0254-6124/2019/39(5)-613–10 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

GAO Ze, FANG Hanxian, LIU Saisai, SUN Lingfeng, BAI Junshui, MA Jie. Numerical study on high frequency radio wave heating ionosphere F layer based on one-dimensional model (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2019, **39**(5): 613-622. DOI:10.11728/cjss2019.05.613

基于一维模型的高频电波加热电离层 F 层数值研究

高 泽[1] 方涵先[2] 刘赛赛[3] 孙凌峰[1] 白钧水[1] 马 杰[1]

1(中国人民解放军 61741 部队 北京 100094)

2(国防科技大学气象海洋学院 南京 211101)

3(中国人民解放军 31010 部队 北京 100081)

摘 要 基于电离层一维仿真加热模型, 详细介绍了模型中电子的动量方程、连续性方程、能量方程和各类参量表达式, 利用对角矩阵追赶法数值求解电离层 F 层加热过程, 分析了不同时次电子数密度和电子温度的变化, 讨论了不同频率和不同功率电波加热的情形. 结果表明: 当高频电波加热高电离层时, 电子温度迅速增加, 并很快趋近于饱和状态; 电子密度的变化较为迟缓, 但在加热过程中其变化幅度却越来越大; 电子密度变化量在沿磁场方向上形成空洞和上下稠团两峰一谷构型; 频率越大、功率越高的电波加热时, 电子密度的变化也越大, 但存在一适值频率的电波对电子温度的影响最小.

关键词 人工影响电离层, 高频电波加热, 数值模拟

中图分类号 P 352

Numerical Study on High Frequency Radio Wave Heating Ionosphere F Layer Based on One-dimensional Model

GAO Ze[1] FANG Hanxian[2] LIU Saisai[3]

SUN Lingfeng[1] BAI Junshui[1] MA Jie[1]

1(*Unit 61741 of People's Liberation Army, Beijing* 100094)

2(*Institute of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Nanjing* 211101)

3(*Unit 31010 of People's Liberation Army, Beijing* 100081)

Abstract Based on ionosphere one-dimensional heating model, the momentum equation, continuity equation and energy equation of electrons, and various parameter expressions are introduced. The heating process of ionosphere F layer is numerically solved by using the diagonal matrix pursuit method. During heating, the changes of electron density and temperature at different times are analyzed, the cases of heating ionosphere by radio wave with different frequency and power are also

2018-12-05 收到原稿, 2019-06-10 收到修定稿

E-mail: gaoze_mail@sina.com

discussed. The results show that, when the ionosphere is heated by high frequency radio wave, the electron temperature increases rapidly, and soon approaches saturation. While the change of electron density is always slow, but the change range is more and more large during heating process. Under the influence of the geomagnetic field, the change of the electron density presents the hollow structure with the upper and lower dense structure, which is two peaks and one valley configuration. When radio wave heating ionosphere, the higher the frequency or the power is, the greater the change of electron density is. There is a suitable frequency which has the least influence on electron temperature.

Key words Artificial ionosphere modification, High frequency radio wave heating, Numerical simulation

0 引言

电离层因特殊的电磁环境和等离子体环境, 当其作为电磁波的传播介质时, 活跃在其中的大量自由电子将对电磁波的传播带来影响: 一方面可以吸收电磁波传播的能量, 导致其信号的衰减, 另一方面可以引发散射、反射和折射等现象, 引起电磁波相位和方向等变化, 造成信号的延迟或失真. 所以, 对短波通信、导航定位等信息系统具有重要影响 [1−3]. 但由于电离层不稳定结构, 即不规则体的存在, 经常导致无线电在穿过电离层时发生信号闪烁等现象, 破坏了无线电的正常传播 [4]. 通过人为方式, 改变或改善电离层环境的需求应运而生. 因此, 人工扰动电离层技术研究, 对于认识和主动控制电离层, 保障和保证良好的电磁环境, 规避恶劣通信条件, 尤其是通信导航领域, 具有较大的研究价值和广阔的应用前景.

从 1933 年电波在电离层中传播时互相影响的卢森堡效应, 到 1937 年 Bailey 提出通过大功率无线电波注入电离层进行人工干预的概念, 对电离层人工影响的认识逐渐清晰, 对电离层的理论研究不断深入. 尤其是 70 年代起世界上相继投入电离层加热实验装置, 为高频电波加热电离层的研究拓展积累了丰硕的实践材料. 在电离层加热分析方面, 国外相继开展了大量的研究工作, 例如 Gondarenko 等 [5] 研究了电离层自聚焦加热产生不规则体的机理和过程; Milikh 等 [6] 分析了因为电离层加热而产生的不规则体结构对 GPS 信号的扰动情况; Lofas 等 [7] 研究了夜间电离层在 O 波模式欠密加热下电离层参数的变化情况.

中国对电离层加热的研究起步较晚, 目前的工作仍主要侧重于人工加热电离层的理论研究. 近年来, Zhao, Ni, Deng, Wang 等 [8−11] 均对电离层加热开展了相关数值模拟, 重点分析了中低纬地区电离层因为加热产生大尺度不规则体结构或内部参数不稳定性等问题. 其中, Ni 等 [9] 借助欧姆加热理论, 分析了 84~310 km 范围内电离层加热后电子温度、电子密度、离子密度的变化情况, 与实验对比发现上述参数在总体变化趋势上是一致的. Deng 等 [10] 数值模拟了中低纬电离层加热过程中电子温度和电子密度大尺度场向不均匀体分布变化情况. Xu, Wang, Cheng 等 [12−14] 则主要研究了极区电离层加热问题, 并对比非相干散射雷达的数据, 分析了极区电离层加热试验的效果, 讨论了极区电离层加热引起的电子温度和电子密度的扰动分布特征和饱和特性.

高频电波加热电离层是人工影响电离层的一种主要方式. 当高频电波注入到电离层时, 电离层高层 (F 层) 是除 D, E 两层之外的另一个主加热区域 [10,15]. 研究高电离层电子温度、电子密度等相关参数的受热响应特征, 对于充分认识电离层演变规律及电离层中不规则体结构的生成发展过程具有重要意义.

本文主要以电离层 F 区为主要加热区, 根据一维加热模型中电子的动量方程、连续性方程、能量方程和各类参量的具体表达式, 利用三对角矩阵追赶法实现电离层 F 层加热数值过程的快速求解. 分析受热过程中电离层参数廓线结构上的电子温度和电子密度的变化, 对比不同频率与不同功率电波加热情况下电子温度和电子密度变化, 深入认识电离层加热的机理.

