

江芳, 毛田, 李小银等. 2014. 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. 地球物理学报, 57(11):3679-3687, doi:10.6038/cjg20141122.

Jiang F, Mao T, Li X Y, et al. 2014. The research on N_mF_2 and TEC derived from nighttime OI 135.6 nm emission measurement. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 57(11):3679-3687, doi:10.6038/cjg20141122.

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

江芳¹, 毛田², 李小银¹, 付利平¹, 王咏梅¹, 余涛²

1 中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100190

2 国家卫星气象中心, 北京 100081

摘要 测量夜间 135.6 nm 大气气辉辐射强度是目前有效的电离层探测方式之一, 我国即将在风云三号卫星上搭载仪器, 利用该波段夜气辉辐射测量来反演电子总含量(本文所指电子总含量表示卫星高度以下大气柱的电子含量)及峰值电子密度, 因此非常有必要开展相关的气辉发光模型及反演研究. 在介绍氧原子 135.6 nm 波段夜气辉激发机制基础上, 考虑辐射在传输过程中受到大气氧原子的散射及氧气分子的吸收, 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, 得到该波段的体发射率, 最终通过考虑包含辐射传输的路径积分计算得到 135.6 nm 气辉辐射强度值. 对结果的分析表明: 该气辉模型能较好地描述体发射率随高度的分布特征, 计算得到的 135.6 nm 夜气辉辐射强度在不同时空及太阳活动的分布与相应条件下峰值电子密度(N_mF_2)及电子总含量(TEC)的分布基本一致. 相同的时空及太阳活动输入条件下, 模式计算的 135.6 nm 夜气辉辐射强度与国外同类模式结果的值平均偏差约为 3%. 文中最后介绍了通过 135.6 nm 夜气辉的辐射强度探测来反演电离层峰值电子密度 N_mF_2 及电子总含量 TEC 的反演方法.

关键词 夜气辉; 电子总含量; 峰值电子密度; 辐射传输; 辐射强度

doi:10.6038/cjg20141122

中图分类号 P356

收稿日期 2013-03-18, 2014-05-20 收修定稿

The research on N_mF_2 and TEC derived from nighttime OI 135.6 nm emission measurement

JIANG Fang¹, MAO Tian², LI Xiao-Yin¹, FU Li-Ping¹, WANG Yong-Mei¹, YU Tao²

1 Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2 China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

Abstract Measuring the nighttime OI 135.6 nm airglow emissions for the study of ionosphere changes has been used as one of the most common ways to detect ionosphere at present. The sensor of measuring the nighttime OI 135.6 nm airglow emissions for obtaining the total electron content and peak electron density will be on board the FY-3 meteorological satellite of China. Because of few far-ultraviolet airglow radiative research in our country, the associated airglow emitting models and the retrieval algorithm study are imperative. Based on the nighttime OI 135.6 nm airglow excitation mechanism research, considering the radiative scattering of the atmospheric oxygen atoms and absorption of oxygen molecules in the band at the radiative transfer process, the

iterative method was used to solve the radiative transfer equation including multiple scattering and the atmospheric absorption attenuation. The volume emissive rates at the band could be obtained. Furthermore the radiative intensity was calculated by the path integral calculation of radiative transfer at 135.6 nm band. Analysis of the results shows that the airglow model could be used to describe the volume emissive rates with height distribution well. The 135.6 nm radiative intensities calculated at different spatial temporal distribution and solar activity conditions have a good consistency with $N_m F_2$ and TEC. Under the same conditions of spatial temporal and solar activity input conditions, the radiative intensity calculated by the model was compared with similar foreign model and the mean deviation was 3%, and further confirms the correctness of the model. This paper finally introduced the retrieval algorithm of $N_m F_2$ and TEC by measuring the nighttime OI 135.6 nm airglow emissions.

Keywords Night airglow; Total electron content; Peak electron density; Radiative transfer; Radiative intensity

1 引言

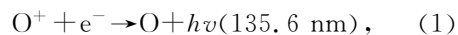
电离层已成为众多研究者广泛关注的热点领域 (Yu T, et al., 2004; Yu T, et al., 2009; Liu L B, et al., 2009; Feldman P D, et al., 1992). 1960 年代末期以来, 陆续发现夜空中的紫外辐射与电离层有密切的关系, 继而有人提出用夜气辉辐射观测电离层 F 层电子浓度梯度的方法, 来自氧原子的 135.6 nm 夜气辉辐射是被研究最多的一种 (Chandra S, et al., 1975; Tinsley B A, et al., 1991; Meier R R, 1991). 夜间氧原子的 135.6 nm 气辉辐射主要由 O^+ 与电子的辐射复合过程产生, 其强度可用来研究电离层变化 (Dymond K F, et al., 1996; Dymond K F, et al., 1997); DeMajistre 等 (2004) 用 GUVI 获取的 135.6 nm 临边辐射强度来反演夜间电子浓度剖面. Dymond 等 (2009) 和 Hsu 等 (2009) 通过 FORMOSAT-3 卫星上的掩星和小型电离层光度计反演了电子浓度剖面. 我国在风云三号卫星上也即将搭载一种小型、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. 为了更好地研究 135.6 nm 气辉辐射强度和电离层电子浓度之间的关系, 需要建立夜气辉氧原子的 135.6 nm 激发模型, 由于氧原子的散射对该波段的辐射具有一定的光学厚度, 因此, 该波段的辐射传输计算除了考虑氧分子的吸收还需要考虑氧原子对其复杂的多次散射过程 (Strickland D J and Anderson D E, 1983). 当前, 远紫外波段辐射传输模型的研制仍然是国际上研究的热点 (Strickland D J and Donahue T M, 1970), 能够用

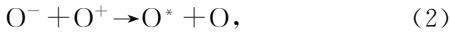
于远紫外波段气辉辐射计算的模型很少, 比较通用的只有 AURIC (Atmospheric Ultraviolet Radiance Integrated Code), 即大气紫外辐射积分代码, 它是由美国计算物理公司 CPI (Computational Physics, Inc.) 与空军 Phillips 实验室联合开发的 (Strickland D J, et al., 1999), 但是出于各种原因, 目前 AURIC 仅提供黑匣子可执行程序, 且由于其包含的大气及电离层数据库不能更新, 只能适用于 1992—1999 年期间的模拟.

