0254-6124/2006/26(2)-092-06 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Liu Yimou, Wang Jingsong, Xiao Zuo, Suo Yucheng. A possible mechanism of typhoon effects on the ionospheric F_2 layer. *Chin. J. Space Sci.*, 2006, **26**(2): 92—97

台风影响电离层 F_2 区的一种可能机制*

刘依谋[1] 王劲松[1,2] 肖 佐[1] 索玉成[3]

[1](北京大学地球与空间科学学院 北京 100871)

[2](中国气象局国家空间天气监测预警中心)

[3](中国电波传播所北京研究中心)

摘 要 在台风期间，特别是台风登陆前后，强烈的海气、陆气相互作用会增强低层大气中的湍流活动，并可能导致大气湍流层顶的抬升. 这种抬升会改变高层大气结构，从而影响高层大气中的光化学过程，最终造成对电离层的影响. 在台风活动抬升了湍流层顶的前提下，利用一个一维电离层物理模型，模拟了日本中纬地区 (45°N, 142°E) 电离层 F_2 区的响应. 模拟结果很好地定性解释了如下观测事实，台风期间，电离层 f_0F_2 会下降，对给定频率电波的反射面会抬升；同时还表明以上过程会导致 h_mF_2 上升，这表明台风期间湍流层顶的抬升可能是台风影响电离层 F_2 区的一种十分有效的机制.

关键词 台风；湍流层顶； F_2 区临界频率； F_2 区峰值高度

中图法分类号 P 353

A Possible Mechanism of Typhoon Effects on the Ionospheric F_2 Layer

LIU Yimou[1] WANG Jingsong[1,2] XIAO Zuo[1] SUO Yucheng[3]

[1](*School of Earth and Space Science, Peking University, Beijing* 100871)

[2](*National Center for Space Weather Monitoring and Warning, China Meteorological Administration*)

[3](*Beijing Research Center, China Research Institute of Radio Wave Propagation*)

Abstract During the period of typhoon, especially when typhoon is approaching the mainland, violent interaction between the wind and the sea surface, the wind and the mainland will greatly strengthen the turbulence in the lower atmosphere, and it will possibly raise the turbopause in altitude. Thus it will change the structure of the earth's atmosphere and influence the photochemical process of the upper atmosphere, and consequently influence the ionosphere. Based on the assumption that typhoon will raise the turbopause in altitude, the response of F_2 layer of the ionosphere over the middle latitude of Japan (45°N, 142°E) was simulated, by using the one dimensional ionospheric model. The results of the simulation can qualitatively explain the following phenomena very well: f_0F_2 of the ionosphere will decrease while the reflecting surface in the ionosphere of the radio wave with a certain frequency will increase during the time of typhoon. h_mF_2 increases due to the raise of turbopause in this simulation. These results suggest that the rising in altitude of turbopause by typhoon is a very reasonable mechanism of typhoon effects on the ionospheric F_2 layer.

Key words Typhoon, Turbopause, Peak density of F_2 layer, peak altitude of F_2 layer

---

* 国家自然科学基金面上项目 (40374058) 和电波环境特性及模化技术国防科技重点实验室项目 (51486010103JW0201) 共同资助

2005-07-10 收到原稿， 2005-12-15 收到修定稿

1 引言

越来越多的观测证据表明，电离层会受到低层大气的影响，特别是在诸如台风、雷暴等剧烈天气过程中 [1]−[5]. 图 1 为一次台风登陆前后电离层临界频率的变化. 找到并理解台风等较强天气过程与电离层之间存在的关系，无论是对电离层研究或台风预报都是很有意义的. 在这方面，已经有了一些观测和理论工作.

