0254-6124/2020/40(6)-1039–07 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

YANG Xiaojun, WANG Houmao, WANG Yongmei. Simulation and analysis on volume emission rate and limb radiation intensity of airglow at oxygen A(0, 0) band (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2020, **40**(6): 1039-1045. DOI:10.11728/cjss2020.06.1039

氧气 A(0, 0) 波段气辉体发射率和临边辐射强度模拟与分析*

杨晓君[1,2,3,4] 王后茂[1,3,4] 王咏梅[1,2,3,4]

1(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

2(中国科学院大学天文与空间科学学院 北京 100049)

3(天基空间环境探测北京市重点实验室 北京 100190)

4(中国科学院空间环境态势感知技术重点实验室 北京 100190)

摘 要 临近空间大气参数如温度、密度、风场等对预报模型精度及航天器运行安全等有较大的影响, 而气辉的辐射模拟是大气参数反演的重要过程. 本文基于光化学模型计算了氧气 A(0, 0) 波段气辉的体发射率和临边辐射强度. 基于氧气 A(0, 0) 波段气辉的光化学反应机制、大气动力学和光化学反应理论, 建立产生 $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ 的光化学模型. 计算气辉体发射率, 基于临边探测几何路径进行气辉辐射强度模拟. 体发射率计算结果与 AURIC 模型结果的辐射值及辐射高度均一致. 基于计算和模拟结果, 对氧气 A 波段气辉体发射率和辐射强度的影响因素进行了分析.

关键词 氧气 A 波段, 气辉, 体发射率, 光化学, 辐射强度

中图分类号 P 352

Simulation and Analysis on Volume Emission Rate and Limb Radiation Intensity of Airglow at Oxygen A(0, 0) Band

YANG Xiaojun[1,2,3,4] WANG Houmao[1,3,4] WANG Yongmei[1,2,3,4]

1(*National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

2(*School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049)

3(*Beijing Key Laboratory of Environment Exploration, Beijing* 100190)

4(*Key Laboratory of Environmental Space Situation Awareness Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

Abstract Atmospheric parameters in near space (temperature, density, wind field, *etc.*) have a great influence on the accuracy of the model prediction and the safety of spacecraft operation.

* 国家自然科学基金项目资助 (41704178)

2019-04-15 收到原稿, 2019-09-29 收到修定稿

E-mail: 569653045@qq.com

Airglow simulation is an indispensable aspect of the inversion of the atmospheric parameter. In this paper, the Volume Emission Rate (VER) and limb radiation intensity of oxygen A(0, 0) band airglow are calculated based on the photochemical model. Firstly, the photochemical model $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ was established based on the theory of atmospheric dynamics, photochemical reaction mechanism, and photochemistry. Then, the VER of O_2 A-band was calculated, and the limb radiation intensity of airglow is simulated using a geometric path integral along the line of sight. The simulation radiation and its corresponding height are both consistent with the results of AURIC model. Finally, based on the results of the simulation, the influence factors of VER and radiation of oxygen A-band airglow are analyzed.

Key words Oxygen A-band, Airglow, Volume Emission Rate (VER), Photochemistry, Radiation intensity

0 引言

临近空间大气影响空间天气预报及航天器发射与再入轨过程的安全性预估 [1], 对临近空间大气的观测与研究具有重要的科学意义和军事应用价值 [2]. 近年来, 中国航空航天技术得到飞速发展, 因此对临近空间大气探测的需求也越来越多. 临近空间大气星载被动光学探测主要是基于大气中自然发光的介质 (如气辉) 进行的, 具有全天时全天候的探测优势.

氧气 A(0, 0) 气辉是观测到的可见和近红外气辉光谱中亮度最强的光谱之一, 光谱波长区域约为 759~767 nm, 其日气辉主要位于 40~200 km 的高度范围, 而夜气辉的产生区域比较小, 主要集中在大约 80~100 km 的高度范围. 氧气 A(0, 0) 波段具有较大的辐射强度, 被广泛应用于高层大气遥感, 但是不能直接用于地表的观测, 这是因为其在 70 km 以下存在较强的自吸收 [3].

