middle and upper atmosphere and its application[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018: 35-40.
- [18] 史波, 李瑞, 刘纯胜, 等. 地球大气临边背景红外辐射特性研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(12): 120101.
Shi B, Li R, Liu C S, et al. Research on earth's atmosphere limb background infrared radiation characteristics[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(12): 120101.
- [19] Shroll R M, Adler-Golden S, Duff J W, et al. User's manual for SAG-2 SHARC/SAMM atmosphere generator [R]. Burlington: Spectral Sciences Inc Burlington Ma, 2003.
- [20] Nebel H, Wintersteiner P P, Picard R H, et al. CO₂ 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, 99(D5): 10409.
- [21] Kumer J B, James T C. CO₂ (001) and N₂ vibrational temperatures in the 50 $\lesssim z \lesssim$ 130 km altitude range[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1974, 79(4): 638-648.