

不同释放高度的化学物质的电离层扰动特性*

胡耀垓[†] 赵正予 张援农

(武汉大学电子信息学院, 武汉 430079)

(2013年5月3日收到; 2013年7月26日收到修改稿)

在电离层释放 H_2O , CO_2 , H_2 和 SF_6 等中性气体能导致释放区域电子损耗, 形成明显的人工电离层洞, 是电离层人工变态的重要而有效的手段之一. 本文在改进电离层化学物质释放三维动力学模型的基础上, 对不同释放量级的 H_2O 和 SF_6 在不同释放高度下产生的电离层洞形态结构及其时空演化规律进行了系统对比研究, 探讨了释放高度对化学物质释放电离层扰动效果、电离层洞形态及其动力学特性等的影响, 并对其成因进行了分析.

关键词: 化学物质释放, 电离层扰动, 人工电离层洞, 三维动力学模型

PACS: 94.20.Vv, 94.20.dv

DOI: 10.7498/aps.62.209401

1 引言

已有理论研究和实验观测表明^[1-5], 化学物质释放是电离层人工变态的有效手段之一. 其中, H_2 , H_2O , CO_2 和 SF_6 等中性气体物质的作用机理是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, 本质是引入中性气体, 加速电子与 O^+ 的复合, 导致释放区域电离层电子密度出现不同程度降低, 形成所谓电离层洞^[6-9]. 基于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电离层化学物质释放三维动力学模型, 我们曾对以上几种典型化学释放物质的电离层扰动特性及其电波传播效应进行了初步分析^[10-12], 研究表明, 释放高度是影响化学物质电离层扰动的重要因素之一. 但截止目前为止, 专门针对释放高度对化学物质电离层扰动性能、电离层洞形态演化等影响规律的系统研究尚未见报道. 本文在改进化学物质释放动力学模型的基础上, 通过对不同释放量级的 H_2O 和 SF_6 在不同释放高度下产生的电离层洞形态结构及其时空演化规律进行对比, 首次发现电离层扰动饱和现象, 揭示了释放高度对化学物质释放电离层扰动效果、电离层

洞形态及其动力学特性等的影响规律, 并从决定电离层洞形态、演化特性的中性释放物质扩散运动和离子化学反应入手, 对其成因进行了深入分析与讨论.

2 电离层化学物质释放三维动力学模型

假设电离层背景和热层背景为平面指数分层分布, 且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^[7]:

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

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 为释放物质总量, $H_a = kT/m_a g$

* 国家高技术研究发展计划 (批准号: 2011AA7122019)、中央高校基本科研业务费 (批准号: 3103001) 和湖北省自然科学基金青年杰出人才项目 (批准号: 2011CDA099) 资助的课题.

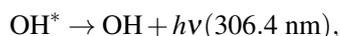
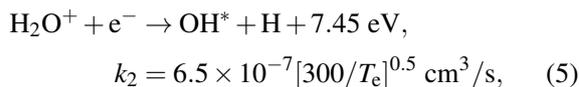
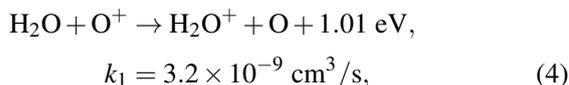
[†] 通讯作者. E-mail: farawayhu@sohu.com

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 为玻尔兹曼常数, 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 为化学反应引起的损失项. 扩散系数 D_0 是温度和释放气体与背景大气组成成分的函数, H_2O 和 SF_6 的扩散系数 D_0 分别为^[9]

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

$$SF_6: D_0 = \frac{8.56 \times 10^{16} T^{0.5}}{n_O + n_{N_2} + n_{O_2}}. \quad (3)$$

H_2O 在电离层中的离子化学反应如下^[9]:



其中, k_1 和 k_2 为离子化学反应速率.

