

# 电离层 $O^+$ 83.4 nm 日辉辐射传输特性研究

王大鑫<sup>1,2</sup>, 付利平<sup>1,3,4\*</sup>, 江芳<sup>1,3,4</sup>, 贾楠<sup>1,2,3,4</sup>, 窦双团<sup>1,2</sup>

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, 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** 电离层极紫外波段(10~100 nm)日辉辐射主要是由太阳光电离激发以及光电子碰撞电离激发过程产生的,利用天基遥感探测手段对极紫外日辉辐射进行观测,可以获得白天电离层F层的电子密度、离子密度及空间分布等信息。极紫外波段日辉的天基遥感探测技术在国外起步较早,尤其是欧美、日本等国家,目前已经处于相对成熟的阶段。而我国对极紫外波段气辉辐射的研究几乎为空白,对电离层的探测也主要集中在夜间,如2017年我国发射的风云三号气象卫星D星上装载的电离层光度计可以获得夜间电离层峰值电子密度。对极紫外气辉进行遥感观测,特别是对电离层中 $O^+$  83.4 nm日气辉辐射的辐射特性进行探测,是获得白天电离层辐射特性的重要手段,也是国际上电离层光学遥感探测技术的研究热点。首先介绍了极紫外日辉的辐射传输理论,对日辉辐射的激发过程、碰撞过程以及共振散射过程进行了介绍,在此基础上重点分析了 $O^+$  83.4 nm日气辉辐射的产生机制及辐射特性。该辐射是太阳光电离激发低热层中的O原子而产生,为电离层极紫外气辉中辐射强度较强的信号之一,83.4 nm气辉的高度分布情况可以提供电离层 $O^+$ 密度扩线以及电子密度扩线,为白天电离层探测提供了一种有效手段。其次分析了 $O^+$  83.4 nm日辉辐射的谱带特性,以MSIS-00大气模型为基础,利用由美国计算物理公司与空军实验室联合开发的AURIC v1.2模型计算83.4 nm气辉辐射的初始体发射率、共振散射作用下的体发射率和临边柱辐射强度的分布情况,探究 $O^+$  83.4 nm日辉谱线与高度、纬度、太阳活动和地磁活动等电离层物理参量的相关性。基于极紫外日辉辐射算法,同时根据氧离子83.4 nm辐射传输特性,考虑该辐射的多次散射效应,提出了氧离子83.4 nm日辉辐射的计算方法。假设电离层呈现电中性,获得氧离子83.4 nm日辉强度可以反演白天电离层 $O^+$ 密度,进而获得白天电离层F层电子密度的分布情况,为探究白天电离层特性提供了重要依据。

**关键词**  $O^+$  83.4 nm; 日气辉; 辐射传输; 电离层

**中图分类号:** P352 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)05-1334-06

## 引言

地球电离层是空间大气的重要组成部分,它的活动特性直接影响无线电波的传播<sup>[1]</sup>。对地球大气极远紫外气辉辐射进行测量是研究地球电离层和热层的重要天基遥感手段。对于电离层F层(100~500 km)区域,氧离子占离子浓度的95%,并认为其浓度可以近似等同于该高度范围内的总等离子体密度<sup>[2]</sup>,因此测量 $O^+$ 相关的气辉辐射可以获得电子密度的分布情况。

利用对白天电离层F层83.4 nm气辉辐射进行临边探测,获得电离层电子密度扩线最初是由McCoy<sup>[3]</sup>等提出的,这项工作为以后一系列通过临边扫描和临边成像来进行遥感探测的卫星任务奠定了理论基础。国际上进行83.4 nm波段遥感探测任务主要包括空间站的大气层电离层遥感探测系统RAIDS<sup>[4-5]</sup>, ARGOS卫星上的低分辨率气辉极光光谱仪LORAAS<sup>[2,5]</sup>, 国防气象卫星计划DMSP上搭载的紫外临边成像仪SSULI<sup>[2,5]</sup>以及安装在国际空间站(ISS)上的临边成像电离层热层极紫外光谱仪LITES<sup>[6]</sup>。此外,2019年发射的ICON卫星计划将对电离层几大因素进行综合探测,包括中

