

135.6 nm 夜气辉峰值电子密度反演算法及误差*

江 芳 付利平 王咏梅

(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

摘 要 根据夜间 135.6 nm 大气辉光光强与 F_2 层峰值电子密度 $N_m F_2$ 平方成正比的物理机制, 在前期夜间 135.6 nm 气辉辐射激发模型研究的基础上建立了峰值电子密度的反演算法, 把全球经纬度分成若干格点, 每个格点的电离层及中性成分信息分别由 IRI2000 和 MSISE90 提供, 将电离层及中性成分廓线输入夜气辉辐射激发模型, 计算每个格点 135.6 nm 气辉的辐射强度, 然后将各个格点的 135.6 nm 气辉辐射强度与电离层廓线输入的 $N_m F_2$ 平方拟合得到气辉强度与 $N_m F_2$ 的转换因子. 利用此方法可获得不同地方时、季节和太阳活动周期的转换因子组成查算表, 进而根据实际探测的 135.6 nm 气辉辐射强度反演相应时空的 $N_m F_2$. 最后对该算法的反演误差进行了综合分析, 为该算法适用的时空特性提供重要理论支撑.

关键词 夜气辉, 峰值电子密度, 辐射强度, 电离层

中图分类号 P 352

Retrieval Algorithm and Precision Analysis for $N_m F_2$ of Nighttime OI 135.6 nm Emission

JIANG Fang FU Liping WANG Yongmei

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

Abstract The nighttime OI 135.6 nm airglow is proportional to the square of the maximum electronic density of ionospheric F_2 layer ($N_m F_2$). Based on the previous studies of the nighttime OI 135.6 nm airglow radiative and emissive model, the retrieval algorithm of $N_m F_2$ derived from nighttime OI 135.6 nm emission was presented. The column emission rate is calculated for each grid point of the nighttime airglow radiative and emissive model. The electron density profile, O^+ density profile, and electron temperature profile are taken from the IRI2000 model, and the neutral components are taken from MSISE90 model. In order to derive the relationship between the OI 135.6 nm column emission rate and $N_m F_2$, the column emission rate is fitted to the square of $N_m F_2$ linearly. The ratio of the square of $N_m F_2$ to the column emission rate is obtained from the slop of the fitting line, which gives the relationship between $N_m F_2$ and the emission. According to the measurements of the OI 135.6 nm column emission rate, $N_m F_2$ are retrieved. Finally, the error of the retrieval method is analyzed, which provides important theoretical supports for the time and space applicability of

* 国家自然科学基金项目资助 (41005013)

2017-02-23 收到原稿, 2017-05-12 收到修定稿

E-mail: jiangf@nssc.ac.cn

the algorithm.

Key words Nighttime airglow, Peak electron density, Emission intensity, Ionosphere

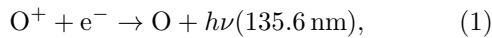
0 引言

很多研究提出夜空中的紫外辐射与电离层密切相关^[1-3], 例如 DeMajistre 等^[4] 提出夜间电离层 135.6 nm 大气辉光正比于电子浓度的平方. 进行 135.6 nm 大气辉光探测的主要有台湾福卫三号卫星 (FORMOST-3/COSMIC, 简称 F3/C) 搭载的小型电离层光度计 (TIP)^[5] 和美国 TIMED (Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energy and Dynamics) 搭载的全球紫外光照相机 GUVI^[4]. 中国风云三号卫星上也将搭载一种小型、高灵敏度的电离层光度计, 该仪器测量夜间 135.6 nm 波段的气辉辐射, 实现电离层状态监测. DeMajistre 等^[1] 用 GUVI 获取的 135.6 nm 临边辐射强度反演电子浓度剖面. Dymond 等^[6] 及 Hsu 等^[7] 通过 F3/C 卫星上的掩星和小型电离层光度计反演电子浓度剖面. 为了配合仪器的数据应用, 发展了 135.6 nm 夜气辉辐射激发模式^[8].