本文在对氧原子 135.6 nm 波段夜气辉激发机制进行研究的基础上, 考虑到该波段辐射会受到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, 建立了 135.6 nm 夜气辉的辐射传输模型, 接着对模型的计算结果进行了分析和验证. 研究表明, 自建模型计算得到的夜间 135.6 nm 气辉辐射强度与相同条件下 AURIC 的计算结果平均偏差约为 3%, 计算的辐射强度在不同时空及太阳活动时的分布特征与相应条件下峰值电子密度及电子总含量的分布有较好的一致性. 文章最后介绍了由 135.6 nm 夜气辉辐射强度得到峰值电子密度及电子总含量的反演算法.

2 气辉发光模型

Dymond 和 Thomas (2001) 认为夜间电离层的 OI 135.6 nm 气辉辐射主要是由 O^+ 与电子的辐射复合过程产生, 另外很小一部分来自 O^+ 与 O^- 的中性复合:





其中 O^* 表示激发态 $\text{O}(^5\text{S})$, 发生能级跃迁 $\text{O}(^5\text{S}) \rightarrow \text{O}(^3\text{P})$ 的同时释放 135.6 nm 谱线。

包括辐射复合及中性复合激发机制的 135.6 体积发射率可由下式给出:

$$\epsilon_0(z) = \frac{\gamma k_1 k_2 \beta n_o(z) n_e(z) n_{o^+}(z)}{k_2 n_{o^+}(z) + k_3 n_o(z)} + \gamma \alpha n_e(z) n_{o^+}(z), \quad (3)$$

通常所说的 OI 135.6 nm 气辉辐射实际上包含了来自 135.8 nm 及 135.6 nm 两个波段的贡献(Dymond et al., 1997), 式中 γ 为 135.6 nm 与 135.8 nm 的谱线比, 对于 135.6 nm 及 135.8 nm 波段分别为 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 是电子温度的函数, 其表达式为 $\alpha = 7.5 \times 10^{-13} (1160/T_e)^{-1/2} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, T_e 为电子温度(K) (Dymond et al., 1997); $n_o(z), n_e(z), n_{o^+}(z)$ 分别表示氧原子, 电子及氧离子的数密度。

大气中的氧原子会使辐射产生多次散射现象, 若考虑多次散射的辐射传输, 那么某一高度的体发射率还应该包括来自其他高度的辐射经过大气散射后传输到这一高度的贡献, 即其体发射率可表示为

$$\epsilon(z) = \epsilon_0(z) + n_o(z) \sigma \int_{z_{\min}}^{z_{\max}} \epsilon(z') H(|\tau(z) - \tau(z')|, |t(z) - t(z')|) dz', \quad (4)$$

式中的 σ 为散射截面(对于 135.6 nm 及 135.8 nm 分别为 $2.499 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$ 及 $1.242 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$ (Meier, 1991), 由于 150 km 高度以上大气中的中性成分几乎全部为氧原子组成, 因此 σ 为氧原子散射截面; τ 是垂直共振散射光学厚度, t 是垂直净吸收光学厚度, 而 H 为 Holstein 方程 (Strickland and Donahue, 1970), 且 τ 和 t 可分别表示为

$$\tau(z) = \sigma \int_z^{\infty} n_o(z') dz', \quad (5)$$

$$t(z) = \sigma_{\text{O}_2}^{\text{abs}} \int_z^{\infty} n_{\text{O}_2}(z') dz', \quad (6)$$

式中 $\sigma_{\text{O}_2}^{\text{abs}}$ 为氧分子的吸收截面, 对于 135.6 nm 及 135.8 nm 分别为 $7.6 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$ 、 $8.0 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$, H 可表示如下:

$$H(\tau, t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-2x^2} E_1(\tau e^{-x^2} + t) dx, \quad (7)$$

其中 x 为用多普勒单位表示的频率, e^{-x^2} 为多普勒谱线加宽的高斯形态表达式; E_1 是对数积分的第一形态, 表达式如下:

$$E_1(Z) = \int_1^{\infty} \frac{e^{-zy}}{y} dy = -E_i(-z), \quad (8)$$

其中 $Z = \tau e^{-x^2} + t > 0$, $E_i(Z) = \int_{-\infty}^Z \frac{e^{\mu}}{\mu} d\mu = \gamma + \ln(-Z) + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{Z^k}{k!k}$, 这里的 γ 为欧拉常数. 展开后的式(7)可写为

$$H(\tau, t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-2x^2} \left(-\gamma - \ln(\tau e^{-x^2} + t) - \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-Z)^k}{k!k} \right) dx, \quad (9)$$

将式(9)代入到方程(4)中, 对方程(4)采用迭代法求解: 首先假设 $\epsilon(z') = \epsilon_0(z')$ 作为初估值代入到式中, 可以求得体发射率的一次解, 再将该值代入方程, 得到新的体发射率值, 以此类推, 直到体发射率的变化小于 0.01%, 迭代结束。

