第20卷 第1期 空 间 科 学 学 报 Vol.20, No.1
2000 年 1月 CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE Jan., 2000

中性风和垂直漂移对低纬 F 区电离层影响初析*

刘立波 万卫星
(中国科学院武汉物理与数学研究所 430071)
涂剑南
(武汉大学空间物理系)
保宗悌
(华南师范大学物理及信息工程系)

摘 要

利用二维低纬电离层－等离子体层时变理论模式，模拟太阳活动高年春分条件下垂直漂移和中性风强度改变对低纬 F 区电离层参量的影响. 模式在所考察的磁子午面内求解等离子体输运方程，给出离子浓度和速度随纬度、高度、地方时的变化. 模式计算结果显示，调整垂直漂移和中性风强度对低纬 F 区电离层电子浓度的影响与电离层所处磁纬、垂直漂移和中性风作用时段等有关，呈现出一些新特点. 结果对分析不同条件下垂直漂移和中性风对低纬 F 区电离层影响具有一定的指导意义.

关键词 低纬电离层－电离层理论模式－垂直漂移－中性风

1 引 言

模式化方法对加深电离层大尺度结构、动力学行为和能量传输与耦合过程等的认识起着日益重要的作用. 依照模式所选取坐标系的运动情况，电离层理论模式可分为坐标系随等离子体一起运动的拉格朗日模式和坐标系相对地球静止 (格点固定) 的欧拉模式 [1]. 为避免这两类模式目前存在的一些缺陷，涂剑南等 [1] 构建了一个二维低纬电离层模式，模式以 O^+ 和 H^+ 为主要离子成份，在相对地球静止的磁坐标系中求解方程. 随后我们对该模式进行了发展，引入 He^+ 为主要离子成份，以考虑了三类主要离子动力学耦合效应的输运方程为模式的基本出发方程，并增加了一些对 F 层和顶部电离层离子化学过程有重要影响的反应过程和参数. 改进后的模式可应用于中低纬电离层、等离子体层区域.

电磁垂直漂移和中性风是影响低纬电离层重要的动力学因素. 电离层电子浓度等对这两个因素反应很敏感，而这两个因素存在复杂的变化形态，在不同活动条件下它们的强度、方向均可能发生显著变化. 可是，电离层各参量对它们强度改变的反应怎样？特别是其强度逐渐变化时所受影响变化趋势如何？了解这些问题无疑将对分析不同条件下漂移

* 国家自然科学青年基金资助项目 49804008
1998-10-29 收到原稿， 1999-06-28 收到修定稿

和中性风作用具有重要意义. 为此, 以东亚扇区春分季节为代表, 利用此模式考察垂直漂移和中性风强度变化对低纬 f_0F_2 的影响.

2 模式简介

模式考虑了 O^+(计入其 4S 、 2D 、 2P 能级分叉) 、 H^+ 、 He^+ 、 N_2^+ 、 O_2^+ 、 NO^+ 等 6 种离子, 相应的 6 个光化学过程和 30 余个离子化学过程. 所用基本方程为等离子体输运方程, 考虑了 O^+ 、 H^+ 、 He^+ 三类离子间的动力学耦合, 计入了静电场和地磁场共同作用引起的 $\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{B}$ 垂直漂移、双极扩散、离子与各中性成份间碰撞、离子间碰撞及重力、浓度梯度和温度梯度等引起等离子体沿磁力线输运效应, 和对高高度电离层、等离子体层区域等离子体需考虑的热扩散效应 [2]. 中性风无疑会通过大气发电机效应产生电场, 进而对电离层产生影响. 和许多模式研究工作 [3] 一样, 为简化问题的复杂程度、降低计算难度和便于问题分析, 中性风和垂直漂移在模式中以独立参量考虑, 不涉及中性风引起的电动力学过程对电离层影响.