1　电离层一维加热物理模型

1.1　动量方程

主要考虑 4 种带电粒子 (O^+, O_2^+, NO^+, e) 的运动状况及中性风场的影响, 忽略惯性项和黏滞项. 该 4 种粒子的运动表达式为 [16,17]

$$\begin{aligned} &n_\alpha m_\alpha \boldsymbol{g} + q_\alpha n_\alpha(\boldsymbol{E}+\boldsymbol{v}_\alpha\times\boldsymbol{B})- \\ &\quad n_\alpha m_\alpha \sum_{\alpha\neq\beta}\nu_{\alpha\beta}(\boldsymbol{v}_\alpha-\boldsymbol{v}_\beta)- \\ &\quad n_\alpha m_\alpha \nu_{\alpha n}\boldsymbol{v}_\alpha - \nabla \boldsymbol{P}_\alpha = 0. \end{aligned} \tag{1}$$

式中, α 和 β 分别为粒子的种类, n_α 为粒子数密度, m_α 为粒子质量, $\boldsymbol{g}$ 为重力加速度, q_α 为粒子带电量, $\boldsymbol{E}$ 为电场, $\boldsymbol{v}_\alpha$ 为粒子运动速度, $\boldsymbol{B}$ 为地磁场, $\nu_{\alpha\beta}$ 为两种不同带电粒子间的碰撞频率, $\nu_{\alpha\mathrm{n}}$ 为带电粒子与中性粒子间的碰撞频率, $\boldsymbol{P}_\alpha$ 为压力项. 通常可取 $P_\alpha = n_\alpha k T_\alpha$, 这其中 k 为玻尔兹曼常数, T_α 为带电粒子的温度. 一般可假设 3 种正离子的温度是相同的, 取为 T_i.

在准中性条件及偶极扩散假设条件下, 即

$$\sum_i n_\mathrm{i} = n_\mathrm{e} \text{ 和 } \sum_i n_\mathrm{i}\boldsymbol{v}_\mathrm{i} = n_\mathrm{e}\boldsymbol{v}_\mathrm{e}.$$

其中下标 i 和 e 分别为正离子和电子, 求和项中 i 表示第 i 种正离子. 将不同粒子的动量方程进行叠加, 则可将式 (1) 转化为 [16,17]

$$\begin{aligned} &\sum_\alpha [n_\alpha m_\alpha \boldsymbol{g} + q_\alpha n_\alpha(\boldsymbol{E}+\boldsymbol{v}_\alpha\times\boldsymbol{B}) - \nabla n_\alpha k(T_\mathrm{e}+ \\ &\quad T_\mathrm{i})] - n_\mathrm{e} m_\mathrm{e}\nu_\mathrm{en}\boldsymbol{v}_\mathrm{e} - \sum_i n_\mathrm{i} m_\mathrm{i}\nu_\mathrm{in}\boldsymbol{v}_\mathrm{i} = 0. \end{aligned} \tag{2}$$

对于各粒子间的碰撞频率 [16,17], 电子和正离子间的碰撞频率可近似表示为

$$\nu_\mathrm{ei} = 54.5 n_\mathrm{e}/T_\mathrm{e}^{1.5}. \tag{3}$$

电子和中性粒子间的碰撞频率可表示为

$$\begin{aligned} \nu_\mathrm{en} =& 9.32\times10^{-12}[\mathrm{N_2}](1-3.44\times10^{-5}T_\mathrm{e})+ \\ & 5.49\times10^{-10}[\mathrm{O}]T_\mathrm{e}^{0.5} + 1.21\times10^{-10}[\mathrm{O_2}]\cdot \\ & (1+2.15\times10^{-12}T_\mathrm{e}^{0.5})T_\mathrm{e}. \end{aligned} \tag{4}$$

离子 O^+ 和中性粒子间的碰撞频率可表示为

$$\begin{aligned} \nu_{\mathrm{O^+n}} =& 6.82\times10^{-10}[\mathrm{N_2}] + 6.64\times10^{-10}[\mathrm{O_2}]+ \\ & 3.67\times10^{-11}[\mathrm{O}](T_\mathrm{e}/2+T_\mathrm{i}/2)^{0.5}\times \\ & [1-0.064\lg(T_\mathrm{e}/2+T_\mathrm{i}/2)]^2. \end{aligned} \tag{5}$$

粒子 O_2^+ 和中性粒子间的碰撞频率可表示为

$$\begin{aligned} \nu_{\mathrm{O_2^+n}} =& 4.13\times10^{-10}[\mathrm{N_2}] + 2.31\times10^{-10}[\mathrm{O}]+ \\ & 2.59\times10^{-11}[\mathrm{O_2}](T_\mathrm{e}/2+T_\mathrm{i}/2)^{0.5}\times \\ & [1-0.073\lg(T_\mathrm{e}/2+T_\mathrm{i}/2)]^2. \end{aligned} \tag{6}$$

粒子 N_2^+ 和中性粒子间的碰撞频率可表示为

$$\begin{aligned} \nu_{\mathrm{NO^+n}} =& 4.34\times10^{-10}[\mathrm{N_2}] + 4.27\times10^{-10}[\mathrm{O_2}]+ \\ & 2.44\times10^{-11}[\mathrm{O}]. \end{aligned} \tag{7}$$

式中, 中括号分别表示 N_2, O_2, O 三种粒子的数密度, 单位为 $\mathrm{cm^{-3}}$.

在偶极扩散的假设条件下, 有

$$\frac{1}{M_\mathrm{I}\nu_\mathrm{in}} = \sum_i \frac{n_\mathrm{i}/n_\mathrm{e}}{m_\mathrm{i}\nu_\mathrm{in}},$$

其中 $M_\mathrm{I}\nu_\mathrm{in}$ 为离子的碰撞权重因子. 代入式 (2), 在忽略电磁力的作用下, 方程可转化为 [16,17]

$$\begin{aligned} n_\mathrm{e}\boldsymbol{v}_\mathrm{e} =& -\frac{1}{M_\mathrm{I}\nu_\mathrm{in}+m_\mathrm{e}\nu_\mathrm{en}}\Big[\frac{\partial}{\partial s}n_\mathrm{e}k(T_\mathrm{e}+T_\mathrm{i})+ \\ & \sum_\alpha n_\alpha m_\alpha \boldsymbol{g}\Big] + n_\mathrm{e}\boldsymbol{v}_\mathrm{n}. \end{aligned} \tag{8}$$

取向上方向为正向, 将坐标系投影到沿地磁场 S 方向上, 则式 (8) 可转化为

$$\begin{aligned} n_\mathrm{e}\boldsymbol{v}_\mathrm{e} =& -\frac{1}{M_\mathrm{I}\nu_\mathrm{in}+m_\mathrm{e}\nu_\mathrm{en}}\Big[\frac{\partial}{\partial s}n_\mathrm{e}k(T_\mathrm{e}+T_\mathrm{i})+ \\ & \sum_\alpha n_\alpha m_\alpha \boldsymbol{g}\sin I\Big] + n_\mathrm{e}\boldsymbol{v}_\mathrm{n}\cos I. \end{aligned} \tag{9}$$

式 (9) 表示粒子沿磁场方向的动量方程, 其中 v_n 为背景风场的速度, I 为磁倾角.

