

Zhang ML, Shi J K, Shang S P. A simulation study on the role of vibrationally excited nitrogen N_2^* in the ionosphere. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, 47(4):571 ~ 577

激发态氮分子 N_2^* 在电离层中的作用的模拟研究

张满莲 史建魁 尚社平

中国科学院空间科学与应用研究中心空间天气重点实验室, 北京 100080

摘要 激发态氮分子 N_2^* 在电离层 F 区中起着重要的作用, 它使 F 区占主导地位的 O^+ 离子的损失率增大, 从而使该区的电子浓度减少. 本文利用理论电离层数值模型, 通过考虑与不考虑 N_2^* 的作用, 对包括 1990 年 6 月、1997 年 5 月、1998 年 5 月以及 2000 年 4 月磁暴事件在内的时间区间的电离层响应情形进行模拟研究, 并与实测结果进行对比. 结果表明, N_2^* 对电离层电子浓度的影响在太阳活动高年非常明显, 在太阳活动低年虽有些影响, 但效果并不明显, 其程度远不如高年. 在太阳活动高年, 不仅是磁暴期间, 在较宁静期间也必须考虑 N_2^* 的影响. 而且, 在考虑 N_2^* 的作用时, 还与激发态振动温度 T 有关, 在采用 $T = T_n$ (其中 T_n 为背景中性大气的温度) 的简化处理时, 所得结果与观测结果的符合程度不如对 T 进行精确计算时所得的结果好. 模拟结果还表明, 太阳活动高年, N_2^* 作用的结果主要是使 150km 高度以上的 F 区电离层电子浓度减少, 而对 150km 以下高度的电离层电子浓度则影响不大. 另外, N_2^* 基本不影响 F_2 层峰高 $h_m F_2$ 的值.

关键词 电离层 数值模拟 扰动机制 激发态氮分子的作用

文章编号 0001-5733(2004)04-0571-07 中图分类号 P352 收稿日期 2003-07-24, 2004-03-18 收修定稿

A SIMULATION STUDY ON THE ROLE OF VIBRATIONALLY EXCITED NITROGEN N_2^* IN THE IONOSPHERE

ZHANG Man-Lian SHI Jian-Kui SHANG She-Ping

Laboratory for Space Weather, Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China

Abstract Vibrationally excited molecular nitrogen N_2^* plays an important role in the F region ionosphere by increasing the loss rate of the dominant ion O^+ , thereby reducing the electron concentration in the F region of the ionosphere. In this paper, we use a theoretical numerical ionospheric model to study the effect of N_2^* on the ionosphere during four time periods, each including both geomagnetically quiet and storm disturbed periods, through considering and not considering the role of N_2^* in the numerical ionospheric model. The four periods simulated are (1) June 11 ~ 15, 1990; (2) May 14 ~ 20, 1997; (3) May 1 ~ 10, 1998 and (4) April 6 ~ 10, 2000. By comparing the simulated results with the observational ones, it is shown that N_2^* has a significant effect on the ionosphere during high solar activity years, while for the low solar activity years, the role played by N_2^* is very limited, much less than that in high solar activity years. It is also shown that for the high solar activity years, when constructing an ionospheric physical model, one must take into account N_2^* not only for the geomagnetically disturbed period but also for the quiet period. Moreover, it is found that the effect of N_2^* on the ionospheric electron density distribution depends on the vibrational temperature T adopted. When

基金项目 国家自然科学基金重大项目(40390150)及中国科学院创新工程资助项目.

作者简介 张满莲, 女, 1962 年生, 1984 年毕业于中国科学技术大学地球和空间科学系, 1987 年于中国科学院地球物理研究所获地磁与高空物理专业硕士学位. 副研究员, 主要从事电离层物理方面的研究工作. E-mail: zhangml@center.cssar.ac.cn

taking the value of T_n as T (where T_n is the background neutral temperature) the simulated result, compared with the observation one, is not as good as that when T is calculated by the steady state analytical solution. Moreover, our simulation results show that, for high solar activity years, the effect of N_2^+ on the distribution of ionospheric electron concentration is to reduce the electron density for the height above 150km, while its effect on the electron density below 150km is very small. The F_2 layer peak height $h_m F_2$ is not affected basically by N_2^+ .

Key words Ionosphere, Numerical simulation, Disturbance mechanism, Role of N_2^+ .