等离子体动量方程表示为沿磁力线和垂直磁力线方向分裂的形式. 在中低纬大约 130—150 km 高度以上, 电子、离子碰撞频率与磁回旋频率之比 $m_e\nu_{en}/eB \ll m_i\nu_{in}/eB \ll 1$, 故在模式涉及的区域内, O^+ 、 H^+ 、 He^+ 等离子体在垂直磁力线方向的速度将与电子 $\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{B}$ 垂直漂移速度大体一致, 即等离子体在垂直磁力线方向的运动表现为 $\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{B}$ 漂移运动. 在电离层较低高度离子垂直磁力线方向的运动偏离 $\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{B}$ 漂移运动, 但在这一区域等离子体浓度变化不是由输运而是由光化学过程为主要过程决定. 因而, 作为近似, 在 F 层及以上高度东西向中性风 (V_n^ϕ) 对等离子体的影响可不考虑. 而 Anderson[4] 的研究表明, 东西向漂移 ($E_\perp/B$) 对低纬 F 层等离子体影响, 作为近似也不考虑.

观测和理论模式研究已指出在高高度电离层、等离子体层考虑 H^+ 和 He^+ 的重要性. 观测结果显示 [2], 600—900 km 以上 H^+ 和 He^+ 成为主要的离子成份, 它们在电离层-等离子体层耦合中起着重要的作用. Moffett 等 [5] 指出, 以 O^+ 、 H^+ 、 He^+ 三类离子间动力学耦合的等离子体输运方程为模式出发方程可以避免以往模式在顶部电离层高度可能出现的计算困难. 本模式计算空间最高可达 3 000 km(受 IRI90 最大高度限制), 因而主要离子成份中包括 H^+ 和 He^+ 是必须的.

模式首先将等离子体输运方程变换到在沿磁力线和垂直磁力线方向上定义的曲线坐标系下. 然后采取算子分裂方法处理方程, 在倾斜偶极子磁场坐标系中采用全隐差分格式对等离子体输运方程差分处理, 依次求解 O^+ 、 H^+ 、 He^+ 和分子离子的差分方程, 给出所在磁子午面内电子、离子浓度、速度的二维空间分布及其随时间变化. 因在正常大气条件下亚稳态 O^+ 离子的寿命较短, 我们只考虑亚稳态 O^+ 离子反应过程而忽略其动力输运. 模式的光化学与离子反应过程及在此化学反应框架下各离子的产生率和损失率及各反应的反应速率见刘立波博士论文 *. 模式计算所需的太阳 EUV 辐射通量、中性风、中性大气成份、各成份温度等参数由相应的经验模式提供. 这些参数和模式各参量初始值的取法请参阅刘立波博士论文的介绍.

* 刘立波, 中国南方电离层参量形态特征的机制研究, 武汉大学博士论文, 1997, p.43

3　计算结果与讨论

模式选取 1968 年 4 月地球物理活动参数 ($Ap = 13$, $F_{107} = 130.8$, $F_{107A} = 142.4$) 进行计算. 由 HWM90 模式 [6] 的水平中性风换算的场向分量在磁纬 ±16° 300 km 高度上随地方时变化，及磁赤道上空垂直漂移速度取值示于图 1. 在满足磁旋频率远大于离子与中性成分碰撞频率条件下，计算域内任一点的垂直漂移速度取值可根据其在偶极地磁场中特点 [7] 获得. 应指出的是，因 110°E 附近没有 $\boldsymbol{E} \times \boldsymbol{B}$ 漂移观测数据，模式所用垂直漂移速度 (图 1b) 是根据中等太阳活动、磁静日条件下 Jicamarca 探测结果的等分季节平均值 [8] 构建的. 计算不考虑垂直漂移的高度变化.

