

罗伟华,徐继生,徐 良. 赤道电离层 R-T 不稳定性发展的控制因素分析. 地球物理学报, 2009, **52**(4): 849~858, DOI: 10.3969/j. issn. 0001-5733. 2009. 04. 001

Luo W H, Xu J S, Xu L. Analysis of controlling factors leading to the development of R-T instability in equatorial ionosphere. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(4): 849~858, DOI: 10.3969/j. issn. 0001-5733. 2009. 04. 001

## 赤道电离层 R-T 不稳定性发展的控制因素分析

罗伟华, 徐继生\*, 徐 良

武汉大学电子信息学院, 武汉 430079

**摘 要** 本文从质量和电荷守恒方程出发, 分析了控制电离层等离子体 R-T 不稳定性线性增长的各种因素, 重点研究了热层风和背景电场的空间梯度对 R-T 不稳定性线性增长的影响. 结果表明, 热层风场和背景电场两者的空间梯度对 R-T 不稳定性线性增长有不可忽视的促进或抑制作用; 对 R-T 不稳定性线性增长起促进作用还是起抑制作用, 依赖热层风场和背景电场及其空间梯度的方向; 对 R-T 不稳定性线性增长影响的显著程度主要依赖于热层风场和背景电场两者空间梯度的大小. 数值计算结果表明, 对典型的背景电离层条件, 磁力线顶点高度为 330 km 时, 对线性增长率的影响最高达到 120%.

**关键词** 电离层, 不规则结构, R-T 不稳定性, 线性增长率, 电场梯度, 风场梯度

DOI: 10.3969/j. issn. 0001-5733. 2009. 04. 001

中图分类号 P352

收稿日期 2008-10-30, 2008-12-02 收修定稿

### Analysis of controlling factors leading to the development of R-T instability in equatorial ionosphere

LUO Wei-Hua, XU Ji-Sheng\*, XU Liang

School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430079, China

**Abstract** In this paper the effect of the spatial gradients of the electric field and the neutral wind on the linear growth of the plasma R-T instability and its growth rate are analyzed, based on the quality and the charge conservation equation. The results reveal that, both electric field spatial gradients and neutral wind spatial gradients can promote or restrain the growth of R-T instability remarkably, which depends on the orientation of the electric field and the neutral wind as well as the polarity of their gradients; and the degree of the influence depends on the magnitude of their spatial gradients and the ratio of the parallel to Pedersen conductance and the ratio of the parallel to transverse wave number for the transverse gradients of the electric field and the neutral wind. Numerical results show that, for the typical ionospheric background condition, the electric field gradients and neutral wind gradients can make the growth rate of R-T instability increase or decrease 10% to 120% for different scale lengths.

**Keywords** Ionosphere, Irregularity, R-T instability, Linear growth rate, Gradient of electric field, Gradient of thermospheric wind

**基金项目** 国家自然科学基金项目(40874085, 40504019)和国家自然科学基金重大项目(40890164)资助.

**作者简介** 罗伟华, 男, 1983 年生, 2004 年毕业于武汉大学, 现为武汉大学博士研究生, 主要从事电离层和电波传播研究.

\* 通讯作者 徐继生, E-mail: jxsu@whu.edu.cn

# 1 引言

日落以后,赤道电离层经常变得不稳定,等离子体不稳定性发展导致赤道扩展 F 产生. 自 Booker 和 Wells 等<sup>[1]</sup>首次发现赤道扩展 F 以来,关于它的生成机制的研究有了很大进展. Dungey<sup>[2]</sup>和 Farley 等<sup>[3]</sup>先后指出,赤道扩展 F 主要由重力瑞利-泰勒不稳定性(以下简称 R-T 不稳定性)驱动. Martyn<sup>[4]</sup>首先在影响扩展 F 生成的因素中引进东-西向电场,认为  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  漂移不稳定性可能生成扩展 F. 现在普遍认为,赤道扩展 F 产生的基本过程是:日落后,由于快速复合作用, E 层电离密度明显降低,而在背景东向电场  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  的作用下, F 层快速抬升. 这样, F 层底部的背景电子密度分布逐渐变陡. 如果有一个初始小扰动,随 R-T 不稳定性的发展,将在 F 层底部形成密度耗尽区. 这些耗尽的等离子体泡上升并穿透 F 层峰达到 F 层顶部,形成赤道扩展 F. R-T 不稳定性的实际重要性在于其演化的非线性阶段所形成的羽状烟云,即沿磁力线拉伸的密度耗尽型不规则结构,这些不规则结构能造成通信导航系统中无线电信号的振幅和相位闪烁.

尽管等离子体不稳定性以及其后效在其非线性发展阶段才能观测到,从而需要非线性数值模拟的结果来解释观测现象. 不过,不稳定性线性发展阶段准确描述有助于深入理解控制不稳定性发展过程的基本物理机制,计算得到的增长率可用于确定和预测赤道和低纬电离层中可能出现等离子体泡和羽状烟云的区域和条件,这对于空间天气和电波闪烁活动的预测非常有意义.

多年来,对于 R-T 不稳定性线性增长率已经进行过大量研究. 概括起来,主要有三种不同形式的描述,即局地描述<sup>[5]</sup>、通量管描述<sup>[6]</sup>和气球模 (ballooning mode) 描述<sup>[7]</sup>,所考虑的电离层条件包括密度梯度、碰撞频率、电场、热层风和电导率. Chou 和 Kuo<sup>[8]</sup>曾提出,研究扩展 F 的形成机制需要引入背景电场和热层风场的梯度的影响,但他们并没有详细讨论背景电场和热层的梯度对线性增长率的影响. 黄朝松和 Kelley<sup>[9]</sup>利用数值模拟表明,空间不均匀电场结构能在赤道地区触发 R-T 不稳定性,导致等离子体泡的产生. 张天华和肖佐<sup>[10]</sup>讨论了横向电导率梯度引起的漂移不稳定性对中纬度地区的扩展 F 的影响,可用于解释某些地方电离层 F 层顶部的不稳定性发生率要高于 F 区底部.

多种技术手段的观测都表明,在电离层 F 层高度上,经常存在热层风和电场的空间梯度. 利用钡离子云实验,文献[11]发现,在扩展 F 活跃期,低纬和赤道电离层中电场存在大尺度的空间梯度; Abdu 等<sup>[12]</sup>指出,晨昏交替面同磁子午面之间存在一个夹角时,可能会产生一个电场梯度. 文献[13]指出,热层风场的空间梯度可能由压强梯度产生. Biondi 等<sup>[14]</sup>比较卫星测量和地基测量的纬圈风场数据后指出,在 250~450 km 高度区域内,纬圈风可能存在沿垂直方向的梯度. 文献[15]注意到子午风在不同高度存在差异,模拟结果表明,计入热层风随高度的变化,计算值和测量结果更为一致. 利用 FPI 测量和 MIG 数据,也发现子午风存在沿场向的梯度<sup>[16,17]</sup>. 此外,强磁扰期间子午风和纬圈风都表现出剧烈变化,这意味着磁扰动期间子午风和纬圈风的梯度更为显著,对扩展 F 的生成和发展可能具有更强的影响<sup>[18]</sup>. 因此,详细分析背景电场和风场的梯度对 R-T 不稳定性发展和扩展 F 生成的影响,将有助于更深入和全面地了解影响赤道扩展 F 生成和发展的条件.

本文将在三维条件下,考察热层风场矢量和电场矢量的空间梯度对赤道扩展 F 生成和发展的影响,着重研究电场梯度和热层风场梯度在 R-T 不稳定性线性增长中所起的作用. 文中推导了包括电场梯度和热层风场梯度的影响在内的线性增长率的完整的数学表达,并在定性分析的基础上,通过数值计算定量地证明,在典型的背景电离层条件下,电场梯度和风场梯度对线性增长率具有极为重要和不可忽略的影响.

