赤道地区和中纬度地区扩展 F 的特点和比较*

张天华 萧 佐
(北京大学地球物理系 100871)

摘 要

通过数值模拟研究了赤道地区和中纬度地区扩展 F 的触发机制间的联系，发现相同的触发机制在不同纬度的条件下所演化出的结构形态不相同，因此观测上会有所不同；研究了西向电场在赤道地区的作用，发现在适合的电离层参数组合下会产生观测到的电离层 F 区顶部扰动出现率高于底部扰动出现率的状况；在数值模拟的基础上提出了一个中纬度地区电波散射的模型，用以解释观测到的中纬度地区电波散射的出现率高于线性理论预期的现象.

关键词 扩展 F — Rayleigh-Taylor 不稳定性—声重波

1 引 言

应用多种探测手段和仪器，如测高仪、雷达、闪烁、辉光测量、火箭和卫星探针等研究扩展 F 已经有几十年了，得到了许多探测结果. 根据观测现象，扩展 F 最初被分为 "赤道地区扩展 F" 和 "中低纬地区扩展 F" 两种，因为二者在电离图上的表现形式不同 [1]，因此有人提出这是两种不同的机制形成的 [2]. 但后来随着观测数据的不断增加，越来越多的人对这二者在本质上是否不同提出疑问，也从观测上找到了一些证据说明二者可能由同一机制引起 [3]. 但从数值模拟上从未有人对赤道和中低纬地区的形态特点做过比较研究来证明二者间的关系，这始终是遗留的问题之一.

从形态学方面对扩展 F 发生的季节变化、地方时效应、随太阳活动、地磁活动等的变化，以及从机理方面在 Rayleigh-Taylor 不稳定性的基础上，对电场、中性风和声重波的种子作用等，都先后有人探讨过 [3−5,8]. 尽管这些研究的大部分都集中在赤道扩展 F 现象 [3,5] 上，但对中、低纬度地区也开展了一定的观测和理论研究工作 [1,2,4]. 在上述这些工作中，迄今为止仍然有较多的观测细节尚未得到满意的理论解释，如前面提到的关于赤道地区和中纬度地区的形成机制间的关系问题，特别是线性增长率理论在许多时候更显得无能为力. 在现存的诸多问题中，有两个问题比较突出：一个是关于中纬度地区扩展 F 的发生率问题；另一个是电离层 F 层峰上、下扩展 F 的出现率及其机制问题. 例如，观测到的电离层 F 区底部扰动和顶部扰动的位相关系十分复杂，顶部扰动位相可以和底部扰动同时或者不一致，即有可能出现只在 F 区顶部有不规则结构，而同时又出现在 F 区底部并没有发生扰动的情况. 分别通过地面上的垂测仪和放置在 Alouettte 卫星上的顶部

* 国家自然科学基金资助的课题 (49874041, 49990454)
1999-09-28 收到原稿， 2000-04-21 收到修定稿

探测仪测量到的西经 75° 地区的一段时间内扩展 F 发生率会发现. 虽然二者在测量时间上不完全一致, 但在扣除了这方面及测量仪器方面等的误差后, 仍然可以得出在这一地区扩展 F 顶部的出现率高于底部出现率的结论 [6], 这就说明扩展 F 有可能只在当地电离层 F 区顶部出现而不在 F 区底部出现. 但到目前为止所有的数值模拟都只能解释先产生底部扰动, 经过一定延迟后才影响到顶部. 本文试图在数值模拟的基础上提出一种新的机制解释顶部扰动位相与底部扰动位相的不一致.

从线性理论分析, 由于磁倾角的存在使得中低纬度地区扩展 F 的产生要比赤道地区困难得多, 纬度越高其出现率应越低. 然而实际在中纬地区观测到的电波散射现象非常普遍, 即使在冬天等背景电离层条件并不适合扩展 F 发生的条件下, 仍然会出现发生率峰值 [1,2]. 这不是扩展 F 的线性理论所能解释的. 本文试图解释这一点.

