

电离层 H₂O 释放扰动效应的数值模拟研究^{*}

高 泽 方涵先 汪四成

(解放军理工大学气象海洋学院 南京 211101)

摘 要 为充分研究化学物质在电离层释放的扰动效应和后期发展效果, 基于化学物质在电离层的扩散模型、化学反应和电离层扩展 F 的控制模型, 通过电离层 H₂O 的释放, 研究电子 e, H₂O, O⁺ 和 H₂O⁺ 共 4 种粒子的分布状态, 分析点源、多源和线源释放对电离层的扰动效果, 比较不同高度、不同量和不同时间释放的影响结果, 模拟夜间释放后期所激发的扩展 F 发展差异. 结果表明, H₂O 在电离层释放后, 能有效耗散背景电子形成空洞, O⁺ 和 H₂O⁺ 数密度呈椭圆形分布; 点源、多源和运动目标线源等不同释放方式对电离层的扰动效果不同, 证实了人工影响一定形态和区域电离层的可能性; H₂O 释放扰动幅度, 低层大于高层, 白天强于夜晚, 释放量越多扰动越突出; 夜间化学释放能激发扩展 F, 并且释放量越多, 激发效果越好.

关键词 化学物质释放, 电离层扰动, 电离层洞, 扩展 F

中图分类号 P 352

Numerical Simulation of Ionospheric Disturbance Effects by Chemical H₂O Release

GAO Ze FANG Hanxian WANG Sicheng

(*Institute of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101*)

Abstract In order to study the perturbation effect of chemical substances in the ionosphere and its evolution on the later stage of development, based on a dynamical model including the neutral gas diffusion and chemical reaction, and a physical model developed to present the development of spread-F, through the release of H₂O in the ionosphere, the distribution of electron, H₂O, O⁺ and H₂O⁺ are discussed and ionospheric disturbances by chemical release in point source, multiple source and line source are analyzed. Different release altitudes, different amounts of released substance and different release time are also compared. Besides, the developmental differences by different amounts of H₂O are also simulated. The results show that: H₂O can substantially decline electron density and facilitate the formation of ionospheric hole; the density distribution of O⁺ and H₂O⁺ are elliptical; H₂O released in different methods, such as, point source, multiple source and moving target line source, can cause different ionospheric disturbance effects, which confirm the possibility of artificially affecting a certain shape and area of the ionosphere; the disturbance amplitude of election density in

* 国家自然科学基金项目资助 (40505005)

2016-03-01 收到原稿, 2016-10-24 收到修定稿

E-mail: gaoze_mail@163.com. 通信作者方涵先, E-mail: fanghxp@163.com

lower altitude is larger than that in higher altitude and in daytime is larger than that in nighttime and the more H₂O is released, the larger disturbance is caused; Chemical release in nighttime can trigger spread-F in ionosphere and the more is released, the better development is caused.

Key words Chemical release, Ionospheric disturbance, Ionospheric hole, Spread-F

0 引言

电离层作为无线电波传播的重要介质,在自然条件下,通常易受太阳辐射、地磁活动和中高层大气等因素共同调制的影响,但在人工影响的技术条件下,同样能产生电离层的扰动.事实证明,随着空间活动的不断增加,一些人为因素对电离层空间环境也将产生一定程度的扰动影响.例如,1973年美国土星 V 火箭在发射天空实验室 (Skylab) 期间,来自 ATS-3 和 ATS-5 地球同步卫星的观测结果显示,由于火箭在电离层高度释放的大量尾气(主要成分为 H₂ 和 H₂O),使得电离层在 300 km 高度形成了一个直径达 1000 km 的电离层电子密度耗空区域,形成电离层洞,该区域的电子密度减少近 50%~60%,持续时间约 4 h,这一事件使得大西洋很大部分地区上空的短波通信中断^[1].在一些航天发射活动中也观察到了类似现象.

在这种无意识扰动形成电离层洞现象的引导下,近年来国外先后利用火箭、卫星等平台搭载化学物质,通过在电离层中有意识地释放来进行扰动效果研究^[2].化学物质释放是影响电离层的有效手段之一,中国对这方面的研究起步较晚,目前还主要处在理论研究阶段.有关化学物质释放影响电离层过程、扩散过程和电子密度变化机理等方面已有大量研究. Huang 等^[3,4] 计算比较了多种物质对电离层的扰动影响; Huang 等^[5,6] 考虑了在电离层高度中性气体扩散和离子化学过程,研究了化学物质释放对电离层和气辉的影响机理; Hu 等^[7-10] 分析了几种典型化学物质释放的扰动效应,及对短波传播的影响,讨论了不同高度化学物质释放的扰动特性; Wang 等^[11] 建立了适合描述中低纬 Spread-F 的物理模型,讨论了利用 H₂O 释放激发电离层 Rayleigh-Taylor 不稳定性的可能性,对比分析了 5% 初始正弦扰动和化学物质释放扰动激发形成扩展 F 的差异.针对化学物质释放激发扩展 F 的研究,1990 年 Boston 大学和 NASA 一起在靠近磁赤道的 Kwajalein 站开展了用化学物

质 SF₆ 激发电离层不稳定性的扰动实验,并在化学释放区观测到小羽毛结构,虽然对这些小羽毛结构的产生,并没有排除背景电离层本身扰动的可能影响,但该实验提出了化学物质释放激发扩展 F 可能性的存在^[12].

本文以化学物质 H₂O 在电离层中释放为例,基于扩散过程和化学反应,对分子 H₂O、电子 e、离子 O⁺ 和 H₂O⁺ 共 4 种粒子密度的分布状态进行研究,同时分析点源、多源和运动目标线源等不同释放方式对电离层的扰动效果,结合不同高度、不同量和不同时间的释放形式,结合不同高度、不同量和不同时间的释放形式,验证了影响一定程度和一定形态电离层的可能性,在化学物质释放激发电离层扩展 F 的可能性下,对不同量化学物质释放后期在电离层激发扩展 F 的差异进行了数值模拟与分析.以期对充分了解化学物质释放人工影响电离层的实验过程和可能存在的后期激发效果提供一定的理论依据.