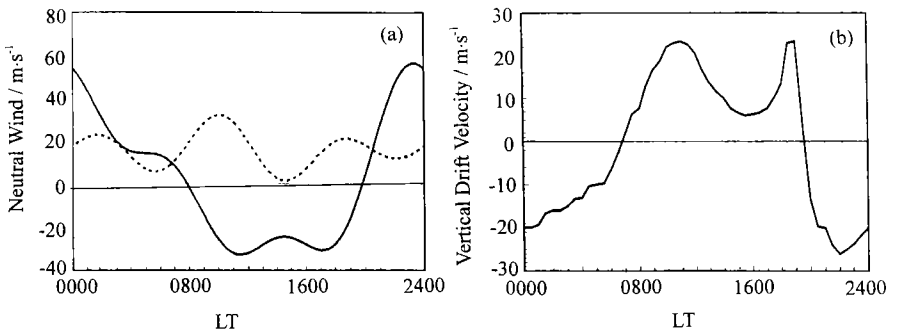


图 1　(a) 磁子午面风沿磁力线分量 (南向为正) 在 300 km 高度磁纬 16°N(实线) 和 16°S(虚线) 随地方时变化，(b) 磁赤道上空的垂直漂移速度 (向上为正)

Fig.1　(a) The local time variations of field-aligned neutral winds (southward positive) at the magnetic 16° N (solid line) and 16° S (dotted line) of a height of 300 km, (b) vertical drift velocity at the magnetic equator (upward positive)

在给定参数下 f_0F_2 的计算结果示于图 2. 结果显示出典型的赤道异常特征：日出后 f_0F_2 迅速增加，0930 LT 左右 f_0F_2 赤道异常驼峰首先在较低磁纬度出现. 随后，赤道异常进一步增强，驼峰位置极向移动，约在 1530 LT 达到充分发展，南北峰靠近磁纬 15°N. 赤道异常峰槽比、异常峰所在纬度及其移动形态和观测结果 [9] 基本吻合.

调整垂直漂移和中性风的强度，考察它们对低纬电离层参量的影响. 这里只考察对 f_0F_2 的影响.

(1) 垂直漂移强度变化对低纬 f_0F_2 的影响

将图 1(b) 所示的垂直漂移速度分别乘以 1.0, 0.75, 0.5, 0.25, 0, 所得到 f_0F_2 计算值随地方时变化示于图 3. 从图 3 可以看到以下特征：1. 增加 (向上) 垂直漂移速度时，驼峰附近以及极向各纬度 f_0F_2 增加. 磁赤道区附近当漂移因子在 0.5 以上时，增大漂移强度 f_0F_2 减小；但当漂移因子小于 0.25 时，如漂移强度增大，f_0F_2 反而随之增加. 本文模式中性风关于磁纬不对称. 夜间垂直漂移向下，有无中性风其对电离层的影响有所差异. 因存在不对称的中性风作用，调整垂直漂移强度对 f_0F_2 的影响纬向不对称，漂移强度增大