收稿日期: 2019-04-15, 修订日期: 2019-08-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(41874187, 41774195)资助

作者简介: 王大鑫,女,1993年生,中国科学院国家空间科学中心博士研究生 e-mail: wdaxin399100@163.com

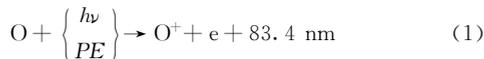
\* 通讯联系人 e-mail: fuliping@nssc.ac.cn

性风、大气成分、大气温度、等离子体速度等。卫星上配置的载荷极紫外光谱成像仪(EUV Spectrograph), 可以通过对日侧 83.4 和 61.7 nm 波段进行临边探测, 获得白天电离层扩线及峰值电子密度信息<sup>[7-8]</sup>。

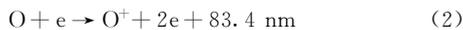
目前, 国内对 83.4 nm 日辉发射机理及探测技术的研究处于起步阶段, 本文重点研究了极紫外 83.4 nm 日气辉的产生机制及辐射传输原理, 并用 AURIC 模型计算了 O<sup>+</sup> 83.4 nm 初始体发射率、共振散射作用下的总体发射率和临边柱辐射强度等分布情况, 并给出 83.4 nm 日辉辐射强度与太阳活动、地磁活动间的关系。

## 1 O<sup>+</sup> 83.4 nm 气辉辐射传输原理

O<sup>+</sup> 83.4 nm 辐射的主要来源是太阳 EUV 气辉辐射( $\lambda < 43.6\text{nm}$ )<sup>[2]</sup>对低热层氧原子内壳电子的光电离, 电离后 O<sup>+</sup> 处于激发态, 然后发生能级跃迁( $2s^2p^4\ p \rightarrow 2s^22p^3\ 4s^0$ )<sup>[3]</sup>返回基态, 并发出 83.4 nm 的光辐射。该辐射是一个三重态 83.4 nm(83.275, 83.333, 83.446 nm)<sup>[3]</sup>的辐射光谱, 是紫外日气辉能被观测到的最明显的 O<sub>II</sub> 特性<sup>[3]</sup>, 其光电离方程可表示为<sup>[9]</sup>



O<sup>+</sup> 83.4 nm 辐射的次要来源是低热层原子氧的光电子碰撞电离, 同样碰撞激发电离产生激发态的 O<sup>+</sup>, 然后内部辐射跃迁返回基态, 并产生 O<sup>+</sup> 83.4 nm 气辉辐射, 碰撞电离可表示为<sup>[10]</sup>



碰撞电离对总的柱发射率贡献约为 10%<sup>[2]</sup>。由氧原子的极紫外光电离和光电子碰撞激发两个主要过程产生的 83.4 nm 光子峰值高度主要在 200 km 以下的低热层。然后, 两个过程电离产生的 O<sup>+</sup> 进入电离层 F 层内, 与主要离子 O<sup>+</sup> 发生多次共振散射<sup>[2-3]</sup>, 这个过程可以使 O<sup>+</sup> 83.4 nm 的体发射率在 F 层附近显著增强, 因此, 不同的 O<sup>+</sup> 分布将导致不同的 F 层临边强度剖面<sup>[3]</sup>。

此外, 83.4 nm 日气辉辐射的来源还包括 O<sup>+</sup> 的电子碰撞激发和太阳 83.4 nm 光子的直接散射。因为 O<sup>+</sup> 柱密度比原子 O 低几个数量级, 所以 O<sup>+</sup> 的直接电子碰撞激发看作一个小贡献, 可以忽略不计。但太阳 83.4 nm 光子的直接散射很难与 O<sup>+</sup> 83.4 nm 辐射区分测量, Feldman 等对太阳通量进行合理评估后, 认为其对 83.4 nm 总辐射率的贡献很小<sup>[11]</sup>, 且仅对约 400 km 以上的辐射剖面有微小贡献, 因此这两个辐射源均可忽略不计。