1 电离层化学物质释放动力学模型

1.1 中性气体扩散过程

取 z 轴竖直向上, x 轴和 y 轴分别指向东和北,那么释放气体在包含 K 种气体成分背景大气中的扩散速度可表示为^[13]

$$\mathbf{w} = \mathbf{w}_n - D \left(\frac{1}{n} \nabla n + \frac{\mathbf{a}_z}{H} \right). \quad (1)$$

其中: \mathbf{w}_n 为背景大气运动速度; \mathbf{a}_z 为 z 方向单位矢量; n 为释放气体的数密度; $H = \frac{kT}{mg}$ 为标高, k 为玻尔兹曼常数, m 为释放气体的分子量, g 为重力加速度; D 为扩散系数,其等于释放气体与每种背景大气分子扩散系数的倒数和,即^[13]

$$\frac{1}{D} = \sum_{i=1}^K \frac{1}{D_i}. \quad (2)$$

释放气体的连续性方程为^[13]

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \nabla \cdot (n\mathbf{w}) = P - L + S. \quad (3)$$

其中, P 和 L 分别为化学物质的产生和损失项, S 为源函数项, 假设背景大气是水平分层的, 那么中性风场 w_n 、扩散系数 D 及中性大气温度 T 只随 z 方向变化, 扩散系数可表示为

$$D = D_0 \exp[(z - z_0)/H_a].$$

其中, D_0 为释放点的扩散系数, z_0 为释放点的高度, H_a 为背景大气标高.

忽略背景热层风场的影响, 释放气体的连续性方程 (3) 可写为

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D \left[\frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 n}{\partial y^2} \right] + \frac{d}{dz} \left[D \left(\frac{\partial n}{\partial z} + \frac{n}{H} \right) \right] - k_1 n_{O^+} + n. \quad (4)$$

将开始释放的物质作为一个点源, 在背景电离层和热层平面分层假设下, 化学物质的扩散过程可由方程 (4) 近似得到, 具体推导过程可参见文献 [13], 中性气体浓度分布表达式如下:

$$n = \frac{N_0}{(4\pi D_0 t)^{3/2}} \exp \left\{ - (z - z_0) \left(\frac{3}{4H_a} + \frac{1}{2H} \right) - \frac{H_a^2 \{1 - \exp[-(z - z_0)/(2H_a)]\}^2}{D_0 t} - \alpha t - \frac{r^2 \exp[-(z - z_0)/(2H_a)]}{4D_0 t} \right. \\ \left. \left(\frac{1}{H_a} - \frac{1}{H} \right)^2 \frac{D_0 t \exp[(z - z_0)/(2H_a)]}{4} \right\}. \quad (5)$$

假设背景大气由 O, O₂ 和 N₂ 组成, 以化学物质 H₂O 为例, 其在释放点的扩散系数可表示为 [14]

$$D_0 = \left(\frac{n_O}{8.46 \times 10^{17} T^{0.5}} + \frac{n_{N_2}}{2.04 \times 10^{17} T^{0.623}} + \frac{n_{O_2}}{2.02 \times 10^{17} T^{0.632}} \right)^{-1} \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}. \quad (6)$$

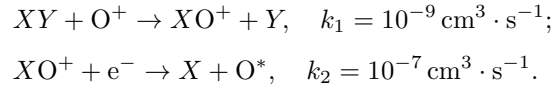
其中, n_O , n_{N_2} 和 n_{O_2} 分别表示 O, O₂ 和 N₂ 的数密度, N_0 为所释放化学物质的数量, T 为背景大气的温度.

1.2 离子化学反应过程

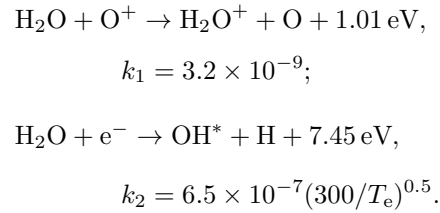
电离层释放物质可按其作用结果分为两类. 一类是使电离层电子密度增加的物质 (如碱金属钡、碱土金属钠等), 这类物质容易发生光致电离而失去电子, 使释放区域的电子密度在极短时间内剧增 [2]. 大量释放钡或其他碱金属, 就可能对通信产生重大的影

响, 甚至对通信造成威胁. 实验资料表明, 释放 1 kg 钡可在 100~200 km 高度、100 km 范围内将电子密度提高 1~2 个量级, 持续时间达 1000 s, 并形成沿磁力线方向的大面积不规则体. 另一类是中性气体分子, 如 H₂, H₂O, CO₂, SF₆ 等, 可使释放区域的电子密度降低 [15]. 主要原因是在电离层 F 区, 占绝大多数 O⁺ 与电子的复合系数约为 10⁻¹² cm³·s⁻¹, 而中性气体很容易将原子性的 O⁺ 转变为分子性离子, 复合系数一般可达到 10⁻⁷ cm³·s⁻¹, 甚至更大, 因此电离层 F 区的电子密度有可能大大减少, 产生人工电离层洞. 而这类物质根据离子化学反应路径不同, 生成的中间产物不同, 又可以分为如下两种类型 [16].

第一类 生成正离子中间产物类:



其中: k_1 和 k_2 为离子化学反应速率; XY 为 H₂, H₂O, CO₂ 等物质; XO^+ 为正离子中间产物; O* 为处于激发态的原子氧. 以 H₂O 为例, 具体的化学反应过程如下:

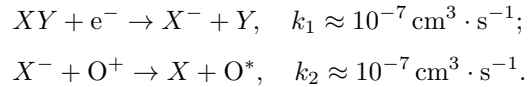


其中, k_1 和 k_2 为化学反应系数, T_e 为电子温度. 电子密度减少量为

$$\Delta n_e = k_2 (k_1 n_{H_2O} n_{O^+} \Delta t) n_e \Delta t. \quad (7)$$

式中, n_{H_2O} , n_{O^+} , n_e 分别为粒子 H₂O, O⁺, 电子 e 的数密度, Δt 为反应时间.

第二类 生成负离子中间产物类:



其中, XY 为 SF₆, CF₃Br, Ni(CO)₄ 等物质.

1.3 电离层扩展 F 的控制方程

电离层扩展 F 的控制方程为 [11]

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial x} \left[n \left(- \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) / \cos I \right] -$$

$$\frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial y} \left[n \left(-\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) \cos I \right] = -\nu_R (n - n_0), \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial n}{\partial x} \left(n \nu_{in} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(n \nu_{in} \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + \frac{\nu_{in}}{e} \frac{\partial^2 n k T}{\partial x^2} + \\ \frac{1}{e} \frac{\partial (n - n_0) k T}{\partial y} = \frac{1}{e} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{n - n_0}{n_0} \frac{\partial n_0 k T}{\partial y} \right) + \\ B \left(-g \cos I + \nu_{in} U_y \cos I + \frac{\nu_{in}}{B} E_{0x} + \right. \\ \left. \frac{\nu_{in}^2}{\Omega_i} U_x \right) \frac{\partial n}{\partial x}. \quad (9) \end{aligned}$$

式中, n 为离子或电子数密度, n_0 为平衡态时的数密度; I 为磁倾角; U , E , B 分别为背景中性风场、电场和地磁场; E_0 为平衡态电场, φ 为扰动电势; ν_R 为复合系数, ν_{in} 为离子和中性粒子的碰撞频率; $p_e = nkT_e$, $p_i = nkT_i$ 均为压力项, 并假设离子温度等于电子温度即 $T_i = T_e = T$, Ω_i 为离子回旋频率.

