

项 薇, 赵正予, 胡耀垓. 利用射线追踪方法研究化学物质释放对高频加热的聚焦效应. 地球物理学报, 2011, 54(9): 2201~2212, DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.09.002

Xiang W, Zhao Z Y, Hu Y G. Research on the focusing effect of HF heating caused by the chemical release using ray tracing method. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, 54(9): 2201~2212, DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.09.002

利用射线追踪方法研究化学物质释放 对高频加热的聚焦效应

项 薇, 赵正予, 胡耀垓

武汉大学电子信息学院, 武汉 430079

摘 要 电离层化学物质释放能导致释放区域电子密度的损耗, 从而产生明显的电离层空洞现象. 高频电波通过电离层空洞时, 由于电子密度不同, 对电波产生折射效果进而形成聚焦效应. 本文利用射线追踪方法, 评估高频电波通过空洞形成聚焦加热的效果. 结果表明, 释放水分子与 SF₆ 都能对电离层产生明显的空洞, 空洞半径约为 25~50 km, 电子密度的损耗率 10% 以上, 在释放点附近有时能达到 90%. 不同摩尔数的化学物质释放能带来不同的效果. 在 300 km 高度释放 100 mol 的水分子并且高频电波频率为 15 MHz 时聚焦效果最好. 聚焦后电波能量吸收可增加 10 dB 左右, 增幅达两倍左右. 加热后的温度可以提升约 20%.

关键词 聚焦加热, 电离层空洞, 化学物质释放, 高频加热, 数字射线追踪, 电波传播

DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.09.002

中图分类号 P352

收稿日期 2010-07-12, 2010-12-02 收修定稿

Research on the focusing effect of HF heating caused by the chemical release using ray tracing method

XIANG Wei, ZHAO Zheng-Yu, HU Yao-Gai

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

Abstract The depletion of ionospheric electron density can be generated by the chemical material release, which is nominated as ionosphere hole. When the HF (high frequency) radio waves propagate through the hole, the refraction of the HF radio waves due to the electron density gradient might form a focusing effect. In this paper the effects of ionospheric focus heating by HF radio wave propagation through ionosphere hole are evaluated using the numerical ray tracing method. The leading numerical results are as follows. Release of H₂O and SF₆ is able to produce an obvious hole in the ionosphere with radius of 25~50 km approximately; the electron density's attenuation rate is above 10%, which can sometimes achieve 90% nearby the release point. Additionally chemical materials of different mole number release can also bring different effects. Focusing effects could reach the best performance at 300 km height by releasing 100 mol H₂O when the frequency of the high power radio waves is 15 MHz. Due to the focusing effects, the amplitude of wave energy absorption may raise about 10 dB, which is a twofold increase. After the focused heating the electron temperature may increase approximately 20% than the normal HF heating.

Keywords Focused heating, Ionospheric hole, Chemical material release, HF heating, Numerical ray tracing, radio propagation

1 引言

早在 20 世纪 50 年代,国外已经展开了利用地基大功率激励装置发射高频电磁波对电离层实施人工改变甚至有目的控制的理论研究工作,而地基高频电波加热电离层的实验验证阶段开始于 20 世纪 70 年代,取得了引人注目的加热观测结果.其中, DuBios^[1,2]、Silin^[3,4]、Nishikawa^[5,6]、Gurevich^[7,8]、Perkins^[9]、Fejer^[10,11] 等人的工作推动着高频加热电离层研究的发展.他们发现两种主要的加热机制决定着高频电磁波加热电离层产生的空间效应:一个是经典的欧姆加热,体现了粒子间碰撞引起的电波能量向电子的直接转移;另一个是异常加热,它与波间的非线性相互作用紧密联系,是在 F 层电离层激励参量不稳定性的主要原因之一.

化学物质释放改变电离层首先是在火箭通过电离层时观察发现的^[12].1973 年美国土星 V 火箭在发射天空实验室(SKYLAB)时,在电离层高度上释放出大量尾气(主要成分是 H₂ 和 H₂O),使得电离层 300 km 左右的高度上产生了一个直径达 1000 km 的巨大的电离层空洞,该区的总电子含量减少了近 60%,持续数小时,导致太平洋广大地区上空的地地通讯中断^[13].火箭喷焰的尾气一般都包括大量中性气体(其中主要成分为 H₂O、CO₂、H₂),这些气体能在 F 层迅速扩散然后与电离层中电子产生快速的化学反应,最终导致形成巨大的空洞.

在 20 世纪 80 年代末期,结合化学物质释放与高频加热的相关理论工作由 Bernhardt 等^[14]展开,主要从电波传播的能量出发,模拟出在形成空洞以后对能量的聚焦效应,他们模拟结果表明高频电波能量能通过人工电离层空洞聚焦可以增强 20 dB 左

右.加强的波束通过加速电子激励氧原子的碰撞,从而产生气辉.电波功率密度的大范围增强会激发新的波与等离子体的相互作用,更有利于激发电离层的不稳定性和其他的效应.

电波在介质中的传播原则上由 Maxwell 方程组和边界条件描述,由于高频电磁波的传播一般满足几何光学近似,可以通过射线追踪的方法研究电波在电离层中的传播问题^[15~17].本文利用射线追踪方法研究了化学物质释放对电离层的影响,并且在给出了电离层加热模型和化学物质释放模型的基础上建立了空洞模型,通过数值模拟的方法定量分析了化学物质释放后形成空洞对电波传播聚焦的效应以及对高频加热电波效应的影响.

2 理论方法和计算模型

利用射线追踪方法研究化学物质释放对高频加热的聚焦效果需要三种理论模型,分别为化学物质释放模型、高频电波加热模型和射线追踪计算聚焦加热模型.化学物质释放模型主要是通过释放动力学模型来计算空洞的大小以及电子与各种离子的浓度;高频电波加热模型为对高频无线电波加热电离层的一般方程组进行数值模拟,从而计算在不同的人射电波激励条件下,不同高度电离层对高频电波加热的响应;射线追踪程序则是通过射线方法计算化学物质释放形成的空洞对高频加热的聚焦效应和影响.

2.1 化学物质释放的基本原理和模型

2.1.1 中性气体扩散

假设电离层背景和热层背景为平面指数分层分布,忽略热层风场的影响,中性气体点源释放的扩散方程近似解如下^[18]:

$$n(x, y, z, t) = \frac{N_0}{(4\pi D_0 t)^{1.5}} \exp \left\{ -z \left(\frac{3}{4H_a} + \frac{1}{2H_i} \right) - \alpha t - \frac{H_a^2 \{1 - \exp[-z/(2H_a)]\}^2}{D_0 t} \right. \\ \left. - \frac{(x^2 + y^2) \exp[-z/(2H_a)]}{4D_0 t} - \left(\frac{1}{H_a} - \frac{1}{H_i} \right)^2 \frac{D_0 t \exp[z/(2H_a)]}{4} \right\}, \quad (1)$$

其中, $n(x, y, z, t)$ 为释放物质密度,它是时间 t 和空间 (x, y, z) 的函数, N_0 为释放的总分子数, $H_a = kT/(m_a g)$ 为释放点处背景热层大气标高, $H_i =$

$kT/(m_i g)$ 为被释放气体的标高, k 为玻耳兹曼常数, T 为中性气体温度, m_a, m_i 分别为大气平均分子量和释放气体的分子量, g 为重力加速度; αt 为