2　理论推导

中低纬地区 (包括赤道地区) 选取水平西向为 x 轴, 垂直向上为 y 轴, 则 z 轴为水平北向, 而磁场方向与北向有一个夹角, 即磁倾角 I. 采用谢红等 [7] 导出的无声重波时中低纬扩展 F 的模型, 当存在一个水平东西向的外电场时描述扩展 F 的方程组为

$$\begin{cases} \dfrac{\partial Q}{\partial t} - \dfrac{C}{B}\Big[\dfrac{\partial}{\partial x}\Big(Q\dfrac{\partial \phi}{\partial y}\Big)/\cos I - \dfrac{\partial}{\partial y}\Big(Q\dfrac{\partial \phi}{\partial x}\Big)\cos I\Big] = -\dfrac{C}{B}\dfrac{Q}{n_0}\dfrac{\partial n_0}{\partial y}\dfrac{\partial \phi}{\partial x}\cos I - \gamma_R(Q-1), \\ \dfrac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \dfrac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \Big(\dfrac{1}{\gamma_{\rm in}}\dfrac{\partial \gamma_{\rm in}}{\partial y} + \dfrac{1}{Q}\dfrac{\partial Q}{\partial y} + \dfrac{1}{n_0}\dfrac{\partial n_0}{\partial y}\Big)\dfrac{\partial \phi}{\partial y} + \dfrac{1}{Q}\dfrac{\partial Q}{\partial x}\dfrac{\partial \phi}{\partial x} = \\ \qquad \Big(E_{0x} - \dfrac{B}{C}\dfrac{g}{\gamma_{\rm in}}\cos I\Big)\dfrac{1}{Q}\dfrac{\partial Q}{\partial x}. \end{cases} \tag{1}$$

当有声重波存在时, 设声重波只有水平扰动分量 u_{1x} 和背景水平风速 u_{0x}, 结合日落后 Rayleigh-Taylor 不稳定性可以推导出描述此时扩展 F 的方程组为

$$\begin{cases} \dfrac{\partial Q}{\partial t} - \dfrac{C}{B}\Big[\dfrac{\partial}{\partial x}\Big(Q\dfrac{\partial \phi}{\partial y}\Big)/\cos I - \dfrac{\partial}{\partial y}\Big(Q\dfrac{\partial \phi}{\partial x}\Big)\cos I\Big] + u_{1x}\cos^2 I\dfrac{\partial Q}{\partial x} = \\ \qquad -\dfrac{C}{B}\dfrac{Q}{n_0}\dfrac{\partial n_0}{\partial y}\dfrac{\partial \phi}{\partial x}\cos I - Q\dfrac{\partial u_{1x}}{\partial x}\cos^2 I - u_{0x}\dfrac{\partial Q}{\partial x}\cos^2 I - \gamma_R(Q-1), \\ \dfrac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \dfrac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \Big(\dfrac{1}{\gamma_{\rm in}}\dfrac{\partial \gamma_{\rm in}}{\partial y} + \dfrac{1}{Q}\dfrac{\partial Q}{\partial y} + \dfrac{1}{n_0}\dfrac{\partial n_0}{\partial y}\Big)\dfrac{\partial \phi}{\partial y} + \dfrac{1}{Q}\dfrac{\partial Q}{\partial x}\dfrac{\partial \phi}{\partial x} = -\dfrac{B}{C}\dfrac{g}{\gamma_{\rm in}}\cos I\dfrac{1}{Q}\dfrac{\partial Q}{\partial x}. \end{cases} \tag{2}$$

其中 $Q = \dfrac{n}{n_0}$, 其它各量均为通用含义. 当磁倾角 $I = 0$ 时方程组 (2) 的形式和文献 [8] 推导的赤道地区的声重波扰动方程组形式一致.

把公式 (1) 线性化后可以求得线性增长率为

$$\gamma = \frac{1}{n_0}\frac{\partial n_0}{\partial y}\frac{k_x^2}{k^2}\Big(\frac{g\cos^2 I}{\gamma_{\rm in}} - \frac{C}{B}E_{0x}\cos I\Big) - \gamma_R, \tag{3}$$

由公式 (3) 可以直观地看出: 在不考虑电场和中性风的作用, 且在赤道地区时, 即纯粹的 Rayleigh-Taylor 模, 若要线性增长率大于 0 则要求电子密度随高度而增加 (梯度 $\partial n_0/\partial y > 0$). 显然电离层 F 区峰值以上并不满足这一条件. 另外, 磁倾角的存在使得线性增长率随纬度增加而减小, 因而从线性理论的角度来讲扩展 F 的发生率应当随纬度升

高单调地降低. 最后, 如果考虑电场和中性风, 则它们的作用与方向有关. 例如, 从公式 (3) 可以看出, 在 F 区底部, 当电场为东向 ($E_{0x} < 0$) 时, 对扩展 F 不稳定性的增长是有利的. 显然, 这些解释和引言中的某些观测现象并不一致.

