

人工电离层洞形态调制及其对短波传播的影响*

胡耀垓[†] 赵正予 项 薇 张援农

(武汉大学电子信息学院, 武汉 430079)

(2010年9月24日收到; 2011年1月5日收到修改稿)

本文在电离层中性气体点源扩散近似解的基础上, 给出了多源释放动力学模型. 分析了释放物质、释放高度、释放模式和释放量等因素对人工电离层洞形态调制的影响, 并利用电离层短波三维数字射线追踪技术, 对不同调制电离层洞的电波传播效应进行了数值模拟和分析.

关键词: 化学物质释放, 人工电离层洞, 形态调制, 电波传播效应

PACS: 94. 20. Vv, 94. 20. dv, 94. 20. ws

1. 引言

作为电离层人工变态的重要而有效的手段之一, 化学物质释放能导致电离层释放区域电子损耗, 形成明显的人工电离层洞, 继而对无线电波传播产生影响, 如导致地-地通讯中断、电离层的最大反射频率下降等^[1]. 基于已观测到的电离层洞现象, 国内外学者在化学物质的电离层扰动机理和效应方面做了大量研究. 早在 1961 年, Booker^[2] 即提出扫雪机效应来解释此类电子密度减少的现象, Mendillo 等^[3] 分析了 SKYLAB 发射引起电离层 F 层电子快速损耗的过程, Bernhardt^[4,5] 发展了一个中性气体在非均匀环境中的扩散模型, 讨论了电离层化学物质注入的电波传播效应. 黄文耿等^[6] 基于中性气体的扩散过程和离子化学过程探讨了人工电离层洞的形成机理. 最近, 胡耀垓等^[7] 建立了一个包括中性释放气体扩散、离子化学反应及等离子体扩散等过程的化学物质电离层释放三维动力学模型, 探讨了几种典型释放物质的电离层扰动特性和释放区域主要粒子的时空变化规律.

不同形态的人工电离层洞对短波传播具有不同影响. 研究显示, 在电离层化学物质释放初期阶段, 椭球形电离层洞可使 HF 和 VHF 电波聚焦或弯曲^[8,9]. 如何对人工电离层洞形态进行精确调制以

获得特定需求的短波传播效应, 及其对短波传播影响进行有效评估, 是开展主动化学释放电波传播效应试验的必备理论基础, 也是本文的主要研究目的.

本文基于电离层中性气体点源扩散近似解, 给出多源释放动力学模型. 通过释放物质、释放高度、释放模式(点源和多源)和释放量等释放方式的控制, 探讨释放方式对人工电离层洞形态调制的影响. 最后, 通过短波三维数字射线追踪技术, 对不同形态电离层洞的短波传播效应进行数值模拟和分析.

2. 化学物质多源释放动力学模型

中性气体连续方程和速度方程如下:

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \nabla \cdot (n\mathbf{v}) = P - L + S, \quad (1)$$

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{g} - k \frac{\nabla(nT)}{nm} + \omega_a(\mathbf{u}_a - \mathbf{v}), \quad (2)$$

其中, n 是释放中性气体数密度, \mathbf{v} 是中性气体的速度, P 和 L 分别为释放气体的产生率和损失率, S 为源项, m 为释放气体分子的质量, $\mathbf{g} = -g\hat{a}_z$ 为重力加速度, \hat{a}_z 为垂直向上的单位矢量, T 为气体温度, \mathbf{u}_a 是中性漂移速度, ω_a 是碰撞频率, k 为 Boltzmann 常数.

一般地, 释放气体的速度波动时间常数远远大

* 国家高技术研究发展计划(批准号:2009AA8093202), 中国博士后科学基金(批准号:20080430988, 200801321)和中央高校基本科研业务费专项资金(批准号:3103001)资助的课题.

[†] E-mail: Farawayhu@sohu.com

于平均碰撞时间. 忽略气体加速, 即 $dv/dt = 0$, 则气体速度表达式为

$$\mathbf{v} = -D \left[\frac{\nabla(nT)}{nT} + \frac{\hat{a}_z}{H_i} \right] + \mathbf{u}_a, \quad (3)$$

$D = kT/m\omega_a$ 为扩散系数, $H_i = kT/mg$ 为释放气体标高. 可见气体速度由两部分组成: 密度梯度和温度梯度引起的扩散速度以及背景大气运动引起的漂移速度. 将(3)式代入(1)式得

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \nabla \cdot \left[D \left(\frac{\nabla(nT)}{T} + \frac{n\hat{a}_z}{H_i} \right) - n\mathbf{u}_a \right] + P - L + S. \quad (4)$$

以非均匀大气层为背景, 考虑重力作用和化学反应损耗, 忽略风场的影响, 选取以释放点为中心的笛卡尔坐标系, 点源释放的气体扩散方程(等温过程)为

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D \left[\frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 n}{\partial y^2} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[D \left(\frac{\partial n}{\partial z} + \frac{n}{H_i} \right) \right] - k_1 n_{O^+} n, \quad (5)$$

其中, (x, y, z) 为笛卡尔坐标; k_1 为释放气体与 O^+ 的化学反应速率; n_{O^+} 为 O^+ 的数密度; $D = D_0 \exp(z/H_a)$, D_0 是气体释放点的扩散系数, $H_a = kT/m_a g$ 为背景大气层标高, m_a 为背景大气的平均分子质量; $k_1 n_{O^+} n$ 代表中性气体的化学损失项.

方程(5)的近似解为^[4]

$$n(x, y, z, t) = \frac{N_0}{(4\pi D_0 t)^{1.5}} \exp \left\{ -z \left(\frac{3}{4H_a} + \frac{1}{2H_i} \right) - \alpha t - \frac{H_a^2 \{1 - \exp[-z/(2H_a)]\}^2}{D_0 t} - \frac{(x^2 + y^2) \exp[-z/(2H_a)]}{4D_0 t} - \left(\frac{1}{H_a} - \frac{1}{H_i} \right)^2 \frac{D_0 t \exp[z/(2H_a)]}{4} \right\}, \quad (6)$$

其中, $n(x, y, z, t)$ 为扩散物质数密度, 它是时间 t 和空间 (x, y, z) 的函数; N_0 为释放物质量; αt 为由于化学反应引起的损失项.

