

极光对中层大气临边红外辐射影响的模拟分析

刘栋^{1,2}, 戴聪明^{1*}, 唐超礼^{1,2}, 魏合理^{1,2}

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, 安徽 合肥 230031;

²中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 安徽 合肥 230026

摘要 利用中高层大气红外辐射模式模拟分析极光对中层大气临边红外辐射的影响。模拟结果表明, 极光扰动大气时, NO 导致 2.7 μm 、5.3 μm 带临边辐亮度相比于静态值显著增大, 2.7 μm 带辐射不含时变化, 5.3 μm 带辐射含时小幅变化; CO₂ 和 NO⁺ 导致 4.3 μm 带临边辐亮度相比于静态值显著增大, CO₂ 导致其含时变化; 10 μm 、15 μm 带临边辐亮度因 CO₂ 4.3 μm 带的关联效应也以一定幅度增大, 并同样含时变化。因化学反应产生的 NO、NO⁺ 的高振动能级使 2.7、4.3、5.3 μm 带在包含它们的基带和热谱带的宽光谱范围内都获得增强。根据所获得的辐射特性, 初步模拟了一次极光扰动大气的 4.3 μm 带临边观测事件, 并与实测值进行对比分析, 验证了中高层大气红外辐射模式的正确性。

关键词 大气光学; 中高层大气; 极光; 红外辐射

中图分类号 O432.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.1201002

Simulation Analysis on Effect of Aurora on Limb Infrared Radiation of Middle and Upper Atmosphere

Liu Dong^{1,2}, Dai Congming^{1*}, Tang Chaoli^{1,2}, Wei Heli^{1,2}

¹Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

²Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

Abstract The effect of aurora on limb infrared radiation is simulated and analyzed with the infrared radiation model of the middle and upper atmosphere. The simulation results show that when aurora disturbs the atmosphere, the limb radiance at 2.7 μm and 5.3 μm resulted from NO is significantly larger than the quiescent value. In addition, the limb radiation at 2.7 μm is not time-dependent, but that at 5.3 μm has a small time-dependent variance. Moreover, the limb radiance at 4.3 μm resulted from CO₂ and NO⁺ has the obvious increase compared with the quiescent value, and CO₂ makes it time-dependent. The radiance at 10 μm and 15 μm is enhanced with a certain amplitude because of the linkage effect from limb radiance at CO₂ 4.3 μm and similarly the variance is also time-dependent. The chemical reactions introduce the high energy levels of NO and NO⁺ and thus the radiance at 2.7 μm , 4.3 μm , 5.3 μm gets enhanced at the broad spectral bands including their baseband and hot bands. The properties from the model analysis are applied to the preliminary simulation of an observation event of limb radiation at 4.3 μm when aurora disturbs the atmosphere. The simulation results are compared with the measured data and thus the correctness of the model is verified.

Key words atmospheric optics; middle and upper atmosphere; aurora; infrared radiation

OCIS codes 010.1280; 010.1290; 010.5620

1 引 言

随着红外测量技术的发展和临近空间应用需求的增加, 关于中高层大气(通常指 30~300 km 范围

内的大气)的红外波段辐射特性的研究受到广泛的关注。利用临边红外辐射遥感中高层大气的温度、成分浓度廓线, 逐渐成为研究中高层大气结构、能量收支和气候变化不可或缺的手段^[1]。中高层大气复

收稿日期: 2018-05-17; 修回日期: 2018-06-12; 录用日期: 2018-07-25

基金项目: 国防基础科研项目(JCKY2016204C602)、装备预研项目(41416020204)

* E-mail: cmdai@aiofm.ac.cn

1201002-1

杂的化学/光化学环境是目前实验室难以完全模拟的。对中高层大气的红外波段辐射和光谱的分析为研究众多化学/光化学过程或中性层与电离层间的相互作用提供了有效的途径^[2]。临近空间的红外波段光学监测和目标探测等应用也需要全面地了解各种大气条件下中高层大气的红外辐射特性^[3-4]。

已有多个中高层大气临边红外辐射测量实验证实^[5-7],当极光发生时,探测器的一些特定红外通道的探测视线穿过极光区域时获得的测量值(下文称极光扰动大气临边辐射)相比于未穿过极光区域时获得的测量值(下文称静态大气临边辐射)显著增大。因此研究极光对中高层大气临边红外辐射的影响对于准确地解译临边观测数据、理解中高层大气物理化学状态演化和旨在适应各种大气条件的空基/星载红外测量系统的设计等都具有重要的指导意义。利用完善的数值模式进行可控的模拟分析则是必不可少的方式,与实验室研究形成有效的互补。

国外的研究者逐步建立了 AARC (Auroral Atmospheric Radiance Code)^[7-8] 和 SHARC (Strategic High-Altitude Radiance Code)^[9-10] 等数值模式,并在实测极光扰动大气临边红外辐射的分析等方面获得了应用^[6-7,11]。国内的中高层大气红外辐射模拟研究起步较晚,近年来开始快速发展,如戴聪明等^[12] 利用 SHARC 研究了不同版本的分子光谱数据库对临边辐射计算的影响,谭鹏飞等^[13] 利用 RFM (Reference Forward Model) 研究了非局域热平衡效应对临边红外辐射计算的影响;对于极光影响临边红外辐射的模拟研究进展可参见文献^[14]。但利用模式综合完善

地研究极光对中高层大气临边红外辐射的影响并将获得的特性应用到实测值的分析还未见公开报道。

本文利用 SHARC 模式,采用分解式的模拟方法研究中高层大气主要红外辐射带的临边辐亮度在极光扰动条件下与静态大气条件下的差异和其变化特征,并列举了应用所获得的辐射特性分析实测辐亮度的示例。

2 模拟原理

指定路径的大气发射辐亮度 I_B 可以表示为

$$I_B = \int_{\nu_1}^{\nu_2} \int_{s_1}^{s_2} J_\nu(s) \exp[-\tau_\nu(s, s_2)] e_\nu(s) ds d\nu, \quad (1)$$