## 2 等离子体模型

### 2.1 基本方程

夜间近赤道电离层中,分析控制重力驱动的碰撞 R-T 等离子体不稳定性线性增长的因素,可以从带电粒子的密度和电流连续性方程以及动量平衡方程出发

$$\frac{\partial n_{\alpha}}{\partial t} + \nabla \cdot (n_{\alpha} \mathbf{V}_{\alpha}) = -\beta n_{\alpha}, \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = \nabla \cdot [ne(\mathbf{V}_i - \mathbf{V}_e)] = 0, \quad (2)$$

$$m_{\alpha} n_{\alpha} d\mathbf{V}_{\alpha}/dt = m_{\alpha} n_{\alpha} \mathbf{g} + q_{\alpha} n_{\alpha} (\mathbf{E} + \mathbf{V}_{\alpha} \times \mathbf{B}) - m_{\alpha} n_{\alpha} \nu_{\alpha n} (\mathbf{V}_{\alpha} - \mathbf{U}), \quad (3)$$

式中  $n_{\alpha}$ 、 $m_{\alpha}$  和  $\mathbf{V}_{\alpha}$  分别表示带电粒子的数密度、质量和运动速度,  $\alpha = e, i$  分别代表电子和离子;  $\mathbf{J}$  为电流

密度;  $\nu_{en}$  为带电粒子-中性粒子碰撞频率;  $U$  为热层风速度;  $g$  为重力加速度;  $E$  为极化电场,  $\beta$  是复合系数. 宏观电中性要求,  $n_e \approx n_i = n$ .

## 2.2 偶极坐标系

考虑地磁场近似为偶极子场, 建立偶极坐标系  $(q, s, l)$ . 在偶极坐标系中,  $\hat{e}_q$  为子午面内垂直  $B$  方向的单位矢量(向上为正),  $\hat{e}_l$  为沿  $B$  方向的单位矢量(向北为正), 单位矢量  $\hat{e}_s = \hat{e}_l \times \hat{e}_q$  向东为正. 再引入球坐标系  $(r, \varphi, \theta)$ , 其中  $r$  为地心距离,  $\varphi$  为磁经度,  $\theta$  为磁纬. 这样偶极坐标可以用球坐标表示:

$$q = r / \cos^2 \theta, \quad s = \varphi, \quad l = r_0^3 \sin \theta / r^2, \quad (4)$$

式中  $r_0$  为磁力线与赤道面的交点到地心的距离. 记  $\xi = (1 + 3 \sin^2 \theta)^{1/2}$ , 两坐标系的单位矢量间的关系为

$$\hat{e}_q = \frac{(\cos \theta \hat{e}_r + 2 \sin \theta \hat{e}_\theta)}{\xi}, \quad \hat{e}_s = \hat{e}_\varphi, \\ \hat{e}_l = \frac{B}{B} = \frac{(-2 \sin \theta \hat{e}_r + \cos \theta \hat{e}_\theta)}{\xi}.$$

地磁场  $B = B_0 (R_E / r)^3 \xi \hat{e}_l$ ,  $B_0$  为磁赤道地面上的磁感应强度,  $R_E$  为地球半径. 在偶极坐标系中描述磁场几何构形的尺度因子为

$$h_q = \cos^3 \theta / \xi, \quad h_l = (r / r_0)^3 / \xi, \quad h_s = r \cos \theta. \quad (5)$$

## 2.3 等离子体运动和电流

考虑夜间在 F 层底部约 200 km 以上的高度区域, 以下近似条件一般可以成立:  $\kappa_e \gg 1$ ,  $\kappa_e \gg \kappa_i$ . 这样, 平行电导率  $\sigma_{//}$ , Pedersen 电导率  $\sigma_p$  和 Hall 电导率  $\sigma_H$  分别近似为

$$\sigma_{//} = (ne/B) \kappa_e, \\ \sigma_p = (ne/B) \kappa_i (1 + \kappa_i^2)^{-1}, \quad (6) \\ \sigma_H = (ne/B) (1 + \kappa_i^2)^{-1} = \sigma_p / \kappa_i,$$

式中  $\kappa_{i,e} = \Omega_{i,e} / \nu_{in,en}$  分别表示离子和电子回旋频率与碰撞频率之比,  $\Omega_{i,e} = eB / m_{i,e}$  为离子和电子回旋频率.

500 km 高度以下, 碰撞的特征时间尺度远小于惯性的特征时间尺度, 因此, 可以忽略惯性项<sup>[19]</sup>. 此外, 如果仅考虑波长大于 100 m 的等离子体模, 压强梯度的作用非常小, 可以忽略<sup>[7]</sup>. 这样, 由动量方程(3)可得到离子和电子速度的表达式:

$$V_i = \frac{\sigma_p}{en} \left( E'_{\perp} + \frac{g \times B}{\nu_{in}} \right) - \frac{\sigma_H}{en} \left( E'_{\perp} \times \hat{e}_l - \frac{Bg_{\perp}}{\nu_{in}} \right) \\ + \frac{E'_{\perp} \times \hat{e}_l}{B} + \frac{\kappa_i E_{//}}{B} + \frac{g_{//}}{\nu_{in}} + U, \quad (7)$$

$$V_e = -\frac{\kappa_e E_{//}}{B} + \frac{E_{\perp} \times \hat{e}_l}{B} + U_{//} + \frac{g_{//}}{\nu_{en}}. \quad (8)$$

按照定义, 由(7)、(8)两式并利用(6)式, 可以导

出电流密度的表达式为

$$J = \sigma_{//} E'_{//} + \sigma_p \left( E'_{\perp} + \frac{g \times B}{\nu_{in}} \right) \\ - \sigma_H \left( E'_{\perp} \times \hat{e}_l - \frac{Bg_{\perp}}{\nu_{in}} \right) + en \left( \frac{1}{\nu_{in}} - \frac{1}{\nu_{en}} \right) g_{//}, \quad (9)$$

式中  $E' = E + U \times B$ , 下标  $\perp$  和  $//$  分别表示垂直和平行磁场的分量. 在偶极坐标系中, 重力加速度  $g = -g_{\perp} \hat{e}_q + g_{//} \hat{e}_l$ .

在偶极坐标系中, 方程(1)和(2)可以改写为

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \sum_{j=q,l,s} V_j \frac{\partial n}{h_j \partial j} + \frac{n}{h_q h_s h_l} \left[ \frac{\partial}{\partial q} (h_s h_l V_q) \right. \\ \left. + \frac{\partial}{\partial l} (h_s h_q V_l) + \frac{\partial}{\partial s} (h_q h_l V_s) \right] = -\beta n, \quad (10)$$

$$\nabla \cdot J = \frac{1}{h_q h_s h_l} \left[ \frac{\partial}{\partial q} (h_s h_l J_q) + \frac{\partial}{\partial l} (h_s h_q J_l) \right. \\ \left. + \frac{\partial}{\partial s} (h_q h_l J_s) \right] = 0. \quad (11)$$

## 3 广义 R-T 不稳定性分析

### 3.1 背景电离层和扰动量

在电离层中, 背景电离密度  $n_0 = n_0(q, s, l)$ , 背景电场  $E_0(r, t) = E_{0q} \hat{e}_q + E_{0s} \hat{e}_s + E_{0l} \hat{e}_l$ . 赤道 R-T 不稳定性是一种静电过程<sup>[5]</sup>, 背景电场可以用势函数  $\phi$  表示,  $E = -\nabla \phi$ , 则有  $E_q = -\partial \phi / (h_q \partial q)$ ,  $E_s = -\partial \phi / (h_s \partial s)$ ,  $E_l = -\partial \phi / (h_l \partial l)$ . 热层风场  $U(r, t) = U_q \hat{e}_q + U_s \hat{e}_s + U_l \hat{e}_l$ .