$O_2(^1\Sigma)$ 的产生机制是通过火箭观测试验中光谱仪和光度计的观测结果建立的 [4], 后来被应用于 Dynamics Explorer 2 的法布里–珀罗干涉仪进行大气参数观测 [5]. 美国空间物理研究实验室基于搭载在 UARS 卫星上的高分辨率多普勒成像仪 HRDI (The high-resolution Doppler imager)[6−8], 通过观测氧 A 波段的发射谱线进行温度测量, UARS 卫星上的风成像干涉仪 (WINDII)[9] 对风速、温度和发射率进行了测量. 搭载在 TIMED 卫星上的 TIDI 多普勒成像仪基于 $O_2(^1\Sigma)$ 发射谱对上层大气风场和温度进行了遥感观测 [10]. 国际空间站 Kibo 实验舱 [3] 中的远程大气和电离层探测系统 (RAIDS) 测量了 $O_2(^1\Sigma)$ (0, 0), (0, 1) 和 (1, 1) 高度 80~180 km 内的气辉发射谱. 2001 年 2 月 20 日 Odin 卫星上的光谱仪和红外成像系统 (OSIRIS)[11,12] 通过对氧气 A 带发射光谱的探测, 得到中间层和低热层区域 (MLT) 的温度. 90 km 高度附近温度反演的精度约为 ±2 K, 更高范围的精度约为 ±6 K.

基于光化学反应机理, 描述 $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ 的产生和损耗, 建立产生氧气 A(0, 0) 气辉的光化学模型, 阐述气辉辐射传输的过程, 建立正演模型, 同时基于模型进行影响因素分析, 包括温度和自吸收等.

1 基本原理

1.1 光化学模型

光化学模型是以光化学反应作为基本原理, 联合大气动力学和光化学理论, 描述大气成分浓度与体发射率之间关系的微分方程. 氧气分子吸收光子后处于激发态, 根据能量的不同, 氧气可以通过太阳光解、太阳激发、碰撞湮灭产生激发态的氧气分子 $O_2(b^1\Sigma_g^+)$, 进而辐射出 762 nm 的光谱, 即氧气 A(0, 0) 波段气辉. $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ 产生机制主要有三种: 大气共振散射, 基态氧气通过与氧气, 臭氧光解产生的原子氧碰撞湮灭, Barth 化学反应 [4,13]. 得到 $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ 并产生 A 波段的过程如图 1 所示 [12], 其中 J, g, k 为反应系数.

第一种机制里共振散射是由太阳激发导致的, 氧气分子在太阳光照下吸收光子后处于激发态, 进而再辐射出光谱. 反应方程式如下:

$$O_2 + h\nu(762\,\text{nm}) \rightarrow O_2(b^1\Sigma_g^+)g. \qquad (1)$$

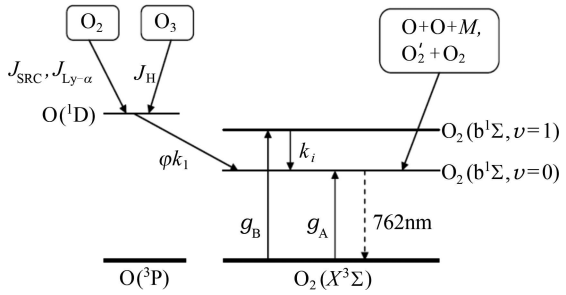


图 1 氧气 A(0, 0) 波段气辉产生过程

Fig. 1 Processes that oxygen A-band airglow production

式 (1) 中, g 为激发系数.

第二种机制中 $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ 是由 $O(^1D)$ 碰撞湮灭反应得到的. 反应方程式如下:

$$O(^1D) + O_2 \rightarrow O_2(b^1\Sigma_g^+) + O(^3P) k_{D,O_2}. \quad (2)$$

式 (2) 中, 反应率 $k_{D,O_2} = 2.9\times10^{-11}e^{67/T}$ ($cm^3\cdot s^{-1}$). 低热层以下 $O(^1D)$ 的主要产生机制是 Schumann-Runge 区氧气的光解和 Hartley 区臭氧的分解, 有

$$O_2 + h\nu(\lambda < 176\,nm) \rightarrow O(^1D) + O(^3P), \quad (3)$$

$$O_2 + h\nu(\lambda < 310\,nm) \rightarrow O(^1D) + O_2^*. \quad (4)$$

臭氧也可以直接分解得到 $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ 激发态, 但生成率非常低, 可忽略不计.

