

中纬突发 E 层特性的模拟分析^{*}

左小敏^{1,2} 万卫星²

¹(中国地质大学数理系 武汉 430074)

²(中国科学院武汉物理与数学研究所)

摘 要

从基本的连续性方程出发,并结合运动方程,运用特征线方法求解,在合理的动力学假设条件下,模拟金属离子的汇聚,即 Es 层的形成.模拟的结果在一定程度上证实了风剪切理论的合理性.通过改变风场和电场模式的输入参量,使模拟的结果体现出不同当地时、不同季节的金属离子汇聚情况,讨论了模拟 Es 层峰值密度对风场和电场的周日和季节变化的响应,其结果与统计得到的 Es 层出现率的时间分布特征相似.

关键词 中纬突发 E 层;模拟计算;风剪切

1 引言

在电离层研究史上,中纬突发 E 层的研究是一个具有很长研究历史的课题,但其中仍有大量问题有待解决,因此受到普遍关注.对中纬 Es 层形成机制的理论解释中, Dungey^[1]首次提出了风剪切理论的基本思想,认为中纬 Es 形成的主要原因是中性大气风水平速度随高度的变化,即风剪切,后经过 Whitehead^[2]和 Axford^[3]的发展和完善,风剪切理论得到大多数学者的认可.由于洛伦兹力,向东吹的风使离子同时有向东和向上的运动,但对电子的影响甚微.当在某个高度存在东风而略高一点的高度上存在西向风,就造成了一个风剪切,上面的离子向下运动,下面的离子向上运动,电离成分得到有效压缩.离子的压缩造成正电荷的积累,电子受到吸引,沿着地磁力线运动,中和正电荷.风剪切压缩的结果就是离子横越磁力线运动,而电子沿着同一条磁力线运动. Kato 等人^[4]设法把用火箭上探针测量到的电子分布与根据同时测量到的风剖面计算得到的电子分布进行比较,计算结果和观测结果符合得很好,证实了风剪切压缩的基本观点.

在早期阐述风剪切理论的文章中,电场总是被忽略或者认为它的作用仅仅是改变 Es 层形成的高度^{[2],[3]}. Kato^[5]认为电场会削弱风剪切机制的积累作用. Rees^[6]研究发现某种 Es 的形成必须结合中性风场和电场才能解释.因此,电场在某些情况下可以起辅助风剪切的作用. Nygren^[7]从离子的动量方程出发,首次详细推导了在电场的作用下 Es 薄层的形成,得出结论:当电场在北半球指向西北方向,在南半球指向西南方向时,离子在电场和地磁场的共同作用下会形成垂直方向上的汇聚,即形成 Es 层.在一些高纬台站, Es 层在当地午夜时间出现率增大以至形成极大值即是电场作用的结果.

^{*} 国家自然科学基金重点项目 (40134020), 国家重点基础研究规划项目 (G2000078407) 共同资助
2002-05-18 收到原稿, 2003-07-10 收到修定稿

在本文中, 我们依据风剪切理论, 主要强调 Es 层形成的动力学因素, 从连续性方程出发, 对离子的初始分布及其产生率, 复合率进行合理的假设, 模拟 Es 层在风场和电场的作用下的形成, 并得到风场和电场随时间变化而引起的 Es 层峰值密度的时间分布特征.

2 模拟分析方法

由连续性方程

$$\frac{\partial n}{\partial t} = q - L - \nabla \cdot (n\mathbf{v}). \quad (1)$$

其中 t 是时间, n 是金属离子密度, L 是复合率, q 是产生率, $\mathbf{v}$ 是离子运动速度. 假设只考虑垂直方向的变化, 且是平方律损失过程^[4], 则方程可写为

$$\frac{\partial n}{\partial t} = q - \alpha n^2 - \left(\frac{\partial}{\partial z}\right)(nv_{iz}), \quad (2)$$

其中 z 表示高度, v_{iz} 表示离子垂直速度.