仪器探测的气辉辐射强度为体发射率沿视场路径的积分, 考虑了多次散射及大气吸收的辐射传输过程, 天底方向探测的辐射强度可表示为

$$I_{135.6} = 10^{-6} \Sigma \int_0^{\infty} T(|\tau(z(s)) - \tau^s(z(s=0))|, |t(z(s)) - t^s(z(s=0))|) \epsilon(z(s)) ds, \quad (10)$$

式中 Σ 表示 135.6 nm 与 135.8 nm 两个发射线的和, s 指视线位置, T 表示某点的发射率到探测器处的传递函数, 可表示为

$$T(\tau, t) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-x^2} \exp(-\tau e^{-x^2} + t) dx, \quad (11)$$

模式中所用的中性大气成分的浓度剖面来自 MSIS-86 模式 (Hedin, 1987), 离子和电子的浓度剖面来自 IRI-2000 电离层模式 (Bilitza, 1990)。

3 模式计算结果分析及验证

图 1(a,b) 分别表示 2006 年 4 月 1 日、2002 年 4 月 1 日的体发射率随高度的分布。

由文中式(3)知, 初始体发射率随所在高度电子浓度的增大而增大, 约在 300 多公里处达到最大值. 若考虑多次散射, 各个高度的体发射率除了本高度贡献的初始体发射率, 还应包括其他高度上散射过来的辐射贡献, 由图可见, 考虑了多次散射后的体发射率约在 250 km 高度以上较初始体发射率变化不大, 但随着高度的降低, 散射辐射的贡献愈加显著, 直至约 120 km 高度处体发射率达到一个次峰值, 随后随高度的降低开始减小. 考虑多次散射的体发

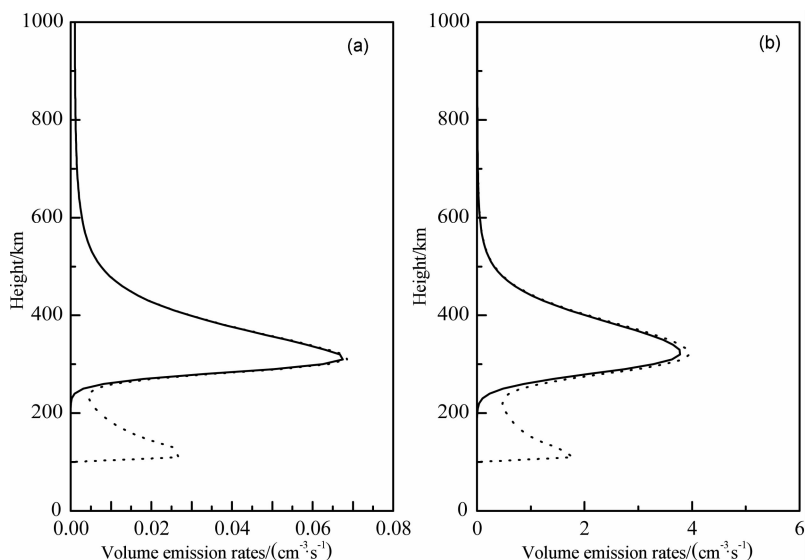


图1 体发射率随高度的分布. 地方时 23 点, 地理经度 180°, 地理纬度 25°, (a) 为 2006 年, (b) 为 2002 年, 实线为初始体发射率, 虚线为考虑了多次散射后的体发射率

Fig.1 The distribution of volumn emission rates with height. The results were calculated for local time 23 hour, geographical longitude 180°, geographical latitude 25°. (a) for 2006 and (b) for 2002. The real line for initial volume emission rates and the broken line for the volume emission rates including multiple scattering

射率随高度的分布特征主要与大气中的散射介质氧原子、吸收介质氧分子的空间分布有关, 由于氧原子主要分布在 200 km 以下的空间, 氧原子越多, 将上方的光辐射散射到下方的就越多, 因而随着高度的降低、体发射率会增大, 直至到达一定高度后, 随着氧气分子越来越多, 辐射被吸收衰减地越来越多, 因而体发射率随高度的降低开始减小. 由图可见, 两个不同年份的体发射率值具有量级的差别, 这主要与太阳活动因子相关, 相对太阳活动较低、电子浓度较小的 2006 年体发射率较小, 太阳活动较高、电子浓度较大的 2002 年的体发射率也较大.

DeMajistre 等(2004)提出夜间 135.6 nm 大气辉光正比于电离层电子浓度平方. 本文将不同时空条件及太阳活动时的中性大气, 离子及电子浓度剖面作为输入条件, 利用模式计算得到相应条件下 135.6 nm 夜间气辉辐射强度, 进而分析研究 135.6 nm 气辉辐射强度与 $N_m F_2$ 、TEC 在不同时空及太阳活动条件下的响应(注: 本文所指经纬度均指地理经纬度).

图 2—6 分别是 $N_m F_2$ 、TEC 及 135.6 nm 气辉辐射强度随地方时、纬度、经度、季节和年变化情况. 由图可见, 本模型计算的 135.6 nm 气辉辐射强度与相应条件下的 $N_m F_2$ 及 TEC 的时空分布有较好的一致性.