多源释放模式下, (5)式变为

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D \left[\frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 n}{\partial y^2} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[D \left(\frac{\partial n}{\partial z} + \frac{n}{H_a} \right) \right] - k_1 n_{O^+} n + \beta(x, y, z, t), \quad (7)$$

其中 $\beta(x, y, z, t)$ 为源项, 方程(7)的解为

$$N(x, y, z, t) = \int_0^t \iiint \beta(\alpha, \beta, \lambda, \gamma) \times n(x - \alpha, y - \beta, z - \lambda, t - \gamma) \times d\alpha d\beta d\lambda d\gamma dt. \quad (8)$$

可见, 多源释放模式的电离层扰动分析可在点源释放基础上进行. 对于一般源项, 可以看作是由无穷个离散点源组成, 形成的中性气体时空分布满足叠加原理. 考虑离子化学反应和等离子体扩散过程, 可以得到释放区域电离层电子密度的时空分布, 有关讨论见文献[7].

3. 电离层洞形态调制及电波传播效应模拟试验

椭球形电离层洞可以通过点源释放形成, 释放点近似为电离层洞中心所在位置. 类抛物线管状电离层洞, 可以通过在抛物线路径上均匀释放形成. 其他复杂形态的电离层洞, 原则上都可通过多源释放模式得到.

本文对比了不同释放方式(包括: 释放物质(H_2O, SF_6)、释放高度(250 km, 300 km)、释放模式(点源释放, 多源释放)和释放量)对电离层洞形态调制的影响. 电波传播效应数值模拟采用电离层短波三维数字射线追踪技术^[10].

采用“物质分子式-摩尔数-释放高度-释放时间”标记点源释放试验, 如“ $H_2O-100 \text{ mol}-300 \text{ km}-300 \text{ s}$ ”表示在 300 km 高度点源释放 100 mol 的水, 历时 300 s. 采用“物质分子式-摩尔数-释放时间”标记多源释放试验, 如“ $H_2O-100 \text{ mol}-60 \text{ s}$ ”表示沿某一类抛物线轨迹均匀释放总量为 100 mol 的水, 历时 60 s.

背景电离层、热层和磁场参数分别由国际参考电离层 IRI-2007^[11], MSIS-E-90^[12] 和 DGRF/IGRF 1900-2015^[13] 得到, 忽略中性风场影响, 其他重要参量如化学反应速率、扩散系数等参考文献[5, 8]. 射线追踪电波频率范围在 6—20 MHz 之间, 射线仰角范围在 $[75^\circ, 105^\circ]$, 仰角步长 0.9375° . 椭球电离层洞中心、类抛物线管道电离层洞起点和电波发射点所在地理位置均为 (E110, N20).

3.1. 不同释放高度的电离层洞调制

分别在 250 km 和 300 km 高度处点源释放 10000 mol (180 kg) 的 H_2O , 历经 60 s 时刻, 形成的椭球形电离层洞二维结构如图 1 和图 3 所示.

图 1 显示, 10000 mol (180 kg) 的 H_2O 在 250 km 高度释放 60 s 后, 可形成垂直轴半径约 40 km 尺度的椭球形电离层洞, 电子密度最大相对变化率达