由于化学反应引起的损失项,

H_2O 和 SF_6 化学物质的扩散系数 D_0 分别为

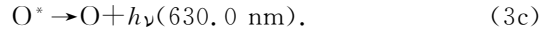
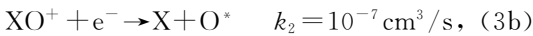
$$H_2O: D_0 = \left(\frac{n_{O_2}}{8.46 \times 10^{17} T^{0.5}} + \frac{n_{N_2}}{2.04 \times 10^{17} T^{0.623}} + \frac{n_{O_2}}{2.02 \times 10^{17} T^{0.632}} \right)^{-1}, \quad (2a)$$

$$SF_6: D_0 = \left(\frac{8.56 \times 10^{16} T^{0.5}}{n_{O_2} + n_{N_2} + n_{O_2}} \right). \quad (2b)$$

2.1.2 离子化学反应

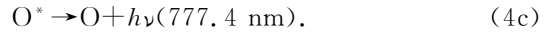
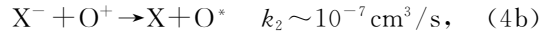
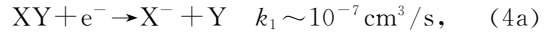
中性气体分子(如 H_2 、 H_2O 、 CO_2 和 SF_6 等), 主要作用于电离层的 F 区, 它们将电离层中的主要离子成分 O^+ 转变为分子离子后再与电子发生离解复合, 导致释放区域电离层电子密度有很大程度降低, 产生所谓“电离层空洞”。依离子化学反应路径不同, 此类物质又可分为^[19]

(1) 正离子中间产物(Positive Ion Intermediary, PII)



其中, k_1 和 k_2 为离子化学反应速率. XY 为 H_2 、 H_2O 、 CO_2 等物质, XO^+ 即所谓正离子中间产物, O^* 是处于激发态的原子氧.

(2) 负离子中间产物(Negative ion intermediary, NII)



XY 为 SF_6 、 CF_3Br 和 $Ni(CO)_4$ 等物质.

一般 NII 的 k_1 大约是 PII 的 k_1 的 100 倍, 因此 NII 比 PII 类物质能产生更强的电离层扰动.

2.1.3 等离子体扩散

电离层化学物质释放区域电子密度的改变, 破坏了原有的带电粒子的密度分布结构和动态平衡. 由等离子体扩散理论, 并假设等离子体被限制只能沿着磁力线运动, 可得到等离子体扩散方程^[20]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_p}{\partial t} = & D \cos^2 I \frac{\partial^2 n_p}{\partial x^2} + D \frac{\cos I \sin I}{H_p} \frac{\partial n_p}{\partial x} - \cos I \cdot v_D \frac{\partial n_p}{\partial x} + D \sin^2 I \frac{\partial^2 n_p}{\partial z^2} \\ & + \left(\sin^2 I \frac{\partial D}{\partial z} + D \sin^2 I \frac{1}{T_p} \frac{\partial T_p}{\partial z} + D \sin^2 I \frac{1}{H_p} - \sin I \cdot v_D \right) \frac{\partial n_p}{\partial z} \\ & + \left[\sin^2 I \frac{\partial D}{\partial z} \frac{1}{T_p} \frac{\partial T_p}{\partial z} + \sin^2 I \frac{\partial D}{\partial z} \frac{1}{H_p} + D \sin^2 I \frac{\partial^2 \ln T_p}{\partial z^2} + D \sin^2 I \frac{\partial \left(\frac{1}{H_p} \right)}{\partial z} \right] n_p \\ & + P - L, \end{aligned} \quad (5)$$

其中: n_p 是离子或电子密度; P 和 L 分别代表带电粒子的产生率和复合率; $T_p = (T_e + T_i)/2$ 是等离子体温度; H_p 是等离子体标高, $H_p = 2T_p k / (m_p g)$; I 是磁倾角; D 是有效双极扩散系数, $D = (1 + T_e/T_i) D_i$, D_i 是离子扩散系数; v_D 为外加漂移速度.

2.1.4 模拟流程

基于 Matlab R2007a 实现了化学物质释放数值模拟通用程序, 流程图如图 1 所示.

2.2 利用射线追踪计算聚焦加热的理论

电离层短波三维射线追踪的理论模型一般都是从 Haselgrove 给出的球坐标系下的三维哈密顿方程出发. Jones^[16] 将时间因子考虑进来, 形成了关于空间和时间的四维哈密顿方程射线方程, 在实际应用中, 射线追踪一般用群路径 $P' = ct$ 作为独立变量, 则群路径的射线方程可写成如下的分量形式:

$$\frac{dr}{dP'} = -\frac{1}{c} \frac{\partial H / \partial k_r}{\partial H / \partial \omega}, \quad (6a)$$

$$\frac{d\theta}{dP'} = -\frac{1}{rc} \frac{\partial H / \partial k_\theta}{\partial H / \partial \omega}, \quad (6b)$$

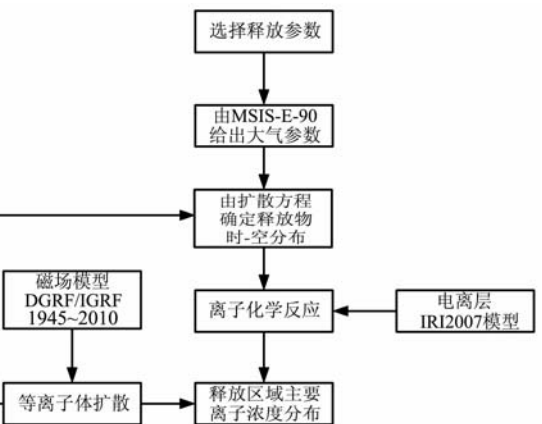


图 1 点源释放数值模拟流程图

Fig. 1 Flow chart of the numerical simulation of point source release

$$\frac{d\varphi}{dP'} = -\frac{1}{rc \sin \theta} \frac{\partial H / \partial k_\varphi}{\partial H / \partial \omega}, \quad (6c)$$

$$\frac{dk_r}{dP'} = \frac{1}{c} \frac{\partial H / \partial r}{\partial H / \partial \omega} + k_\theta \frac{d\theta}{dP'} + k_\varphi \sin \theta \frac{d\varphi}{dP'}, \quad (6d)$$

$$\frac{dk_\theta}{dP'} = \frac{1}{r} \left(\frac{1}{c} \frac{\partial H}{\partial \theta} - k_\theta \frac{dr}{dP'} + k_\varphi r \cos\theta \frac{d\varphi}{dP'} \right), \quad (6e)$$

$$\frac{dk_\varphi}{dP'} = \frac{1}{r \sin\theta} \left(\frac{1}{c} \frac{\partial H}{\partial \varphi} - k_\varphi \sin\theta \frac{dr}{dP'} - k_\theta r \cos\theta \frac{d\theta}{dP'} \right), \quad (6f)$$

$$\frac{d(\Delta f)}{dP'} = \frac{1}{2\pi} \frac{d\Delta\omega}{dP'} = \frac{1}{2\pi} \frac{d\omega}{dP'} = -\frac{1}{2\pi} \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (6g)$$

其中, r, θ 和 φ 是射线路径上的点在球坐标系中的坐标; 群路径 $P' = ct$ 作为独立变量; k_r, k_θ 和 k_φ 是波矢量 \mathbf{k} 在球坐标系中的三个分量, 有 $k_r^2 + k_\theta^2 + k_\varphi^2 = \omega^2/c^2$, ω 为波的角频率; c 为自由空间光速; H 为哈密顿算符; t 为时间; τ 是一个参数, 它的取值取决于哈密顿函数。