考虑电离层各个参量在平衡态背景上叠加有一个小振幅的扰动, 并用下标 0, 1 分别表示各参量的平衡态背景及其扰动量, 即

$$\phi(r, t) = \phi_0(r) + \phi_1(r, t), \\ n(r, t) = n_0(r) + n_1(r, t), \quad (12) \\ \sigma_K(r, t) = \sigma_{K,0}(r) + \sigma_{K,1}(r, t), \\ K = //, P, H.$$

注意, (12) 式中电导率的扰动由电离密度扰动引起. 由定义式(6),  $\sigma_{K,1} = \sigma_{K,0} n_1 / n_0$ .

进一步假定各扰动量  $\phi_1, n_1, \sigma_{//,1}, \sigma_{p,1}$  和  $\sigma_{H,1}$  形式为

$$a_1 = a_0 \exp[i\omega t - i(m_q q + m_l l + m_s s)], \quad (13)$$

式中  $a_0$  表示恒定的相对扰动幅度. 沿  $q, l, s$  方向的波数分别为  $k_q = m_q / h_q$ ,  $k_l = m_l / h_l$ ,  $k_s = m_s / h_s$ . 由(13)式可以得到

$$\partial a_1 / \partial q = -i m_q a_1, \quad \partial a_1 / \partial l = -i m_l a_1, \quad (14) \\ \partial a_1 / \partial s = -i m_s a_1, \quad \partial a_1 / \partial t = i \omega a_1.$$

### 3.2 线性增长率

将电子速度和电流密度的表达式分别代入方程(10)和(11)中,在接近磁赤道的很窄纬度带内,地磁场近似沿水平方向,对方程(10)和(11)的微分可以忽略偶极坐标系中尺度因子的空间变化.将场从电场中分离出来,并忽略背景电导率的梯度、背景电子密度的场向梯度.在线性化过程中保留一阶量,这样,经过一些数学运算,可得到方程组

$$\begin{bmatrix} a_1 + ia_2 & b_1 + ib_2 \\ c_1 + ic_2 & d_1 + id_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_1 \\ \phi_1 \end{bmatrix} = 0, \quad (15a)$$

方程组的系数分别为

$$\begin{aligned} a_1 &= B \frac{\sigma_{P,0}}{n_0} \left( \frac{\partial U_s}{h_q \partial q} - \frac{\partial U_q}{h_s \partial s} + \frac{\partial E_{0s}}{B h_s \partial s} + \frac{\partial E_{0q}}{B h_q \partial q} \right) \\ &\quad + B \frac{\sigma_{H,0}}{n_0} \left( \frac{\partial U_q}{h_q \partial q} + \frac{\partial U_s}{h_s \partial s} \right) + \frac{\sigma_{//,0}}{n_0} \frac{\partial E_{0l}}{h_l \partial l}, \\ a_2 &= \frac{\sigma_{H,0}}{n_0} \left( E_{0s} - U_q B - \frac{B}{\Omega_i} g_q \frac{\sigma_{P,0}}{\sigma_{H,0}} \right) k_q - \frac{\sigma_{H,0}}{n_0} \\ &\quad \times (E_{0q} + U_s B) k_s + \frac{\sigma_{P,0}}{n_0} \left( U_q B - E_{0s} + \frac{g_q}{\nu_{in}} \right) k_s \\ &\quad - \left[ e \frac{g_l}{\nu_{in}} + E_{0l} \frac{\sigma_{0,0}}{n_0} + e \left( \frac{g_l}{\nu_{in}} - \frac{g_l}{\nu_{en}} \right) \right] k_l, \\ b_1 &= \sigma_{P,0} (k_q)^2 + \sigma_{P,0} (k_s)^2 + \sigma_{//,0} (k_l)^2, \quad b_2 = 0, \\ c_1 &= \frac{\kappa_e}{B} \frac{1}{h_l} \frac{\partial E_{0l}}{\partial l} + \frac{1}{h_l} \frac{\partial U_l}{\partial l} + \beta, \\ c_2 &= \omega - \frac{E_{0s}}{B} k_q + \frac{E_{0q}}{B} k_s - U_l k_l - \frac{g_l}{\nu_{en}} k_l = \omega + c'_2, \\ d_1 &= -n_0 \frac{\kappa_e}{B} k_l^2, \\ d_2 &= \frac{1}{B} \frac{1}{h_q} \frac{\partial n_0}{\partial q} k_s - \frac{1}{B} \frac{1}{h_s} \frac{\partial n_0}{\partial s} k_q - \frac{\kappa_e}{B} \frac{1}{h_l} \frac{\partial n_0}{\partial l} k_l. \end{aligned} \quad (15b)$$

方程组(15)有惟一非零解的条件是系数矩阵的行列式为零,由此得到色散关系为

$$\omega = -ib_1^{-1} [(a_1 + ia_2)(d_1 + id_2)] + ic_1 - c'_2. \quad (16)$$

记  $\omega = \omega_r - i\gamma$ ,  $\gamma$  称作增长率,  $\gamma > 0$  表明扰动出现不稳定增长.增长率的表达式为

$$\gamma = -\frac{a_2}{b_1} d_2 - c_1 + \frac{a_1}{b_1} d_1 = \gamma_0 + \gamma_1 + \gamma_2, \quad (17)$$

式中

$$\begin{aligned} \gamma_0 &= \left[ \left( \frac{g}{\nu_{in}} + \frac{E_{0s}}{B} - U_q + \frac{\nu_{in}}{\Omega_i} \frac{E_{0q}}{B} + \frac{\nu_{in}}{\Omega_i} U_s \right) \right. \\ &\quad \left. + \frac{k_q}{k_s} \frac{\nu_{in}}{\Omega_i} \left( U_q - \frac{E_{0s}}{B} \right) + \frac{E_{0l}}{B} \frac{\sigma_{//,0}}{\sigma_{P,0}} \frac{k_l}{k_s} \right] L_n^{-1} \eta^{-1} - \beta, \end{aligned} \quad (18a)$$

$$\gamma_1 = -\frac{\kappa_e k_l^2}{\eta k_s^2} \left( L_{E,ss}^{-1} \frac{E_{0s}}{B} + L_{E,qq}^{-1} \frac{E_{0q}}{B} \right)$$

$$- \kappa_e \left( \frac{\sigma_{//,0}}{\sigma_{P,0}} \frac{k_l^2}{k_s^2} \eta^{-1} + 1 \right) \frac{E_{0l}}{B} L_{E,ll}^{-1}, \quad (18b)$$

$$\begin{aligned} \gamma_2 &= -\frac{\kappa_e k_l^2}{\eta k_s^2} (-L_{U,qs}^{-1} U_q + L_{U,sq}^{-1} U_s) \\ &\quad + \left( \frac{\kappa_e}{\kappa_i} \frac{k_l^2}{\eta k_s^2} - 1 \right) L_{U,ll}^{-1} U_l, \end{aligned} \quad (18c)$$

$$\begin{aligned} \eta^{-1} &= \frac{\sigma_{P,0}/\sigma_{//,0}}{\sigma_{P,0}/\sigma_{//,0} + k_l^2/k_s^2 + (\sigma_{P,0}/\sigma_{//,0})(k_q^2/k_s^2)} \\ L_n^{-1} &= L_{nq}^{-1} - \frac{k_q}{k_s} L_{ns}^{-1}, \quad L_{nq}^{-1} = \frac{\partial \ln n_0}{h_q \partial q}, \quad L_{ns}^{-1} = \frac{\partial \ln n_0}{h_s \partial s}, \\ L_{E,qq}^{-1} &= \frac{\partial \ln E_{0q}}{h_q \partial q}, \quad L_{E,ss}^{-1} = \frac{\partial \ln E_{0s}}{h_s \partial s}, \quad L_{E,ll}^{-1} = \frac{\partial \ln E_{0l}}{h_l \partial l}, \\ L_{U,qs}^{-1} &= \frac{\partial \ln U_q}{h_s \partial s}, \quad L_{U,sq}^{-1} = \frac{\partial \ln U_s}{h_q \partial q}, \quad L_{U,ll}^{-1} = \frac{\partial \ln U_l}{h_l \partial l}, \end{aligned} \quad (18d)$$

式(18d)中,  $L_{nq}^{-1}$ 、 $L_{ns}^{-1}$ 、 $L_{E,qq}^{-1}$ 、 $L_{E,ss}^{-1}$ 、 $L_{E,ll}^{-1}$ 、 $L_{U,qs}^{-1}$ 、 $L_{U,sq}^{-1}$  和  $L_{U,ll}^{-1}$  分别是标度长度(scale length)  $L_{nq}$ 、 $L_{ns}$ 、 $L_{E,qq}$ 、 $L_{E,ss}$ 、 $L_{E,ll}$ 、 $L_{U,qs}$ 、 $L_{U,sq}$  和  $L_{U,ll}$  的倒数.就其物理意义,标度长度表示对应物理参量的相对大小在给定空间方向上变化的空间特征尺度.在得到(18)式时,考虑在近赤道区域,  $g_q \approx -g$ ,  $g_l \approx 0$ .此外,还应用了流体不可压缩条件,  $\nabla \cdot \mathbf{U} = 0$ .