2 数值模拟方法

背景电离层和中性热层大气参数分别由经验模式 IRI-2012 和 NRLMSISE-00 得到. 首先由经验模式获取释放区域的中性大气和电离层参数, 利用扩散方程得出此时刻释放物质浓度的空间分布, 再由离子化学反应方程和等离子体的准中性特性 $\sum n_{i+} = n_e$ 的条件, 可确定出释放区域的电子密度变化. 进而时间步向前推进一步, 重复以上循环, 即可得到下一时刻的电子密度分布, 时间步长取为 1.0s, 流程如图 1 所示.

在模拟扩展 F 发展的数值计算中, $\max(n_0)$ 为初始电子密度最大值, 可令电子密度比 $Q = n / \max(n_0)$ 以便于数值计算过程稳定, 有助于求解方程组的非线性解, 同时用通量修正法 (FCT) 求解双曲线方程 (8), 用交替方向隐式法 (ADI) 求解椭圆方程 (9), 对于 $\frac{1}{Q} \frac{\partial Q}{\partial x}$ 的形式, 可以用中心差分方法做近似代替.

3 数值模拟结果

释放地点在中纬地区南京 (32 °N, 118.5°E), 时间为 2012 年 6 月 1 日 12:00LT 和 00:00LT. 背景电

离层电子密度参数如图 2 所示, 白天和夜间电子密度峰值高度分别为 310 和 329 km.

由式 (7) 可知, 电子密度的耗散程度与化学反应系数 k_1 和 k_2 , 以及背景粒子数密度相关, 所以本文中释放高度主要选在电离层的 F 层, 即电子密度的高值区.

3.1 点源释放过程

以中性化学物质 H_2O 为例, 在白天释放 500 mol, 释放高度为 310 km. H_2O 释放后迅速扩散, 并造成电子密度耗散, 图 3 所示为释放 20, 40, 60, 80, 100s 时释放中心处的电子密度剖面, 在释放高度附近, 电子密度急剧减少, 减少主要发生在 60s 内, 60s 时最大电子密度减小幅度接近 30%, 其后变化比较缓慢. 由于中性物质 H_2O 释放后是一个向四周扩散的过程,

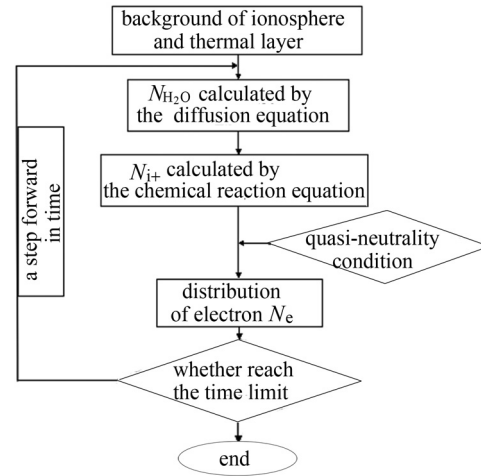


图 1 化学物质释放扰动电离层流程

Fig. 1 Flow chart of ionosphere disturbance by chemical release

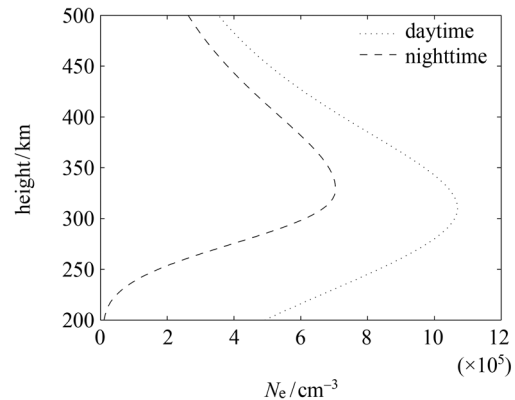


图 2 初始电离层电子密度剖面

Fig. 2 Initial profile of ionospheric electron density

扩散的范围形成相应尺度的影响区域, 释放中心数密度值较大, 导致化学反应过程较快, 造成电子密度削减的幅度最大. 同时, 由于中性化学物质分布由中心向上下递减, 电子密度削减幅度也向上下递减. 可见化学物质 H₂O 是有效耗散电子密度的物质, 容易造成电离层空洞的形成.

图 4 给出的是 500 mol H₂O 释放 60 s 后 e, H₂O,

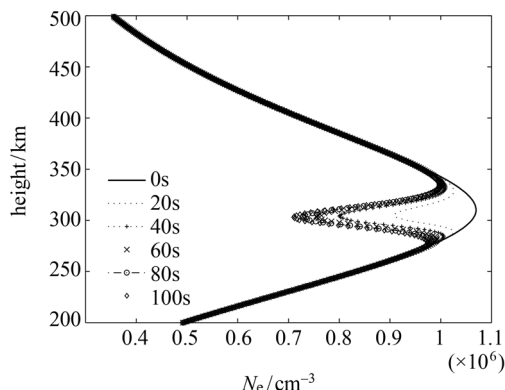


图 3 500 mol 化学物质释放后不同时间电离层电子密度剖面

Fig. 3 Profile of ionospheric electron density at different time after 500 mol chemical release

O⁺ 和 H₂O⁺ 4 种粒子的空间分布情况. 由图 4 可以发现: H₂O 释放后向四周迅速扩散, 60 s 时上下左右都能扩散到 50 km 范围外; 背景电子被释放的化学物质消耗, 形成水平尺度近 50 km 的电子密度削减区, 并且在释放中心附近, 电子密度削减情况较为剧烈, 主要是由于 H₂O 能有效与电子产生化学反应, 在未有效扩散前就能剧烈耗散电子密度, 从而形成电子密度空洞; O⁺ 在化学反应过程中也被消耗, 垂直切面上形成了椭圆形的密度消耗区, 其耗散区范围与电子密度耗散区位形相似; 由于化学反应而生成的离子 H₂O⁺, 其数密度形成近似椭圆形的分布状态, 并且由内到外递减.