式(6a)~(6f)用于计算射线路径上某一点的坐标及该点处波矢量各分量的大小, 式(6g)计算时变介质中电磁波的频率漂移, 由于电离层的时变性造成的频率漂移量很小, 在计算射线参数时可忽略不计。因此在射线追踪每一步可以不计算式(6g), 利用(6a)~(6f)式进行射线追踪的过程中也无需对频率进行调整。对于确定的初始值, 利用 Runger-Kutta 法求解(6a)~(6f)式的射线微分方程组, 群路径每变化一个步长, 便可得到射线路径上不同点处的波矢量及坐标矢量, 将所有点连接起来, 最终便可形成完整的射线描述, 同时也可得到传播路径的主要参数如群路径、地面距离、方位偏差等。

电离层模型下的射线追踪实现流程基本框架如图 2 所示。

2.3 高频电波加热的基本理论

作为解释高频加热电离层各种现象的经典理论, 欧姆加热机制的实质就是电离层对无线电波的碰撞吸收。

主要分为连续性方程和能量方程, 具有如下表达式^[21]:

$$\frac{\partial n_\alpha}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial s} (n_\alpha v_\alpha) = \beta_\alpha(s, t) + P_\alpha(s, t) + S_{\alpha\alpha}(s), \quad (7a)$$

$$\begin{aligned} & \frac{3}{2} k_B \left(n_e \frac{\partial T_e}{\partial t} + n_e v_e \frac{\partial T_e}{\partial s} \right) + k_B n_e T_e \frac{\partial v_e}{\partial s} \\ & = \frac{\partial}{\partial s} \left(k_e \frac{\partial T_e}{\partial s} \right) + Q_{HF} + Q_0 - L_e, \end{aligned} \quad (7b)$$

(7a)式中, $S_{\alpha\alpha}(s)$ 是和初始电离层带电粒子分布相对应的源项, 和太阳辐射引起的光电效应有关, 在高

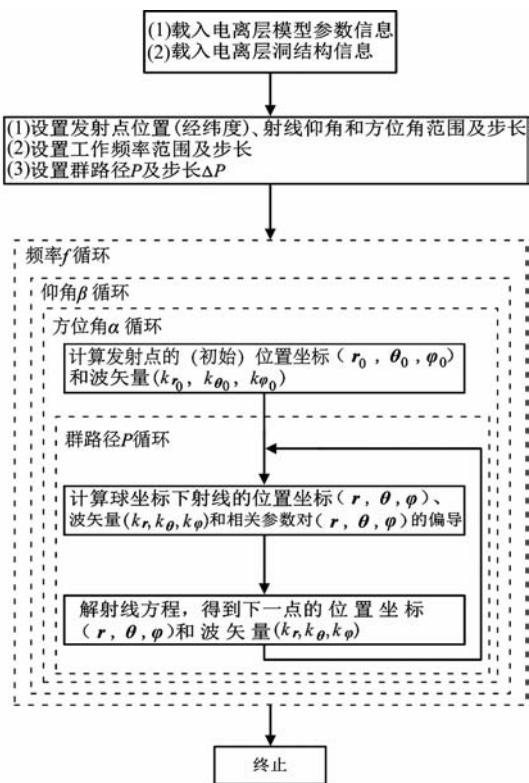


图 2 射线追踪数值模拟流程图

Fig. 2 Flow chart of the numerical simulation of ray tracing

频电波加热电离层期间可以认为是不随时间变化的, 它导致加热前的电离层离子和电子密度处于动态平衡; $P_\alpha(s, t)$ 和 $\beta_\alpha(s, t)$ 分别代表 α 种粒子的产生率和复合率, 它们的表达式可以通过在不同高度上发生和该种粒子有关的化学反应来确定。

(7b)式中左边第一项代表电子温度由于高频加热电离层随时间的变化率, 第二项表示和电子温度变化有关的对流过程, 第三项表示和电子温度变化有关的压缩过程; 右边第一项代表沿磁力线方向的和电子温度变化有关的热传导过程, 第二项为和电波加热电离层有关的源, 第三项代表和加热前电子温度的动态平衡分布有关的稳态源, 第四项代表由于中性气体的转动、旋转、振动激励以及和离子的碰撞所引起的电子冷却率。

2.4 聚焦前后能量分布模型

高频电波加热源随高度的分布满足下面的经验公式^[21]:

$$Q_{HF}(h) = A Q_{HF}(h_R) f_1(h), \quad (8)$$

其中 $Q_{HF}(h_R) = \frac{\varepsilon_0}{2} \left(\frac{\omega_p^2 v_e}{\omega^2} \right) E^2(h_R)$ 为在入射电波反射点(h_R)处的欧姆吸收, $E(h) = \sqrt{30ERP}/h$ (V/m), ERP 为电波有效辐射功率; $f_1(h)$ 是和电离层高度有

关的高斯函数,它的中心位于电波反射的电离层高度,半宽度由上、下电离层电波能量吸收的连续性近似确定。

根据射线穿过的能量通量对比来计算出通过聚焦时加热区域的电波能量. 在每个特定的高度上,假设在水平波束面内电波的总能量通量是一定的,于是满足 $Q_{HF_1} \cdot S1 = Q_{HF_2} \cdot S2$, 其中 Q_{HF_2} 是没有聚焦时的数据, $S2$ 是没有聚焦时的波束面积,通过波束宽度可以容易确定; $S1$ 是有聚焦效应时的波束面积,根据射线追踪后的结果得到,这样就可以确定在每个特定高度上、经过聚焦之后的 Q_{HF} 的大小。

计算出聚焦前与聚焦后的高斯能量分布后,将其带入加热程序,计算出电子浓度温度等参数的电离层加热一级效应的变化。

一个完整的电离层加热的数值模拟程序如图 3 所示。

3 数值模拟结果

本文试验所用电离层空洞参数由视为点源化学物质释放数值模拟得到,并采用“物质分子式-摩尔

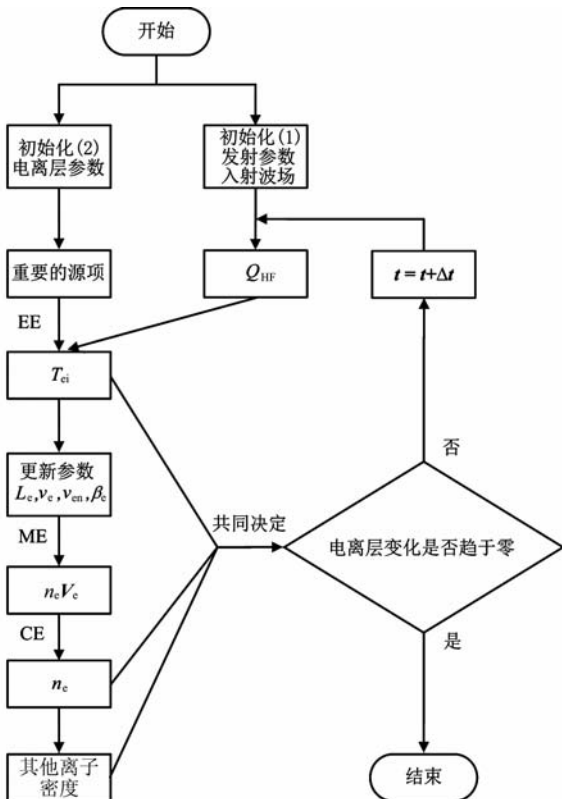


图 3 高频加热数值模拟流程图

Fig. 3 Flow chart of the numerical simulation of HF heating

数-释放高度-释放时间”标记不同释放试验. 如: “ $H_2O-100mol-300km-300s$ ”表示在 300 km 高度释放 100 mol 的水,历时 300 s. 其他参数如下:释放地区:海口($110^\circ E, 20^\circ N$);释放高度:250、300 km;释放量: $1 \sim 1 \times 10^4$ mol;扩散时间: ~ 600 s.