方程 (2) 为偏微分方程, 我们可以通过特征线法将其转化为全微分进行求解. 上式可化为

$$\frac{\partial n}{\partial t} = q - \alpha n^2 - v_{iz} \frac{\partial n}{\partial z} - n \frac{dv_{iz}}{dz}. \quad (3)$$

由全微分公式

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial n}{\partial z} \frac{dz}{dt} \quad (4)$$

和

$$\frac{dz}{dt} = v_{iz} \quad (5)$$

代入式 (3), 可得

$$\frac{dn}{dt} = q - \alpha n^2 - n \frac{dv_{iz}}{dz}. \quad (6)$$

已知初始分布和速度场, 我们就可以将上式做简单差分离散处理, 解出离子密度. 其中, (5) 式为方程的特征线方程, (6) 式是沿特征线 (5) 的微分方程, 方程求解时沿着特征线积分. 特征线方法能提高数值计算的实际精度和稳定度. 同时, 在这里特征线也表征了不同高度上离子的运动轨迹.

我们假设在初始时刻处于平衡态, 产生率 q 为 αn_0^2 , 且 q 不变. 假设电子密度 n_0 的初始分布为峰值密度在 105 km 处, 半宽度为 20 km 的高斯分布^[8], 这对应着流星烧蚀后注入的金属离子的预期平均分布^[9]. 即 $n_0 = n_i \exp\{-[(z - 105)/20]^2\}$, 在这里取 $n_i = 1.4 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$. 我们认为被压缩的是 E 层的金属离子, 由于金属离子的复合率很小, α 取值 $3 \times 10^{-9} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. 假定在 $t = 0$ 时刻风场和电场突然加在以上假设的初始电子密度分布上. 虽然在实际情况不会在整个高度范围上发生这种突然的扰动, 但在 t 比较大时的结果基本上处于稳态, 是有意义的.

离子的垂直速度 v_{iz} 是最重要的输入参数, 它由下式推导而来,

$$e(\mathbf{E} + \mathbf{v}_i \times \mathbf{B}) - m_i \nu_i (\mathbf{v}_i - \mathbf{u}) = 0, \quad (7)$$

其中, e 是单位电荷电量, E 是电场强度, B 是地磁场强度, u 是中性风, ν_i 是金属离子和中性粒子的碰撞频率, m_i 是离子质量, v_i 即离子运动速度.

由此可推导出离子的垂直速度为

$$v_{iz} = \frac{1}{B(1 + \rho_i^2)} [\pm \rho_i (E_{\perp N} B u_E) - (B u_N \cdot \sin I - E_{\perp E})] \cdot \cos I. \quad (8)$$

公式中同时包括了风场和电场的作用, 正负号分别表示北半球和南半球的结果. 其中 $E_{\perp N}$ 是电场垂直北向分量, $E_{\perp E}$ 是电场东向分量, u_E 是东向风场, u_N 是北向风场, I 是磁倾角. ρ_i 是碰撞频率 ν_i 和磁旋频率 Ω_i 之比. 取铁离子的参数, 碰撞频率和磁旋频率分别由以下公式求得 [7].

$$\nu_i = 3.5 \times 10^{-16} \times 1.125 \times 10^{19} \exp\{-(z - 100)/[87.3 \times 10^{-3} \times (z - 100) + 5]\}, \quad (9)$$

$$\Omega_i = 1.759 \times 10^{11} \times B \times 10^{-3} / (1823 \times 55.847). \quad (10)$$

地磁强度 B 和磁倾角 I 通过国际参考地磁场模式 IGRF^[10] 计算得出. 在本文大量的计算中, 不可能得到大量的实测风场和电场数据, 因此, 我们采用大气水平风场经验模式 HWM93^[11] 给出风场, 用 Richmond 等^[12] 通过非相干散射雷达得到的漂移经验模式给出电场. HWM93 风场模式考虑了大气的日变化和季节变化, 以及太阳活动、地磁扰动等因素对电离层的影响, 因此可以应用于不同季节、不同时段. 的计算.

