

谭 辉, 万卫星, 雷久候等. 一个中纬电离层 E 层理论模式. 地球物理学报, 2005, 48(2): 243 ~ 251

Tan H, Wan W X, Lei J H, et al. A theoretical model for the mid-latitude ionospheric E layer. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, 48(2): 243 ~ 251

一个中纬电离层 E 层理论模式

谭 辉^{1,2,3}, 万卫星², 雷久候^{2,3}, 刘立波², 宁百齐²

1 电磁兼容性国防科技重点实验室, 武汉 430064

2 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

3 中国科学院武汉物理与数学研究所, 武汉 430071

摘 要 本文建立了一个中纬电离层 E 层理论模式. 该模式从 NO^+ , O_2^+ , O^+ 和 N_2^+ 这四种主要离子的连续性方程出发, 通过数值模拟得到中纬电离层 E 层电子和各种离子密度随时间和高度的变化情况. 计算结果能较好地反映出 E 层电子密度峰值 ($N_m E$) 或 E 层临界频率 ($f_o E$) 的日变化、季节变化以及随太阳活动的变化趋势. 将模式的计算结果与武汉地区测高仪的观测数据进行比较, 结果证明模式能够较为客观地反映中纬电离层 E 层的实际形态. 针对以往电离层 E 层理论模式存在的主要问题, 本文还进一步讨论了几种重要因素, 包括二次电离源, $< 150 \text{ \AA}$ 谱段的辐射通量, 吸收截面以及 NO 分布对于模式计算结果的影响.

关键词 电离层理论模式, 电离层 E 层

文章编号 0001 - 5733(2005)02 - 0243 - 09 **中图分类号** P352 **收稿日期** 2004 - 03 - 15, 2004 - 09 - 30 收修定稿

A theoretical model for the mid-latitude ionospheric E layer

TAN Hui^{1,2,3}, WAN Wei-Xing², LEI Jiu-Hou^{2,3}, LIU Li-Bo², NING Bai-Qi²

1 Key Laboratory of EMC National Defence Science and Technology, Wuhan 430064, China

2 Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

3 Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China

Abstract A theoretical model for the mid-latitude ionospheric E layer is established in this paper. Through numerical simulation, the temporal and altitudinal variation tendencies of electron and ion densities in mid-latitude region can be obtained from the continuity equations of the four main component ions i. e. NO^+ , O_2^+ , O^+ and N_2^+ . The diurnal, seasonal and solar variation tendencies of electron peak density ($N_m E$) or critical frequency ($f_o E$) in E layer are revealed preferably in the computing results. Comparing the results with the observed value of ionosonde measured in Wuhan, we find that this model can objectively describe the actual situation in the mid-latitude ionospheric E layer. Considering the disadvantages of previous models, we further discuss the influence of some important factors, such as secondary ionization, fluxes at wavelengths $< 150 \text{ \AA}$, photoabsorption cross section and distribution of NO upon the model's results.

Key words Theoretical model of the ionosphere, Ionospheric E layer

基金项目 国家自然科学基金重点项目(40134020)和国家重点基础研究规划项目(G2000078407)共同资助.

作者简介 谭 辉, 男, 1976 年生, 2004 年于中国科学院武汉物理与数学研究所获空间物理专业博士学位, 主要的研究方向为中纬电离层 Es 层数据分析和数值模拟, 现从事电磁兼容性方面的研究工作. E-mail: tanhuilucky@126.com

1 引言

电离层的常规 E 层分布在地球上空约 90 ~ 140km 的高度范围内,主要由太阳辐射离解形成,其电子和离子密度随太阳天顶角和太阳活动有规律地变化. E 层主要离子成分是 NO^+ 和 O_2^+ 等分子离子,其密度为 $10^3 \sim 10^5 \text{ cm}^{-3}$. 影响 E 层形态结构的主要因素是光化学过程,由于光化学过程的时间常数很小(通常只有数十秒钟),动力学效应(例如中性风场,重力波,潮汐,扩散和电场等因素)对于常规 E 层电子和离子密度的影响处于次要地位,因而此区域常处于光化学平衡状态.

20 世纪 90 年代初,很多学者开展了电离层 E 层理论模式的研究,但精度较差,例如关于 $N_m E$ 的计算结果比观测数据要低 30% 左右^[1-4]. 造成这一差异的主要原因有:(1)理论模式的物理框架并不完善,例如没有充分考虑二次离化源.(2)卫星探测数据无法给出作为 E 层离化源——太阳的各个谱段的辐射通量,辐射通量的取得只能通过经验模式进行估算.(3)各种大气成分的吸收截面和主要离子的化学反应系数大多来自于实验室测量或理论推导,而电离层的实际空间环境可能与实验室的模拟环境有较大的不同,因此吸收截面和反应系数可能与真实值存在着较大的出入.(4)尽管 NO 是微量成分,但对 E 层化学过程有非常重要的作用,由于 NO 随时间、空间及地球物理环境的可变性很大,理论与观测研究还没有给出较为理想的全球分布模式,许多理论模式并没有细致地考虑 NO 随时间和空间的分布情况.

最近的理论模式在以往工作的基础上做了一些改进,将模式计算结果与观测数据之间的偏差值降低到了 10% 左右^[5-7]. 这些模式有的重新考虑了二次离化源的影响,进一步完善了理论模式的物理框架;有的对太阳辐射通量模式中个别谱段进行了特殊的处理;有的则采用了全新的卫星数据资料建立了更为优化的 NO 分布模式^[8].

本文综合考虑了这些新的改进,并结合以往模式的不足以及与观测数据的对比进行合理地选择,努力使模式的计算结果进一步趋近于实际情况. 针对这些新的改进,本文讨论了它们之中的一些重要因素,例如二次离化源, $< 150 \text{ \AA}$ 谱段的辐射通量,吸收截面以及 NO 分布在模式中所起的作用. 同时展示了模式计算结果对于 E 层形态结构主要是其

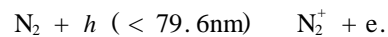
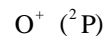
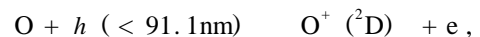
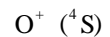
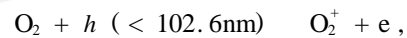
日变化,季节变化以及随太阳活动变化趋势的描述情况. 最后将计算所得每小时的 $f_o E$ 值与测高仪观测数据进行比较,并分析了误差.