试验包括: $H_2O-100mol-300km-60s$ 、 $H_2O-10000mol-300km-60s$ 、 $SF_6-100mol-300km-60s$. 短波频率范围:13~20 MHz.

3.1 $H_2O-100mol-300km-60s$

图 4 和图 5 显示在 300 km 高度释放水分子 100 mol 之后 60 s,在大约 25 km 范围内形成一个空洞. 释放中心处电子密度变化率大约为 10% 左右,即电子密度的浓度减少约 10%。

图 6 是在高频加热的情况下,高频波的频率分别为 13.2、15、20 MHz 时对有空洞和无空洞的射线对比效果. 可以看出在频率为 13.2 MHz 无空洞电离层背景传播时,大部分射线被反射,表示电离层临界频率高于电波频率;而在有空洞时,由于中间电子密度更稀薄,临界频率变低,所以射线中间有部分穿透. 在 15 MHz 的情况下聚焦效果是最明显的,可以看到聚焦焦点大概在 350 km 高度左右,可以使加热效果增强数倍以上. 而 20 MHz 的高频波聚焦效果稍差,聚焦焦点在 600 km 以上,能量聚集的效果也没有 15 MHz 强烈。

3.2 $H_2O-10000mol-300km-60s$

释放 10000 mol 的水分子后 60 s 时刻电离层洞信息(电离层释放区域各物质密度分布和释放中心处电子密度及其变化剖面图)如图 4 和图 5。

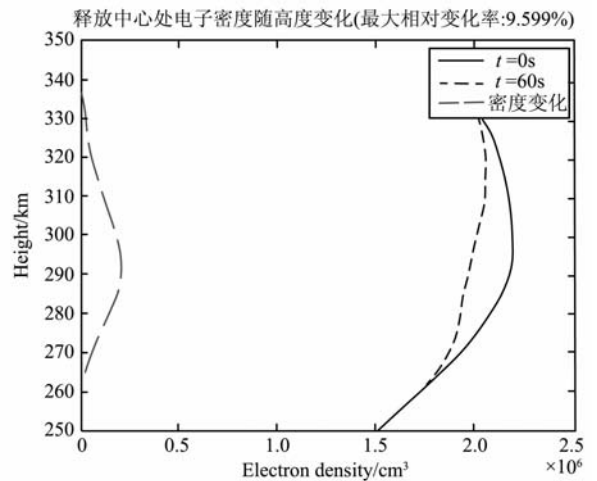


图 5 $H_2O-100mol-300km-60s$,释放中心处电子密度及其变化剖面图(60 s)

Fig. 5 $H_2O-100mol-300km-60s$,The electron density at the release center and the profile changes (60 s)

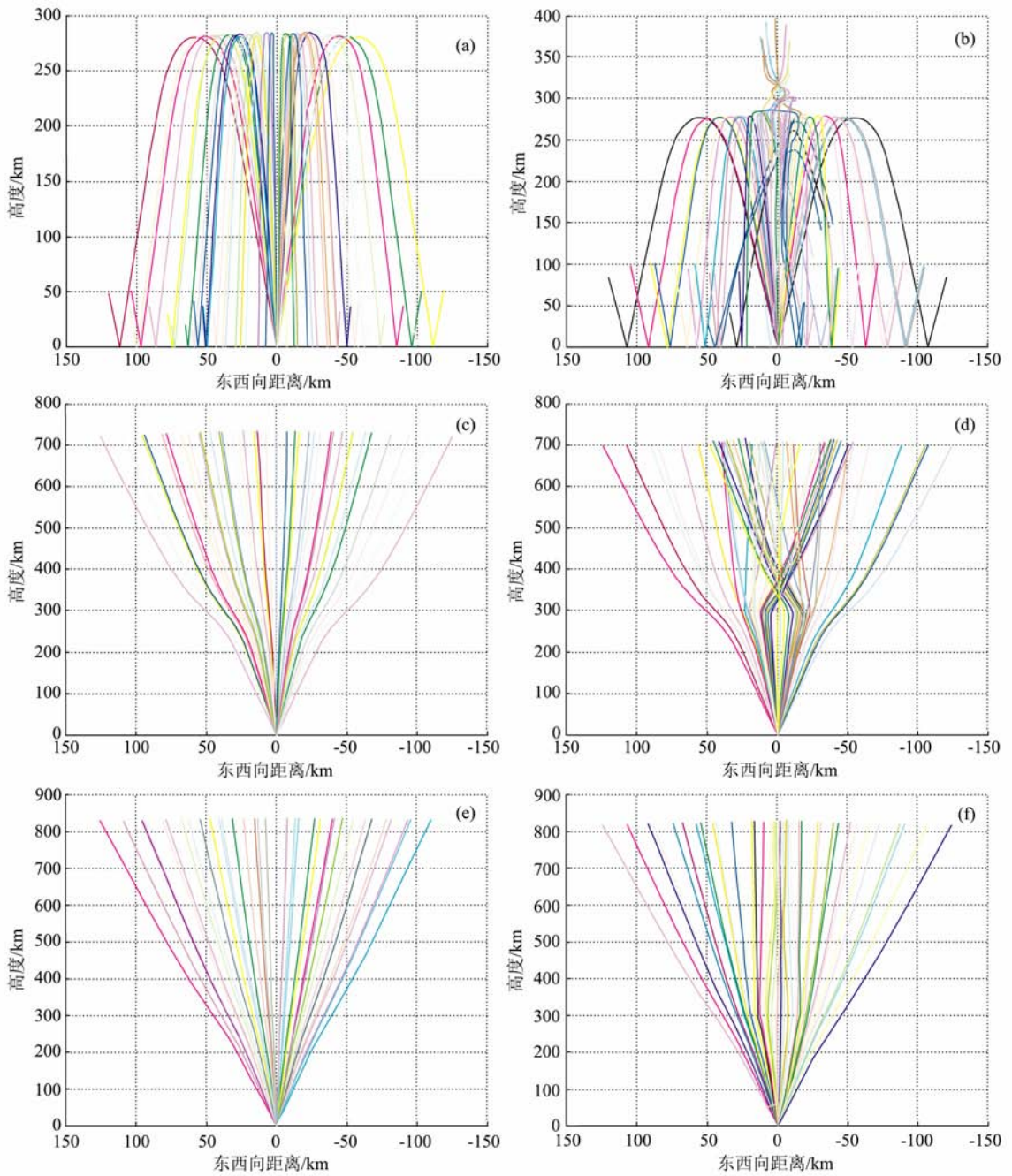


图 6 释放 H_2O -100mol-300km-300s

(a)(c)(e)分别为无空洞情况下频率为 13.2、15、20 MHz 的高频电波传播射线图;

(b)(d)(f)分别为有空洞情况下频率为 13.2、15、20 MHz 的高频电波传播射线图.

Fig. 6 Release H_2O -100mol-300km-300s

(a) (c) (e) are the high-frequency wave propagation ray figure of the frequency at 13.2, 15, 20 MHz having none hole;

(b) (d) (f) are the high-frequency wave propagation ray figure of the frequency at 13.2, 15, 20 MHz having hole.