第三种机制是 Barth 化学反应. 实际上夜气辉的产生是 Chapman 过程还是 Barth 过程一直存在争议. 本文夜气辉模型中的化学来源符合 Barth 机制, 许多证据也与此观点一致 [14−16]. 其过程包括两部分: 第一部分是两个氧原子与一个氮气分子或者氧气分子之间的三体碰撞; 第二部分是激发态氧气分子发生碰撞湮灭反应, 产生激发态 $O_2(b^1\Sigma_g^+)$.

$$O + O + M \rightarrow O_2' + M, \quad (5)$$

$$O_2^* + O_2 \rightarrow O_2(^1\Sigma) + O_2. \quad (6)$$

其中, $M = O_2$, N_2, 反应系数 $k_5 = 4.7\times10^{-33}(300/T)^2\alpha\,cm^6\cdot s^{-1}$, $k_6 = 5.0\times10^{-13}\beta\,cm^3\cdot s^{-1}$, 效率因子 $\alpha\beta = 0.8$. O_2' 还可以发生如下反应:

$$O_2' + O \rightarrow O_2 + O. \quad (7)$$

其中, 反应系数 $k_7 = 3\times10^{-11}\,cm^3\cdot s^{-1}$.

$O_2(b^1\Sigma_g^+)$ 的损耗过程包含两种机制, 一是自发辐射, 二是与大气中性分子 (这里只考虑含量最大的两种成分 N_2 和 O_2) 发生碰撞湮灭. $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ 损耗过程中发生的反应为

$$O_2(b^1\Sigma_g^+) \rightarrow O_2 + h\nu(762\,nm) A_\Sigma, \quad (8)$$

$$O_2(b^1\Sigma_g^+) + M \rightarrow O_2 + M, \quad M = N_2, O_2. \quad (9)$$

损耗过程中发出的 762 nm 辐射即为氧气 A(0, 0) 波段气辉, A_Σ 为自发辐射系数, 通常为常数. A(0, 0) 波段的体发射率为

$$\eta_{O_2(^1\Sigma)}(z) = F_c A_\Sigma n_{O_2(b^1\Sigma_g^+)}. \quad (10)$$

其中, F_c 为 A(0, 0) 波段的 Frank-Condon 因子 [17].

1.2 辐射传输过程

氧气 A(0, 0) 波段产生转动谱线时会发出光子, 波数 ν 处的特定转动谱线发出的光子数可以表示为 $fD\eta$, f 为谱线强度, D 为多普勒线型, η 为体发射率. 谱线强度是温度的函数, 即

$$f = f_{ref}\frac{T_{ref}}{T}\exp\Big[\frac{1.439E'(T-T_{ref})}{TT_{ref}}\Big]. \quad (11)$$

f_{ref} 为参考温度 $T_{ref} = 296\,K$ 时的谱线强度, E' 为转动谱线的上能级能量. 以 v_c 为谱线中心的多普勒线型为

$$D(v) = \frac{1}{\alpha_D\sqrt{\pi}}\exp\Big[-\Big(\frac{\nu-\nu_c}{\alpha_D}\Big)^2\Big], \quad (12)$$

$$\alpha_D = \frac{\nu_c}{c}\sqrt{\frac{2kT}{m}}. \quad (13)$$

其中, k 为玻尔兹曼常数, c 为光速, m 为氧气分子量.

在某一点沿视线积分得到考虑自吸收后的透过率, 有

$$\tau(v,s) = \exp\Big[-\int_s^\infty n(s')\sigma(s')D(v,s')ds'\Big]. \quad (14)$$

其中, s 为视线路径, $n(s)$ 为氧气数密度, σ 为吸收截面, 其表达式为

$$\sigma = \sigma_{ref}\frac{T_{ref}}{T}\exp\Big[\frac{1.439E''(T-T_{ref})}{TT_{ref}}\Big]. \quad (15)$$

其中, E'' 为转动谱线下能级的能量, σ_{ref} 为参考温度下的吸收截面.