(18)式中,  $\gamma_0$  是不考虑任何背景电场和热层风场的空间梯度时的线性增长率;  $\gamma_1$  反映纬圈电场的纬圈梯度、垂直电场的垂直梯度和纵向电场的场向梯度的影响;  $\gamma_2$  反映纬圈风场的垂直梯度、垂直风场的纬圈梯度以及平行风场的场向梯度的影响.

由式(18)可以看到,在线性近似条件下,扰动沿各个方向的传播彼此没有耦合,纵向电场和横向电场的作用彼此也没有耦合.为简化讨论,突出热层风场和横向电场的空间梯度对 R-T 不稳定性所起的作用,以下讨论忽略扰动沿  $q$  方向的传播和背景纵向电场及其梯度的影响<sup>[7]</sup>,由此线性增长率的表达式(18)简化为

$$\gamma_0 = \frac{1}{\eta_0} \left( \frac{g}{\nu_{in}} + \frac{E_{0s}}{B} - U_q + \frac{\nu_{in}}{\Omega_i} \frac{E_{0q}}{B} + \frac{\nu_{in}}{\Omega_i} U_s \right) - \beta, \quad (19a)$$

$$\gamma_1 = -\frac{\kappa_e k_l^2}{\eta_0 k_s^2} \left( L_{E,ss}^{-1} \frac{E_{0s}}{B} + L_{E,qq}^{-1} \frac{E_{0q}}{B} \right), \quad (19b)$$

$$\begin{aligned} \gamma_2 &= -\frac{\kappa_e k_l^2}{\eta_0 k_s^2} (-L_{U,qs}^{-1} U_q + L_{U,sq}^{-1} U_s) + \left( \frac{\kappa_e}{\kappa_i} \frac{k_l^2}{\eta_0 k_s^2} - 1 \right) \\ &\quad \times L_{U,ll}^{-1} U_l, \end{aligned} \quad (19c)$$

式中各参量与符号的定义与(18)式相同.

$$\eta_0^{-1} = \frac{\sigma_{P,0}/\sigma_{//,0}}{\sigma_{P,0}/\sigma_{//,0} + k_l^2/k_s^2}. \quad (19d)$$

如果不考虑任何背景电场和热层风场的空间梯度,并取  $\mathbf{E}_0 = E_{0s}\hat{e}_s$  和  $\beta=0$ , 本文得到的增长率表达式(19a)与文献[7]中的(46)式完全相同。

式(19a)表明,要使  $\gamma_0 > 0$ , 必要条件是存在垂直向上的背景密度梯度,同时,东向电场和向下的风场都有利于不稳定性线性增长。离子-中性碰撞频率随高度的增加呈指数下降,因此,日落后的 F 层抬升也有利于不规则体的增长。黄昏期间,东向电场翻转前增强和强磁扰条件下在近赤道电离层可能出现的下行热层风都将引起 F 层抬升,因此,它们对不规则结构的生成与发展有着非常重要的意义。需要指出,垂直向上的电场和向东的风场也有利于不稳定性线性增长,但由于在电离层 F 层,因子  $\nu_{in}/\Omega_i$  很小,它们对线性增长率的影响不如东向电场和下行热层风那样显著。

(19)式中的因子  $\eta_0^{-1}$  依赖平行电导率和 Pedersen 电导率之比以及纵、横向波数比。下面简要讨论因子  $\eta_0^{-1}$  对线性增长率的影响。在电离层 200 km 高度以上,  $\sigma_{p,0}/\sigma_{//,0}$  的量级约  $10^{-7}$ ; 考虑平行波长  $\lambda_l \leq 4l$ ,  $2l$  为一条磁力线的长度,取  $l \sim 1.5 \times 10^3$  km<sup>[7]</sup>, 当东-西向波长  $\lambda_s \sim 1$  km 或更长时,  $\sigma_{p,0}/\sigma_{//,0}$  和  $k_l^2/k_s^2$  具有大致相同的量级,  $\eta_0^{-1} < 1$ , 平行波长和有限的平行电导率对线性增长率的影响不能忽略, R-T 不稳定模具有三维结构; 当东-西向波长  $\lambda_s \ll 1$  km 时,  $\sigma_{p,0}/\sigma_{//,0} \gg k_l^2/k_s^2$ , 则  $\eta_0 \rightarrow 1$ , 由式(19a)得到的线性增长率类似熟知的广义重力 R-T 不稳定性的线性增长率的局地表达式<sup>[7]</sup>。

由(19)式还可以看到,电场梯度和风场梯度对线性增长率影响的显著程度取决于梯度的大小。假定  $\kappa_e k_l^2/\eta_0 k_s^2$  固定,当纬圈电场的纬圈梯度  $L_{E,ss}^{-1} E_{0s}/B$  和垂直电场的垂直梯度  $L_{E,qq}^{-1} E_{0q}/B$  越大时,  $\gamma_1$  越大,电场梯度对线性增长率的影响程度越显著; 同样,当纬圈风场的垂直梯度、垂直风场的纬圈梯度以及平行风场的场向梯度越大时,它们对线性增长率的影响也越显著。

## 4 热层风和背景电场空间梯度的影响

### 4.1 定性分析

下面定性分析横向电场梯度以及风场梯度对线性增长率的影响。首先分析横向电场梯度的影响,然后考察热层风场梯度的影响。

#### 4.1.1 横向电场梯度的影响

仅考虑纬圈电场的纬圈梯度时,由(19)式,线性

增长率的表达式可写成

$$\gamma_{Es} = \gamma_0 + [-L_{E,ss}^{-1}(E_{0s}/B)(\kappa_e k_l^2/k_s^2)\eta_0^{-1}]. \quad (20)$$

(20)式表明,如果东向电场( $E_{0s} > 0$ )存在向西的梯度( $L_{E,ss} < 0$ ),或西向电场( $E_{0s} < 0$ )存在向东的梯度( $L_{E,ss} > 0$ ), (20)式右端第二项大于零,将使线性增长率增加;反之,如果东(西)向电场存在向东(西)的梯度, (20)式右端第二项小于零,将使线性增长率减小。

比较(20)与(19a)式还可以看到,纬圈电场的纬圈梯度对线性增长率的影响程度主要取决于  $L_{E,ss}^{-1} \kappa_e k_l^2/k_s^2$  与  $L_{nq}^{-1}$  的相对大小。如果  $L_{E,ss}^{-1} \kappa_e k_l^2/k_s^2$  远小于  $L_{nq}^{-1}$ , 纬圈电场的纬圈梯度对线性增长率的影响很小,可以忽略;如果  $L_{E,ss}^{-1} \kappa_e k_l^2/k_s^2$  的量级与  $L_{nq}^{-1}$  的量级相当或更大,纬圈电场的纬圈梯度对线性增长率的影响将非常显著,不可忽略。