图 7 和图 8 为释放水分子 10000 mol 的情况下电离层中各物质以及空洞状态的模拟结果,对比图 4 和图 5 的结果,可以明显得出结论,随着释放化学物质浓度的增加,空洞的范围增加至半径 40 km 左右并且电子密度减小更多.从剖面图可以看出在电子浓度的损耗率最大处可以达到 90% 左右.与

100 mol 的情况相对比,不管是空洞的范围还是空洞的电子密度损耗率效果都更加明显.

而图 9 则反映了在 300 km 释放 10000 mol 水分子的情况下,高频电波传播的射线比较图.从图中可以看出,在 13.2 MHz 的情况下,电波频率未达到电离层临界频率,大部分射线被反射,而释放化学物

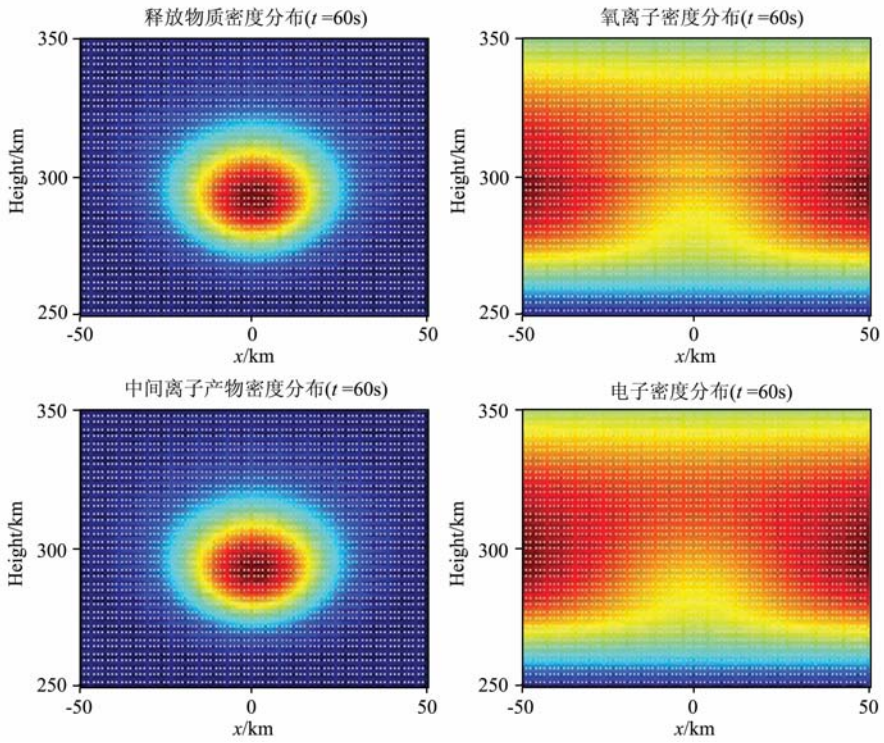


图 4 $H_2O-100mol-300km-60s$, 释放后 60 s 时刻释放区域各物质密度分布(俯视)
Fig. 4 $H_2O-100mol-300km-60s$, The density distribution for the material in the release region at the 60 s after the release (top view)

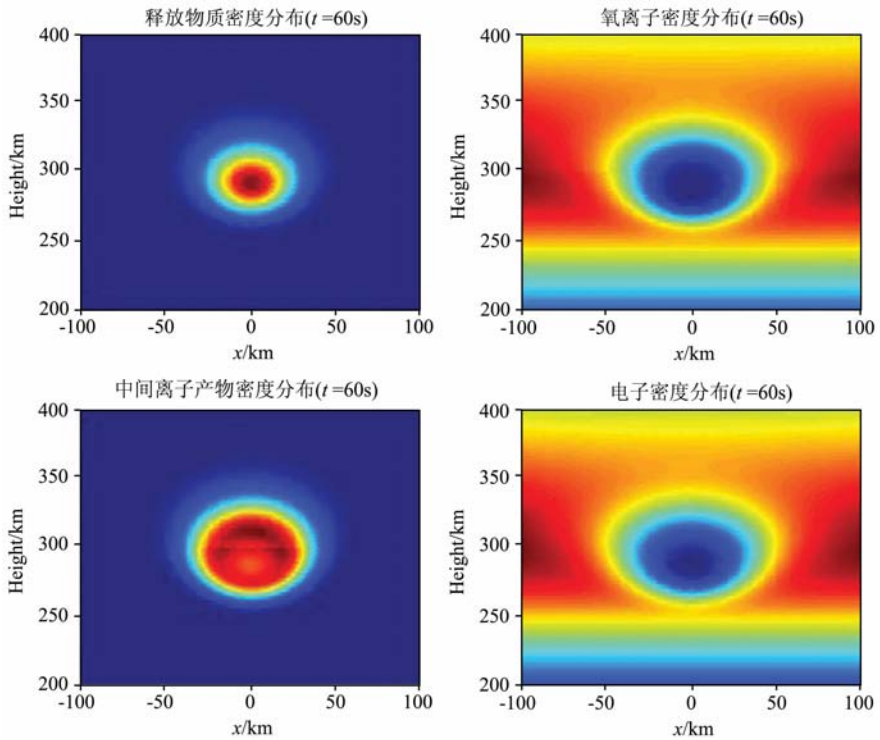
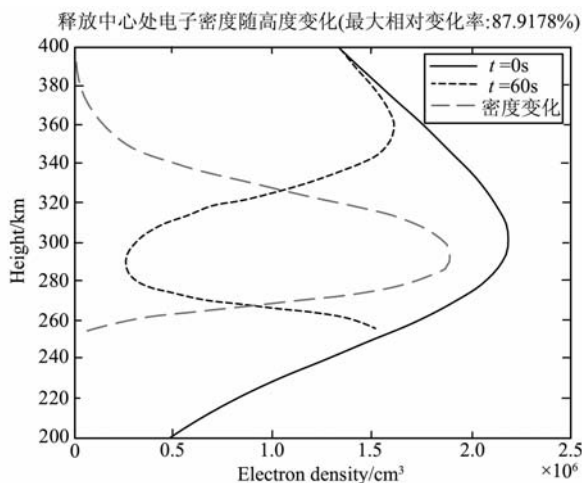
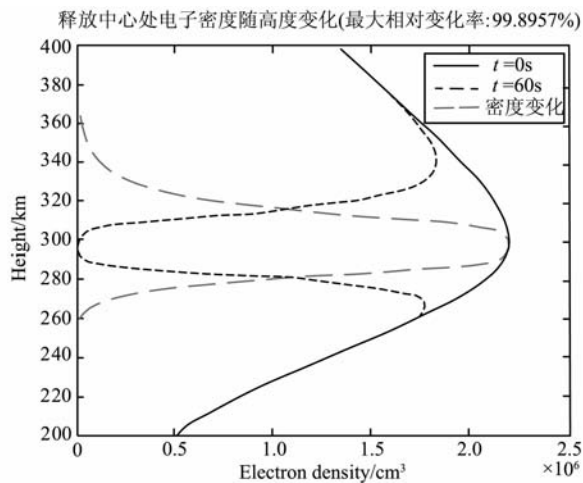


图 7 $H_2O-10000mol-300km-60s$, 释放后 60 s 时刻电离层释放区域各物质密度分布(俯视)
Fig. 7 $H_2O-10000mol-300km-60s$, The density distribution for the material in the release region at the 60 s after the release (top view)

图 8 H₂O-10000mol-300km-60s,

释放中心处电子密度及其变化剖面图(60 s)

Fig. 8 H₂O-10000mol-300km-60s, The electron density at the release center and the profile changes (60 s)图 11 SF₆-100mol-300km-60s, 释放中心处

电子密度及其变化剖面图(60 s)

Fig. 11 SF₆-100mol-300km-60s, The electron density at the release center and the profile changes (60 s)

质以后,由于电离层空洞中间浓度急剧下降,临界频率降低,导致中间部分射线穿出,和 100 mol 释放的情况基本类似.只是,由于中间区域电离层浓度变化非常剧烈,导致射线出现角度的偏转,这个可以从图 9b 和 9d 中明显看出.在 20 MHz 的情况下,有空洞与无空洞的射线几乎是一致的,我们认为这是由于电离层空洞中电子密度梯度过大,导致只有少量射线产生折射,绝大多数射线都直接穿透电离层空洞.