假设在平面水平大气中, 若满足各向同性、守恒散射以及完全频率重分布的条件, 则正演模型可给出体发射率, 可表示为<sup>[3, 7]</sup>

$$j_k(z) = j_{0k}(z) + \sigma_{0k} N_{\text{O}^+}(z) \int_{z_0}^{\infty} j_k(z') \cdot H(|\tau'_k - \tau_k|, |t'_k - t_k|) dz' \quad (3)$$

其中,  $j_k(z)$  为高度  $z$  处的体发射率,  $j_{0k}(z)$  为高度  $z$  处的初始体发射率, 包含太阳 83.4 nm 共振散射源<sup>[3]</sup>。第二项为

O<sup>+</sup> 多次共振散射源项, 其中,  $\sigma_{0k}$  为共振散射截面,  $N_{\text{O}^+}(z)$  为高度  $z$  处的氧离子数密度,  $z_0$  为初始光子产生源高度,  $\tau_k$  为与共振散射相关的光学厚度,  $t_k$  为与吸收相关的光学厚度, 包括 N<sub>2</sub>, O 以及 O<sub>2</sub> 的吸收<sup>[3]</sup>。 $H$  即 Holstein 概率函数, 表示一个光子从区域( $z', z'+dz$ )传输到( $z, z+dz$ )过程中, 在某一点经历共振散射的概率<sup>[12]</sup>。

体发射率沿着视线方向积分即得到柱辐射强度  $I^{[3, 7]}$ , 即<sup>[7]</sup>

$$4\pi I(r, \hat{e}) = 10^{-6} \int_k \sum_k j_k[r'(s)] T_k(r', r) ds \quad (4)$$

其中,  $T_k$  为光子沿着视线  $\hat{e}$  方向从位置  $r'$  传输到传感器位置  $r$  处的大气传输函数。

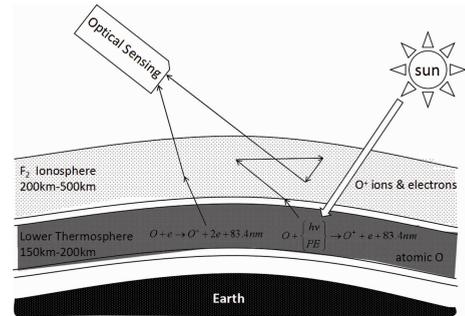


图 1 O<sup>+</sup> 83.4 nm 辐射传输示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the O<sup>+</sup> 83.4 nm radiation transfer

## 2 O<sup>+</sup> 83.4 nm 气辉辐射模式计算结果分析及验证

大气紫外辐射积分代码 AURIC(Atmospheric Ultraviolet Radiance Integrated Code)是美国计算物理公司 CPI(Computational Physics, Inc.)和空军 Phillips 实验室联合开发的用于研究热层 80~1 000 nm 辐射光谱的大气辐射传输模型, 可以用于计算光电子通量、体发射率和辐射强度等<sup>[13]</sup>, 是目前可用于极远紫外波段辐射模拟研究的通用模型。本文利用 AURIC v1.2 对电离层 O<sup>+</sup> 83.4 nm 日气辉辐射模拟, 获得卫星高度以下电离层体发射率、柱辐射强度等参量, 并研究 83.4 nm 气辉强度在赤道异常区以及其随太阳活动、地磁活动等不同条件影响下的变化规律。

### 2.1 O<sup>+</sup> 83.4 nm 气辉辐射随高度变化

83.4 nm 气辉辐射强度与氧原子分布有关, 并随高度变化。分别选取一个太阳活动周期内太阳活动低年(1986 年)、太阳活动峰年(1989 年)、太阳活动高年(1992 年)中同一天, 位置为地磁赤道附近, 利用 AURIC 模式对 O<sup>+</sup> 83.4 nm 辐射体发射率随高度的分布进行仿真计算, 模拟高度为 0~850 km(文中假设卫星为太阳同步轨道卫星, 轨道高度 850 km), 观测角为 90°~118°, 模拟仿真选用参数如表 1 所示。