综上所述, 卫星观测到的光谱亮度可以从切点高度 Z_t 沿视线进行路径积分得到, 有

$$B(v,z_t) = \int_{-\infty}^{\infty}\eta(s)f(s)D(v,s)\cdot \exp\Big[-\int_s^\infty n(s')\sigma(s')D(v,s')ds'\Big]ds. \quad (16)$$

由式 (16) 可知, 光谱辐射主要由氧气体发射率和温度决定, 而光谱辐射对温度的依赖主要是由于温度对自吸收截面的影响导致的 [18].

2 模拟结果与讨论

2.1 体发射率模拟计算

2.1.1 夜气辉体发射率模拟

图 2 给出了基于氧气 A(0, 0) 波段的辐射机制计算得到的夜气辉体发射率和 AURIC 计算结果. AURIC 是目前比较权威的中高层大气气辉辐射模拟研究通用模型 [19]. 由图 2 可以看出, 二者的数值量级和高度分布范围基本吻合, 夜气辉主要产生在 80~100 km 的高度范围内, 峰值则出现在 90~95 km 附近. 80~90 km 高度范围内的夜气辉模型模拟结果与 AURIC 模拟结果吻合度较高, 而在 90~100 km 存在一些偏差, 主要原因是: 本文模拟过程中将式 (6) 中 O_2' 的与式 (7) 中 O_2' 的能级当作同一能级, 而实际上未知氧气激发态能级尚未确定, 是否为同一能级还存在争议, 也有研究推测式 (6) 与式 (7) 中的未知激发态 O_2' 为同一能级, 但振动能级不同, 后续研究将把更精确的化学机制纳入夜气辉模型中.

由式 (5)~(7) 可得, Barth 过程需要氧原子参与反应, 因此其分布范围与氧原子的分布存在直接关系. 夜间氧原子浓度在 80 km 以下基本为零, 这导致激发态氧气分子 $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ 产生率也基本为零. 在 100 km 以上, 随着反应物即氧原子浓度和氧气浓度的降低及温度升高, 反应系数减小, 激发态氧气分子 $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ 的产生率也逐渐降低, 进而导致夜气辉体发射率降低.

图 3 给出了夜气辉的两个影响因素 (氧原子浓度和温度) 对体发射率的影响, 初始 O 浓度和温度廓线数据均来自 MISIS-00 模型 [20]. 图 3(a) 模拟了氧原子浓度廓线 10% 递增时体发射率的变化. 由图 3(a) 可以看出, 体发射率随着浓度的增加而增加, 其中 90 km 附近体发射率单次增幅在 8%~15% 左右. 图 3(b) 模拟了体发射率随温度的变化. 由图 3(b) 可以看出, 夜气辉体发射率随温度的升高而降低, 温度递增 10 K 时体发射率单次降幅在 7%~10% 左右. 体发射率与温度成反比主要是反应系数与温度成反比造成的.

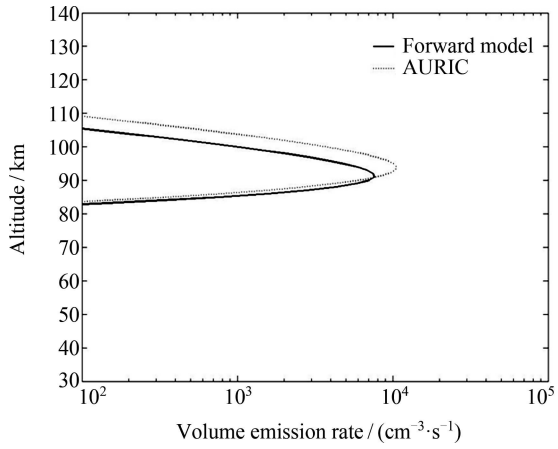


图 2 夜气辉模型与 AURIC 体发射率模拟值的对比

Fig. 2 Comparison of the simulations of night airglow model and those of AURIC model

