

142-148

第17卷 第2期
1997年4月空间科学学报
CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCEVol.17, No.2
Apr., 1997中纬电离层暴时形态的
理论模式研究*

张顺荣 黄信榆

(中国科学院武汉物理研究所 430071)

摘 要

P352.4

A 结合观测结果对中纬电离层暴时形态进行理论模式研究, 分析了两次电离层暴变事件中影响其基本形态的原子-分子含量比、上部输运通量和中性风等因素的行为, 发现在这两次具有不同特点的事件中, 中性风较为平稳, 而原子-分子含量比和耦合输运通量的相对作用则各不相同。

关键词 电离层暴—电离层模拟—输运通量—原子—分子含量比

中纬电离层 1 引 言

在一定的太阳电离辐射强度和热层温度等基本背景下, 引起中纬电离层 F_2 层变化的主要物理机制可以概括为 3 个方面, 1 是中性的原子-分子含量比的变化; 2 是中性风与电场引起的漂移变化; 3 是受上部电离层或等离子体层耦合输运通量的影响而引起的变化。这些机制在电离层平静状态发生作用, 在扰动和暴变时亦然。对此, 前人作过大量的理论探讨、模拟计算和观测数据的直接分析^[1-4], 但从总体上看, 理论和观测手段的联合运用还较少见。每一次具体的暴, 各因素的相对重要性各异, 因此在作定性的理论分析及定量计算时, 必须尽可能充分地利用实际电离层观测数据, 方可得到较明确的结果。我们采用较严格的电离层理论模型和简明而物理意义明晰的伺服模式, 对两次电离层暴期间的垂直探测数据进行综合分析, 以探讨电离层暴变过程的某些特点, 确认有关过程的作用。我们将特别注意观测结果同理论模式的充分融合。

2 理论基础

我们的总体思路是, 利用观测的最大电子浓度和所在高度获取背景中性风的信息, 其理论依据是“伺服理论”^[1]; 利用一个中纬电离层的时变理论模式^[6, 7], 并结合上述“伺服风场”和经验模式风场, 配合使用观测的电离层参数, 确定中性成份含量比、热层

* 国家自然科学基金重大项目资助课题

1995-10-15 收到原稿 1996-12-11 收到修定稿

** 张顺荣, 中纬电离层结构的时变理论模式及其在电离层形态与机制研究上的应用, 博士学位论文, 中国科学院武汉物理所, 1995

风引起的漂移和顶部通量对观测形态的相对作用的大小。

2.1 “伺服风场”

本文的基本算法与文献[8]类似, 其基本原理是, 在稳态电离层条件下, 峰高位于由扩散与复合所决定的平衡高度, 外加的风场(及电场)引起的垂直漂移, 将使平衡高度发生向上或向下按指数函数变化的移动; 相应的最大电子浓度由产生与复合过程决定。这一理论强调电离层峰高对垂直漂移的响应。由此可得由外加风场(及电场)引起的垂直漂移速度 W , 即伺服方程^[5]

$$W = H \frac{dz_m}{dt} + (\alpha - 1) \frac{q_m}{N_m} H - \frac{k\alpha c - 1}{k} \beta_m H + \frac{D_m \sin^2 I}{2H} .$$

式中, H 为氧离子标高; α 为 Chapman- α 层厚度因子, 取为 2.82, q_m , N_m , β_m 和 D_m 分别为峰高附近的氧离子产生率, 最大氧离子(电子)浓度, 复合率和双极扩散系数, k 为复合率标高系数, 当考虑由 O_2 与 N_2 引起的氧离子复合时, $k=1.875$; I 为磁倾角; z_m 为约化高度, 定义为 $z_m = (h_m - h_0) / H$, h_m 为 F_2 层峰高 $h_m F_2$, h_0 为平衡高度, 须事先另行求出; c 为半经验参数, 它将扩散引起的电子浓度的改变, 归入连续方程的复合率项, 在本项研究中, 通过和理论模型(下节)所计算的平衡高度比较, 发现取 1.2 / 2.2 这一组白天 / 夜间值较为合适, 其中用到的 N_m 与 h_m 皆由实测确定, 其中峰高是根据文献[9]的方法反演得到。