图 2 是 2002 年第 91 天计算的高、中、低纬度上 $N_m F_2$ 、TEC 与 135.6 nm 气辉辐射强度随当地时间

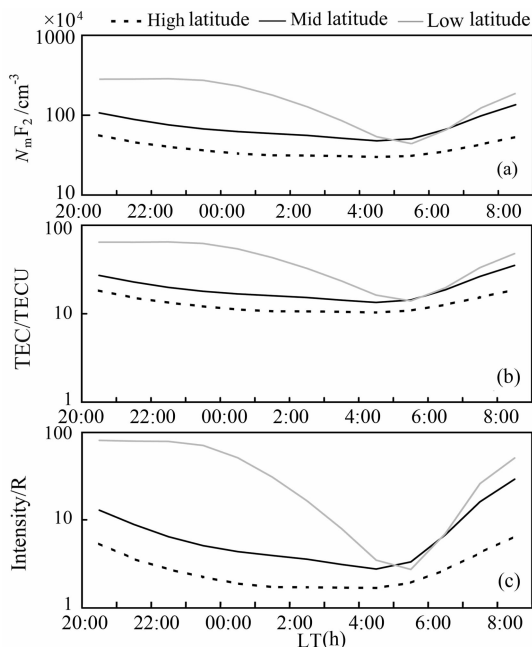


图 2 $N_m F_2$ (a)、TEC (b) 及 135.6 nm 气辉辐射强度 (c) 随地方时的分布. 2002 年 4 月 1 日计算经度 180°, 纬度分别为 20°、40°、60°

Fig.2 $N_m F_2$ (a), TEC (b) and 135.6 nm airglow intensity (c) distribution with local time. The results for geographical longitude 180° and geographical latitude 20°, 40°, 60° respectively on April 1st, 2002

的分布. 由图可见: 夜间 $N_m F_2$ 、TEC 有着较明显的纬度特征, 绝大多数时刻 $N_m F_2$ 、TEC 随着纬度的降

低而增加;各纬度上的 N_mF_2 、TEC 几乎都在凌晨 4、5 点的时候达到最小值;总体而言,计算的 135.6 nm 气辉辐射强度与 N_mF_2 、TEC 随时间的分布有较好的一致性。

图 3 是 2002 年 4 月 1 日计算的 N_mF_2 、TEC 与 135.6 nm 气辉辐射强度随纬度的分布,由图可见, N_mF_2 、TEC 在南北两侧的 15° 左右各有一个峰值区,相应地, 135.6 nm 辐射强度随纬度的分布与 N_mF_2 、TEC 基本一致,高纬度地区的辐射强度较低纬度峰值区的低了一个量级。

图 4 是 2002 年 4 月 1 日计算各纬度上 N_mF_2 、TEC 与 135.6 nm 气辉辐射强度随经度的分布。由图可见:在整个经度范围内,低纬度的 N_mF_2 与 TEC 明显高于中、高纬度的值;模式计算的辐射强度随经度的分布与 N_mF_2 、TEC 的基本一致。

图 5 为 2002 年 4 月 1 日计算的 N_mF_2 、TEC 与 135.6 nm 气辉辐射强度随季节的分布。由图可见,在全年时间内,低纬度的 N_mF_2 与 TEC 明显高于

中、高纬度;中、高纬度的 N_mF_2 与 TEC 在年初与年末较低,而在年中较大;在低纬度,上半年的 N_mF_2 、TEC 似乎大于下半年。各纬度上计算的 135.6 nm 气辉辐射强度随季节的分布与对应纬度 N_mF_2 、TEC 随季节的分布基本一致。

图 6 为 N_mF_2 、TEC 的年变化。由图可见, N_mF_2 与 TEC 有明显的年变化特征,各纬度的 N_mF_2 、TEC 随年份的变化特征一致,太阳活动越强的年, N_mF_2 、TEC 值越大。相应地,太阳活动越强的年, 135.6 nm 气辉辐射强度越大。

总之,自建模型计算的 135.6 nm 夜气辉辐射强度有着较明显的时空分布特征,与相应条件下的 N_mF_2 及 TEC 的时空分布有较好的一致性。

目前仅国外的 AURIC 模型 (Strickland, et al., 1999) 能提供夜气辉 135.6 nm 波段的辐射强度计算结果,但是由于其保密性目前仅公开其可执行程序,不能应用于研究及工程应用,再者,它仅能用于 1992—1999 年间的气辉强度计算。本文将 AURIC

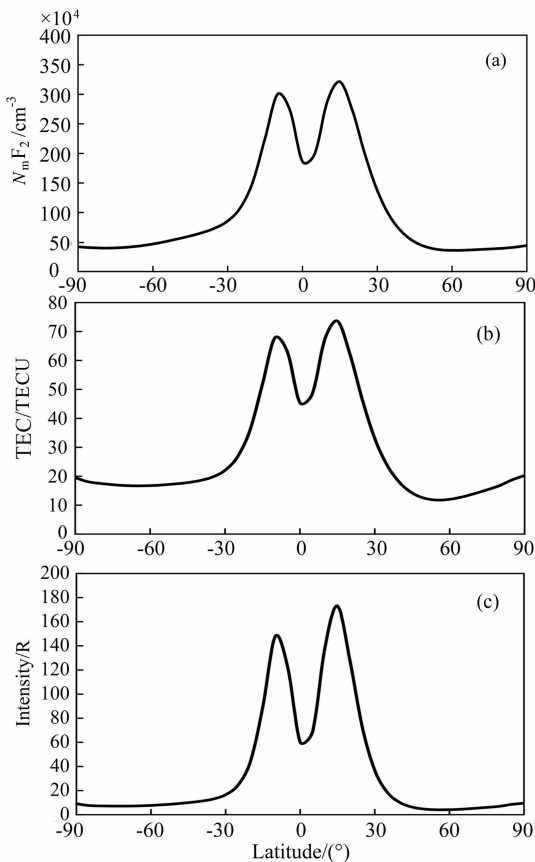


图 3 N_mF_2 、TEC 及 135.6 nm 气辉辐射强度随纬度的分布。2002 年 4 月 1 日、当地时间 23 点计算经度 180°
Fig. 3 N_mF_2 , TEC and 135.6 nm airglow intensity distribution with latitude. The results for geographical longitude 180° and local time 23 hour on April 1st, 2002