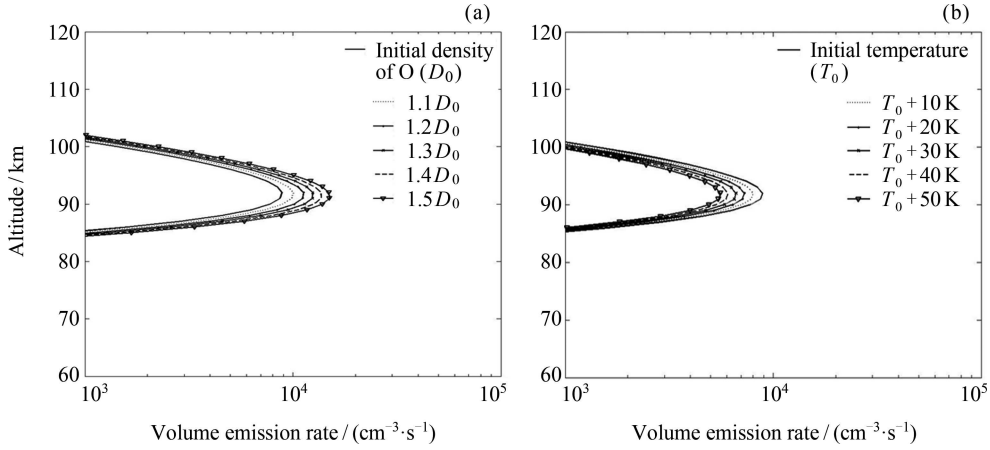


图 3 夜气辉体发射率随氧原子浓度 (a) 和温度 (b) 的变化

Fig. 3 Simulated profiles of nightglow VER (Volume Emission Rate) varying with oxygen atom concentration (a) and temperature (b)

2.1.2 日气辉体发射率模拟结果

图 4 为针对日气辉三种机制分别进行数值模拟得到的体发射率及总体发射率, 与文献 [4] 的研究结果吻合. 由图 4 可知, 日气辉在 40~100 km 高度范围内体发射率相对较强. 由共振散射获得的体发射率覆盖了 30~130 km 的高度范围; 30 km 以下由于光学厚度迅速增加, 太阳紫外辐射难以到达近地面, 从而使低空太阳光解系数变得很小; 130 km 以上高度的光学厚度很小甚至可以忽略不计, 但是反应物浓度迅速变低, 体发射率也随之变低. 此外, 由氧气和臭氧光解产生的日气辉体发射率峰值分别在 100 km 和 40 km 左右, 这是氧气、氮气和臭氧数密度分布共同作用的结果.

2.1.3 日气辉总体发射率与太阳天顶角的关系

日气辉的产生机制与太阳辐射强度关系密切, 因此太阳天顶角是日气辉的重要影响因素之一. 氧气 A 波段体发射率随太阳天顶角的变化而变化, 天顶角的变化影响了光化学反应系数, 进而影响了 $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ 产生率. 如图 5 所示, 气辉体发射率随太阳天顶角增加而减小, 而在 90 km 附近随太阳天顶角变化最不明显, 这是因为 90 km 处的 Barth 效应与太阳辐射无关. 当太阳天顶角为 0 时, 受到太阳光照发生强烈的太阳光解, 因此体发射率相对较强.

2.2 辐射强度模拟

2.2.1 不同温度的氧气 A(0, 0) 波段辐射强度

图 6 给出了切点高度 85 km 处不同温度下氧气 A(0, 0) 波段发射光谱的模拟结果, 包括 759~767 nm 内的 99 条谱线. 其中, 谱线带宽由式 (13) 计算得出, 其与温度和谱线中心波长有关. 如图 6 所示, 将模拟的不同温度下的发射谱线与半高宽 (FWHM) 为 20 cm^{-1} 的仪器函数进行卷积, 模拟仪器观测到的光谱辐射, 这些光谱均根据 100 K 时的辐射强度最大值进行归一化. 由图 6 可知, 当温度升高时, 发射光谱中高转动能级的粒子数变多, 整体表现为光谱带中心处的辐射强度减弱, 而辐射光谱两侧的辐射强度则相对增强. 这表明不同的温度决定了不同的光谱辐射形状, 可以根据不同谱线的辐射强度进行大气温度反演.