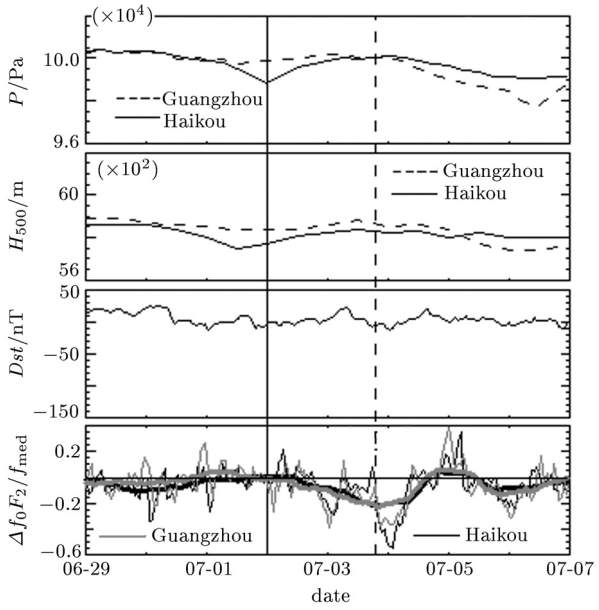


图 1 2001 年台风 Durian 登陆前后电离层 f_0F_2 的变化 (垂直实线为台风的登陆时刻，垂直虚线为 f_0F_2 下降到最小值的时刻，$f_{\rm med}$ 为月中值)

Fig.1 Variations of f_0F_2 during the period of typhoon Durian, 2001. The vertical solid line denotes the time of typhoon's landing, and the vertical dashed line denotes the time when f_0F_2 reaches its minimum

Bauer[1] 曾报告了台风过境时的电离层响应, 认为台风时期对流层内的气流系统会直接发展到电离层高度, 从而影响那里的电子密度, 但这一理论并未得到广泛认同. 沈长寿 [2] 统计分析发现, 海南岛附近台风临近前后，300 km 高空电离层 f_0F_2 有明显的下降，并认为这种现象可能是台风活动导致平流层的大气上升，而中间层内的气温结构又有利于这一气流的继续发展，最终中间层顶附近的上升气流使得湍流层顶抬高的结果. 他们还分析了 1968—1975 年寒潮过境时乌鲁木齐和长春台站电离层 f_0F_2 的变化, 结果表明寒潮过境时夜间 f_0F_2 有下降趋势, 并将这种下降的可能原因归结为寒潮中激流带底部风剪切不稳定性产生的重力波向上传至电离层高度对电子浓度分布影响的积累效应 [6]. Huang 等 [7] 利用高频多普勒探测阵对由台风产生的声重力波的可探测性进行了研究，结果表明可以用高频多普勒探测阵探测由台风引起的声重力波，但是可探测性不高. 在台湾岛 1982—1983 年间发生的所有台风中，在去掉仪器设备失败的影响外，12 次台风中仅有 2 次探测到了台风激发的声重波. 他认为这可能是由不同台风源的强度，离探测阵的距离，以及声重波传播过程中由于背景大气的反射、折射而偏离探测阵的方向和水平中性风、地磁等的影响造成的 *. 结合北京大学高频多普勒台站多年来的一些典型资料，针对几次台风登陆事件的高频多普勒资料及相关的台风资料进行了分析. 结果表明，台风过境期间，电离层中出现明显的波状扰动，波逐渐由高频向较低频率过渡, 形成中尺度的电离层行扰 (TIDs), 并在夜晚激发了电离层中的不规则结构. 特别是有 5 次台风影响的后期，电离层形态中出现了类似日出效应的现象，即观测到的高频多普勒频移出现下降趋势. Isaev[8] 和 Sorokin[9] 等还分析了台风时期低纬电离层中电场的变化，他们的分析结果表明台风时期，低纬电离层中电场有较大的扰动，从而也会对电离层产生重要的影响.