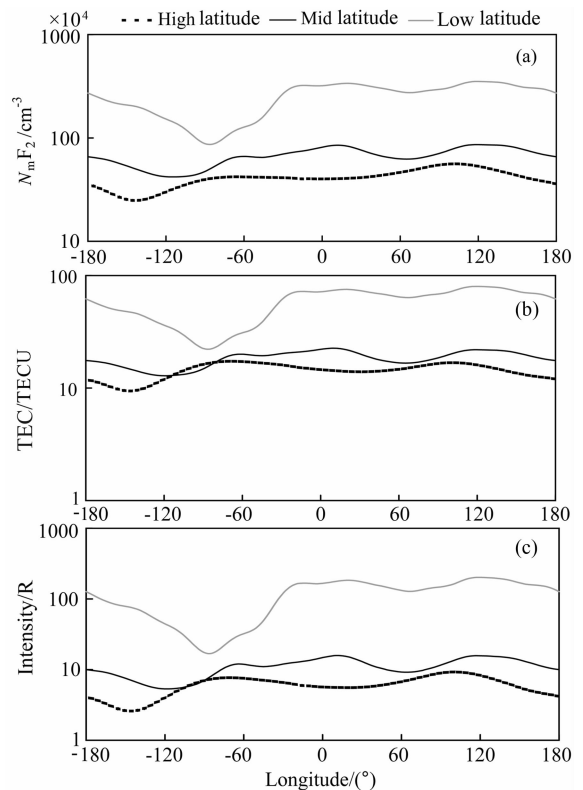


图 4 N_mF_2 (a)、TEC (b) 及 135.6 nm 气辉辐射强度 (c) 随经度的分布。2002 年 4 月 1 日、当地时间 23 点,计算纬度分别为 20° 、 40° 、 60° 时

Fig. 4 N_mF_2 (a), TEC (b) and 135.6 nm airglow intensity (c) distribution with longitude. The results for local time 23 hour and geographical latitude 20° , 40° , 60° respectively on April 1st, 2002

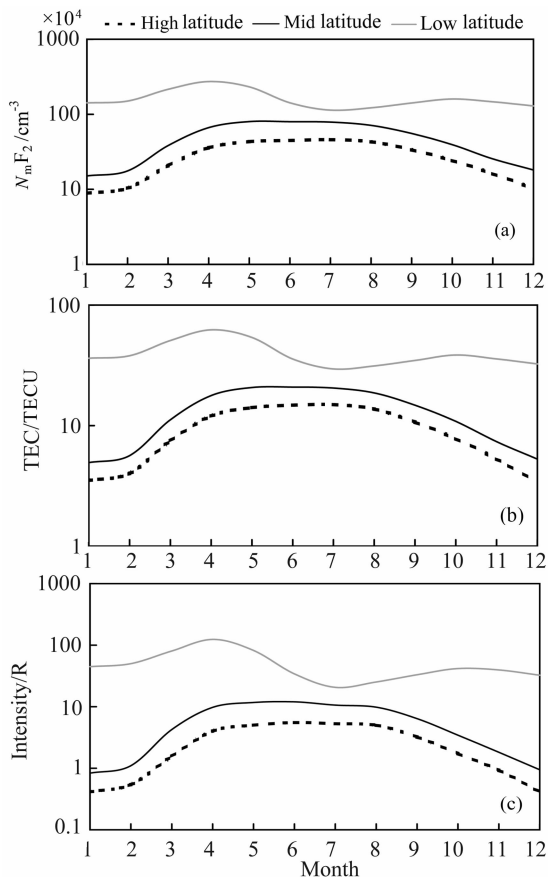


图 5 $N_m F_2$ (a)、TEC(b) 及 135.6 nm 气辉辐射强度 (c) 随季节的分布. 当地时间 23 点, 经度为 180° , 纬度分别为 20° 、 40° 、 60° , 计算 2002 年每月第一天的结果
Fig. 5 $N_m F_2$ (a), TEC (b) and 135.6 nm airglow intensity (c) distribution with season. The results for local time 23 hour, geographical longitude 180° and geographical latitude 20° , 40° , 60° respectively at the first day in every month in 2002

模型与自建模型于 1992—1999 年间不同纬度、地方时及太阳活动指数时的 135.6 nm 夜间气辉的辐射强度计算结果进行对比, 平均偏差约在 3%, 这主要是由于两个模型中的反应系数及数值积分路径的偏差引起. 图 7 为两个模式计算结果的比较, 由图可见, 各季节上两个模式计算的 135.6 nm 气辉辐射强度随纬度的分布都有较好的一致性.

4 反演算法

利用夜间 135.6 nm 辐射强度来反演 $N_m F_2$ 及 TEC 的详细算法将在另外的文章进行介绍, 本文仅简单介绍反演的基本方法.