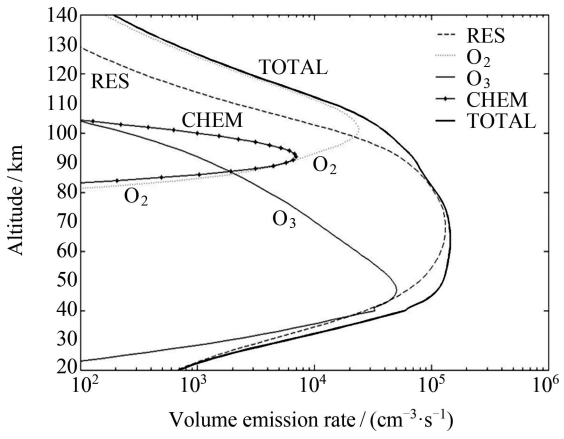


图 4 模拟得到的日气辉氧气 A(0, 0) 波段体发射率廓线

Fig. 4 Oxygen A(0, 0) band volume emission rate profile obtained by numerical simulation

2.2.2 不同切点高度下氧气 A(0, 0) 波段辐射强度

图 7 给出了不同切点高度的辐射强度模拟, 谱线中心约为 762.538 nm. 图 7 的模拟结果与文献 [21]

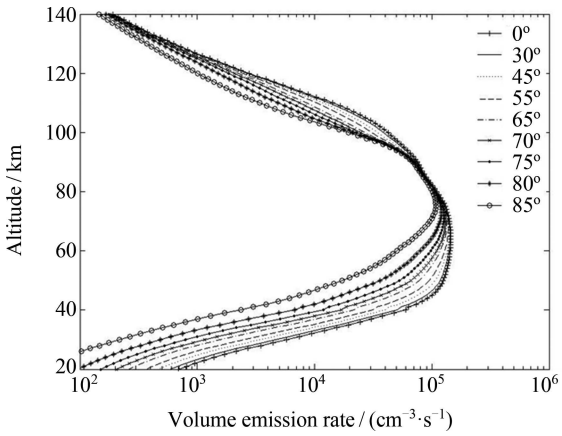


图 5 不同太阳天顶角下日气辉体发射率廓线

Fig. 5 Dayglow VER as a function of solar zenith angle

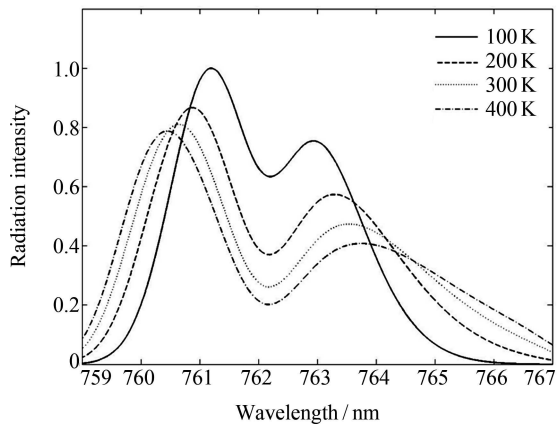


图 6 正演模型模拟 85 km 高度处归一化氧气 A 带发射光谱

Fig. 6 Normalized oxygen A-band emission spectra at 85 km height obtained by the forward model

