

XUE Shixiang, JIANG Chunhua, MA Zhengzheng, XU Bin, DING Guangxing, YANG Guobin, ZHANG Yuannong, ZHAO Zhengyu. A Comparative Study between the Ionospheric f_0F_2 from Nighttime OI 135.6 nm Emission and Ionosonde Observations (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2023, **43**(3): 456–465. DOI:10.11728/cjss2023.03.2022-0018

夜间 135.6 nm 气辉反演的电离层 f_0F_2 与 测高仪观测比较研究*

薛仕翔¹ 姜春华¹ 马征征² 徐彬²
丁广兴³ 杨国斌¹ 张援农¹ 赵正予^{1,4}

1(武汉大学电子信息学院 武汉 430072)

2(中国电波传播研究所 电波环境特性及模化技术重点实验室 青岛 266107)

3(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033)

4(哈尔滨工业大学(深圳) 深圳 518055)

摘要 在夜间电离层, 气辉 135.6 nm 谱线主要由 F 层的 O^+ 和电子的辐射复合过程以及 O^+ 和 O^- 的中性复合过程激发, 该谱线强度和电离层峰值电子密度 N_mF_2 存在很强的相关性。利用夜气辉 135.6 nm 辐射强度与 F_2 层峰值电子密度 N_mF_2 的平方成正比的物理模型, 建立了在不同经纬度、地方时、季节和太阳活动下均适用的反演算法。通过 DMSP 卫星上搭载的紫外光谱成像仪(SSUSI)实际观测的 135.6 nm 气辉辐射强度来反演相应时空的电离层 F_2 层临界频率 f_0F_2 , 并将其与地基测高仪探测结果做了综合对比。结果表明, 在太阳活动高年(2013 年), 相对误差小于等于 20% 的数据占比 93.0%, 平均相对误差约为 7.08%; 在太阳活动低年(2017 年), 相对误差小于等于 20% 的数据占比 80.8%, 平均相对误差约为 12.64%。最后, 对该算法在太阳活动高低年的反演精度差异进行了分析。

关键词 OI 135.6 nm, 反演方法, f_0F_2 , 电离层, 测高仪

中图分类号 P352

A Comparative Study between the Ionospheric f_0F_2 from Nighttime OI 135.6 nm Emission and Ionosonde Observations

XUE Shixiang¹ JIANG Chunhua¹ MA Zhengzheng² XU Bin²
DING Guangxing³ YANG Guobin¹ ZHANG Yuannong¹ ZHAO Zhengyu^{1,4}

* 中国电波传播研究所稳定支持科研经费项目(A132001 W03)和国家自然科学基金项目(42104166)共同资助

2022-05-06 收到原稿, 2022-12-01 收到修定稿

E-mail: wangjifannao@aliyun.com. 通信作者 姜春华, E-mail: chuajiang@whu.edu.cn

©The Author(s) 2023. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

1(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072)

2(National Key Laboratory of Electromagnetic Environment, China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao 266107)

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

4(Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518055)

Abstract The ionosphere is the part of the upper atmosphere which is ionized by solar radiation. There are a variety of ground-based and space-based remote sensing and in situ instruments to study the ionosphere. Recently, an effective method, called passive optical remote sensing technique, is widely used to study the ionosphere. It utilizes natural airglow (atoms and molecules frequently emit light to shed their excess energy) in the ionosphere. In the electromagnetic spectrum, the far ultraviolet light emissions are prominent in the ionosphere and could be used to monitor the ionosphere. During the nighttime, the 135.6 nm spectral line is excited by the radiation recombination process of F region O^+ and e^- and the mutual neutralization process of O^+ and O^- in the ionosphere. There is a strong correlation between the intensity of the spectral line and the maximum electronic density of ionospheric F_2 layer (N_mF_2). Based on the physical model in which the OI 135.6 nm emission is proportional to the square of N_mF_2 , the retrieval algorithm is established for different longitude, latitude, local time, season and solar activity. In this paper, the critical frequency of ionospheric F_2 region (f_0F_2) is retrieved from 135.6 nm emission observed by the Special Sensor Ultraviolet Spectrographic Imager (SSUSI) instrument on board the Defense Meteorological Satellite Program (DMSP), and then the estimated results are compared with the detection results of ground-based ionosonde. As the results show, during the high-solar activity year (2013), the data with relative error less than or equal to 20% accounted for 93.0%, and the average relative error is about 7.08%. During the low-solar activity years (2017), the data with relative error less than or equal to 20% accounted for 80.8%, and the average relative error is about 12.64%. Finally, we analyze the difference of retrieval accuracy of the algorithm during the high and low solar activity years.

Key words OI 135.6 nm, Retrieval method, f_0F_2 , Ionosphere, Ionosonde

0 引言

电离层是中性大气部分电离的区域,其位于从距地球表面约 60 km 一直延伸到约 1000 km 的位置。在电离层中存在自由电子,其能够影响途经该区域的无线电的幅度和相位特性。因此,研究电离层特性对短波通信、卫星导航和定位系统等具有重要的工程意义。对于电离层的探测研究主要通过两种方式实现,即遥感和就位测量(卫星直接测量所在位置的电子/离子密度、电子/离子温度等重要参数)。遥感观测主要包括无线电遥感和光学成像。在电离层研究早期,主要通过无线电遥感的方式实现电离层的探测,包括测高仪、相干散射雷达、非相干散射雷达以及掩星探测等。随着对电离层认识和了解的不深

入,发现气辉也可以用来监测电离层。气辉是中高层大气中自然发光的一种现象,根据发光时间可以分为昼气辉、夜气辉和曙暮气辉;根据气辉辐射谱线又可以分为极紫外、远紫外、可见光和近红外气辉^[1]。

大量研究表明,不同波段的气辉辐射能够灵敏地表征电离层物理化学状态^[2-4]。对于 135.6 nm 夜气辉辐射而言,辐射强度主要涉及 O^+ 和电子的辐射复合过程以及 O^+ 和 O^- 的中性复合过程^[3]。Meier 等^[5,6]的研究证明了夜间 135.6 nm 气辉辐射主要取决于辐射复合过程,将 F 层临界频率与气辉强度关联起来,并于 1991 年详细地阐述了遥感观测气辉辐射的机制,使得通过卫星观测气辉并反演全球 F 层参数成为可能。DeMajistre 等^[7]通过 TIMED 卫星上的全球紫外成像仪(GUVI)观测的 135.6 nm 数据来反演夜间电子