3.3 SF₆-100mol-300km-60s

60 s 时刻电离层洞形态(释放区域各物质密度分布和释放中心处电子密度及其变化剖面图)如图 7 和图 8.

图 10 和图 11 为释放 100 mol 的 SF₆ 在 300 km 高度的电离层空洞的模拟结果,可以看出与图 7 和图 8 的效果基本类似,空洞半径也达到 45 km 左右,空洞中心电子密度减少率也达到 90% 以上.说明比起水分子,释放 SF₆ 用更少的浓度可以达到更好的效果.也印证了 2.1.2 节所说的 NII 比 PII 类物质能产生更强的电离层扰动.这主要是因为 SF₆ 对电子有更强的吸附作用.

图 12 为射线图,得出的结论与水分子释放 10000 mol 的类似,可以更明显地看出由于空洞内电子密度梯度偏大,射线偏转的更加明显.在 13.2 MHz 的情况下依然由于未达到电离层的临界频率只有中间的一小部分折射出去.而在 13.5 MHz 和 20 MHz 的情况下中间的射线发生了明显的偏转,而其他方向变化不大,聚焦的效果不如 100 mol 的水分子释放那么明显.

3.4 聚焦加热对电子温度的影响

选取射线追踪效果最好的 15 MHz 在 H₂O-100mol-300km-60s 的空洞情况.假定 Q_{HF} 是符合高斯分布.可以通过射线图的基本显示,从图 6c 和 6d 对比可得,聚焦以后,射线波束宽度从原来的一 70~70 km 变为 一 50~50 km,并且靠近中心区域的时候波束更密集,这样可以粗略计算出聚焦前与聚焦后的高斯能量分布,如图 13 所示.从图中可以看出能量吸收的增幅达到 2 倍以上,聚焦的效果是很明显的.再带入电离层加热程序,从图 14 可以看出在焦点 350 km 附近电子温度的变化更加剧烈,加热效果更加明显,大概增幅可以达到 20% 左右.

4 结论和讨论

通过对电离层化学物质释放、电波传播射线追踪和电离层高频加热的数值模拟,得到以下结论:

(1) 化学物质释放在电离层能迅速地与其中电子和离子产生化学作用,消耗大量的电子,形成电离层空洞.

(2) 释放量过少均不能造成显著的电离层扰动以形成明显的电离层洞.随着释放量增大,影响空间区域和电子密度下降率也随之增大,形成电离层洞也更大更深,维持时间更长.一般情况空洞半径为 25~50 km,在释放中心处电子密度减少率最大可达到 90% 以上.

(3) 相比于 PII 类化学物质而言,释放相对较小量的 NII 类化学物质 SF₆,即可在短时间内形成边界清晰、电子密度下降剧烈的电离层洞,且具有较长

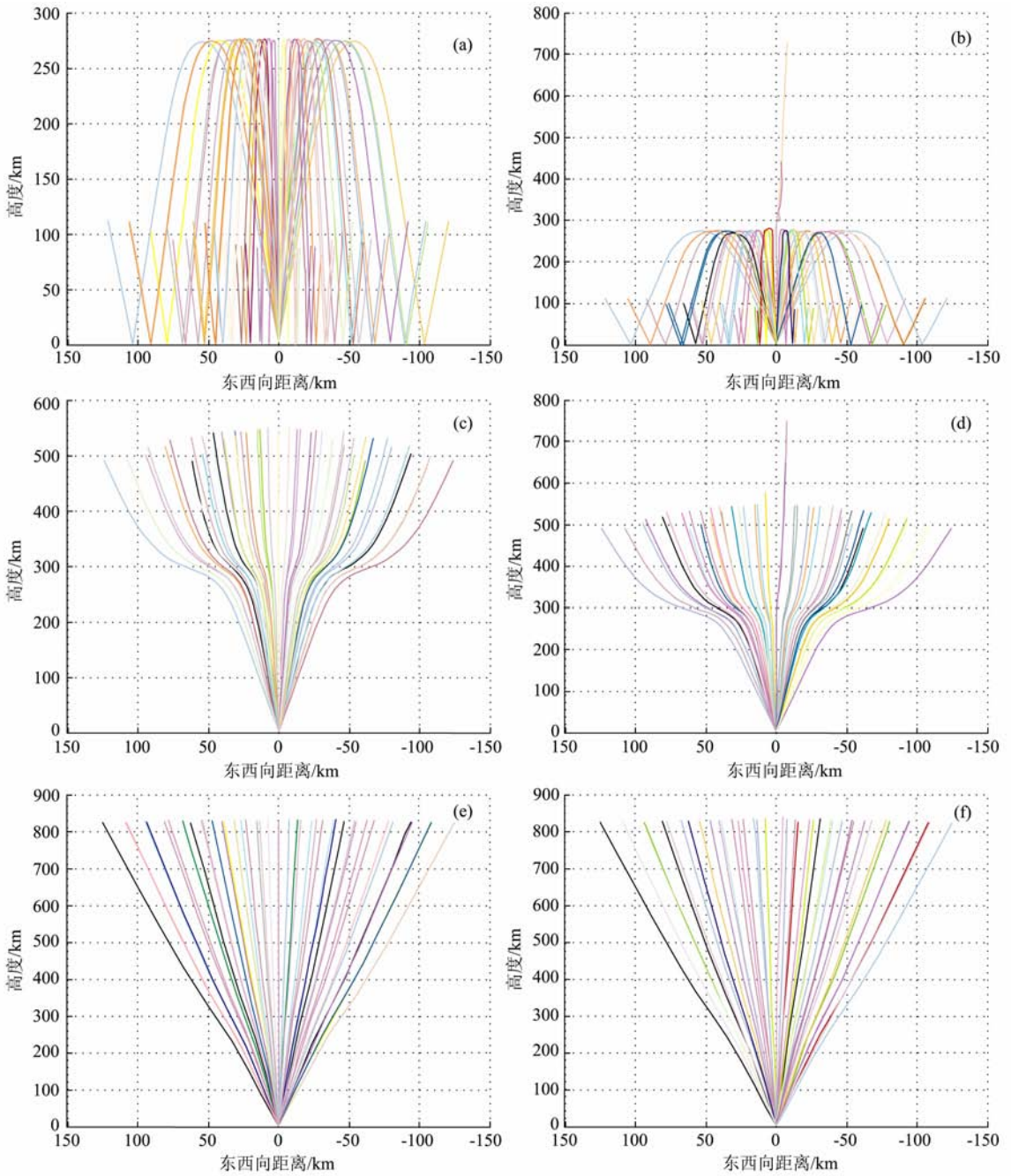


图 9 释放 H₂O-10000mol-300km-300s

(a)(c)(e)分别为无空洞情况下频率为 13.2、13.5、20 MHz 的高频电波传播射线图；
(b)(d)(f)分别为有空洞情况下频率为 13.2、13.5、20 MHz 的高频电波传播射线图。

Fig. 9 Release H₂O-10000mol-300km-300s

(a) (c) (e) are the high-frequency wave propagation ray figure of the frequency at 13.2, 15, 20 MHz having none hole;
(b) (d) (f) are the high-frequency wave propagation ray figure of the frequency at 13.2, 15, 20 MHz having hole.