垂直漂移 W 仅包含风场和电磁漂移的贡献, 其等效子午风为 $U = W / \sin I \cos I$ (电场的贡献已归入其中)。

2.2 时变电离层模式

我们采用的时变电离层理论模式, 基于氧离子连续性方程和动量方程以及分子离子的光化平衡条件, 在氧离子的动力输运中包含扩散、水平热层风和电场引起的输运(本文暂不单独考虑电场的贡献), 中性大气密度与温度和太阳极紫外通量, 由 MSIS86^[10] 和 EUV91^[11] 确定; 用 IRI90^[12] 确定离子与电子温度, 模式的下边界设于电离层 100km 处, 处于光化平衡; 由于不计及氢离子的贡献, 把上边界(本文亦称“顶部”)设在 500km 处, 将是较为可靠的, 该处离子浓度有两种处理方法, 或者简单地采用 IRI90 的相应值, 或者逐步修正该顶部边界值, 以使模拟和观测的 $f_o F_2$ 相符, 实际计算表明, 只要采用合适的算法, 模拟结果可以很快收敛到观测值上, 热层风速也有两种确定方法, 直接使用经验水平风模式 HWM90^[13] 最为简便易行, 另外, 采用上节提到的“伺服风场”, 并将这一峰高附近的值, 按照 HWM90 的风随高度变化的函数延拓到其它区域, 在修改顶部边界和使用伺服风场的情况下, 理论模式采纳了电离层观测结果。

3 结果与讨论

本文所分析的发生于武昌(30.5°N, 114.4°E)地区的二次事件, 分别为具有中等太阳活动强度的 1992 年 12 月 27—29 日(月平均太阳黑子数为 73.2), 其中 A_p 指数在 27 日为 8, 28 日达 39, 简称事件 I。一次为具有较强太阳活动性的 1991 年 3 月 21—24 日

(月均黑子数为 146.6), 其中 A_p 指数在 24 日达 61, 简称事件 II. 观测的峰值参量如图 1 所示.

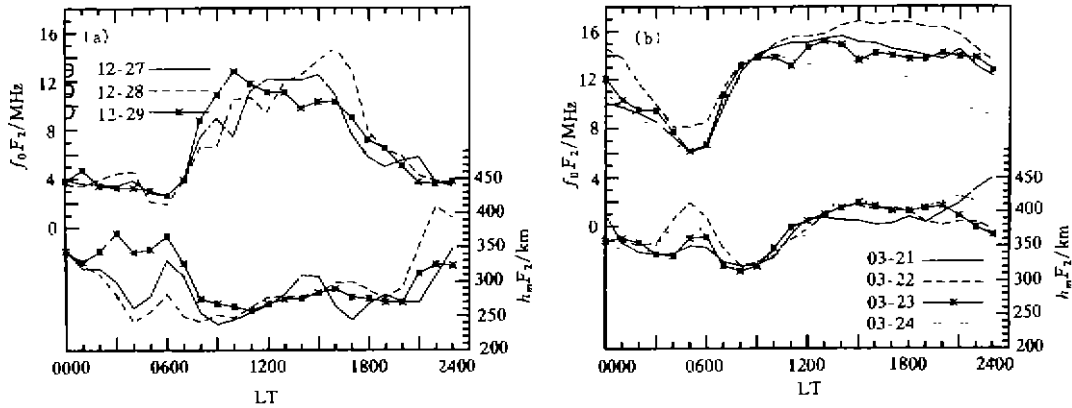


图 1 两次事件中武昌地区(a)1992-12-27—29 (b)1991-03-21—24 日电离层临界频率 f_oF_2 及峰值浓度所在高度 h_mF_2 随地方时的变化

Fig.1 The observed f_oF_2 and h_mF_2 variations with local time at Wuchang

在事件 I 中, 28 日的 f_oF_2 于 1200—1800LT 间较前后日子明显地增大, 颇为引人注目, 我们将着重讨论这一现象. 事件 II 中, 1200LT 后 f_oF_2 的起伏现象也很令人感兴趣.

3.1 伺服风场(垂直漂移)

利用伺服模式获得的伺服风场如图 2 所示. 在第一次事件中, 在 1200—1800LT 时段由于 27 日峰高不同于 28 日与 29 日, 故所得垂直漂移亦是如此. 第二次事件中, 对午后时段, 21 日的漂移也同样明显区别于其它日子.