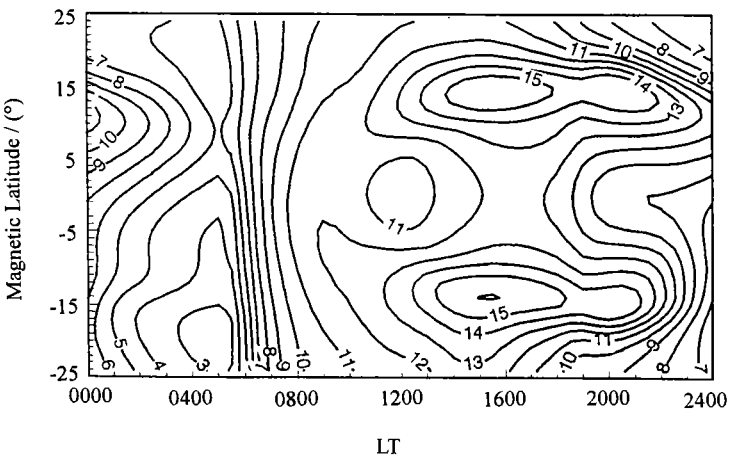


图 2 过地理点 (110°E, 20°N) 的磁子午面上 f_0F_2 随磁纬和地方时变化

Fig.2 The contour of f_0F_2 as functions of magnetic latitude and local time

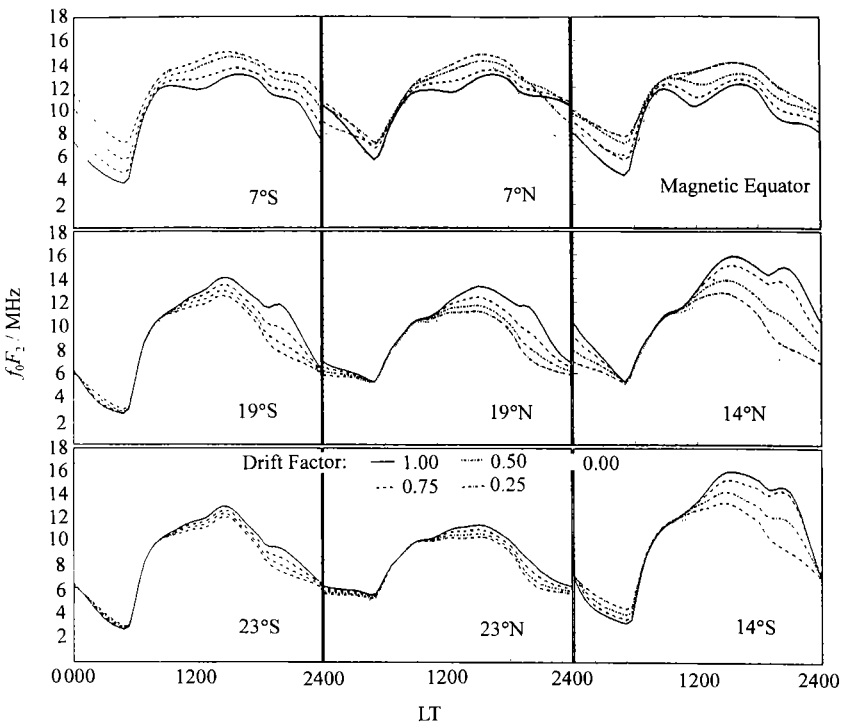


图 3 不同垂直漂移下 f_0F_2 随地方时变化

Fig.3 The local time variation of f_0F_2 under the influence of vertical drifts with different magnitude

时 f_0F_2 在北半球量值增大、而在南半球变小. 在没有中性风情形 f_0F_2 模式计算结果显示较好的对称性. 2. 调整漂移强度引起磁赤道至异常峰区 f_0F_2 变化的差异最明显, 随

后纬度增加差异逐渐减小. 3. 日出后至上午 1000 左右垂直漂移强度改变引起 f_0F_2 变化甚微.

图 4 以 2000 LT 和 0200 LT 为例, 考察给定时刻 f_0F_2 对垂直漂移强度的响应, 图 4(a) 和 (b) 为考虑中性风作用时分别在 0200 LT 和 2000 LT 时的值, 图 4(c) 和 (d) 为不考虑中性风时分别在 0200 LT 和 2000 LT 时的值. 在赤道异常存在时段, 垂直漂移强度 (向上) 增大时, 赤道异常发展得更充分: 驼峰所在磁纬及其电子浓度增加, 而磁赤道附近电子浓度进一步减小, 浓度峰槽比增加. 在 2000 LT, 本文的垂直漂移改变引起 f_0F_2 在磁赤道附近有 3 MHz 差异, 驼峰 (磁纬 ±14°N) 附近可达 7—8 MHz; 驼峰所在纬度变化也非常明显. 图中显示出正常驼峰纬度附近区域有一有趣特点: 当垂直漂移强度小且位于驼峰外侧时, 随垂直漂移增大, f_0F_2 增加; 随着垂直漂移强度继续增大, 该位置逐渐靠近异常驼峰并发展到处于异常驼峰内侧, f_0F_2 反而下降. 这一特点在以往文献中未提到过. 这里 f_0F_2 关于磁赤道的对称情况反映出中性风是导致电离层离化物纬向分布不对称的一个重要因素. 对各经度扇区中性风引起的电子浓度分布不对称, 请参阅文献 [10].