表 1 中 Year 和 Day 表示日期, UT 为世界时,  $F_{10.7}$  为太阳活动指数以及 81 天太阳活动指数平均值( $F_{10.7}$ )。

仿真结果如图 2 所示。

图 2 为一个太阳活动周期内不同年份中同一天的体发射

表 1 AURIC 模型参数

Table 1 The parameters of AURIC

Parameters	Group a	Group b	Group c
Year	1986	1989	1992
Day	80	80	81
UT	43200	43200	43200
$F_{10.7}$	68.50	213.50	166.40
$\langle F_{10.7} \rangle$	76.07	203.90	177.78

率随高度变化的扩线图, 实线表示考虑多次共振散射的体发射率, 虚线是光电子碰撞电离的体发射率, 点划线是光电离激发的体发射率。随着高度的增加, 体发射率先增大后减

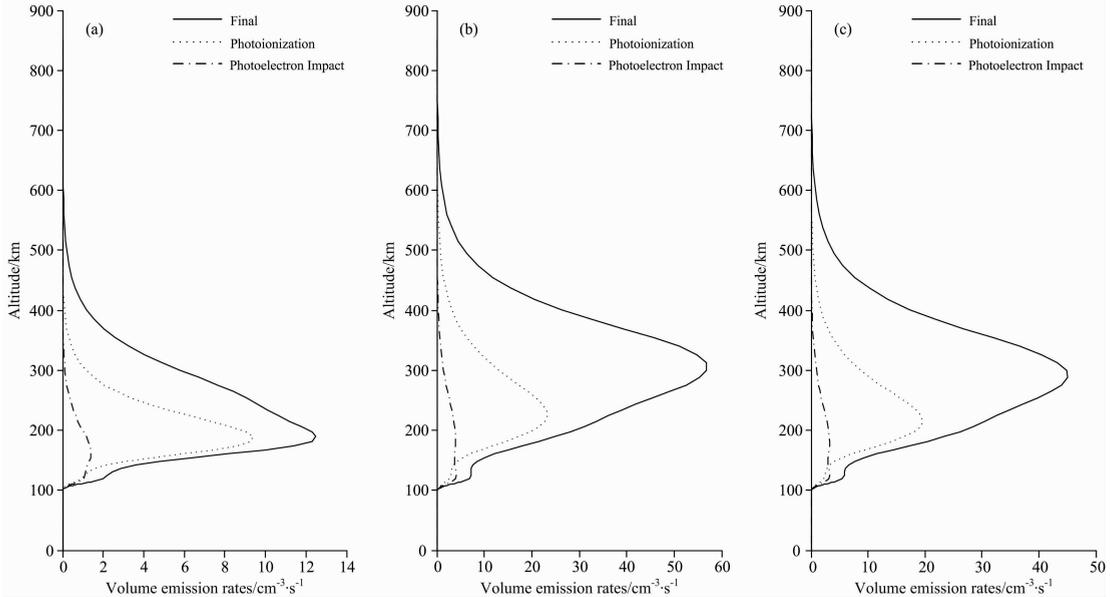


图 2 体发射率随高度的分布

Fig. 2 The distribution of volume emission rates with height

## 2.2 $O^+$ 83.4 nm 气辉辐射与太阳活动、地磁活动的关系

从图 2 可以看出, 83.4 nm 气辉辐射强度与太阳活动有关, 太阳活动高年的辐射体发射率明显大于太阳活动低年, 且峰值高度也要高于太阳活动低年。这是由于不同太阳活动条件下, 低热层 O 原子的光电离速率不同。太阳活动越剧烈, 光电离产生的  $O^+$  和电子浓度越大, 产生的 83.4 nm 气辉辐射强度就越强, 因此太阳活动高年 83.4 nm 气辉辐射体发射率越大。而  $O^+$  浓度越大, 向  $F_2$  层扩散越剧烈, 共振散射现象越明显, 因此太阳活动高年,  $O^+$  83.4 nm 辐射体发射率的峰值高度升高, 这与电离层电子密度的变化趋势一致, 进一步说明 83.4 nm 辐射的扩线分布与电离层电子密度扩线分布有着很好的相关性。