密度,并提出夜间 135.6 nm 谱线辐射强度正比于峰值电子密度平方的物理模型。

目前,夜间 135.6 nm 气辉强度正广泛用于监测电离层状态信息。自 1990 年以来,135.6 nm 气辉辐射一直是空基遥感观测的重要目标。具有代表性的卫星与探测系统有:DMSP 气象卫星搭载的紫外光谱成像仪 SSUSI^[8],TIMED 卫星上的全球紫外成像仪 GUVI^[9],COSMIC 卫星上的小型电离层光度计 TIP^[10],LEOSTar-2 卫星上搭载的电离层连接探测器 ICON^[11]以及中国的风云三号(FY-3)气象卫星搭载的电离层光度计 IPM 等^[12]。这些卫星实现了对夜间 135.6 nm 气辉的探测以及对电离层状态信息的实时监测。为了从气辉观测中反演电离层参数,需要借助于气辉计算模型。目前,国际上使用最广泛的气辉计算模型是由美国计算物理公司 CPI (Computational Physics, Inc.)和空军 Phillips 实验室开发的大气紫外辐射模型 AURIC(Atmospheric Ultraviolet Radiance Integrated Code)。基于 AURIC 模型开展有大量的气辉与电离层相关的研究^[13-18]。

本文在夜间 135.6 nm 气辉激发原理的基础上,探讨了夜气辉 135.6 nm 辐射强度与 F_2 层临界频率(f_0F_2)的关系。通过与地基测高仪测量的 f_0F_2 进行对比,分析讨论了反演算法在不同经纬度、地方时和太阳活动下的反演精度问题。

1 反演理论基础

夜间 F 层中 OI 135.6 nm 气辉辐射的产生机制主要有 3 个^[6]:一是 O^+ 和电子的辐射复合反应,二是 O^+ 和 O 的中性复合反应,三是 135.6 nm 谱线在辐射传输过程中由于多次散射效应形成的二次辐射源。其中, O^+ 与电子的辐射复合反应过程占主导地位,前

两种气辉激发机制涉及的复合反应过程如表 1 所示。激发态氧原子发生能级跃迁 $O(^5S) \rightarrow O(^3P)$ 时会释放出 135.85 nm 和 135.56 nm 谱线,通常所说的 OI 135.6 nm 辐射是这两种辐射的总和。对于各向同性辐射,氧原子 135.6 nm 辐射的体发射率^[19]可以表示为

$$4\pi\epsilon_0(z) = 4\pi\epsilon_{\text{nn}}(z) + 4\pi\epsilon_{\text{rr}}(z) = \beta_{135.6} \frac{k_1 k_2 n_e(z) n_{o+}(z) n_o(z)}{k_2 n_{o+}(z) + k_3 n_o(z)} + a_{135.6} n_e(z) n_{o+}(z). \quad (1)$$

式中, ϵ_{nn} 和 ϵ_{rr} 分别表示中性复合反应(Mutual Neutralization)和辐射复合反应(Radiative Recombination)产生的体辐射率, $n_e(z)$, $n_{o+}(z)$ 和 $n_o(z)$ 分别表示电子、氧离子与氧原子在某一高度的数密度。其他复合反应系数如表 1 所示^[19]。

在夜间 OI 135.6 nm 气辉辐射的 3 种产生机制中,辐射复合过程是 135.6 nm 气辉辐射的主要来源,占比一般超过 75%^[20]。Dymond 等^[21]认为 F 层峰附近的 135.6 nm 气辉强度占据主导地位, F 层峰以下的 135.6 nm 气辉辐射被掩盖。对于探测高度位于顶部电离层的卫星而言(如 DMSP 卫星),多次散射效应带来的影响较弱。基于这些原因,可以简单地描述夜间 OI 135.6 nm 辐射机制。

如果仅考虑辐射复合过程,夜间 OI 135.6 nm 辐射的体发射率可简化为

$$4\pi\epsilon_0(z) = a_{135.6} n_e(z) n_{o+}(z). \quad (2)$$

在假设电离层是电中性的情况下,电子密度应等于离子密度的总和,即满足

$$n_e(z) = n_{o+}(z) + n_{o_2^+}(z) + n_{\text{NO}^+}(z) + n_{\text{H}^+}(z). \quad (3)$$

由于夜间电离层 F 层中最主要的离子成分是 O^+ ,故式(3)可以表示为 $n_e(z) \approx n_{o+}(z)$,因此,体发射率可表示为

表 1 复合反应和复合系数
Table 1 Recombination reaction and recombination coefficient

复合反应	复合系数
$O^+ + e \rightarrow O + h\nu$ (1356)	$\alpha_{135.6} = 7.3 \times 10^{-13} (1160/T_e)^{1/2} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
$O + e \rightarrow O^- + h\nu$	$k_1 = 1.3 \times 10^{-15} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
$O^+ + O^- \rightarrow O' + O$ (1356)	$k_2 = 1.0 \times 10^{-7} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}, \beta_{135.6} = 0.54$
$O + O^- \rightarrow O_2 + e$	$k_3 = 1.4 \times 10^{-10} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

注 O' 表示激发态的氧原子 $O(^5S)$ 。

$$4\pi\epsilon_0(z) \approx \alpha_{135.6} n_e(z)^2. \quad (4)$$

在实际的天底探测中, 探测到的气辉强度为天底方向上各点处的体发射率与一个光子传输至观测点处而不被散射的概率的乘积沿高度的积分, 即夜气辉 OI 135.6 nm 辐射强度^[22] 表示为

$$4\pi I = 10^{-6} \int_0^{Z_{\text{obs}}} 4\pi\epsilon_0(z) T(z) dz. \quad (5)$$

式中, Z_{obs} 表示观测点的高度, $T(z)$ 表示氧原子自吸收效应的透过率函数。由于 135.6 nm 辐射是光学薄的, 透过率近似为 1, 则夜气辉 OI 135.6 nm 辐射强度可近似表示为

$$4\pi I \approx 10^{-6} \int_0^{Z_{\text{obs}}} \alpha_{135.6} n_e(z)^2 dz. \quad (6)$$