由于公式 (1) 和 (2) 是相对完整的制约 F 区电子和离子运动的方程组, 其中包含了必要的非线性项, 因而, 本文从公式 (1) 或公式 (2) 出发, 以数值模拟的方法研究可能的非线性效应.

3 数值模拟结果和讨论

数值模拟分为三组进行, 其中的背景电子密度剖面取自 IRI90 模型, 背景中性风取自 HWM90 模型; 初始扰动取为在整个模拟域内加上不随高度变化、仅随水平距离变化的正弦形式: $Q = n/n_0 = 1, -\mathrm{e}^{-3}\cos(kx), k = 2\pi/64\,\mathrm{km}$.

第一组: 研究触发产生赤道地区和中纬度地区扩展 F 的机制间的可能关系, 即同样从方程组 (1) 出发, 考虑在非线性效应作用下赤道和中纬度地区扩展 F 演化形态上的差异;

第二组: 研究赤道地区 F 区顶部扰动位相与底部不一致的可能机制, 即在某些特殊条件或不同条件的组合下, 赤道地区电离层 F 层峰值以上单独激发扩展 F 的可能性;

第三组: 研究中纬地区扩展 F 出现频率高于线性理论预测的可能机制, 即通过数值模拟考察证实中纬度地区扩展 F 的非线性演化是否确实比线性理论预期的更容易增长.

第一组纬度效应模拟的出发方程组是方程组 (1), 赤道地区磁倾角 $I = 0$, 地磁经度取 110°, 地磁纬度取 0°, 日期选取 6 月 22 日, 地方时选取 2100. 中纬度地区磁倾角 $I = 46°$, 地理经度 108°, 地理纬度 35°, 日期和地方时同赤道地区. 模拟中水平尺度 160 km, 垂直尺度 192 km, 起始高度 270 km; 网格 32×32; 电场为东向定常值, 强度大小 3 mV/m, 模拟结果见图 1.

其中图 1(a) 、(b) 两图是赤道地区, 可以看到在模拟开始后 1585 s, 在电离层 F 区底部生成了一个电子密度减小的 "空泡", 尺度 50 km 左右; 到 4770 s 时 "空泡" 上升了一段距离, 顶部已经越过了 F 区电子密度峰值 (大约 360 km). 在同样的机制作用下, 中纬地区的扩展 F 的演化形态就不尽相同了. 图 1 的 (c) 、(d) 两图是地理纬度 35° 的地方, 可以看到电子密度减小的区域发展形成的形状是贯穿电离层 F 区顶部和底部的巨大柱状, 并且随时间的发展看不到 "空泡" 的上升, 只是柱状结构向上和两侧的膨胀. 这种结构对电波的散射特性与赤道地区的 "空泡" 是不同的: 对于柱状结构, 同一频率的电波可以在很大一段高度范围内都能观测到回波; 而对于尺度小, 边界较锐利的 "空泡", 回波的频率随高度的变化要明显得多. 当考虑电离层中的不规则结构引起的闪烁现象时, 赤道地区的不规则结构模型可以采用球形, 而同样机制引起的中纬度地区的不规则结构模型则应采用柱状模型, 它们对于传播的电波所引起的闪烁是不完全相同的. 因此, 虽然赤道地区和中纬度地区的扩展 F 由同一机制引起, 但由于其发展出的结构形态不同, 从电离图等观测仪器上得到的探测结果却可能不相同. 另外, 文献 [1] 指出, 中纬度地区的顶部探测发现, 当有电离层底部扩展 F 扰动时经常能同时观测到顶部的扰动, 这也与模拟中柱状

结构同时贯穿电离层 F 区顶部和底部的结果是一致的.

当有声重波存在时，声重波扰动形成的扩展 F 在赤道地区和中纬度地区的演化形态也是不相同的. 谢红 [8] 指出：赤道地区当声重波的扰动速度达到一定幅度后，会在波状结构的顶部生成羽柱状结构，随声重波波矢方向不同，羽柱状结构向东或向西倾斜，但发展出的结构基本是对称的.