同一个太阳活动周期, 选取模拟年份与表 1 相同, 日期为春分点附近, 此时太阳直射点经过赤道, 继续向北移动。固定经度  $25^\circ$  不变, 观测高度为 500 km, 观测角为  $90^\circ \sim 118^\circ$ , 世界时为 12 点, 对临边柱辐射强度随切点高度变化进行模拟仿真, 结果如图 3 所示。

图 3 为同一太阳活动周期内三个年份中同一天的临边辐

射强度随切点高度的变化, 色度表示  $O^+$  83.4 nm 的临边柱辐射强度 ( $R$ ), 由图可知太阳活动的剧烈程度直接影响  $O^+$  83.4 nm 气辉临边柱辐射强度, 在南北半球低纬处出现两个极大值, 说明  $O^+$  83.4 nm 辐射强度与电离层赤道异常现象有很好的对应关系, 且太阳活动高年赤道异常现象更加明显, 因此  $O^+$  83.4 nm 日辉辐射与电离层电子密度有非常好的相关性。

小, 在 200~300 km 高度达到峰值, 此时光电离激发过程为主要过程。不考虑多次共振散射时, 83.4 nm 气辉辐射的初始体发射率峰值高度在大约 200 km 高度处, 这是因为氧原子主要分布在 200 km 以下的低热层, 通过光电离激发过程和光电子碰撞过程产生的 83.4 nm 辐射强度在大约 200 km 处达到峰值。而考虑多次共振散射后,  $O^+$  向上扩散进入电离层 F 层过程中, 与  $O^+$  发生多次共振散射, 使  $O^+$  83.4 nm 的体发射率在 F 层附近明显增强, 因此各个高度的体发射率不仅考虑该高度处的初始体发射率, 还应考虑来自其他高度散射过来的辐射贡献<sup>[14]</sup>。

选择表 1 前两组数据中的日期、时间, 太阳活动指数  $F_{10.7}$  分别取 70, 120, 170, 230, 270 和 300, 画出  $O^+$  83.4 nm 气辉柱辐射强度随切点高度变化的曲线图, 如图 4 所示。

图 4 为表 1 内前两组数据中的年份日期下仿真得到的临边柱辐射强度随太阳活动分布的扩线图。由图可知, 当  $F_{10.7}$  的值越大时, 83.4 nm 气辉临边柱辐射强度也越强, 即随着太阳活动的增强, 83.4 nm 气辉临边柱辐射强度也会呈现不同程度的增加, 其原因是太阳活动增强会导致低热层 O 原子的光电离速率增强, 进而导致 83.4 nm 气辉辐射增强<sup>[15]</sup>, 尤其是短波辐射增强会导致极紫外波段气辉增强。两图相比, 也会看出太阳活动高年, 柱辐射强度变化速率更快。太阳活