由于 135.6 nm 气辉主要贡献来自于辐射再结合反应, 而中和反应贡献较少, 若不考虑中和辐射的

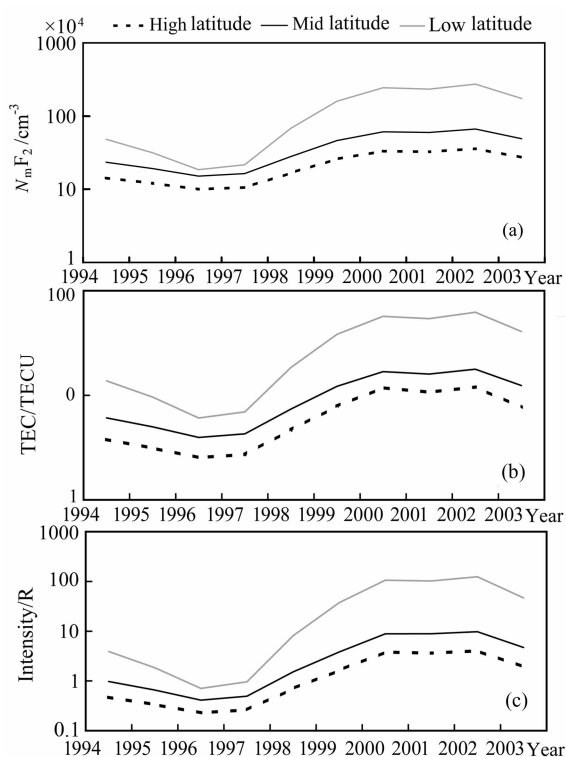


图 6 $N_m F_2$ (a)、TEC(b) 及 135.6 nm 辐射强度 (c) 随年份 (太阳活动) 的分布. 当地时间 23 点, 经度为 180° , 纬度分别为 20° 、 40° 、 60° , 计算 1994—2003 年第 91 天的结果
Fig. 6 $N_m F_2$ (a), TEC (b) and 135.6 nm airglow intensity (c) distribution with year. The results for local time 23 hour, geographical longitude 180° and geographical latitude 20° , 40° , 60° respectively at the 91st day between 1994—2003

贡献, 文中的 (3) 式可简化为

$$\epsilon_0(z) = \gamma \alpha n_e(z) n_{o^+}(z), \quad (12)$$

假设电离层 F 层呈电中性, 即 $n_e(z) \approx n_{o^+}(z)$, 故式 (12) 可写成

$$\epsilon_0(z) \approx \gamma \alpha n_e(z)^2. \quad (13)$$

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, 为此需要对垂直路径进行积分, 即测量的夜气辉 135.6 nm 的辐射强度为

$$4\pi I \approx 10^{-6} \int_0^{z_{\text{sat}}} \gamma \alpha_{135.6} n_e(z) n_e(z) dz, \quad (14)$$

式中 z_{sat} 为卫星高度, 若式 (14) 中电子浓度随高度的分布用 Chapman 函数 (Chamberlain and Hunten, 1987) 来表示, 则上式可简化为

$$4\pi I = K_1 (N_m F_2)^2 H_{\text{km}}, \quad (15)$$

H_{km} 为电离层等离子体标高 (单位 km), K_1 为和光化反应速率系数有关的常数 (Budzien et al., 2010).

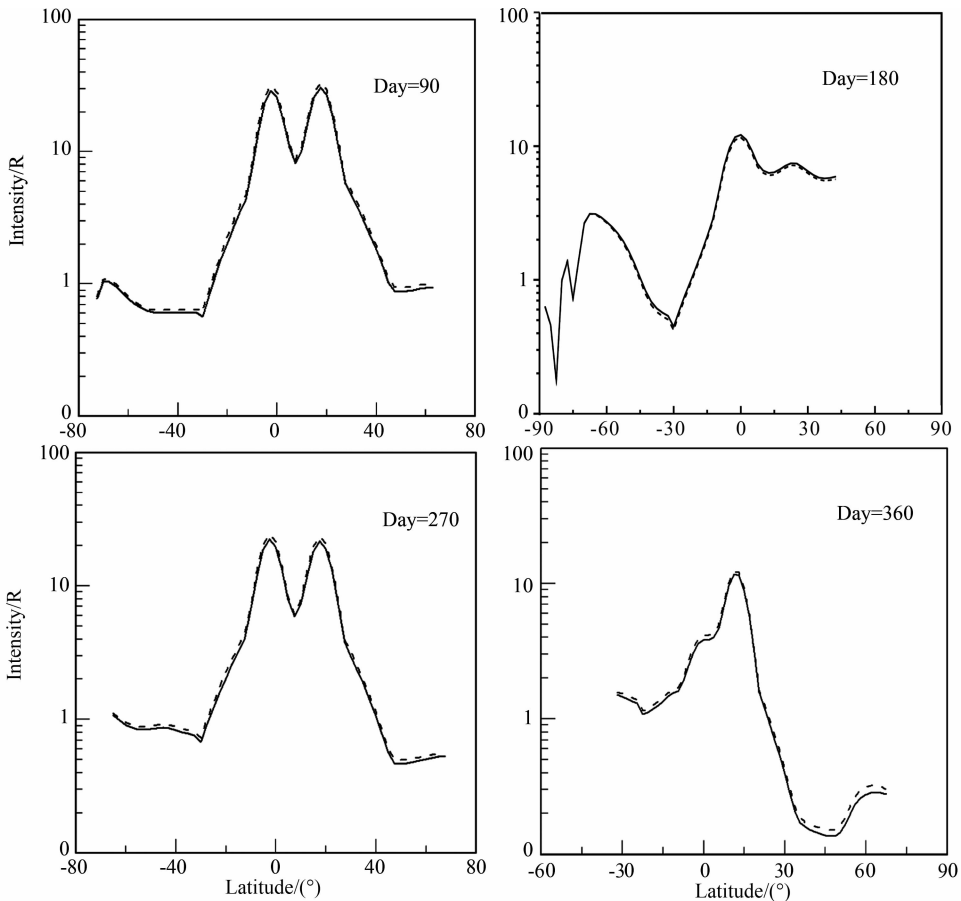


图7 自建模型与 AURIC 模式计算的 135.6 nm 夜气辉随纬度的分布. $F_{10.7}$ 为 100, 地方时为 3.5 h, 经度 180° , 分别计算 1992 年第 90、180、270 及 360 天, 135.6 nm 夜气辉辐射强度随纬度的分布, 图中实线表示自建模型结果, 虚线表示 AURIC 计算结果

Fig. 7 135.6 nm airglow intensity distribution with latitude from AURIC and the developed model. The results for the 90th, 180th, 270th, 360th day at $F_{10.7}=100$, local time=3.5 hour and longitude= 180° , the real line for the developed model and the broken line for AURIC

电子总含量 TEC 可表达为

$$TEC = \int_0^z n_e(z) dz, \quad (16)$$

同样将式(16)中的电子浓度随高度的分布用 Chapman 函数来表示, 可得

$$TEC = K_2 (N_m F_2) H_{km}, \quad (17)$$

K_2 为光化反应速率系数有关的常数.