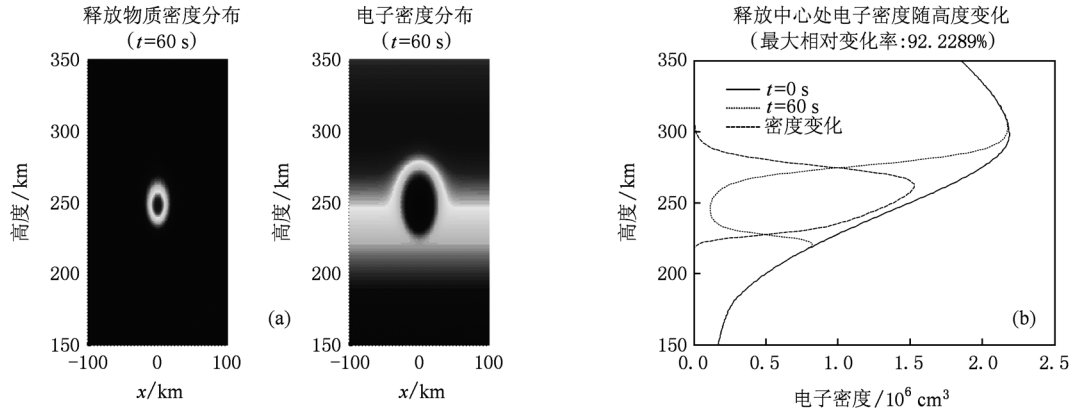


图1 椭球形电离层洞结构图(H₂O-10000 mol-250 km-60 s) (a) 释放物质和电子密度二维分布;(b) 电子密度及其变化剖面

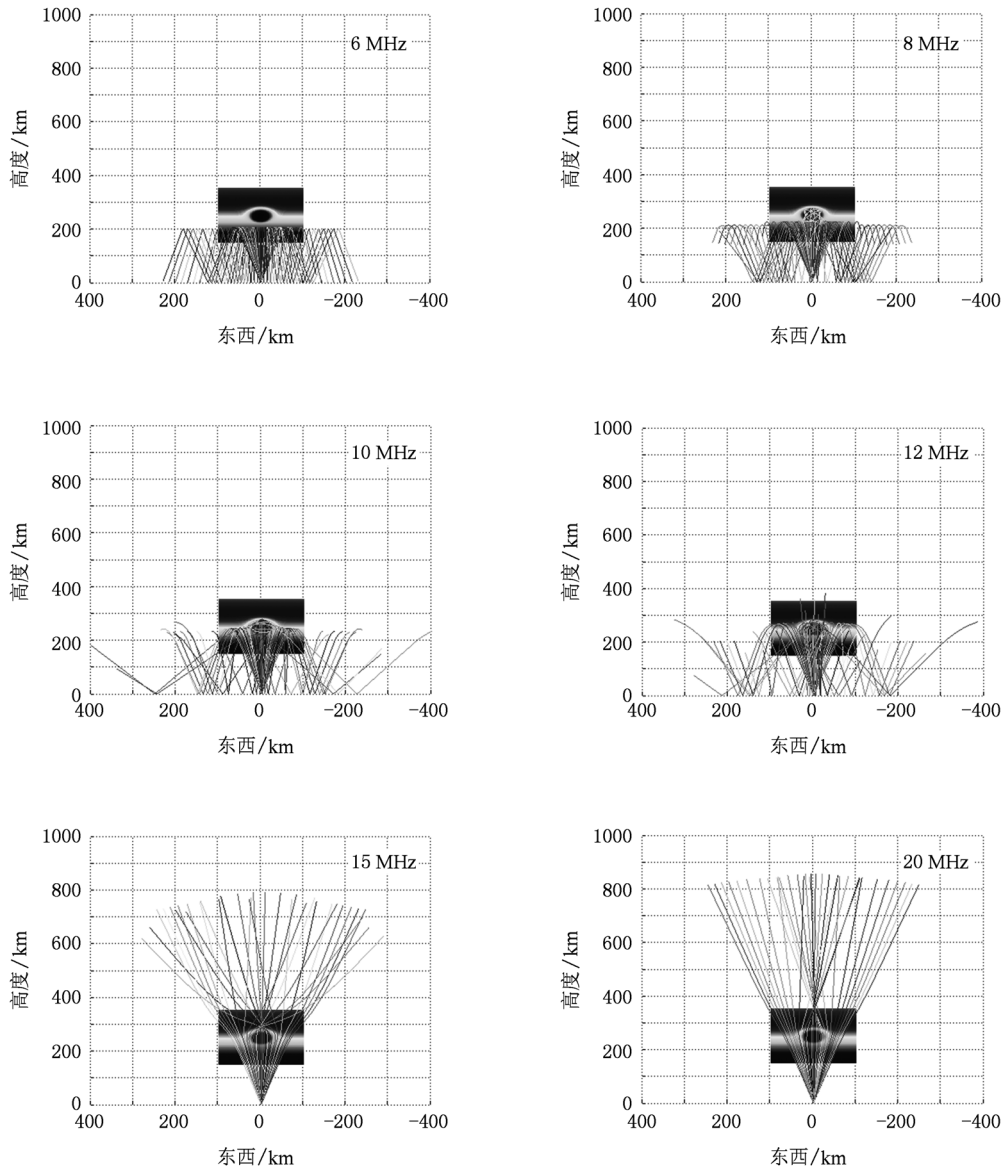


图2 不同频率电波三维射线追踪结果(H₂O-10000 mol-250 km-60 s)

92.2289%. 东西方向的射线追踪结果如图 2 所示.

图 1(b) 显示, 电离层洞下边界处最大电子密度明显小于上边界处最大电子密度, 因此某些频率电波可以穿过电离层洞下边界, 但无法穿透上边界, 从而可使射线在电离层洞内壁上边界处多次反射. 如图 2 所示, 频率 6 MHz 低于受扰电离层区域临

频, 射线在 200 km 高度附近全部反射; 频率为 8 MHz 时, 射线在电离层洞内壁形成多次反射; 频率超过 12 MHz 时, 高于该区域电离层临频, 射线开始穿过电离层洞; 射线频率在 15—20 MHz 间, 在电离层洞高度之上, 出现射线的汇聚, 且聚焦点随电波频率的增高而上升.

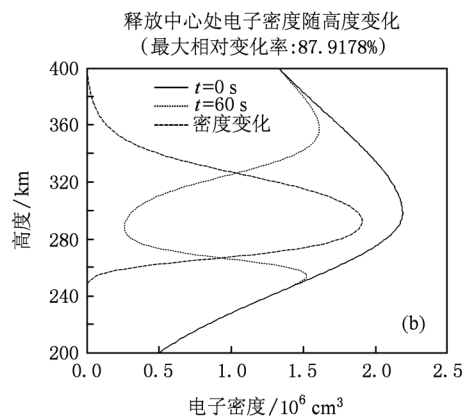
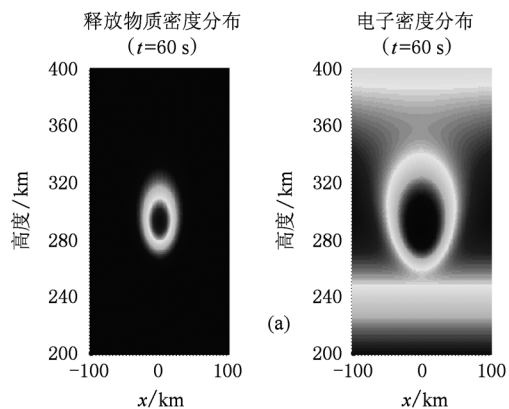


图 3 椭球形电离层洞结构图($H_2O-10000 \text{ mol}-300 \text{ km}-60 \text{ s}$) (a) 释放物质和电子密度二维分布; (b) 电子密度及其变化剖面

图 3 显示, 10000 mol (180 kg) 的 H_2O 在 300 km 高度释放 60 s 后, 可形成垂直轴半径约 70 km 尺度的椭球形电离层洞, 电子密度最大相对变化率达 87.9178%. 比 250 km 高度释放 (图 1) 形成的电离层洞更大, 但边界较之平缓 (模糊), 最大电子密度

变化率也稍低. 且电离层洞垂直方向不对称, 呈上大下小 (鸭梨) 形态. 以上现象成因可由扩散系数随高度的增加而增大加以解释. 东西方向的射线追踪结果如图 4 所示.