1 引言

计算机技术的快速发展以及求解复杂非线性方程组的算法的发展都对电离层数值模拟的研究起到了巨大的促进作用. 在国际上出现了一批理论电离层模型. 如美国国家大气研究中心 (NCAR) 的热层电离层总环流模型 TIGCM^[1], 英国谢菲尔德 (Sheffield) 大学和伦敦大学学院的耦合热层 - 电离层模型 CTIM^[2], 美国犹他 (Utah) 州立大学的时变电离层模型 TDM^[3], 阿拉巴马大学的 FLIP 模型^[4] 以及菲利浦 (Phillips) 实验室的全球理论电离层模型 GTM^[5]. 中国也出现了一批面向问题的实用电离层模型^[6-15]. 本文将用一维时变理论电离层数值模型, 研究激发态氮分子 N_2^+ 在电离层中的作用.

激发态氮分子 N_2^+ 对电离层电子浓度的影响主要通过增大电离层 F 区占主导地位的 O^+ 离子的损失率, 从而使该区的电子浓度减少. 因此, 激发态氮分子 N_2^+ 在电离层 F 区中起着重要作用. 根据文献 [16] 的研究结果, 太阳活动高年夏季 N_2^+ 可使 F_2 层峰区电子浓度 $N_m F_2$ 之值减少二分之一. 文献 [17] 与 [18] 分别研究了 N_2^+ 在中纬槽 (mid-latitude trough) 形成中所起的作用. 对于 N_2^+ 在电离层暴中的作用, 以 Pavlov 为代表的学者^[19-22] 认为 N_2^+ 在电离层负相暴的形成过程中起着相当重要的作用; 而以 Mikhailov 为代表的另一些学者^[23, 24] 却认为无需考虑 N_2^+ 的作用就可解释所观测到的电离层暴的主要特征. 本文利用理论电离层数值模型, 对包括 1990 年 6 月、1997 年 5 月、1998 年 5 月以及 2000 年 4 月磁暴事件在内的时间区间的电离层响应情形进行数值模拟, 研究 N_2^+ 在电离层 (暴) 中的作用.

2 物理模型简介

一维时变理论电离层数值模型的构成请参见文

献 [25]. 该模型考虑了包括光致电离反应、电荷转移与交换反应以及离解性复合反应在内的 16 个化学反应方程式. 模型通过联立求解 O^+ 、 O_2^+ 、 NO^+ 和 N_2^+ 四种离子的连续性和动量方程组, 得到 O^+ 、 O_2^+ 、 NO^+ 和 N_2^+ 的剖面分布, 并由电中性条件得到电子浓度的分布.

在求解方程组时, 对模型中涉及的中性背景大气的成分、温度和中性风以及电场等采取参数化处理, 利用观测值或现有各种经验模型作为这些参数的输入值. 中性成分的密度和温度由 MSISE90 经验模型^[26] 提供. 为了模拟磁暴效应对中性大气的影 响, 我们采用 3h 时段的 A_p 指数为 MSISE90 的输入. 计算离子的光电离产生率所需的太阳 EUV 辐射通量由 EUVAC 模型^[27] 提供. 计算由沉降粒子产生的电离率时采用 AFL87^[28] 模型作为极光沉降电子数密度通量与能通量的输入. 由于模型不包括能量方程的求解, 对电子与离子的温度作了如下处理: 电子温度采用的是 AE/ISIS 模型^[29]. 离子温度中考虑了有效电场^[30] 的影响, 它与离子和中性风的相对速度有关, 由

$$T_i = T_n + \frac{M_o}{3k_b} |V_i - U_n|^2 \quad (1)$$

给出, 其中 T_i 、 T_n 、 M_o 和 k_b 分别为离子温度、中性背景大气温度、氧原子质量和玻尔兹曼常数, V_i 和 U_n 分别为离子与中性风速度在垂直于地磁场方向上的分量. 热层中性风及电场均可引起等离子体的漂移运动, 其对电离层最为突出的效应是使 F_2 层峰高 $h_m F_2$ 产生相应的变化. 因此模型计算所得的 F_2 层峰高 $h_m F_2$ 的真实与否将与所输入的热层中性风及电场有关. 研究表明, $h_m F_2$ 主要受中性风和电场引起的漂移的控制^[31, 32]. 因而可通过电离层 F_2 层峰高参数 $h_m F_2$ 相对于无风场时平衡高度的变化求得子午风, 这样求得的风场为等效风场, 它包含了电场引起的垂直漂移作用. 然而, $h_m F_2$ 直接的观测资料常常不易得到. 利用电离层特性参量 $f_o F_2$ 、