式中, 电子密度可表示为 $n_e(z) = N_m g(z)$, 其中 N_m 为 F_2 层峰值电子密度, $g(z)$ 为电子密度随高度的分布。由于实际探测中不清楚电子密度对高度的依赖性, 这里采用 Chapman 函数^[23] 来描述 F_2 层电子密度廓线, 则 $g(z)$ 可表示为

$$g(z) = \exp \frac{1}{2} \left[1 - \frac{z - h_m}{H_0} - \exp \frac{-(z - h_m)}{H_0} \right]. \quad (7)$$

这里的 h_m 为 F_2 层峰的高度, H_0 为氧原子的标高, 单位均为 km。将式(7)代入式(6), 夜气辉 OI 135.6 nm 辐射强度可描述为

$$4\pi I = K H_0 N_m^2. \quad (8)$$

式中, N_m 为 F_2 层峰值电子密度(单位为 cm^{-3}), K 为与辐射复合系数有关的常数。在计算 N_m 时, K 中电

子温度的贡献为 $T_e^{1/4}$ 。因而, N_m 对电子温度的依赖性很弱, 通常可以假设电离层电子温度在 1160 K 时恒定不变。

由式(8)可知, OI 135.6 nm 夜气辉强度正比于 F_2 层峰值电子密度($N_m F_2$, 定义符号 N_m)的平方, 同时可以通过 N_m 求解得到 F_2 层临界频率($f_0 F_2$, 定义符号 f_0), 其关系如下

$$N_m = 1.24 \times 10^4 f_0^2. \quad (9)$$

式(8)已经建立了夜气辉 OI 135.6 nm 强度和 $N_m F_2$ 平方成正比的物理模型。为了研究式(8)对不同经纬度、地方时、季节和太阳活动下的依赖性, 模拟计算了 2002—2012 年各个季节下的气辉数据, 经度范围为 $180^\circ\text{W} - 180^\circ\text{E}$, 纬度范围为 $65^\circ\text{S} - 65^\circ\text{N}$, 经度间隔为 5° , 纬度间隔为 2° 。电离层数据以及中性大气数据来源于参考电离层模型 IRI2016^[24] 和参考大气模型 NRLMSISE00^[25]。将全球模拟得到的 OI 135.6 nm 夜气辉强度与 $N_m F_2$ 平方进行线性拟合, 2002 年 3 月 21 日的拟合结果如图 1 所示。

图 1(a) 给出了 20:00 LT 的全球各点数据不能恰当地拟合的情况。图 1(b) 揭示了在夜晚 23:00 LT 夜气辉 OI 135.6 nm 辐射强度和 $N_m F_2$ 的平方之间的强相关性, 这个线性拟合结果符合 Rajesh 等^[26] 和 Qin^[27] 的结论, 即将图 1(b) 所示的回归直线斜率作为 $N_m F_2$ 平方和夜气辉 OI 135.6 nm 辐射强度的换算系数。本文换算系数(Conversion Factor)定义为 $(N_m F_2 \times 10^{-5})^2 / \text{OI}_{135.6}$ 。

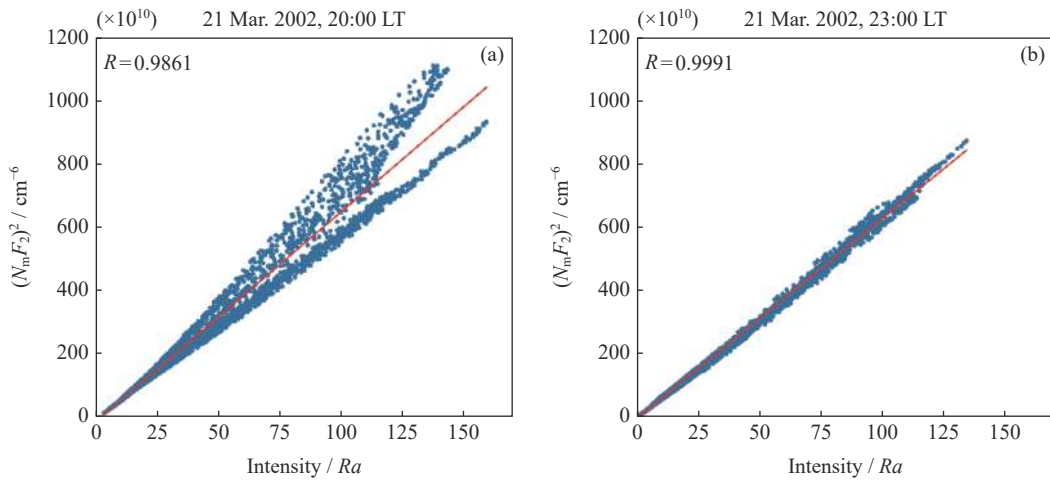


图 1 OI 135.6 nm 夜气辉辐射强度与 $N_m F_2$ 平方的拟合 (R 表示线性相关系数, 红色实线为两类数据的线性拟合)

Fig. 1 Linear fitting of the OI 135.6 nm emission and the square of $N_m F_2$ (R represents the linear correlation coefficient, and the red solid line indicates the linear fitting of the two data)

为了验证不同时期的换算系数差异,本文模拟计算了 2002 年春分、夏至、秋分和冬至的 $N_m F_2$, OI 135.6 与换算系数,结果如图 2 所示。可以看出, OI 135.6 nm 辐射强度和 $N_m F_2$ 有很强的相关性,并且随地球磁赤道分布,在磁纬 $\pm 20^\circ$ 左右形成峰值。而换算系数的峰值主要分布在磁赤道以南,大约位于磁纬 $-40^\circ - 0^\circ$,这可能是南北半球受到驱动力不一致造成的。实际上,在太阳活动较高的年份,并且时间早于 21:00 LT 时,换算系数都会呈现出如图 2 所示的结果,即换算系数并不能一概而论,因而夜气辉 OI 135.6 nm 辐射强度和 $N_m F_2$ 平方进行线性拟合时需要考虑纬度对拟合结果的影响。

