

doi: 10.19855/j.1000-0364.2020.066001

利用 LBH 辐射图像数据反演大气 O/N_2 方法

丁广兴, 陈 波

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春市 130033)

摘 要: 利用极光 Lyman – Birge – Hopfield (LBH) 辐射图像数据可用来研究太阳风磁场与地球磁场耦合、亚暴与磁暴等过程. 综合 LBH 辐射图像数据和 O 原子 135.6 nm 辐射数据可反演电离层氧原子与氮气分子 O/N_2 比值分布, 进而研究高层大气组分信息及电离层分布变化, 对科学研究和空间天气预报具有重要意义. 本文给出了 LBH 辐射传输机理和我国自主研发的搭载在风云三号 D 星 (FY – 3D) 上的广角极光成像仪 (Wide – field Auroral Imager, WAI) 在轨获得的 LBH 140 – 180 nm 波段极光辐射图像数据. 结合大气紫外辐射积分代码 (Atmospheric Ultraviolet Radiance Integrated Code, AURIC) 计算 O 135.6 nm 辐射数据、LBH 辐射光谱以及 MSISE00 大气模型计算的 O 、 N_2 数据, 给出了利用 WAI 观测的 LBH 辐射图像数据反演大气 O/N_2 比值理论计算方法. 该方法将为利用我国自主观测 LBH 辐射数据和 O 135.6 nm 辐射数据开展空间信息反演研究打下基础.

关键词: 莱曼 – 伯奇 – 霍普菲尔德 (LBH) 辐射; 广角极光成像仪 (WAI); 电离层光度计 (IPM); O/N_2

中图分类号: P352

文献标识码: A

文章编号: 1000-0364(2020) 06-0946-05

Calculation of the atmospheric O/N_2 based on the LBH radiation image data

DING Guang-Xing, CHEN Bo

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: The auroral LBH radiation image data can be used to study the coupling process of solar wind magnetic field and earth magnetic field, substorm and magnetic storm. The ionospheric O/N_2 ratio distribution can be retrieved using LBH radiation image data and O 135.6 nm radiation data, and then the upper atmosphere composition information and ionospheric distribution can be studied, which is of great significance for scientific research and space weather forecast. In this paper, the mechanism of LBH radiation transmission and the data of LBH 140 – 180 nm auroral radiation image obtained by Chinese self – developed wide – field auroral imager (WAI) mounted on FY – 3D are presented. Combined with the O 135.6 nm radiation data calculated by AURIC, LBH radiation spectrum and O , N_2 data calculated by MSISE00 atmospheric model, the theoretical calculation method of atmospheric O/N_2 ratio inversion using LBH radiation image data observed by WAI is given. This method will lay a foundation for spatial information inversion research using LBH radiation data and O 135.6 nm radiation data observed by Chinese instruments.

Key words: Lyman – Birge – Hopfield (LBH) radiation; Wide – field Auroral Imager (WAI); Ionospheric Photometer (IPM), O/N_2

收稿日期: 2020-07-03

基金项目: 国家自然科学基金 (U1531106)

作者简介: 丁广兴 (1991—), 男, 山东聊城市人, 博士, 助理研究员, 主要研究领域为空间观测数据反演计算及空间物理现象研究.

通讯作者: 陈波 (1961—), 男, 吉林长春市人, 博士, 研究员, 主要从事 X 射线 – 极紫外 – 远紫外空间短波光学遥感技术研究.

E-mail: chenb@ciomp.ac.cn

1 引言

极光 LBH 辐射是太阳风携带能量粒子沿地球磁力线沉降进入极区高层大气并与高层大气中的 N₂ 分子碰撞激发产生, 中低纬度电离层 LBH 辐射与 O135.6 nm 辐射是太阳短波辐射电离高层大气产生的光电子碰撞激发高层大气中的 N₂ 分子与 O 原子产生^[1,2]. 通常极光卵位置介于磁纬 65° 与 75° 之间, 但在磁暴或亚暴发生时, 极光会向夜侧低纬度偏移. 从空间对极光成像可以提供沉降粒子的时空分布信息, 推断出沉降粒子源于磁层位置, 进而研究磁层能量传输过程^[3,4]. 综合利用空间 LBH 观测图像数据和 O135.6 nm 观测数据反演电离层 O/N₂ 比值, 研究高层大气中粒子组分变化等问题.