$M(3000)F_2$ 和 f_oE 的常规观测资料,通过 Dudeney 公式^[33]可求得 h_mF_2 。通过由 SERVO 技术得到的参数化公式^[32]可求得等效风场。在有 f_oF_2 、 $M(3000)F_2$ 及 f_oE 的观测值时,本文将采用上述等效风场作为模型的输入值,由于该等效风场已包含了电场的作用,此时不再输入模式提供的电场。在没有观测值可供利用时,热层中性风由 HWM90 模型^[34]提供,电场输入在中纬采用 ISR 离子漂移模型^[35],高纬对流电场采用 HMR90 模型^[36]。采用由 HWM90 模型提供的风场与采用 f_oF_2 、 $M(3000)F_2$ 及 f_oE 求得包括电场效应在内的等效风场,计算所得的 h_mF_2 有时会有较大的差别。本文着重研究考虑与不考虑 N_2^* 作用时产生的结果的差别。根据我们的经验, N_2^* 基本上对 h_mF_2 不产生什么影响,因此,采用由 HWM90 模型提供的风场或采用 f_oF_2 、 $M(3000)F_2$ 及 f_oE 求得包括电场效应在内的等效风场来计算对本文的结论不会产生影响。只不过后者给出的结果与实际观测的 h_mF_2 符合程度会好得多,这就是为什么在有观测值可用时,我们尽量采用后者的原因。

3 对激发态氮分子 N_2^* 作用的考虑

N_2^* 对电子数密度的影响是通过加快 O^+ 离子与 N_2 的化学反应



的反应速率

$$L_{N_2} = k_1 [N_2] \quad (3)$$

来达到的。上述反应所形成的 NO^+ 将迅速与电子进行游离复合。式中 ν 为氮分子所处激发态的振级数: $\nu=0,1,2,\dots$ k_1 为化学反应式(2)的有效反应系数,

$$k_1 = \sum_{\nu=0} k_1 [N_2(\nu)] / [N_2], \quad (4)$$

其中 k_1 为 O^+ 与第 ν 激发态氮分子 $N_2(\nu)$ 的反应系数, $[N_2]$ 是氮分子的总数密度,包括基态($\nu=0$)与激发态($\nu>0$):

$$[N_2] = \sum_{\nu=0} [N_2(\nu)], \quad (5)$$

$[N_2(\nu)]$ 为处在第 ν 激发态上的氮分子数密度,其值由玻尔兹曼分布确定,

$$[N_2(\nu)] = [N_2(0)] \exp(-E_\nu/T). \quad (6)$$

$[N_2(0)]$ 为基态氮分子的数密度:

$$[N_2(0)] = [N_2] (1 - \exp(-E_1/T)). \quad (7)$$

$E_1 = 3353K$, T 为激发态振动温度。有关 T 的计算公式参见文献[37],简单的处理方法是令 $T = T_n$ 。本文将考虑从基态($\nu=0$)到第 5 激发态($\nu=5$)氮分子的作用,其反应系数 k_1 的计算公式为

$$k_1 = A T_{\text{eff}} + B, \quad (8)$$

其中 $T_{\text{eff}} = (m_i T_n + m_n T_i) (m_i + m_n)^{-1} + m_i m_n V_d^2 (m_i + m_n)^{-1} (3k_b)^{-1}$, k_b 是玻尔兹曼常数, V_d 是 O^+ 与 N_2 之间的相对漂移速度, m_i 和 m_n 为 O^+ 和 N_2 的质量, A 和 B 是常数,其值参见文献[37]中的表 1。

4 模拟结果

利用所述电离层数值模型,通过考虑与不考虑 N_2^* 的作用,本文分别对太阳活动低年与太阳活动高年包括 4 个磁暴事件在内的时间区间的电离层变化情形进行数值模拟,并与实际观测结果对比。表 1 列出了所模拟台站的名称及其地理坐标以及模拟时段。

表 1 所模拟的时间区间与台站名称

Table 1 Time periods and geographic coordinates of the stations simulated

模拟时段	台站名称及地理坐标
	Dourbes (50.1 N, 4.6 E)
1990 年 6 月 11 ~ 15 日	Slough (51.5 N, 359.4 E)
1997 年 5 月 14 ~ 20 日	Chilton (51.6 N, 358.7 E)
1998 年 5 月 1 ~ 10 日	Goosebay (53.3 N, 299.2 E)
2000 年 4 月 6 ~ 10 日	Sondrestrom (67.0 N, 310.0 E)
	Thule/Qanaq (77.5 N, 290.8 E)
	Argentia Island (47.3 N, 306.0 E)

4.1 太阳活动低年结果

图 1 给出了 1997 年 5 月 14 ~ 20 日 Thule/Qanaq (77.5 N, 290.8 E) 台站和 1998 年 5 月 1 ~ 10 日期间 Chilton (51.6 N, 358.7 E) 台站的电离层 F_2 层临界频率 f_oF_2 模拟结果与实际观测结果的对比。从图中可以很清楚地看出,对于太阳活动低年,模型输出结果在考虑与不考虑激发态氮分子 N_2^* 的作用时差别不大,而且,不论是在宁静期间还是在地磁活动剧烈的磁暴期间,由模型给出的结果都与观测结果符合得很好。其他台站相应期间的模拟结果与图 1 中给出的结果非常一致。由此说明,激发态氮分子对电离层电子浓度的影响在太阳活动低年非常有限。