式中: $\tau_\nu(s, s_2) = \int_s^{s_2} e_\nu(s') ds'$, $\tau_\nu(s, s_2)$ 为两点间大气路径的光学厚度, $e_\nu(s)$ 为 s 处的大气消光系数, s_1, s_2 分别为路径的起始位置和终止位置; $J_\nu(s)$ 为路径上 s 处的大气发射源函数; ν_1, ν_2 为需要计算的光谱范围的上下限。给定所需的大气状态参数, (1) 式适用于大气中任意两点间路径发射辐亮度的计算,但中高层大气临边辐亮度的计算与低层大气辐亮度模式仍存在很大的差异。

首先,为了提高灵敏度和高度分辨率,对中高层大气红外辐射的探测主要采用临边方式。如图 1 所示,临边路径贯穿整个大气,存在一个高度最低的点,称为切点。地球曲率对路径传输的影响不可忽略,因此低层大气辐亮度模式不能采用平面分层模型,需要在球面分层模型下建模计算。并且,对于 30 km 以上的中高层大气,折射对路径产生的影响可以忽略不计^[15]。

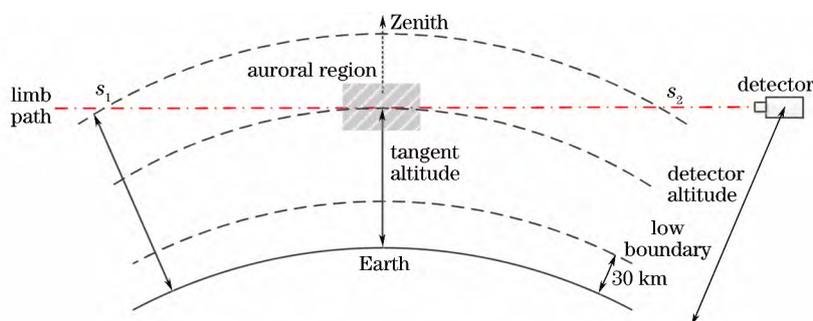


图 1 中高层大气临边红外辐亮度测量示意图

Fig. 1 Schematic of infrared limb radiance measurement of middle and upper atmosphere

其次,计算低层大气红外波段发射辐射时,一般假设大气处于局域热力学平衡状态(LTE),这样路径上的 $J_\nu(s)$ 可以直接使用普朗克函数 $B_\nu[T(s)]$ 计算。对于中高层大气,由于大气密度随高度增加而迅速减小,大气分子间热碰撞对其能级分布的决

定作用会显著减弱,辐射过程和化学/光化学反应诱导的能级跃迁可能使辐射分子的能级分布明显偏离玻尔兹曼分布,这样的大气热力学状态称为非局域热力学平衡状态(non-LTE)。准确地计算 non-LTE 状态的大气发射辐射需根据决定每一种辐射

分子能级的跃迁机制建立能级数密度方程组,并在给定的大气条件下求解出对应的能级分布。根据能级分布计算路径上的 $J_\nu(s)$ 和 $e_\nu(s)$,进而根据(1)式计算大气发射辐亮度。

极光的发生则是由于太阳风携带的大量高能粒子在强烈的磁扰动条件下在有限的时间范围内沉降到大气的有限区域内与大气分子相互作用,通过诱导离解和化学反应等过程激发大气分子/离子的能级跃迁,进而促使其辐射性质明显不同于静态大气时的辐射性质^[16]。根据能级分析,发射辐射的改变不仅出现在可见光波段,也出现在红外波段^[8]。因此,计算极光区域内分段路径的 $J_\nu(s)$ 和 $e_\nu(s)$ 的流程与静态大气 non-LTE 模式没有根本的区别,只是极光 non-LTE 模式包含计算高能粒子激发大气分子能级跃迁的机制和相关算法。所谓极光扰动大气临边红外辐射就是指临边路径上的部分路径位于极光区域内时的临边红外辐射,如图 1 阴影区域所示。而临边路径上无极光区域的情况就对应静态大气临边红外辐射。

3 模拟结果与分析

3.1 模拟说明

SHARC 是以完整的 non-LTE 建模为核心的中高层大气红外辐射模式,计算 30~300 km 范围内静态和极光扰动条件下的临边辐亮度,可计算光谱范围为 1~40 μm 。目前 SHARC 建模并计算 CO_2 、 NO^+ 、 NO 三种在极光扰动大气中有显著改变的分子/离子的能级分布。根据理论分析和实测数据,认为其他成分(如 O_3 、 H_2O)的红外辐射带在极

光扰动时受到的影响可以忽略。详细的 SHARC 模式描述可参见文献^[9-11]。

模拟采用典型高纬度冬季夜间大气参数,计算和对比受极光扰动影响的几种主要红外谱带在静态大气条件下和 IBC II、III、III+^[11] 三种极光强度扰动条件下的临边辐亮度。三种极光扰动强度中,IBC II 代表最弱,IBC III+ 代表最强。为了尽可能完整地包含红外谱带的基带和热谱带,模拟中各带均采用较宽的光谱范围,如表 1 所示。其中,2.7 μm 、4.3 μm 带都由两种分子的振转带共同决定,为准确地获得它们的辐射特性,这里采用分解式模拟方法,即在模拟极光扰动临边辐亮度时,每次只假定一种分子的能级受极光粒子激发,其他分子的能级跃迁采用静态机制,以明确极光扰动时每种分子对各红外谱带的影响特征。

表 1 各红外谱带的光谱范围

Table 1 Spectral ranges of all infrared bands

Band name	Wavenumber /	Wavelength /	Radiator
	cm^{-1}	μm	
2.7 μm band	3000-3800	2.6-3.3	CO_2 、 NO
4.3 μm band	2000-2500	4.0-5.0	CO_2 、 NO^+
5.3 μm band	1400-2000	5.0-7.1	NO
10 μm band	900-1100	9.1-11.1	CO_2
15 μm band	600-750	13.3-16.7	CO_2