3.2 不同释放高度电子密度变化情况

化学物质 H₂O 的释放量为 500 mol, 释放高度主要在电离层的 F 层, 分别取 290, 300, 310, 320 km, 释放 60 s 后释放中心的电子密度剖面如图 5 所示. 由图 5 可知, 500 mol 化学物质在不同高度释放后尽管电子密度都有减少, 但耗散的效果与程度并不相同. 在 320 km 高度释放后, 60 s 时释放中心电子密度减少了近 25%, 而当相同量的化学物质在 290 km 高度释放后, 其释放中心的最大削减程度约为 50%, 这说

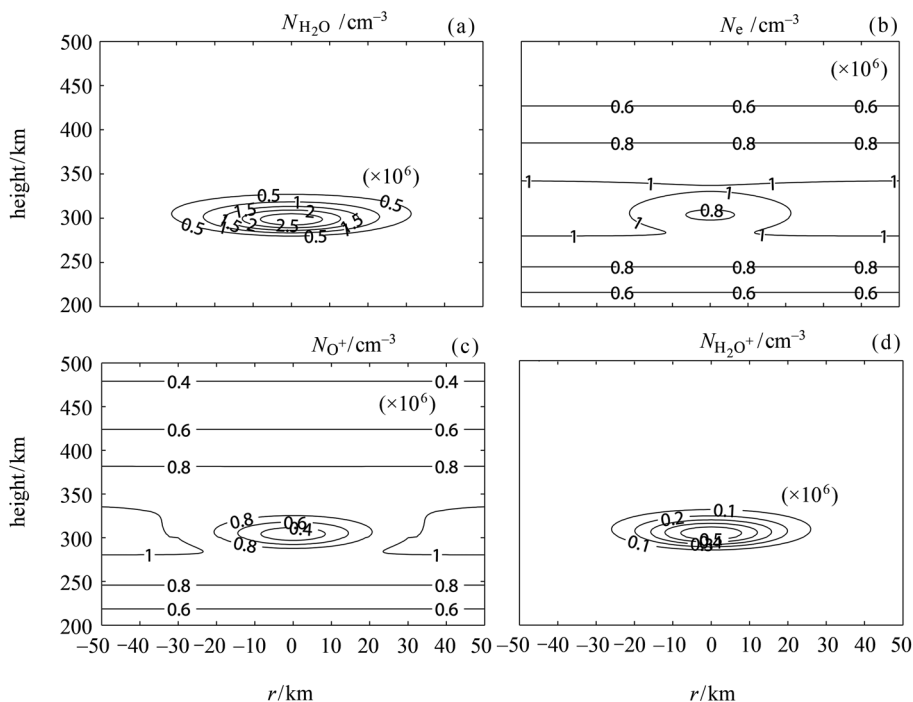


图 4 500 mol 化学物质释放 60 s 后粒子分布

Fig. 4 Particles distribution at $t = 60$ s after 500 mol chemical release

明在电离层的 F 层, 化学物质释放的高度越低, 其影响的程度就越深, 越有利于电子密度的耗散, 而更容易形成洞状结构. 分析其主要原因在于, 电离层洞的深度取决于中性释放物质参与下的电离层离子化学反应累积效应, 扩散系数随着高度的增加而变大, 所

以当中性化学物质在 F 层较低层释放时, 相比于高层扩散较慢, 未有效扩散前, 较高数值密度的中性化学物质化学反应后更容易形成更深的电离层洞.

3.3 多源释放下的粒子密度分布

图 6 给出了各点释放 500 mol H₂O 60 s 后的粒

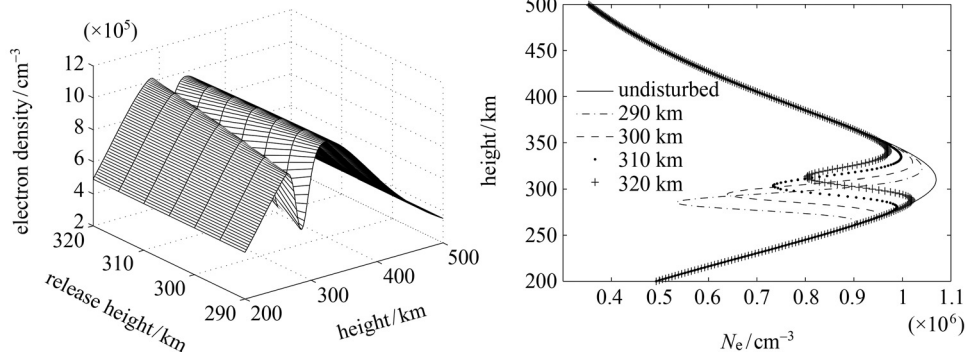


图 5 500 mol 化学物质在不同高度释放 60 s 后电子密度剖面

Fig. 5 Profile of ionospheric electron density at $t = 60$ s after 500 mol chemical release at different heights

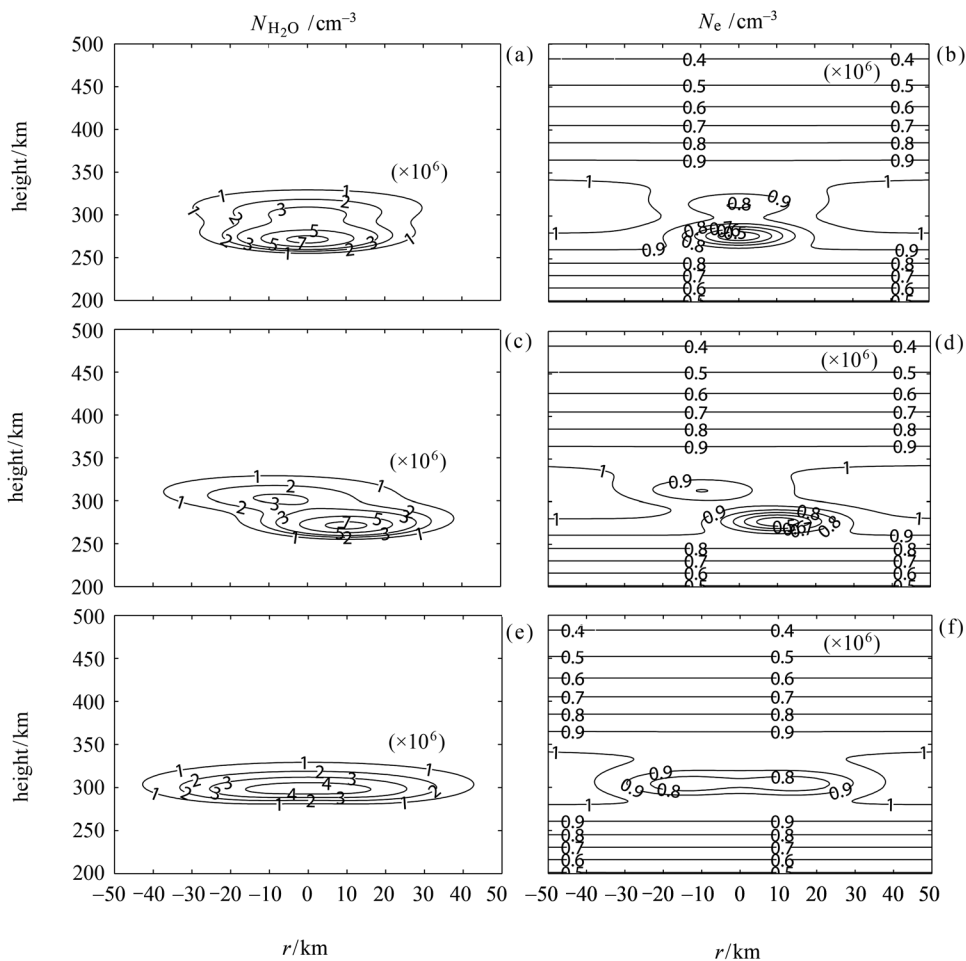


图 6 化学物质多源同时释放 60 s 后的粒子分布

Fig. 6 Particles distribution at $t = 60$ s after chemical release in different positions at the same time