针对极光与电离层的空间遥感观测已经发展了 40 余年, 在此期间, 多种成像相机及光谱仪(工作在 X 射线波段、远紫外波段、可见光波段)发射升空用于研究极光电离层现象, 这些仪器大致可分为两类. 第一类仪器属于运行在极轨椭圆轨道上的多光谱相机, 如在 DE-1 卫星上的极光扫描相机(SAI)^[5], IMAGE 卫星上的宽带成像相机(WIC)和光谱成像仪(SI)^[6], Polar 卫星上的紫外相机(UVI)^[7]等等. 这些仪器工作在远紫外波段, 对极光某些特征谱段(H121.6 nm, O130.4 nm, O135.6 nm 和 N₂ LBH)进行成像观测. 由于卫星轨道和仪器设计的原因, 这些仪器只能在远地点获得相对较大但分辨率较低的极光图像. 另一类仪器搭载在低轨道高度卫星上, 能够获得较高分辨率的极光图像, 但观测视场的限制使得无法瞬时获得极光全貌, 例如 TIMED 卫星上的 GUVI 和 DMSP 系列卫星上的 SSUSI^[8,9]. 综合上述两类仪器的特点, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研制出的大视场(130° × 130°)高分辨率极光观测设备—广角极光成像仪(WAI), 用于监测极光动态变化, 研究磁层动力学过程.

极光形态往往被认为是电离层-磁层系统的投影, 在过去的十年中, 利用空间极光观测数据, 研究学者发现了许多极光的大尺度结构, 对磁层中的物理化学过程有更深入的理解^[10,11]. 远紫外波段极光辐射与日辉辐射遥感观测数据可用来反演计算多种重要空间物理参数, 如电离层 O/N₂ 比值、极光边界位置、有效沉降电子通量、电子平均能量和电离层电导率等等^[1-4]. 电离层 O/N₂ 比

对大气组分变化极其敏感, 该比值反应了大气内部加热等动力学过程^[12,13]. 当太阳风暴来临时, 太阳风携带的大量能量粒子轰击地球大气层, 产生的焦耳加热和高能粒子沉降会导致大气温度升高和大气 O/N₂ 比值下降, 这是由于该过程中 O 原子含量将减小而 N₂ 分子数量相对稳定导致的, 所以 O/N₂ 比值通常被用作监测热层扰动的指标. 此外, O/N₂ 比值的变化也与电离层 F 层峰值电子密度和总电子密度含量有关^[14]. 许多研究表明, 综合利用空间观测 O135.6 nm 辐射数据和 LBH 辐射数据可反演计算电离层 O/N₂ 比值^[15,16]. 参考 AURIC 计算 LBH 辐射光谱结果, 本文最后给出了利用 WAI 观测的 LBH 辐射图像数据反演大气 O/N₂ 比值理论计算方法.

2 LBH 辐射传输机理

N₂ LBH 辐射是分子带状辐射, 覆盖远紫外波段 127 nm 处至中紫外波段 240 nm 处的光谱范围. 如式(1)所示, 该辐射是 N₂ 由激发态($\alpha^1\Pi_g$)至基态($X^1\Sigma_g^+$)的辐射跃迁而产生, 此为电偶极禁止跃迁. 由选择定则可知, 在这两个态之间可以发生的是电四极矩跃迁和磁偶极矩跃迁. 实际上, 在分子光谱中最先被观测到的是电四极矩跃迁贡献的 LBH 带. 每个 LBH 带由(O, P, Q, R, S)五个分支组成, 其中(P, Q, R)三个分支是由磁偶极矩跃迁和电四极矩跃迁混合组成的, 对应于 $\Delta J = -1, 0, 1$; 其余两个分支(O, S)则为纯电四极矩跃迁, 对应于 $\Delta J = -2, 2$.

$$N_2(\alpha^1\Pi_g) \rightarrow N_2(X^1\Sigma_g^+) + h\nu(\text{LBH}) \quad (1)$$