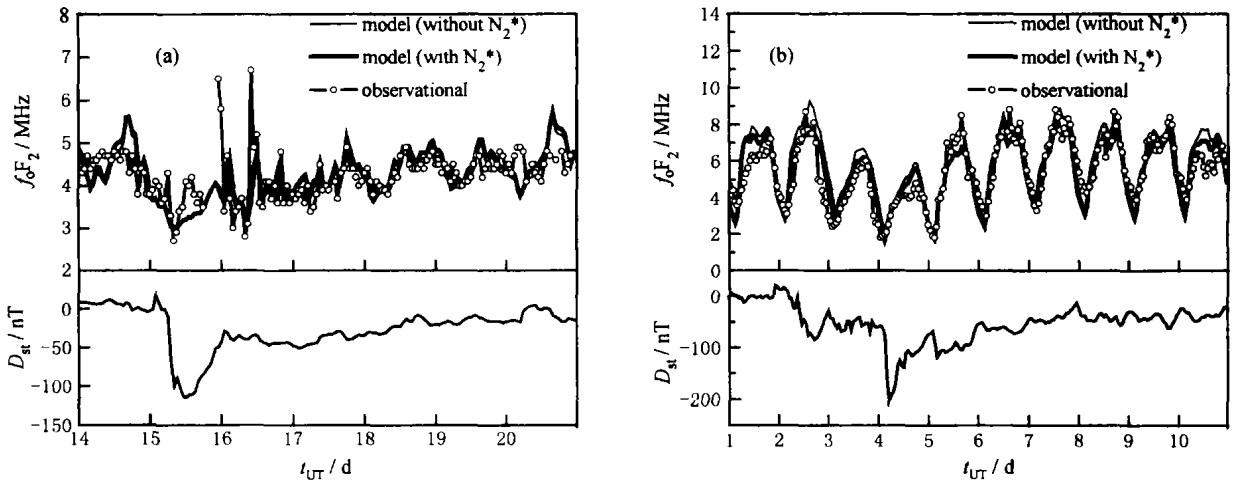


图1 1997年5月14~20日 Thule/Qanaq 站(a)和1998年5月1~10日 Chilton 站(b)电离层 F_2 层临界频率 f_oF_2 数值模拟结果与实测值的比较

Fig. 1 Comparison of F_2 -layer critical frequency f_oF_2 obtained by model simulations with observations during May 14 ~ 20, 1997 for Thule/Qanaq (a) and during May 1 ~ 10, 1998 for Chilton (b)

4.2 太阳活动高年结果

图2给出了太阳活动高年1990年6月11~15日期间 Dourbes (50.1 N, 4.6 E) 站和2000年4月6~10日期间 Sondrestrom (67.0 N, 310.0 E) 站站的电离层 F_2 层临界频率 f_oF_2 数值模拟结果与实际观测结果的对比。从图中可以很清楚地看出,对于太阳活动高年,模型输出结果在考虑与不考虑激发态氮分子 N_2^* 的作用时差别很大。不论是在宁静期还是在地磁活动剧烈的磁暴期,在考虑 N_2^* 的作用后,数值模拟给出的结果都能很好地重现观测结果。而

在不考虑 N_2^* 的作用时数值模拟结果与实际观测结果有很大的偏离——白天一般都比实测值偏高。可见, N_2^* 作用的结果使得 f_oF_2 比不考虑 N_2^* 的作用时下降。对其他台站相应期间的模拟结果与图2中给出的结果非常一致。由此可得出结论:在太阳活动高年,激发态氮分子对电离层电子浓度的影响非常明显,在对电离层进行数值模拟时应将这一因素考虑在内。