3.2 CO_2 红外谱带

首先,计算极光扰动临边辐亮度时只考虑 CO_2 能级被电子激发,其他分子采用静态机制,并且设定极光电子注入大气的持续时间为 900 s。

图 2(a)、2(b)分别展示出 CO_2 4.3 μm 带和 2.7 μm 带在极光电子注入第 600 s 时刻的三种极光

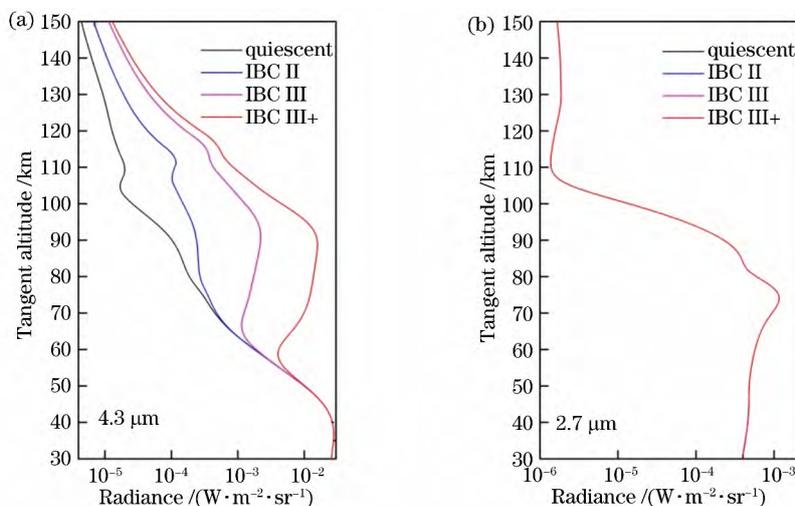
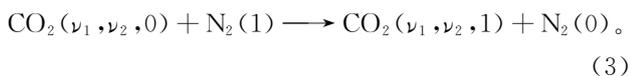
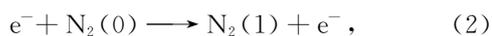


图 2 CO_2 不同谱带临边辐亮度廓线。(a) 4.3 μm ; (b) 2.7 μm

Fig. 2 Limb radiance profiles at different CO_2 spectral bands. (a) 4.3 μm ; (b) 2.7 μm

扰动临边辐亮度廓线以及此谱带的静态临边辐亮度廓线。根据图 2(a), 在一定的切点高度以上, CO_2 4.3 μm 带极光扰动辐亮度相比静态辐亮度显著增强; 且在相同的切点高度上, 极光强度越大, 临边辐亮度越大; 在本文设置的极光区域条件下, 切点高度在 70~110 km 范围内的 IBC III+ 辐亮度相比静态情况增强两个数量级左右。同时, 极光强度越大, 辐亮度在越低的切点高度上展现出明显的增强, 这体现出极光电子刺入大气的深度变化。根据图 2(b) 可知, CO_2 2.7 μm 带辐亮度在各切点高度上都不受极光事件的影响。

CO_2 4.3 μm 带的极光增强主要源自于以下过程^[7]:



极光电子通过(2)式的碰撞过程将大量的动能转化为 N_2 的振动能, (3)式的碰撞过程将能量进一步传递到 CO_2 ν_3 振动能级, 进而导致 CO_2 $\nu_3: 1 \rightarrow 0$ 自发辐射跃迁产生的 4.3 μm 带辐射的增加。而 CO_2 2.7 μm 带源自于 $\text{CO}_2(101)$ 向基态的自发辐射跃迁, 由于在极光事件中缺乏这一高激发态的激励机制, 因此它对应的临边辐射没有增强。

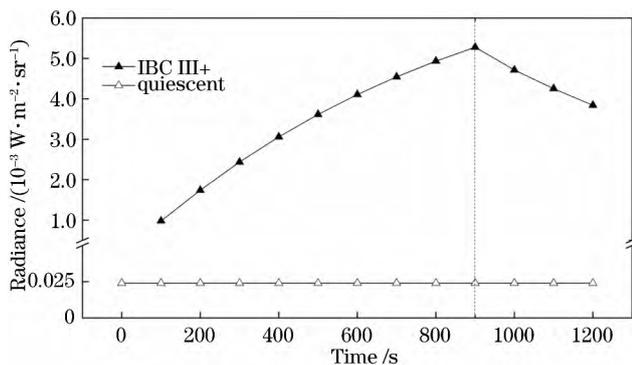


图 3 切点高度 100 km 处 CO_2 4.3 μm 带临边辐亮度随时间的演化

Fig. 3 Time evolution of limb radiance at CO_2 4.3 μm for 100 km tangent altitude

另一方面, 由于(2)式表示的碰撞过程的速率很快, 可以在很短的时间内产生大量 $\text{N}_2(1)$, 但 $\text{N}_2(1)$ 的损失速率很缓慢, 这造成极光电子注入开始后 $\text{N}_2(1)$ 的数密度并不会很快达到稳定而是随时间增加逐渐积累。另外, 通过(3)式, 处于 $\text{CO}_2(001)$ 能级的分子数密度也会随时间增加, 进而导致 CO_2 4.3 μm 带辐射在极光事件中随时间演化。图 3 展示出切点高度 100 km 处 CO_2 4.3 μm 带辐亮度随时

间演化的过程。极光电子持续注入的 900 s 内极光扰动值不仅比静态值增强两个数量级左右, 而且随时间的增加仍持续增强数倍。在极光结束后, 没有迅速恢复到静态值, 而是缓慢地减小; 由于 $\text{N}_2(1)$ 损失缓慢, 辐亮度会在相当长一段时间后恢复静态情况。因此, 精确地解译极光扰动条件下受 CO_2 4.3 μm 带影响的辐射观测值时, 需要通过其他手段先明确极光电子注入的时间历程。