由反应 (4) 和 (5) 式有:

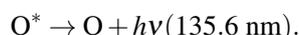
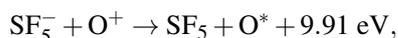
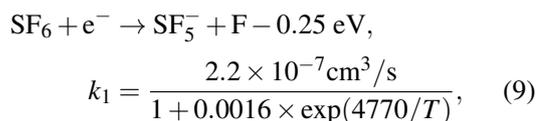
$$d[O^+]/dt = -k_1[H_2O][O^+], \quad (6)$$

$$d[e]/dt = -k_2[H_2O^+][e]. \quad (7)$$

因 $[O^+] + [H_2O^+] + [Q^+] = [e]$, 其中 $[Q^+]$ 为背景电离层其他所有正离子 (由 IRI 给出), 代入 (7) 式得:

$$d[e]/dt = -k_2([e] - [O^+] - [Q^+])[e]. \quad (8)$$

与 H_2O 的离子化学反应不同, SF_6 在电离层中的离子化学反应类型受温度的影响显著, 完整的描述达 16 个之多^[8], 其中主要的等离子体损耗反应如下^[9]:



由反应 (9) 式可得:

$$d[e]/dt = -k_1[SF_6][e]. \quad (10)$$

由于 SF_6 的 k_1 大约是 H_2O 的 k_1 的 100 倍, 因此 SF_6 比 H_2O 具有更强的电离层扰动效能.

数值计算中, (1) 式中化学反应损失项 αt , 对于释放物质为 H_2O , 一般取常数 $\alpha = k_1[O^+]$, 其中 $[O^+]$ 是未扰前电离层化学物质释放区域平均氧离子密度, k_1 为 H_2O 和 O^+ 的反应系数; 对于 SF_6 , $\alpha = k_1[e]$, $[e]$ 为未扰前电离层化学物质释放区域平均氢离子密度, k_1 为 SF_6 和电子的反应系数^[5]. 这样的近似处理仅适用于电离层扰动较弱的场合. 本文改进原有模型, 在数值计算的每一时间步中, $[e]$ 或 $[O^+]$ 均以当前时刻电子 (或氧离子) 密度实时更新, 可应用于包括本文释放区域电离层电子 (或氧离子) 密度发生显著变化的各种情形. 此外, 模型还考虑了等离子体扩散, 详细讨论见文献 [10, 12].

3 数值模拟试验

本文首先对不同释放量级 (224, 2240 mol) 的 H_2O 在不同释放高度 (140, 210, 300 km) 下产生的受扰电离层形态时空结构进行了数值模拟, 通过系统对比, 揭示了不同释放高度下电离层扰动规律, 并从决定电离层洞形态、演化特性的中性释放物质扩散运动和电离层离子化学反应入手, 对其成因进行了分析和讨论. 最后为了验证本文所归纳出的扰动规律及物理机制解释的有效性, 对 SF_6 在不同释放高度 (210, 300 km) 下产生的受扰电离层形态时空结构也进行了模拟. 这里采用“物质分子式 - 摩尔数 - 释放高度”标记不同试验, 如: “ H_2O -100 mol-300 km”表示在 300 km 高度释放 100 mol 的水. 数值试验方案如表 1 所示:

表 1 数值试验方案

释放物质	释放高度/km	释放量/mol
H_2O	140	224
		2240
	210	224
		2240
		224
		2240
SF_6	210	57
		1410
	300	57
		141

背景电离层、热层和磁场参数分别由国际参考电离层 IRI-2007^[13]、MSIS-E-90^[14] 和 DGRF/IGRF 1900—2015^[15] 得到, 释放点所在地理

位置均为新疆喀什地区 (76°E, 30°N), 模拟时间为 2013 年 4 月 1 日日落时刻 (18: 02). 忽略中性风场影响, 其它重要参量如化学反应速率、扩散系数等见文献 [6, 9].