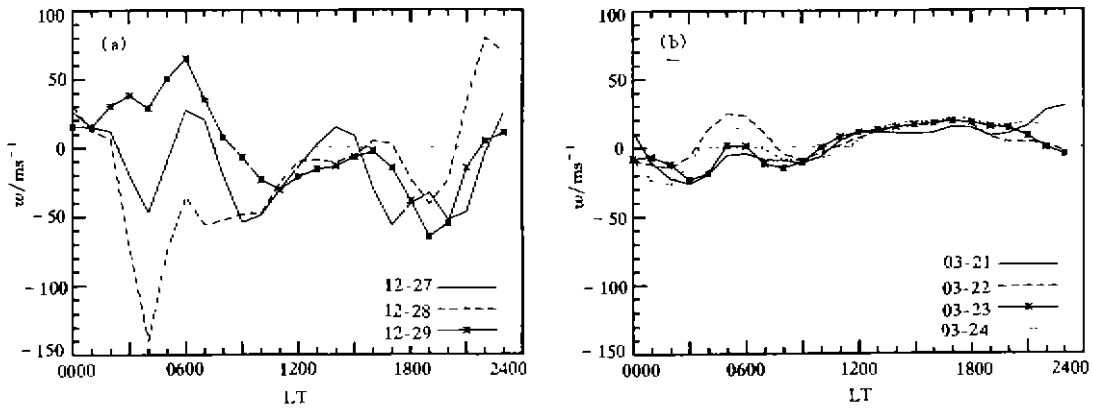


图 2 两次事件中武昌地区电离层垂直漂移 w (a)1992-12-27—29 (b)1991-03-21—24 随地方时的变化

Fig.2 The servo-model-based winds as a function of local time at Wuchang

3.2 对事件 I 的分析

当在理论模式中使用伺服风场, 顶部采用 IRI90 作为边界条件, 我们发现模拟计算的峰值浓度所在高度的变化(图 3)同实际观测趋于一致; 若以经验的水平风模式取代伺服风场, 则在白天的峰高明显偏离于观测值, 这说明所采用的伺服风场基本上是适宜的. 但由此得到的 f_0F_2 低于观测值(图 4), 究其原因, 不外乎顶部通量不适当, 或是原子-分子含量比的 MSIS 经验模式值不适当, 下面分别进行讨论.

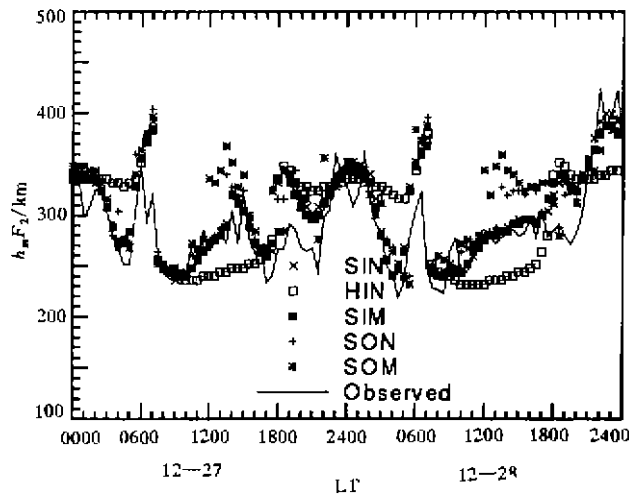


图 3 理论模拟的峰高变化(1992-12-27-28)

Fig.3 The simulated $h_p F_2$ variations for 27-28 December 1992

先看原子-分子含量比的作用. 根据对电离层 F_2 层光化过程的分析, 人们确信, 最大电子浓度正比于原子-分子含量比. 不过, 实际情况往往复杂得多, 其中动力效应具有不可忽视的影响, 例如中部电离层同其上部发生耦合作用: 当中性气体含量的变化引起氧离子同中性粒子的碰撞频率改变时, 耦合输运通量的大小也将随之变化. 一般地说, 氧原子含量减少(或降低原子-分子含量比), 一方面通过光化作用直接减少氧离子浓度, 另一方面由于流向上部电离层的通量减小(白天), 中电离层的损耗减小. 其净效果是, 氧离子浓度的减少将没有纯粹含量比控制机制所预计的那样多. 现在假定把 MSIS86 的含量比减小 50%(氧原子的含量减少, 氮氧分子不变), 计算所得 f_0F_2 减少, 顶部通量亦然(图 5), 而峰高基本维持不变. 总之, 原子-分子含量比所引起的变化, 对峰高影响不大, 对顶部通量有部分影响, 但对最大电子浓度产生可观的影响. 值得特别注意的是, 在我们所分析的两天的中, 上述特点并不因 A_p 指数所表征的磁活动性的改变而显不同.