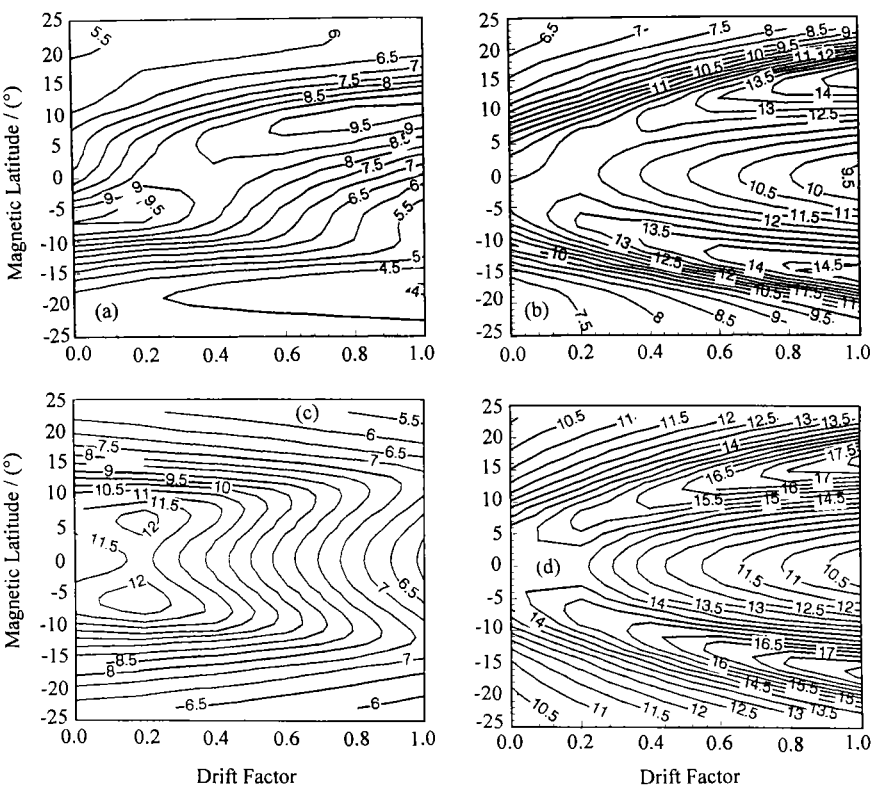


图 4　给定时刻垂直漂移对 f_0F_2 的影响

Fig.4　The effects of the vertical drifts on f_0F_2 at given times

垂直漂移引起电离层电子浓度变化的途径有: 把电子、离子带到新高度上, 在新高度上中性成份及其浓度不同, 因而电子、各离子光电离产生率和损失率不同. 即通过改变电

离层高度影响离子与电子的化学过程；输运局域电离物，改变输运通量．这两者的作用使得垂直漂移对电离层的影响与所在纬度、作用时段及其强度等密切相关．在向上垂直漂移作用下，F 层被抬升到更高高度．同时，电离物垂直磁力线极向输运，并在重力等作用下沿磁力线输运．一般情况下垂直漂移强度增大趋向使得 f_0F_2 在异常峰及极向纬度上升，而在磁赤道附近下降．但如果垂直漂移抬升电离层引起电子浓度变化不能弥补局域电离物极向输运所带来的损失时，f_0F_2 便可能减小．反之则增加．计算结果显示驼峰内 f_0F_2 随垂直漂移强度改变的变化趋势可由以上分析来定性解释．