为便于对电离层洞形态和演化的定量化描述, 本文把电子密度变化 (减小) 最大处所在位置定义为洞底, 电子密度减少量为 $0.5 \times 10^3/\text{cm}^3$ 所在位置定义为电离层洞边沿, 并据此确定电离层洞垂直方向半径. 采用释放中心电子密度随时间的变化曲线描述电离层洞的生成、恢复等演化过程, 定性掌握

电离层洞维持时间的长短.

3.1 H₂O-140 km

1) H₂O-140 km-224 mol

图 1 所示为 224 mol 的 H₂O 在 140 km 高度释放, 历经 300 s 后电离层释放区域释放物质和电子密度分布, 图 2 为 30, 60, 90, 300 s 等不同时刻释放中心电子密度及其变化剖面, 图 3 为释放中心电子密度随时间的变化曲线.

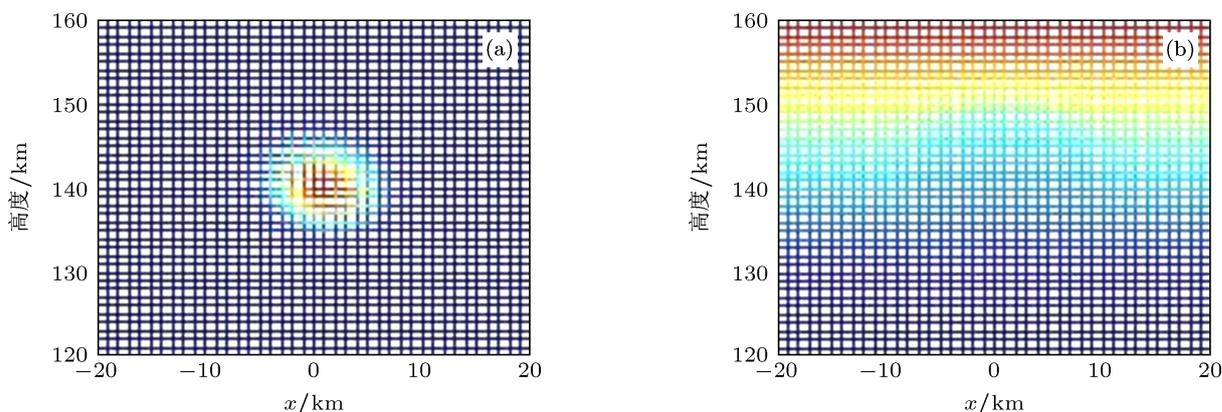


图 1 300 s 时刻电离层释放区域释放物质和电子密度分布 (H₂O-140 km-224 mol) (a) 释放物质密度分布 ($t = 300$ s); (b) 电子密度分布 ($t = 300$ s)