2 光电离源

电离层 E 层离子主要通过光电离与化学反应产生. 以下是模式的光化学框架,将给出光电离产生率和相关离子的化学反应.

2.1 白天的光电离产生率

白天太阳极紫外辐射 (EUV) 引起 E 层中性大气的电离. 本文主要考虑以下三种形式的光电离过程:



光电离导致的离子产生率定义为

$$Q_n(\theta, z) = N_n(z) \int_0^\infty I(\theta, z) \exp[-(\theta, z)] \sigma_n^{(i)} d\lambda, \quad (1)$$

式中下标 n 代表中性成分 O, N_2 和 O_2 , λ 代表太阳辐射的不同谱段, z 为高度, θ 为太阳天顶角, I 为在无穷远处(没有受到任何衰减)的辐射通量, $\sigma_n^{(i)}$ 为离化截面, $N_n(z)$ 为中性成分的密度. (θ, z) 为光学深度(optical depth),描述太阳辐射被吸收的程度,可用如下的式子来表达:

$$(\theta, z) = \int_z^\infty \sum_m \sigma_m^{(a)} N_m(z) \sec \theta dz, \quad (2)$$

式中 $\sigma_m^{(a)}$ 为吸收截面.

2.2 夜间的电离源

E 层白天的主要离化源是太阳极紫外辐射,日落后由于电子和离子的自然复合, E 层的电子密度将会很快地下降. 然而星光和地冕谐振散射的 H 和 He 谱线在日落以后和日出之前的几个小时内将成为 E 层大气的主要电离源,特别是在太阳活动高年的北半球,其作用尤其显著,可以使夜间 E 层电子密度稳定地维持在 10^3 cm^{-3} 的数量级水平上. 本文主要考虑了 Lyman (1216 Å), Lyman (1026 Å), HeI (584 Å) 和 HeII (304 Å) 四条谱线以及 900 ~ 950 Å, 950 ~ 1000 Å 和 1000 ~ 1050 Å 三个谱段对于夜间 E 层大气成分 NO, O_2 , O 和 N_2 的电离作用.

2.3 二次电离源

太阳辐射中波长较短的谱段具有较高的能量,被它直接电离出的中性大气分子的电子仍然有很大的动能,能够进一步电离周围的中性大气分子,从而产生附加的电离效果,这就是所谓的二次电离源。据分析二次电离源可使 F2 层的光电离率增加 30% 左右,它对于 E 层的影响则更为显著,能使 E 层的光电离率增加到 100%^[5],因此能否处理好二次电离源直接关系到 E 层理论模式的优劣。但是,要完全计算出二次电离产生率却是十分困难的,这需要知道光电子流能量随高度变化的函数,而这是很难办到的。求二次电离产生率的通常办法是估算它与基本电离产生率的比值,从而得到一个对基本电离产生率的修正因子,通过此修正因子加入二次电离的等效效应。早期的模式对于太阳辐射中所有波段都采用一个相同的修正因子,这显然是不合适的,因为不同波段的二次电离率相差较大,修正因子自然

也有很大的差异。本文采用的是 Titheridge (1996)^[5] 的处理方法,分别估算 EUVAC 辐射通量模式中的前 12 条可能产生二次电离的谱段各自的修正因子。

3 离子化学

电离层 E 层的主要离子成分有四种,即 NO^+ , O_2^+ , O^+ 和 N_2^+ , 其中 NO^+ 和 O_2^+ 所占比例较大。影响其产生和消失的化学反应主要有 10 个(见表 1), 这些稳态离子反应构成了 E 层化学反应过程的基本框架。亚稳态的氧原子离子 $\text{O}^+(^2\text{D})$ 和 $\text{O}^+(^2\text{P})$ 在 E 层背景下的寿命为几秒的量级,它们参与电离层化学过程主要是作为稳态离子的源。本文在表 2 中也列出了与其相关的 12 个化学反应。如无特别说明,本文所提及的 O^+ 都指的是稳态氧原子离子 $\text{O}^+(^4\text{S})$ 。

表 1 稳态离子反应与反应率

Table 1 Stable ion reactions and the corresponding rates

序号	反应	反应系数 ($\text{cm}^3 \text{s}^{-1}$)	引自文献
1	$\text{O}^+ + \text{N}_2 \rightarrow \text{NO}^+ + \text{N}$	$A_1 = 1.533 \times 10^{-12} - 5.92 \times 10^{-13} (\text{Tn}/300) + 8.6 \times 10^{-14} (\text{Tn}/300)^2$	[9]
2	$\text{O}^+ + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2^+ + \text{O}$	$A_2 = 3.1 \times 10^{-11} - 1.11 \times 10^{-11} (\text{Tn}/300) + 1.125 \times 10^{-12} (\text{Tn}/300)^2$	[10]
3	$\text{N}_2^+ + \text{O} \rightarrow \text{O}^+ + \text{N}_2$	$A_3 = 9.8 \times 10^{-12} (300/\text{Tn})^{0.23}$	[11]
4	$\text{N}_2^+ + \text{O} \rightarrow \text{NO}^+ + \text{N}$	$A_4 = 1.4 \times 10^{-10} (300/\text{Tn})^{0.44} - A_3$	[11]
5	$\text{N}_2^+ + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2^+ + \text{N}_2$	$A_5 = 5.0 \times 10^{-11} (300/\text{Tn})$	[12]
6	$\text{N}_2^+ + e \rightarrow \text{N} + \text{N}$	$A_6 = 2.7 \times 10^{-7}$	[13]
7	$\text{O}_2^+ + \text{NO} \rightarrow \text{NO}^+ + \text{O}_2$	$A_7 = 4.5 \times 10^{-10}$	[12]
8	$\text{O}_2^+ + \text{N} \rightarrow \text{NO}^+ + \text{O}$	$A_8 = 1.2 \times 10^{-10}$	[14]
9	$\text{O}_2^+ + e \rightarrow \text{O} + \text{O}$	$A_9 = 2.0 \times 10^{-7} (300/\text{Tn})^{0.7}$	[15]
10	$\text{NO}^+ + e \rightarrow \text{N} + \text{O}$	$A_{10} = 4.3 \times 10^{-7} (300/\text{Tn})$	[16]