的维持时间,是一种性能优良的化学释放物质. PII 类化学物质 H₂O 的电离层干扰效果则相对较弱.

(4)通过射线追踪的数值模拟,可以看到空洞对射线的聚焦效应是很明显的.

(5)当空洞内部梯度过大时,反而不利于射线的聚焦作用. 选取合适的释放浓度和高度以及合适的

电波频率,才能使得电波能量聚集在一起,更有利于高频加热的增强. 文中认为释放 100 mol 的水分子在 300 km 高度,高频加热频率为 15 MHz 是最合适的.

(6)聚焦加热对电离层参数的变化相比未聚焦的高频加热效果是明显的. 能量的吸收可以达到数倍以上,电子的温度更是可以至少提升 20% 以上.

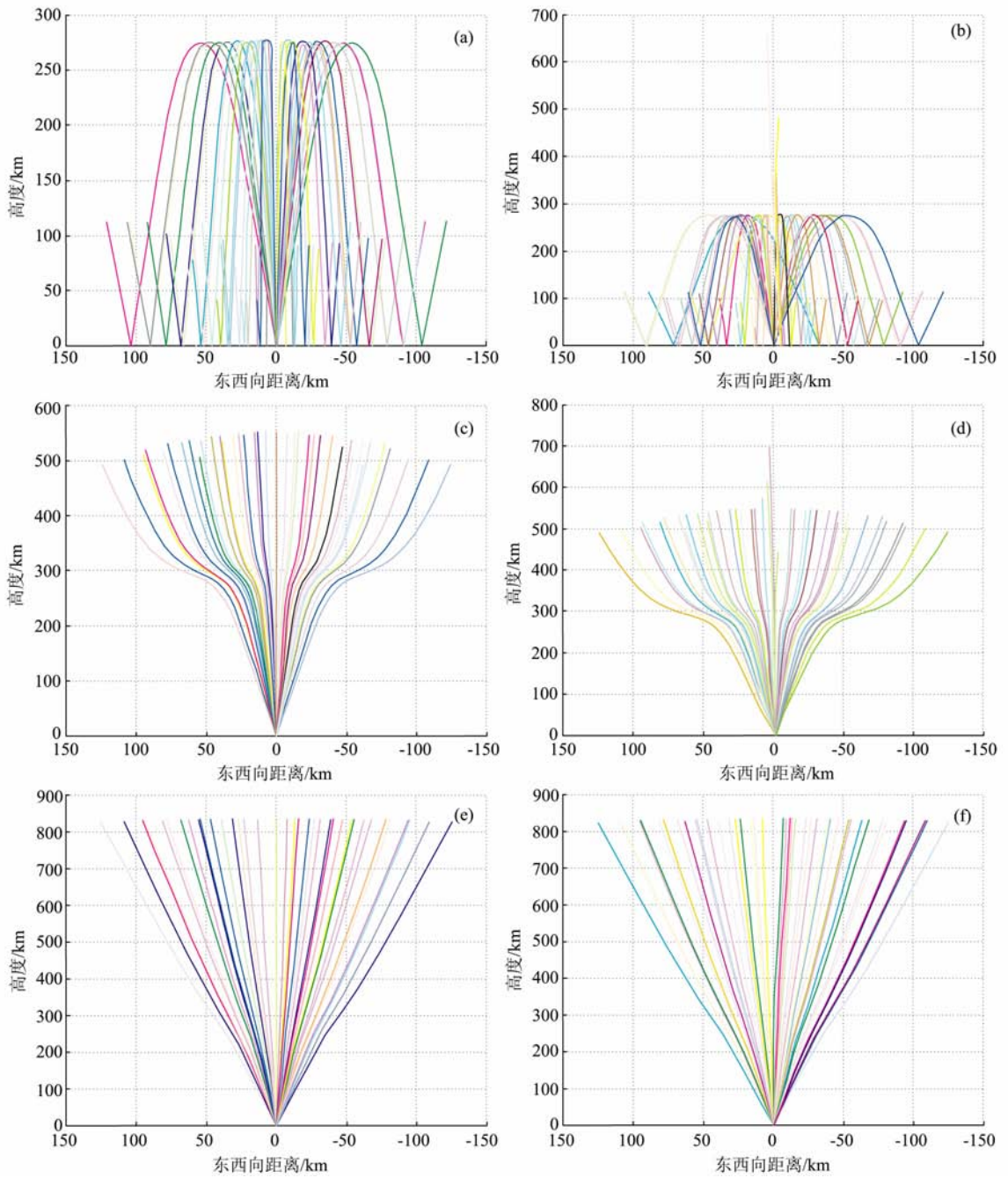


图 12 释放 SF₆-100mol-300km-60s

(a)(c)(e)分别为无空洞情况下频率为 13.2、13.5、20 MHz 的高频电波传播射线图；
 (b)(d)(f)分别为有空洞情况下频率为 13.2、13.5、20 MHz 的高频电波传播射线图。

Fig. 12 Release SF₆-100mol-300km-60s

(a) (c) (e) are the high-frequency wave propagation ray figure of the frequency at 13.2, 15, 20 MHz having none hole;
 (b) (d) (f) are the high-frequency wave propagation ray figure of the frequency at 13.2, 15, 20 MHz having hole.

通过模拟结果可知,通过化学物质释放的聚焦加热能在高频电波加热电离层基础上更进一步人工扰动电离层. 本文在模拟过程中忽略了地磁场的影响,地磁场会对电离层在磁场方向产生的不均匀体发生作用,导致聚焦效果的变化. 并且三维的射线追踪在做模拟分析时简化为二维. 三维模拟将是我们

以后将要关注的主要问题. 因为三维的聚焦效果是立体的锥形聚焦,相较于二维平面聚焦效果能量可以成倍地增加,更有利于聚焦加热效果.

参考文献 (References)

[1] DuBios D F, Goldman M V. Radiation-induced instability of

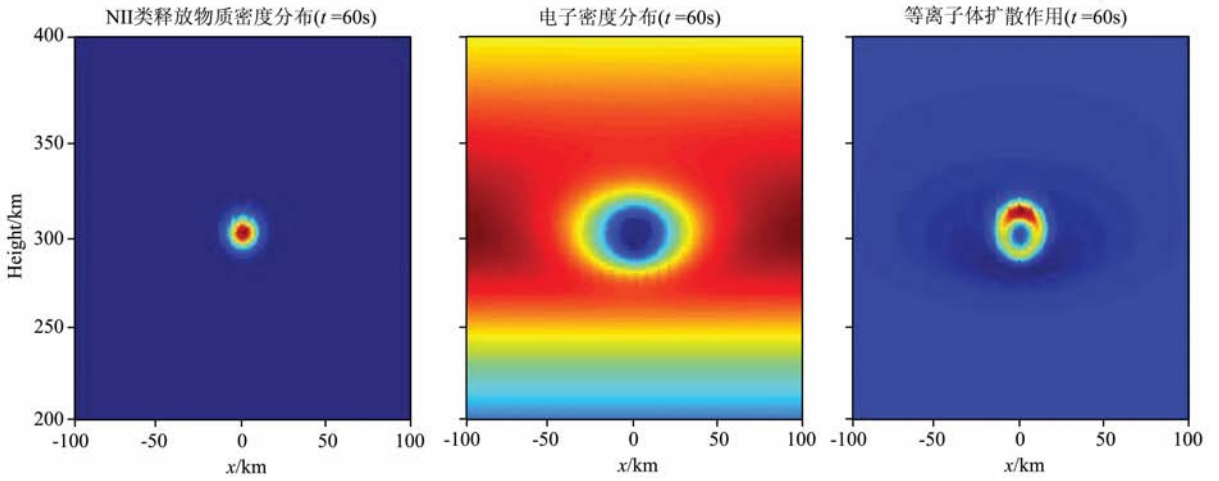


图 10 SF₆-100mol-300km-60s, 释放后 60 s 时刻释放物质、电子密度分布和等离子体扩散作用(俯视)