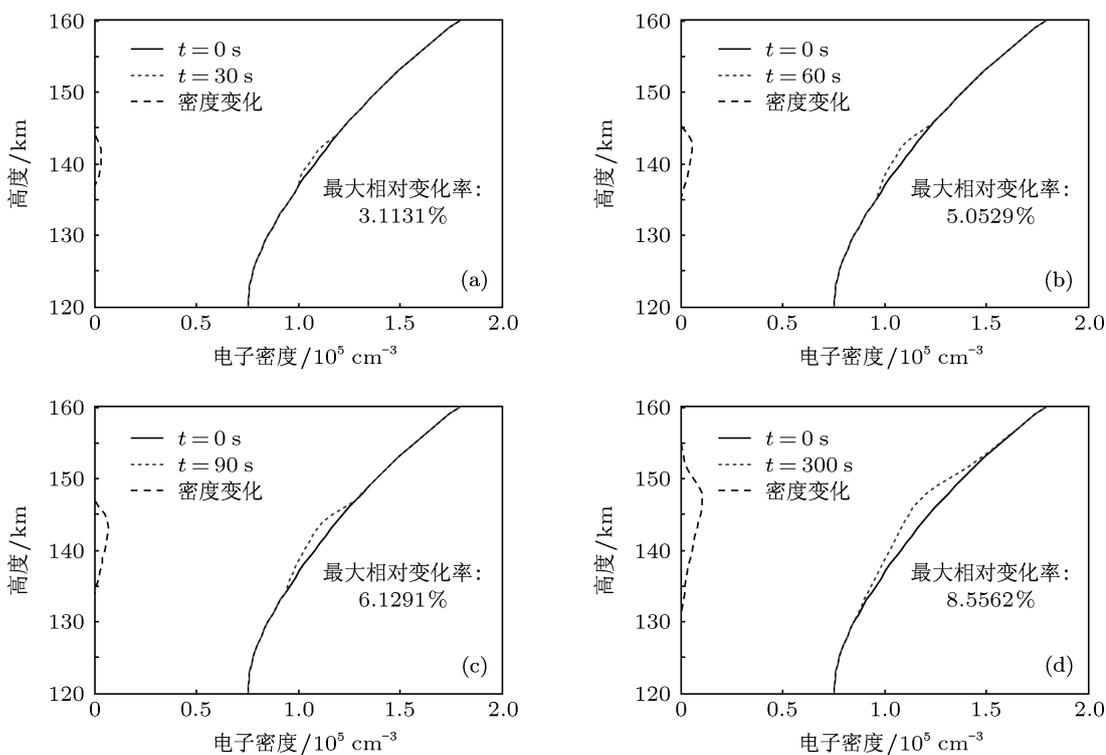


图 2 不同时刻释放中心电子密度及其变化剖面 (H₂O-140 km-224 mol) (a) 30 s; (b) 60 s; (c) 90 s; (d) 300 s

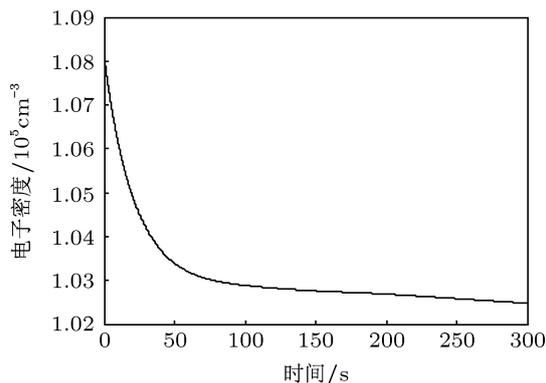


图3 释放中心电子密度变化 (H₂O-140 km-224 mol)

图1和图2表明,在140 km高度释放224 mol的H₂O,释放后30,60,90和300 s时刻,电离层洞垂直方向半径仅分别为4,5,6和12 km,电子密度最大相对变化率仅分别为3.11%,5.05%,6.13%和8.56%.另外图2的电子密度变化剖面显示,最大电子密度损耗(洞底)高度明显高于释放高度140 km,且直至300 s时刻,电离层洞仍在逐渐增大、加深中.

图3显示,在释放最初50 s内,释放中心电子密度下降剧烈,此后,电子密度变化逐渐趋缓,但直至300 s时刻,释放中心电子密度仍在缓慢下降.