由式(15)、(17)知, 135.6 nm 的夜气辉辐射强度分别与 $N_m F_2$ 平方、TEC 平方成正比, 若测得 135.6 nm 的夜气辉辐射强度, 即可反演 $N_m F_2$ 及 TEC.

把全球经纬度分为经度 5° 和纬度 2.5° 的网格, 模拟每格点的 135.6 nm 气辉的辐射强度, 将每个格点的 135.6 nm 气辉辐射强度分别与 $N_m F_2$ 平方、TEC 平方拟合, 如图 8 所示, 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 $N_m F_2$ 、TEC 的转换因子, 然后将各格点的

135.6 nm 辐射强度利用 $N_m F_2$ 、TEC 的转换因子, 可以得到 $N_m F_2$ 、TEC 反演值随经纬度的分布, 如图 9 所示.

根据上述计算转换因子的方法, 可获得适用不同地方时、季节和太阳活动周期的转换因子, 组成查算表, 在对实际探测资料处理时, 寻找与观测资料相对应的、季节和太阳活动周期时的转换因子, 即可反演得到相应的 $N_m F_2$ 及 TEC 值.

5 结论

利用夜气辉 135.6 nm 波段探测夜间电子总含量及峰值高度电子密度是目前电离层监测较为常用的手段之一, 我国即将在风云三号卫星上搭载相关仪器, 这是我国首次开展通过远紫外波段光学遥感探测电离层, 同时也是我国首次开展远紫外波段遥

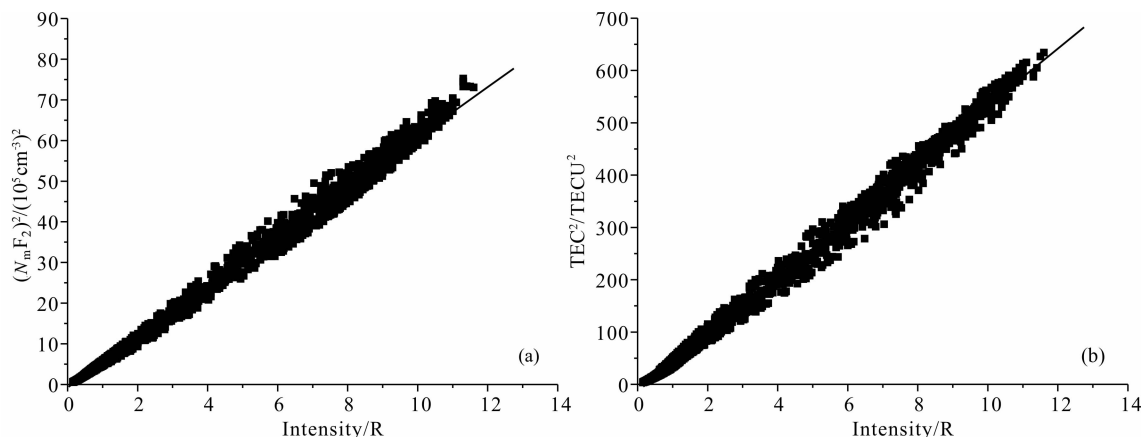


图 8 135.6 nm 辐射强度分别与 $N_m F_2$ 平方、TEC 平方的拟合 (2006 年 4 月 1 日、当地时间 23 点)
 Fig. 8 The linear relationship between the square of $N_m F_2$ and TEC with the OI 135.6 nm intensity
 (the results for local time 23 hour on April 1st, 2006)

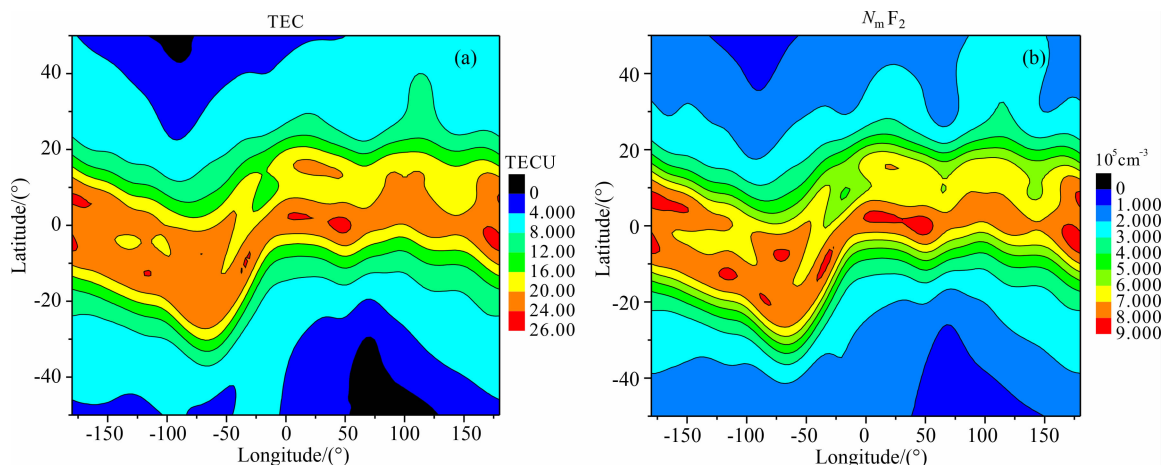


图 9 $N_m F_2$ 及 TEC 的反演值随经纬度的分布 (2006 年 4 月 1 日、当地时间 23 点)
 Fig. 9 The retrieval values of $N_m F_2$ and TEC with longitude and latitude
 (the results for local time 23 hour on April 1st, 2006)