电场漂移模式给出了地磁静日太阳活动低年的电场信息, 考虑了季节变化和经度变化. 以北半球为例, 电场经验模式给出的漂移速度与 (8) 式中电场分量的关系为: $E_{\perp E} = v_{\perp N} B$, $E_{\perp N} = -v_{\perp E} B$. $v_{\perp N}$ 是垂直漂移速度, $v_{\perp E}$ 是东向漂移速度. 经过简单代换, 漂移速度可以直接代入公式 (8) 进行计算.

3 模拟结果及讨论

我们选取位于美洲地区的地点 A (30°N , 270°E) 太阳活动低年夏季一天 (第 200 天) 作为研究的对象. 选取这个经纬度的原因是北美洲地区的台站较多, 由此而得到的风场和电场的模式的值也比较接近真实值, 而本文所计算的结果也就更具有真实意义和可比较性.

HWM93 模式给出的 A 地第 200 天的白天 10 点由南北风 (北为正) 和东西风 (东为正) 的沿高度的剖面图分别如图 1 所示. 可以看出, 南北风和东西风在垂直高度上都有剪切现象. 在 80—150 km 高度电场产生的离子垂直漂移速度和东向漂移速度在高度上的变化不大, 因此我们没有给出漂移速度随高度的剖面图.

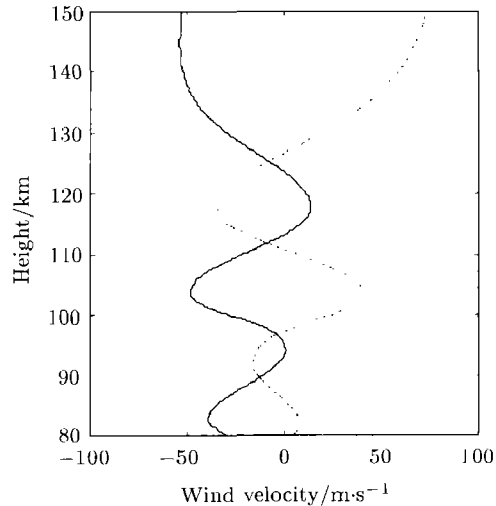


图 1 A 地第 200 天的白天 10 点的风场, 实线为南北风 (北为正), 虚线为东西风 (东为正)

Fig.1 The wind profile at 10 a.m. of the 200th day in the place A. The solid line is the southward wind velocity and the broken line is the eastward velocity

根据公式 (8), 我们求出风场作用下白天 10 点的离子速度, 其随高度的剖面图如图 2 所示. 与电场相比, 风场是引起离子运动的主要因素. 在图 2 中, 离子垂直速度曲线几乎穿过零线, 尤其是在 110 km 高度左右, 负梯度达到最大, 可以推断, 离子容易在这个高度形成汇聚. 用同样的方法, 我们得出电场作用下白天 10 点的离子速度剖面图, 如图 3 所示, 由于磁旋频率是随高度变化的, 所以电场引起的离子速度也随着高度而变化. 电场引起的离子速度值较小.

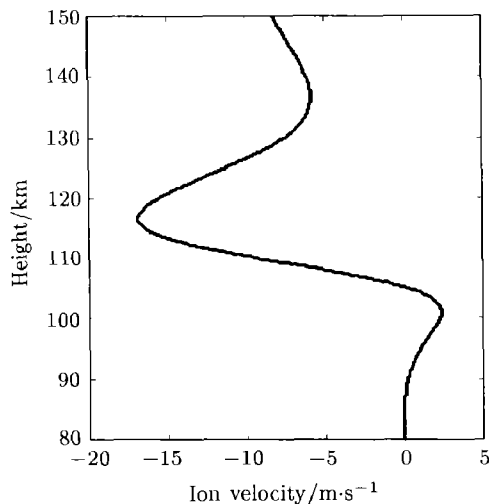


图 2 风场作用下白天 10 点的离子垂直速度
Fig.2 The ion vertical velocity at 10 am under the action of wind field