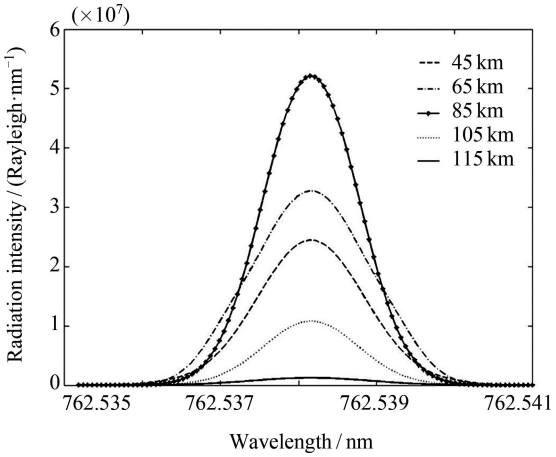


图 7 正演模型模拟氧气 A 带日气辉发射谱线

Fig. 7 Oxygen A-band emission line shape obtained by the forward model

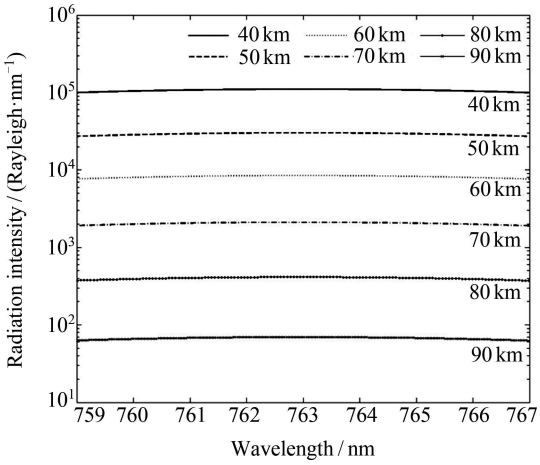


图 8 临边太阳散射强度

Fig. 8 Edge solar scattering intensity

中临边观测氧 A 波段的发射谱模拟值基本符合, 辐射强度在 85 km 切点高度时最大, 其次是 65 km, 45 km, 105 km, 115 km. 根据日气辉辐射机制, 85 km 处辐射强度较强且 85 km 以上氧气数密度低, 氧气自吸收较弱, 路径积分后总的辐射强度最强; 而 65 km 和 45 km 处虽然辐射也比较强, 但由于 70 km 以下氧气数密度高, 自吸收比较强, 氧气 A 波段的透过率随之变低, 因此辐射强度有所减小; 105 km 和 115 km 处参与光化学的反应物浓度较低, 从而导致气辉辐射强度比较弱. 综上所述, 不同切点高度的辐射强度不同主要是由于氧气数密度随高度变化导致的.

如图 7 所示, 762.538 nm 在不同高度的临边辐射强度值约为 $10^7 Ra$. 太阳散射值在切点高度 40 km 处最大, 约为 $10^5 Ra$; 随高度增加, 太阳散射强度值迅速降低, 在 90 km 时降为 $10^1 Ra$ (见图 8). 因此, 气辉临边辐射强度远大于同一高度的大气背景散射. 但是气辉辐射强度随时间和位置等因素的影响变动较大, 其辐射差异也会有所变化.

3 结论

解算了一系列光化学反应系数, 建立了 $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ 的光化学辐射模型. 根据辐射传输理论, 将氧气自吸收引入正演模型, 并将模型模拟结果与其他模拟结果进行比较, 验证了本模型的正确性. 研究结果为临近空间高度大气温度反演奠定了理论模型基础. 基于本模型, 对氧气 A(0, 0) 波段气辉辐射的影响因素 (包括氧气浓度、氧原子浓度、温度及太阳天顶角等) 进行了分析, 得到如下结论.

(1) 夜气辉模型模拟的体发射率与 AURIC 模拟结果吻合度较高. 此外, 夜气辉模型模拟的体发射率随氧原子数密度和温度廓线变化而变化. 氧原子数密度廓线增加 10%, 90 km 高度附近体发射率增幅约为 8%~15%; 而当温度廓线升高 10 K, 体发射率降幅约为 7%~10%.

(2) 日气辉体发射率随太阳天顶角的变化而变化. 当太阳天顶角增大时, 日气辉体发射率减小. 由于 80~90 km 处的 Barth 效应占比较大, 气辉随太阳天顶角变化不明显.

(3) 氧气 A 波段发射谱随温度的变化而变化. 其中, 波段中心处随温度升高而减小, 两侧则随温度的升高而降低. 沿视线积分得到的总辐射强度受氧气浓度的影响较大, 包括发射率和自吸收. 总辐射强度最大值出现在 85 km 高度附近, 随着高度的增加或减小, 气辉辐射强度均有所减小.

参考文献

[1] WANG Yingjian. Effects of middle and upper atmosphere on satellite system [J]. *China Sci.*, 2000, **30**(12): 17-20 (王英鉴. 中高层大气对卫星系统的影响 [J]. 中国科学, 2000, **30**(12): 17-20)

[2] LIU Zhenxing. Space Physics [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2005 (刘振兴. 太空物理学 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2005)

[3] CHRISTENSEN A B, YEE J H, BISHOP R L, *et al.* Observations of molecular oxygen atmospheric band emission

in the thermosphere using the near infrared spectrometer on the ISS/RAIDS experiment [J]. *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 2012, **117**(A4): DOI: 10.1029/2011ja016838