表 2 亚稳态离子反应与反应率

Table 2 Metastable ion reactions and the corresponding rates

序号	反应	反应系数 ($\text{cm}^3 \text{s}^{-1}$)	引自文献
1	$\text{O}^+(^2\text{D}) + \text{N}_2 \rightarrow \text{N}_2^+ + \text{O}$	$B_1 = 8.0 \times 10^{-10}$	[17]
2	$\text{O}^+(^2\text{D}) + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2^+ + \text{O}$	$B_2 = 7.0 \times 10^{-10}$	[17]
3	$\text{O}^+(^2\text{D}) + \text{O} \rightarrow \text{O}^+(^4\text{S}) + \text{O}$	$B_3 = 5.0 \times 10^{-12}$	[13]
4	$\text{O}^+(^2\text{D}) + e \rightarrow \text{O}^+(^4\text{S}) + e$	$B_4 = 6.6 \times 10^{-8} (300/\text{Tn})^{0.5}$	[18]
5	$\text{O}^+(^2\text{D}) + h \rightarrow \text{O}^+(^4\text{S}) + h$	$B_5 = 7.7 \times 10^{-5} *$	[18]
6	$\text{O}^+(^2\text{P}) + \text{O} \rightarrow \text{O}^+(^4\text{S}) + \text{O}$	$B_6 = 4.0 \times 10^{-10}$	[19]
7	$\text{O}^+(^2\text{P}) + \text{N}_2 \rightarrow \text{N}_2^+ + \text{O}$	$B_7 = 3.4 \times 10^{-10}$	[19]
8	$\text{O}^+(^2\text{P}) + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2^+ + \text{O}$	$B_8 = 4.8 \times 10^{-10}$	[20]
9	$\text{O}^+(^2\text{P}) + e \rightarrow \text{O}^+(^2\text{D}) + e$	$B_9 = 1.5 \times 10^{-7} (300/\text{Tn})^{0.5}$	[18]
10	$\text{O}^+(^2\text{P}) + e \rightarrow \text{O}^+(^4\text{S}) + e$	$B_{10} = 4.0 \times 10^{-8} (300/\text{Tn})^{0.5}$	[18]
11	$\text{O}^+(^2\text{P}) + h \rightarrow \text{O}^+(^2\text{D}) + h$	$B_{11} = 0.172 *$	[21]
12	$\text{O}^+(^2\text{P}) + h \rightarrow \text{O}^+(^4\text{S}) + h$	$B_{12} = 0.047 *$	[21]

注:带 * 号项反应系数的单位为 s^{-1} 。

4 模式计算的出发方程

模式的出发方程是四种主要离子 NO^+ , O_2^+ , O^+ 和 N_2^+ 的连续性方程,电子密度则为四种离子密度之和。假定电离层 E 层处于水平分层,这样可忽略任何水平方向上的变化。此假设对于本文所研究的中纬地区是比较合理的。简化的出发方程可写成

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} = q_i - \sum_i n_i - \frac{\partial}{\partial z} (n_i V_i), \quad (3)$$

式中下标 i 指代四种离子, q_i 为离子的产生率,是光电离产生率 Q_i 和化学产生率之和, \sum_i 为离子的复合率。根据以上对光电离和离子化学过程的讨论,可以得出四种离子产生率和复合率的表达式:

$$q_{NO^+} = Q_{NO^+} + A_1 [O^+][N_2] + A_4 [N_2^+][O] + A_7 [O_2^+][NO] + A_8 [O^+][N] \quad (4a)$$

$$q_{O_2^+} = Q_{O_2^+} + A_2 [O^+][O_2] + A_5 [N_2^+][O_2] + (Q_{O^+}({}^2D) + Q_{O^+}({}^2P)_{2P\ 2D})_{2D\ D_2^+} + Q_{O^+}({}^2P)_{2P\ O_2^+} \quad (4b)$$

$$q_{O^+} = Q_{O^+} + A_3 [N_2^+][O] + (Q_{O^+}({}^2D) + Q_{O^+}({}^2P)_{2P\ 2D})_{2D\ O^+} + Q_{O^+}({}^2P)_{2P\ O^+} \quad (4c)$$

$$q_{N_2^+} = Q_{N_2^+} + (Q_{O^+}({}^2D) + Q_{O^+}({}^2P)_{2P\ 2D})_{2D\ N_2^+} + Q_{O^+}({}^2P)_{2P\ N_2^+} \quad (4d)$$

$$NO^+ = A_{10} [e] \quad (4e)$$

$$O_2^+ = A_7 [NO] + A_8 [N] + A_9 [e] \quad (4f)$$

$$O^+ = A_1 [N_2] + A_2 [O_2] \quad (4g)$$

$$N_2^+ = A_3 [O] + A_4 [O] + A_5 [O_2] + A_6 [e] \quad (4h)$$

其中 ${}_{2D}\ O_2^+$, ${}_{2D}\ O^+$, ${}_{2D}\ N_2^+$, ${}_{2P}\ O_2^+$, ${}_{2P}\ O^+$, ${}_{2P}\ N_2^+$ 和 ${}_{2P\ 2D}$ 为亚稳态离子的转化系数, 分别为

$${}_{2D}\ O_2^+ = \frac{B_2 [O_2]}{B_1 [N_2] + B_2 [O_2] + B_3 [O] + B_4 [e] + B_5} \quad (5a)$$