图 2 是方程组 (2) 的模拟结果，其中声重波的水平扰动速度为 20 m/s，周期 30 min，波数分别为东向 $k_x = -100$ km(图 2a、b) 和西向 $k_x = 100$ km(图 2c、d). 模拟结果发现在中纬度地区，这种演化的发展是不对称的，当波矢西向传播时演化要比波矢东向传播

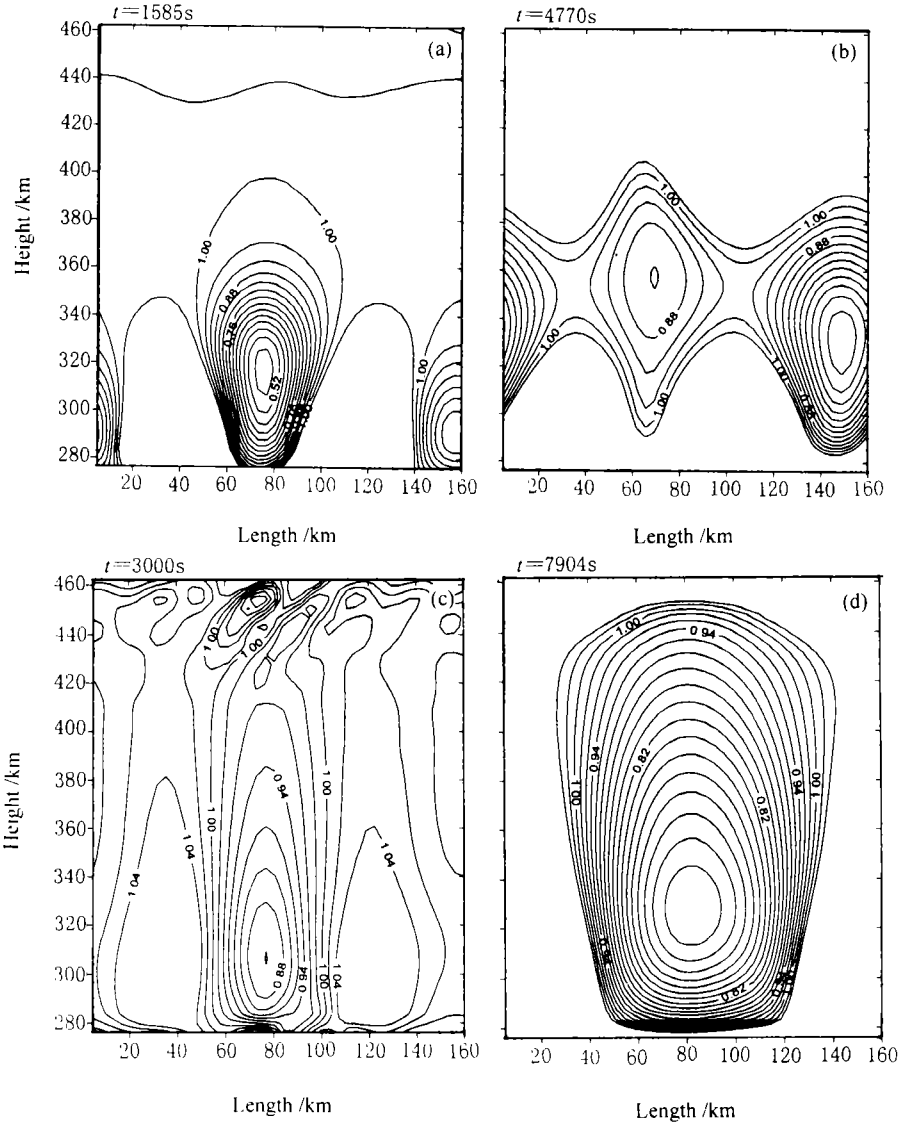

图 1　赤道地区和中纬度地区的比较 (n/n_0 的等值线)

Fig.1　The compare of equatorial and mid-latitude regions (n/n_0 contours)