图 4(a) 和 (b) 分别展示出 CO_2 15 μm 带和 10 μm 带的静态廓线以及极光电子注入第 600 s 时刻的三种极光扰动廓线。15 μm 带辐亮度在切点高度 100 km 以上存在微弱的增强; 10 μm 带辐亮度在切点高度 80 km 以上存在小幅度增强。实际上, 这两个长波红外谱带的辐射增强都是 CO_2 4.3 μm 带辐射增强的关联效应。 $\text{CO}_2(001)$ 主要通过向基态自发辐射跃迁的过程产生 4.3 μm 带辐射, 但也存在一定概率的 $\text{CO}_2(001) \rightarrow \text{CO}_2(020)$ 跃迁产生 10 μm 带辐射, 此过程导致 10 μm 带辐射在极光扰动时的增强, 同时使 $\text{CO}_2(020)$ 能级数密度增大。进一步, $\text{CO}_2(020) \rightarrow \text{CO}_2(010) \rightarrow \text{CO}_2(000)$ 跃迁产生的 15 μm 带辐射也获得附带的增强。由跃迁概率决定, 它们的增强幅度远低于 4.3 μm 带, 在图 4 中较低的切点高度上增强效应可以忽略不计。此外, 它们在极光扰动时也存在与 CO_2 4.3 μm 带辐亮度相似的含时演化特征, 只是增长幅度同样远小于 4.3 μm 带。

3.3 NO^+ 红外谱带

在模拟静态大气时并不考虑 NO^+ 的存在, 认为这是极光电子注入造成的离解过程中的产物。根据对 NO^+ 光谱的实验室测量和理论计算, 其在 4.3 μm 带同样存在较强的发射谱^[8,17]。这里, 计算极光扰动临边辐亮度时只考虑 NO^+ 能级被电子激发。

图 5(a) 展示出 NO^+ 4.3 μm 带在极光电子注入第 600 s 时刻的三种极光扰动廓线以及对应的静态廓线。在一定的切点高度以上, NO^+ 4.3 μm 带极光扰动辐亮度相比于静态辐亮度有显著地增强, 且与 CO_2 4.3 μm 带的增强现象相似。为明确在极光扰动条件下 4.3 μm 带辐亮度相比静态值的总增强中 CO_2 和 NO^+ 的贡献大小, 采用

$$P = \frac{I_{\text{NO}^+} - I_{\text{Q}}}{I_{\text{CO}_2 + \text{NO}^+} - I_{\text{Q}}} \times 100\% \quad (4)$$

来计算 NO^+ 的贡献比例, 式中: I_{Q} 是 4.3 μm 带静态辐亮度; I_{NO^+} 是考虑 NO^+ 4.3 μm 带增强的辐亮度; $I_{\text{CO}_2 + \text{NO}^+}$ 是同时考虑 CO_2 和 NO^+ 4.3 μm 带增强

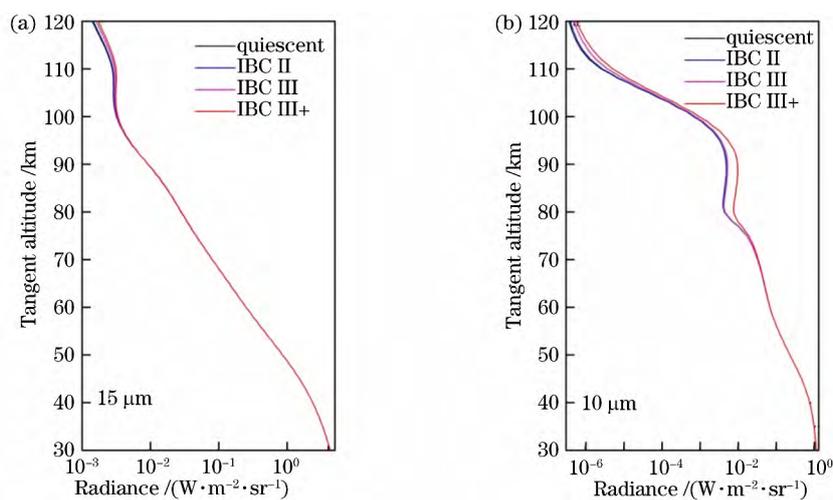


图 4 CO₂不同谱带临边辐亮度廓线。(a) 15 μm; (b) 10 μm

Fig. 4 Limb radiance profiles at different CO₂ spectral bands. (a) 15 μm; (b) 10 μm

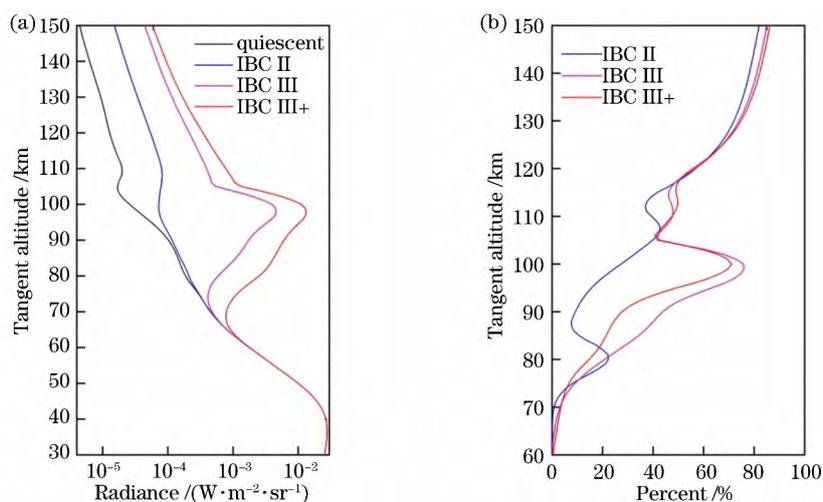


图 5 NO⁺ 4.3 μm 带临边辐亮度廓线和在总的 4.3 μm 带极光增强中的贡献比例。(a)亮度廓线;(b)贡献比例

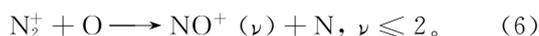
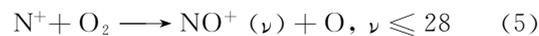
Fig. 5 Limb radiance profiles at NO⁺ 4.3 μm and its contribution percentage in total auroral enhancement.