动除影响辐射强度外，柱辐射强度的峰值高度也会相应变化，即太阳活动越剧烈，83.4 nm 辐射强度峰值高度越高。

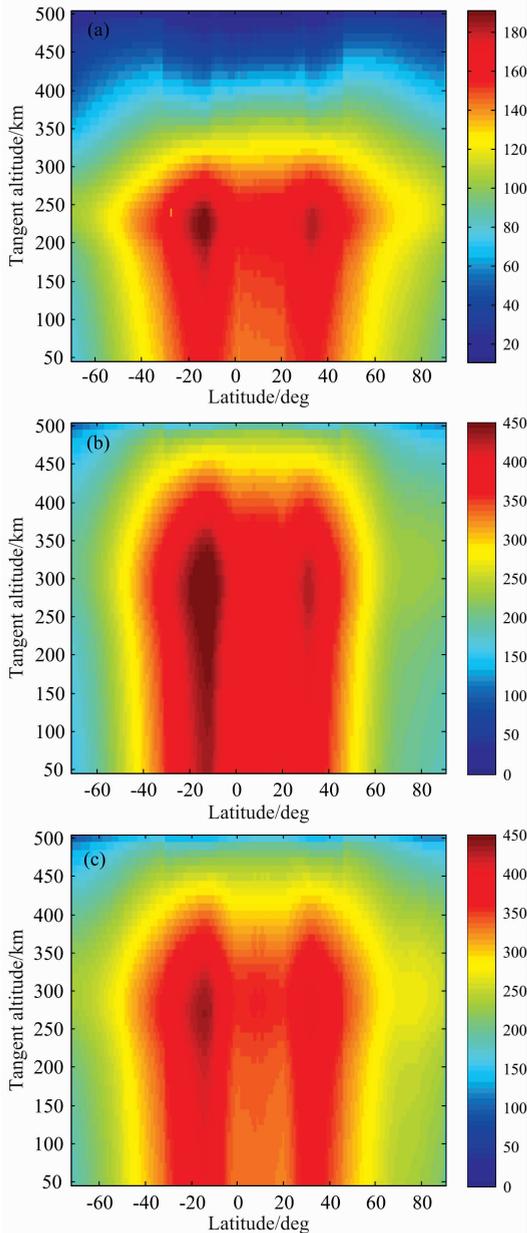


图 3 临边柱辐射强度随切点高度、纬度的分布(春分点附近)  
(a): 1986 年(太阳活动低年); (b): 1989 年(太阳活动峰年);  
(c): 1992 年(太阳活动高年)

Fig. 3 The distribution of limb column emission intensity with altitude and latitude (near the vernal equinox)  
(a): 1986 (Low solar activity);  
(b): 1989 (Peak year of solar activity);  
(c): 1992 (High solar activity)

选择表 1 前两组数据中的日期、时间，地磁活动指数  $A_p$  分别取 3, 70, 110, 160, 200 和 250，画出  $O^+ 83.4 \text{ nm}$  气辉柱辐射强度随切点高度变化的曲线图，如图 5 所示。

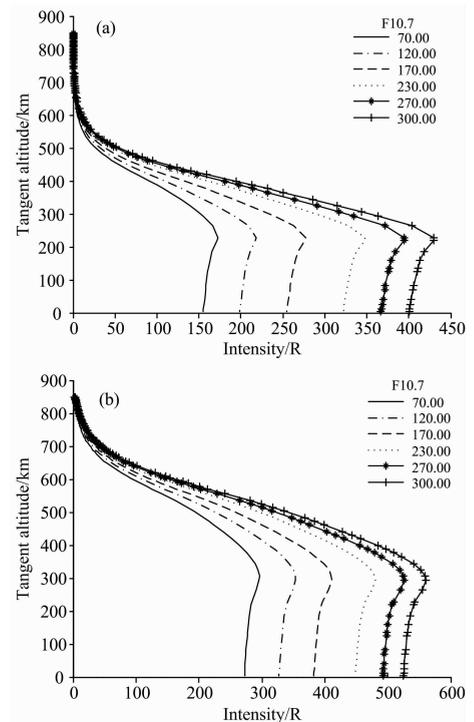


图 4 临边柱辐射强度随太阳活动的分布  
磁赤道附近， $SZA = 73^\circ$

Fig. 4 The distribution of limb column emission intensity with solar activity  
Near the geomagnetic equator,  $SZA = 73^\circ$