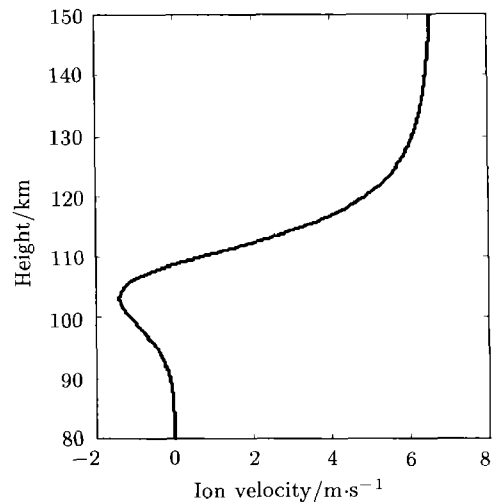


图 3 电场作用下白天 10 点的离子垂直速度
Fig.3 The ion vertical velocity at 10 am under the action of electric field

图 4 是通过方程求出的白天 10 点在以上所示的风场和电场作用 30 min 后的离子密度随高度的剖面图, 其中点线是初始分布, 粗实线是 30 min 后的最后结果, 细实线是每 6 min 后的结果. 作为比较, 我们给出了假设只有电场或只有风场的情况下求出的离子密度的高度剖面图, 分别如图 4(a), 4(b). 风场和电场共同作用的结果如图 4(c). 离子在风场和电场的作用下, 在 105 km 附近汇聚, 形成峰值, 最大峰值为 $2.4 \times 10^5/\text{cm}^3$. 3 张图比较可以看出, 在这个时刻, 电场对于离子的积累的作用起反作用. 图 4 的结果证明, 风剪切结构可以有效地压缩离子形成薄层, 电场在压缩离子的过程起的作用比较微弱, 或者是反作用.

4 与统计结果的比较

为了考察风场和电场变化对 Es 汇聚状况的影响, 我们取离子在某一时刻开始受到风场和电场 30 min 作用后形成的离子峰值密度作为这个时刻风场和电场对离子积累效率的量度, 这个峰值密度越大, 说明风场和电场的输运过程产生的积累效果越好, 也就是说, 这个外界条件越有利于形成离子的积累. 风场和电场的变化, 也就是外界动力学条件的变化, 导致的对离子积累效率的变化就可以通过求出的峰值密度大小的变化来体现.