1.2　连续性方程

在电离层 F 区, 随着高度的增加, 分子性离子 O_2^+ 和 NO^+ 数量逐渐减少, O^+ 数量逐渐增加, 但电子与 O^+ 不易复合, 主要是通过 O^+ 与 N_2 和 O_2 进行电荷交换后生成 O_2^+ 和 NO^+, 再与电子进行复合. 主要涉及的化学反应如下 [16,17]:

O^+ 与 N_2 和 O_2 的电荷交换过程:

$$\mathrm{O^+ + N_2 \to NO^+ + N},\quad \mathrm{O^+ + O_2 \to O_2^+ + O}.$$

O_2^+ 和 NO^+ 与电子的离解性复合:

$$NO^+ + e^- \to O + N, \quad O_2^+ + e^- \to O + O.$$

O_2^+ 与 NO^+ 的数密度由经验模式得出, 则电子连续性方程可表示为

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} = Q_0 - \beta n_e - \frac{\partial n_e v_e}{\partial s}. \tag{10}$$

其中, Q_0 为无加热情况下平衡态时电子产生率, 复合率 $\beta = k_1 n_{NO^+} + k_2 n_{O_2^+}$,

$$k_1 = 4.2 \times 10^{-7}(300/T_e)^{0.85}\,\mathrm{cm}^3 \cdot \mathrm{s}^{-1},$$
$$k_2 = 1.6 \times 10^{-7}(300/T_e)^{0.55}\,\mathrm{cm}^3 \cdot \mathrm{s}^{-1}. \tag{11}$$

1.3 能量方程

在有电波加热的情况下, 能量方程可表述为

$$\frac{3}{2}k\Big(n_e\frac{\partial T_e}{\partial t} + n_e v_e \frac{\partial T_e}{\partial s}\Big) + k n_e T_e \frac{\partial v_e}{\partial s} = \frac{\partial}{\partial s}\Big(K_e \frac{\partial T_e}{\partial s}\Big) + S_Q + S_0 - L. \tag{12}$$

式中, K_e 为地磁场方向的热导率 (单位为 $\mathrm{eV{\cdot}cm^{-1}{\cdot}s^{-1}{\cdot}K^{-1}}$), S_Q 为高频电波加热源项, S_0 为无加热情况下电子的能量吸收项, L 为电子的能量损失项. 其中,

$$K_e = \frac{7.7 \times 10^5 T_e^{2.5}}{1 + 3.22 \times 10^4 (T_e^2/n_e)\sum_\alpha n_\alpha \overline{Q}_{D,\alpha}}. \tag{13}$$

式中: n_α 分别为三种中性粒子 O, O_2, N_2 的数密度; $\overline{Q}_{D,\alpha}$ 为该三种中性粒子相应的动量平均传输截面, 单位 cm^2, 可分别表示为 [16]

$$\overline{Q}_{D,O} = 1 \times 10^{-15}, \tag{14}$$
$$\overline{Q}_{D,O_2} = 2.2 \times 10^{-16}(1 + 3.6 \times 10^{-2} T_e^{0.5}), \tag{15}$$
$$\overline{Q}_{D,N_2} = 1 \times 10^{-17}(2.82 - 3.41 \times 10^{-4} T_e) T_e^{0.5}. \tag{16}$$

在高频电波加热的实验中, 式 (12) 中的 S_Q 一般可按照取反射点当作中心点的近高斯分布方法计算, 则 S_Q 的表达式可表示为 [18−20]

$$S_Q(z) = A S_{Q,\max} \exp[-(z - z_m)^2/\sigma^2]. \tag{17}$$

式中, A 为吸收能量比例常数, z 为高度, z_m 为电波反射点的高度, σ 为高斯分布半宽度, 一般可取为 20 km. 其中,

$$S_{Q,\max} = \frac{\varepsilon_0}{2}\Big(\frac{f_p^2 \nu_e}{f_0^2}\Big) E_{zm}^2$$

为电波反射点处的能量吸收值, 式中 $f_p = \dfrac{n_e e^2}{\varepsilon_0 m_e}$ 为等离子体频率, E_{zm} 为电波在反射点高度处的场强, 并且不同高度处的电波场强强度可以由经验公式 $E(z) = \sqrt{30 P_{ER}}/z$ [21] 确定, P_{ER} 为加热电波的有效辐射功率, ν_e 为电离层电子的碰撞频率, 可取 $\nu_e = \nu_{en} + \nu_{ei}$, 即电子的碰撞频率是电子分别同中性离子和正离子的碰撞频率之和, ν_{en} 与 ν_{ei} 两者可以通过经验公式得到 (见 1.1 节).

1.4 电子能量损失

电离层中电子能量损失的过程主要是由粒子间的碰撞造成的. 主要的损失过程如下 [22,23].

电子与正离子间的弹性碰撞损失

$$L_1 = -n_i n_e (7.7 \pm 0.8) \times 10^{-6} T_e^{-1.5} M_i^{-1} (T_e - T_i). \tag{18}$$

其中, M_i 为正离子的相对质量.

电子与中性粒子间的弹性碰撞损失, 在电离层 F 层, 主要考虑的中性分子有 O, N_2 和 O_2, 电子与这三种中性粒子的弹性碰撞损失过程分别可表示为

$$L_2 = -n_e[O] \times 5.3 \times 10^{-19} T_e^{-0.5} \cdot (T_e - T_n)(1 + 5.7 \times 10^{-4} T_e), \tag{19}$$
$$L_3 = -n_e[O_2] \times 1.8 \times 10^{-19} T_e (T_e - T_n) \cdot (1 - 1.21 \times 10^{-4} T_e), \tag{20}$$
$$L_4 = -n_e[N_2] \times 1.2 \times 10^{-18} T_e^{-0.5} \cdot (T_e - T_n)(1 + 3.6 \times 10^{-2} T_e^{0.5}). \tag{21}$$

其中, T_n 为中性粒子温度, 单位 K.