图 4 显示, 频率 ($\leq 11.3 \text{ MHz}$) 低于受扰电离层

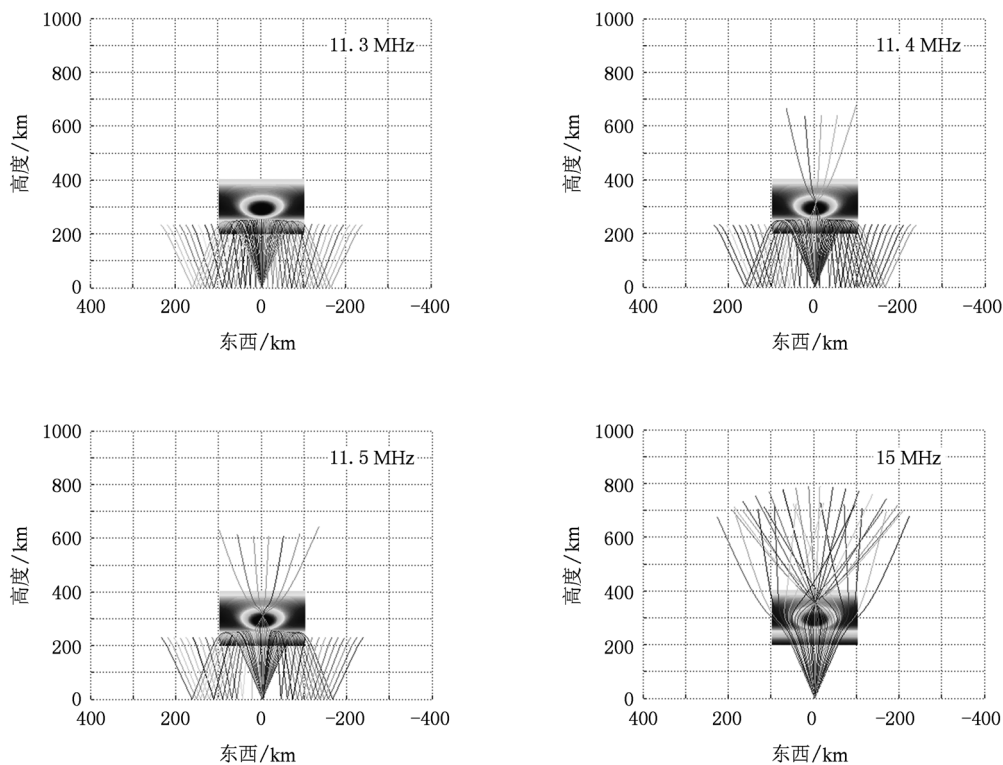


图 4 不同频率电波三维射线追踪结果($H_2O-10000 \text{ mol}-300 \text{ km}-60 \text{ s}$)

区域临频时,射线不能穿过电离层;当频率达 11.4 MHz 时,开始有垂直方向小角度范围内的射线穿过,且在电离层洞内形成一个聚焦点,此后随着频率的增加,聚焦点高度也有所提升.

和 250 km 高度点源释放(图 2)相比较,没有出现射线在电离层洞内多次反射的现象. 观察图 3 (b),电离层洞下边界和上边界处最大电子密度相近,可以穿过电离层洞下边界的电波,亦可穿过电离层洞上边界,因此无法出现在电离层洞内壁上边界处多次反射的现象. 可见,是否出现在电离层洞内壁多次反射现象,取决于电离层洞上下边界处最

大电子密度大小.

3.2. 不同释放物质的电离层洞调制

选取 SF₆ 和 H₂O(试验:H₂O-10000 mol-300 km-60 s)进行对比. 在 300 km 高度点源释放 10000 mol 的 SF₆,扩散时间为 60 s 时所形成的椭球形电离层洞二维结构如图 5 所示.

由图 5(b)可见,10000 mol(1460 kg)SF₆ 在 300 km 高度释放 60 s 后,可形成垂直轴半径约 70 km 尺度的椭球形电离层洞,电子密度最大相对变化率达 100%.

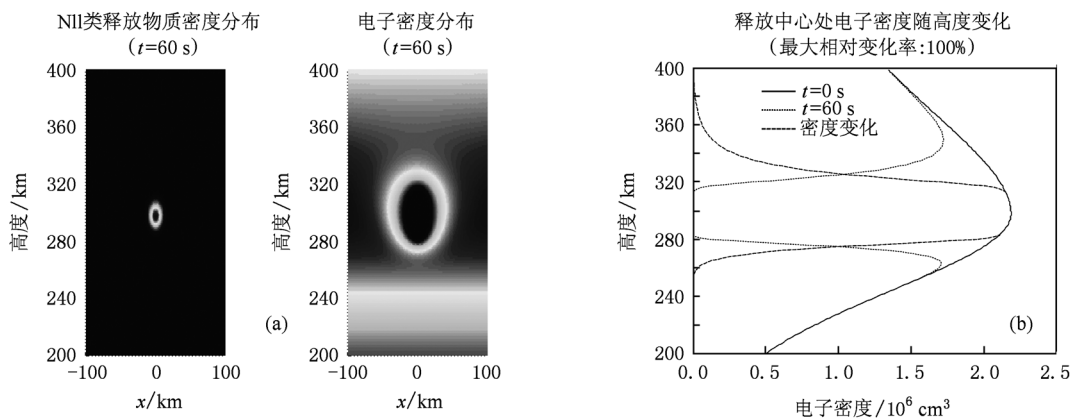


图 5 椭球形电离层洞结构图(SF₆-10000 mol-300 km-60 s) (a) 释放物质和电子密度二维分布;(b) 电子密度及其变化剖面

和图 3 对比显示,在相同释放高度、释放量和扩散时间的情况下,H₂O 和 SF₆ 可形成大小相当的电离层洞,但 SF₆ 形成的电离层洞边缘更清晰(边缘电子密度轴向梯度绝对值更大),且形成电离层洞更深(电子密度最大相对变化率更大). 这是由于 SF₆ 的离子化学反应速率 k_1 大约是 H₂O 的 100 倍,而导致 SF₆ 比 H₂O 具有更强的电离层扰动效果^[5]. 东西方向的射线追踪结果如图 6 所示.

图 5(b)显示,电离层洞下边界和上边界处最大电子密度相近,因此导致仅小范围频率(11.95 ± 0.01 MHz)的电波可以在电离层洞内壁上边界处反射(如图 6 所示). 当频率更大(> 临频)时,射线开始穿过电离层洞,并出现射线的汇聚,且聚焦点随电波频率的增高而上升.

3.3. 不同释放量的电离层洞调制

选取释放 100 mol 和 10000 mol(试验:SF₆-10000mol-300km-60s)的 SF₆ 进行对比. 在 300 km

高度点源释放 100 mol(14.6 kg)的 SF₆,扩散时间为 60 s 时所形成的椭球形电离层洞二维结构如图 7 所示.

由图 7(b)可见,100 mol(14.6 kg)的 SF₆ 在 300 km 高度释放 60 s 后,可形成垂直轴半径约 60 km 尺度的椭球形电离层洞,电子密度最大相对变化率接近 100%. 和图 5 对比显示,释放量的增加,可获得更“深”、更大的电离层洞. 东西方向的射线追踪结果如图 8 所示.

图 7(b)显示,电离层洞下边界处最大电子密度稍小于上边界处最大电子密度,因此高于下边界临频、低于上边界临频的小范围频率(12.15 ± 0.05 MHz)的电波可以穿过电离层洞下边界,但无法穿透上边界,从而在电离层洞内壁上边界处多次反射. 如图 8 中所示,频率为 12.2 MHz 时,射线在电离层洞内形成多次反射;频率超过 12.2 MHz 时,高于上边界区域电离层临频,射线开始穿过电离层洞;射线频率在 15—20 MHz 间,在电离层洞高度之上,出现射线的汇聚,且聚焦点随电波频率的增高而上升.