在前期对氧原子 135.6 nm 波段夜气辉激发机制进行研究的基础上, 建立了峰值电子密度的反演算法, 并对该反演算法的误差进行了分析. 考虑到该波段辐射受大气中氧原子对其多次散射的影响, 采用迭代法求解包含多次散射及大气吸收衰减的辐射传输方程, 计算 135.6 nm 波段夜气辉辐射强度值.

1 反演算法

对于电离层, OI 135.6 nm 夜气辉的辐射强度主要由 O^+ 与电子的辐射复合过程产生, 即



另外一小部分来自 O^+ 与 O^- 的中性复合. 包括辐射复合及中性复合的 135.6 nm 体积发射率为

$$\varepsilon_0(z) = \frac{\gamma k_1 k_2 \beta n_o(z) n_e(z) n_{o^+}(z)}{k_2 n_{o^+}(z) + k_3 n_o(z)} + \gamma \alpha n_e(z) n_{o^+}(z). \quad (2)$$

OI 135.6 nm 气辉辐射通常包含了来自 135.8 nm

及 135.6 nm 两个波段的贡献^[6], 式 (2) 中 γ 为 135.6 nm 与 135.8 nm 的谱线比, 135.6 nm 及 135.8 nm 波段的谱线比分别为 0.791, 0.209; 反应系数 k_1 , k_2 , k_3 分别为 $1.3 \times 10^{-15} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $1.5 \times 10^{-7} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $1.4 \times 10^{-10} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; $\beta = 0.54$. 辐射复合率 α 为电子温度的函数, T_e 为电子温度, 单位 K^[9]. $n_o(z)$, $n_e(z)$, $n_{o^+}(z)$ 分别为氧原子、电子及氧离子的数密度.

忽略 O^+ 与 O^- 的中性复合 ($O^+ + O^- \rightarrow O^* + O$) 对 135.6 nm 辐射强度的影响, 135.6 nm 的体积发射率可简化为

$$\varepsilon_0(z) = \gamma \alpha n_e(z) n_{o^+}(z). \quad (3)$$

假设电离层 F 层呈电中性, 即 $n_e(z) \approx n_{o^+}(z)$, 式 (3) 可写为

$$\varepsilon_0(z) \approx \gamma \alpha n_e(z)^2. \quad (4)$$

在实际的天底探测中, 电离层气辉光度计测量的是天底方向 135.6 nm 的总辐射. 因此需要对垂直路径进行积分, 即测量的夜气辉 135.6 nm 辐射强度为

$$4\pi I \approx 10^{-6} \int_0^{z_{\text{sat}}} \gamma \alpha_{135.6} n_e(z) n_e(z) dz. \quad (5)$$

其中 z_{sat} 为卫星高度. 利用 Chapman 函数表示电子浓度随高度的分布^[10], 则上式可简化为

$$4\pi I = K_1 (N_m F_2)^2 H. \quad (6)$$

这里 H 为电离层等离子体标高 (单位 km), K_2 为与光化反应速率系数有关的常数^[11].

由式 (6) 可知, 135.6 nm 的夜气辉辐射强度与 $N_m F_2$ 平方呈正比. 因此, 测得 135.6 nm 的夜气辉辐射强度即可反演 $N_m F_2$.

将全球按经度 5° 和纬度 2.5° 划分为网格, 模拟每个格点的 135.6 nm 气辉辐射强度. 气辉辐射强度的计算采用 135.6 nm 夜气辉辐射激发模式^[8]. 中性大气成分的浓度剖面来自 MSIS-86 模式^[12], 离子和电子的浓度剖面来自 IRI-2000 电离层模式^[13]. 将每个格点的 135.6 nm 气辉辐射强度分别与 $N_m F_2$ 平方拟合 (见图 1), 可以获得一条相关系数较高的回归直线. 将该回归直线的斜率作为 135.6 nm 辐射强度与 $N_m F_2$ 的转换因子, 通过转换因子得到 $N_m F_2$ 反演值随经纬度的分布 (见图 2).

根据上述计算转换因子的方法, 可以获得不同地方时、季节和太阳活动周期的转换因子, 组成查算表.