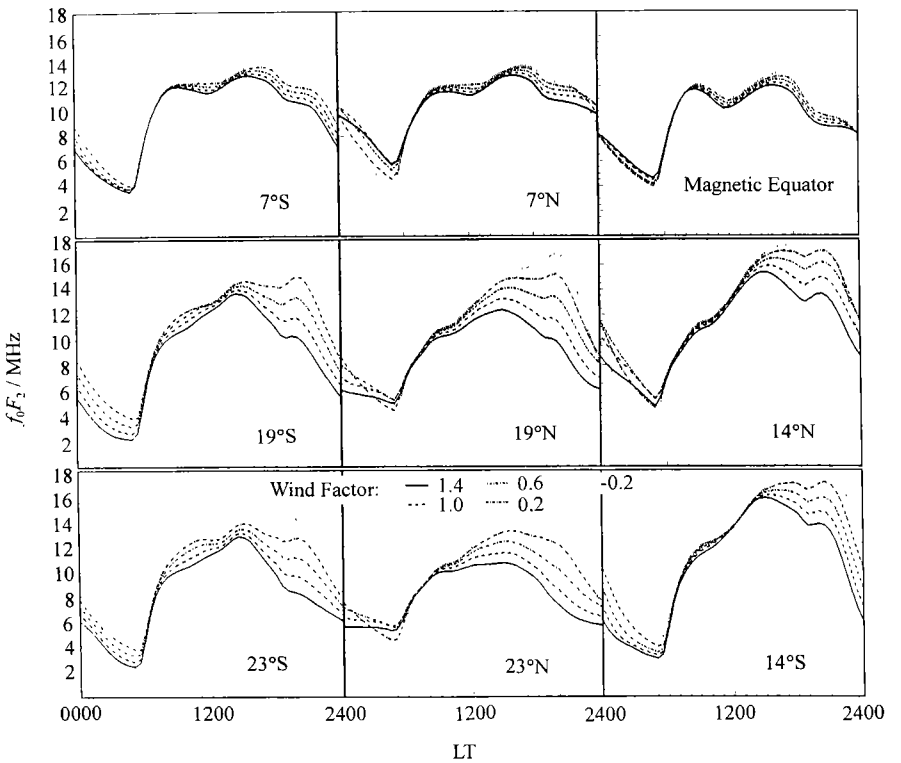


图 5 不同中性风场强度下 f_0F_2 随地方时变化

Fig.5 Same as Fig.3 but under the influence of neutral wind

(2) 中性风强度变化的影响

这里只涉及中性风引起的动力学效应，而不考虑中性风通过发电机效应对电离层带来的影响．把风场 (图 1a) 强度乘以 1.4, 1.0, 0.6, 0.2, −0.2 得到不同的输入风场，考察在这些模式风作用下低纬电离层 f_0F_2 的响应．

计算结果 (图 5) 显示出调整中性风强度时不同时段 f_0F_2 反应不一．在日出后一段时间内，调整中性风强度对 f_0F_2 影响不明显．从前面的计算结果，推知光电离过程是影响日出时段低纬 F 区浓度发展最主要的因素．这一时段日出后光电离产生率迅速增加，局域产生的电子来不及输运到别处．浓度变化率中化学过程的贡献大于动力因素改变所造成的影响．同时，日出时段在峰高附近电子浓度变化率对高度不敏感 [12]．因而这一时段

f_oF_2 对垂直漂移、中性风强度改变不敏感.

随后，白天中性风强度增大时相应 f_0F_2 计算值下降. 中性风对 f_0F_2 影响在较高纬度比赤道区明显. 这和 Rishbeth[11] 等的观点一致. 同一纬度调整中性风强度 f_0F_2 出现明显差异的起始时间存在纬向差异：在较高磁纬度中性风给 f_0F_2 带来差异出现的时间较早，而磁赤道附近中性风强度变化对 f_0F_2 影响出现明显差异的时间较晚. 在本文，夜间 f_0F_2 计算值受白天的影响累积，单从图 5 难以判断调整中性风强度给 f_0F_2 带来的影响. 只调整夜间中性风场的计算结果 [13] 显示，尽管在南半球场向中性风沿磁力线向下，增大中性风强度时 F 区电离层峰值电子浓度衰减速率反而变小，可在某些时段其峰值浓度相对增加，F 层抬升更明显.