此外,我们还研究了 N_2^* 的作用效应与激发态振动温度 T 的关系。图3给出了取 $T = T_n$ 时的结

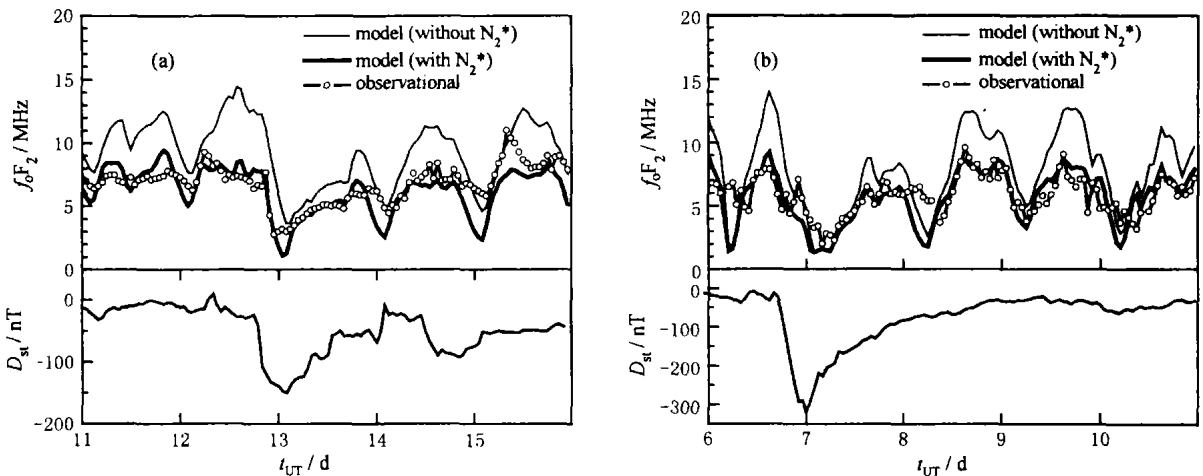


图2 1990年6月11~15日 Dourbes 站(a)和2000年4月6~10日 Sondrestrom 站(b) 电离层 F_2 层临界频率 f_oF_2 数值模拟结果与实测值的比较

Fig. 2 Comparison of F_2 -layer critical frequency f_oF_2 obtained by model simulations with observations during June 11 ~ 15, 1990 for Dourbes (a) and during April 6 ~ 10, 2000 for Sondrestrom (b)

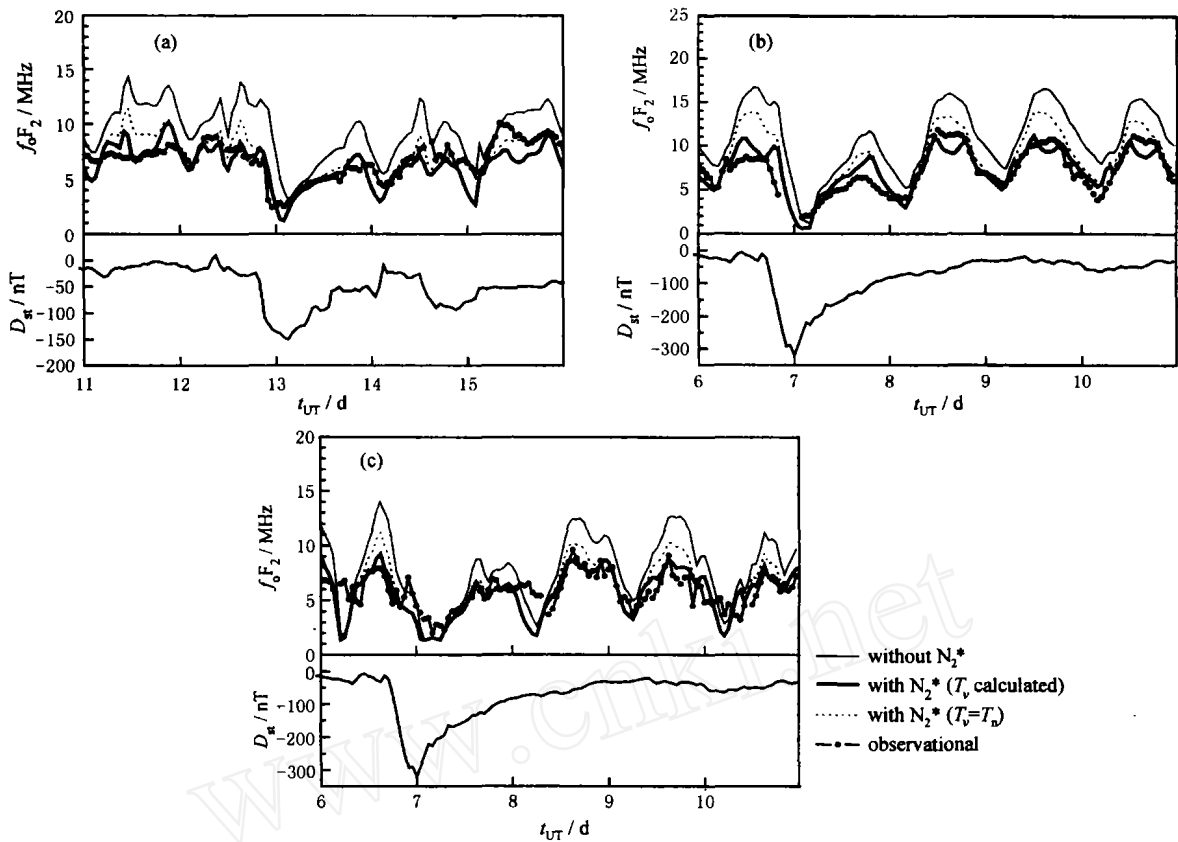


图3 1990年6月11~15日 Slough 台站 (a) 及2000年4月6~10日 Chilton (b) 和 Sondrestrom 台站 (c) 电离层 F₂ 层临界频率 f_0F_2 数值模拟结果与实测值的比较