目前，中低层大气与电离层 (或高层大气) 耦合研究的主要着眼点多为下方激发波动并向上传播，而这种传播本身往往是十分困难的 [10]. 沈长寿 [2] 曾经提出湍流层顶的移动可能是中低层大气与电离层耦合的可能机制，但没有进行进一步的探讨. Wang 和 Nielsen[11] 在研究火星沙尘暴对电离层的影响时发现，湍流层顶抬高可以影响高层大气的结构，从而显著影响电离层中的光化学过程，最终对电离层产生显著影响. 这一工作证明湍流层顶高度的改变是一种很有效的行星低层大气与电离层耦合的机制，并暗示在地球上也可能发生类似的情况. 本文利用与文献 [11] 同样的思路，通过数值模拟的方法，探讨地球大气湍流层顶抬高对高层大气密度分布的影响，进而研究台风等强天气过程通过这种机制对电离层 F_2 层的影响.

* 肖赛冠等. 台风登陆的电离层效应 —— 几次特例的观测与数值模拟. 第十届全国日地空间物理学术讨论会，2003

2 模型描述

根据大气成分垂直分布的特点，地球大气可以分为均匀层和非均匀层 [12]. 在低层大气中，空气分子运动的平均自由程很短，湍流混合作用要比分子扩散混合作用大得多，以湍流混合过程为主. 在此高度范围内大气的组成与高度无关，各种气体均匀混合, 为均匀层. 均匀层中分子按同样的标高扩散，描述这种扩散的物理量为湍流扩散系数 (D_t). 在均匀层以上，分子扩散起主要作用，大气成分按各自的标高扩散，它们之间的比例不再固定不变，这里的大气称为非均匀层，描述非均匀层中分子扩散的物理量为分子扩散系数 (D_m), D_m 与中性分子的密度成反比 [13]. 大气湍流扩散系数与分子扩散系数相等的地方即为湍流层顶，地球大气湍流层顶大致在 100 km 高度附近. 在湍流层顶附近，分子扩散与湍流混合两种作用大小差不多; 在湍流层顶以下 D_t 大于 D_m, 而在湍流层顶以上 D_t 小于 D_m.

Izakov[14] 曾经计算了火星沙尘暴期间和平静期湍流扩散系数 (D_t) 和分子扩散系数 (D_m) 的高度剖面 (见图 2). 他的计算结果表明, 沙尘暴期间火星低层大气的湍流扩散系数增加和低层大气膨胀会使得火星湍流层顶从 125 km 上升到 150 km, 计算结果与观测结果符合得非常好. 同样的道理，在台风登陆期间，由于强烈的海气、陆气相互作用，会使低层大气中的湍流过程加强, 从而使得湍流扩散系数 D_t 增加，同时低层大气的膨胀使得分子扩散系数 D_m 减小. 低层大气中 D_t 的增加及 D_m 的减小会使得湍流层顶抬高，从而使得湍流层顶处的大气组成发生变化. 由于湍流层顶处的大气组成是高层大气成分按各自标高垂直分布的下边界，湍流层顶的改变自然就改变了高层大气的结构.

利用 MSIS 模型可以考虑这种由湍流层顶抬高引起的高层大气结构变化. 显然，大气中 $[N_2]/[O]$ 的变化会对电离层产生重大影响，比如在电离层暴期间 [15], 但本文主要是分析湍流层顶抬高引起的高层大气结构变化，因此这里主要考虑了大气的主要成分 N_2 和 O_2. 假设湍流层顶高度 (Z_t) 从 95 km 抬高到 105 km, 从图 3 可以看出，湍流层顶高度以上两种中性成分密度与湍流层顶未抬高以前相比均有所增加.

由于高层大气分布是电离层光化学过程的背景，大气分布的改变势必会对电离层产生影响. 本文用文献 [16] 建立的一维电离层物理模型来模拟这种影响. 由图 4 可知, 该模型与 IRI2000 的对应结果及相关观测结果基本一致，证明该模型是适用的. 本文在台风等剧烈天气过程能抬高湍流层顶高度的假设下，以前述中性大气的变化为输入条件，模拟了台风对电离层可能造成的影响，并与观测结果进