$${}_{2D}\ O^+ = \frac{B_3 [O] + B_4 [e] + B_5}{B_1 [N_2] + B_2 [O_2] + B_3 [O] + B_4 [e] + B_5} \quad (5b)$$

$${}_{2D}\ N_2^+ = \frac{B_1 [N_2]}{B_1 [N_2] + B_2 [O_2] + B_3 [O] + B_4 [e] + B_5} \quad (5c)$$

$${}_{2P}\ O_2^+ = \frac{B_8 [O_2]}{B_6 [O] + B_7 [N_2] + B_8 [O_2] + B_9 [e] + B_{10} [e] + B_{11} + B_{12}} \quad (5d)$$

$${}_{2P}\ O^+ = \frac{B_6 [O_2] + B_{10} [e] + B_{12}}{B_6 [O] + B_7 [N_2] + B_8 [O_2] + B_9 [e] + B_{10} [e] + B_{11} + B_{12}} \quad (5e)$$

$${}_{2P}\ N_2^+ = \frac{B_7 [N_2]}{B_6 [O] + B_7 [N_2] + B_8 [O_2] + B_9 [e] + B_{10} [e] + B_{11} + B_{12}} \quad (5f)$$

$${}_{2P\ 2D} = \frac{B_9 [e] + B_{11}}{B_6 [O] + B_7 [N_2] + B_8 [O_2] + B_9 [e] + B_{10} [e] + B_{11} + B_{12}} \quad (5g)$$

V_i 为离子的垂直漂移速度, 可写成

$$V_i = \frac{i \cos I}{1 + \frac{1}{2} w_E} - \frac{\cos I \sin I}{1 + \frac{1}{2} w_N} \quad (6)$$

其中 I 为磁倾角, i 为离子与中性大气碰撞频率和其磁旋频率之比, w_E 和 w_N 分别为东向风和北向风速度.

获得产生率和复合率的表达式后, 就可以将方程 (3) 写成差分方程, 为了保证模拟计算的稳定性, 本文采用隐格式差分, 考虑到 E 层的特殊情况取光化学平衡的边界条件, 利用追赶法求解差分方程, 可以求出四种离子密度随时间和高度的变化趋势, 而电子密度则是四种离子密度之和.

5 主要输入参数

模式中需要预先指定的参数包括太阳极紫外 (EUV) 辐射通量, 吸收截面, 中性大气各成分的密度, 中性大气温度, 中性大气运动速度等等. 这些参

数大致分成两类, 以下将分别讨论.

5.1 中性大气背景参数

基本的大气背景参数包括 NO , O_2 , O , N_2 和 N 的密度以及中性大气温度和中性大气运动速度. 质谱仪与非相干散射雷达模式 MSIS2000^[22] 是根据卫星与地面观测数据的全球中性大气经验模式. 模式给出了 O_2 , O , N_2 和 N 的密度和中性大气温度, 以及它们随地理经纬度、时间、高度、太阳活动性 (用 $F_{10.7}$ 表示) 和地磁活动性 (用 A_p 指数表示) 的变化情况, 是目前使用最为广泛的大气模式. 不足的是 MSIS2000 没有提供 NO 的分布情况. NO 是高层大气中的微量成分, 随时间、空间和具体地理环境而有很大变化, 本文采用较新的 Titheridge1997 NO 模式. Titheridge1997 是一经验模式, 综合了不同年份不同地区的大量数据, 能够比较合理地反映出 NO 密度随地方时、季节、经纬度和太阳活动周期的变化趋势. 中性大气运动速度取自于 HWM93^[23] 模式, 这也是一个全球模式, 可以根据输入的地理经纬度和时

间得出所对应的水平风速.

5.2 与光电离有关的参数

与光电离相关的太阳辐射通量由 EUVAC^[24] 模式给定,该模式主要是基于在第 21 太阳活动周的 1977 年 7 月至 1980 年 12 月 AE-E 卫星观测的 EUV 数据,利用 $F_{10.7}$ 及其前后 81 天的均值等参数估计所有太阳大气层的辐射状况,给出了 50 ~ 1050 Å 间 37 个波段的辐射通量. 吸收截面则取自 Torr1982^[25].

6 电离层 E 层理论模式的计算结果

图 1 是一张典型的 E 层夏季电子和离子密度的剖面图,对应的是武汉地区 (30.5°N, 114.3°E) 1981 年 6 月 21 日 (夏至) 正午 12:00LT 的情况,图中给出了当时的 $F_{10.7}$ 以及太阳天顶角,同时还标志出了 E 层比较重要的几个参数:电子密度峰值和谷值 ($N_m E$ 和 $N E$) 以及所对应的高度 ($h_m E$ 和 $h E$). 此图为本模式计算结果,采用的是 EUVAC 太阳辐射通量模式,吸收截面取自 Torr1982,并且完全考虑了二次电离. 由图中可以看出 NO^+ 和 O_2^+ 是电离层 E 层的主要离子成分, O^+ 从 115km 处开始快速增加,并将成为上部电离层的主要离子成分. 与其他三种离子相比 N_2^+ 含量甚微,图中没有画出它的分布曲线. 以往电离层 E 层理论模式的不足之处主要表现在两个方面,一是对电子密度峰值 $N_m E$ 的模拟往往比观测数据低,二是各种离子组成比例特别是 $[NO^+]/[O_2^+]$ 也与真实情况有出入. 最近的一些模式做了不少改进,使这两方面与观测数据进一步趋近,这些

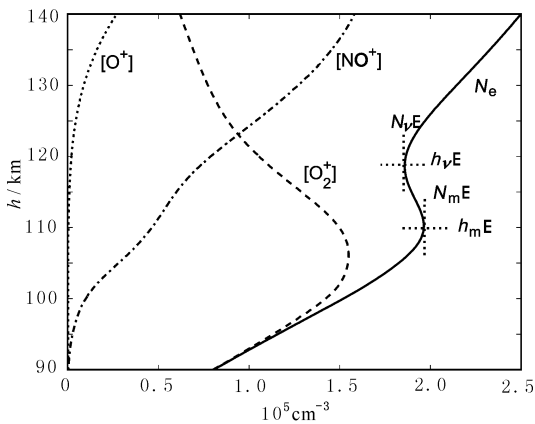


图 1 夏季电子和离子密度剖面, 纬度为 30.54°N, 经度为 114.34°E, 为 7°, $F_{10.7}$ 为 153.6

Fig. 1 Electron and ion densities in summer at 30.54°N, 114.34°E, with $\theta = 7^\circ$ and $F_{10.7} = 153.6$

改进包括完全考虑二次电离源,增大 $< 150\text{Å}$ 谱段的辐射通量,采用不同的吸收截面以及优化 NO 分布模式.