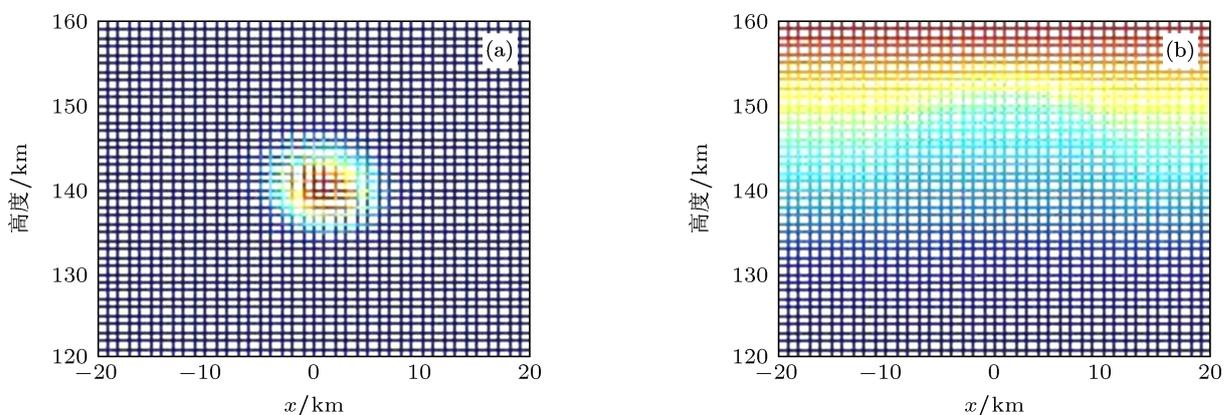


图4 300 s时刻电离层释放区域释放物质和电子密度分布 (H₂O-140 km-224 mol) (a) 释放物质密度分布 (t = 300 s); (b) 电子密度分布 (t = 300 s)

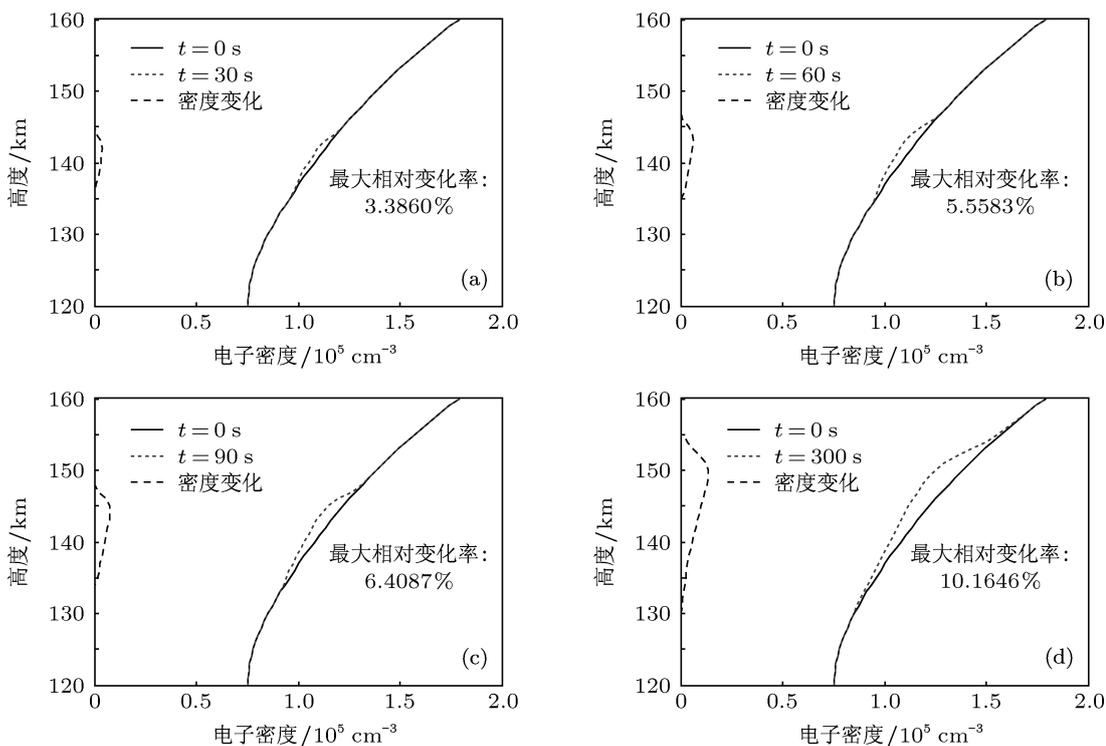


图5 不同时刻释放中心电子密度及其变化剖面 (H₂O-140 km-224 mol) (a) 30 s; (b) 60 s; (c) 90 s; (d) 300 s

2) H₂O-140 km-2240 mol

图 4 为 2240 mol 的 H₂O 在 140 km 高度释放, 历经 300 s 后电离层释放区域释放物质和电子密度分布, 图 5 为 30, 60, 90, 300 s 等不同时刻释放中心电子密度及其变化剖面, 图 6 为释放中心电子密度随时间的变化曲线.