Fig. 3 Comparison of F₂-layer critical frequency f_0F_2 obtained by model simulations with observations during June 11 ~ 15, 1990 for Slough (a) and during April 6 ~ 10, 2000 for Chilton (b) and for Sondrestrom (c)

果与按文献[37]中的方法计算 T 时的结果的对比. 从图中可见, 采取 $T = T_n$ 的简化处理时所得结果与观测结果的符合程度显然不如对 T 进行较精确计算时所得的结果好.

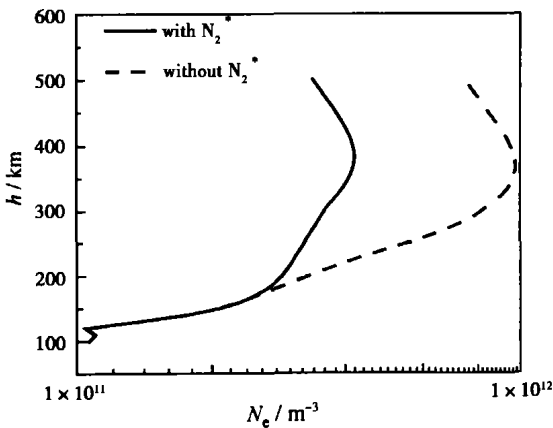


图4 英国 Slough 台站电离层在 1990 年 6 月 12 日 12 00UT 时刻的电子浓度剖面分布

Fig. 4 Electron density profile obtained by model simulation at 12 00UT of June 12, 1990 for Slough, UK

上述模拟结果表明太阳活动高年 N_2^* 对 F₂ 层临界频率 f_0F_2 (亦即 F₂ 层峰值浓度 N_mF_2) 有重要影响, 但模拟结果表明 h_mF_2 值基本不受 N_2^* 的影响. 这可以从图 4 中看出. 图 4 给出的是由数值模拟得到的电子浓度随高度分布的一个例子. 从图中可看出, N_2^* 作用的结果使得 F 区 (高度 $h > 150\text{km}$) 电子浓度下降, 而对 150km 以下高度的电离层电子浓度则影响不大. 从图中也可以看出, 虽然 N_2^* 使 F₂ 层的峰区电子浓度 N_mF_2 减小, 但 F₂ 层峰高 h_mF_2 却基本不受影响.

5 讨论与总结

本文利用理论电离层数值模型, 通过考虑与不考虑激发态氮分子 N_2^* 的作用, 分别对太阳活动低年与太阳活动高年包括 4 个磁暴事件在内的时间区间的电离层变化情形进行了模拟研究, 并与实际观测结果对比. 结果表明, N_2^* 对电离层电子浓度的影

响在太阳活动高年非常明显,在太阳活动低年虽有些影响,但效果并不明显,其程度远不如高年。而在太阳活动高年,不仅是在磁暴期间,在较宁静期间也必须考虑 N_2^+ 的影响。究其物理原因,是由于激发态氮分子 N_2^+ 在电离层中的作用取决于电离层中是否有可观数量的 N_2^+ 存在,从而使 O^+ 的复合速率增大。而 N_2^+ 的数量是随热电子温度增高而增加的,电子温度越高, N_2 被热激发为 N_2^+ 的数量也就越多。太阳活动高年热电子温度高, N_2^+ 的数量也将增多,尤其是夏季 N_2^+ 的数量达最高值,因此太阳活动高年的夏季 N_2^+ 的作用就尤其突出。这种情况在电离层暴时也可能出现。因为大磁暴期间由于高能能量的注入而产生的热层暴环流一方面使富含分子成分(包括 N_2)的气团被带到 F_2 层高度^[15, 38],另一方面由于加热效应使电子的温度增高,这都将使 N_2^+ 的数量增加。

感谢俄罗斯 IZMIRAN 的 A. V. Pavlov 博士提供了计算 N_2^+ 振动温度 T 的 FORTRAN 子程序。电离层数值模型中用到的 IR95、EUVAC、MSISE90、HWM90、HMR90 以及 ISR 离子漂移模型由 NASA 的 National Space Science Data Center 提供,AFGL 电子沉降模型由 Philips Laboratory, Hanscom Air Force Base, Massachusetts 提供,电离层特性参量数据资料由美国 NGDC 数据中心和 World Data Center for Solar - Terrestrial Physics at the Rutherford Appleton Laboratory 提供,在此一并致谢。