根据上述讨论,可以发现将 OI 135.6 nm 夜气辉强度与 $N_m F_2$ 平方进行线性拟合时,不同纬度的数据不能很好地兼容,因而提出分区域拟合的方法。参照 Guo^[28] 和 Tsai^[29] 等对 AACGM^[30] 坐标系 (Altitude-Adjusted Corrected Geomagnetic coordinates) 的应用,本文使用 AACGM 坐标系 (高度为 800 km) 对换算系数进行划分,此时换算系数的峰值全部分布在 AACGM 磁纬 $-40^\circ - 0^\circ$,即可以将 AACGM 磁纬 $-40^\circ - 0^\circ$ 划分为一个区域 (记为 A 区),磁纬 $-65^\circ - -40^\circ$ 以及 $0^\circ - 65^\circ$ 划分为另一个区域 (记为 B 区),图 3 给出了 2002 年 3 月 21 号 20:00 LT 按区

域进行线性拟合的结果。图 3(a) 揭示了直接对全球数据进行线性拟合会有较大误差,而通过上述分区,可以极大地提升拟合的精度。分区后线性拟合结果如图 3(b) 和图 3(c) 所示。这种线性拟合方式明显不同于 Rajesh 的方法,考虑了辐射传输过程对气辉强度的影响以及不同纬度区域带来的差异,本文线性拟合的结果更接近于实际情况。

综上给出了分区域对 OI 135.6 nm 夜气辉强度与 $N_m F_2$ 平方进行线性拟合的方法,可以得到一条线性相关系数很高的直线,可以将该直线的斜率作为 $N_m F_2$ 平方和夜气辉 OI 135.6 nm 辐射强度的换算系数,图 4 给出了各个区域在不同太阳辐射指数 ($F_{10.7}$) 下的换算系数值。可以看出,在 $F_{10.7} < 100$ 的情况下 ($F_{10.7} < 100$),全球区域以及 A 和 B 区域的换算系数趋于一致。在太阳辐射通量较大的情况下 ($F_{10.7} \geq 100$),22:00 LT 之前 A 区的换算系数明显大于 B 区。此外,换算系数在 B 区的时间依赖性不明显,尤其是在 20:00—02:00 LT 期间,曲线随时间变化比较平缓。

2 反演算法验证

为了验证反演算法的有效性,使用 DMSP 卫星 (轨道高度约为 830 km) 天底方向探测的 135.6 nm

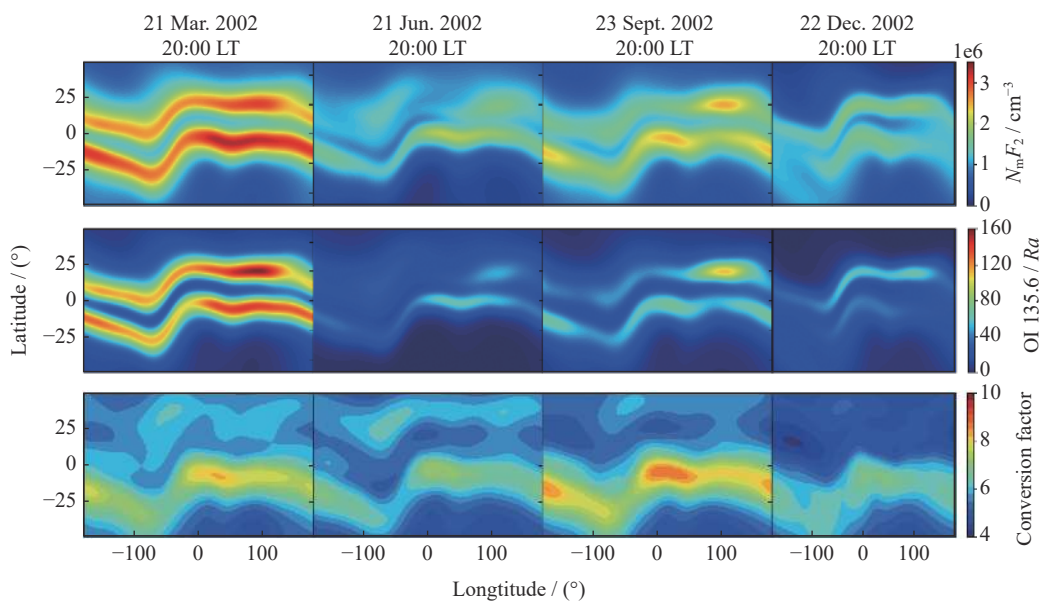


图 2 2002 年春分、夏至、秋分和冬至时 $N_m F_2$, OI 135.6 与换算系数

Fig. 2 $N_m F_2$, OI 135.6 and conversion factor at the spring equinox, summer solstice, autumn equinox and winter solstice in 2002

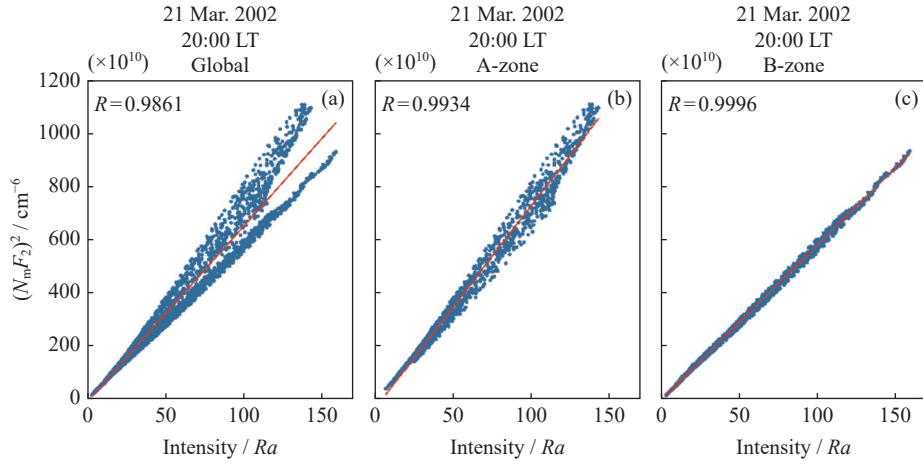


图 3 OI 135.6 nm 夜气辉辐射强度与 $N_m F_2$ 平方在不同区域的拟合 (R 表示线性相关系数, 红色实线为两类数据的线性拟合)。(a) 全球区域, (b) A 区, (c) B 区