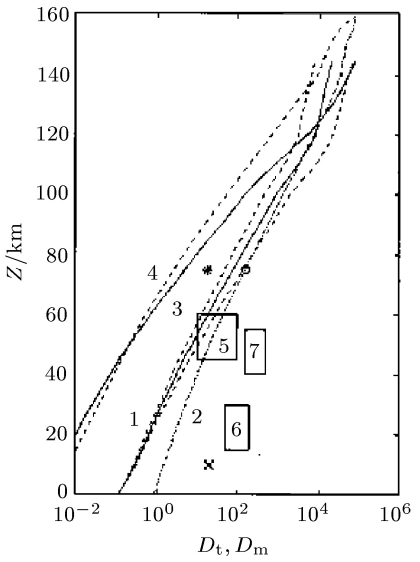


图 2 火星沙尘暴期间和平静期湍流扩散系数 D_t 与分子扩散系数 D_m 的高度剖面 (实线 1 和 3 以及虚线 2 和 4 分别表示平静期和沙尘暴期间的 D_t 和 D_m)

Fig.2 Vertical profiles of turbulent (D_t) and molecular (D_m) diffusion coefficient in Martian atmosphere (Curve 1 and 3 denote D_t and D_m for quiet conditions; curve 2 and 4 denote D_t and D_m for a dust storm, respectively)

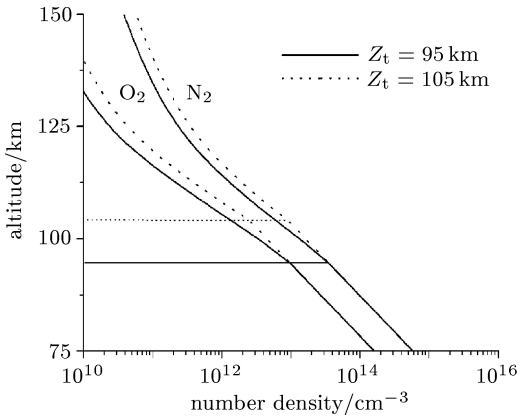


图 3 湍流层顶抬高中性成分密度的变化

Fig.3 Variations of neutral atmosphere due to the raise of turbopause in altitude

行对比.

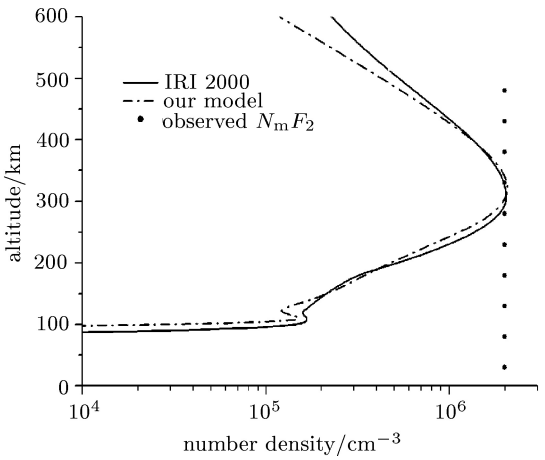


图 4 由本文模型所得北京地区电子密度剖面及其与 IRI2000 和观测值的比较

Fig.4 Comparison among profiles of electron density over Beijing area obtained from our model, IRI2000 and observation

3 结果描述与讨论

为了使问题更加简单清晰，本文暂时忽略地磁活动对电离层的影响，所以选取 Ap 指数趋近于 0 的日子 (2000 年 3 月 21 日) 为代表. 由于在低纬地区电离层具有很强的水平梯度造成的水平输运，一维电离层模型不适用于低纬地区，本文模拟了日本中纬地区 (45°N, 142°E) 湍流层顶抬高对 F_2 层的影响.

图 5 显示了湍流层顶抬升而导致的电离层 F_2 区电子密度剖面的变化. 进一步分析可以得到如下结果.