(a) Radiance profile; (b) contribution percentage

的辐亮度。图 5(b) 展示出极光电子注入第 600 s 时刻 NO⁺ 对总的带辐射增强的贡献比例。可以看到, 在切点高度 75 km 以下, NO⁺ 的贡献比例均小于 10%, 这表明在此区域 CO₂ 4.3 μm 带主导极光增强; 在切点高度 75~120 km 之间, IBC II 条件下 NO⁺ 的贡献比例逐步增加到 50% 以上, IBC III、III+ 条件下 NO⁺ 的贡献比例增加得更迅速, 这表明在这一区域内 NO⁺ 的贡献与 CO₂ 逐步相当; 在切点高度 120 km 以上, NO⁺ 的贡献比例均逐步增加到 90% 以上, 这表明这一区域 NO⁺ 4.3 μm 带主导了极光增强。很明显, NO⁺ 4.3 μm 带是分析实测 4.3 μm 带极光扰动临边辐亮度时必须考虑的主要因素。

NO⁺ 4.3 μm 带的极光增强主要来源于以下过

程^[7]:



极光电子的注入导致大气中主要成分的离解, 产生了大量的离子 N⁺、N₂⁺, 它们具有较高的化学势能, 通过由(5)式和(6)式表示的化学反应将能量转化为 NO⁺ 的振动能, 进而通过自发辐射跃迁 NO⁺(ν) → NO⁺(ν-1) 产生 4.3 μm 带辐射。反应产生的 NO⁺ 可以处于最高 ν = 28 的振动激发态, 因此 NO⁺ 4.3 μm 带包含多个重要的热谱带辐射, 使其带辐射具有很宽的光谱范围。

图 6 展示出 IBC III+ 极光条件下切点高度 100 km 处的一组 4.3 μm 带辐亮度谱, 光谱分辨率为 2 cm⁻¹。可以看到, NO⁺ 在更宽的光谱范围内都

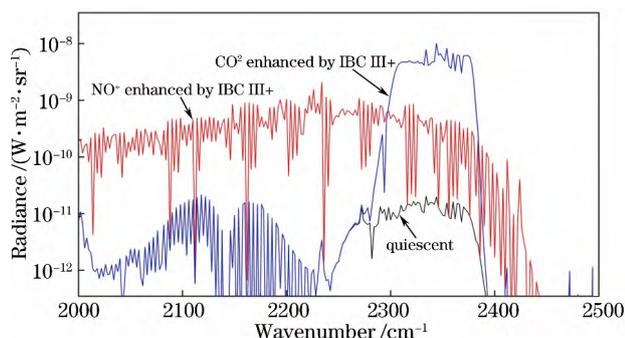


图 6 切点高度 100 km 处 CO₂ 和 NO⁺ 4.3 μm 带临边辐亮度谱

Fig. 6 Spectra of limb radiance at CO₂ and NO⁺ 4.3 μm for 100 km tangent altitude

相比于静态谱有显著增强。对于小于 2300 cm⁻¹ 的辐射,极光增强都源于 NO⁺。根据 CO₂ 和 NO⁺ 4.3 μm 带的增强机制比较也可以看出,两者虽然有重合的谱区,但是相互并无耦合关系,可以单独分析。

进一步,由于自发辐射跃迁和随后的中和反应导致 NO⁺(ν) 损失速率很快,NO⁺(ν) 数密度在强极光扰动时依然可以很快达到平衡,因此 NO⁺ 4.3 μm 带极光扰动辐亮度也会很快达到平衡。图 7 展示出切点高度 100 km 处的 NO⁺ 4.3 μm 带辐亮度随时间演化的过程。根据模拟结果,在极光电子注入后辐亮度很快就相比于静态值增大了两个数量级以上,并保持恒定直至极光结束的时刻;在极光结束后,迅速恢复到静态值。因此,解译极光扰动时 NO⁺ 主导的 4.3 μm 带临边辐射观测值,比如 2000 ~ 2300 cm⁻¹ 的辐亮度或 150 km 以上的辐亮度,并不需要充分了解极光电子注入时间历程。

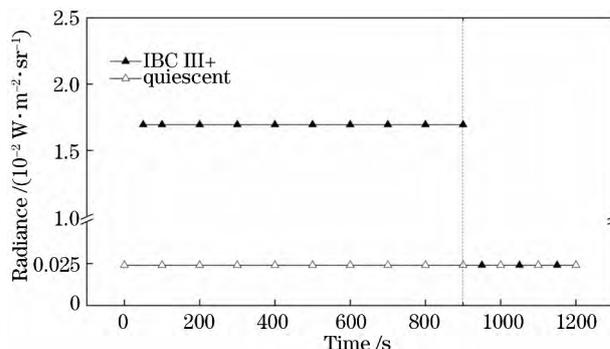
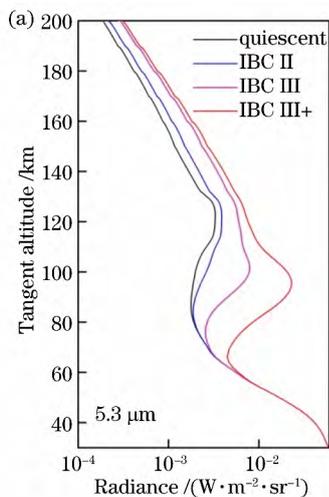