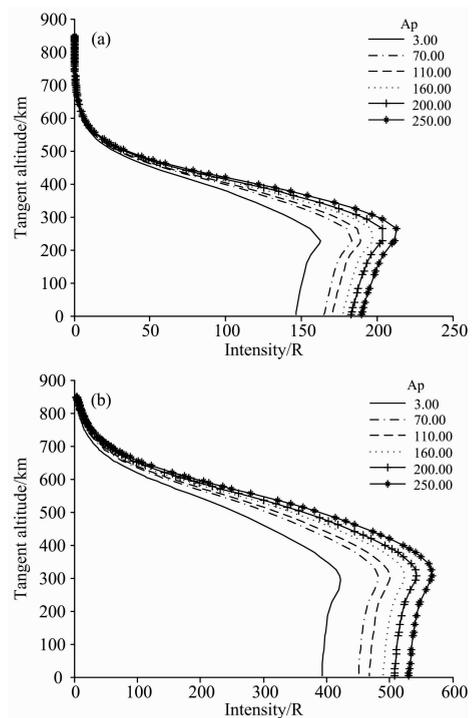


图 5 临边柱辐射强度随地磁活动的分布  
地磁赤道附近， $SZA = 73^\circ$

Fig. 5 The distribution of limb column emission intensity with solar activity  
Near the geomagnetic equator,  $SZA = 73^\circ$

图 5 为表 1 前两组数据中的年份日期下仿真得到的临边柱辐射强度随地磁活动分布的扩线图。由图 5 可知, 当  $A_p$  的值增大时,  $O^+$  83.4 nm 气辉临边柱辐射强度随之增强, 并且太阳活动高年的临边柱辐射强度值明显高于太阳活动低年, 即  $O^+$  83.4 nm 气辉辐射强度与地磁活动指数  $A_p$  主要呈现正相关的关系, 因此地磁活动的变化会引起大气主要离子成分的变化, 进而影响其柱辐射强度变化。

### 3 结 论

基于极紫外日辉辐射算法, 提出了氧离子 83.4 nm 日辉辐射的计算方法。并用 AURIC v1.2 模拟了  $O^+$  83.4 nm 日

辉辐射与高度、纬度、太阳活动、地磁活动等电离层参量的相关性。气辉辐射随纬度的变化主要呈现出赤道异常现象, 且太阳活动越剧烈, 赤道异常现象也越明显, 与电离层电子密度变化趋势一致。气辉辐射强度及分布特性受太阳活动、地磁活动的影响, 并均呈现正相关的关系。

太阳活动、地磁活动越剧烈, 会导致低层 O 原子的光电离速率增强, 则光电离产生的  $O^+$  和电子浓度就越大, 即太阳活动、地磁活动均会影响大气成分的变化, 进而影响气辉辐射强度的变化。氧离子 83.4 nm 日辉辐射与电离层电子密度分布有着非常好的相关性, 是对日间电离层进行光学遥感监测的最佳手段之一, 对于反演获得白天电离层 F 层电子密度扩线等电离层参量具有重要意义。

### References

- [ 1 ] XU Xian-sheng, HONG Zhen-jie, GUO Peng, et al(徐贤胜, 洪振杰, 郭 鹏, 等). Acta Physica Sinica(物理学报), 2010, 59(3): 2163.
- [ 2 ] Stephan A W. J. Geophys. Res. Space Physics, 2016, 121: 9284.
- [ 3 ] Picone J M, Meier R R, Kelley O A, et al. J. Geophys. Res., 1997, 102: 2441.
- [ 4 ] Christensen A B, Kayser D C, Pranke J B, et al. Opt. Eng., 1993, 32(12): 3054.
- [ 5 ] Dymond K F, Nicholas A C, Budzien S A, et al. J. Geophys. Res. Space Physics, 2017, 122: 2674.
- [ 6 ] Finn S C, Stephan A W, Cook T, et al. American Geophysical Union, Fall Meeting, 2017, 212: 631.
- [ 7 ] Stephan A W, Korpela E J, Sirk M M, et al. Space Sci. Rev., 2017, 212: 645.
- [ 8 ] Sirk M M, Korpela E J, Ishikawa Y, et al. Space Sci. Rev., 2017, 212: 631.
- [ 9 ] McCoy R P, Anderson D E Jr. J. Geophys. Res., 1985, 90(A12): 12257.
- [10] LIU Xin-yu, ZHANG Xiao-xin, HE Fei, et al(刘鑫宇, 张效信, 何 飞, 等). Chinese J. Geophys. (地球物理学报), 2017, 60(9): 3308.
- [11] Feldman F B, Anderson D E Jr, Meier R R. J. Geophys. Res., 1981, 86(A5): 3583.
- [12] Holstein T. Phys. Rev., 1947, 72: 1212.
- [13] Strickland D J, Bishop J, Evans J S, et al. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 1999, 62: 689.
- [14] JIANG Fang, MAO Tian, LI Xiao-yin, et al(江 芳, 毛 田, 李小银, 等). Chinese J. Geophys. (地球物理学报), 2014, 57(11): 3679.
- [15] WANG Hou-mao, WANG Yong-mei(王后茂, 王咏梅). Science China: Earth Sciences(中国科学: 地球科学), 2015, 45(11): 1768.