在 F 层高度,电子磁旋频率与电子-中性成分的碰撞频率之比  $\kappa_e$  很大,量级可达到  $10^4 \sim 10^6$ , 如前所述,当东-西向波长  $\lambda_s \geq 1$  km 时,  $\kappa_e k_l^2/k_s^2$  的量级可达约  $10^{-2} \sim 10^0$ ; 如果  $L_{E,ss}^{-1} \sim L_{nq}^{-1}$  或者  $L_{E,ss}^{-1} > L_{nq}^{-1}$ , 则电场梯度对线性增长率的影响将非常显著,不能忽略;反之,如果  $L_{E,ss}^{-1} \ll L_{nq}^{-1}$ , 则  $L_{E,ss}^{-1} \kappa_e k_l^2/k_s^2 : L_{nq}^{-1}$  的量级约  $10^{-3}$  或更小,电场梯度对线性增长率的影响很小,可以忽略。当东-西向波长  $\lambda_s$  量级为  $10^2$  m 或更短时,  $\kappa_e k_l^2/k_s^2$  量级约  $10^{-3}$  或更小,如果  $L_{E,ss}^{-1} \leq L_{nq}^{-1}$ , 则电场梯度对线性增长率的影响很小,可以忽略;反之,如果  $L_{E,ss}^{-1}$  大于或远大于  $L_{nq}^{-1}$ , 比值  $L_{E,ss}^{-1} \kappa_e k_l^2/k_s^2 : L_{nq}^{-1}$  的量级可达到  $10^{-2}$  或更大,电场梯度对线性增长率的影响依然不能忽略。

仅考虑垂直电场的垂直梯度的影响时,线性增长率的表达式可写成

$$\gamma_{Eq} = \gamma_0 + [-L_{E,qq}^{-1}(E_{0q}/B)(\kappa_e k_l^2/k_s^2)\eta_0^{-1}]. \quad (21)$$

(21)式表明,如果垂直磁力线指向外的电场( $E_{0q} > 0$ )存在垂直磁力线指向内的梯度( $L_{E,qq}^{-1} < 0$ ),或垂直磁力线指向内的电场( $E_{0q} < 0$ )存在垂直磁力线指向外的梯度( $L_{E,qq}^{-1} > 0$ ),都将使线性增长率增加;反之,如果垂直磁力线指向外(内)的电场存在垂直磁力线指向外(内)的梯度,将使线性增长率减小。式(21)与式(19a)比较还可以看到,垂直电场的垂直梯度对线性增长率的影响程度也主要取决于  $L_{E,qq}^{-1} \kappa_e k_l^2/k_s^2$  与  $L_{nq}^{-1}$  的相对大小。

根据 Jicamarca 雷达等技术手段的长期观测结果,在夜间赤道电离层中,垂直电场通常大于纬圈电场,垂直电场引起的夜间离子纬圈漂移的最大值可达  $100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以上<sup>[20]</sup>。因此,如果标度长度  $L_{E,qq}$  和

$L_{E,s}$  相当时,垂直电场的垂直梯度对线性增长率的影响将比纬圈电场纬圈梯度的影响更大。

Raghavarao 等<sup>[11]</sup>利用钡离子云实验发现,在扩展 F 活跃期,电场存在标度长度约为 15 km 的空间梯度,这个标度长度与 F 层底部背景电子密度梯度的标度长度的量级相当,这意味着背景电场的空间梯度对线性增长率的影响,可能是赤道扩展 F 形成和发展的重要控制因素之一。

#### 4.1.2 风场梯度的影响

水平风场沿垂直方向变化称作垂直风剪切,类似地,垂直风场沿水平方向变化可称作水平风剪切。下面首先分析垂直和水平风剪切对线性增长率的影响,然后分析平行风场的场向梯度的效应。

##### (1) 垂直和水平风剪切的效应

由式(19c),仅考虑垂直风剪切时,线性增长率的表达式为

$$\gamma_{us} = \gamma_0 + [-L_{U,sq}^{-1} U_s (\kappa_e k_l^2 / k_s^2) \eta_0^{-1}]. \quad (22)$$

由(22)式可以看到,如果东风场( $U_s > 0$ )存在垂直磁力线指向内的梯度( $L_{U,sq}^{-1} < 0$ )或西风场( $U_s < 0$ )存在垂直磁力线指向外的梯度( $L_{U,sq}^{-1} > 0$ ),将使线性增长率增大;反之,如果东(西)向风场存在垂直磁力线指向外(内)的梯度,将使线性增长率减小。

由式(19c),仅考虑水平风剪切时,线性增长率的表达式可写成

$$\gamma_{uq} = \gamma_0 + L_{U,qs}^{-1} U_q (\kappa_e k_l^2 / k_s^2) \eta_0^{-1}. \quad (23)$$

(23)式表明,如果垂直磁力线指向外的风场( $U_q > 0$ )存在向东的梯度( $L_{U,qs}^{-1} > 0$ ),或垂直磁力线指向内的风场( $U_q < 0$ )存在向西的梯度( $L_{U,qs}^{-1} < 0$ ),将使线性增长率增大;反之,如果垂直磁力线指向外(内)的风场存在向西(东)的梯度,将使线性增长率减小。

将(19a)式与(22)和(23)式比较还可以看到,垂直和水平风剪切对线性增长率的影响程度主要取决于比值( $L_{U,qs}^{-1} \kappa_e k_l^2 / k_s^2$ ): $L_{nq}^{-1}$ 和( $L_{U,sq}^{-1} \kappa_e k_l^2 / k_s^2$ ): $L_{nq}^{-1}$ 的大小。如果比值远小于1,垂直和水平风剪切对线性增长率的影响很小,可以忽略;如果比值接近或大于1,它们对线性增长率的影响将很显著,不可忽略。

观测结果表明,东-西向风场的速度大小在  $100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  上下变化,最大可达  $150 \sim 200 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ <sup>[21]</sup>。如果风场梯度的标度长度与电场梯度的标度长度具有相同的量级,则垂直风剪切对线性增长率的影响比纬圈电场的纬圈梯度的影响更大。Biondi 等<sup>[14]</sup>比较卫星和地基测量的纬圈风场数据后指出,在  $250 \sim 450 \text{ km}$  高度区域内,纬圈风可能存在值得注意的垂直梯度。这意味着背景风场的空间梯度对线性增长

率的影响也不可忽略,是影响赤道扩展 F 形成和发展的另一种控制因素。

##### (2) 平行风场的场向梯度的效应

由式(19c),仅考虑平行风场的场向梯度的影响时,线性增长率的表达式可写成

$$\gamma_{ul} = \gamma_0 + \left[ \frac{\kappa_e}{\kappa_i} \frac{k_l^2}{\eta_0 k_s^2} - 1 \right] L_{U,ll}^{-1} U_l, \quad (24)$$

(24)式中因子 $(\kappa_e / \kappa_i) (k_l^2 / k_s^2) \eta_0^{-1}$ 可改写为 $(\kappa_e / \kappa_i) (\sigma_{//,0} / \sigma_{p,0} + k_s^2 / k_l^2)^{-1}$ ,在  $200 \text{ km}$  高度以上,典型情况下,比值 $\kappa_e / \kappa_i$ 约为  $10^3$ <sup>[22]</sup>, $\sigma_{//,0} / \sigma_{p,0}$ 约为  $10^7$ 。因此,通常因子 $(1 / \kappa_i) (\kappa_e k_l^2 / k_s^2) \eta_0^{-1} \ll 1$ , (24)式等号右边方括号内第一项对线性增长率的影响可以忽略。式(24)化为