图 7 切点高度 100 km 处 NO⁺ 4.3 μm 带临边辐亮度随时间的演化

Fig. 7 Time evolution of limb radiance at NO⁺ 4.3 μm for 100 km tangent altitude

3.4 NO 红外谱带

图 8(a)、8(b) 分别展示出 NO 5.3 μm 带和 2.7 μm 带在极光电子注入第 600 s 时刻的三种极光扰动廓线以及对应的静态廓线。这里,计算极光扰动临边辐亮度只考虑 NO 能级被极光电子激发。可以看出,NO 5.3 μm 带和 2.7 μm 带极光扰动辐亮度相比对应的静态值均有显著增大,且极光强度越大,增强越明显;在切点高度 100 km 附近,NO 5.3 μm 带的 IBC III+ 辐亮度相比静态值增大一个数量级左右,NO 2.7 μm 带增大超过三个数量级。

NO 5.3 μm 带和 2.7 μm 带的极光增强主要来源于以下过程^[8]:



极光电子离解大气主要成分时同样产生大量激发态和基态原子 N(²D)、N(⁴S),它们通过由(7)式

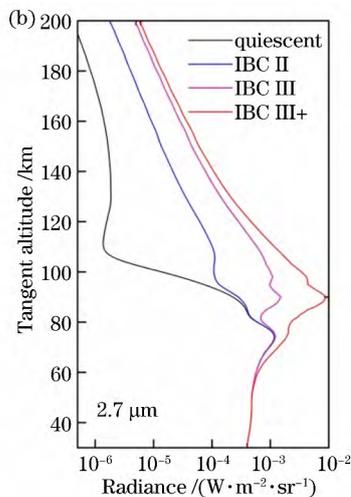


图 8 NO 不同谱带临边辐亮度廓线。(a) 5.3 μm; (b) 2.7 μm

Fig. 8 Limb radiance profiles at different NO spectral bands. (a) 5.3 μm; (b) 2.7 μm

和(8)式表示的化学反应将能量转化为 NO 振动能;同时静态大气中主导 NO 振动能级跃迁的由(9)式表示的碰撞过程也在极光扰动时起主要作用。处于高振动激发态的 NO 通过自发辐射跃迁 $\text{NO}(\nu) \rightarrow \text{NO}(\nu-1)$ 产生 $5.3 \mu\text{m}$ 带辐射, $\text{NO}(\nu) \rightarrow \text{NO}(\nu-2)$ 产生 $2.7 \mu\text{m}$ 带辐射。由于(7)式和(8)式表示的化学反应直接产生 NO 高振动激发态, $5.3 \mu\text{m}$ 带和 $2.7 \mu\text{m}$ 带辐射不仅基带获得增强, 多个热谱带也获得增强。图 9(a)、9(b)分别展示出 IBC III+ 极光条件下切点高度 110 km 处 NO $5.3 \mu\text{m}$ 带和 $2.7 \mu\text{m}$ 带的辐亮度谱, 光谱分辨率为 2 cm^{-1} 。可以看到, 它们的热谱带可以获得比基带更大幅度的增强。

由(7)式和(8)式表示的化学反应快速产生大量 $\text{NO}(\nu)$, 经过自发辐射跃迁后都落入基态, 但 $\text{NO}(0)$ 的损失速率很慢, 这使其数密度随时间的增加逐渐

积累, 在相当长时间内都不会到达稳定。通过由(9)式表示的碰撞过程, $\text{NO}(1)$ 的数密度也会随时间逐步增加, 因此 $5.3 \mu\text{m}$ 基带辐射在极光扰动时含时演化。而单独由(7)式和(8)式表示的化学反应产生的 $\text{NO}(\nu)$ 及其发射辐射是可以在很短时间内到达平衡状态的, 因此 $5.3 \mu\text{m}$ 带的热谱带和 $2.7 \mu\text{m}$ 带辐射可以很快到达平衡。

图 10(a)、10(b)分别展示出切点高度 110 km 处的 NO $5.3 \mu\text{m}$ 带和 $2.7 \mu\text{m}$ 带辐亮度随时间演化的过程。可以看出, 包含 $5.3 \mu\text{m}$ 基带和热谱带的总辐亮度在极光开始后迅速增强, 随后的极光持续时间内只是小幅度增大, 这反映出由(9)式表示的碰撞过程贡献的基带辐射在总辐射中比例较小。极光结束后, 总辐亮度迅速回落到接近静态值, 只是由于 $\text{NO}(0)$ 缓慢地损失, 在持续一段时间后会完全恢

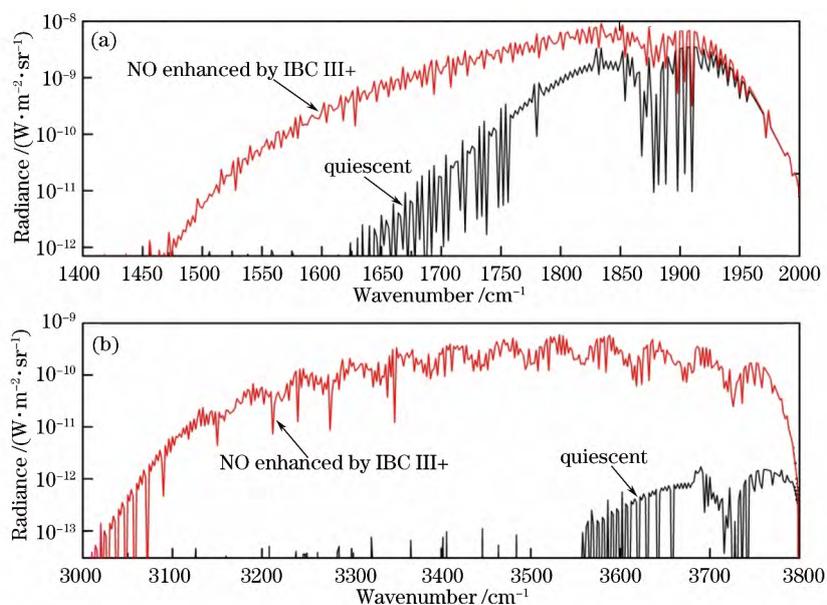


图 9 切点高度 110 km 处 NO 不同谱带临边辐亮度谱。(a) $5.3 \mu\text{m}$; (b) $2.7 \mu\text{m}$

Fig. 9 Spectra of limb radiance at different NO spectral bands for 110 km tangent altitude. (a) $5.3 \mu\text{m}$; (b) $2.7 \mu\text{m}$