## Investigation of Transmission Characteristic of $O^+$ 83.4 nm Dayglow in the Ionosphere

WANG Da-xin<sup>1,2</sup>, FU Li-ping<sup>1,3,4\*</sup>, JIANG Fang<sup>1,3,4</sup>, JIA Nan<sup>1,2,3,4</sup>, DOU Shuang-tuan<sup>1,2</sup>

1. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
3. Beijing Key Laboratory of Space Environment Exploration, Beijing 100190, China
4. Key Laboratory of Environmental Space Situation Awareness Technology, Beijing 100190, China

**Abstract** Extreme Ultraviolet (10~100 nm) dayglow emission is produced primarily by photoionization excitation and photoelectron impact ionization. Observing extreme ultraviolet dayglow by using space-based remote sensing, we can obtain the information of electron density, ion density and spatial distribution of ionospheric F layer in the daytime. The EUV dayglow remote sensing technology started earlier in foreign countries, especially in Europe, America, Japan and other countries, and have come to maturity now. However, there are very few studies on EUV dayglow remote sensing in China, and the detection of ionosphere is mainly at night. For example, the ionospheric photometer loaded on the D-Star of the FengYun-3 meteorological satellite launched by China in 2017 can obtain the nighttime ionospheric peak electron density. Remote sensing in extreme ultraviolet (EUV) emission, especially the detection of the radiation characteristics of  $O^+$  ion 83.4 nm in the ionosphere, is an important

means to obtain daytime ionospheric radiation characteristics, and is also the research hotspot of ionospheric optical remote sensing in the world. Firstly, we have studied the main radiative transfer theory of EUV dayglow in this paper, and introduces the excitation process, impact ionization process and multiple resonant scattering process. On this basis, we focus on the generation mechanism and radiation transmission characteristics of 83.4 nm dayglow.  $O^+$  83.4 nm dayglow is generated by photoionization of the O atoms in the low thermosphere by solar EUV and is the brightest emission in EUV. The altitude distribution of the 83.4 nm dayglow can provide some information about the density profile of the  $O^+$  ions, and by charge neutrality, the electron density, which provide an effective method for ionospheric detection in the daytime. Secondly, we have analyzed the band characteristics of 83.4 nm dayglow. Based on the Mass Spectrometer Incoherent Scatter (MSIS-00) model, we calculate the initial volume emission rates, the volume emission rates under resonant scattering and limb column emission intensity of 83.4 nm dayglow emission by using the AURIC v1.2 model, and then we analyze the correlation with altitude, latitude, solar activity index, geomagnetic activity index and so on. Based on the extreme ultraviolet radiation algorithm, and the particularity of the radiation transmission at  $O^+$  ion 83.4 nm, considering the multiple scattering effects of the radiation, the radiation calculation method of oxygen ion 83.4 nm dayglow is proposed. Assuming that the ionosphere is electrical neutrality, the  $O^+$  density of the ionosphere in the daytime can be inverted by obtaining the EUV dayglow intensity of oxygen ion 83.4 nm, and then we can obtain the electron density distribution of the ionosphere F layer in the daytime, providing an important basis for studying the radiation transmission characteristics of the daytime ionosphere.

**Keywords**  $O^+$  83.4 nm; Dayglow; Radiative transfer; Ionosphere

(Received Apr. 15, 2019; accepted Aug. 22, 2019)

\* Corresponding author