感大气及电离层的理论研究. 为了将探测仪测量的辐射强度反演得到电子总含量及峰值高度电子密度等产品信息, 前提工作是需要建立能定量描述由各种激发机制产生的气辉辐射经大气传输后到达星上仪器的物理学模型. 目前国内这方面的工作基本未见报到. 为开展日后星上数据处理需要, 本文建立了夜间 135.6 nm 气辉的激发及辐射传输模型, 以循环迭代法求解辐射传输方程进而得到体发射率及辐射强度. 为了验证结果的正确性, 对夜气辉 135.6 nm 的辐射强度在不同时空及太阳活动时的分布特征分别与 $N_m F_2$ 、TEC 平方的分布进行了比较, 结果证实三者在不同条件下的分布特征基本一致. 将本模型的计算结果与国外 AURIC 模型的结果进行了比较, 两个模型的夜气辉 135.6 nm 的辐射强度有很好的 consistency, 平均偏差在 3% 左右, 这更进一步证明了自建模型的正确性. 最后, 文章介绍了利用夜间

135.6 nm 气辉辐射强度反演 $N_m F_2$ 与 TEC 的算法.

References

- Budzien S, Chua D, Coker C, et al. 2010. Evolved Tiny Ionospheric Photometer (ETIP): A sensor for ionospheric specification // 2010 Decadal Strategy for Solar and Space Physics. Washington, DC: National Academies Press.
- Bilitza D. 1990. International reference ionosphere. 1990 NSSDC/WDC-A-RAS, 90-20, National Space, Science Data Center, Greenbelt, MD.
- Chamberlain J W, Hunten D M. 1987. Theory of planetary atmospheres: An introduction to their physics and chemistry. // International Geophysics Series, 36. Florida: Academic Press Inc.
- Chandra S, Reed E I, Meier R R, et al. 1975. Remote sensing of the ionospheric F layer by use of O I 6300-A and O I 1356-A observations. *Journal Geophysical Research*, 80 (16): 2327-

- 2332.
- DeMajistre R, Paxton L J, Morrison D, et al. 2004. Retrievals of nighttime electron density from Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics (TIMED) mission Global Ultraviolet Imager (GUVI) measurements. *J. Geophys. Res.*, 109(A5): A05305, doi:10.1029/2003JA010296.
- Dymond K F, Budzien S A, Chua D H, et al. 2009. Tomographic reconstruction of the low-latitude nighttime electron density using formosat-3/cosmic radio occultation and UV photometer data. *Terr., Atmos. Ocean. Sci.*, 20(1): 215-226.
- Dymond K F, Thonnard S E, McCoy R P, et al. 1996. A technique for determining F region electron densities using optical measurements of recombination radiation. // Proceedings of the 1996 Ionospheric Effects Symposium. Alexandria, VA, 346-353.
- Dymond K F, Thonnard S E, McCoy R P, et al. 1997. An optical remote sensing technique for determining nighttime F region. *Radio Science*, 32(5):1985-1996.
- Dymond K F, Thomas R J. 2001. A technique for using measured ionospheric density gradients and GPS occultations for inferring the nighttime ionospheric electron density. *Radio Science*, 36(5): 1141-1148.
- Feldman P D, Davidsen A F, Blair W P, et al. 1992. The spectrum of the tropical oxygen nightglow observed at 3 a resolution with the Hopkins ultraviolet telescope. *Geophysical Research Letters*, 19(5): 453-456.
- Hedin A E. 1987. MSIS-86 thermospheric model. *Journal of Geophysical Research*, 92(A5):4649-4662.
- Hsu M L, Rajesh P K, Liu J Y, et al. 2009. Ionospheric electron density concurrently derived by tip and GOX of FORMOSAT-3/COSMIC. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 20(1): 207-214.
- Liu L B, Wan W X, Ning B Q, et al. 2009. Climatology of the mean total electron content derived from GPS global ionospheric maps. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 114(A6):A06308, doi:10.1029/2009JA014244.
- Meier R R. 1991. Ultraviolet spectroscopy and remote sensing of the upper atmosphere. *Space Science Reviews*, 58(1): 1-185.
- Strickland D J, Anderson D E. 1983. Radiation transport effects on the OI 1356-A limb intensity profile in the dayglow. *Journal of Geophysical Research*, 88(A11): 9260-9264.
- Strickland D J, Donahue T M. 1970. Excitation and radiative transport of OI 1304 A resonance radiation-I: The dayglow. *Planetary and Space Science*, 18(5):661-689.
- Strickland D J, Bishop J, Evans J S, et al. 1999. Atmospheric Ultraviolet Radiance Integrated Code (AURIC): Theory, software architecture, inputs, and selected results. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 62(6): 689-742.
- Tinsley B A, Bittencourt J A. 1991. Determination of F region height and peak electron density at night using airglow emissions from atomic oxygen. *J. Geophys. Res.*, 80(16): 2333-2337.
- Yu T, Wan W X, Liu L B, et al. 2004. Global scale annual and semi-annual variations of daytime $N_m F_2$ in the high solar activity years. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 66(18): 1691-1701.
- Yu T, Mao T, Wang Y G, et al. 2009. Study of the ionospheric anomaly before the Wenchuan earthquake. *Chinese Science Bulletin*, 54(6): 1080-1086.

(本文编辑 胡素芳)