O_2 和 N_2 两种粒子旋转能级激发而造成电子能量损失的表达式分别为

$$L_5 = -n_e[O_2] \times 7 \times 10^{-14} T_e^{-0.5}(T_e - T_n), \tag{22}$$
$$L_6 = -n_e[N_2] \times 2.8 \times 10^{-14} T_e^{-0.5}(T_e - T_n). \tag{23}$$

O_2 和 N_2 两种粒子振动能级激发而造成电子能量损失的表达式分别为

$$L_7 = n_e[O_2] \times 7.45 \times 10^{-13} \exp\Big(f_1 \frac{T_e - 700}{700 T_e}\Big) \cdot$$

$$\Big[\exp\Big(-3000\frac{T_\mathrm{e}-T_\mathrm{n}}{T_\mathrm{e}T_\mathrm{n}}\Big)-1\Big], \tag{24}$$

$$L_8 = n_\mathrm{e}[\mathrm{N_2}]\times 2.99\times 10^{-12}\exp\Big(f_2\frac{T_\mathrm{e}-2000}{2000T_\mathrm{e}}\Big)\cdot \Big[\exp\Big(-f_3\frac{T_\mathrm{e}-T_\mathrm{n}}{T_\mathrm{e}T_\mathrm{n}}\Big)-1\Big]. \tag{25}$$

其中,

$$f_1 = 3.902\times 10^3+4.38\times 10^2\cdot \tanh[4.56\times 10^{-4}(T_\mathrm{e}-2400)], \tag{26}$$

$$f_2 = 1.06\times 10^4+7.51\times 10^3\cdot \tanh[1.1\times 10^{-3}(T_\mathrm{e}-1800)], \tag{27}$$

$$f_3 = 3300+1.233(T_\mathrm{e}-1000)- 2.056\times 10^{-4}(T_\mathrm{e}-1000)(T_\mathrm{e}-4000). \tag{28}$$

原子 O 粒子的电子能级及精细结构激发而造成电子能量损失的表达式分别为

$$L_9 = n_\mathrm{e}[\mathrm{O}]\times 1.57\times 10^{-12}\exp\Big(f_4\frac{T_\mathrm{e}-3000}{3000T_\mathrm{e}}\Big)\cdot \Big[\exp\Big(-22\,713\frac{T_\mathrm{e}-T_\mathrm{n}}{T_\mathrm{e}T_\mathrm{n}}\Big)-1\Big], \tag{29}$$

$$L_{10} = -n_\mathrm{e}[\mathrm{O}]\times 3.4\times 10^{-12}T_\mathrm{n}^{-1}\cdot (T_\mathrm{e}-T_\mathrm{n})(1-7\times 10^{-5}T_\mathrm{e}). \tag{30}$$

$$f_4 = 2.4\times 10^4+0.3(T_\mathrm{e}-1500)- 1.947\times 10^{-5}(T_\mathrm{e}-1500)(T_\mathrm{e}-4000). \tag{31}$$

综上所述, 电子能量的损失应为上述各损失过程之和 (单位 $\mathrm{eV\cdot cm^{-3}\cdot s^{-1}}$), 可表达为

$$L=\sum_{i=1}^{10}L_\mathrm{i}. \tag{32}$$

2　数值解法

处理电子的动量方程、连续性方程和能量方程时, 采用时间前差、空间中央差分的近似方法. 在本次模拟中, 时间步长 $\Delta t=0.01\,\mathrm{s}$, 空间步长 $\Delta s=3/\sin I$, 单位 km[24].

对于时间一阶导数, 采用

$$\frac{\partial T_\mathrm{e}}{\partial t}=\frac{T_{\mathrm{e},i}^{l+1}-T_{\mathrm{e},i}^{l}}{\Delta t}. \tag{33}$$

对于空间一阶导数, 采用

$$\frac{\partial T_\mathrm{e}}{\partial s}=\frac{1}{2}\Big(\frac{T_{\mathrm{e},i+1}^{l}-T_{\mathrm{e},i-1}^{l}}{2\Delta s}+\frac{T_{\mathrm{e},i+1}^{l+1}-T_{\mathrm{e},i-1}^{l+1}}{2\Delta s}\Big). \tag{34}$$

对于空间二阶导数, 采用

$$\frac{\partial^2 T_\mathrm{e}}{\partial s^2}=\frac{1}{2}\Big[\frac{(T_{\mathrm{e},i+1}^{l}-T_{\mathrm{e},i}^{l})-(T_{\mathrm{e},i}^{l}-T_{\mathrm{e},i-1}^{l})}{(\Delta s)^2}+ \frac{(T_{\mathrm{e},i+1}^{l+1}-T_{\mathrm{e},i}^{l+1})-(T_{\mathrm{e},i}^{l+1}-T_{\mathrm{e},i-1}^{l+1})}{(\Delta s)^2}\Big]. \tag{35}$$

式中, 上标为时间节点, 下标为空间节点. 将近似方法带入到能量方程式 (12) 中, 得到

$$\begin{aligned}&\frac{3}{2}k\Big[n_\mathrm{e}\frac{T_{\mathrm{e},i}^{l+1}-T_{\mathrm{e},i}^{l}}{\Delta t}+\frac{1}{2}n_\mathrm{e}v_\mathrm{e}\Big(\frac{T_{\mathrm{e},i+1}^{l}-T_{\mathrm{e},i-1}^{l}}{2\Delta s}+ \frac{T_{\mathrm{e},i+1}^{l+1}-T_{\mathrm{e},i-1}^{l+1}}{2\Delta s}\Big)\Big]+kn_\mathrm{e}T_{\mathrm{e},i}^{l}\frac{\partial v_\mathrm{e}}{\partial s}= \\ &S_{\mathrm{Q},i}^{l}+S_{0,i}^{l}-L_i^l+\frac{1}{2}\frac{\partial K_\mathrm{e}}{\partial s}\cdot \Big(\frac{T_{\mathrm{e},i+1}^{l}-T_{\mathrm{e},i-1}^{l}}{2\Delta s}+\frac{T_{\mathrm{e},i+1}^{l+1}-T_{\mathrm{e},i-1}^{l+1}}{2\Delta s}\Big)+ \\ &\frac{1}{2}K_\mathrm{e}\Big[\frac{(T_{\mathrm{e},i+1}^{l}-T_{\mathrm{e},i}^{l})-(T_{\mathrm{e},i}^{l}-T_{\mathrm{e},i-1}^{l})}{(\Delta s)^2}+ \frac{(T_{\mathrm{e},i+1}^{l+1}-T_{\mathrm{e},i}^{l+1})-(T_{\mathrm{e},i}^{l+1}-T_{\mathrm{e},i-1}^{l+1})}{(\Delta s)^2}\Big].\end{aligned} \tag{36}$$

将上式展开且合并同类项, 可转化为

$$\begin{aligned}&\Big[-\frac{3}{2}k\frac{1}{2}n_\mathrm{e}v_\mathrm{e}\frac{1}{2\Delta s}+\frac{1}{2}\frac{\partial K_\mathrm{e}}{\partial s}\frac{1}{2\Delta s}- \frac{1}{2}K_\mathrm{e}\frac{1}{(\Delta s)^2}\Big]T_{\mathrm{e},i-1}^{l+1}+\Big[\frac{3}{2}kn_\mathrm{e}\frac{1}{\Delta t}+ K_\mathrm{e}\frac{1}{(\Delta s)^2}\Big]T_{\mathrm{e},i}^{l+1}+\Big[\frac{3}{2}k\frac{1}{2}n_\mathrm{e}v_\mathrm{e}\frac{1}{2\Delta s}- \frac{1}{2}\frac{\partial K_\mathrm{e}}{\partial s}\frac{1}{2\Delta s}-\frac{1}{2}K_\mathrm{e}\frac{1}{(\Delta s)^2}\Big]T_{\mathrm{e},i+1}^{l+1}= \\ &\Big[\frac{3}{2}k\frac{1}{2}n_\mathrm{e}v_\mathrm{e}\frac{1}{2\Delta s}-\frac{1}{2}\frac{\partial K_\mathrm{e}}{\partial s}\frac{1}{2\Delta s}+ \frac{1}{2}K_\mathrm{e}\frac{1}{(\Delta s)^2}\Big]T_{\mathrm{e},i-1}^{l}+\Big[\frac{3}{2}kn_\mathrm{e}\frac{1}{\Delta t}- kn_\mathrm{e}\frac{\partial v_\mathrm{e}}{\partial s}\frac{1}{2\Delta s}-K_\mathrm{e}\frac{1}{(\Delta s)^2}\Big]T_{\mathrm{e},i}^{l}+ \\ &\Big[-\frac{3}{2}k\frac{1}{2}n_\mathrm{e}v_\mathrm{e}\frac{1}{2\Delta s}+\frac{1}{2}\frac{\partial K_\mathrm{e}}{\partial s}t\frac{1}{2\Delta s}+\end{aligned}$$