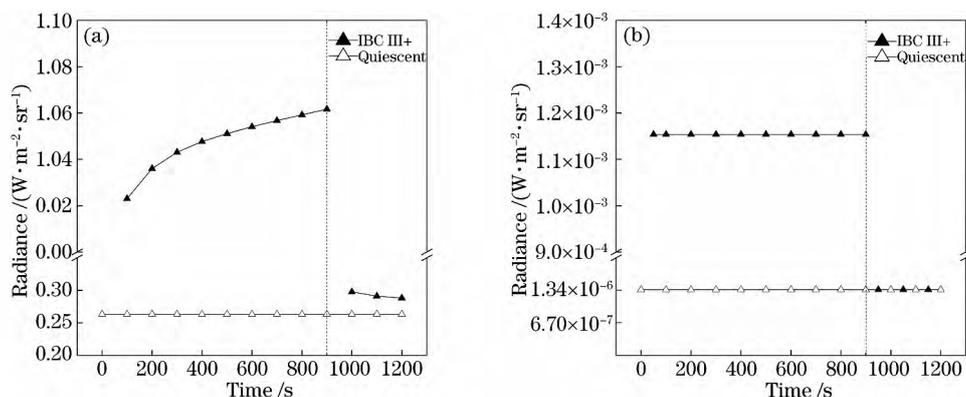


图 10 切点高度 110 km 处 NO 不同谱带临边辐亮度随时间的演化。(a) $5.3 \mu\text{m}$; (b) $2.7 \mu\text{m}$

Fig. 10 Time evolution of limb radiance at different NO spectral bands for 110 km tangent altitude. (a) $5.3 \mu\text{m}$; (b) $2.7 \mu\text{m}$

复到静态情况。NO 2.7 μm 带辐亮度则在极光电子注入后快速增强三个数量级左右并保持恒定值，并在极光结束后快速恢复到静态值。

4 实测数据分析示例

应用所获得的极光扰动条件下中高层大气红外谱带的辐射特性，列举利用模式分析实测数据的示例。模拟卫星载荷 TIMED/SABER (Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetic and Dynamic/Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry)^[18] 4.3 μm 通道于 2003 年 10 月 30 日世界时 1.69UT 在 67N°, 12E° 处的一次极光扰动临边辐射观测事件。根据文献 [19] 的判断，极光电子注入能谱使用 Maxwellian 模型描述，能量通量为 $80 \text{ erg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ，特征能量为 8 keV，其中 $1 \text{ erg} = 10^{-7} \text{ J}$ 。采用大气参数经验模式 SAG (SHARC Atmosphere Generator)^[20] 生成对应时间-位置的大气参数廓线，并利用 TIMED 获得的大气参数反演值替换原本的经验值，以尽可能接近真实的大气状态。

由于 SABER 4.3 μm 通道相对谱响应超过 0.1 的光谱区间为 $2200 \sim 2350 \text{ cm}^{-1}$ ，根据图 6，其观测临边辐射应该同时包含 NO⁺ 和 CO₂ 的贡献。但根据 NO⁺ 和 CO₂ 贡献比例的研究，无论极光强弱，在至少 150 km 以上的切点高度上，NO⁺ 都主导 4.3 μm 带临边辐射，因此模拟这一区域 SABER 4.3 μm 通道临边辐亮度可以忽略极光电子注入时间的影响。

图 11 展示出对这一观测事件的模拟值与实测值的对比，模拟时考虑 NO⁺ 和 CO₂ 能级都被极光电子激发。可以看到，静态模式确实不能用于极光扰动红外辐射的模拟分析，而模拟的极光扰动临边辐亮度与实测值总体符合得较好，这也验证了模式的正确性。模拟值与实测值之间的偏差是模拟采用的视线几何、大气参数与实际情况的偏差以及模式算法不确定性的综合体现。根据假定的极光电子注入 100, 600, 1000 s 时刻的模拟结果，在切点高度 120 km 以上，极光注入时间历程对模拟结果没有显著的影响。因此，可以通过模式分析热层区域的极光扰动 4.3 μm 带临边辐射观测数据进一步研究 NO⁺ 关联的热层/电离层化学过程或反演 NO⁺ 数密度等。

5 结 论

利用 SHARC 模拟研究了极光对中高层大气主

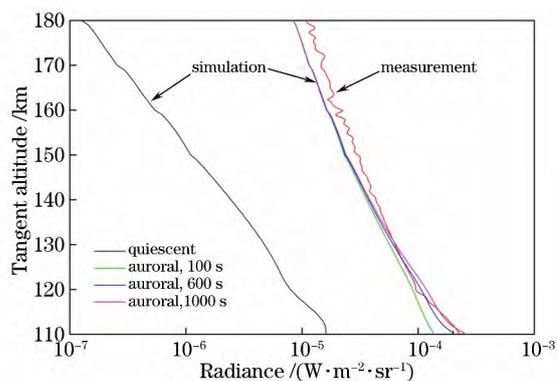


图 11 SABER 观测事件的模拟值与实测值对比

Fig. 11 Comparison between simulated and measurement data of SABER event

要分子红外辐射带临边辐亮度的影响，模拟分析的主要结论为：

1) 在中高层大气中，极光扰动条件下实际的 2.7 μm 带临边辐亮度因 NO 2.7 μm 带在极光区域的辐射增强而增强；增强谱带范围包含 NO 2.7 μm 带基带和热谱带谱区；增强效应在极光持续过程中保持稳定，极光结束后很快恢复到静态情况。