子分布情况. 其中, 图 6(a) (b) 是在 280 km ($r = 0$ km) 和 320 km ($r = 0$ km) 高度处释放后的 H₂O 和电子数密度分布情况; 图 6(c) (d) 是在 280 km ($r = 10$ km) 和 320 km ($r = -10$ km) 高度处释放后的 H₂O 和电子数密度分布情况; 图 6(e) (f) 是在 310 km ($r = 10$ km) 和 310 km ($r = -10$ km) 高度处释放后的 H₂O 和电子数密度分布情况. 由于释放高度和位置的不同, H₂O 和电子的数密度分布呈现出形态各异分布情况, 其中电子密度有不同程度的减少, 出现了与化学物质释放位置同步的消耗中心. 对于 H₂O 的分布, 由图 6(a) (c) 可以看到, 化学物质在高层的扩散速度快于低层的扩散速度, 高层释放中心的 H₂O 数密度小于低层释放中心的数密度, 这与扩散系数随高度的增加而增加有关; 低层释放中心的电子密度耗散程度更深, 这与 3.2 模拟中的结论相一致. 由此可以看出, 通过控制化学物质的释放位置和释放量, 可以实现电离层一定程度和一定位置的影响区域.

3.4 运动目标释放下的粒子密度分布

假设飞行器的飞行速度为 $10 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, 竖直向上从 280 km 到 320 km 过程中每秒释放 $100 \text{ mol H}_2\text{O}$, 则 30 s 后 H₂O 和电子数密度的分布如图 7(a) (c) 所示, 图 7(b) (d) 为飞行器从 -20 km 到 20 km 的过程. 运动目标的释放过程可近似看做线源的释放过程, 是多个点源的叠加效果, 并且线源释放也是比较常见的释放方式, 多是由于飞行器的尾焰和尾气中所含化学物质造成的. 由图 7 可以看到, 随着飞行方式的不同, 影响的形态效果也随之变化. 当垂直向上飞行时, 在低层区域电子密度耗散较大, 电子密度的耗散区域形成了塔状结构; 当飞行器水平飞行时, 化学物质的密度分布最大值有向飞行方向靠拢的趋势, 电子密度的耗散效果差异并不太明显.

3.5 不同数量不同时间释放扰动效果对比

图 8 给出了不同质量的化学物质在白天和夜间分别释放 50 和 100 s 后的影响效果对比. 分别取 50, 100, 200, 400 mol 在背景电子密度峰值高度附近处释

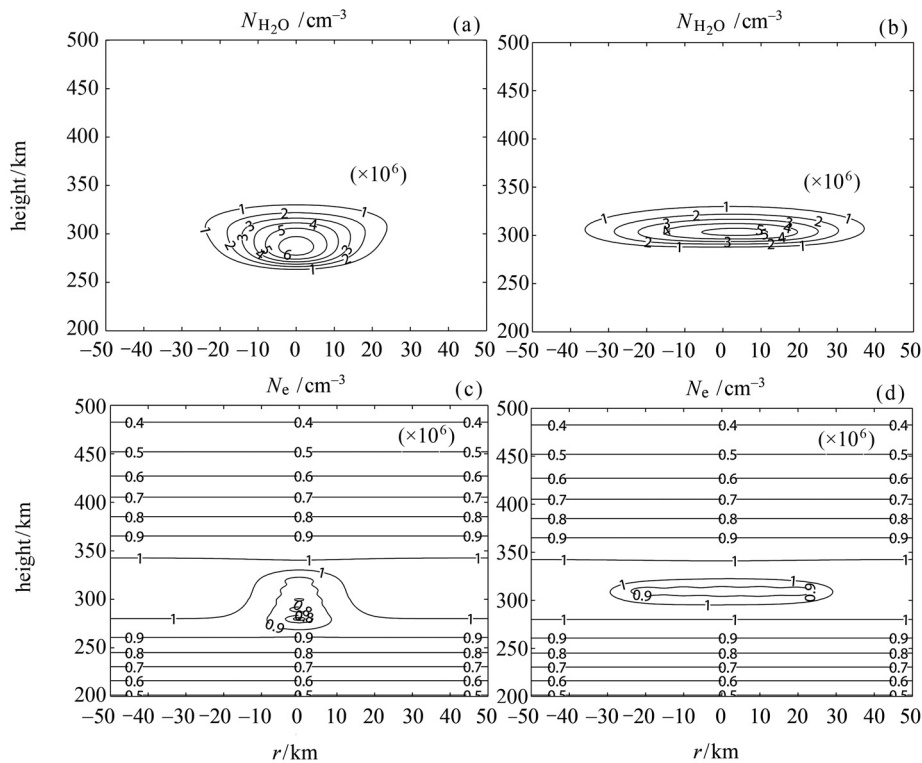


图 7 $10 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 飞行器每秒释放 $100 \text{ mol H}_2\text{O}$ 后 30 s 时粒子的空间分布竖直方向 (a) (c) 及水平方向 (b) (d)

Fig. 7 Particles distribution at $t = 30 \text{ s}$ after chemical release by a $10 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ aircraft which release $100 \text{ mol H}_2\text{O}$ per second. (a) and (c) are vertical flight, (b) and (d) are horizontal flight