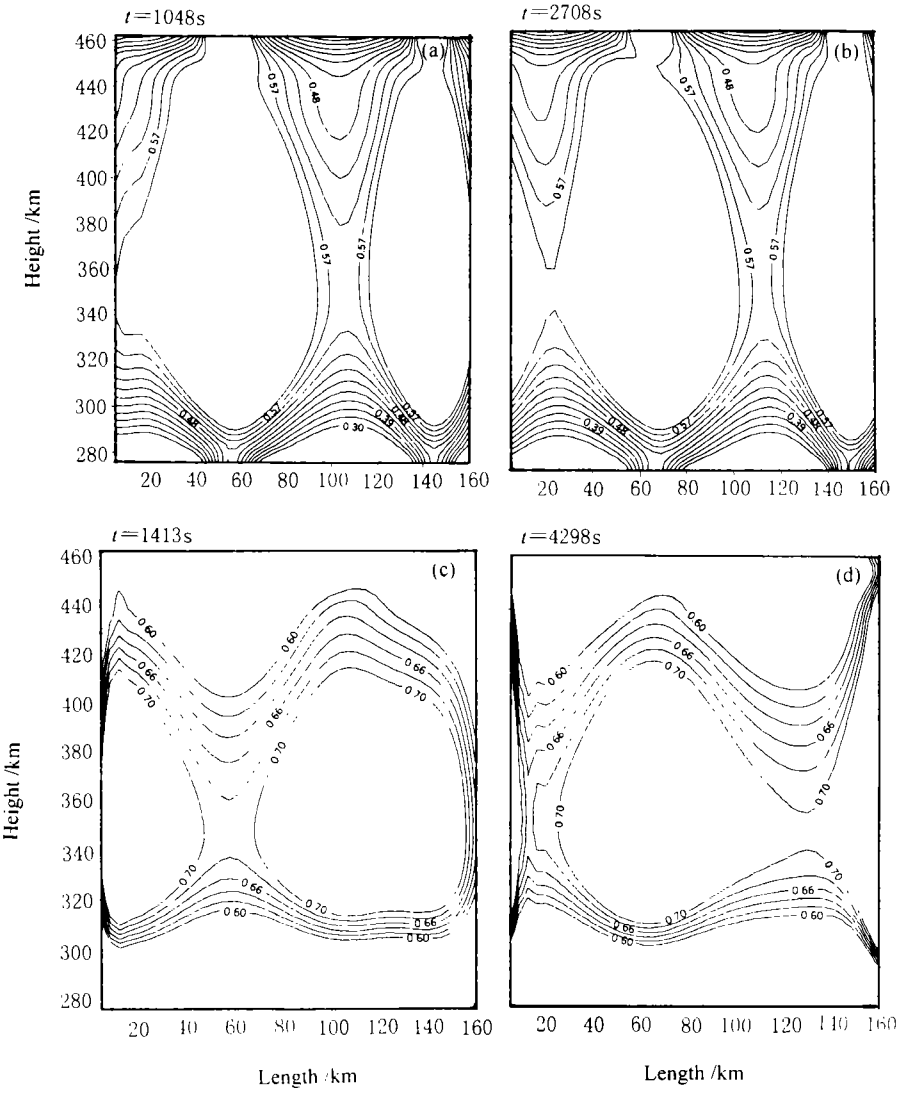

图 2 声重波的效应 ($\times 10^6\,\mathrm{cm}^{-3}$)

Fig.2 The effect of gravity waves ($\times 10^6\,\mathrm{cm}^{-3}$)

演化得慢一些，且波顶部的羽柱状结构升得并不高，使得电离层顶部也生成了波状扰动. 作者认为这种不对称性是因为在中纬度地区有向下的磁倾角，水平运动的扰动波在 $\boldsymbol{v}\times\boldsymbol{B}$ 的作用下会产生倾斜的扰动电场. 其中，垂直方向的电场分量是使扩展 F 产生 $\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{B}$ 非线性抬升所必须的，而北向的电场分量只是使等离子体发生东西方向的漂移. 对于东向传播的扰动波，其北向电场产生的漂移是西向的，而模拟所采用的纬度地区夜晚的背景等离子体漂移是东向的，因此电场引起的漂移减慢了等离子体整体离开原位置的速度，使得扩展 F 得以在原地有较充分的时间演化发展. 而对于西向传播的扰动波，其电场引起的漂移也是东向的，促使等离子体更快地离开原地，因此扩展 F 发展得不够充分. 这是由于磁倾角的存在而造成的差异，在磁倾角为 0 的磁赤道地区是不存在的.

总之，模拟结果发现，在赤道地区和中纬度地区，即使对于同样的触发机制，由于磁倾角的作用使得演化出的结构的形态并不相同，因而我们得到的观测结果可能不相同.

第二组电场效应模拟出发方程组 (1) 在赤道地区的情形，结果见图 3.

其中图 3(a)、(b) 两图的模拟条件与图 2(a)、(b) 两图相同，采用东向电场；图 3(c)、(d) 两图采用 15 mV/m 的西向电场，电场的形式不变. 与传统认为西向电场仅仅对扩展 F 起抑制作用不同，模拟结果发现在电离层 F 区顶部首先生成了一个电子密度减小的 "空泡"，这个 "空泡" 向下发展，并在电子密度峰值高度 (360 km) 左右扩散，而 F 区底部所受的扰动非常小.