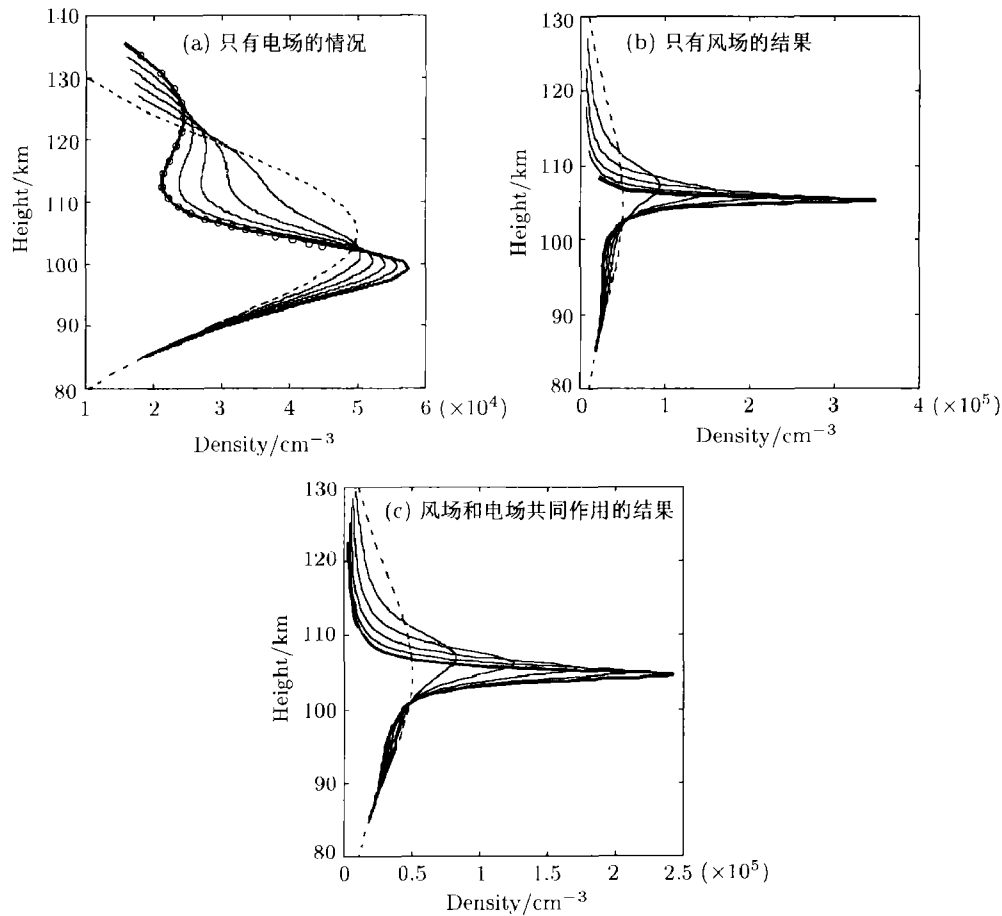


图 4 在风场和电场作用 30 min 后的离子密度对高度的剖面图, 其中点线是初始分布, 粗实线是 30 min 后的最后结果, 细实线是每 6 min 后的结果

Fig.4 Calculated ion density distribution, the broken curve is the initial distribution, while the thick solid curve is the final distribution at $t = 30$ min and the thin solid curves are the distribution at $t = 6, 12, 18, 24$ min respectively

用同样的计算方法得出一年中每个时刻的离子受到风场和电场 30 min 作用后的汇聚情况, 其峰值密度的季节分布如图 5. 由图可知, 从季节看, 峰值密度在夏季最大. 这定性证实了 Es 出现率的夏季峰值的观测结果. 从周日变化看, 峰值密度有两个明显的极大值, 一个出现在夏季上午的 0800 左右, 一个出现在夏季晚上的 2000 点左右. 对比东西风场在第 200 天一天内的分布图 (见图 6) 来看, 峰值密度的日变化的双峰特征显然是由于风场在一天内的半日变化引起的.

另外, 我们选取了美国的 Cape Kennedy (28.4°N , 279.4°E) 1964 年的垂测数据统计分析 Es 出现率的时间变化. 我们求取了每个月当地时每个小时的 $f_0E_s > 5\text{ MHz}$ 的 Es 出现率, 得出当地时和月份的分布图, 如图 7 所示. 从图中可以看出, Es 出现率在夏季的白天有两个峰, 一个在上午 10 点附近, 一个在下午 17 点附近. 比较发现, 模拟结果 (见图 5) 中峰值出现的时间虽然与观测统计结果有所差异, 但时间分布上出现的双峰结构很相似. 另外, 我们也分析了位于附近位置的 Boulder (40.0°N , 254.7°E) 台站的 Es 出现率的

统计结果, 也出现了以上类似的双峰结构 (图略). 由此可以看出, 风剪切的形成理论可以定性地解释模拟 Es 层出现率的夏季峰值.