参考文献

- [1] Roble R G, Ridley E C, Richmond A D, et al. A coupled thermosphere/ionosphere general circulation model. *Geophys. Res. Lett.*, 1988, **15**: 1325 ~ 1328
- [2] Fuller-Rowell T J, Rees D, Quegan S, et al. Interactions between neutral thermospheric composition and polar thermosphere using a coupled global model. *J. Geophys. Res.*, 1987, **92**: 7744 ~ 7748
- [3] Schunk R W. A mathematical model of the middle and high latitude ionosphere. *Pure and Apply. Geophys.* 1988, **127**(2-3): 255 ~ 304
- [4] Richards P G, Torr D G, Reinisch B W, et al. F_2 peak electron density at Millstone Hill and Hbart: Comparison of theory and measurement at solar maximum. *J. Geophys. Res.*, 1994, **99**: 15005 ~ 15016
- [5] Decker D T, Valladares C E, Sheehan R, et al. Modeling daytime F layer patches over Sonderstrom. *Radio Sci.*, 1994, **29**: 249 ~ 268
- [6] 张奇伟,郭兼善,章公亮.磁暴期间中纬度电离层剖面结构变化的数值模拟.空间科学学报,1994, **14**(1): 39 ~ 47
Zhang Q W, Guo J S, Zhang GL. Model study of mid-latitude ionospheric density profile variation during geomagnetic storms. *Chinese J. Space Sci.* (in Chinese), 1994, **14**(1): 39 ~ 47
- [7] 张顺荣,黄信榆.电离层峰下结构的数值模拟.空间科学学报,1994, **14**(2): 116 ~ 124
Zhang S R, Huang X Y. Numerical simulation of ionospheric structure below F_2 peak. *Chinese J. Space Sci.* (in Chinese), 1994, **14**(2): 116 ~ 124
- [8] 张顺荣,黄信榆.中纬电离层暴时形态的理论模式研究.空间科学学报,1997, **17**(2): 143 ~ 148
Zhang S R, Huang X Y. A model study of the storm-time behavior for mid-latitude ionosphere. *Chinese J. Space Sci.* (in Chinese), 1997, **17**(2): 143 ~ 148
- [9] 高铭,肖佐.一种电离层物理模型及其在 F_1 谷区形成讨论中的应用.空间物理学报,1992, **12**(4): 287 ~ 297
Gao M, Xiao Z. A physical model of ionosphere for low latitude and its applications in discussions of F_1 valley formation. *Chinese J. Space Sci.* (in Chinese), 1992, **12**(4): 287 ~ 297
- [10] 涂剑南,刘立波,保宗悌.一个低纬电离层理论模式.空间科学学报,1997, **17**(3): 212 ~ 219
Tu J N, Liu L B, Bao Z T. A theoretical low latitude ionospheric model. *Chinese J. Space Sci.* (in Chinese), 1997, **17**(3): 212 ~ 219
- [11] 朱明华, Taieb C, 曹冲等.中纬电离层理论模式研究.空间科学学报,1998, **18**(1): 23 ~ 30
Zhu M H, Taieb C, Cao C, et al. A theoretical model of middle latitude ionosphere. *Chinese J. Space Sci.* (in Chinese), 1998, **18**(1): 23 ~ 30
- [12] 张北辰,刘瑞源,刘顺林.极区电子沉降对电离层影响的模拟研究.地球物理学报,2001, **44**(3): 311 ~ 319
Zhang B C, Liu R Y, Liu S L. Simulation study on the influences of the precipitating electrons on the polar ionosphere. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2001, **44**(3): 311 ~ 319
- [13] 邓悦,王劲松,肖佐.一种电离层垂直剖面物理模型及其与 IRF-90 模型比较.空间科学学报,2000, **20**(2): 103 ~ 112
Deng Y, Wang J S, Xiao Z. A physical model for ionospheric vertical profile and comparison between it and IRF-90. *Chinese J. Space Sci.* (in Chinese), 2000, **20**(4): 103 ~ 112
- [14] 王劲松,肖佐.子午面内时变电离层模型及其边界条件.地球物理学报,1999, **42**(1): 18 ~ 29
Wang J S, Xiao Z. Time dependent ionosphere model in meridian plane and its boundary conditions. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1999, **42**(1): 18 ~ 29
- [15] 涂传谔.中纬电离层暴负相的开始时间与磁暴主相开始时间的对应关系及其理论模式.空间科学学报,1983, **3**(1): 36 ~ 43
Tu C Y. The relation between the onset of the negative phase of ionospheric storms and the main phase of magnetic storms and a theoretical model. *Chinese J. Space Sci.* (in Chinese), 1983, **3**(1): 36 ~ 43
- [16] Richards P G, Torr D G. A factor of 2 reduction in theoretical F_2 peak electron density due to enhanced vibrational excitation of N_2 in Summer at solar maximum. *J. Geophys. Res.*, 1986, **91**(A10): 11331 ~ 11336
- [17] Schunk R W, Banks P W. Auroral N_2 vibrational excitation and the