6.1 电子密度及离子组成比例

上面所提到的改进可以分为两大类,二次电离源, $< 150\text{Å}$ 谱段的辐射通量和吸收截面主要是影响电子密度,对离子组成比例影响不大. 而 NO 分布不仅影响电子密度也影响离子组成比例,特别是 $[NO^+]/[O_2^+]$ 的值. 图 2 展示了第一类改进对电子密度的影响情况,同时也标出了测高仪观测数据与 IRI90^[26] 的计算结果. 曲线 1 为图 1 中的电子密度剖面,曲线 2 为忽略了二次电离源的情况,二条曲线所对应的电子密度峰值相差了 15%. EUVAC 模式采用的是 F74113 参考谱,在 $\lambda = 150 \sim 250\text{Å}$ 的谱段上辐射通量乘上了 2 倍因子, $< 150\text{Å}$ 乘上了 3 倍因子,现将后者的 3 倍因子增加为 4 倍,即在原来的基础上再增加 33%,所对应的为曲线 3,与曲线 1 相比 $N_m E$ 增大了 5%. 曲线 4 采用的是 Richards1994 吸收截面,与前面的曲线相比,不仅电子密度峰值减少较多,连峰高也大为降低,与相同条件下采用 Torr1982 吸收截面计算结果所对应的 $N_m E$ 减少了将近 20%. 图中的两条竖线分别标志出了 IRI90 经验模式和测高仪观测数据得到的电子密度峰值. 可见,本模式计算结果要优于 IRI90,与测高仪观测数据的偏差仅为 1% 左右.

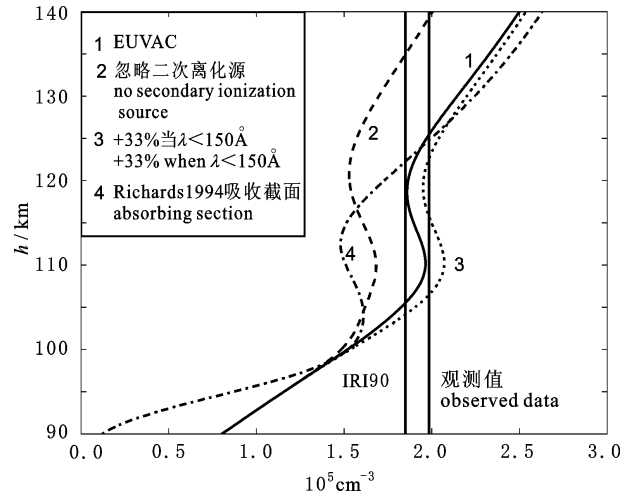


图 2 二次电离源,吸收截面和 $< 150\text{Å}$ 谱段的辐射通量对电子密度的影响

Fig. 2 The influence of secondary ionization, photoabsorption cross section and fluxes at wavelengths $< 150\text{Å}$ upon the electron density

NO 分布对电离层 E 层的影响如图 3 所示,当

[NO]增大时, [NO⁺]也随之增大, 而电子密度却降低, 主要原因是[NO]增大时 O₂⁺ + NO → NO⁺ + O₂ 反应速度加快, 有较多的 O₂⁺ 转化成 NO⁺, 而 NO⁺ 与电子的复合速度要快于其产生速度, 这样产生的 NO⁺ 要少于复合掉的 NO⁺, 导致整体电子密度的下降. 因此 [NO] 增大的效果是使电子密度下降而 [NO⁺]/[O₂⁺] 增大. 现定义 [NO⁺]/[O₂⁺] = 1 的高度为 h_x, 在没有 NO 的情况下, 在 h_x = 127km 时, [NO⁺] = [O₂⁺], 采用 Titheridge1997 高度下降到 123km, 将 [NO] 加倍则下降为 119km, 如将 [NO] 增大 10 倍, 在 102km 时 [NO⁺] = [O₂⁺], 但此时 N_mE 却降低了 15%. 同理, 加大或减小 O₂⁺ + NO → NO⁺ + O₂ 反应系数, 也会获得同样的结果. 在 115km 以上由于 [O⁺] 迅速增大, 使得 O⁺ + N₂ → NO⁺ + N 重要性加大, [NO⁺] 增加速度也会加快, 图 3 也体现出了这一特点.

6.2 电离层 E 层的日变化, 季节变化以及随太阳活动的变化趋势

E 层电子密度峰值 N_mE 与 E 层临界频率 f_oE 存在着以下的关系:

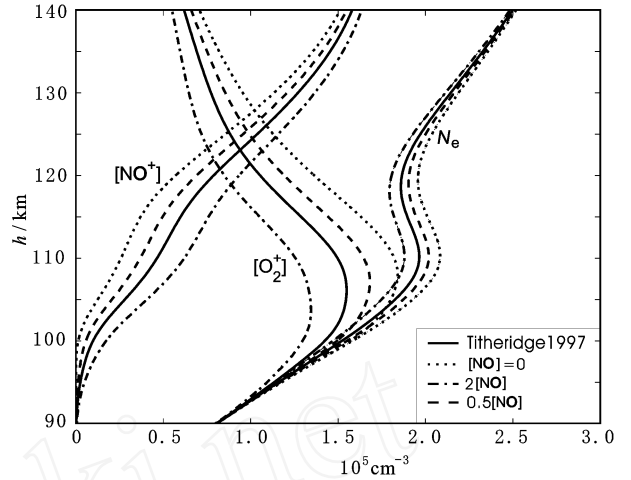


图 3 NO 对电子密度和离子组成比例的影响
Fig. 3 The influence of NO upon electron density and proportion of ion components

$$N_m E = 1.24 \times 10^4 \times (f_o E)^2, \quad (7)$$

其中 f_oE 单位为 MHz, N_mE 单位为 cm⁻³. 本文计算了 1981 年 (太阳活动高年) 和 1985 年 (太阳活动低年) 的春分、夏至、秋分和冬至这四天 E 层电子密度随高度的日变化情况, 由此得出各时刻 E 层临界频

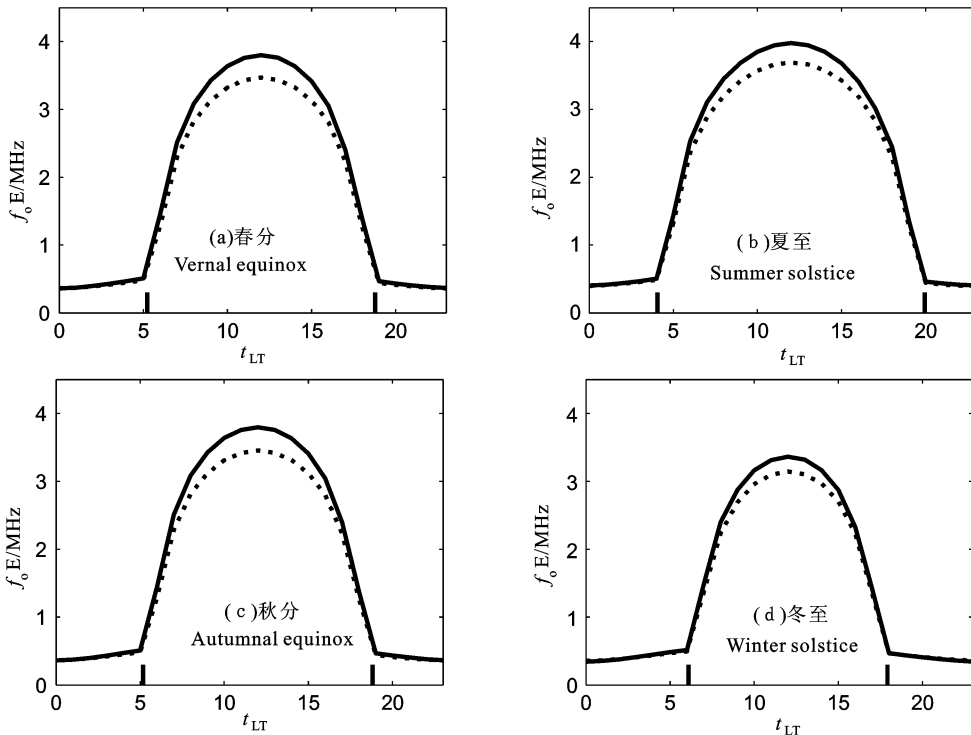


图 4 f_oE 在春分、夏至、秋分和冬至的日变化

实线为 1981 年, 虚线为 1985 年. 短竖线标志出了日出日落的时刻.

Fig. 4 The diurnal variations of f_oE on vernal equinox, summer solstice, autumnal equinox and winter solstice. Solid lines represent year 1981 and dotted ones year 1985. The short vertical lines indicate the times of sunrise and sunset.

率 f_oE 的数值,如图 4 所示. E 层的主要离子来自太阳辐射,电子密度白天可以达到 $10^4 \sim 10^5 \text{ cm}^{-3}$ 的量级(所对应的 f_oE 大于 1MHz),夜间则会很快地下

降到 10^3 cm^{-3} (所对应的 f_oE 小于 1MHz). 为了说明 E 层电子密度对于太阳辐射的敏感性,在图中用短竖线标注出了各季节 110km 高度上的日出日落时

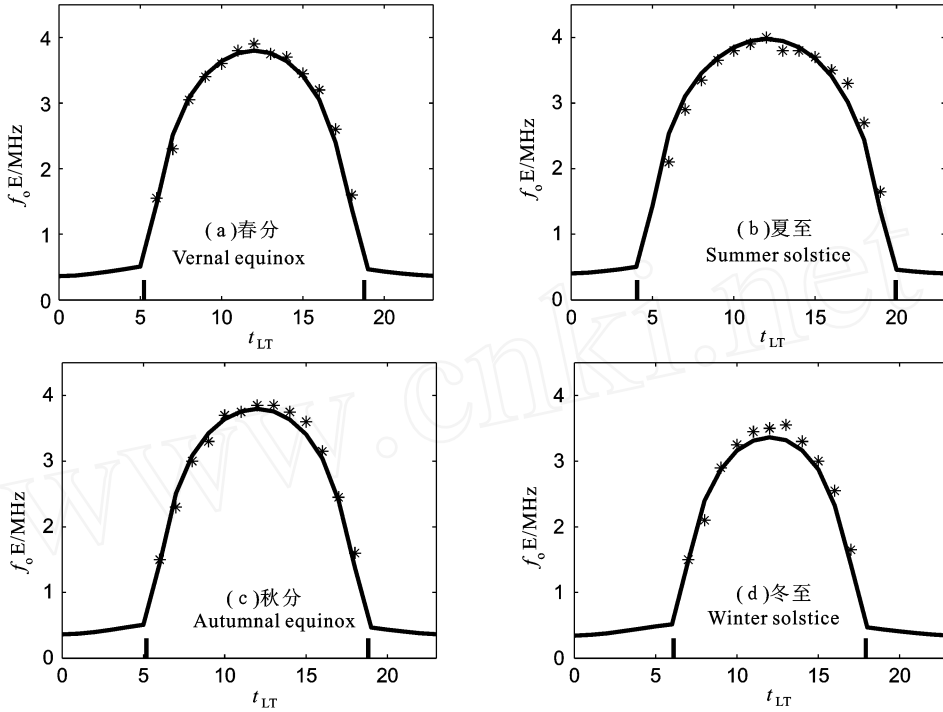


图 5 1981 年春分、夏至、秋分和冬至的模式计算结果与实际观测数据的比较

Fig. 5 The comparison between the computing results with the observations on vernal equinox, summer solstice, autumnal equinox and winter solstice in 1981