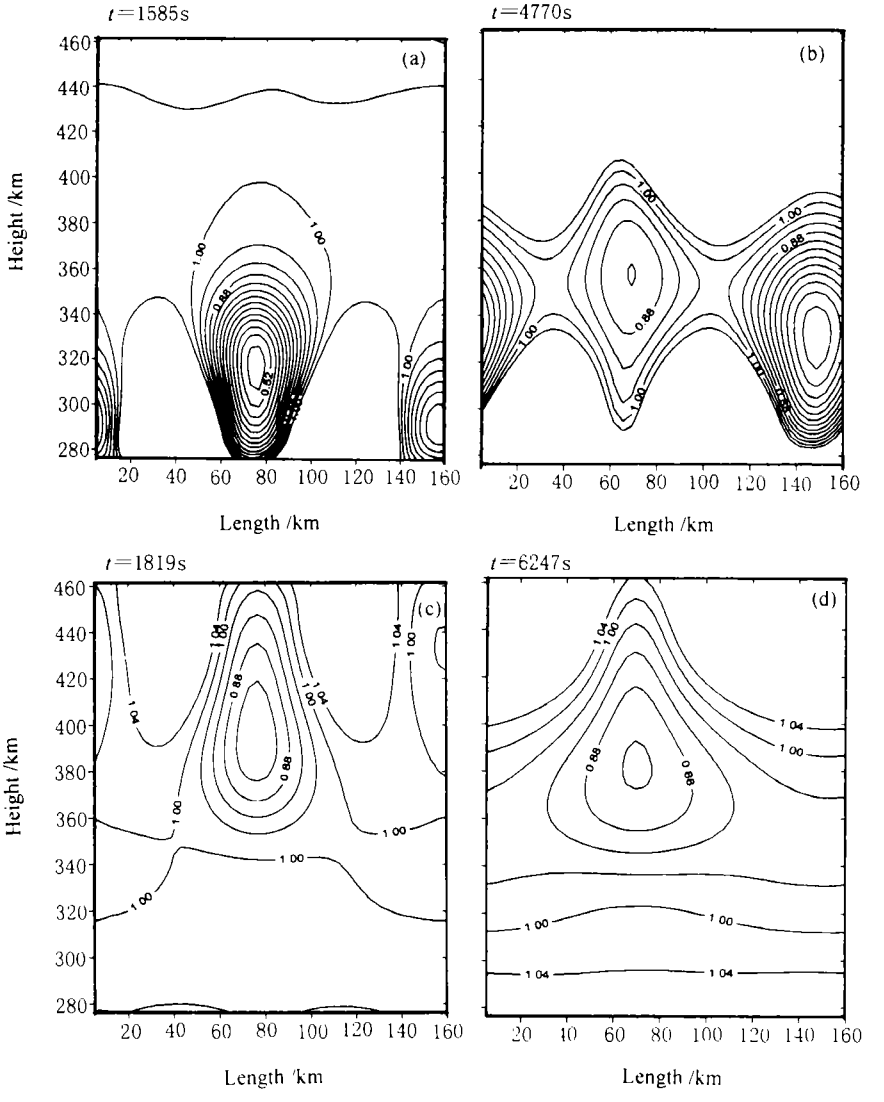

图 3　赤道地区电场的效应 (n/n_0 等值线)

Fig.3　The effect of equatorial electric fields (n/n_0 contours)

从线性增长率公式 (3) 可以看出，在电离层 F 层峰值以上，电子密度梯度为负值，如果电场值大于 0，则线性增长率仍可能为正值．但这要求电离层 F 区顶部有足够的电子密度梯度和小的背景碰撞频率及复合系数，同时要求足够强的西向电场．在同时满足这些条件的情况下，在赤道地区电离层 F 区的顶部首先产生 “空泡”，然后向下发展不是不可能的，文献 [6] 的观测结果也证明了这一点．模拟时还发现当西向电场不够强时，初始扰动和线性理论预见的一样被平息，没有不规则结构发展起来．而且也采用过剪切电场，即 F 区底部采用东向电场， F 区顶部采用西向电场，发现和全部是东向电场类似，有底部的 “空泡” 生成并向上升，而没有顶部 “空泡” 的产生．也就是只要底部有适合 “空泡” 生成