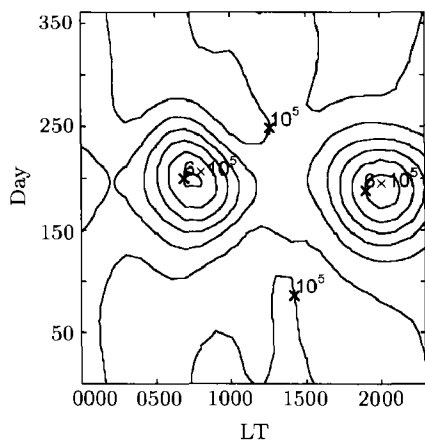


图 5 位于美洲地区的地点 A (30°N, 270°E) 模拟 Es 层峰值密度的季节分布, 横坐标为地方时, 纵坐标为天数. 等值线上的数值单位为 cm^{-3}

Fig.5 The temporal variation of peak density of the simulation Es in the place A (30°N, 270°E). The x-axis is the local time, the y-axis is the day number. The unit of the isoline is cm^{-3}

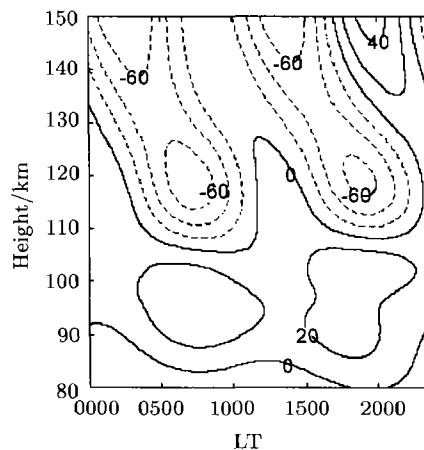


图 6 第 200 天东西风场的分布图, 图中实线表示东向风, 虚线表示西向风, 单位 m/s

Fig.6 The distribution of zonal wind field of the 200th day. The solid line is the eastward wind velocity and the broken line is the westward velocity. The unit of the isoline is m/s

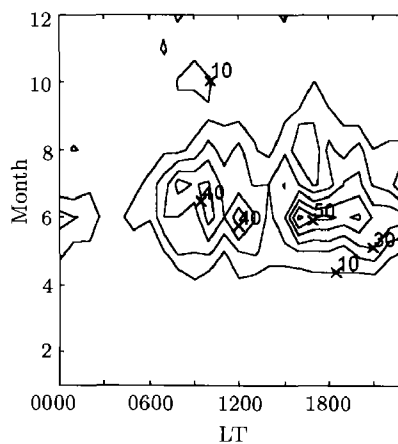


图 7 美国 Cape Kennedy (28.4°N, 279.4°E) 1964 年的 Es 出现率的季节时间分布图
等值线上标注的是百分数

Fig.7 The temporal variation of Es occurrence in 1964 in Cape Kennedy (28.4°N, 279.4°E)
The values labeled over the isoline are the Es occurrence percent

5 结论与讨论

综上所述, 以上在外界风场和电场的条件下模拟 Es 层的形成及分析其峰值密度的时

间分布特征的过程, 实际上是将复杂的动力输运效果量化成一个虚拟的物理量——模拟得出的 Es 层的峰值密度。因为风场和电场变化以及地磁场环境所涉及的参数很多, 我们无法简单地描述风场和电场所组成的动力输运结构的周日或季节变化, 本文分析这个物理量的周日及季节变化, 实际上得到的是当仅考虑动力因素时, 动力因素的周日变化和季节变化对 Es 层的时间变化造成的影响。当然在实际的情况中, Es 层还受到很多因素的影响, 其时间变化规律并不仅仅取决于动力结构, 以上模拟得到的 Es 层的变化规律并不代表实际情况, 可能完全不同于实际 Es 层的形态规律。但动力因素作为中纬 Es 层形成的主要原因, Es 层对其周日和季节的变化情况的响应的分析是有物理意义的。模拟结果和统计结果的相似证实了风剪切理论的合理性。Es 出现率的夏季峰值也基本上可以得到解释, 而 Es 出现率的周日变化是由于风场的周日变化引起的, 因此与风场中包含的周日潮汐分量和半日潮汐分量的相位及幅值的相对大小很有关系。