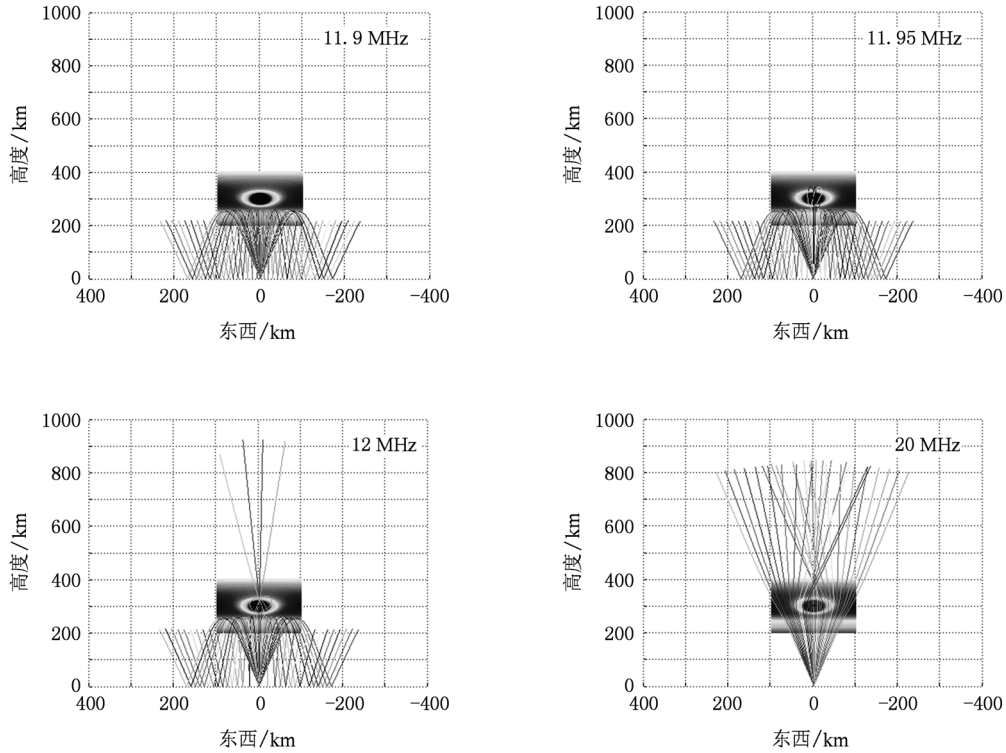


图6 不同频率电波三维射线追踪结果(SF_6 -10000 mol-300 km-60 s)

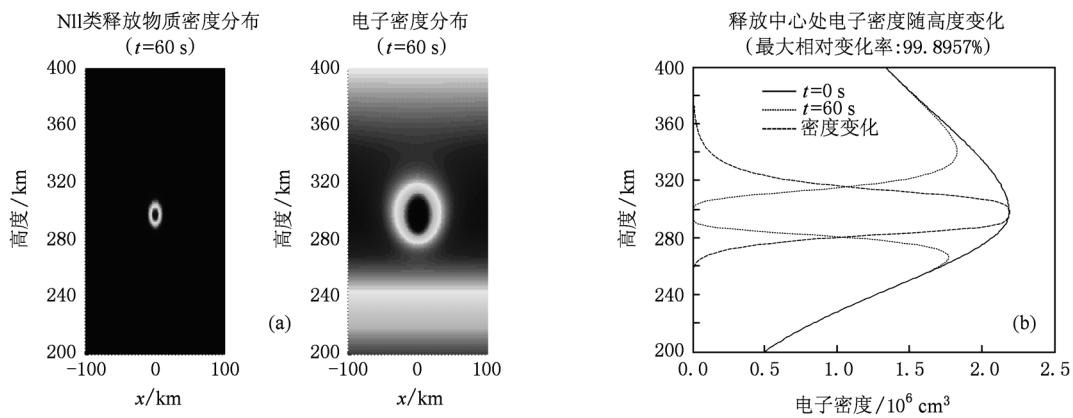


图7 椭圆形电离层洞结构图(SF_6 -100 mol-300 km-60 s) (a) 释放物质和电子密度二维分布;(b) 电子密度及其变化剖面

3.4. 多源释放的电离层洞调制

和点源释放只能形成简单的类椭球状电离层洞不同,多源释放模式可形成任意复杂形态的电离层洞.本文通过在抛物线路径上均匀释放化学物质,形成类抛物线管状电离层洞.

3.4.1. H_2O -50000mol

以 200 km 为起始高度,释放总量 50000 mol (900 kg) 的 H_2O ,释放 32 s 和 60 s 时刻的人工调制

类抛物线管状电离层洞二维结构如图 9 所示.

电离层洞进入维持期之前,随着扩散时间的增加,抛物线管状电离层洞变宽加深.射线由位于抛物线起始位置正下方地面发射,60 s 时刻东西方向射线追踪结果如下图 10 所示.

由于类抛物线管状电离层洞的存在,射线在 9 MHz 开始有部分穿透电离层.频率为 9 MHz 和 10 MHz 的透射射线传播方向发生东西向跃变;电波频率 13—15 MHz 区间,除一部分穿透电离层外还有