$$\frac{1}{2}K_{\mathrm{e}}\frac{1}{(\Delta s)^2}\Big]T^l_{\mathrm{e},i+1}+S^l_{\mathrm{Q},i}+S^l_{0,i}-L^l_i. \tag{37}$$

式中, 对 $\dfrac{\partial K_{\mathrm{e}}}{\partial s}$ 和 $\dfrac{\partial v_{\mathrm{e}}}{\partial s}$ 采用空间中央差分方法进行处理, 则由上式可以得出形如

$$\begin{bmatrix} a_1 & b_1 & 0 & \cdots & 0 \\ c_1 & a_2 & b_2 & \ddots & 0 \\ 0 & c_2 & a_3 & \ddots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & b_{n-1} \\ 0 & \cdots & 0 & c_{n-1} & a_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T^{l+1}_{\mathrm{e},1} \\ T^{l+1}_{\mathrm{e},2} \\ T^{l+1}_{\mathrm{e},3} \\ \vdots \\ T^{l+1}_{\mathrm{e},n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ \vdots \\ d_n \end{bmatrix}$$

的三对角矩阵方程组. 当 l 时刻的各物理量已知时, 即三对角矩阵方程中 $a_1, a_2, \cdots, a_n$; $b_1, b_2, \cdots, b_{n-1}$; $c_1, c_2, \cdots, c_{n-1}$; $d_1, d_2, \cdots, d_n$ 也都是已知的, 利用追赶法即可得到 $l+1$ 时刻的 T^{l+1}_{e}, 进而可以更新动量方程、连续性方程和能量方程中与电子温度有关的物理参数. 例如, 各粒子间的碰撞频率、复合率 β、地磁场方向上的热导率 K_{e}、动量平均传输截面 $\overline{Q}_{D,\alpha}$ 等. 再利用电子的连续性方程可得下一个时次的电子密度 n^{l+1}_{e}.

3 初始值和边界条件

这里的数值模拟中, 背景电离层参数由 International Reference Ionosphere 2012 (IRI2012) 模式得出, 中性大气背景参数由中高层大气 NRLMSISE-00 Model 2001 模式计算得出, 纬向风背景风场由 Horizontal Wind Model 07 (HWM07) 模式得出. 模拟地点选为南京地区 (32°N, 118.5°E, 磁倾角 $I = 47.3°$), 模拟开始时间为 2012 年 7 月 15 日 20:00 LT. 在边界问题上, 选用文献 [25] 边界条件, 即电子温度和电子密度两个量, 在顶部边界上保持梯度不变, 在底部边界上保持其值不变.

图 1 给出了模拟初始时刻各物理量的相关参数廓线, 图 1(a) 为电子数密度和电子温度随高度的变化, 本次模拟实验中, 背景电离层的电子密度峰值高度出现在 304 km 高度处, 峰值电子密度约为 $7.22\times10^{11}\,\mathrm{m^{-3}}$, 对应的临界频率近似为 7.63 MHz, 即电波可以穿透电离层的最低频率. 最大的背景电子温度为 1475 K, 出现在 210 km 高度处. 由图 1(a) 可

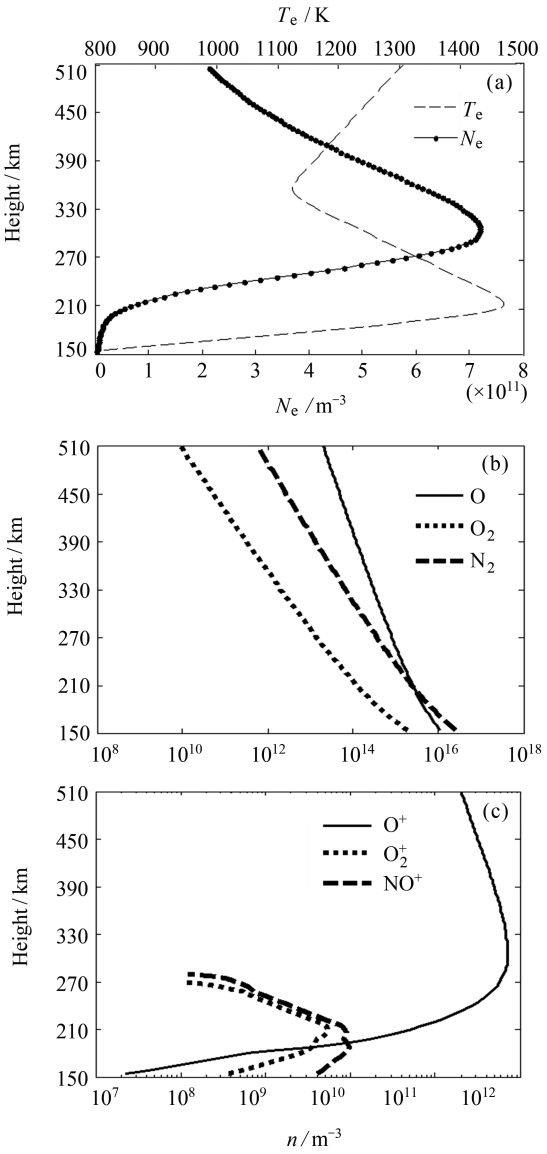


图 1 初始时刻各物理量的参数廓线

Fig. 1 Initial parameter profile of each physical quantity

知, 20:00 LT 时, 背景电子温度随着高度的增加, 呈现出先增加到一个极值点, 然后减少, 后又再增加的趋势. 图 1(b) 描述了 O, O_2, N_2 三种中性粒子随高度的变化情况, 三种粒子皆随高度呈现出递减的趋势, 并且在三个粒子中, O 原子的含量相对较高, O_2 分子的含量相对最少. 图 1(c) 给出了 O^+, O_2^+, N_2^+ 三种正离子随高度的变化情况, 从图中可以清楚地看出, 210 km 之后, 随着高度的增加, O_2^+, N_2^+ 两种正离子的含量迅速减少, O^+ 含量相对较高, 处于主体地位, 这与前文中提到的考虑 O^+ 离子在高电离层中起主导作用的表述相吻合.