Fig. 3 Linear fitting of the OI 135.6 nm emission and the square of $N_m F_2$ in different regions. R represents the linear correlation coefficient, and the red solid line indicates the linear fitting of the two data. (a) Global-zone, (b) A-zone, (c) B-Zone

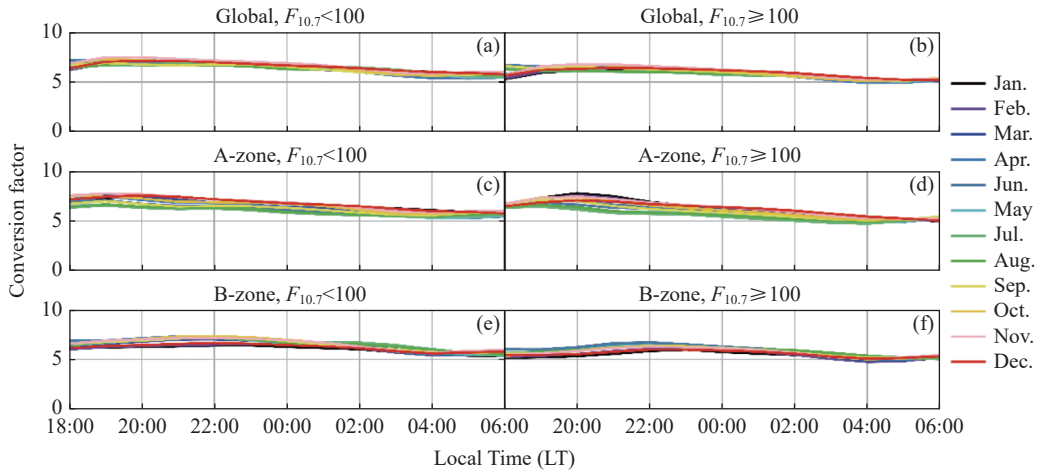


图 4 不同纬度区域和不同太阳 10.7 cm 辐射通量下 $N_m F_2$ 平方和 OI 135.6 nm 辐射强度的换算系数

Fig. 4 Conversion factor of the square of $N_m F_2$ and OI 135.6 nm emission at different latitudes and 10.7 cm solar radio flux

夜气辉数据, 来进行 f_0F_2 的反演, 并将反演结果与地基探测得到的 f_0F_2 数据进行比较。地基探测数据来源于子午工程网站*的数字测高仪数据集。

DMSP 卫星轨道较为稳定, 探测时间一般为 20:00 LT。图 5 为 DMSP 卫星于 2013 年 1 月 11 日探测得到 OI 135.6 nm 夜气辉强度图, 空白部分为缺失值。如图 5 所示, 卫星数据有较多的缺失值, 在实际反演过程中气辉观测区域和地基测高仪探测区域

可能存在不一致的情况。因此, 采取了一种加权平均算法, 将地基观测点周围 150 km 范围内的气辉数据加权平均后作为该位置的气辉强度值。

为了验证反演算法在复杂情况下的有效性, 使用了 DMSP 卫星于 2013 年(太阳活动高年)和 2017 年(太阳活动低年)探测的夜气辉强度数据, 并与子午工程网站的数字测高仪数据进行反演比对。为了获取较强的气辉辐射强度, 只选用了海南富克站

* <https://data.meridianproject.ac.cn/>

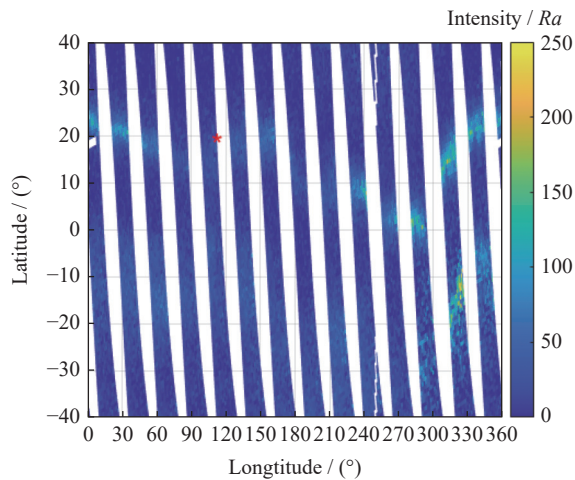


图5 2013年1月11日DMSP卫星夜间探测的OI 135.6 nm 气辉强度。红色标记为海南富克站的位置(19.53°N, 109.13°E)

Fig. 5 OI 135.6 nm emission at night detected by satellite DMSP on 11 Jan. 2013. The red mark indicates the location of Hainan Fuke station (19.53°N, 109.13°E)

(19.53°N, 109.13°E)的数字测高仪数据。

图6表示2013年(太阳活动高年)海南富克站处估计的 f_0F_2 与地基探测 f_0F_2 的对比。由于DMSP卫星数据的缺失或者测高仪电离图无法判读,图中只显示了2013年157天的反演结果。同时,将相应时刻的IRI f_0F_2 与地基探测的 f_0F_2 进行了综合对比,确立了气辉反演算法的有效性。

首先将IRI f_0F_2 和地基探测 f_0F_2 进行对比,结果如图6(a)所示,可以看出二者的相关性较差。图6(d)表示IRI f_0F_2 与地基探测 f_0F_2 的相对误差统计直方图,其中相对误差小于等于10%的数据占比27.4%,相对误差小于等于20%的数据占比69.4%,平均相对误差约为15.42%,相对均方根误差约为8.44%。

图6(b)表示Global换算系数反演的 f_0F_2 与地基探测 f_0F_2 的对比,可以看出,大部分情况下,反演 f_0F_2 与地基探测 f_0F_2 的误差较小。图6(e)表示Global换算系数反演的反演 f_0F_2 与地基探测 f_0F_2 的相对误差统计直方图,可以看出相对误差小于等于10%的数据占比72.6%,相对误差小于等于20%的数据占比93.0%,平均相对误差约为7.55%,相对均方根误差约为7.15%。

图6(c)表示B区换算系数反演的 f_0F_2 与地基探测 f_0F_2 的拟合,可以看出二者有很高的一致性。

图6(f)表示B区换算系数反演的 f_0F_2 与地基探测 f_0F_2 的相对误差统计直方图,相对误差小于等于10%的数据占比77.1%,相对误差小于等于20%的数据占比93.0%,平均相对误差约为7.08%,相对均方根误差约为7.31%。