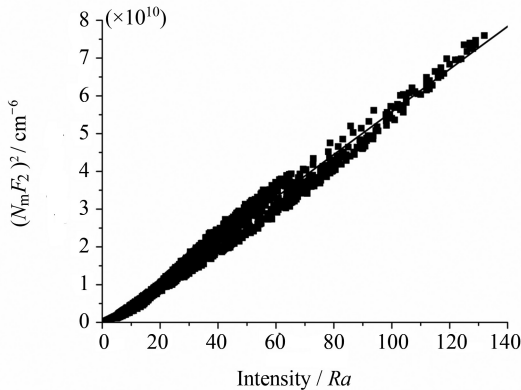


图 1 2002 年 1 月 5 日 23:00 LT 135.6 nm 辐射强度与 $N_m F_2$ 平方的拟合

Fig. 1 Linear relationship between the square of $N_m F_2$ and the OI 135.6 nm column emission rate at 23:00 LT on January 5, 2002

在对实际探测资料处理时, 寻找与观测资料相对应的时间、季节和太阳活动周期时转换因子, 即可反演得到相应的 $N_m F_2$ 值.

计算一个太阳活动周期 (1996—2006 年) $N_m F_2$ 平方与 135.6 nm 大气辉光在不同季节和地方时的转换因子. 图 3 为 1996—2006 年 $F_{10.7}$ 的变化^[13]. 图 4 为 1996—2005 年转换因子随不同季节的地方时变化. 由图 4 可以看出, 转换因子随季节、太阳活动周期、地方时的变化较为平缓, 在临近早晨时值较低. 总体而言, $N_m F_2$ 平方与 135.6 nm 大气辉光的转换因子趋于稳定.

2 算法误差分析

反演算法中把全球按经度 5° 和纬度 2.5° 划分为网格, 计算每个网格点夜气辉辐射强度对应的真实峰值电子密度 ρ^t , 利用转换因子反演得到该格点上的

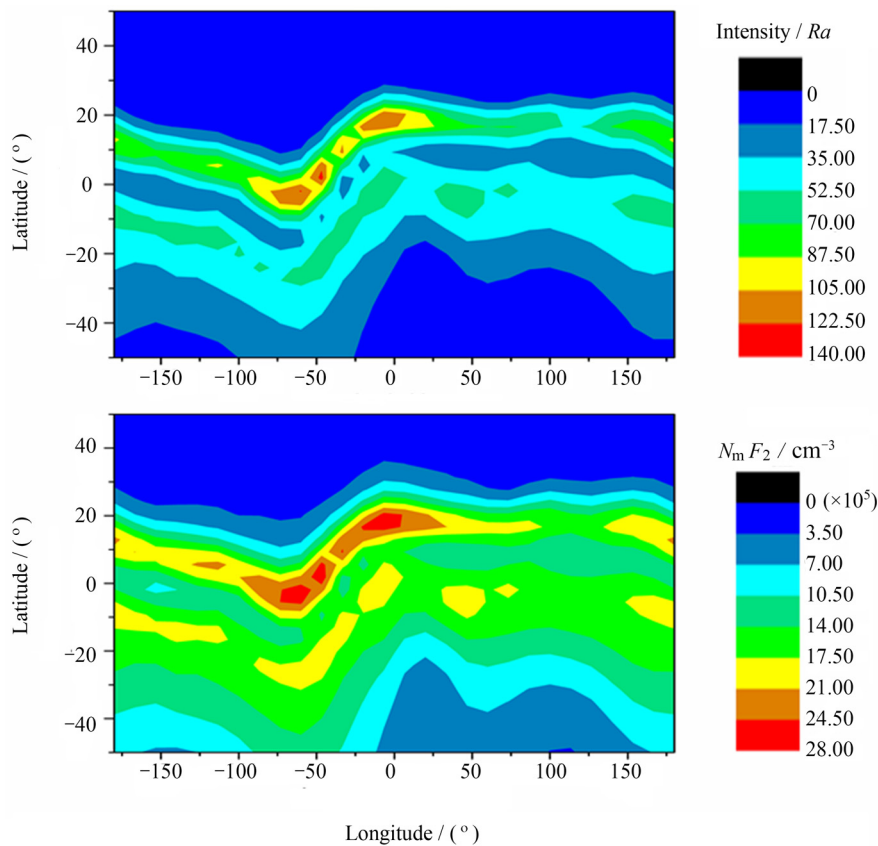


图 2 2002 年 1 月 5 日 23:00 LT 夜气辉辐射强度和反演的 $N_m F_2$ 随经纬度的分布

Fig. 2 Nighttime airglow emission and the retrieval values of $N_m F_2$ at 23:00 LT on January 5, 2002