4　数值模拟仿真与分析

分析电离层电子密度 N_e 和电子温度 T_e 在不同时刻、不同频率、不同功率加热情况的两种参数变化情况, 以下分析中 $\Delta N_e = N_e - N_{e0}$, $\Delta T_e = T_e - T_{e0}$, 其中 N_{e0} 和 T_{e0} 分别为电子密度和电子温度初始值.

4.1　高电离层被加热过程中电子密度和电子温度的变化

图 2 描述的是一次电离层加热过程中, 沿磁场方向电子数密度和电子温度随时间的变化过程, 加热采

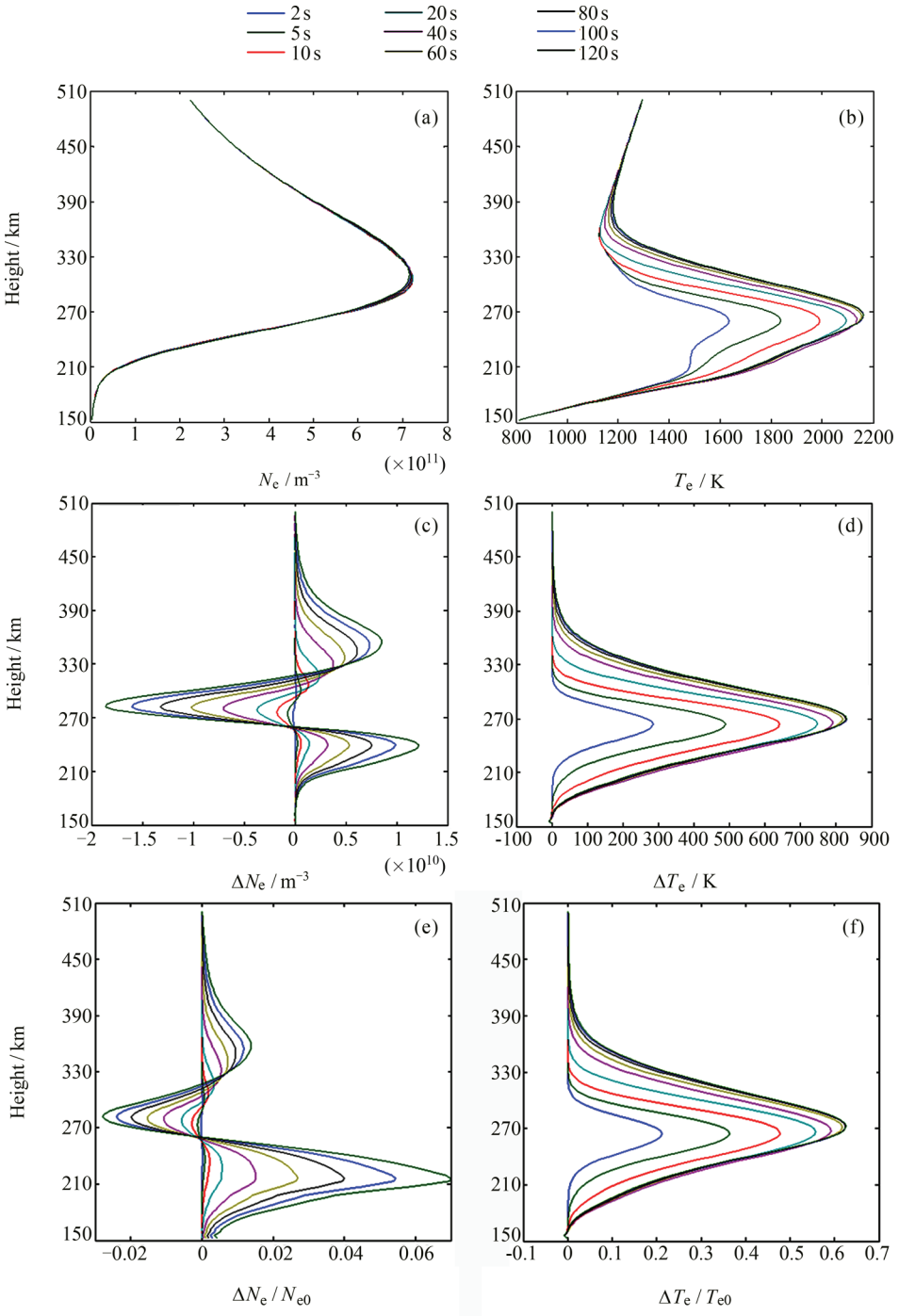


图 2　高电离层被加热过程中沿磁场方向电子数密度与电子温度随时间的变化

Fig. 2　Variation of electron density and temperature along the magnetic field at different time when high ionosphere is heated

用的电波有效功率为 200 MW, 频率为 6.5 MHz, 其低于电离层的临界频率. 图 2(a) (c) (e) 分别给出了电离层电子密度变化廓线、变化量和变化比例, 图 2(b) (d) (f) 分别给出了电离层电子温度变化廓线、变化量和变化比例.

尽管从图 2(a) 不能直观地得出电子密度变化, 但从图 2(c) 可以看出在廓线上存在明显的两峰一谷的电子密度结构. 其原因主要是, 在加热电波的反射点高度附近, 电子受热后沿磁场向上下膨胀运输, 使反射点电子密度被耗散, 上下两侧电子密度压缩而出现稠团的结构, 该现象与文献 [10] 中的结论一致. 由图 2(e) 可以看出, 当加热时间为 2 min 时, 谷区的电子密度最大耗散接近 3%. 在反射点的上下两侧, 分别形成了电子密度的增加区, 随着加热时间的推进, 上层峰值点的高度不断抬升, 下层峰值点的高度较稳定, 同时由图 2(e) 可知, 下层峰值处电子密度变化的比值最大, 当加热时间为 2 min 时, 下层峰值处电子密度增加最大值接近 7%. 对比图 2(c) 与 (e) 还可以看出, 尽管电子密度耗散比例不是峰谷结构中变化比例最大的, 但从变化的数量上, 谷区的电子密度损耗量多于峰区电子密度的增加量, 这可能是由于低层电子密度本身含量较少, 所以下峰区电子密度的变化量虽然不是最多, 但变化比例是最突出的.

从图 2(b) (d) (f) 可以明显看出, 当电波注入电离层时, 背景电子温度迅速升高, 以电波反射点附近电子温度的变化最为突出. 当加热 1 min 左右时, 电子温度的变化趋近饱和, 此时电子温度最大增加量约 850 K, 变化比例最大约 63%. 相比之下, 电子密度的变化随着加热时间的推进并没有出现饱和的趋势, 电子密度最大增加量和耗散量仍随着加热的持续进行可不断增大.