由图6(a)~(c)可知,与IRI经验模型相比,本文提出的气辉反演算法具有更高的精度。同时,B区换算系数的反演结果更加精确,这证明了对换算系数进行分区域拟合的方法更加符合实际情况。

对2017年(太阳活动低年)海南富克站处 f_0F_2 进行反演时,下面仅使用了B区换算系数,这是因为太阳活动低年的全球换算系数与B区换算系数基本一致(见图4),并且图6已经证明了分区域拟合的换算系数是切实有效的。图7为2017年(太阳活动低年)海南富克站处估计的 f_0F_2 与地基探测 f_0F_2 的比较。

图7(a)表示IRI f_0F_2 和地基探测 f_0F_2 的拟合,可以看出二者的相关性较差。图7(c)表示IRI f_0F_2 和地基探测 f_0F_2 的相对误差统计直方图,其中相对误差小于等于10%的数据占比26.9%,相对误差小于等于20%的数据占比51.5%,平均相对误差约为18.73%,相对均方根误差约为11.08%。B区换算系数反演的 f_0F_2 与地基探测 f_0F_2 的对比如图7(b)所示,可以看出二者有较高的一致性。图7(d)表示B区换算系数反演的 f_0F_2 与地基探测 f_0F_2 的相对误差统计直方图,其中相对误差小于等于10%的数据占比55.4%,相对误差小于等于20%的数据占比80.8%,平均相对误差约为12.64%,相对均方根误差约为12.95%。

由图6和图7可知,与IRI经验模型相比,本文提出的气辉反演算法在不同的太阳活动下均有更高的精度。图6(b)和图6(c)揭示了2013年海南富克站处使用对应区域(B区)的换算系数反演的 f_0F_2 会更加精确,这证明了本文分区域拟合的方法切实有效。而图6(c)和图7(b)的对比显示出2017年反演误差相对较大。通过对2013和2017年反演结果的深入对比,对反演的误差来源有了更深入的了解。

明显看出,2013年和2017年首要的差别是太阳活动的剧烈程度不同,这种影响将反映到DMSP卫星探测的气辉强度上。在太阳活动低年,气辉强度整体偏低,较低的气辉强度数据可能被背景噪声淹没,地基观测点150 km范围内的气辉强度可能有较大差异,例如2017年2月10号海南富克站150 km范围

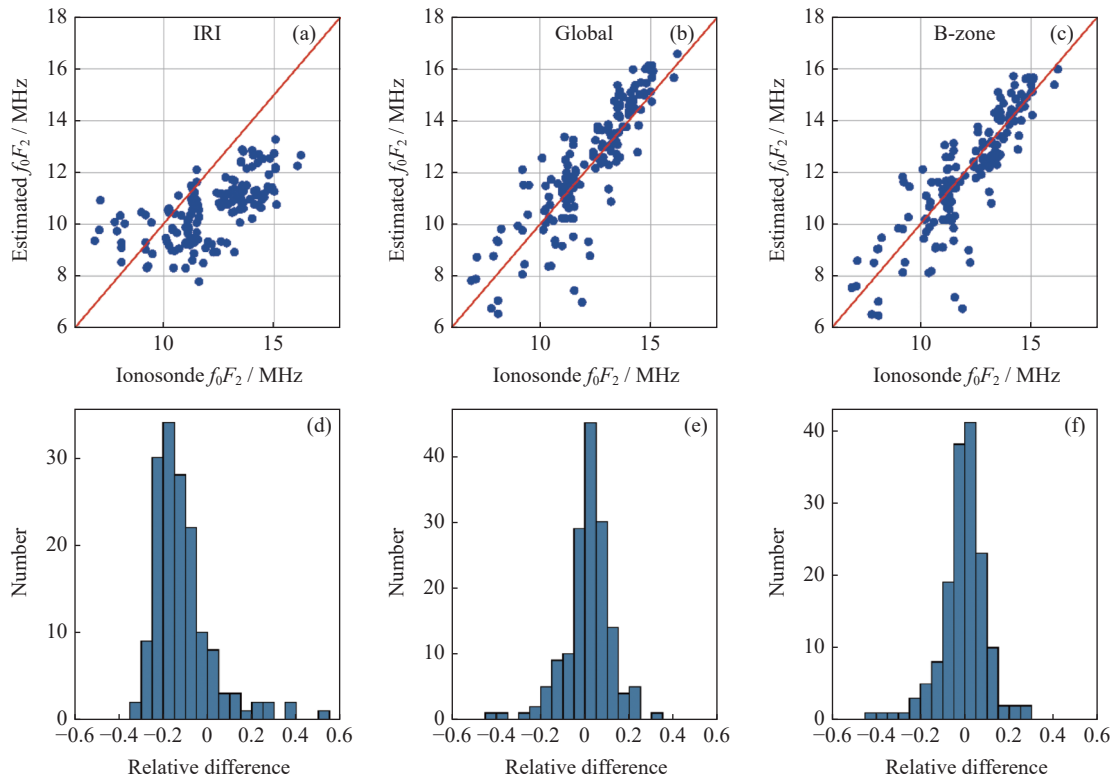


图 6 2013 年估计的 f_0F_2 与地基探测 f_0F_2 的对比。(a) IRI f_0F_2 , (b) 使用 Global 换算系数反演的 f_0F_2 , (c) 使用 B 区换算系数反演的 f_0F_2 , (d) ~ (f) 相对误差的统计直方图。地点为海南富克站 (19.53°N, 109.13°E)

Fig. 6 Comparison between estimated f_0F_2 and f_0F_2 detected by ionosonde in 2013. (a) IRI f_0F_2 , (b) f_0F_2 retrieved from Global conversion factor, (c) f_0F_2 retrieved from B-zone conversion factor, (d)~(f) statistical histogram of relative difference. The location is Hainan Fuke station (19.53°N, 109.13°E)

内的夜气辉强度范围为 0.328~29.259 Ra (瑞利数), 即气辉强度值可能有几十倍的差异。在太阳活动高年, 气辉强度整体而言较高, 一般不会呈现幅度较大的偏差。