(1) 随着湍流层顶的抬高， f_0F_2 下降，如图 6 所示. 这与沈长寿 [2] 的统计结果是相符的. 如图 3 所示，湍流层顶抬高将使电离层中的中性分子成分相对增多，而 F_2 层中电子的复合系数是与大气分子、原子的浓度成正比的，因此 F_2 层中性成分相对增多必然使电子复合系数增大，从而 N_mF_2 降低，即 f_0F_2 降低. 随着湍流层顶的进一步抬高，电离层中中性成分相对浓度将进一步增加，电子复合系数进一步增大，所以随着湍流层顶越来越高， f_0F_2 越来越小.

(2) 随着湍流层顶的抬高， h_mF_2 上升，如图 7 所示. 这是可以理解的. Rishbeth[17] 指出， F_2 层

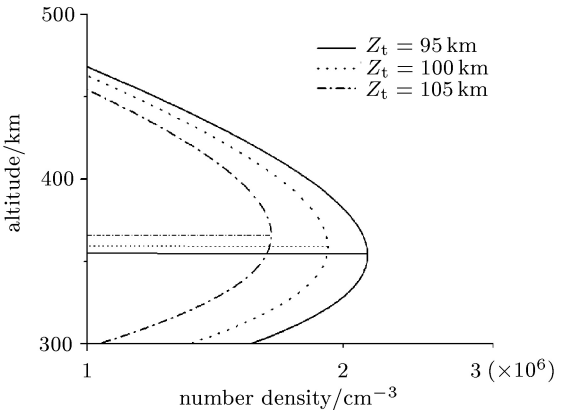


图 5 湍流层顶升高 F_2 层变化图

Fig.5 Variations of F_2 layer due to the raise of turbopause in altitude

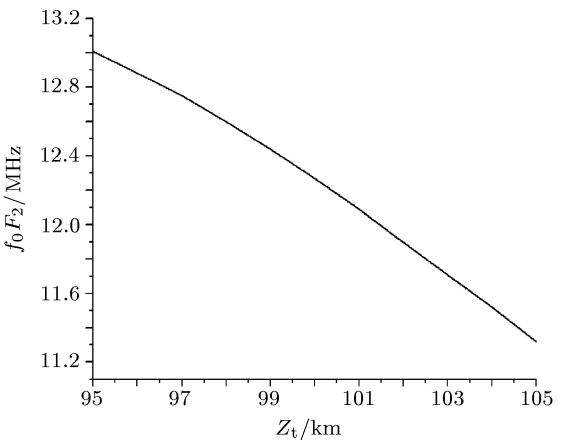


图 6 f_0F_2 随湍流层顶高度变化

Fig.6 Variation of f_0F_2 due to the raise of turbopause in altitude

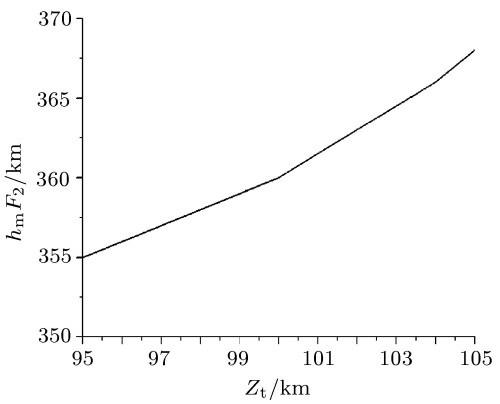


图 7 h_mF_2 随湍流层顶高度变化

Fig.7 Variations of h_mF_2 due to the raise of turbopause in altitude

峰出现在扩散项与损失项同样重要的高度上，即 $\beta \approx D_a/H^2$ 的高度上，其中 β 为复合系数，D_a 为扩散系数. 扩散系数 D_a 与离子和中性分子的碰撞频率成反比，而这一频率又正比于中性分子的密度，所以 D_a 与中性成分的密度成反比，即随高度指数增加，复合系数 β 随高度指数减小. 如图 3 所示，湍流层顶抬高使得湍流层顶以上中性成分密度增加，导致 D_a 减小和 β 增加，从而使得 F_2 峰值高度上升. 图 8 显示了台风 Durian 登陆后抬升湍流层顶并由此导致的 f_0F_2 和 h_mF_2 时变曲线.