由于现今研究对于金属离子缺乏了解, 模拟计算中对于离子的初始分布的假设以及复合系数的假设都比较简单。另外, 计算中也忽略了 E 层背景电子分布以及 Es 层的下行运动^[13]。又由于风场和电场是经验模式的输出值, 我们对于 Es 层的模拟是比较粗略的。虽然风剪切理论对 Es 的形成的解释已被公认, 但 Whitehead^[14]认为, 关于 Es 的形态特征与形成机理尚有许多问题未能解决, 最重要的两个问题就是 Es 出现率极强的夏季峰值和远东异常。尽管本文运用连续性方程对于离子汇聚的模拟存在着一些缺陷, 但作为定性研究的依据以及对 Es 层的形成机理的理解和深入探讨是很有科学意义的。

参 考 文 献

- [1] Dungey J W. Cosmic Electrodynamics. London: Cambridge University Press, 1958. 167—168
- [2] Whitehead J D. The formation of the sporadic-E layer in the temperate zones. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1961, **20**:49—58
- [3] Axford W I. Note on a mechanism for the vertical transport of ionization in the ionosphere. *Can. J. Phys.*, 1961, **39**: 1393—1396
- [4] Kato S, Aso T, Horiuchi T. Sporadic-E formation by wind shear, comparison between observation and theory. *Radio Sci.*, 1972, **7**:359—362
- [5] Kato S. Theoretical basis of the formation of sporadic due to wind motions in the ionosphere. *Radio Sci.*, 1966, **1**:226—2346
- [6] Rees D *et al.* The role of neutral winds and ionospheric electric field in forming stable sporadic E-layers. *Planet. Space Sci.*, 1976, **24**:475—478
- [7] Nygren T *et al.* The role of electric field and neutral wind direction in the formation of sporadic E-layers. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1984, **46**:373—381
- [8] Kirkwood S, Zahn U von. On the role of auroral electric fields in the formation of low altitude sporadic-E and sudden sodium layers. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1991, **53**:389—407
- [9] Olsson-Steel D, Elford W G. The height distribution of radio meteors: observations at 2 MHz. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1987, **49**(3):243—258
- [10] Gustafsson G, Papitashvili N E, Papitashvili V O. A revised corrected geomagnetic coordinate system for Epochs 1985 and 1990. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1992, **54**(11/12):1609—1631
- [11] Hedin A E *et al.* Empirical wind model for the upper, middle and lower atmosphere. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1996, **58**:1421—1447
- [12] Richmond A D *et al.* An Empirical model of quiet-day ionospheric electric fields at middle and low latitudes. *J. Geophys. Res.*, 1980, **85**(A9):4658—4664

- [13] Chimonas G, Axford W I. Vertical movement of temperate-zone sporadic E layers. *J. Geophys. Res.*, 1968, **73**(1):111—117
- [14] Whitehead D. Sporadic E—A mystery solved (Part II). *QST*, 1997, **11**:38—42

THE SIMULATION ANALYSIS OF MID-LATITUDE SPORADIC E-LAYERS

ZUO Xiaomin^{1,2} WAN Weixing²

¹(Department of Physics and Mathematics, Chinese University of Geosciences, Wuhan 430074)

²(Wuhan Institute of Physics and Mathematics, The Chinese Academy of Sciences)

Abstract

The present paper deals with both the computer simulation and statistical study of sporadic E-layers at mid-latitude regions. According to the widely accepted wind shear theory, simulation for the formation of Es under the action of wind fields and electric fields was carried out. The simulation work is based on the continuity equation and momentum equation and method of characteristics curve is adopted. We accomplish simulating the convergence of metal ions to form a thin layer under reasonable dynamics conditions. The wind field data come from the HWM93 empirical model and the electric field data from the drift empirical model. The results of simulation confirm the validity of the wind shear theory indirectly. When changing the input parameter of the HWM93 empirical model and the drift empirical model, we obtained different results, which make it possible for us to study the reaction of Es peak density on the diurnal and seasonal variations of the background dynamics conditions. The results agree with the statistical temporal variation feature of the sporadic E occurrence. After a comparison of data statistic results, the reliable part of the theory is confirmed and its irrationality is discussed.

Key words The mid-latitude Es, Simulation calculation, Wind shear