由于 DMSP 卫星探测的空间分辨率不高, 往往关注地点处在 150 km 范围内可以取得的数据量较少, 对较少的数据采取加权平均算法可能会带来较大的误差。另一主要差异是 DMSP 卫星在 2013 年和 2017 年探测时间的不同。2013 年 DMSP 卫星探测时间基本稳定在 20:00 LT 左右, 而上面取得的 2017 年 130 天的卫星数据的探测时间全部早于 20:00 LT, 并且 2017 年探测时间早于 19:00 LT 的卫星数据所占比重高达 83.08%。一般来说, 早于 19:00 LT 的 OI 135.6 nm 气辉受到昼夜交替的影响更为强烈, 并不能完全用上述夜气辉模型来描述。处在昼夜交替期间, 由于 OI 135.6 nm 日辉的影响, 运用上述的夜气辉反演模型来计算得到的 f_0F_2 会整体

偏大, 这也和图 7(b)所示的结果相吻合。

总体来说, 上述的 OI 135.6 nm 夜气辉换算系数查找表在不同的太阳活动下都是切实有效的。由总的反演结果可以看出, 气辉强度较高时反演精度会有较为明显的提升, 这可能是 DMSP 卫星搭载的 SSUSI 在气辉强度较大时能有较好的信噪比。值得注意的是, 昼夜交替时分反演精度会受到一定的影响。

3 结论

利用 OI 135.6 nm 夜气辉反演电离层 F_2 层临界频率 f_0F_2 是现阶段广泛应用的电离层监测手段之一。本文在研究了 OI 135.6 nm 夜气辉产生模型的基础上, 通过最新的电离层模型 IRI-2016 和中性大气模型 NRLMSISE-00, 建立了在不同经纬度、季节、太阳活动和地磁活动下均适用的换算系数查找表, 并将 DMSP 卫星于 2013 年(太阳活动高年)和 2017 年(太

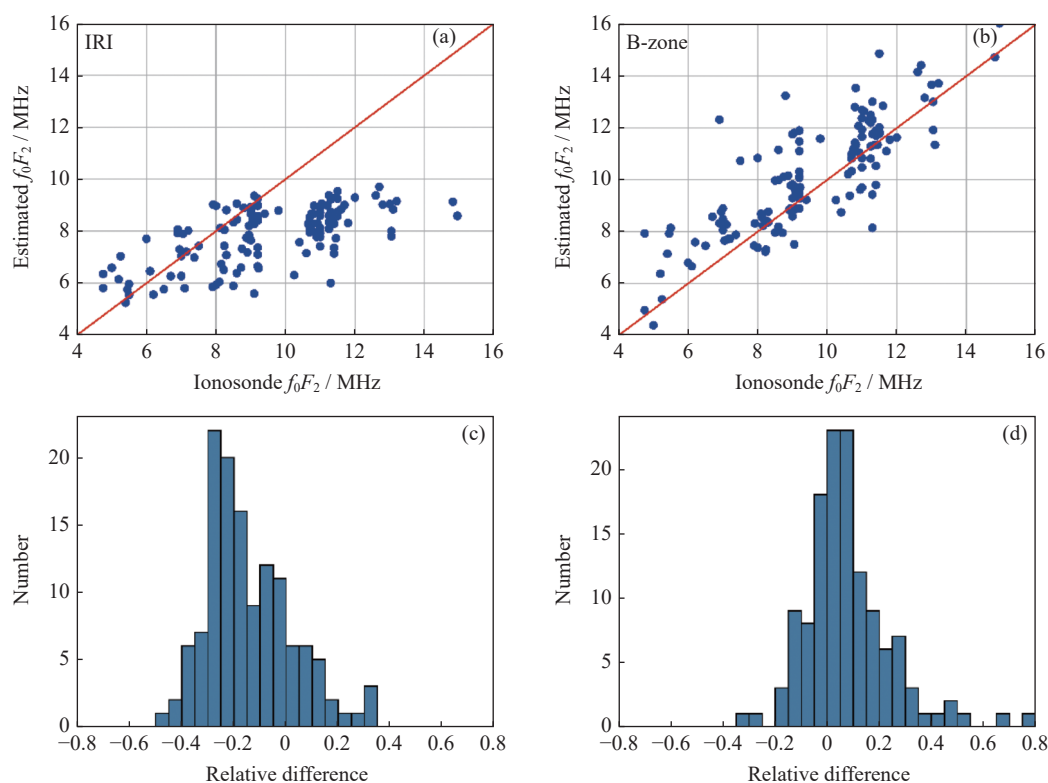


图7 2017年估计的 f_0F_2 与地基探测 f_0F_2 的对比。(a) IRI f_0F_2 , (b) 使用B区换算系数反演的 f_0F_2 , (c)~(d) 相对误差的统计直方图。地点为海南富克站(19.53°N, 109.13°E)

Fig. 7 Comparison between estimated f_0F_2 and f_0F_2 detected by ionosonde in 2017. (a) IRI f_0F_2 , (b) f_0F_2 retrieved from B-zone conversion factor, (c)~(d) statistical histogram of relative difference.

The location is Hainan Fuke station (19.53°N, 109.13°E)

阳活动低年)探测的夜气辉强度数据与海南富克站(19.53°N, 109.13°E)的数字测高仪数据进行反演对比。由反演 f_0F_2 与地基探测 f_0F_2 的结果进行对比,可以看出二者有较高的一致性,在太阳活动高年(2013年),反演结果的相对误差小于等于10%的数据占比77.1%,相对误差小于等于20%的数据占比93.0%,平均相对误差约为7.08%;在太阳活动低年(2017年),相对误差小于等于10%的数据占比55.4%,相对误差小于等于20%的数据占比80.8%,平均相对误差约为12.64%。该反演算法仍有一定的局限性,现实中的电离层电子密度廓线可能较大地偏离模型,以及多种复杂情况下 O^+ 和电子的密度廓线不再吻合。后续的工作将选用更精确的大气模型,致力于提升反演精度。