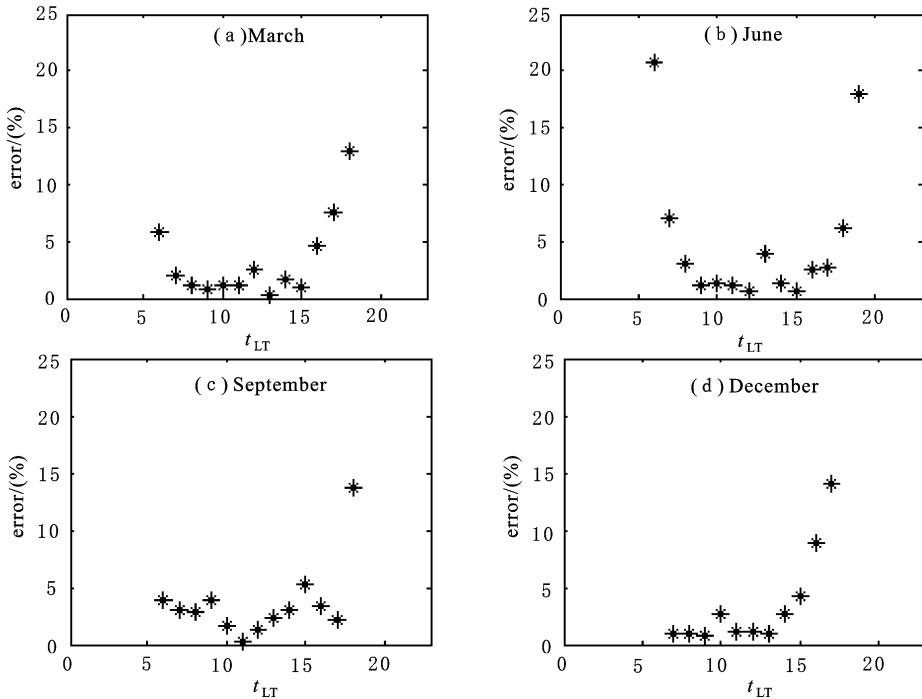


图 6 1981 年 3 月、6 月、9 月和 12 月模式计算误差的平均值

Fig. 6 The average error of model calculation in March, June, September, and December, 1981

刻,这与模式计算展示的日出日落时刻非常吻合. 电子密度的季节变化非常明显,以 12:00 LT 时刻的 f_oE 为例,无论是低年还是高年夏至与冬至的差别都在 15% 左右,春分和秋分的值非常接近,与夏至的差别为 5% 左右. 图 4 还反映了太阳活动性对于 f_oE 的影响程度,太阳活动高年 1981 年和太阳活动低年 1985 年的平均 $F_{10.7}$ 分别为 160 和 70,由图中可以看出其差别为 5% ~ 10%.

6.3 与观测数据的比较

本文选取了 1981 年春分、夏至、秋分和冬至,武汉地区测高仪的 f_oE 数据,不足的是由于仪器灵敏度的限制,无法测量出夜间的 f_oE . 如图 5 所示,实线为模式计算结果,* 为实际观测数据,可以看出在有观测点的位置,模式的计算结果与观测数据还是比较相合的.

为了突出模式与观测数据的确切误差,本文计算了 1981 年 3 月、6 月、9 月和 12 月每天各时刻误差的平均值,选取一个月数据是为了消除某一天数据可能的偶然性. 如图 6 所示,大部分误差值都集中在 5% 以下,特别是正午附近的一段时间内模式计算结果与观测数据十分接近. 只是在日出日落的那段时间内有较大误差,达到 10% ~ 20% 左右,可见日出日落的处理是本模式的一个弱点,其原因可能是在计算光学深度时采用的是 Chapman 函数,而它在日出日落时刻与实际情况有较大的偏差. 虽然 f_oE 能反映的信息比较有限(只能反映出电子密度峰值的大小,不能展示各离子成分的高度变化),但对于初步验证模式可靠性还是有一定参考价值的.

7 结论与展望

(1) 建立了一个中纬电离层 E 层的理论模式. 该模式从四种主要离子 NO^+ , O_2^+ , O^+ 和 N_2^+ 的连续性方程出发,通过数值模拟得出电子和各种离子密度随时间和高度的变化情况. 其主要输入参数中中性大气温度以及各种中性成分的密度由经验模式 MSIS2000 给出,而 NO 密度采用的是较新的 Titheridge1997 NO 模式,中性大气的水平运动速度由 HWM93 模式给出,与光电离相关的太阳辐射通量由 EUVAC 模式给定,各种大气成分的吸收截面取自 Torr1982.

(2) 研究了一些重要因素(主要是二次离化源、 $< 150\text{\AA}$ 谱段的辐射通量、吸收截面以及 NO 分布)

对电子密度以及离子组成比例(特别是 $[NO^+]/[O_2^+]$)的影响. 二次离化源对电子密度峰值影响极大,加与不加差距大约为 15%; $< 150\text{\AA}$ 谱段的辐射通量增大 33% 时, N_mE 大约增加 5%; 采用不同的吸收截面也会使结果有很大的差异,例如采用 Torr1982 和 Richards1994,不仅 N_mE 有 20% 左右的差别,连峰高也会不同; NO 分布不仅影响 N_mE ,也会影响到 $[NO^+]/[O_2^+]$ 的值,一般规律是当 [NO] 增加时, $[NO^+]/[O_2^+]$ 增大, N_mE 却降低.