[4] BUCHOLTZ A, SKINNER W R, ABREU V J, *et al*. The dayglow of the O_2 atmospheric band system [J]. *Planet. Space Sci.*, 1986, **34**(11): 1031-1035

[5] SKINNER W R, HAYS P B. Brightness of the O_2 atmospheric bands in the daytime thermosphere [J]. *Planet. Space Sci.*, 1985, **33**(1): 17-22

[6] HAYS P B, ABREU V J, DOBBS M E, *et al*. The high-resolution doppler imager on the upper atmosphere research satellite [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 1993, **98**(D6): 10713-10723

[7] ZARBOO A, BENDER S, BURROWS J P, *et al*. Retrieval of $O_2(1\Sigma)$ and $O_2(1\Delta)$ volume emission rates in the mesosphere and lower thermosphere using SCIAMACHY MLT limb scans [J]. *Atmos. Meas. Tech.*, 2018, **11**: 473-487

[8] SKINNER W R, HAYS P B, GRASSL H J, *et al*. High-resolution doppler imager on the upper atmosphere research satellite [C]//Spies International Symposium on Optics. San Diego: International Society for Optics and Photonics, 1994

[9] SHEPHERD G G, GERARD THUILLIER, GAULT W A, *et al*. WINDII, the wind imaging interferometer on the upper atmosphere research satellite [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 1993, **99**(D10): 21117

[10] KILLEEN T L, WU Q, SOLOMON S C, *et al*. TIMED Doppler interferometer: overview and recent results [J]. *J. Geophys. Res.*, 2006, **111**(A10): 10.1029/2005JA011484

[11] SHEESE P E, LLEWELLYN E J, GATTINGER T L, *et al*. Temperatures in the upper mesosphere and lower thermosphere from OSIRIS observations of O_2 A-band emission spectra [J]. *Can. J. Phys.*, 2010, **88**(12): 919-925

[12] LLEWELLYN E J, LLOYD N D, DEGENSTEIN D A, *et al*. The OSIRIS instrument on the odin spacecraft [J]. *Can. J. Phys.*, 2004, **82**(6): 411-422

[13] WALLACE L, HUNTEN D M. Dayglow of the oxygen a band [J]. *J. Geophys. Res.*, 1968, **73**(15): 4813-4834

[14] CAMPBELL I M, GRAY C N. Rate constants for $O(^3P)$ recombination and association with N(4S) [J]. *Chem. Phys. Lett.*, 1973, **18**(4): 607-609

[15] GREETR R G H, LLEWELLYN E J, SOLHEIM B H, *et al*. The excitation of $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ in the nightglow [J]. *Planet. Space Sci.*, 1981, **29**(4): 383-389

[16] SLANGER T G, BLACK G. $O(^1S)$ In the lower thermosphere-Chapman vs Barth [J]. *Planet. Space Sci.*, 1977, **25**(1): 79-88

[17] NICHOLLS R W. Franck-condon factors to high vibrational quantum numbers v-o sub 2 band systems [J]. *J. Res. Nat. Bur. Stand.: A Phys. Chem.*, 1965, **69A**: 369-373

[18] ORTLAND D A, HAYS P B, SKINNER W R, *et al*. Remote sensing of mesospheric temperature and $O_2(^1\Sigma)$ band volume emission rates with the high-resolution Doppler imager [J]. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 1998, **103**(D2): 1821-1835

[19] WANG Houmao, WANG Yongmei. Simulation of auric-2012 airglow radiation based on ultraviolet radiation transfer model [J]. *Sci. China: Earth Sci.*, 2015, **45**(11): 1768-1780 (王后茂, 王咏梅. 基于紫外辐射传输模型 AURIC-2012 的气辉辐射模拟 [J]. 中国科学: 地球科学, 2015, **45**(11): 1768-1780)

[20] PICONE J M. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: statistical comparisons and scientific issues [J]. *J. Geophys. Res.*, 2002, **107**(A12): 1468

[21] ABREU V J, BUCHOLTZ A, HAYS P B, *et al*. Absorption and emission line shapes in the O_2 atmospheric bands-Theoretical model and limb viewing simulations [J]. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(11): 2128-2137