Fig. 10 SF₆-100mol-300km-60s, The density distribution for the material in the release region at the 60 s after the release (top view)

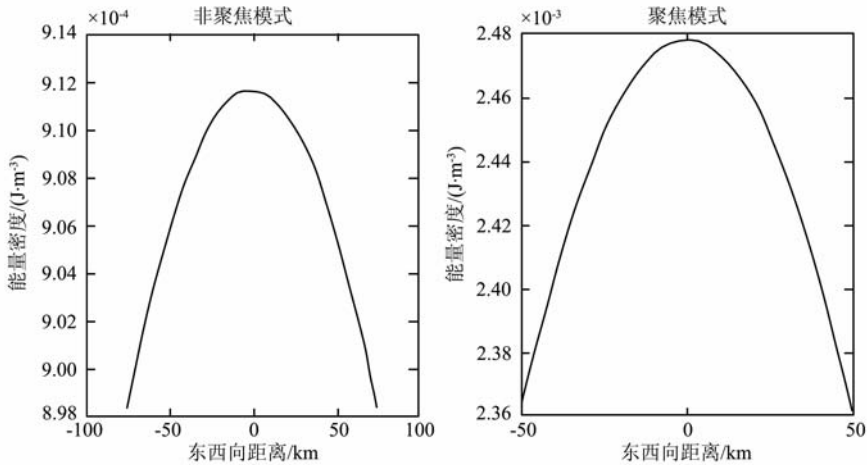


图 13 H₂O-100mol-300km-60s-15MHz, 聚焦情况与非聚焦情况下电离层对电波能量的吸收

Fig. 13 H₂O-100mol-300km-60s-15MHz, The absorption of the radio energy in the ionosphere at the non-focusing situation and the focusing situation

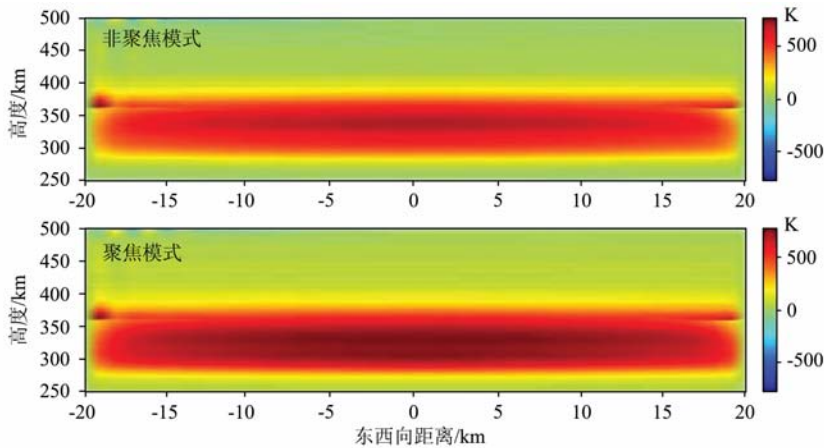


图 14 H₂O-100mol-300km-60s-15MHz 聚焦情况与非聚焦情况下电子温度的变化

Fig. 14 H₂O-100mol-300km-60s-15MHz, The change of the electron temperature at the non-focusing situation and the focusing situation

- electron plasma oscillations. *Phys. Rev. Lett.*, 1965, **14** (14): 544~546
- [2] DuBios D F, Goldman M V. Parametrically excited plasma fluctuations. *Phys. Rev.*, 1967, **164**(1):207~222
- [3] Silin V P. Interaction of a strong high frequency electromagnetic field with a plasma. Proc. Eighth Int. Conf. Phenom. Ionized Gases, 1968. 205~237
- [4] Silin V P. Anomalous nonlinear dissipation of high frequency radio waves in plasma. *Soviet Physics*, 1973, **15**(3):742~758
- [5] Nishikawa K. Parametric excitation of coupled waves I. General formulation. *Journal of the Physical Society of Japan*, 1968, **24**(4): 916~922
- [6] Nishikawa K. Parametric excitation of coupled waves II. Parametric plasmon photon interaction. *Journal of the Physical Society of Japan*, 1968, **24**(5):1152~1158
- [7] Gurevich A V. Radio wave effect on the ionosphere in the F2 layer region. *Geomagn. Aeron.*, 1967, **7**(1):291~297
- [8] Gurevich A V. Nonlinear Phenomena in the Ionosphere. New York: Springer-Verlag, 1978
- [9] Perkins F W. Parametric instabilities and ionospheric modification. *J. Geophys. Res.*, 1974, **79**(4):1478~1496
- [10] Fejer J A. Ionospheric modification and parametric instabilities. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 1979, **17**(1): 135~153
- [11] Fejer J A. Ionospheric modification experiments with the Arecibo heating facility. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1985, **47** (12):1165~1179
- [12] Booker H. A local reduction of F-region ionization due to missile transit. *J. Geophys. Res.*, 1961, **66**(4):1073~1079
- [13] Mendillo M. Ionospheric holes: a review of theory and recent experiments. *Adv. Space Res.*, 1988, **8**:51~62
- [14] Bernhardt P A, Duncan L M. The theory of ionospheric focused heating. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1987, **49**:1107~1117
- [15] Yeh K C, Liu C H. Theory of Ionospheric Waves. New York, U. S. : Academic Press, 1972
- [16] Jones R M. A three dimensional ray-tracing computer program. ESSA Tech. Rept. IET-17/ITSA-17, 1966
- [17] Huang X, Reinisch B W. Real-time HF ray tracing through a tilted ionosphere. *Radio Sci.*, 2006, **41**, RS5S47, doi:10.1029/2005RS003378
- [18] Bernhardt P. Three-dimensional, time-dependent modeling of neutral gas diffusion in a nonuniform, chemically reactive atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 1979, **84**(A3):793~802
- [19] Bernhardt P. A critical comparison of ionospheric depletion chemicals. *J. Geophys. Res.*, 1987, **92**(A5):4617~4628
- [20] 王 艳. 火箭尾焰电离层效应研究[硕士论文]. 武汉: 武汉大学空间物理系, 2008
- Wang Y. A study on ionospheric effects of the rocket plume [Master's thesis] (in Chinese). Wuhan: Department of Space Physics, Wuhan Univ., 2008
- [21] 倪彬彬. 大功率高频无线电波加热电离层理论及数值模拟研究[博士论文]. 武汉: 武汉大学空间物理系, 2005
- Ni B B. Theoretical and numerical studies on ionospheric modification caused by the incidence of high-power radio waves [Ph.D. thesis](in Chinese). Wuhan: Department of Space Physics, Wuhan Univ., 2005

(本文编辑 何 燕)