峰值电子密度 ρ^r , 二者的百分比误差为

$$\chi_i = 100 \times (\rho_i^t - \rho_i^r) / \rho_i^r \quad (7)$$

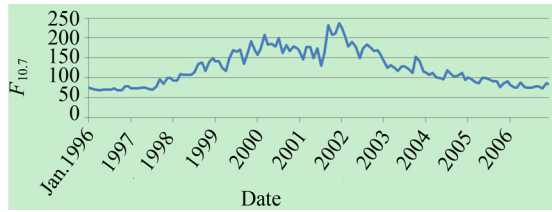


图 3 1996—2006 年 $F_{10.7}$ 变化
Fig. 3 $F_{10.7}$ variation from 1996 to 2006

其中 i 为格点的序号.

假设全球范围共有 n 个格点, 则全球反演误差的均方根误差 χ_{rms} 为

$$\chi_{rms} = \sqrt{\frac{(\chi_1^2 + \chi_2^2 + \chi_3^2 + \dots + \chi_n^2)}{n}} \quad (8)$$

只考虑中低纬度的 n' 个格点, 反演误差的均方根误差 χ'_{rms} 为

$$\chi'_{rms} = \sqrt{\frac{(\chi_1^2 + \chi_2^2 + \chi_3^2 + \dots + \chi_{n'}^2)}{n'}} \quad (9)$$