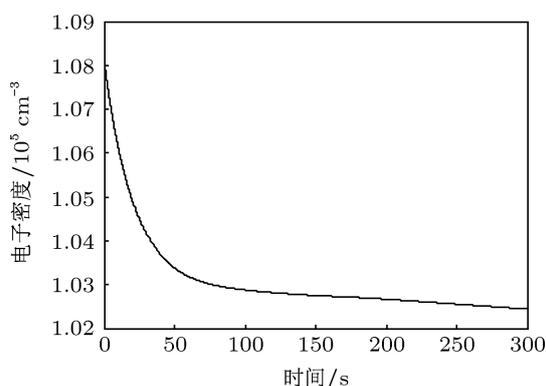
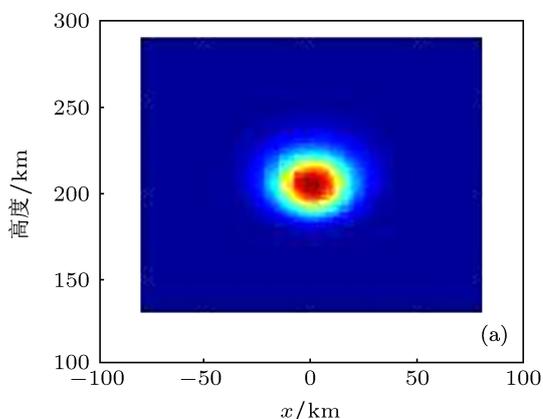


图 6 释放中心处电子密度变化 (H₂O-140 km-2240 mol)

图 5 显示, 在 140 km 高度释放 2240 mol 的 H₂O, 释放后 30, 60, 90 和 300 s 时刻, 电离层洞垂直方向半径分别为 4, 6, 7.5 和 13 km, 电子密度最大相对变化率仅分别为 3.39%, 5.56%, 6.41% 和 10.17%. 与释放量为 224 mol 的结果 (图 2) 对比显示, 在 140 km 高度释放 2240 mol 和 224 mol 的 H₂O 产生的电离层洞形态 (大小和深度) 在 300 s 内几乎没有区别. 本文把一定时间内电离层扰动明显且其形态对释放量不敏感的现象称之为“电离层扰动饱和状态”, 通过比较相同时刻电离层洞形态之间是否存在显著差异, 可以定性判断是否处于饱和状态, 确定较小释放量是否大于扰动饱和状态的释放量门



限值. 很显然, 通过减小释放量, 不难得到与该释放高度下的饱和状态有显著差异的扰动效果, 因而本文没有特意设计处于非饱和状态的数值试验. 需要指出的是, 饱和量化判据实质上有赖于电离层洞形态差异度的定量化, 可以释放区域电子密度差平方和等作为量化指标. 这里通过电离层洞电子密度剖面形态之间的比对进行饱和判断, 尽管是非定量的, 但也是合理的. 随着释放量的增加 (224 mol→2240 mol), 所形成电离层洞大小和深度仅略有提高, 表明 224 mol 的 H₂O 即使得该区域电离层处于“扰动饱和状态”. 0—300 s 时段内, 释放量在 224—2240 mol 量级所形成的释放中心电子密度随时间的变化趋势相近.

3.2 H₂O-210 km

1) H₂O-210 km-224 mol

图 7 所示为 224 mol 的 H₂O 在 210 km 高度释放, 历经 300 s 后电离层释放区域释放物质和电子密度分布, 图 8 为 30, 60, 90, 300 s 等不同时刻释放中心电子密度及其变化剖面, 图 9 为释放中心电子密度随时间的变化曲线.