顶部通量的作用则有所不同. 如果同样使用伺服风场, 但根据观测的 f_0F_2 修正顶部边界值, 那么理论模拟计算表明, 在磁活动较强的 12 月 28 日午后 1600LT, 出现明显的向下电离通量, 而在前一天无此现象. 受通量改变的影响, 模拟的电离层峰高比观测结果要高, 但主要发生于出现较大向下输运之前(图 3). 图 3-5 中各曲线对应代码 SIM 等所代表的物理条件相同, S 代表包含伺服风场; H 代表 HWM90 风场, I 代表用 IRI90 值,

O 代表用观测的 f_oF_2 作修正, N 代表不对MSIS86含量作调整, M 代表作调整(乘以0.5), 在此基础上再调节原子-分子含量比时, 上述情况几乎不变。

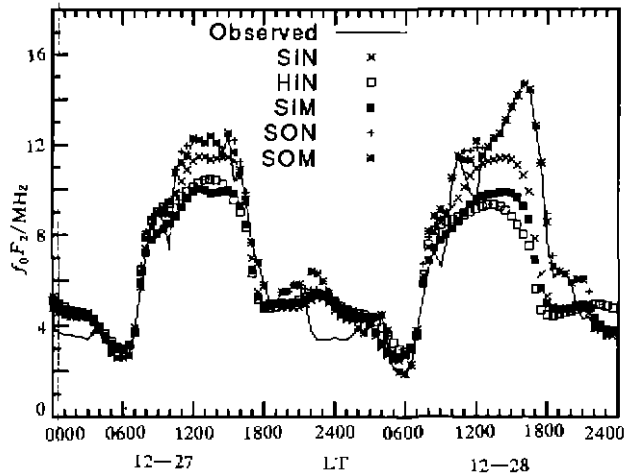


图4 理论模拟的临界频率变化
(1992-12-27-28)

Fig. 4 The simulated f_oF_2 variations for 27-28 December 1992

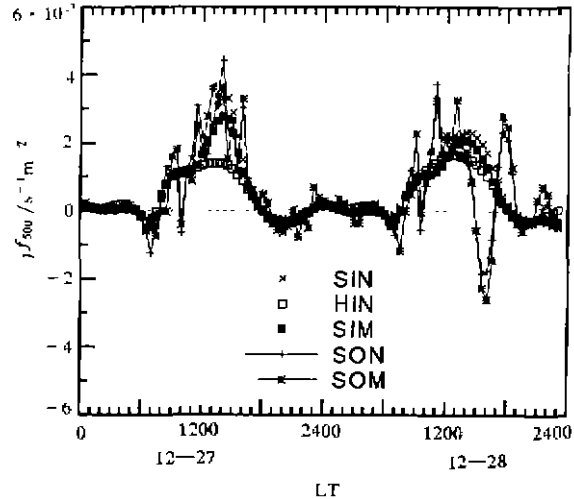


图5 理论模拟的500km通量变化
(1992-12-27-28)

Fig.5 The simulated flux variations at 500 km for 27-28 December 1992

综上所述, 在本次电离层事件中, 在电离层峰高、峰值浓度和顶部输运通量3个重要参量中, 由峰高所反映的中性风速变化较不显著, 其暴变效应较小; 中性的原子-分子含量比和上部电离输运对峰值浓度都有较大影响, 特别是在暴变强烈的白天时间, 伴随有可观的来自上部的电离源。

3.3 对事件II的分析

采用与分析事件I完全相同的方法, 分别讨论中性风和原子-分子含量比的作用以及顶部输运的变化, 可以获得基本类似的结果, 有两个方面的不同点值得注意, 即含量比的变化和顶部输运的相对作用有所改变。在这里, 采用伺服风场的情况下, 如果不对MSIS的含量比加以调整, 便无法得到一个物理意义正确的顶部含量值, 使得模拟的最大电子浓度与观测相吻合, 这一情况发生在每天0900-1800LT间, 基本上对应于最大电子浓度有特殊变化的时间。当把MSIS的含量比减少50%(氧原子的含量减少, 氮氧分子不变)时, 理论模拟便既可给出合理的顶部通量又能趋于观测的最大电子浓度值。这至少表明, 经验大气模式MSIS所给出的原子-分子含量比在此期间同实际情况有较大偏离(MSIS值偏大); 引伸一步, 本次事件前后, 中性原子-分子含量比可能存在某种特殊变化, 它强烈地影响到电离层的形态变化。

顶部输运通量的形态, 也有别于事件I, 在我们特别关心的1200-1800LT时段, 虽然峰值浓度在四天中出现先增后减的变化, 反映在通量上, 只是强度大小上的差异, 没有出现方向上的根本性变化。