每个 LBH 带的辐射强度的计算需要实验室测量的原子物理参数, 其中关于基态($X^1\Sigma_g^+$)的测量数据由 Loftus 与 Krupenie 整理^[17], 而激发态($\alpha^1\Pi_g$)的测量数据是由 Vanderslice 等人整理^[18]. LBH 带的体辐射速率 j_λ 可通过式(2)来计算

$$j_\lambda(z) = f_\lambda \cdot j(z) \quad (2)$$

式中, f_λ 表示某个 LBH 带占总的 LBH 带系的辐射组分, $j(z)$ 表示海拔高度 z 处于 $\alpha^1\Pi_g$ 态氮气分子的产生速率. 对于 f_λ 的值, 计算可采用 Ajello 与 Shemansky 的实验室测量结果^[19]. 处于 $\alpha^1\Pi_g$ 态的氮气分子的产生速率 $j(z)$, 可采用电子碰撞直接激发理论来计算, 其值等于 g 因子与氮气分子密度的乘积, 如式(3)和(4)所示

$$j(z) = \rho_{N_2}(z) \cdot g(z) \quad (3)$$

$$g(z) = \int_{E_0}^{E_{\max}} \phi(E, z) \cdot \sigma^{\text{ex}}(E) dE \quad (4)$$

上式中, $\phi(E, z)$ 代表海拔高度 z 处的电子通量, $\sigma^{\text{ex}}(E)$ 表示 $\alpha^1\Pi_g$ 态的激发截面, E_0 表示 $\alpha^1\Pi_g$ 态的激发势能阈值, $E_{\max}$ 表示所考虑的电子能量的上限.

从空间对 LBH 辐射进行观测, 观测量为 LBH 柱辐射率. 某一观测视线 LOS 方向的柱辐射率 I_λ 等于此方向上各点处的体辐射率与一个光子由发射点处传输至观测点处而不被散射的几率的乘积沿该方向的积分, 可通过下式来计算(单位为 Rayleigh)

$$I_\lambda = 10^{-6} \int_{Z_l}^{Z_u} j_\lambda(z) \cdot \exp(-t_\lambda) dz / \mu \quad (5)$$

$$t_\lambda = \sigma_{O_2}^{\text{abs}}(\lambda) \cdot \int_Z^{Z_u} \rho_{O_2}(z) dz / \mu \quad (6)$$

式中, Z_l 表示辐射产生区域的下边界; Z_u 表示辐射产生区域的上边界; μ 表示观测角的余弦值, 即 $\mu = \cos\theta$, 观测角 θ 的定义如图 1 所示, 即观测视线 LOS 方向与当地天底方向之间的夹角; j_λ 表示某个波长的体辐射率; t_λ 表示氧气分子对某个 LBH 波长吸收的光学厚度; $\sigma_{O_2}^{\text{abs}}$ 表示氧气分子对某个 LBH 波长的吸收截面.

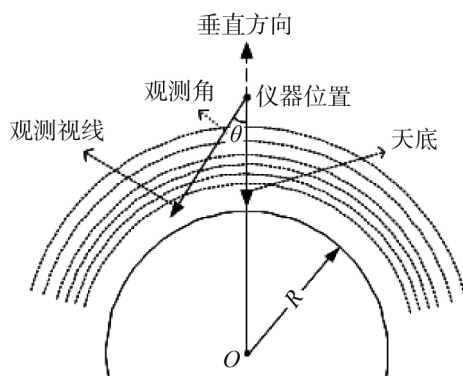


图 1 空间观测仪器观测视线及观测角定义图.

Fig. 1 Definition of line of sight and observation angle of space observation instrument

LBH 带光子的辐射传输过程主要考虑的是氧气分子的吸收效应, 而忽略氮气分子自身的吸收作用, 即氮气分子对于 LBH 带光子是“光学薄”的. 因此 LBH 带光子的散射几率可通过计算氧气分子的吸收光学厚度来解决, 氧气分子的吸收截面数据参考文章^[20].

3 WAI 观测 LBH 极光辐射

WAI 在国内外首次实现通过观测 N_2 LBH 带

辐射对极光和电离层进行大视场、高分辨率成像. WAI 观测波段为 140 nm – 180 nm, 成像仪由两个相同的成像镜头组成, 每一个成像镜头的瞬时观测视场为 $68^\circ \times 10^\circ$, 其中 68° 为跨轨方向, 10° 为沿轨方向. 两个镜头拼接从而使瞬时视场达到 $130^\circ \times 10^\circ$, 通过机身转动结构, 在 2 min 时间内实现对极区 $130^\circ \times 130^\circ$ 扫描成像. 每个光学镜头均由一套离轴四反光学系统、氟化钡滤光片和一个光子计数成像探测器组成. 在 110 km 的参考观测高度上, WAI 的星下点分辨率为 10 km, 两个探测头部的灵敏度均大于 0.01 counts/s/Rayleigh/pixel, 从而保证了无论是在亚暴发生还是磁暴发生过程中, 成像仪能够观测到极光的边界以及内部精细结构^[21]. 截至目前, WAI 在轨成功工作并下传积累了大量极光与电离层观测数据, 其观测极光图像如图 2 所示.