$$\gamma_{ul} = \gamma_0 + [-L_{U,ll}^{-1} U_l]. \quad (25)$$

(25)式表明,在磁赤道附近,如果向北的风( $U_l > 0$ )存在向南的梯度( $L_{U,ll}^{-1} < 0$ )或南向风( $U_l < 0$ )存在向北的梯度( $L_{U,ll}^{-1} > 0$ ),都将使线性增长率增加;反之,当北(南)向风存在向北(南)的梯度时,将使线性增长率减小。比较式(25)与(19a),如果平行风场的场向梯度的标度长度与背景电子密度梯度的标度长度满足 $L_{U,ll}^{-1} \ll \eta_0^{-1} L_{nq}^{-1}$ ,则平行风场的场向梯度对线性增长率的影响可以忽略;反之,如果满足 $L_{U,ll}^{-1} \sim \eta_0^{-1} L_{nq}^{-1}$ 或 $L_{U,ll}^{-1} > \eta_0^{-1} L_{nq}^{-1}$ ,平行风场的场向梯度对线性增长率的影响不可忽略。根据 FPI 和 MIG 的实验测量结果<sup>[16,17]</sup>,子午风的梯度通常在  $0.1 \sim 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$  范围内变化,有时可达  $0.5 \sim 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ,子午风速通常约  $10 \sim 100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , $\eta_0^{-1} L_{nq}^{-1}$ 通常在  $1/30 \sim 1/400 \text{ km}^{-1}$  范围内变化,满足条件 $L_{U,ll}^{-1} \geq \eta_0^{-1} L_{nq}^{-1}$ ,其对 R-T 不稳定性的发展有重要的不可忽略的影响。

从(25)式还可以看到,平行风场的场向梯度对 R-T 不稳定性线性增长的影响与背景电子密度和扰动的传播方向两者均无关。另一方面,(20)至(23)式表明,电场和风场的横向梯度 $\partial E_{0s} / h_s \partial s$ 、 $\partial E_{0q} / h_q \partial q$ 、 $\partial U_s / h_q \partial q$ 以及 $\partial U_q / h_s \partial s$ 对线性增长率的影响与背景电子密度无关,但与因子 $(\kappa_e k_l^2 / k_s^2) \eta_0^{-1}$ 有关,这意味着当存在电离层电场和热层风场的这些梯度时,它们对 R-T 不稳定性线性增长的影响依赖平行电导率和 Pedersen 电导率之比以及纵、横向波数比。因此,在分析 R-T 不稳定性线性增长时,R-T 不稳定性的三维描述是必要的,也更为准确。

## 4.2 数值计算结果

下面将基于(19)至(23)式以及(25)式,通过数值计算,定量地估计电离层电场和热层风场两者的

梯度对线性增长率的影响。

计算线性增长率所需要的相关参数,如背景电子密度、电子温度、电导率、密度梯度的标度长度等,将利用 MSIS90<sup>[23]</sup>,IRI2001<sup>[24]</sup> 模型得到. 电子和离子与中性成分的碰撞频率用以下表达式近似计算:

$$\begin{aligned}\nu_{in} &\cong 2.6 \times 10^{-9} n_n M^{-1/2}, \\ \nu_{en} &\cong 5.4 \times 10^{-10} n_n T_e^{1/2},\end{aligned}\quad (26)$$

式中  $n_n$  为中性成分密度 ( $\text{cm}^{-3}$ ),  $M$  为离子的平均质量,  $T_e$  为电子温度 (K), 夜间, 在电离层 200 至 500 km 的高度区域, 可近似取电子温度和中性气体的温度相同。

计算复合系数的表达式为<sup>[25]</sup>

$$\beta = K_1 n(\text{O}_2) + K_2 n(\text{N}_2),$$

式中  $n(\text{O}_2)$ ,  $n(\text{N}_2)$  分别为  $\text{O}_2$  和  $\text{N}_2$  的数密度,  $K_1 = 2 \times 10^{-11} (300/T)^{0.4}$ , 当  $T \leq 750$  K 时,  $K_2 = 1.2 \times 10^{-12} (300/T)$ ,  $T > 750$  K 时,  $K_2 = 8 \times 10^{-14} (T/300)^2$ ,  $T$  为热层中性气体的温度。

本文以 2000 年 12 月 21 日为例进行计算, 这一天磁情平静,  $\Sigma Kp = 8$ , 平均  $Kp = 1^-$ ,  $Ap = 3.8$ ,  $F107$  通量为 194.8; 平均太阳黑子数为 111.4. 在磁赤道上,  $114^\circ\text{E}$ , 由 IRI 模型计算得到, 电离层峰高约为 426.6 km.

在下面的数值计算中, 取东西向电场为  $0.5 \text{ mV} \cdot \text{m}^{-1}$ , 垂直电场为  $3 \text{ mV} \cdot \text{m}^{-1}$ ; 垂直热层风为  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ <sup>[26]</sup>, 由 HWM93 模型<sup>[27]</sup>, 东西向热层风取  $120 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 磁感应强度  $B = 3 \times 10^{-5} \text{ T}$ , 重力加速度取  $g = 9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ . 沿场方向的波数取为  $k_l \geq \pi/2l$ ,  $2l$  是一条磁力线的长度, 依据文献[7], 取  $l = 1500 \text{ km}$ ; 东西向波数  $k_s = 2\pi/\lambda_s$ ,  $\lambda_s$  分别取 1 km 和 2 km.

根据(19a)式, 不考虑电场和热层风场的各种梯度的影响, 同时取两种不同东西向波长  $\lambda_s = 1 \text{ km}$  和  $\lambda_s = 2 \text{ km}$ , 数值计算得到线性增长率  $\gamma_0$  随磁力线顶点高度的变化如图 1 所示. 图 1 中实线表示东西向波长取 1 km, 虚线表示东西向波长取 2 km. 从图 1 可以看到, 在较低的高度,  $\gamma_0$  随高度增加而增加, 分别在 310 km (实线) 和 330 km (虚线) 上下达到极大, 之后随高度增加而减小, 这种随高度的变化主要由因子  $L_m^{-1}$  随高度的变化引起. 此外还可以看到, 当平行波长固定, 东西向波长增大, 线性增长率减小, 这主要是因子  $\eta_0^{-1}$  的作用。

图 2 给出纬圈电场的纬圈梯度(图 2a、2c)和垂直电场的垂直梯度(图 2b、2d)对线性增长率的影响随高度的变化. 图 2a(图 2c)和图 2b(图 2d)分

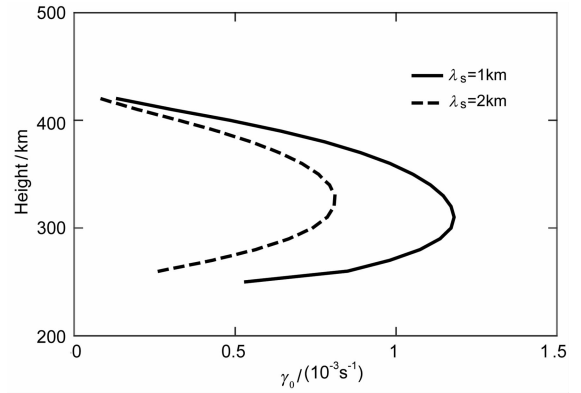


图 1 不同东西向波长时, 增长率 ( $\gamma_0$ ) 随磁力线顶点高度的变化

Fig. 1 Variation of growth rates ( $\gamma_0$ ) vs. the height of the magnetic line apex for the different wave lengths along the west-east direction

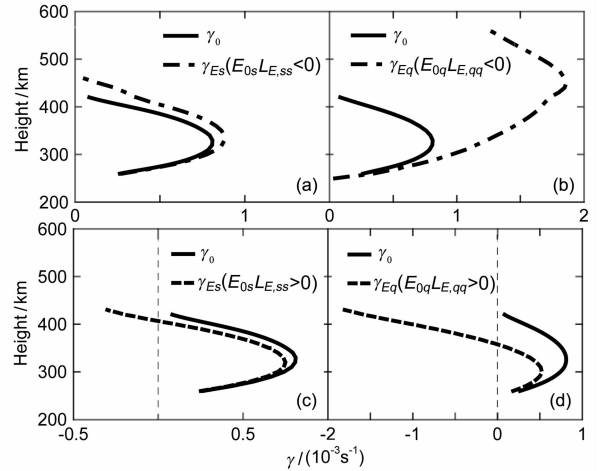


图 2 纬圈电场的纬圈梯度(a 和 c)和垂直电场的垂直梯度(b 和 d)对线性增长率的影响随磁力线顶点高度的变化. 电场梯度的标度长度为 10 km.