图 7 和图 8 表明, 在 210 km 高度释放 224 mol 的 H₂O, 历经 300 s 后, 释放区域主要粒子密度分布仍近乎球状分布. 释放后 30, 60, 90 和 300 s 时刻, 电离层洞垂直方向半径为 18, 25, 35 和 55 km, 电子密度最大相对变化率分别为 55.79%, 64.26%, 66.10% 和 65.58%. 图 9 显示, 释放中心电子密度在历经最初 30 s 左右骤降后进入缓慢下降区, 约 100 s 时刻电子密度达到最低值, 此后开始缓慢恢复.

2) H₂O-210 km-2240 mol

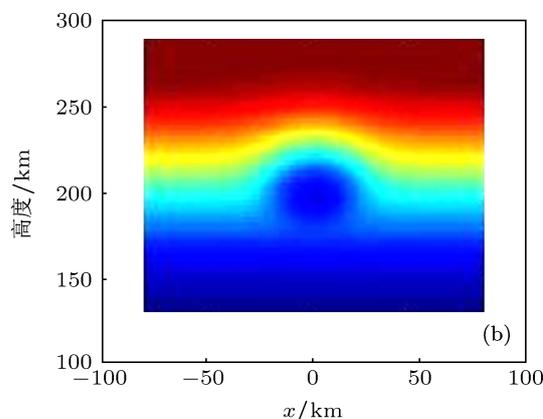


图 7 300 s 时刻电离层释放区域释放物质和电子密度分布 (H₂O-210 km-224 mol) (a) 释放物质密度分布 (t = 300 s); (b) 电子密度分布 (t = 300 s)

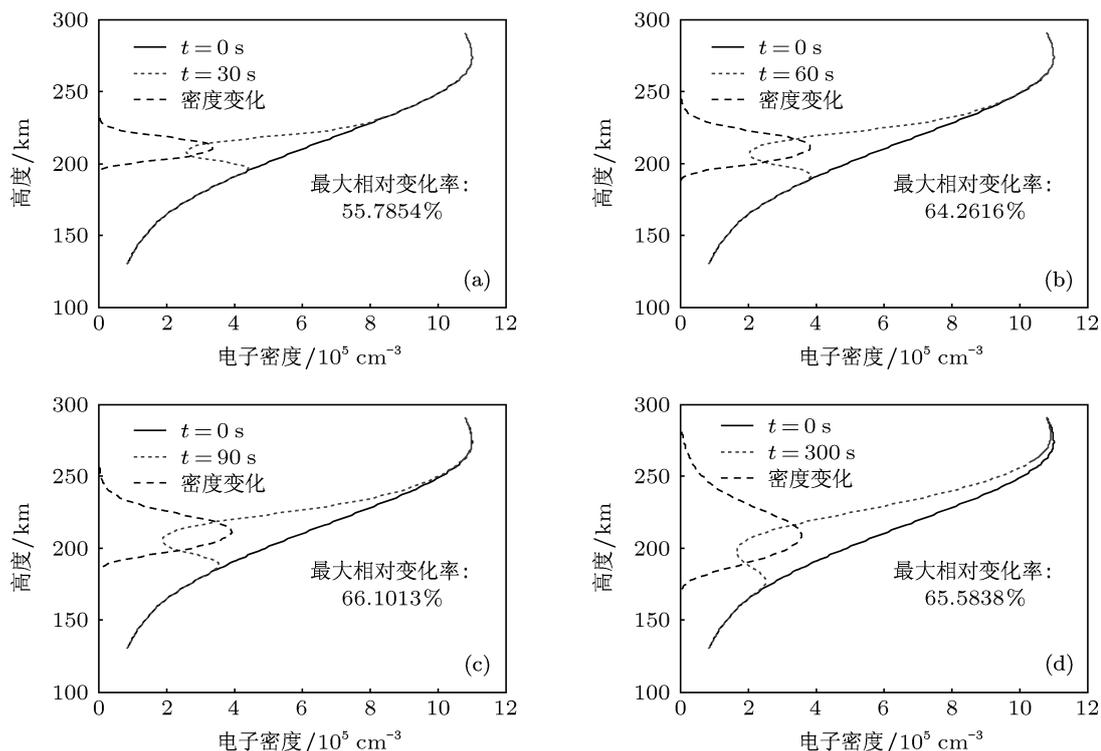


图 8 不同时刻释放中心电子密度及其变化剖面 (H_2O -210 km-224 mol) (a) 30 s; (b) 60 s; (c) 90 s; (d) 300 s