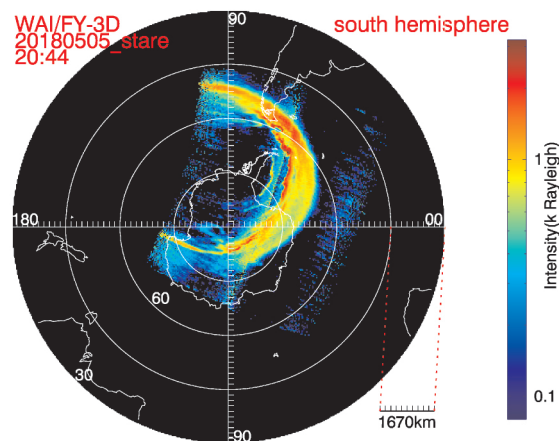


图 2 WAI 在 2018 年 5 月 5 日 20 点 44 分观测到的南半球极光图像. 由图可以得出, WAI 在跨轨方向瞬时观测范围达 5000 km.

Fig. 2 The auroral image in southern hemisphere was observed by WAI at 20: 44 on May 5, 2018. The instantaneous observation range of WAI is 5000 km in the cross orbit direction

4 O/N₂ 比计算

单独利用高纬度 WAI 观测极光数据可用来研究极光动力学过程, 综合 WAI 观测的中低纬度 LBH 辐射数据与空间观测的 O135.6 nm 辐射数据, 可以反演电离层 O/N₂ 柱密度比. Meier 和 Anderson 给出了远紫外波段 O 和 N₂ 日辉辐射谱线的系统研究, Strickland 给出了 O(5S) 135.6 nm 和 N₂($\alpha^1\Pi_g$) LBH 辐射谱线柱密度计算公式如下^[12](单位: Rayleigh)

$$4\pi I_{O1356}(\mu) = 10^{-6} \int_{z_l}^{z_u} j_{O1356}(z) T(z, \mu) e^{-t_\lambda(z)/\mu} dz / \mu \quad (7)$$

$$4\pi I_{LBH}(\lambda, \mu) = 10^{-6} \int_{z_l}^{z_u} j_{LBH}(z) f_\lambda e^{-t_\lambda(z)/\mu} dz / \mu \quad (8)$$

式中, z_l 和 z_u 分别表示辐射产生区域的上下边界, μ 是观测角的余弦值, λ 表示光谱波长, f_λ 是体辐射率 j_{LBH} 在波长 λ 处占的组分, $j_{O135.6}$ 是包含复合散射效应在内的总的体辐射率, $t_\lambda(z)$ 表示在波长 λ 处 O₂ 吸收光学深度, $T(z)$ 表示 O 原子自吸收方程. 参考 Strickland 等人的研究^[12], O/N₂ 柱密度比值的理论方程可由公式(9) 给出

$$\frac{I_{O1356}}{I_{LBH}} \approx k \frac{\int_{N_T} f_o(N_T) dN_T}{\int_{N_T} f_{N_2}(N_T) dN_T} = k \frac{O}{N_2} \quad (9)$$

式中, N_T 表示总的垂直柱密度. 公式(9) 表明, O/N₂ 柱密度比值与 O135.6/LBH 比值成线性关系. 图3 是利用 AURIC 算法计算的电离层中低纬度 120 – 240 nm 波段辐射光谱, 图中蓝色实线标注的是 O135.6 nm 谱线, 橘色实线之间谱线表示的是 LBH 140 – 180 nm 辐射谱线^[20]. 图4 是利用 AURIC 算法模拟计算的 2018 年 5 月 5 日和 2018 年 6 月 22 日两天中 O135.6 nm 辐射强度与 LBH 140 – 180 nm 辐射强度比值与 MSISE00 大气模型计算的大气 O 与 N₂ 比值关系图. 图中数据显示 O135.6 nm/LBH 与 O/N₂ 之间存在高的线性相关关系. 红色实线代表了 O135.6 nm/LBH 与 O/N₂ 的线性拟合, 拟合公式如式(10) 所示.

$$O/N_2 = 2.305 \times O135.6/LBH_{WAI} - 0.165 \quad (10)$$

该公式给出了利用 WAI 观测 LBH 辐射图像数据计算大气 O/N₂ 比值的计算方法.