Fig. 2 Effects of zonal gradient for zone electric field (a and c) and vertical gradient for vertical electric field (b and d) on linear growth rates and their variations vs. the height of the magnetic line apex

Scale size of electric field gradient is equal to 10 km.

别由(20)和(21)式计算得到. 作为比较, 图中用实线画出了不考虑梯度影响时的线性增长率  $\gamma_0$ , 计算  $\gamma_0$  的条件与图 1 相同 ( $\lambda_s = 2 \text{ km}$ ). 虚线和点虚线表示计入电场梯度时的线性增长率. 纬圈电场的纬圈梯度和垂直电场的垂直梯度的标度长度大小均为 10 km.

由图 2a 和 2b 可以看到, 纬圈电场的纬圈梯度和垂直电场的垂直梯度对增长率的影响程度随高度变化. 在较低的高度, 它们的影响程度比较小, 在 270 km 高度, 与  $\gamma_0$  相比, 它们对增长率的影响只有约 4% 和 27%, 随高度升高, 其影响逐渐增大, 在

400 km 高度, 它们对增长率的影响约 68% 和 410%。如前所述, 纬圈电场的纬圈梯度对线性增长率的影响程度随高度的变化主要由比值 ( $L_{E,ss}^{-1} \kappa_e k_l^2 / k_s^2$ ):  $L_{nq}^{-1}$  随高度的变化引起。整体而言, 与垂直电场的垂直梯度的影响相比, 纬圈电场的纬圈梯度对线性增长率的影响较小。在 330 km 高度, 相对于  $\gamma_0$ , 纬圈电场的纬圈梯度所引起的增长率增加约 9% (参见图 2a); 垂直电场的垂直梯度所引起的增长率增加约 53% (参见图 2b)。图 2c 和 2d 表明, 当  $E_{0q} L_{E,qq}^{-1}$  和  $E_{0s} L_{E,ss}^{-1}$  由负变为正时, 它们引起增长率减小, 是一种致稳定的因素; 在较高的高度上, 甚至使增长率  $\gamma < 0$ , 电离层恢复到稳定状态。与纬圈电场的纬圈梯度和垂直电场的垂直梯度类似, 纬圈风场的垂直梯度和垂直风场的纬圈梯度以及平行风场的场向梯度的符号改变时, 也会由促进 R-T 不稳定性增长转变为抑制不稳定性增长。

图 3 给出取纬圈电场的纬圈梯度和垂直电场的垂直梯度的标度长度均为 30 km 时, 纬圈电场的纬圈梯度 (图 3a) 和垂直电场的垂直梯度 (图 3b) 对线性增长率的影响随高度的变化。计算图 3 的曲线时其他条件与图 2 相同。由图 3 可以看到, 当电场梯度的标度长度由 10 km 增大到 30 km 时, 纬圈电场的纬圈梯度和垂直电场的垂直梯度对增长率的影响都减弱。在 330 km 高度上, 相对于  $\gamma_0$ , 纬圈电场的纬圈梯度所引起的增长率增加约 3% (参见图 3a); 垂直电场的垂直梯度所引起的增长率增加约 18% (参见图 3b)。

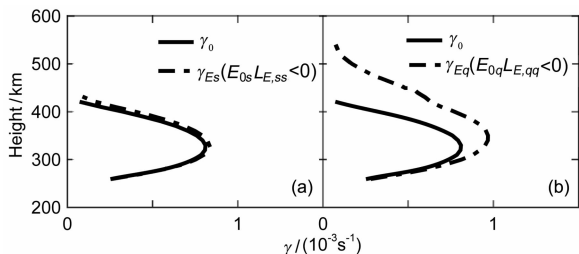


图 3 纬圈电场的纬圈梯度 (a) 和垂直电场的垂直梯度 (b) 对线性增长率的影响随磁力线顶点高度的变化  
电场梯度的标度长度为 30 km。

Fig. 3 Effects of zonal gradient for zone electric field (a) and vertical gradient for vertical electric field (b) on linear growth rates and their variations vs. the height of the magnetic line apex  
Scale size of electric field gradient is equal to 30 km.

图 4 给出垂直风场的纬圈梯度和纬圈风场的垂直梯度对线性增长率的影响随高度的变化。图 4a 和

4b 分别由 (22) 和 (23) 式计算得到。图中实线表示不考虑梯度影响时的线性增长率  $\gamma_0$ , 计算  $\gamma_0$  的条件与图 1 相同 ( $\lambda_s = 2$  km)。点虚线表示计入热层风场梯度时的线性增长率。垂直风场的纬圈梯度和纬圈风场的垂直梯度两者的标度长度均为 10 km。

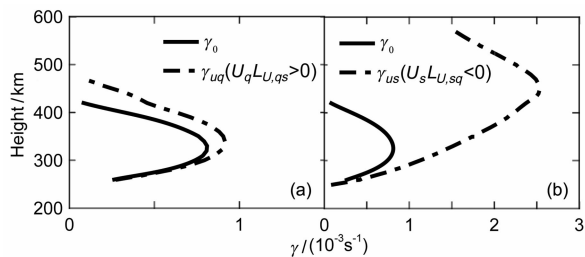


图 4 垂直风场的纬圈梯度 (a) 和纬圈风场的垂直梯度 (b) 对线性增长率的影响随磁力线顶点高度的变化  
梯度的标度长度均为 10 km。

Fig. 4 Effects of zonal gradient for vertical wind field (a) and vertical gradient for zone wind field (b) on linear growth rates and their variations vs. the height of the magnetic line apex  
Scale size of gradient is equal to 10 km.

由图 4 可以看到, 与图 2 类似, 垂直风场的纬圈梯度和纬圈风场的垂直梯度对增长率的影响程度随高度变化。在较低的高度, 它们的影响程度比较小, 随高度升高, 其影响逐渐增大。与垂直风场的纬圈梯度相比, 纬圈风场的垂直梯度的影响对线性增长率的影响相对较大。在 330 km 高度, 与  $\gamma_0$  相比, 垂直风场的纬圈梯度引起增长率相对增加约 12%; 纬圈风场的垂直梯度引起增长率相对增加约 86%。

图 5 给出平行风场的场向梯度 (向北为正) 对线性增长率的影响随高度的变化。平行风场的场向梯度  $U_l L_{U,ll}^{-1}$  的大小分别取  $-0.1, -0.5, -1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 。图中实线表示不考虑梯度影响时的线性增长率  $\gamma_0$ , 计算  $\gamma_0$  的条件与图 1 相同 ( $\lambda_s = 2$  km)。点虚线表示计入平行风场梯度时的线性增长率, 由 (25) 式计算得到。

由图 5 可以看到, 平行风场的场向梯度对线性增长率的影响, 随着梯度大小的增加而增加。在 330 km 高度, 与  $\gamma_0$  相比, 当平行风场的场向梯度为  $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$  时, 引起增长率增加约 12%; 当平行风场的场向梯度为  $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$  时, 引起增长率增加约 61%; 平行风场的场向梯度为  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$  时, 引起增长率增加约 120%。如前所述, 平行风场的场向梯度对线性增长率的影响程度随高度的变化主要由比值  $L_{U,ll}^{-1} : (\gamma_0^{-1} L_{nq}^{-1})$  随高



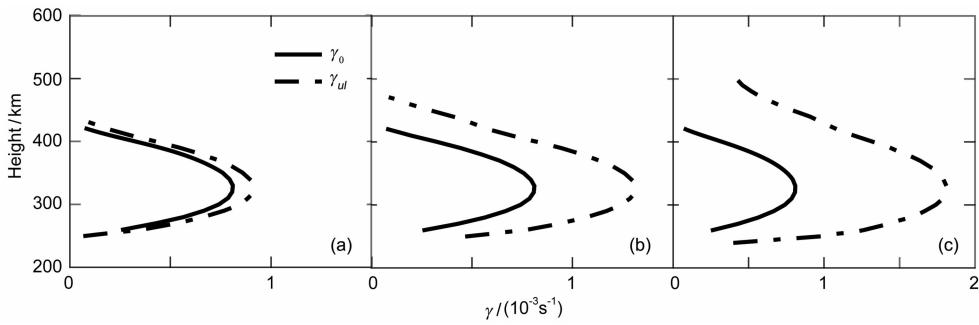


图 5 平行风场的场向梯度对线性增长率的影响随磁力线顶点高度的变化

平行风场的场向梯度分别为  $-0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$  (a),  $-0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$  (b),  $-1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$  (c).