参考文献

- [1] WANG Houmao, WANG Yongmei. Airglow simulation based on the atmospheric ultraviolet radiance integrated code of 2012[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2016, **59**(2): 425-435
- [2] STRICKLAND D J, DONAHUE T M. Excitation and radiative transport of OI 1304 Å resonance radiation—I: The dayglow[J]. *Planetary and Space Science*, 1970, **18**(5): 661-689
- [3] STRICKLAND D J, ANDERSON JR D E. Radiation transport effects on the OI 1356-Å limb intensity profile in the dayglow[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1983, **88**(A11): 9260-9264
- [4] CHANDRA S, REED E I, MEIER R R, *et al.* Remote sensing of the ionospheric F layer by use of O I 6300-Å and O I 1356-Å observations[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1975, **80**(16): 2327-2332
- [5] MEIER R R, OPAL C B. Tropical UV arcs: Comparison of brightness with f_0F_2 [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1973, **78**(16): 3189-3193
- [6] MEIER R R. Ultraviolet spectroscopy and remote sensing of the upper atmosphere[J]. *Space Science Reviews*, 1991, **58**(1): 1-185
- [7] DEMAJISTRE R, PAXTON L J, MORRISON D, *et al.* Retrievals of nighttime electron density from Thermo-

- sphere Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics (TIMED) mission Global Ultraviolet Imager (GUVI) measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2004, **109**(A5): A05305
- [8] PAXTON L J, MENG C I, FOUNTAIN G H, *et al.* Special sensor ultraviolet spectrographic imager: an instrument description[C]//Proceedings of SPIE 1745, Instrumentation for Planetary and Terrestrial Atmospheric Remote Sensing. San Diego: SPIE, 1992: 2-15
- [9] CHRISTENSEN A B, PAXTON L J, AVERY S, *et al.* Initial observations with the Global Ultraviolet Imager (GUVI) in the NASA TIMED satellite mission[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2003, **108**(A12): 1451
- [10] DYMOND K F, NEE J B, THOMAS R J. The tiny ionospheric photometer: an instrument for measuring ionospheric gradients for the COSMIC constellation[J]. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2000, **11**(1): 273-290
- [11] MENDE S B, FREY H U, RIDER K, *et al.* The far ultraviolet imager on the ICON mission[J]. *Space Science Reviews*, 2017, **212**(1): 655-696
- [12] JIANG F, MAO T, ZHANG X X, *et al.* Observation of thermosphere and ionosphere using the ionosphere Photometer (IPM) on the Chinese meteorological satellite FY-3D[J]. *Advances in Space Research*, 2020, **66**(9): 2151-2167
- [13] STRICKLAND D J, BISHOP J, EVANS J S, *et al.* Atmospheric Ultraviolet Radiance Integrated Code (AURIC): theory, software architecture, inputs, and selected results[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1999, **62**(6): 689-742
- [14] BISHOP J, FELDMAN P D. Analysis of the astro-1/Hopkins ultraviolet telescope EUV-FUV dayside nadir spectral radiance measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2003, **108**(A6): 1243
- [15] STEPHAN A W, DYMOND K F, BUDZIEN S A, *et al.* Middle ultraviolet remote sensing of the equatorial thermosphere during a geomagnetic storm[J]. *Annales Geophysicae*, 2004, **22**(9): 3203-3209
- [16] EVANS J S, LUMPE J D, CORREIRA J, *et al.* Extension of the AURIC radiative transfer model for mars atmospheric research[C]//AGU Fall Meeting 2013. Washington: American Geophysical Union, 2013: P21 A-1686
- [17] JIANG Fang, MAO Tian, LI Xiaoyin, *et al.* The research on N_mF_2 and TEC derived from nighttime OI 135.6 nm emission measurement[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, **57**(11): 3679-3687 (江芳, 毛田, 李小银, 等. 利用 OI 135.6 nm 夜气辉辐射探测电离层峰值电子密度及电子总含量的研究[J]. 地球物理学报, 2014, **57**(11): 3679-3687)
- [18] DING G X, CHEN B, ZHANG X X, *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
- [19] QIN J Q, MAKELA J J, KAMALABADI F, *et al.* Radiative transfer modeling of the OI 135.6 nm emission in the nighttime ionosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2015, **120**(11): 10116-10135
- [20] BRUNE W H, FELDMAN P D, ANDERSON R C, *et al.* Midlatitude oxygen ultraviolet nightglow[J]. *Geophysical Research Letters*, 1978, **5**(5): 383-386
- [21] DYMOND K F, THONNARD S E, MCCOY R P, *et al.* An optical remote sensing technique for determining nighttime F region electron density[J]. *Radio Science*, 1997, **32**(5): 1985-1996
- [22] DYMOND K F, NICHOLAS A C, BUDZIEN S A, *et al.* A comparison of electron densities derived by tomographic inversion of the 135.6-nm ionospheric nightglow emission to incoherent scatter radar measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, **124**(6): 4585-4596
- [23] CHAMBERLAIN J W, HUNTEN D W. Theory of Planetary Atmospheres: An Introduction to Their Physics and Chemistry [M]. New York: Academic Press Inc., 1987
- [24] BILITZA D, ALTADILL D, TRUHLIK V, *et al.* International reference ionosphere 2016: from ionospheric climate to real-time weather predictions[J]. *Space Weather*, 2017, **15**(2): 418-429
- [25] PICONE J M, HEDIN A E, DROB D P, *et al.* NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: statistical comparisons and scientific issues[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2002, **107**(A12): 1468
- [26] RAJESH P K, LIU J Y, HSU M L, *et al.* Ionospheric electron content and NmF₂ from nighttime OI 135.6 nm intensity[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2011, **116**(A2): A02313
- [27] QIN J Q. Far ultraviolet remote sensing of the nighttime ionosphere using the OI 130.4-nm emission[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2020, **125**(6): e2020JA028049
- [28] GUO B, XU J Y, SUN L C, *et al.* The seasonal and longitudinal variations of nighttime OI 135.6-nm emission at equatorial ionization anomaly crests observed by the DMSP/SSUSI[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2020, **125**(9): e2019JA027764
- [29] TSAI T C, JHUANG H K, LEE L C, *et al.* Ionospheric peaked structures and their local time, seasonal, and solar activity dependence based on global ionosphere maps[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, **124**(10): 7994-8014
- [30] SHEPHERD S G. Altitude-adjusted corrected geomagnetic coordinates: definition and functional approximations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2014, **119**(9): 7501-7521