2) 极光扰动条件下实际的 4.3 μm 带临边辐亮度因 NO⁺ 和 CO₂ 而显著增强，两者对实际辐射增强的贡献比例在不同切点高度上不同，但总体来说都是重要的影响因素。对于增强谱带范围，NO⁺ 覆盖更广；包含 CO₂ 4.3 μm 带的临边辐亮度因 CO₂ 辐射的含时演化在极光事件中和结束后一段时间有明显的含时演化，在此以外的谱区不含时演化。

3) 极光扰动条件下实际的 5.3 μm 带临边辐亮度因 NO 5.3 μm 带在极光区域的辐射增强而增强。增强的光谱范围包含 NO 5.3 μm 带基带和热谱带；极光电子诱导的化学反应导致热谱带对总辐亮度的贡献显著增大；纯热谱带的临边辐亮度在极光持续中保持稳定，但包含基带的临边辐亮度在极光中和结束后一段时间有小幅度的含时演化。

4) 在极光扰动条件下实际的 10 μm 、15 μm 带临边辐亮度也获得增强，这是 CO₂ 4.3 μm 带辐射在极光区域增强的关联效应。它们的时间演化特征与 CO₂ 4.3 μm 带的相似，只是变化幅度小很多。

基于此，进一步列举了应用模式模拟分析实测的极光扰动临边辐射数据的示例，展示出模拟获得的辐射特性在实测辐射数据分析中的作用，验证了 SHARC 极光模式的正确性，为利用极光模式开展辐射和光谱分析的研究做了初步探索。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Goussev O. Non-LTE diagnostics of the infrared observations of the planetary atmosphere[D]. München: Ludwig-Maximilians-Universität München, 2003.
- [3] Picard R H, Dewan E M, Winick J R, *et al.* Optical/infrared signatures for space-based remote sensing [R]. MA: AIR Force Research Laboratory, AIR Force Materiel Command, Space Vehicles Directorate, 2007-11-01.
- [4] Paxton L J, Meng C I, Anderson D E, *et al.* MSX-A multiuse space experiment[J]. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 1996, 17(1): 19-34.
- [5] Winick J R, Mlynczak M G, Wintersteiner P P, *et al.* Thermospheric infrared radiance response to the April 2002 geomagnetic storm from SABER infrared and GUVI ultraviolet limb data [J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5235: 250-264.
- [6] Sharma R D, O'Neil R, Gardiner H, *et al.* Midcourse space experiment: auroral enhancement of nitric oxide medium-wave infrared emission observed by the spatial infrared imaging telescope III radiometer [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(A10): 21351-21365.
- [7] O'Neil R R, Winick J R, Picard R H, *et al.* Auroral NO⁺ 4.3 μm emission observed from the midcourse space experiment; multiplatform observations of 9 February 1997[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112(A6): 19331-19345.
- [8] Winick J R, Picard R H, Joseph R A, *et al.* An infrared spectral radiance code for the auroral thermosphere (AARC) [R]. [S. l.]: Air Force Geophysics Laboratory, 1987-11-20.
- [9] Sundberg R L, Duff J W, Gruninger J H, *et al.* SHARC, a model for calculating atmospheric infrared radiation under non-equilibrium conditions [J]. *The Upper Mesosphere and Lower Thermosphere: A Review of Experiment and Theory*, 1995: 287-295.
- [10] Gruninger J H, Sundberg R L, Acharya P K, *et al.* User's manual for SHARC-4 the strategic high-altitude radiance code[R]. MA: Phillips Laboratory, Geophysics Directorate, AIR Force Materiel Command Hanscom AIR Force Base, 1997-03-31.
- [11] Dothe H, Duff J W, Sharma R D, *et al.* A model of odd nitrogen in the aurorally dosed nighttime terrestrial thermosphere[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(A6): SIA 2.
- [12] Dai C M, Wei H L, Hu S X. 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.
- [13] Tan P F, Han Y G, Xuan Y M. Analysis of the non-local thermodynamic equilibrium effect on infrared limb radiances in the upper atmosphere [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34 (10): 1001001.
谭鹏飞, 韩玉阁, 宣益民. 高层非局地热力平衡大气对红外临边辐射的影响分析[J]. *光学学报*, 2014, 34 (10): 1001001.
- [14] Wu Y. Energy deposition and non-equilibrium infrared radiation in aurora [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
吴亚东. 极光的能量沉积和非平衡红外辐射[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [15] Rao R Z. *Modern atmospheric optics* [M]. Beijing: Science Press, 2012.
饶瑞中. *现代大气光学* [M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [16] Jursa A S. *Handbook of geophysics and the space environment* [R]. MA: Phillips Laboratory, Geophysics Directorate, AIR Force Materiel Command Hanscom AIR Force Base, 1985.
- [17] Werner H J, Rosmus P. Ab initio calculations of radiative transition probabilities in the X1Σ⁺ ground state of the NO⁺ ion [J]. *Journal of Molecular Spectroscopy*, 1982, 96(2): 362-367.
- [18] 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: 277-289.
- [19] Mertens C J, Fernandez J R, Xu X, *et al.* A new source of auroral infrared emission observed by TIMED/SABER [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(17): 52-58.
- [20] Shroll R M, Adler-Golden S, Duff J W, *et al.* User's manual for SAG-2 SHARC/SAMM atmosphere generator [R]. MA: Air Force Research Laboratory, Space Vehicles Directorate, AIR Force Materiel Command Hanscom AIR Force Base, 2003-10-14.