(3) 选取太阳活动高年以及低年春分、夏至、秋分和冬至作为算例,研究了 E 层电子密度的日变化,季节变化以及随太阳活动的变化趋势,计算结果能够展示出 E 层电子密度的昼夜变化,冬夏季差别以及在太阳活动高年和低年的不同. 同时本文还选取了一些观测数据来验证模式的可靠性,在对照中可以看出模式计算结果还是比较理想的.

本文所建立的中纬电离层 E 层理论模式能够比较客观地反映出中纬常规 E 层的形态以及日变化,季节变化和随太阳活动的变化趋势. 但在模式中没有金属离子的参与,其实金属离子也是 E 层的重要组成部分,许多现象(如 E_s 以及各种突发的金属原子层)都与其有密切的关系. 本文建立中纬 E 层理论模式目的在于能够提供正确的中纬常规 E 层背景,并在此基础上引入金属离子从而进一步模拟中纬 E_s 的变化趋势.

致谢 Titheridge 教授提供了 NO 模式 Titheridge1997,在此深表感谢!

参考文献 (References)

- [1] Buonsanto M J. A study of the daytime E-F1 region ionosphere at mid-latitude. *J. Geophys. Res.*, 1990, **95**: 7735 ~ 7747
- [2] Buonsanto M J, Solomon S C, Tobiska W K. Comparison of measured and modeled solar EUV flux and its effect on the E-F1 region ionosphere. *J. Geophys. Res.*, 1992, **97**: 10513 ~ 10524
- [3] Titheridge J E. Aeronomical calculations of valley size in the ionosphere. *Adv. Space Res.*, 1990, 21 ~ 24
- [4] Tobiska W K. Recent solar extreme irradiance observations and modeling: A review. *J. Geophys. Res.*, 1993, **98**: 18879 ~ 18894
- [5] Titheridge J E. Direct allowance for the effect of photoelectrons in ionospheric modeling. *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**: 357 ~ 369
- [6] Titheridge J E. Modelling the peak of the ionospheric E-layer. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, 2000, **62**: 93 ~ 114
- [7] Titheridge J E. Ionisation below the night F2 layer - a global model. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, 2003, **65**: 1035 ~ 1052

- [8] Titheridge J E. Model results for the ionospheric E region: solar and seasonal changes. *Ann. Geophysicae*, 1997, **15**: 63 ~ 78
- [9] St.-Maurice J P, Torr D G. Nonthermal rate coefficients in the ionosphere: The reactions of O^+ with N_2 , O_2 , and NO. *J. Geophys. Res.*, 1978, **83**: 969 ~ 977
- [10] Torr D G, Richards P G, Torr M R. Photochemistry of the ionosphere. *World Ionosphere Thermosphere Study WITS Handbook*, 1988. 1 ~ 38
- [11] McFarland M, Albritton D L, Fehsenfeld F C, et al. Energy dependence and branching ratio of the $N_2^+ + O$ reaction. *J. Geophys. Res.*, 1974, **79**: 2925 ~ 2926
- [12] Lindinger W, Fehsenfeld F C, Schmeltekopf A L, et al. Temperature dependence of some ionospheric ion-neutral reactions from 300K—900K. *J. Geophys. Res.*, 1974, **79**: 4753 ~ 4756
- [13] Abdu W A, Torr D G, Richards P G, et al. Results of a comprehensive study of the photochemistry of N_2^+ in the ionosphere. *J. Geophys. Res.*, 1984, **89**: 9069 ~ 9079
- [14] Fehsenfeld F C. The reaction of O_2^+ with atomic nitrogen and $NO^+ \cdot H_2O$ and NO_2^+ with atomic oxygen. *Planet Space Sci.*, 1977, **25**: 195 ~ 196
- [15] Walls F L, Dunn G H. Measurement of total cross sections for electron recombination with NO^+ and O_2^+ using ion storage techniques. *J. Geophys. Res.*, 1974, **79**: 1911 ~ 1915
- [16] Torr M R, Torr D G. Recombination of NO^+ in the mid-latitude trough and the polar ionization hole. *J. Geophys. Res.*, 1979, **84**: 4316 ~ 4320
- [17] Johnsen R, Biondi M A. Laboratory measurements of the $O^+ (^2D) + N_2$ and $O^+ (^2D) + O_2$ reaction rate coefficients and their ionospheric implications. *Geophys. Res. Lett.*, 1980, **7**: 401 ~ 403
- [18] Henry R J W, Burke P G, Sinfailam A L. Scattering of electrons by C, N, O, N^+ , O^+ , and O^{++} . *Phys. Rev.*, 1969, **178**: 218 ~ 224
- [19] Chang T, Torr D G, Richards P G, et al. Reevaluation of the $O^+ (^2P)$ reaction rate coefficients from Atmosphere Explorer C observations. *J. Geophys. Res.*, 1993, **98**: 15589 ~ 15597
- [20] Link R. Dayside magnetospheric cleft auroral processes [Ph. D. Thesis]. 1982. 489
- [21] Seaton M J, Osterbrock D W. Relative OII intensities in gaseous nebulae. *Astrophys. J.*, 1957, **125**: 66 ~ 83
- [22] Picone J M, Hedin A E, Drob D P. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues. *J. Geophys. Res.*, 2002, 107: doi:10.1029/2002JA009430
- [23] Hedin A E, Fleming E L, Manson A H. Empirical wind model for the upper, middle and lower atmosphere. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1996, **58**: 1421 ~ 1447
- [24] Richards P G, Fennelly J A, Torr D G. EUVAC: A solar EUV flux model for aeronomic calculations. *J. Geophys. Res.*, 1994, 99: 8981 ~ 8992
- [25] Torr M R, Torr D G. The role of metastable species in the thermosphere. *Rev. Geophys.*, 1982, **20**: 91 ~ 144
- [26] Bilitza D. International reference ionosphere 1990. NSSDC/WDC-A-R&S, 1990. 90 ~ 92