Fig. 5 Effects of field-direction gradient for parallel wind field on linear growth rates and their variations vs. the height of the magnetic line apex

Magnitudes of field-direction gradient of parallel wind field are  $-0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$  (a),  $-0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$  (b) and  $-1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$  (c) respectively.

度的变化引起。

## 5 总结与讨论

本文从质量和电荷守恒方程以及动量平衡方程出发,分析了控制电离层等离子体 R-T 不稳定性线性增长的各种因素,重点讨论了热层风和背景横向电场的空间梯度对 R-T 不稳定性线性增长的影响。定性分析结果揭示,热层风场和背景电场两者的空间梯度对 R-T 不稳定性线性增长有不可忽视的促进或抑制作用;对 R-T 不稳定性线性增长起促进作用还是起抑制作用,依赖热层风场和背景电场及其空间梯度的方向;对 R-T 不稳定性线性增长影响的显著程度主要依赖于热层风场和背景电场两者的空间梯度的大小。定性分析结果还表明,电场和风场的横向梯度对 R-T 不稳定性线性增长的影响依赖平行电导率和 Pedersen 电导率之比以及纵、横向波数比,而平行风场的场向梯度对 R-T 不稳定性线性增长的影响基本上与平行电导率和 Pedersen 电导率之比以及纵、横向波数比无关,表现出明显的各向异性特征。数值计算结果表明,随磁力线顶点高度的增高,电场和风场的梯度对线性增长率的影响也逐渐增大。

本文的研究结果表明,在讨论等离子体 R-T 不稳定性时,考虑背景电场和风场的空间变化可能更接近真实的电离层物理过程,将有助于更全面地了解影响赤道扩展 F 生成和发展的条件,对预测引起中低纬电离层闪烁的不规则结构可能在何时何地出现无疑是很有价值的。

## 参考文献 (References)

- [1] Booker H G, Wells H W. Scattering of radio waves by the F-region of the ionosphere. *Terr. Magn. Atmos. Electr.*, 1938, **43**(3): 249~256
- [2] Dungey J W. Convective diffusion in equatorial F-region. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1956, **9**(5-6): 304~310
- [3] Farley D T, Balsley B B, Woodman R F, et al. Equatorial spread F: implication of VHF radar observations. *J. Geophys. Res.*, 1970, **75**(34): 7199~7216
- [4] Martyn D F. The normal F region of the ionosphere. *Proc. IRE*, 1959, **47**(2): 147~155
- [5] Kelley M C. *The Earth's Ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics*. San Diego, California: Academic Press, 1989
- [6] Sultan P J. Linear theory and modeling of the Rayleigh-Taylor instability leading to the occurrence of equatorial spread F. *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**(A12): 26875~26891
- [7] Basu B. On the linear theory of equatorial plasma instability: comparison of different descriptions. *J. Geophys. Res.*, 2002, **107**(A8): 1199~1108
- [8] Chou S Y, Kuo F S. A numerical study of the wind field effect on the growth and observability of equatorial spread F. *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**(A8): 17317~17149
- [9] 黄朝松, Kelley M C. 电场产生的赤道扩展 F 的时空演变. *地球物理学报*, 1996, **39**(5): 296~305  
Huang C S, Kelley M C. Spatial and temporal evolution of equatorial spread F generated by electric fields. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1996, **39**(5): 296~305
- [10] 张天华, 肖佐. 中、低纬度地区电离层不同层结间的耦合对夜间 F 区不规则结构的影响. *地球物理学报*, 2000, **43**(5): 589~598  
Zhang T H, Xiao Z. Effect of the coupling of different ionospheric regions on the nighttime F region. *Chinese J.*

- Geophys.* (in Chinese), 2000, **43**(5):589~598
- [11] Raghavarao R, Desai J N, Anandarao B G, et al. Evidence for a large scale electric field gradient at the onset of equatorial spread-F. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1984, **46**(4): 355~362
- [12] Abdu M A, Batista I S, Sobral J H A. A new aspect of magnetic declination control of equatorial spread F and F region dynamo. *J. Geophys. Res.*, 1992, **97**(A10):14897~14904
- [13] Meriwether J W, Biondi M A, Herrero F A, et al. Optical interferometric studies of the nighttime equatorial thermosphere: enhanced temperatures and zonal wind gradients. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**(A9):20041~20058
- [14] Biondi M A, Sazykin S Y, Fejer B G, et al. Equatorial and low latitude thermospheric winds; measured quiet variations with season and solar flux from 1980 to 1990. *J. Geophys. Res.*, 1999, **104**(A8):17091~17106
- [15] Friedman J F, Herrero F A. Fabry-Perot interferometer measurements of thermospheric neutral wind gradients and reversals at Arecibo. *Geophys. Res. Lett.*, 1982, **9**(7):785~788
- [16] Herrero F A, Meriwether J W. The 630 nm MIG and the vertical neutral wind in the low latitude nighttime thermosphere. *Geophys. Res. Lett.*, 1994, **21**(2):97~100
- [17] Schlesier A C, Buonsanto M J. Observations and modeling of the April 10-12, 1997 ionospheric storm at Millstone Hill. *Geophys. Res. Lett.*, 1999, **26**(15):2359~2362
- [18] Fagundes P R, Sahai Y, Bittencourt J A, et al. Observations of thermospheric neutral winds and temperatures at Cachoeira Paulista (23S, 45W) during a geomagnetic storm. *Adv. Space Res.*, 1995, **16**(5):27~30
- [19] Huba J D, Schwartz A B, Keskinen M J. Ionospheric turbulence: interchange instabilities and chaotic fluid behavior. *Geophys. Res. Lett.*, 1985, **12**(1):65~68
- [20] Fejer B G, Kudeki E, Farley D T. Equatorial F region zonal plasma drifts. *J. Geophys. Res.*, 1985, **90**(A12):12249~12255
- [21] Martinis C, Meriwether J, Niciejewski R, et al. Zonal neutral winds at equatorial and low latitudes. *J. Atmos. Sol-Terr. Phys.*, 2001, **63**(14):1559~1569
- [22] Rishbeth H. The ionospheric E-layer and F-layer dynamo-a tutorial review. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1997, **59**(15):1873~1879
- [23] Hedin A E. Extension of the MSIS thermospheric model into the middle and lower atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 1991, **96**(A2):1159~1172
- [24] Bilitza D. International reference ionosphere 2000. *Radio Sci.*, 2001, **36**(2):261~275
- [25] Ossakow S L, Zalesak S T, McDonald B E, et al. Nonlinear equatorial spread F: dependence on altitude of the F peak and bottomside background electron density gradient scale length. *J. Geophys. Res.*, 1979, **84**(A1):17~29
- [26] Raghavarao R, Gupta S P, Narayanan R, et al. In situ measurements of winds, electric fields and electron densities at the onset of equatorial spread-F. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1987, **49**(5):485~492
- [27] Hedin A E, Fleming E L, Manson A H, et al. Empirical wind model for the upper, middle and lower atmosphere. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1996, **58**(13):1421~1447

(本文编辑 何 燕)