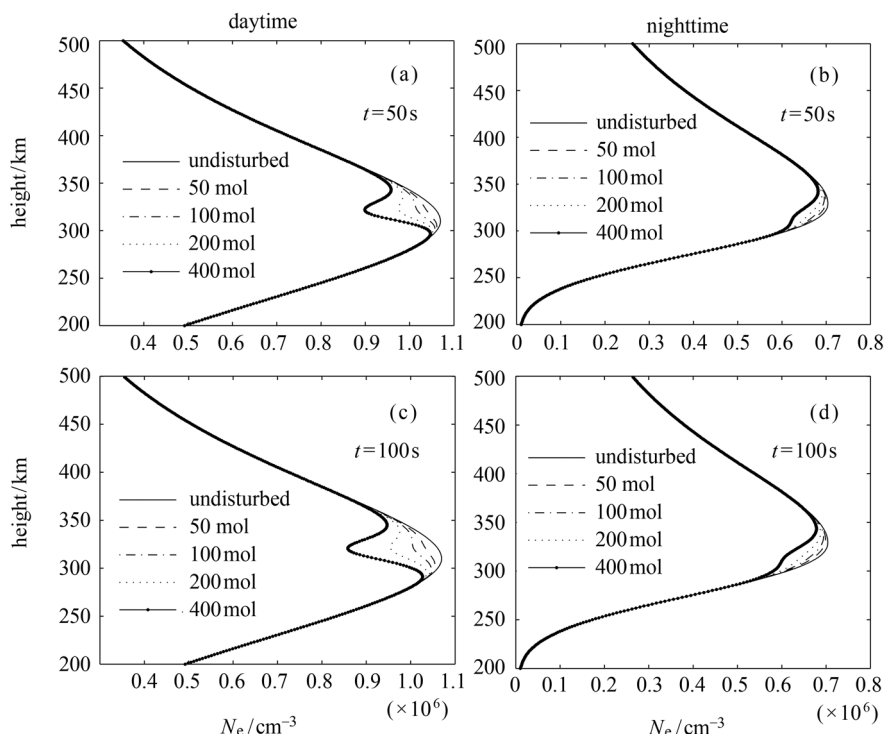


图 8 不同量 H_2O 在白天和夜间释放后电离层电子密度剖面

Fig. 8 Profile of ionospheric electron density at daytime and nighttime after different amounts of H_2O release

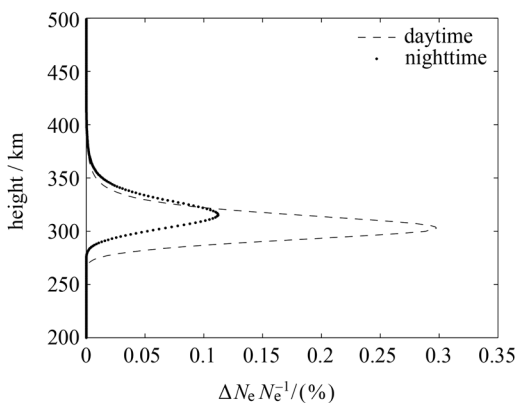


图 9 400 mol H_2O 在白天和夜间释放 100 s 后电子密度变化比例剖面

Fig. 9 Profile of electron density changes in the proportion at $t = 100$ s after 400 mol H_2O release in the daytime and nighttime

放, 电子密度剖面如图 8 所示. 可以看到, 释放物质的量越多, 电子密度扰动幅度越大, 同时其上下影响的范围也就越广. 通过对比还可发现, 化学物质释放 50 和释放 100 s 后影响的效果并无明显的差距, 尤其是释放量越小的时候, 其不同时间的差异也越小,

这可能与化学物质释放量越小, 其化学反应能力有限相关. 通过白天和夜间释放效果的对比, 可明显发现白天的耗散幅度远大于夜间的电子耗散效果.

图 9 给出的是 400 mol H_2O 在同一天夜间 00:00 LT 和白天 12:00 LT 背景电子密度峰值高度释放后 60 s 时电子密度所减少比例的剖面. 如图 9 所示, 在白天释放中心电子密度减少近 30%, 而在夜间却远远小于白天的情况, 释放中心的电子密度只减少近 10%, 与图 8 所示结果一致, 进一步说明白天的扰动幅度比晚上大, 这主要是因为夜间电离层的各参数比白天情况小得多, 化学反应的速率会变慢, 且夜间的电子密度峰值高度比白天高, 化学物质在越高层次扩散越快, 越不利于化学物质与电子的充分反应, 所以造成的电子密度耗散幅度不如白天的环境.

3.6 夜间不同释放量激发扩展 F 对比

3.6.1 不同质量的化学物质释放后的分布

图 10 和图 11 所示分别为 10 mol 和 100 mol H_2O 释放后的效果, 释放高度为 255 km, 其中图 10(a) (b) 为不同时刻释放中心的电子密度剖面, 图 10(c) (d) 分别为 (a) (b) 在释放点放大后的效果; 图 11 为释放

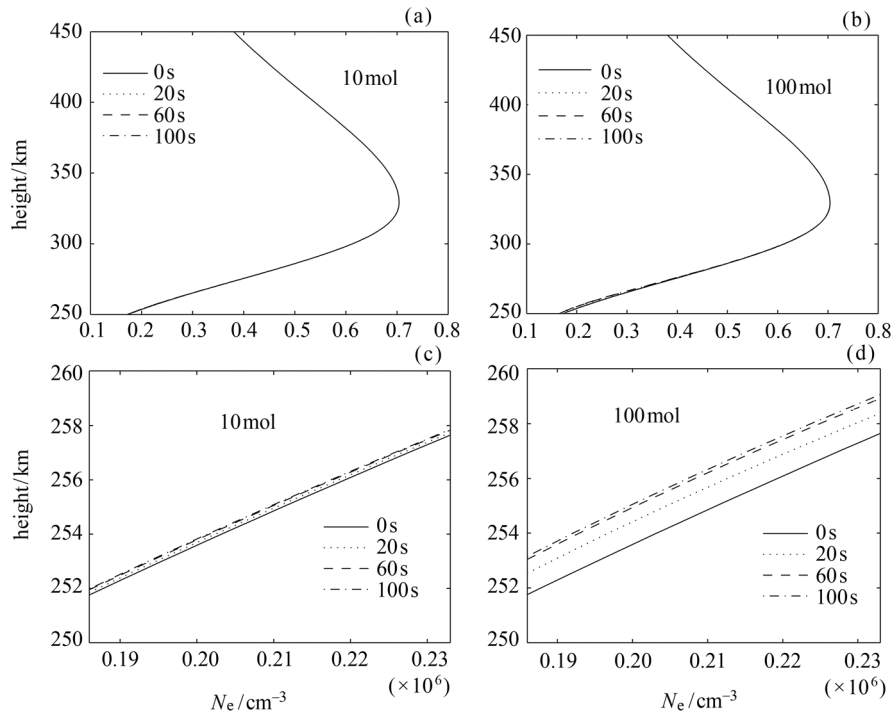


图 10 不同时刻释放中心电子密度剖面. (c) (d) 为 (a) (b) 放大后的结果
 Fig. 10 Electron density profile of disturbance center at different time after chemical release.
 (c) and (d) are the amplifications of (a) and (b) respectively