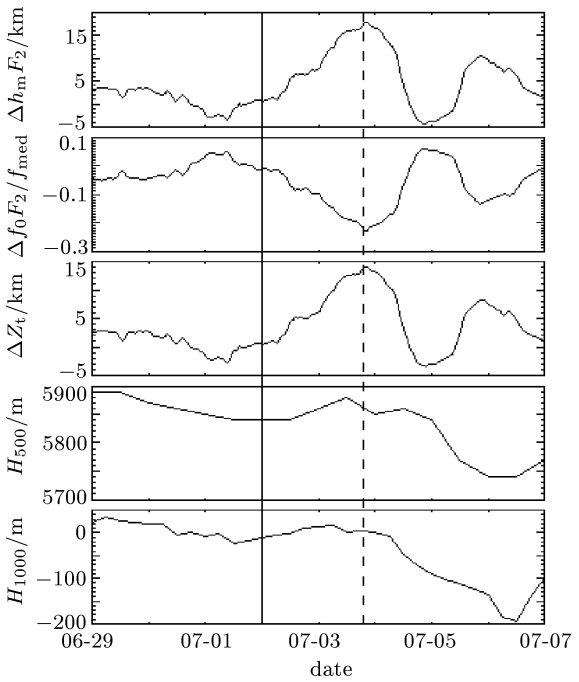


图 8 2001 年台风 Durian 抬升湍流层顶 Z_t 及由此导致的 f_0F_2 和 h_mF_2 时变曲线

Fig.8 Variations of Z_t, f_0F_2, h_mF_2 during the period of typhoon Durian, 2001

(3) 如图 9 所示，给定频率的电磁波在电离层中的反射高度 (Z_f) 随湍流层顶的抬高而上升；同时由图 3 又可推出电波所经路径上的电子浓度普遍减少，故其相路径减小. 多普勒频移微分效应和积分效应是不可分割的 [18]，反射面的上升和电波所经路径上电子浓度减少均能使高频多普勒信号出现频移下降. 这可用来解释肖赛冠等在台风登陆期间，接收的电波有负相偏移的观测结果.

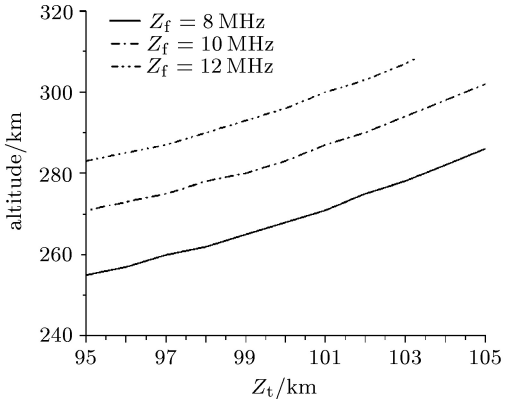


图 9 反射高度随湍流层顶高度变化

Fig.9 Variations of reflecting altitudes due to the raise of turbopause in altitude

4 小结

本文的主要工作是在台风活动抬升了湍流层顶的前提下，利用我们建立的一维电离层模型 [16]，模拟了日本中纬地区电离层 F_2 区的响应. 模拟结果如下.

(1) 台风登陆期间，电离层 f_0F_2 会下降. 这与现有的观测结果是一致的.

(2) 台风时期电离层 h_mF_2 会上升. 关于这一点虽然目前还缺少统计分析结果来证实，但是从理论上是可以解释的.

(3) 给定频率电波在电离层中的反射面会抬升；电波传播路径上的电子密度减小，故其相路径减小. 这可以比较有力地解释现有的观测现象.

以上结果说明如果台风等强天气过程能抬升湍流层顶的话，那这种抬升很可能是台风影响电离层 F_2 区的一种十分有效的机制. 如果这种机制被证实，那么我们就可以定量地分析台风对电离层各参数的影响，这无论是对电离层研究还是台风预报等都是很有意义的.