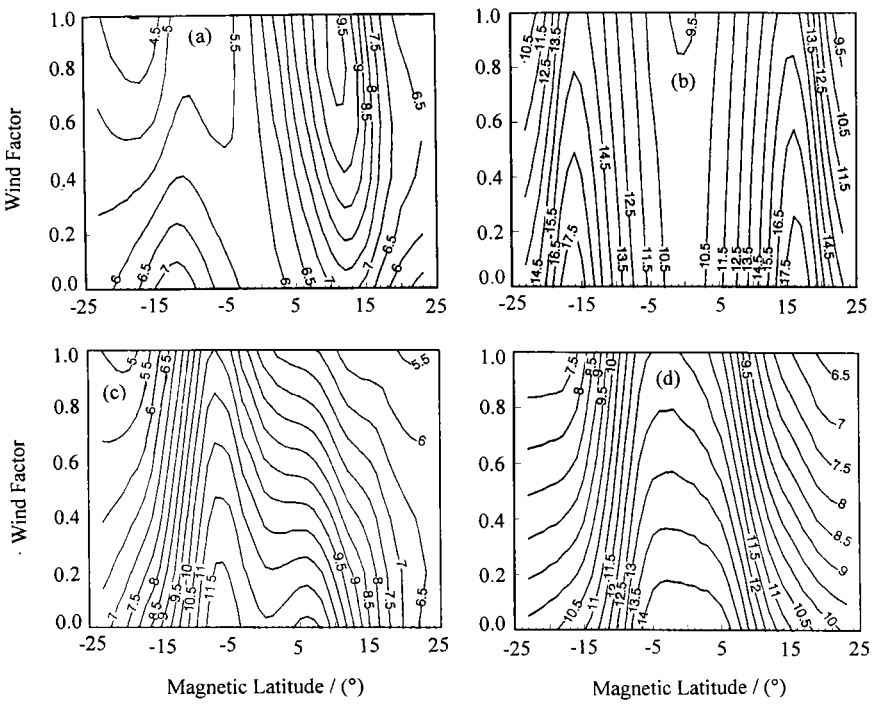


图 6　给定时刻中性风对 f_0F_2 的影响

Fig.6　Same as Fig.4 but under the influence of neutral wind

在 2000 LT 和 0200 LT 低纬 f_0F_2 随中性风强度变化示于图 6，图 6(a) 和 (b) 是考虑漂移作用下分别在 0200 LT 和 2000 LT 时的值；图 6(c) 和 (d) 是不考虑漂移作用时分别在 0200 LT 和 2000 LT 时的值. 结果显示：(1) 在给定纬度 f_0F_2 计算值随中性风强度增大而减小；但在 0200 LT 考虑垂直漂移情形，北半球 f_0F_2 随中性风强度增大而变大. (2) 中性风强度越大，赤道异常峰所在纬度及 f_0F_2 峰槽比略有减小趋势. 从图 4 和图 6 结果可以看到，决定赤道异常能否出现的最关键因素是垂直漂移，而非场向中性风. (3) 中性风对 f_0F_2 的影响与垂直漂移是否存在有关. 以磁赤道附近纬度为例，包括垂直漂移时调整中性风强度，f_0F_2 模式值改变很小；而没有垂直漂移时中性风强度变化对 f_0F_2 影响明显增大. 整体来看，场向中性风强度变化对电离层 f_0F_2 的影响随磁纬 (磁倾角) 增大而

更明显. 这和 Rishbeth[11] 等的观点一致.

但是, 关于场向中性风对电离层参量的影响, 通常的观点认为赤道向中性风抬升等离子体沿磁力线向上运动到复合率相对小的区域, 趋向于抬升峰高和增加电子浓度; 而极向中性风作用正好相反. 这一从影响电离层化学过程角度考虑的观点能解释大部分与中性风影响有关的问题, 但在某些情况下可能会出现与此观点相对立的结果 [13]. 分析复杂风场对电离层的影响时, 中性风对 F 区电离层浓度、峰高的影响除与考察点的磁纬度有关外, 还和中性风方向、强度及电离层离化物分布等因素有关. 也就是说, 中性风对电离层的影响密切依赖于所考察的风场及离化物等的时空分布.