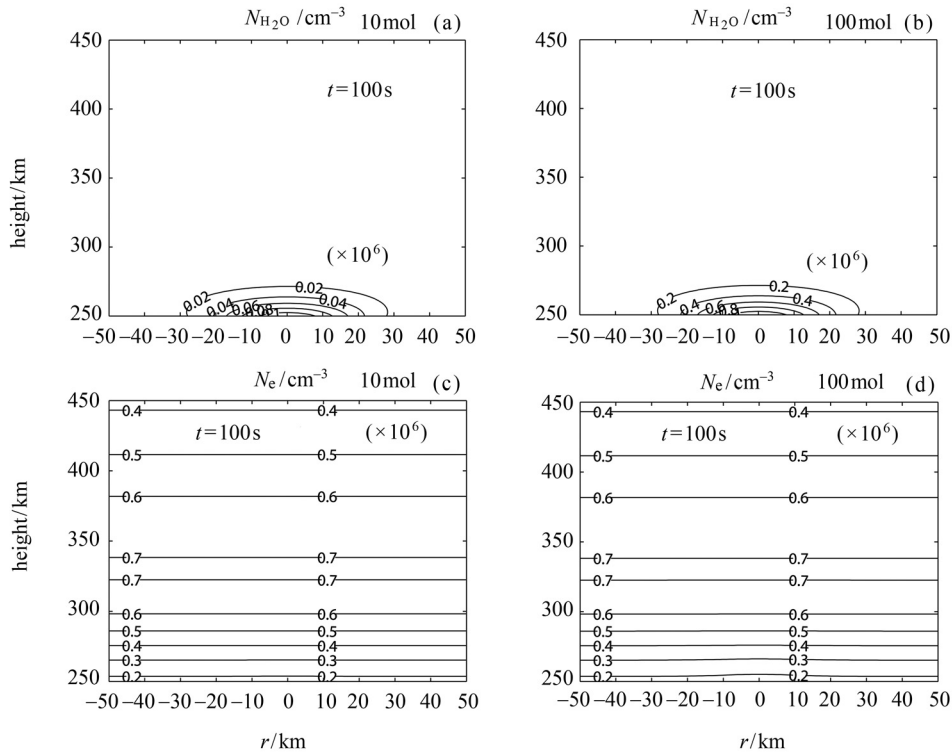


图 11 化学物质释放 100s 后粒子空间分布
 Fig. 11 Particles distribution at $t = 100s$ after chemical release

100 s 后 H_2O 和电子数密度的空间分布. 如图 10(a) (b) 所示, 尽管释放 100 mol 和 10 mol 时都不曾发现明显的电子密度剖面变化, 但对比图 10(c) (d) 可以发现释放 100 mol 的扰动幅度大于 10 mol 的扰动幅度, 并且释放 100 s 时与 0 s 相比并无明显差别, 扰动已经接近极值状态. 由图 11(a) 到 (d) 可知, H_2O 和电子数密度的空间分布在 100 s 时也随化学物质不同的释放量而有所不同, 当释放 10 mol 化学物质时, 电子数密度分布并无明显变化.

3.6.2 化学物质释放后的激发效果

图 12 是针对图 10 中初始扰动后不同时间的电子密度比 Q 分布. 把图 10 所示的电离层状态作为电离层低层的初始扰动, 不考虑背景中性风场的影响, 在 $-1 \times 10^{-3} \text{V}\cdot\text{m}^{-1}$ 水平电场的作用下, 100 mol 化学物质所形成的电子密度耗散区缓慢抬升, 等离子体泡状结构逐步发展成型, 电离层扩展 F 得以激发, 但 10 mol 化学物质释放所形成的初始扰动并未有效激发形成等离子体的泡状结构. 3000 s 时, 100 mol 释放扰动激发的等离子体泡状结构已经抬升至 300 km 高度附近, 抬升速度接近 $30 \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; 而 10 mol 释放

后产生的扰动发展则不明显, 模拟后期未见相当尺度的等离子体泡状结构. 在发展过程中等离子体泡中心的电子密度一直相对较低, 接近扰动低层的电子密度. 说明在一定背景条件下, 化学物质释放能激发电离层不稳定性, 产生扩展 F, 并且释放量越多, 越有利于促进扰动的发展和扩展 F 的生成.

4 结论与讨论

选取南京地区夜间和白天两组数据, 在背景电离层水平均匀的假设下, 对化学物质 H_2O 在电离层释放后多种粒子的响应过程及多种形式释放后的作用效果进行了分析, 通过对化学物质在不同高度、不同物质的量和不同时间释放后的差异进行比较, 模拟了夜间释放化学物质激发电离层扩展 F 的发展过程. 综上所述分析, 得出以下结论.

(1) 化学物质 H_2O 在电离层释放后, 能够在较大空间尺度扩散, 同时能有效地与背景电子发生化学反应, 尤其是释放中心在短时间能造成背景电子数密度的耗散和削减, 形成电子密度空洞. O^+ 和 H_2O^+ 随

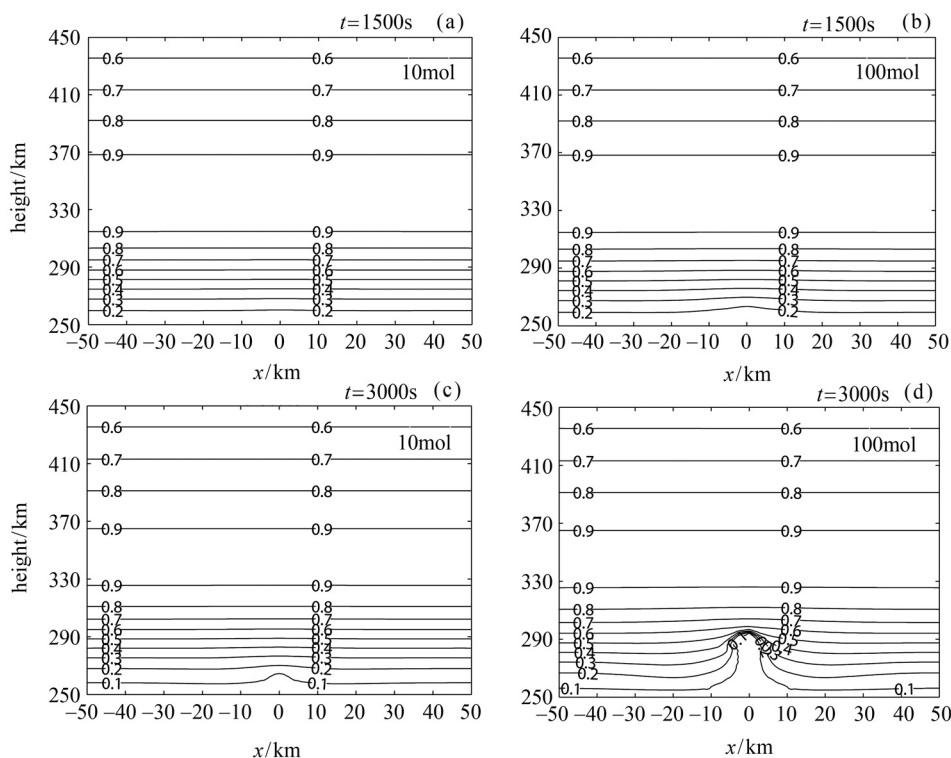


图 12 化学物质释放产生扰动后不同时刻的电子密度比 Q 分布

Fig. 12 Electron density ratio Q distribution at different time after chemical release

化学反应过程产生分布变化, 垂直切面上形成了近似椭圆形的分布状态.