4.2 不同频率电波加热电离层的响应效果

图 3 给出的是 200 MW 功率下, 不同频率电波注入电离层 1 min 后, 沿磁场方向电离层电子密度和电子温度的变化情况. 图 3(a) 为电子密度在不同入射电波频率加热 1 min 时, 沿磁场方向剖线上电子密度的变化情况; 图 3(b) 为电离层电子温度在不同频率入射电波加热情况下的变化情况.

从图 3(a) 可以看出, 入射电波的频率越高, 电子密度的变化程度也就越大, 当然入射电波不能一直增高, 当入射电波高于背景电离层的临界频率时, 电波将穿透电离层而射出. 从图 3(a) 还可以发现, 并不是所有频率的电波都能造成背景电离层剖线上两峰一谷的变化. 当入射电波的频率为 2.5 MHz 时, 未能形成电子密度的耗散区间, 形成的是两个程度较小的密度增加区. 同时还可以看出, 不同频率电波影响的上下范围相当, 随着入射电波频率的增加, 影响的宽度范围略有增加.

从图 3(b) 可以看出, 当加热时间为 1 min 时, 随着入射电波的频率增加, 背景电子温度增加量的最大值先减少后增加, 即在 4.5 MHz 电波加热时, 电子温度的改变程度较其他频率小. 这表明在不同频率电

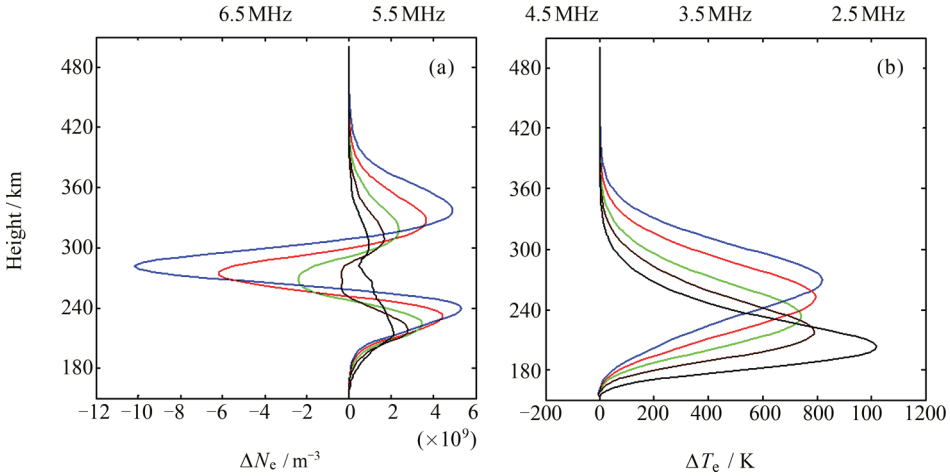


图 3 不同频率电波加热电离层后沿磁场方向电子密度和电子温度的变化特征

Fig. 3 Changes of electron density and temperature along the magnetic field as ionosphere heated by radio waves with different frequencies

波加热电离层时, 存在一个频率的电波使电子温度的增加量最少, 此频率电波既不是能加热电离层的最大频率电波, 也不是最小频率电波. 对比图 3(a) 与 (b) 时, 还可以发现不同频率电波加热情况下, 电子温度变化的最大值出现在电波的反射点高度附近, 而电子密度的最大耗散值并未一直出现在电波的反射点附近. 这主要是电子密度的变化受电子温度、扩散输运、其他中性粒子和正离子含量等因素综合作用的结果.

4.3　不同功率电波加热电离层的响应效果

图 4 给出 6.5 MHz 频率下, 不同功率电波注入电离层 1 min 后, 沿磁场方向电离层电子密度与电子温度的变化情况. 图 4(a) 为电子密度在不同入射电波频率加热 1 min 时, 沿磁场方向剖线上电子密度的变化情况; 图 4(b) 为电离层电子温度在不同频率入射电波加热情况下的变化情况.

从图 4(a) 可以看出, 入射电波的功率越高, 电子密度的变化量也越大, 在电子密度剖线上形成了较好的两峰一谷构型. 从图 4(b) 可以看出, 入射电波的功率越高, 电子温度的变化量也越来越大. 同时分析两图可以看出, 相同间隔大小的电波入射功率, 当入射电波功率越大时, 较上一个功率间隔区间电子密度和电子温度增加量均越来越小. 例如: 加热 1 min 时, 电子密度在 100 MW 电波加热下, 最大耗散量较 50 MHz 电波加热下增加 $2.7\times10^9\ \mathrm{m}^{-3}$; 在 150 MW 电波加热下, 最大耗散量较 100 MHz 电波加热下增加 $2.0\times10^9\ \mathrm{m}^{-3}$; 在 200 MW 电波加热下, 最大耗散量较 150 MHz 电波加热下增加 $1.3\times10^9\ \mathrm{m}^{-3}$. 这表明随着入射电波功率的增加, 电波加热电离层有饱和的倾向, 电子密度的变化同样有饱和的变化倾向.

5　结论

基于电子的动量方程、连续性方程和能量方程, 建立了一维的仿真模型, 数值模拟了电波加热高电离层的过程, 分析了加热过程中不同时次电子数密度和电子温度的变化, 讨论了不同频率和不同功率电波加热电离层的情形, 主要结论如下.

高频电波加热高电离层时, 在背景电子密度沿磁场方向的剖线上形成两峰一谷构型的电子密度变化量. 当 6.5 MHz 的电波加热电离层时, 电子密度的耗散区即谷结构以及电子温度变化的最大点都在电波的反射点附近. 在加热过程中, 电子温度的变化在加热约 60 s 时已趋于饱和状态, 而电子密度的变化随着电波加热的持续, 一直在向更深更强发展.

相同功率、不同频率的电波注入电离层时, 通常在低于背景电离层临界频率的范围内, 频率越高造成的电子密度变化量也越大. 但这一变化趋势并不适用于电子温度的变化. 实验模拟结果表明, 存在一个适值频率的电波对电子温度的影响最小, 无论大于或

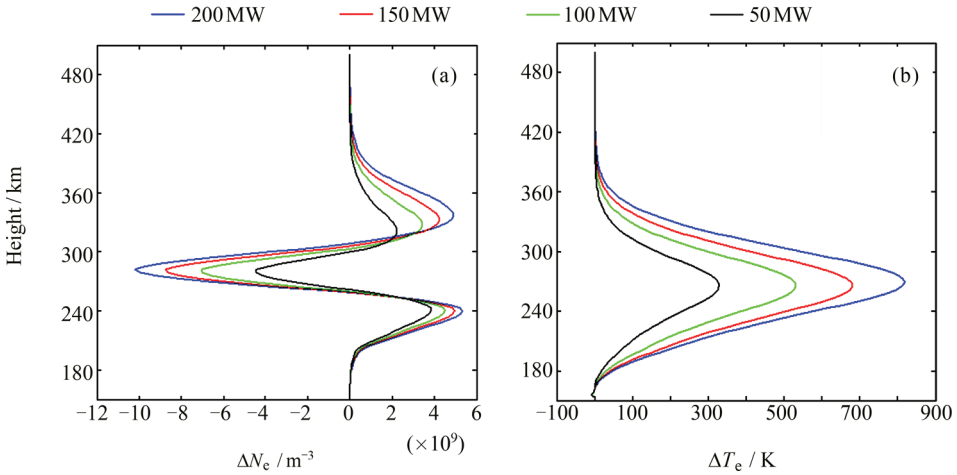


图 4　不同功率电波加热电离层后沿磁场方向电子密度和电子温度的变化特征

Fig. 4　Changes of electron density and temperature along the magnetic field as ionosphere heated by radio waves with different power

小于该频率的电波, 对电子温度的影响都将变大.