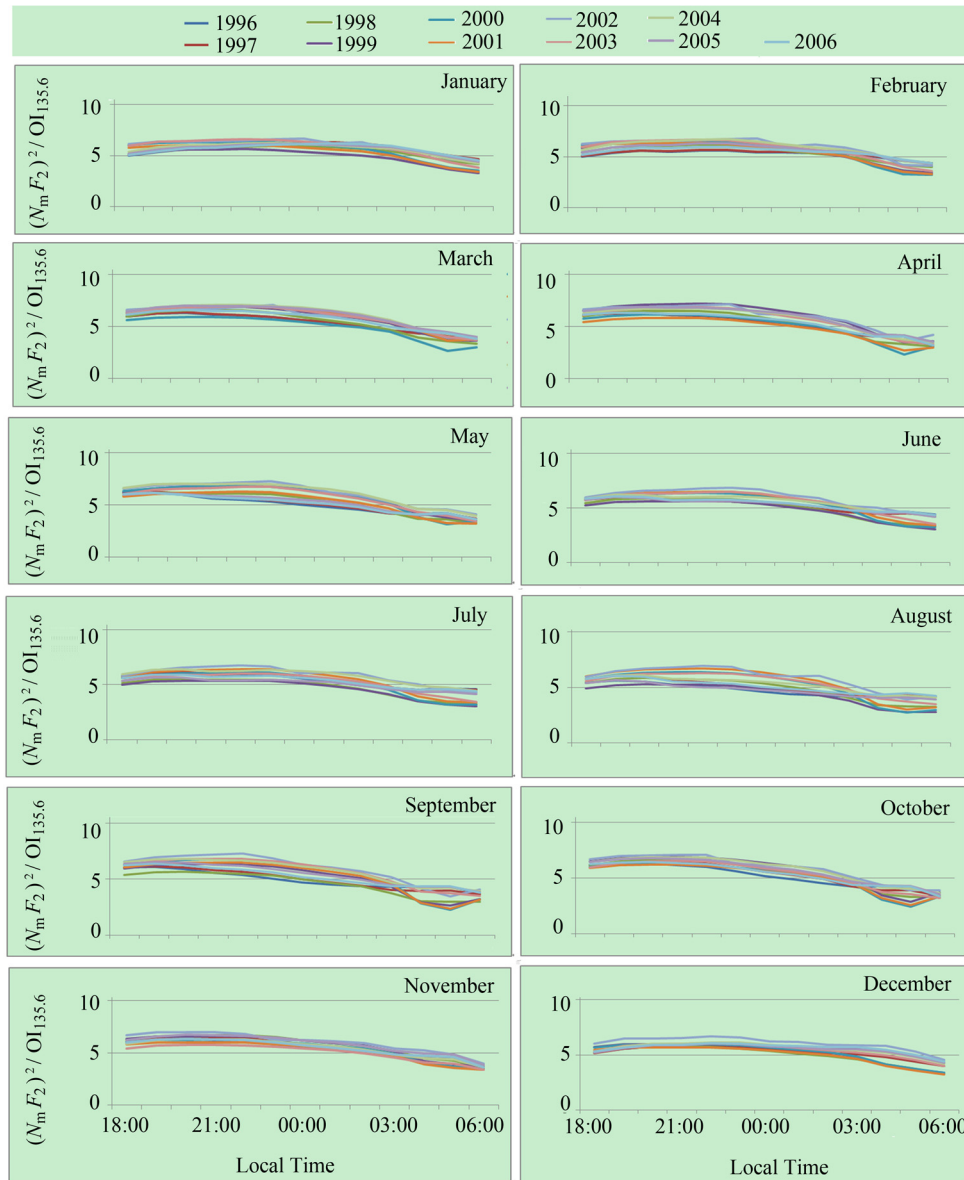


图 4 1996—2006 年转换因子随不同月份的地方时变化
Fig. 4 Conversion factor change for $N_m F_2$ with local time in different months from 1996 to 2006

为了深入分析反演算法误差, 计算了2002年(太阳活动高年)与2006年(太阳活动低年)不同地方时的全球 χ_{rms} 、中低纬度 χ'_{rms} 随月份的分布, 如图5和图6所示。

由图5可见, 对于太阳活动高年(2002年), 除凌晨04:00LT和05:00LT外, 全球范围的 $N_m F_2$ 反演误差 χ_{rms} 均比中低纬的反演误差 χ'_{rms} 大得多。

夜间18:00LT至凌晨02:00LT的 χ_{rms} 均在30%以上, 03:00LT之后各个月的 χ_{rms} 开始逐渐下降, 04:00LT–06:00LT的 χ_{rms} 几乎都下降到30%以下。此外, 18:00LT–03:00LT的 χ'_{rms} 几乎都在10%左右, 04:00LT–05:00LT的 χ'_{rms} 随月份起伏较大, 06:00LT时各个月的 χ'_{rms} 均下降到5%左右。