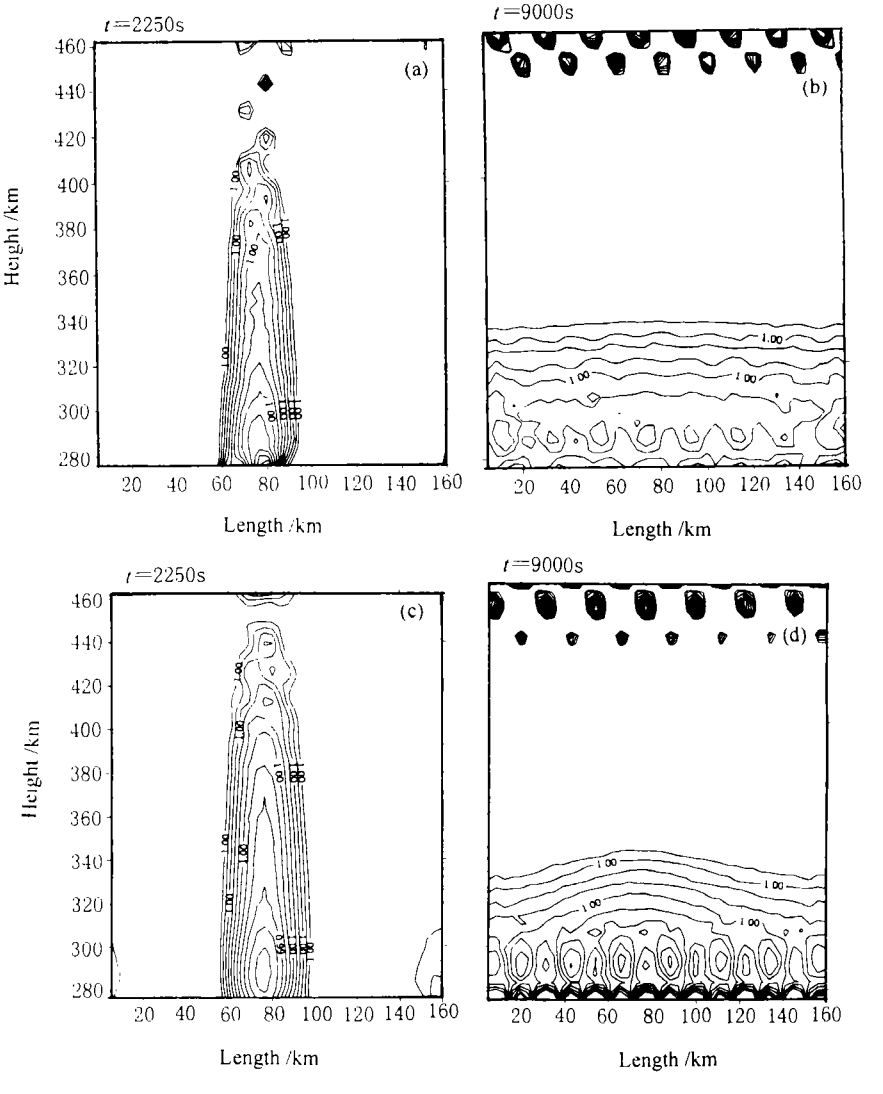

图 4 中纬度地区 n/n_0 等值线

Fig.4 Mid-latitude n/n_0 contours

的电场存在，不管其它高度是什么样的电场，底部的“空泡”总是“优先”生成. 文献 [2] 中统计了午夜后发生的扩展 F 的一些特性，其出现率往往比午夜前并不低. 午夜后电场基本都已经反转成西向，根据线性理论，在声重波、中性风等的影响不达到足以克服西向电场的影响的强度时应不能出现扩展 F，而这样足够强的声重波、中性风等出现的频率可以想象不一定十分频繁. 在这里，我们的模拟提供了另一种可能产生扩展 F 现象的机制.

第三组散射模型模拟出发方程组 (1) 在中纬地区的情形，地理经度、纬度都与第一组中的中纬度地区条件相同，结果见图 4.