4 结 束 语

考虑离子间动力学耦合效应, 对一个电离层时变理论模式进行拓展, 使模式能应用于顶部电离层、等离子体层区域. 利用该电离层模式模拟垂直漂移和中性风强度变化对低纬 F 区电离层浓度的影响. 模式结果显现出典型的赤道异常特征. 计算结果反映出, 光电离过程是日出时段低纬 F 区浓度发展的最主要决定因素. 除此时段外, 垂直漂移和中性风强度对低纬 F 区浓度的影响显著, 两动力学因素强度改变对电离层的影响与磁纬、地方时有关. 结果显示出一些新的特点. 如中性风对电离层影响密切依赖于所考察的风场和电离层离化物等的时空分布; 驼峰极向、赤道向纬度电离层对垂直漂移强度改变的响应不同等. 这些特点将增加对低纬电离层现象分析的难度. 结果对分析不同条件下垂直漂移和中性风对电离层作用, 调整参数提高模式与观测结果的吻合程度, 具有一定的指导意义. 本文没有调整两者的相位, 调整漂移和中性风相位对电离层影响可参阅文献 [3].

参 考 文 献

[1] 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

[2] Quegan S, Bailey G J, Moffett R T. Diffusion coefficients for three major ions in the topside ionosphere. *Planet. Space Phys.*, 1981, **29**(8):851—867

[3] Su Yuanzhi, Bailey G J, Balan N. Modelling studies of the longitudinal variations in TEC at equatorial anomaly latitudes. *J. Atoms. Terr. Phys.*, 1995, **57**(4):433—442

[4] Anderson D N. Modeling the ambient, low latitude F-region ionosphere-a review. *J. Atoms. Terr. Phys.*, 1981, **43**(8):753—762

[5] Moffett R J, Bailey G J, Quegan S *et al.* Modelling the ionospheric and plasmaspheric plasma. *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, 1989, **A328**:255—270

[6] Hedin A E, Biondi M A, Burnside R G *et al.* Revised global model of thermospere winds using satellite and ground-based observations. *J. Geophys. Res.*, 1991, **96**(A5):7 657—7 688

[7] Murphy J A, Heelis R A. Implications of the relationship between electromagnetic drift components at mid and low latitudes. *Planet. Space Sci.*, 1986, **34**(7):645—652

[8] Fejer B G *et al.* Average vertical and zonal F-region plasma drifts over Jicamarca. *J. Geophys. Res.*, 1991, **96**(A8):13 901—13 906

[9] Huang Y N, Cheng H, Chen S W. On the equational anomaly of the ionospheric total electron content near the northern anomaly crest region. *J. Geophys. Res.*, 1989, **94**(A10):13 515—13 525

[10] Su Yuanzhi *et al.* A modelling study of the longitudinal variations in the north-south asymmetries of the ionospheric equatorial anomaly. *J. Atoms. Terr. Phys.*, 1997, **59**(11):1 299—1 310

[11] Rishbeth H. Thermospheric winds and the F-region: a review. *J. Atoms. Terr. Phys.*, 1972, **34**(1):1—47

[12] Rishbeth H B, Jenkins B, Moffett R J. The F-layer at sunrise. *Ann. Geophysicae*, 1996, **13**:367—374

[13] 刘立波，涂剑南，保宗悌. 中性风对夜间低纬电离层参量的影响. 空间科学学报，1998, **18**(4):308—312

EFFECTS OF NEUTRAL WINDS AND VERTICAL DRIFTS ON LOW-LATITUDE IONOSPHERE

LIU Libo　WAN Weixing

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

TU Jiannan

(*Department of Space Physics, Wuhan University*)

BAO Zongti

(*Department of Physics, South China Normal University*)

Abstract

Effects of variations of magnitude of $\boldsymbol{E} \times \boldsymbol{B}$ vertical drifts and neutral winds on low-latitude ionosphere are investigated by using a two-dimensional low-latitude ionospheric time-dependent theoretical model. In the model ion transport equations are solved by using splitting technique at fixed grid points along magnetic field lines, and densities and velocities of ions are outputted on the given geomagnetic meridian. Modelling results show that the influences of adjusted magnitude of $\boldsymbol{E} \times \boldsymbol{B}$ vertical drifts and neutral winds on low-latitude f_0F_2 are dependent on magnetic latitude and local time. And some features not reported previously are also mentioned in the paper.

Key words　Low-latitude ionosphere, Ionospheric theoretical model, Vertical drift, Neutral wind