相同频率, 不同功率的电波注入电离层时, 通常功率越大, 所造成的电子密度和电子温度的变化量也越大, 并且两者的变化随着功率的增大有缓慢趋近饱和的趋势.

参考文献

[1] TANG Xiaodong, HAN Yunjie, ZHOU Wenyu. Skywave over-the-horizon backscatter radar [C]//2001 CIE International Conference on Radar. Beijing: IEEE, 2001: 90-94

[2] HU Y, ZHAO Z, ZHANG Y. Ionospheric disturbances produced by chemical releases and the resultant effects on short-wave ionospheric propagation [J]. *J. Geophys. Res.*, 2011, **116**(A7). DOI: 10.1029/2011JA016438

[3] HE Fang. A Study of the Space Information Link Modified by Ground-based Powerful High Frequency Radio Waves [D]. Wuhan: Wuhan University, 2009 (何昉. 地基大功率无线电波加热电离层对空间信息链路影响研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2009)

[4] HEADRICK J M. Looking over the horizon [J]. *IEEE Spectrum*, 1990, **27**(7): 36-39

[5] GONDARENKO N A, OSSAKOW S L, MILIKH G M. Generation and evolution of density irregularities due to self-focusing in ionospheric modifications [J]. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**(A9). DOI: 10.1029/2005JA011142

[6] GENNADY M, ALEX G, KIRIL Z, *et al.* Perturbations of GPS signals by the ionospheric irregularities generated due to HF heating at triple of electron gyrofrequency [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2008, **35**(22). DOI: 10.1029/2008GL035527

[7] LOFAS H, IVCHENKO N, GUSTAVSSON B, *et al.* F-region electron heating by X-mode radiowaves in underdense conditions [J]. *Ann. Geophys.*, 2009, **27**(6): 2585-2592

[8] ZHAO Zhengyu, WEI Hanying. General dispersion relation for the three-wave process of parametric excitation II [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2005, **25**(1): 17-22 (赵正予, 魏寒颖. 参量激励过程中三波耦合的一般色散关系 (II) [J]. 空间科学学报, 2005, **25**(1): 17-22)

[9] NI Binbin, ZHAO Zhengyu, XIANG Wei, *et al.* Numerical modeling of ionosphere modification with powerful HF pump waves [J]. *J. Radio Sci.*, 2004, **19**(3): 274-289 (倪彬彬, 赵正予, 项薇, 等. 高频泵波加热电离层的数值模拟 [J]. 电波科学学报, 2004, **19**(3): 274-289)

[10] DENG Feng, ZHAO Zhengyu, SHI Run, *et al.* Two-dimensional simulation of high frequency induced large scale irregularities in F region [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2009, **58**(10): 7382-7390 (邓峰, 赵正予, 石润, 等. 中低纬电离层加热大尺度场向不均匀体的二维数值模拟 [J]. 物理学报, 2009, **58**(10): 7382-7390)

[11] WANG Feng, ZHAO Zhengyu, ZHANG Yuannong. Numerical modeling of ionospheric current artificial modulation at low latitude [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2009, **52**(4): 887-894 (汪枫, 赵正予, 张援农. 低纬地区电离层电流的人工调制数值模拟 [J]. 地球物理学报, 2009, **52**(4): 887-894)

[12] XU Bin, WANG Zhange, XUE Kun, *et al.* 2D numerical simulation of artificial ionospheric heating in polar region [J]. *J. Radio Sci.*, 2010, **25**(1): 14-20 (徐彬, 王占阁, 薛昆, 等. 极区二维人工电离层加热数值仿真 [J]. 电波科学学报, 2010, **25**(1): 14-20)

[13] WANG Zhange, XU Bin, XU Zhengwen, *et al.* A comparison of numerical simulation and measurements during ionospheric heating [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2012, **55**(3): 751-759 (王占阁, 徐彬, 许正文, 等. 极区电离层加热的数值模拟与实验对比 [J]. 地球物理学报, 2012, **55**(3): 751-759)

[14] CHENG Musong. A Study of Polar Ionospheric Heating Experiments and Abnormal Incoherent Scattering Spectra [D]. Xi'an: Xidian University, 2015 (程木松. 极区电离层加热实验及异常非相干散射谱研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2015)

[15] DENG Feng, ZHAO Zhengyu, ZHOU Chen, *et al.* Research of ionospheric ionosphere instability excited in mid and low latitude HF heating [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2010, **53**(1): 10-21 (邓峰, 赵正予, 周晨, 等. 高频电波加热中低纬电离层激励不稳定性研究 [J]. 地球物理学报, 2010, **53**(1): 10-21)

[16] BANKS P M, KOCKARTS G. Aeronomy (Part A and Part B) [M]. New York: Academic Press, 1973

[17] BERNHARDT P A, DUNCAN L M. The feedback-diffraction theory of ionospheric heating [J]. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 1982, **44**(12): 1061-1074

[18] DJUTH F T, SULZER M P, ELDER J H. High resolution observations of HF-induced plasma waves in the ionosphere [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1990, **17**(11): 1893-1896

[19] HANSEN J D, MORALES G J, MAGGS J E. Large-scale HF-induced ionospheric modifications: theory and modeling [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 1992, **97**(A1): 113-122

[20] DUBOIS D F, ROSE H A, RUSSELL D. Excitation of strong Langmuir turbulence in plasmas near critical density: Application to HF heating of the ionosphere [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 1990, **95**(A12): 21221-21272

[21] BELENOV A F, ERUKHIMOV L M, PONOMARENKO P V, *et al.* Interaction between artificial ionospheric turbulence and geomagnetic pulsations [J]. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 1997, **59**(18): 2367-2372

[22] STUBBE P, VARNUM W S. Electron energy transfer rates in the ionosphere [J]. *Planet. Space Sci.*, 1972, **20**(8): 1121-1126

[23] STUBBE P. A new collisional relaxation model for small deviations from equilibrium [J]. *J. Plasma Phys.*, 1987, **38**(11): 95-116

[24] FU Zhufeng, HU Youqiu. Numerical Simulations of Space Plasma [M]. Hefei: Anhui Science and Technology Press, 1995