其中图 4(a)、(b) 两图是 6 月 22 日晚地方时 1900，图 4(c)、(d) 两图是 12 月 23 日的 2100 的结果. 这两个条件下背景电子密度峰值的高度很低，大概在 300 km 左右，再加上磁倾角的作用，这种背景条件很不利于扩展 F 的生成. 模拟结果也显示虽然有 3 mV/m 的东向电场存在，确实没有生成电子密度减小的区域，相反却在电离层 F 区底部和顶部出现了电子密度增大的结构，这些结构的尺度都比“空泡”的尺度小一倍左右，更加有利于电波的散射. 文献 [7] 也提到过类似的现象. 观测结果显示，中纬度地区扩展 F 现象的季节变化和赤道地区类似，在夏天和冬天会有两个极大值 [1,2]. 冬天电子密度峰值一般都很低，不太可能产生扩展 F，在没有其它原因情况下更不太可能形成出现率峰值的情况，这促使作者提出一个中纬度地区电波散射模型：即在中纬度地区散射电波的机制不仅仅有扩展 F 代表的电子密度减小的区域，在许多时候，如冬季，会有电子密度增大的结构在电离层底部和顶部生成，它们的尺度比较小，更有利于电波的散射. 这也许是中纬度地区观测到的电波散射现象远远高于线性理论预测的扩展 F 出现率的一个重要原因.

4　结　　论

通过对赤道地区和中纬度地区的数值模拟发现，即使对于同样的扰动机制，如相同的出发方程和初始扰动或声重波扰动，在赤道地区和中纬度地区由于背景电离层条件和磁场位型条件等的不相同，所激发的扩展 F 的演化形态是不相同的，赤道地区更容易发展出小的泡状结构，并且泡有向上升的运动；而中纬度地区生成的结构的特点是在电离层 F 层峰值高度上、下同时存在，因而观测到 F 层峰上、下同时有扰动 [1]. 这种演化形态上的差异就会造成不同纬度地区观测现象上的不同，而不一定是演化机制的不同.

由于磁倾角的作用，在赤道地区和中纬度地区处扩展 F 的演化形态不同外，还有其它的一些不同的特点：如赤道地区在合适的背景条件下，足够强的西向电场会在电离层顶部首先产生“空泡”结构，使得扰动能够先在电离层顶部形成，因而观测结果会发现电离层 F 区顶部的发生率高于 F 区底部 [6].

而在中纬地区，在不适合电子密度减小区域生成的条件下，会有电子密度增大的区域在电离层 F 区底部和顶部生成，对电波的散射能力大大增强，这就解释了为什么线性增长率预期的中纬度地区的增长率应随纬度升高而减小，但实际观测到中纬度地区在不适合电子密度减小区域生成的冬天仍然会出现发生率峰值，因为这时会在电离层 F 区顶部和底部有电子密度增大的团状结构生成，而且团状结构的尺度一般比电子密度减小区域的尺度要小，因而散射电波的能力大大增强了.

参 考 文 献

[1] Takashi Maruyama. $\boldsymbol{E} \times \boldsymbol{B}$ instability in the F-region at low-to mid-latitudes. *Planet. Space Sci.*, 1990, **38**(2):273—285

[2] Bowman G G. A comparison of mid-latitude and equatorial-latitude Spread-F characteristics. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1984, **46**(1):65—71

[3] 宁百齐，李钧. 电离层不规则结构的多普勒特性. 空间科学学报， 1996, **16**(1):36—42

[4] 谢红，刘滨莎，萧佐. 中性风在中低纬 Spread-F 中的作用. 北京大学学报 (自然科学版), 1996,**32**(1):78—88

[5] Sigh S. Morphology of equatorial plasma bubbles. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**(A9):20 019—20 029

[6] Calvert W *et al.* Spread-F observations by the Aloaette topside sounder satedite. *J. Geophys. Res.*, 1964, **69**(9):1 839—1 852

[7] 谢红，萧佐. 中低纬 Spread-F 的数值模拟. 地球物理学报， 1993, **36**(1):18—26

[8] 萧佐，谢红. 声重波激发的赤道 Spread-F 不稳定性. 空间科学学报， 1994, **14**(3):183—190

THE CHARACTERISTICS AND RELATIONSHIPS OF EQUATORIAL AND MID-LATITUDE SPREAD-F

ZHANG Tianhua XIAO Zuo

(*Geophysics Department, Peking University, Beijing* 100871)

Abstract

By numerical simulations the characteristics of the mechanism of equatorial and mid-latitude Spread-F and relations between them are studied. It is found that in different latitudes, the same mechanism can evolve into quite different structures as the background ionosphere is different. Then a theory to explain the discord of disturbance phases in bottomside and topside ionosphere, because it is believed that through some combinations of ionospheric parameters, bubbles can generate in topside first without much disturbance of the bottomside ionosphere. And by numerical simulation. A model of radio-wave scattering is put forward to explain the higher occurrence rate of the blur of radio waves in mid-latitudes than what is expected by linear theory.

Key words Spread-F, Rayleigh-Taylor instability, Gravity wave