由图6可见, 太阳低年(2006年)的 χ_{rms} 比太阳

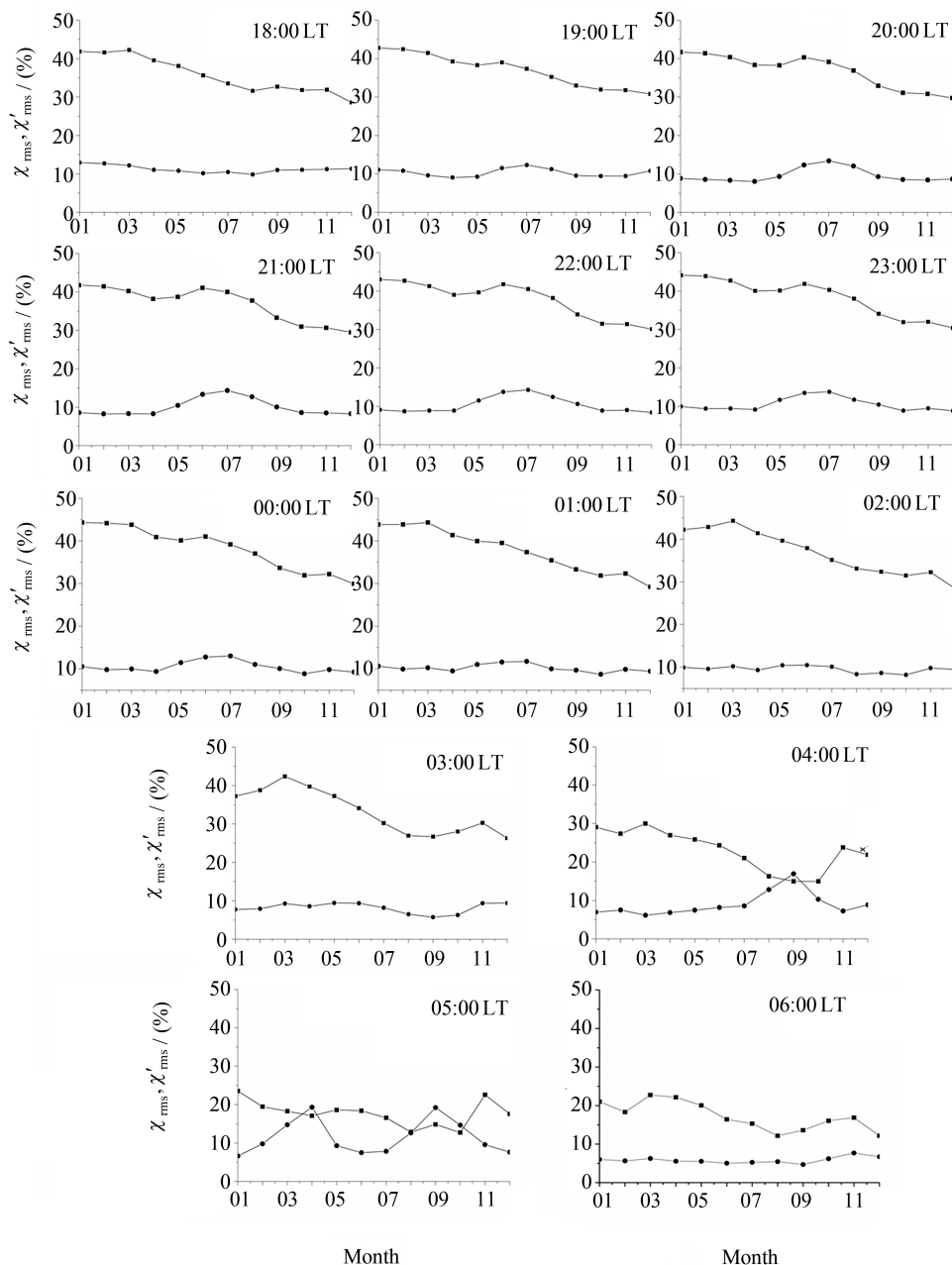


图5 2002年夜间各个时刻 χ_{rms} 和 χ'_{rms} 随月份的分布. 方块连线为全球纬度 χ_{rms} , 圆形连线为中低纬度 χ'_{rms}

Fig. 5 Monthly variation of χ_{rms} and χ'_{rms} at different nighttime in 2002. The line with blocks is χ_{rms} , and the line with dots is χ'_{rms}

高年 (2002 年) 大大降低. 上半年 18:00 LT–01:00 LT 间的 χ_{rms} 比 χ'_{rms} 大, 下半年二者较为接近. 全年 02:00 LT–05:00 LT 间的 χ_{rms} 与 χ'_{rms} 相差不大, 到 06:00 LT 时 χ_{rms} 与 χ'_{rms} 的差别又略有增大. 总体而言, 太阳低年 χ_{rms} 与 χ'_{rms} 的差值比太阳高年小

得多.