5 结 论

本文给出了 N₂ LBH 波段辐射产生及传输理论计算公式与 WAI 在轨获得的极光 LBH 波段辐射图像. 结合 AURIC 模拟计算的 O135.6 nm 辐射数据、LBH 140 – 180 nm 辐射数据以及 MSISE00 大气模型计算的 O、N₂ 数据, 给出了利用 WAI 观测图像数据反演大气 O/N₂ 比值的计算方法, 理论分析表明, 该方法反演出的 O/N₂ 比与大气模型计算的 O/N₂ 比线性相关性为 0.989. 在 FY-3D 卫星上搭载 WAI 和电离层光度计(IPM) 两台仪器,

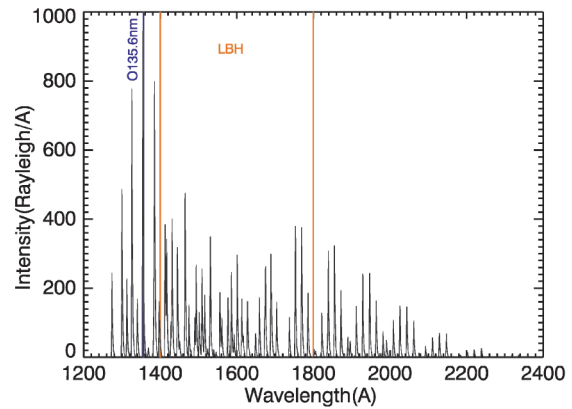


图3 AURIC 算法计算的电离层中低纬度 120 – 240nm 波段辐射光谱, 蓝色实线标注的是 O135.6nm 谱线, 橘色实线之间谱线表示的是 LBH 140 – 180nm 辐射谱线.

Fig. 3 The O135.6nm spectral line marked by blue solid line and the LBH 140 – 180nm spectral lines marked by orange solid lines are calculated by AURIC algorithm.

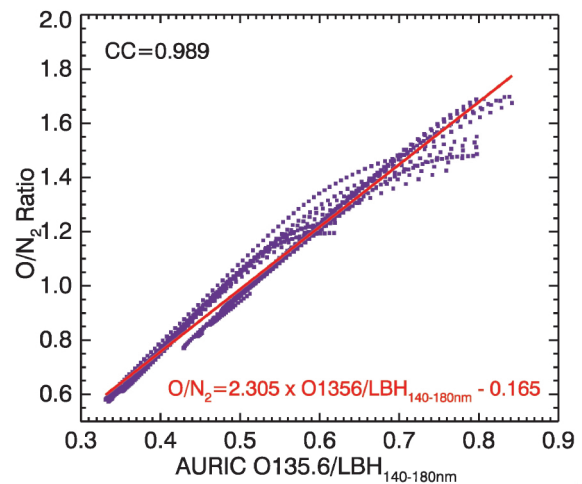


图4 O135.6nm 谱线辐射强度与 LBH 140 – 180nm 辐射谱线强度比值与 MSISE00 大气模型计算的大气 O 与 N₂ 比值关系图. 两类数据拥有高的线性相关系数 CC = 0.989, 红色实线表示两类数据的线性拟合, 拟合公式为 $O/N_2 = 2.305 \times O135.6/LBH_{140-180nm} - 0.165$.

Fig. 4 The relationship between the ratio of O135.6nm to LBH 140 – 180nm intensity and the atmospheric O/N₂ calculated by MSISE00 atmospheric model. The two data have a high linear correlation coefficient CC = 0.989. The red solid line indicates the linear fitting of the two data, the formula is $O/N_2 = 2.305 \times O135.6/LBH_{140-180nm} - 0.165$.

可以同时监测全球极光、电离层图像和 O135.6 nm 辐射,但是 IPM 仅观测到卫星星下点处不同地理位置点的 O135.6 nm 辐射亮度分布,而 WAI 拍摄到的是全球 140 – 180 nm 波段内的图像分布.在后续的 WAI 和 IPM 观测数据反演大气 O/N₂ 比值中,拟根据星上观测视线采用插值的方法来计算全球大气 O/N₂ 比,获得全球 O/N₂ 比高分辨率分布.

致 谢: 针对文中研究所用到的数据,作者们特此感谢中国国家气象局气象卫星中心提供的 FY – 3D WAI 观测数据,感谢美国计算物理实验室提供的 AURIC 算法.感谢中国科学院长春光学精密机械与物理研究所空间一部极紫外研究室各位同事在文章写作期间给予的指导和帮助.