(2) 随着点源、多源和运动目标线源多种样式的释放形式, 背景电子密度呈现出多种样式的耗散区域, 证实了通过化学物质释放影响一定区域和形态电离层的可操作性.

(3) 在电离层 F 层, 相同量的化学物质 H₂O 在不同高度释放后, 造成的扰动效果并不相同, 低层次释放所削减的电子密度幅度更大. 对比显示, 在白天释放后的耗散幅度远大于夜间的电子耗散效果; 不同物质的量的化学物质在电子密度峰值高度附近释放后, 释放量越多, 其影响的幅度也就越大.

(4) 夜间化学物质 H₂O 在电离层低层释放后, 能够造成背景电子密度的耗散, 增强了扰动中心垂直方向上的电子密度梯度, 有利于电离层扩展 F 的激发和发展, 并且释放的量越大, 初始扰动就越容易发展, 越有利于扩展 F 的形成. 同时在等离子体泡状结构的抬升过程中, 扰动中心垂直上方形成不断扩大的电子密度耗散区. 在一定条件下, 化学物质释放可作为一种人工激发电离层扩展 F 的有效手段.

以上结论基于电离层水平均匀、忽略中性风场等相关假设和近似条件, 中性化学物质扩散模型也仅考虑了二维方向, 并且背景参数由经验模式得出, 与真实的物理环境还有一定差异, 所以对于模拟准确性还有待进一步研究. 电离层扩展 F 的发展受多种因素的共同作用, 人工激发扩展 F 作为人工影响电离层的延伸领域, 其机理和条件有待进一步研究与分析.

参考文献

[1] MENDILLO M. Ionospheric holes: a review of theory and recent experiments [J]. *Adv. Space. Res.*, 1998, **8**(1): 51-62.

[2] CHOUEIRI E Y, ORAEVSKY V N, DOKUKIN V S, *et al.* Observations and modeling of neutral gas releases from the APEX satellite [J]. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**: 25673-25681

[3] HUANG Y, SHI J M, YUAN Z C. Ionosphere electron density depletion caused by chemical release [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2011, **54**(1): 1-5 (黄勇, 时家明, 袁忠才. 释放化学物质耗空电离层电子密度的研究 [J]. *地球物理学报*, 2011, **54**(1): 1-5)

[4] HUANG Yong, SHI Jiaming, YUAN Zhongcai. Comparison of ionosphere modification by different chemicals release [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2012, **32**(1): 33-39 (黄勇, 时家明, 袁忠才. 释放不同化学物质对电离层扰动的对比 [J]. *空间*

科学学报, 2012, **32**(1): 33-39)

[5] HUANG Wengeng, GU Shifen. Ionospheric disturbances produced by artificially chemical releases [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2005, **25**(4): 254-258 (黄文耿, 古士芬. 化学物质释放人工改变电离层 [J]. *空间科学学报*, 2005, **25**(4): 254-258)

[6] HUANG Wengeng, GU Shifen. Artificially created air-glow by neutral gas release [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2006, **26**(2): 81-85 (黄文耿, 古士芬. 中性气体释放人工产生气辉 [J]. *空间科学学报*, 2006, **26**(2): 81-85)

[7] HU Yaogai, ZHAO Zhengyu, ZHANG Yuannong. Ionospheric disturbances produced by chemical releases at different release altitudes [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2010, **59**(11): 8293-8303 (胡耀垓, 赵正予, 张援农. 几种典型化学物质的电离层释放效应研究 [J]. *物理学报*, 2010, **59**(11): 8293-8303)

[8] HU Y G, ZHAO Z Y, XIANG W, *et al.* Morphological control of artificial ionospheric hole and its short-wave propagation effects [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2011, **60**(9): 099402 (胡耀垓, 赵正予, 项薇, 等. 人工电离层洞形态调制及其对短波传播的影响 [J]. *物理学报*, 2011, **60**(9): 099402)

[9] HU Yaogai, ZHAO Zhengyu, ZHANG Yuannong. Ionospheric disturbances produced by chemical releases and the resultant effects on short-wave ionospheric propagation [J]. *J. Geophys. Res.*, 2011, **116**: A07307

[10] HU Y G, ZHAO Z Y, ZHANG Y N. Ionospheric disturbances produced by chemical releases at different release altitudes [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2013, **62**(20): 209401 (胡耀垓, 赵正予, 张援农. 不同释放高度的化学物质的电离层扰动特性 [J]. *物理学报*, 2013, **62**(20): 209401)

[11] WANG S C, FANG H X. Numerical simulation of artificially initiating spread-F in lower and mid-latitudes by chemical release [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2013, **56**(9): 2906-2911 (汪四成, 方涵先. 化学物质释放激发中低纬扩展 F 的数值模拟 [J]. *地球物理学报*, 2013, **56**(9): 2906-2911)

[12] SULTAN P J. Chemical Release Experiments to Induce F Region Ionospheric Plasma Irregularities at the Magnetic Equator [D]. Boston: Boston University, 1994

[13] BERNHARDT P A. Three-dimensional, time-dependent modeling of neutral gas diffusion in a nonuniform, chemically reactive atmosphere [J]. *J. Geophys. Res.*, 1979, **84**: 793-780

[14] MENDILLO M, SEMETER J, NOTO J. Finite Element Simulation (FES): a computer modeling technique for studies of chemical modification of the ionosphere [J]. *Adv. Space Res.*, 1993, **13**: 55-64

[15] KOLOMITSEV O P, RUZHIN Y Y, EGOROV L B, *et al.* Ionosphere plasma holes-modeling and diagnostic [J]. *Phys. Chem. Earth*, 1999, **24**(4): 393-399

[16] BERNHARDT P A. A critical comparison of ionospheric depletion chemicals [J]. *J. Geophys. Res.*, 1987, **92**: 4617-4628