由图 5 和图 6 可知, 太阳高年的 $N_m F_2$ 反演误差 χ_{rms} 比太阳低年的大, 即太阳活动越强, 全球格点上峰值电子密度与 135.6 nm 柱发射率线性拟合相关性越差. 这可能是因为电子密度廓线的半厚宽度受

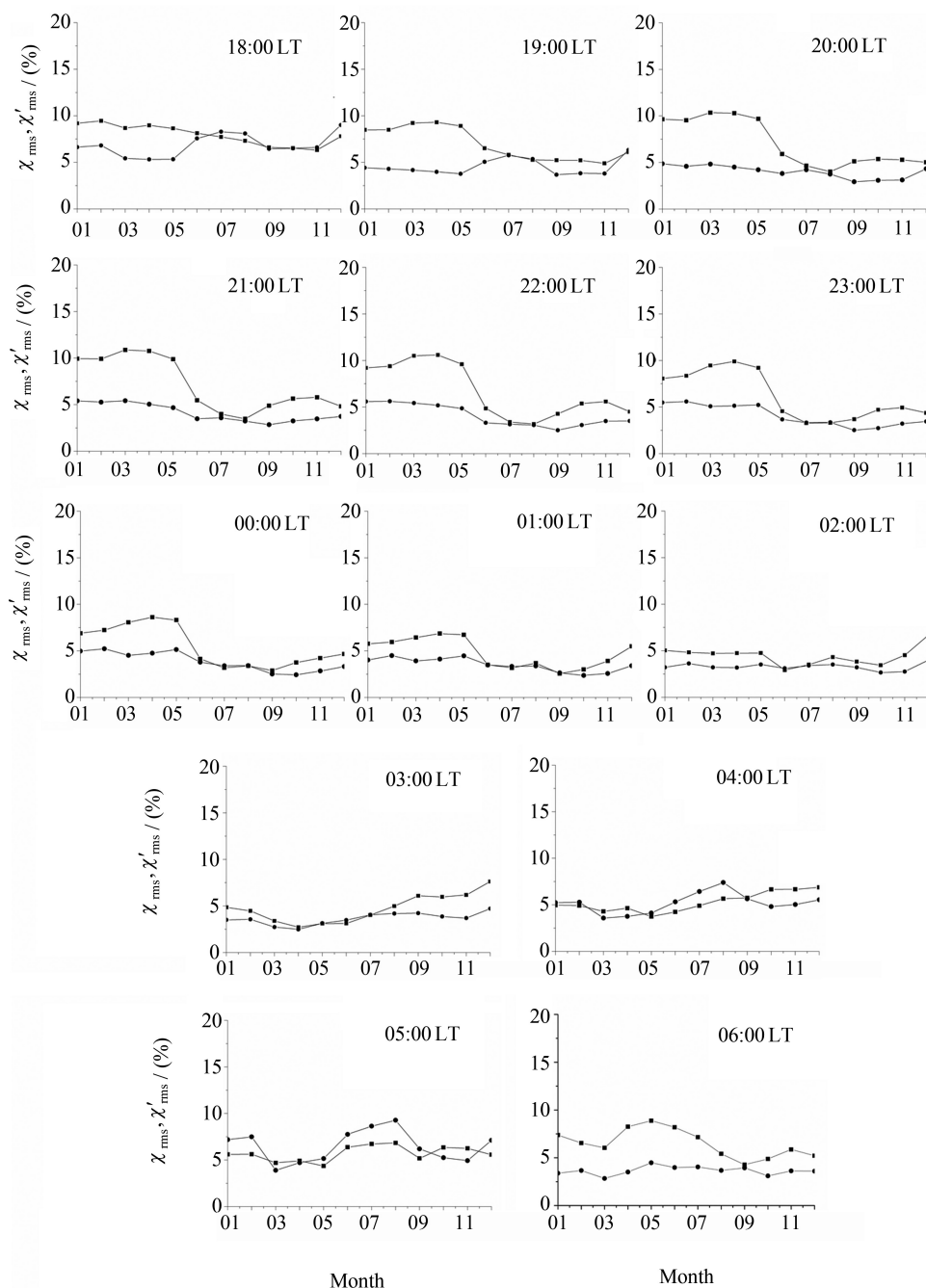


图 6 2006 年夜间各个时刻 χ_{rms} 和 χ'_{rms} 随月份的分布. 方块连线为全球纬度 χ_{rms} , 圆形连线为中低纬度 χ'_{rms}
 Fig. 6 Monthly variation of χ_{rms} and χ'_{rms} at different nighttime in 2006. The line with blocks is χ_{rms} and the line with dots is χ'_{rms}

太阳活动影响, 半厚宽度范围覆盖高度不同影响了 135.6 nm 柱发射率与峰值电子密度的线性关系. 另外, 太阳活动高年的 χ_{rms} 比 χ'_{rms} 大得多. 这可能是由于太阳活动越强, 高纬度的电子密度廓线变化越剧烈, 从而影响 135.6 nm 柱发射率与峰值电子密度的线性关系.