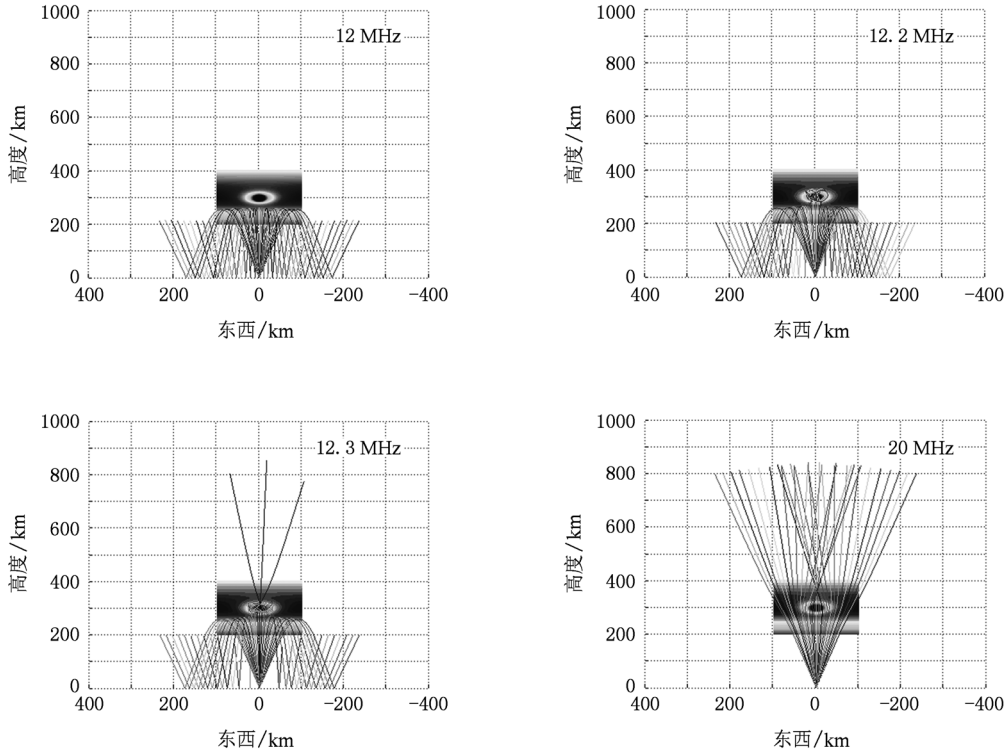


图 8 不同频率电波三维射线追踪结果(SF₆-100 mol-300 km-60 s)

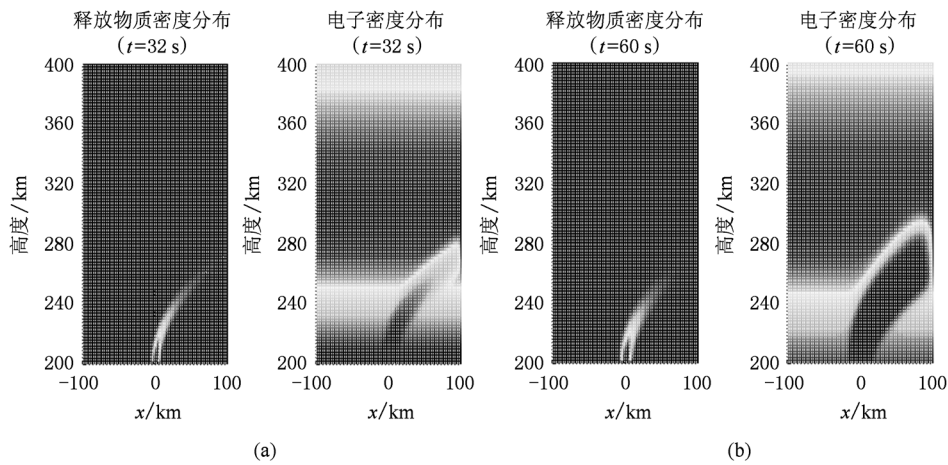


图 9 人工调制电离层区域释放物质和电子密度分布图(H₂O-50000 mol) (a)32 s;(b)60 s

一部分射线沿管道传播而出;频率为 20 MHz 时,抛物线管道一侧形成近似平行的射线束,这可认为是形成的射线汇聚点在无穷远处.可见不同频率射线,在此类电离层受扰区域呈现多种复杂的传播模式.

3.4.2. SF₆-5000 mol

以 200 km 为起始高度,释放总量 5000 mol(730 kg)的 SF₆,释放 32 s 和 60 s 时刻的人工调制类抛物

线管状电离层洞二维结构如图 11 所示.

电离层洞进入维持期之前,随着释放时间的增加,所形成的抛物线管状电离层洞变宽加深.和释放 H₂O(图 9)相比较,采用 SF₆ 所得到的抛物线形态更清晰,维持也更稳定,显示 SF₆ 具有更优异的电离层洞调制性能.射线由位于抛物线起始位置正下方地面发射,60 s 时刻东西方向射线追踪结果如下图 12 所示.