参考文献

[1] Bauer S J. An apparent ionospheric response to the passage of hurricanes. *J. Geophys. Res.*, 1958, **63**:265—269

[2] Shen Changshou. The correlations between the typhoon and the f_0F_2 of ionosphere. *Chin. J. Space Sci.*, 1982, **2**(4):335—340. in Chinese (沈长寿. 台风与电离层 f_0F_2 相关性的探讨. 空间科学学报, 1982, **2**(4):335—340)

[3] Baker D M, Davies K. F_2-region acoustic waves from severe weather. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1969, **31**:1345—1352

[4] Davies K *et al.* Ionospheric disturbances in the F_2 region associated with severe thunderstorms. *J. Atmos. Sci.* 1971, **28**:254—262

[5] Prasad S S *et al.* Ionospheric disturbances by severe tropospheric weather storms. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1975, **37**:1357—1363

[6] Shen Changshou, Zi Minyun. The crossing of cold front and the night f_0F_2. *Chin. J. Space Sci.*, 1986, **6**(3):211—215. in Chinese (沈长寿, 资民筠. 关于寒潮对夜间 f_0F_2 影响的探讨. 空间科学学报, 1986, **6**(3):211—215)

[7] Huang Yinnnien, Cheng Kang, Chen Senwen. On the detection of acoustic-gravity waves generated by typhoon by use of real time HF Doppler frequency shift sounding system. *Radio Sci.*, 1985, **20**(4):897—906

[8] Isaev N V, Sorokin V M, Chmyrev V M, Serebryakova O N, Yashchenko A K. Disturbance of the electric field in the ionosphere by sea storms and typhoons. *Cosmic Res.*, 2002, **40**(6):591—597

[9] Sorokin V M, Isaev N V, Yaschenko A K, Chmyrev V M, Hayakawa M. Strong DC electric field formation in the low latitude ionosphere over typhoons. *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, 2005, **67**:1269—1279

[10] Zhang Shaodong, Yi Fan. A numerical study of propagation characteristics of gravity wave packets propagating in a dissipative atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 2002, **107**(D14):ACL 14-1-14-9

[11] Wang J S, Nielsen E. Behavior of the Martian dayside electron density peak during global dust storms. *Planet. Space Sci.*, 2003, **51**:329—338

[12] Syun Ichi Akasofu, Sydney Chapman. Solar-Terrestrial Physics. Oxford: Oxford University Press, 1972

[13] Yamanaka M D. Homopause control by gravity wave breaking in the planetary atmospheres. *Adv. Space Res.*, 1995, **15**(4):47—50

[14] Izakov M N. Turbulence and anomalous heat fluxes in the atmospheres of Mars and Venus. *Planet. Space Sci.*, 2001, **49**:47—58

[15] Tu Chuanyi. Solar Terrestrial Physics. Beijing: Science Press, 1988. in Chinese (涂传诒等. 日地空间物理学. 北京：科学出版社, 1988)

[16] Deng Yue, Wang Jingsong, Xiao Zuo. A physical model for ionospheric vertical profile and comparison between it and IRI-90. *Chin. J. Space Sci.*, 2000, **20**(2):103—112. in Chinese (邓悦, 王劲松, 肖佐. 一种电离层垂直剖面物理模型及其与 IRI-90 模型的比较. 空间科学学报, 2000, **20**(2):103—112)

[17] Rishbeth H *et al.* Introduction to Ionospheric Physics. New York: Academic Press, 1969

[18] Xiao Zuo, Liu Kaijun, Zhang Donghe. Some typical records of ionospheric Doppler shift and their significance in the study of ionospheric morphology. *Chin. J. Space Sci.*, 2002, **22**(4):321—329. in Chinese (肖佐, 刘凯军, 张东和. 典型电离层多普勒记录及其讨论. 空间科学学报, 2002, **22**(4):321—329)