3 结论

利用夜气辉 135.6 nm 波段监测电离层峰值电子密度是目前常用的手段之一. 中国即将在相关卫星上搭载此类探测仪器, 这是中国首次开展通过远紫外波段光学遥感探测电离层, 同时也是中国首次开展远紫外波段遥感大气及电离层的理论研究. 为了利用探测仪测量的辐射强度反演得到峰值电子密度, 首先需要建立相应的反演算法. 本文在前期夜间 135.6 nm 气辉辐射激发模型工作的基础上, 建立了电离层峰值电子密度反演算法, 并对该算法的反演误差进行了分析. 研究结果可为该反演算法适用的时空特性提供重要理论依据.

参考文献

- [1] LIU L B, WAN W X, NING B Q, *et al.* Climatology of the mean total electron content derived from GPS global ionospheric maps [J]. *J. Geophys. Res.*, 2009, **114**(A6): A06308
- [2] YU T, WAN W X, LIU L B, *et al.* Global scale annual and semi-annual variations of daytime $N_m F_2$ in the high solar activity years [J]. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, 2004, **66**(18): 1691-1701
- [3] FELDMAN P D, DAVIDSEN A F, BLAIR W P, *et al.* The spectrum of the tropical oxygen nightglow observed at 3 Å resolution with the Hopkins ultraviolet telescope [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1992, **19**(5): 453-456
- [4] DEMAJISTRE R, PAXTON L J, MORRISON D, *et al.* Retrievals of nighttime electron density from Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics (TIMED) mission Global Ultraviolet Imager (GUVI) measurements [J]. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**(A5): A05305
- [5] COKER C, DYMOND K F, BUDZIEN S A, *et al.* Observations of the ionosphere using the tiny ionospheric photometer [J]. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 2009, **20**(1): 227-235
- [6] DYMOND K F, BUDZIEN S A, CHUA D H, *et al.* Tomographic reconstruction of the low-latitude nighttime electron density using FORMOSAT-3/COSMIC radio occultation and UV photometer data [J]. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 2009, **20**(1): 215-226
- [7] HSU M L, RAJESH P K, LIU J Y, *et al.* Ionospheric electron density concurrently derived by tip and GOX of FORMOSAT-3/COSMIC [J]. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, **20**(1): 207-211
- [8] JIANG Fang, MAO Tian, LI Xiaoyin, *et al.* The research on $N_m F_2$ and TEC derived from nighttime OI 135.6 nm emission measurement [J]. *Chin. J. Geophys.*, 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量的研究 [J]. *地球物理学报*, 2014, **57**(11): 3679-3687)
- [9] DYMOND K F, THOMAS S E, MCCOY R P, *et al.* An optical remote sensing technique for determining nighttime F region [J]. *Radio Sci.*, 1997, **32**(5): 1985-1996
- [10] CHAMBERLAIN J W, HUNTEN D W. *Theory of Planetary Atmospheres: An Introduction to Their Physics and Chemistry* [M]. New York: Academic Press Inc., 1987
- [11] CHANDRA S, REED E I, MEIER R R, *et al.* Remote sensing of the Ionospheric F layer by use of OI 6300-Å and OI 1356-Å observations [J]. *J. Geophys. Res.*, 1975, **80**(16): 2327-2332
- [12] HEDIN A E. MSIS-86 thermospheric model [J]. *J. Geophys. Res.*, 1987, **92**(A5): 4649-4662
- [13] BILITZA D. *The International Reference Ionosphere 1990: NSSDC/WDC-A-S* [R]. Greenbelt, MD: National Space Science Data Center, 1990: 90-20