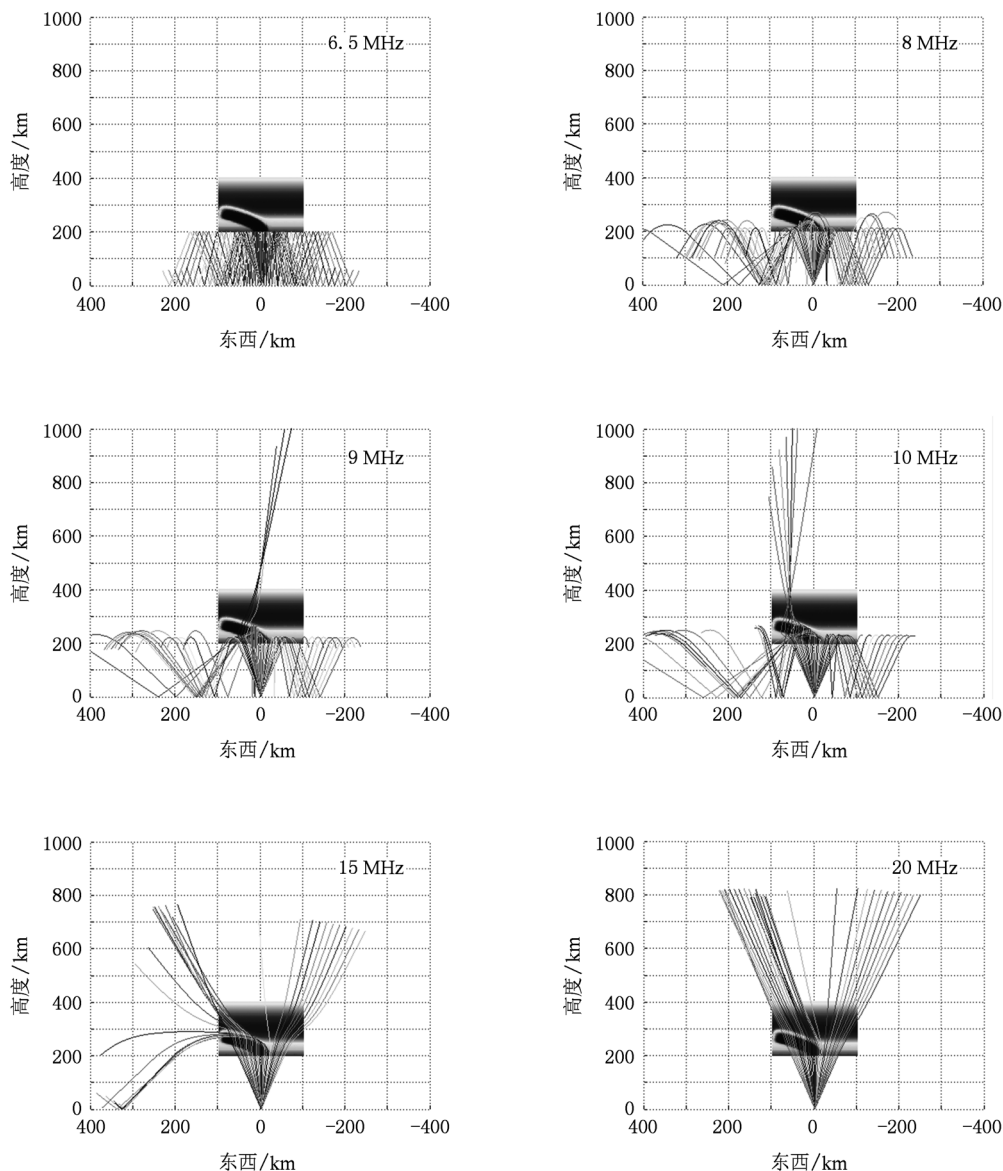


图 10 不同频率电波三维射线追踪结果(H_2O -50000 mol-60 s)

图 12 与图 10 所示传播模式类似. 受扰电离层临频约为 9 MHz; 频率为 10 MHz 和 12 MHz 的透射射线传播方向发生东西向跃变; 电波频率在 13—15 MHz 区间, 除一部分穿透电离层外还有一部分沿管道传播; 随着射线频率的增加 (15—20 MHz), 抛物线管道一侧形成近似平行的射线束.

4. 结果与讨论

本文以中性气体点源扩散方程为基础, 建立了一个多源释放动力学模型. 研究了释放方式 (释放物质、释放高度、释放模式和释放量) 对人工电离层

洞形态调制的影响, 并利用三维数字射线追踪技术, 对受扰电离层的电波传播效应进行了数值模拟和分析. 以上工作, 为开展主动化学释发电波传播效应试验提供了必备的理论基础. 基于已有试验结果, 可以得出以下一些结论:

1. 椭球形态电离层洞, 可以通过化学物质点源释放模式形成. 由于中性气体扩散系数随高度的增加而增大, 因此电离层洞呈上大下小 (鸭梨) 形状, 且在较高处释放可以形成区域更大、边界更平缓、最大电子密度相对变化量更小的电离层洞.
2. 两种典型化学释放物质中, SF_6 和 H_2O 比较而言, 离子化学反应速率更大, 相同物质的量 (摩尔