- electron density trough. *Geophys. Res. Lett.*, 1975, **2**: 239 ~ 242
- [18] Pavlov A V. The role of vibrationally excited nitrogen in the formation of the mid-latitude ionisation trough. *Ann. Geophys.*, 1993, **11**: 479 ~ 484
- [19] Pavlov A V. The role of vibrationally excited nitrogen in the formation of the mid-latitude negative ionospheric storms. *Ann. Geophys.*, 1994, **12**: 554 ~ 564
- [20] Pavlov A V, Buonsanto M J. Comparison of model electron densities and temperatures with Millstone Hill observations during undisturbed period and the geomagnetic storms of 16 ~ 23 March and 6 ~ 12 April 1990. *Ann. of Geophys.*, 1997, **15**: 327
- [21] Pavlov A V, Buonsanto M J, Schlesier A C, et al. Comparison of models and data at Millstone Hill during the 5 ~ 11 June 1990 storm. *J. Atmos. Solar-Terres. Phys.*, 1999, **61**: 263 ~ 279
- [22] Schlesier A C, Buonsanto M J. The Millstone Hill ionospheric model and its application to the May 26 ~ 27, 1990, ionospheric storm. *J. Geophys. Res.*, 1999, **104**(A10): 22453 ~ 22468
- [23] Mikhailov A V, Foster J C. Daytime thermosphere above Millstone Hill during severe geomagnetic storms. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**(A8): 17275 ~ 17282
- [24] Mikhailov A V, Schlegel K. Physical mechanism of strong negative storm effect in the daytime ionospheric F₂ region observed with EISCAT. *Ann. Geophys.*, 1998, **16**: 602 ~ 608
- [25] Zhang M L, Radicella S M, Shang S P. A physical numerical ionospheric model and its simulation results. *Commun. Theor. Phys.*, 2004, **41**(5): 795 ~ 800
- [26] Hedin A E. Extension of the MSIS thermospheric model into the middle and lower atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 1991, **96**: 1159
- [27] Richards P G, Fennelly J A, Torr D G. A solar EUV flux model for aeronomic calculations. *J. Geophys. Res.*, 1994, **99**: 8981 ~ 8992
- [28] Hardy D A, Gussenhoven M S, Raistrick R. Statistical and functional representations of the pattern of auroral energy flux, number flux, and conductivity. *J. Geophys. Res.*, 1987, **92**: 12275 ~ 12294
- [29] Bilitza D, Brace L H, Theis R F. Modeling of ionospheric temperature profiles. *Adv Space Res.*, 1985, **5**(7): 53
- [30] Schunk R W, Raitt W J, Banks P M. Effect of electric fields on the daytime high-latitude E and F Regions. *J. Geophys. Res.*, 1975, **80**: 3121
- [31] Rishbeth H, Ganguly S, Walker J C G. Field-aligned and field-perpendicular velocities in the ionospheric F₂-layer. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1978, **40**: 767 ~ 784
- [32] Codrescu M V, Roble R G, Forbes J M. Interactive ionosphere modeling: A comparison between TIGCM and ionosonde data. *J. Geophys. Res.*, 1992, **97**: 8591 ~ 8600
- [33] Dudeney J R. The accuracy of simple methods for determining the height of the maximum electron concentration of the F₂-layer from scaled ionospheric characteristics. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1983, **45**(8/9): 629 ~ 640
- [34] Hedin A E, Biondi M A, Burnside R G, et al. Revised globe model of thermospheric winds using satellite and ground-based observations. *J. Geophys. Res.*, 1991, **96**: 7657 ~ 7688
- [35] Richmond A D, Balane M, Emery B A, et al. An empirical model of quiet-day ionospheric electric fields at middle and low latitudes. *J. Geophys. Res.*, 1980, **85**(A9): 4658 ~ 4664
- [36] Rich F J, Maynard N C. Consequences of using simple analytical functions for high-latitude convection electric field. *J. Geophys. Res.*, 1989, **94**: 3687 ~ 3701
- [37] Pavlov A V, Buonsanto M J. Using steady state vibrational temperatures to model effects of N_2^+ on calculations of electron densities. *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**(A12): 26941 ~ 26945
- [38] Prolss G W. Ionospheric F-region storms. In: Volland H ed. *Handbook of Atmospheric Electrodynamics*, Vol. 2. Boca Raton: CRC Press, 1995. 195 ~ 248