4 结 束 语

我们结合实验观测结果, 采用理论模式和模拟计算的方法, 从影响电离层基本形态的原子-分子含量比、上部输运通量和中性风的角度, 研究了两次电离层事件的基本特点。其主要结论是:

在 1992 年 12 月 27—29 日事件中, 暴时出现较强烈的由上部电离层至电离层 F_2 层的输运过程, 造成电子浓度的增长; 中性大气的原子-分子含量比也对观测的浓度增长有一定贡献; 在此期间, 中性风的变化不太强烈。

在 1991 年 3 月 21—24 日事件中, 可能出现的异常原子-分子含量比变化, 对电离层 F_2 层形态具有重要影响; 上部电离层与 F_2 层之间的耦合输运通量未见有特殊变化; 热层风速亦在基本正常的范围内变化。

从上述研究中, 我们有这样的看法, 每一具体的电离层事件, 发生于不同的背景条件下, 造成其变化的驱动原因各不相同, 很难找到所谓的普适机制, 因此进行理论分析包括理论模拟计算时, 必须充分地利用观测结果。

感谢梁尚琪同志提供了观测和反演的最大电子浓度及其所在高度的数据, 理论模式中使用的全部外部经验模式, 由美国 NASA 的 Godard 空间飞行中心提供。

参 考 文 献

- [1] Rishbeth H, Fuller-Rowell T J, Rodger A S. F-region storms and thermospheric disturbances. *Phys. Scr.*, 1987, **36**: 327—336
- [2] 涂传诤, 贾志华. 中纬电离层暴时相期间 F_2 层临界频率 f_oF_2 变化的模式. 中国科学 A 辑, 1982, (12): 1146—1154
- [3] Fuller-Rowell T J, Rees D, Quegan S, et al. Interaction between neutral thermospheric composition and the polar ionosphere using a coupled ionosphere-thermosphere model. *J. Geophys. Res.*, 1987, **92**: 7744—7748
- [4] Mikhailov A V, Skoblin M G, Forster M. Daytime F_2 -layer positive storm effect at middle and lower latitudes. *Ann. Geophysicae*, 1985, **13**: 532—540
- [5] Rishbeth H, Ganguly S, Walker J C G. Field-aligned and field perpendicular velocities in the ionospheric F_2 -layer. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1978, **40**: 767—784
- [6] Zhang S R, Huang X Y, Su Y Z, et al. A physical model for one-dimension and time-dependent ionosphere. Part I. Description of the model. *Annali di Geofisica*, 1993, **36**: 105—110
- [7] Zhang S-R, Huang X Y. A numerical study of ionospheric profiles for mid-latitudes. *Ann. Geophysicae*, 1995, **13**: 551—557
- [8] Zhang S R, Huang X Y, Su Z. Monthly average behavior and oscillation of derived ionospheric drifts. Report UAG-104. *Ionosonde Networks and Stations*. WDC-A for STP, NOAA, Boulder Co., 1995. 127—133
- [9] Huang X Y, Su Y Z, Zhang K. Ionospheric structure and profile over Wuchang, China. *Adv. Space Res.*, 1995, **15**(2): 149—152
- [10] Hedin A E. MSIS-86 thermospheric model. *J. Geophys. Res.*, 1987, **92**: 4649—4662
- [11] Tobiska K. Revised solar extreme ultraviolet flux model. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1991, **53**: 1005—1018
- [12] Bilitza D. International Reference Ionosphere 1990, National Space Science Data Center / World Data Center A for Rockets and Satellites 90—22, 1990
- [13] Hedin A E, Biondi M A, Burns R G et al. Revised globe model of thermospheric winds using satellite and

ground-based observations. *J. Geophys. Res.*, 1991, **96**: 7657—7688

A MODEL STUDY OF THE STORM-TIME BEHAVIOUR FOR MID-LATITUDE IONOSPHERE

ZHANG Shunrong HUANG Xinyu

(*Wuhan Institute of Physics, The Chinese Academy of Sciences, 430071*)

Abstract

This paper introduces a new method of the theoretical modeling and simulation of the ionospheric storm behaviour in mid-latitudes, with the use of the experimental ionospheric data. The effects of the atom-molecule ratio, topside fluxes and neutral winds on the ionospheric structure are discussed for the two very different storm events. It is found that, neutral winds vary steadily during the events, while the relative importance of the ratio is distinct in each event, and the fluxes differ also. These suggest that the ionospheric behaviour in the storm time has many dependencies, which can only be determined by the concrete solar-geophysical and atmospheric background conditions.

Key Words Ionospheric storm, Ionospheric simulation, Transport flux, Ratio of atom molecule composition