参考文献:

- [1] Meier R R. Ultraviolet spectroscopy and remote sensing of the upper atmosphere [J]. *Space Sci. Rev.*, 1991, 58: 1.
- [2] Dashkevich Z V, Sergienko T I, Ivanov V E. The Lyman – Birge – Hopfield bands in aurora [J]. *Planet. Space Sci.*, 1993, 41: 81.
- [3] Germany G A, Torr M R, Torr D G, et al. Use of FUV auroral emissions as diagnostic indicators [J]. *J. Geophys. Res.*, 1994, 99: 383.
- [4] Germany G A, Torr D G, Richards P G, et al. Determination of ionospheric conductivities from FUV auroral emissions [J]. *J. Geophys. Res.*, 1994, 99: 23297.
- [5] Frank L A, Craven J D, Ackerson K L, et al. Global auroral imaging instrumentation for the Dynamic Explorer mission [J]. *Space Sci. Instrum.*, 1981, 5: 369.
- [6] Mende S B, Heeterdicks H, Frey H U, et al. Far ultraviolet imaging from the IMAGE spacecraft. 2. Wide-band FUV imaging [J]. *Space Sci. Rev.*, 2000, 91: 271.
- [7] Torr M R, Torr D G, Zukic M, et al. A far ultraviolet imager for the International Solar – Terrestrial Physics Mission [J]. *Space Sci. Rev.*, 1995, 71: 329.
- [8] Christensen A B, Walterscheid R L, Ross M N, et al. The global ultraviolet imager (GUVI) for the NASA TIMED mission [J]. *Optical Spectroscopic Techniques and Instrumentation for Atmospheric and Space Research*, 1994, 2266: 451.
- [9] Paxton L J, Meng C I, Fountain G H, et al. Special sensor UV spectrographic imager (SSUSI), an instrument description [J]. *Instrum. Planet. Terr. Atmos. Remote Sens.*, 1992, 1745: 2.
- [10] Laundi K M, Ostgaard N. Asymmetric auroral intensities in the Earth's Northern and Southern hemispheres [J]. *Nature*, 2009, 460: 491.
- [11] Han D S, Nishimura Y, Lyons L R, et al. Throat aurora: The ionospheric signature of magnetosheath particles penetrating into the magnetosphere [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2016, 43, 1819.
- [12] Strickland D J, Evans J S, Paxton L J, Satellite remote sensing of thermospheric O/N₂ and solar EUV, 1, Theory [J]. *J. Geophys. Res.*, 1995, 100: 12217.
- [13] Evans J S, Strickland D J, Huffman R E. Satellite remote sensing of the thermospheric O/N₂ and solar EUV, 2, Data analysis [J]. *J. Geophys. Res.*, 1995, 100: 12227.
- [14] Lean J L, Meier R R, Picone J M, et al. Ionospheric total electron content: global and hemispheric climatology [J]. *J. Geophys. Res.*, 2011a, 116: A10318.
- [15] Peng S F, Tang Y, Wang J, et al. Research on retrieving thermospheric O/N₂ from FUV remote sensing [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32: 1296.
- [16] Ding G X, Chen B, Zhang XX, et al. A method to derive global O/N₂ ratios from SSUSI/DMSP based on Re – AURIC algorithm [J]. *Journal of Atmospheric and Solar – Terrestrial Physics*, 2020, 199: 105196.
- [17] Loftus A, Krupenie P H. The spectrum of molecular nitrogen [J]. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 1977, 28: 947.
- [18] Vanderslice J T, Tilford S G, Wilkinson P G. The high – resolution absorption spectrum of nitrogen from 1060 to 1520 Å, I, The $a^1 \Pi_g \leftarrow X^1 \Sigma_g^+$ system [J]. *Astrophys. J.*, 1965, 141: 395.
- [19] Ajello J M, Shemansky D E. A Reexamination of Important N₂ Cross Sections by Electron Impact with Application to the Dayglow: The Lyman – Birge – Hopfield Band System and NI (119.99 nm) [J]. *J. Geophys. Res.*, 1985, 99(A10): 9845.
- [20] Strickland D J, Bishop J, Evans J S, et al. Atmospheric ultraviolet radiance integrated code (AURIC): theory, software architecture, inputs, and selected results [J]. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 1999, 62: 689.
- [21] Zhang X X, Chen B, He F, et al. Wide – field auroral imager onboard the Fengyun satellite [J]. *Light Sci. Appl.*, 2019, 8: 494.