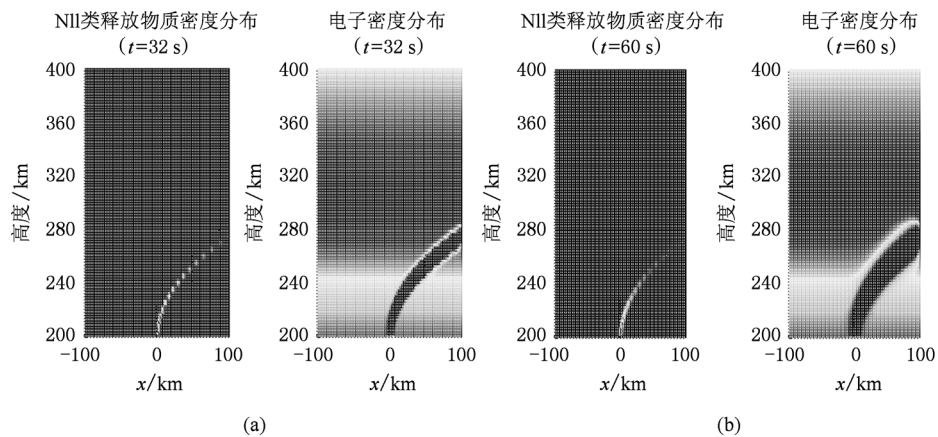


图 11 人工调制电离层区域释放物质和电子密度分布图(SF_6 -5000 mol) (a)32 s; (b)60 s

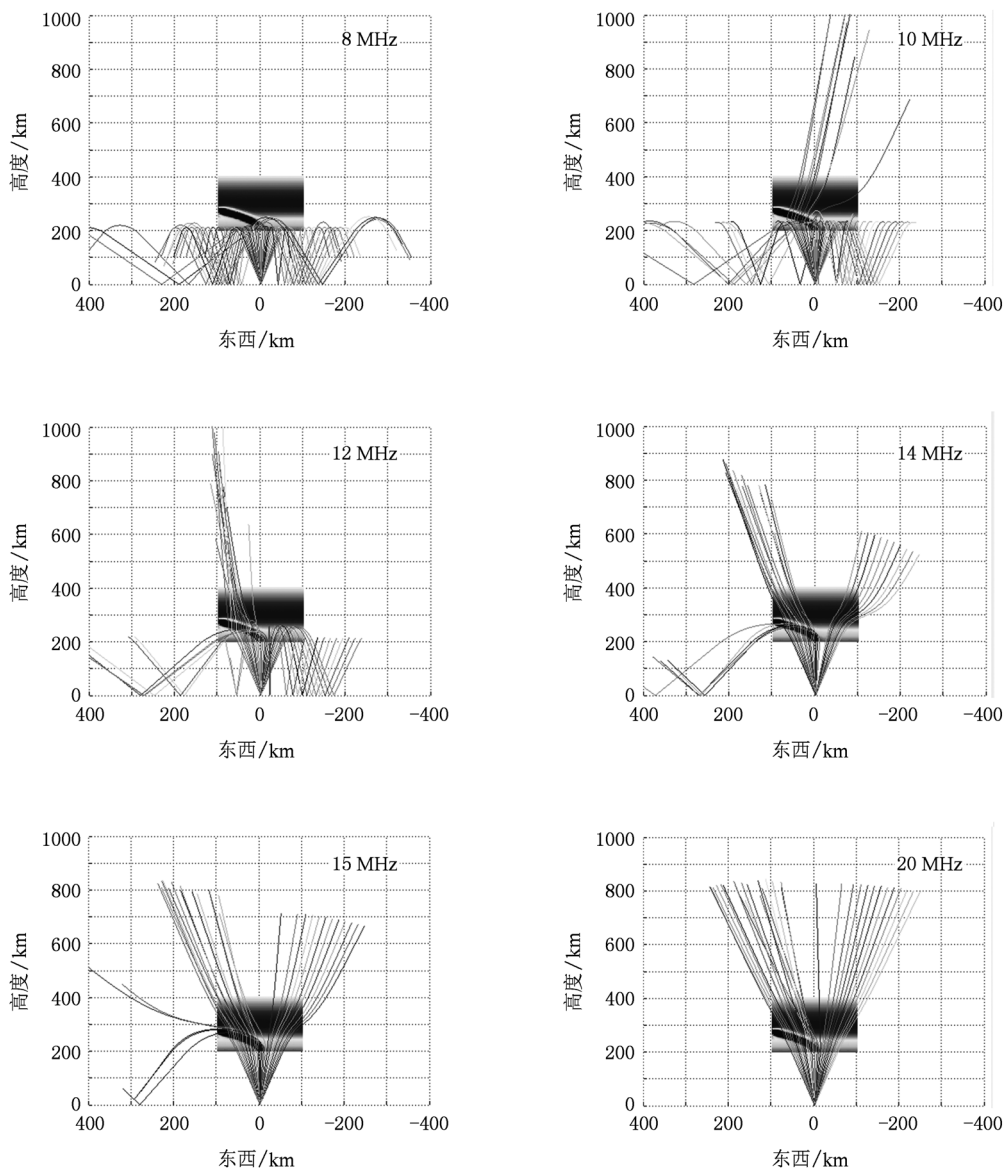


图 12 不同频率电波三维射线追踪结果(SF_6 -5000 mol-60 s)

数)可形成边界更清晰、最大电子密度相对变化量更大的电离层洞,作为人工调制电离层洞的释放物质, SF_6 比 H_2O 具有更好的形态调制和时空维持性能.

3. 释放量的增加,可以形成扰动区域更大、最大电子密度相对变化量更大的电离层洞.

4. 对椭球形态的电离层洞而言,当电离层洞上边界最大电子密度大于下边界最大电子密度时,一定频率范围内的射线会在其内形成多次反射,可反射最大频率(临频)由上边界最大电子密度决定,且上下边界最大电子密度差越大,可多次反射频率范围越宽;当电离层洞上边界最大电子密度等于或小于下边界最大电子密度时,则不会出射线在电离层洞内的多次反射模式.

5. 椭球形电离层洞,对工作频率超过该区域临频的射线,具有聚焦作用,且聚焦点位置随频率的

增高而增高.

6. 类抛物线管状电离层洞对不同频率电波呈现多样的扰动模式. 临频以上,随着频率的增高,首先会出现透射射线束传播方向的东西向跃变;然后出现部分射线沿类抛物线管道内传播(相当于“波导管”);频率的进一步提高,由于电离层洞对射线的折射作用,可使绝大多数穿过其间的发散射线,形成汇聚点在无穷远处的近似平行的射线束.

7) 各种形态人工电离层洞的出现,都可导致该区域电离层临界频率有所下降.

本文仅对 SF_6 比 H_2O 两种物质的电离层洞调制特性和处于释放初期(受扰电离层恢复期之前)的电离层洞的电波传播特性进行了讨论,其他一些典型化学释放物质(如 CO_2 和 H_2 等)及处于恢复期的电离层洞形态及其电波传播效应等,将在下一步进行更系统、深入的研究.

-
- [1] Mendillo M 1988 *Adv. Space Res.* **8** 51
- [2] Booker H G 1961 *J. Geophys. Res.* **66** 1073
- [3] Mendillo M, Hawkins G S, Klobuchar J A 1975 *Science* **187** 343
- [4] Bernhard P A 1979 *J. Geophys. Res.* **8** 793
- [5] Bernhard P A 1976 *Tech. Rep.* 17 (California: Stanford University) p1
- [6] Huang W G, Gu S F 2005 *Chin. J. Space Sci.* **25** 254 (in Chinese) [黄文耿、古士芬 2005 空间科学学报 **25** 254]
- [7] Hu Y G, Zhao Z Y, Zhang Y N 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8293 (in Chinese) [胡耀垓、赵正予、张援农 2010 物理学报 **59** 8293]
- [8] Bernhard P A 1987 *J. Geophys. Res.* **92** 4617
- [9] Kolomiitsev O P, Ruzhin Y Y, Egorov I B, Razinkov O G, Cherkashin Y N 1999 *Phys. Chem. Earth* **24** 393
- [10] Jones R M, Stephenson J J 1975 *OT Report* 75—76 (Washington: U. S. Government Printing Office) p1
- [11] Bilitza D, Reinisch B W 2008 *Adv. Space Res.* **42** 599
- [12] Hedin A E 1991 *J. Geophys. Res.* **96** 1159
- [13] McGuire R 2010 DGRF/IGRF Geomagnetic Field Model 1900—2015 and Related Parameters (available on line at http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/igrf_vitmo.html)

Morphological control of artificial ionospheric hole and its short-wave propagation effects^{*}

Hu Yao-Gai[†] Zhao Zheng-Yu Xiang Wei Zhang Yuan-Nong
(College of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430079, China)
(Received 24 September 2010; revised manuscript received 5 January 2011)

Abstract

As one of important and effective means for modifying the ionosphere, chemical release can produce artificial ionospheric holes attributed to ionization depletion, which also greatly affect the short-wave propagation. In this paper, a neural gas multi-point release dynamics model is proposed based on mono-point one, and then the morphological control effects of chemical substances, releasing altitude, releasing mode and mass on artificial ionospheric hole are discussed. Furthermore, the short-wave propagation effect of artificial ionospheric hole is simulated and investigated by the 3-D numerical ray tracing.

Keywords: chemical releases, artificial ionospheric hole, morphological control, short-wave propagation effect

PACS: 94.20. Vv, 94.20. dv, 94.20. ws

^{*} Project supported by National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2009AA8093202), China Postdoctoral Science Foundation (Nos. 20080430988, 200801321), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (Grant No. 3103001).

[†] E-mail: Farawayhu@sohu.com