图 10 所示为 2240 mol 的 H_2O 在 210 km 高度释放, 历经 300 s 后电离层释放区域释放物质和电子密度分布, 图 11 为 30, 60, 90, 300 s 等不同时刻释放中心电子密度及其变化剖面, 图 12 为释放中心电子密度随时间的变化曲线。

类似于 3.1 中释放高度为 140 km 得出的结论, 图 10 和图 11(H_2O -210 km-2240 mol) 与图 7 和图 8(H_2O -210 km-224 mol) 对比表明: 210 km 高度处释放 224 mol 和 2240 mol 的 H_2O 产生的电离层洞形态在 300 s 内也没有显著区别, 显示在此高度下,

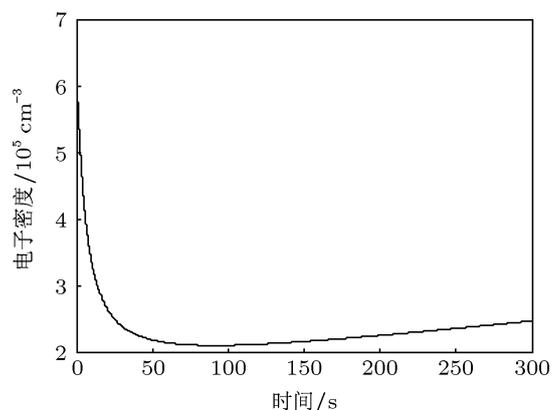


图 9 释放中心电子密度变化 (H_2O -210 km-224 mol)

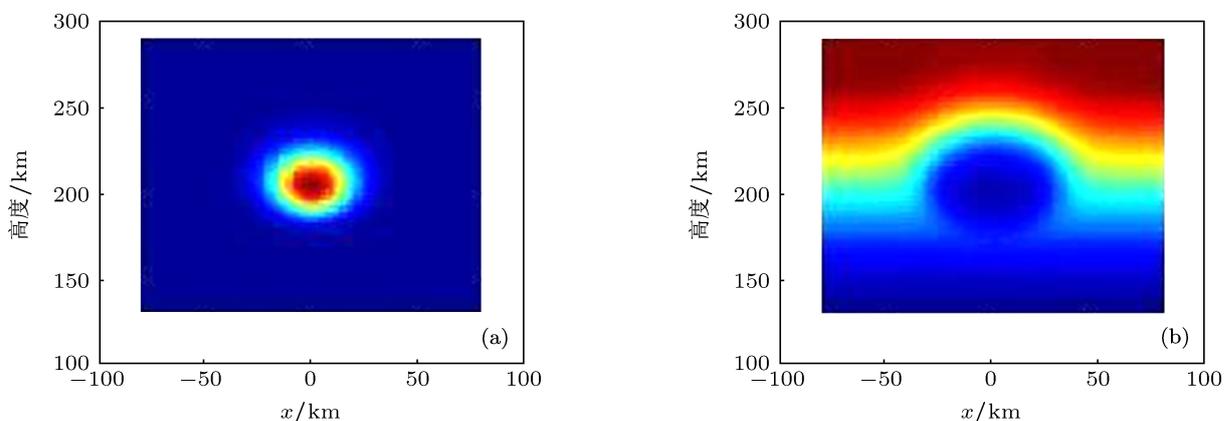


图 10 300 s 时刻电离层释放区域释放物质和电子密度分布 (H_2O -210 km-2240 mol) (a) 释放物质密度分布 ($t = 300$ s); (b) 电子密度分布 ($t = 300$ s)

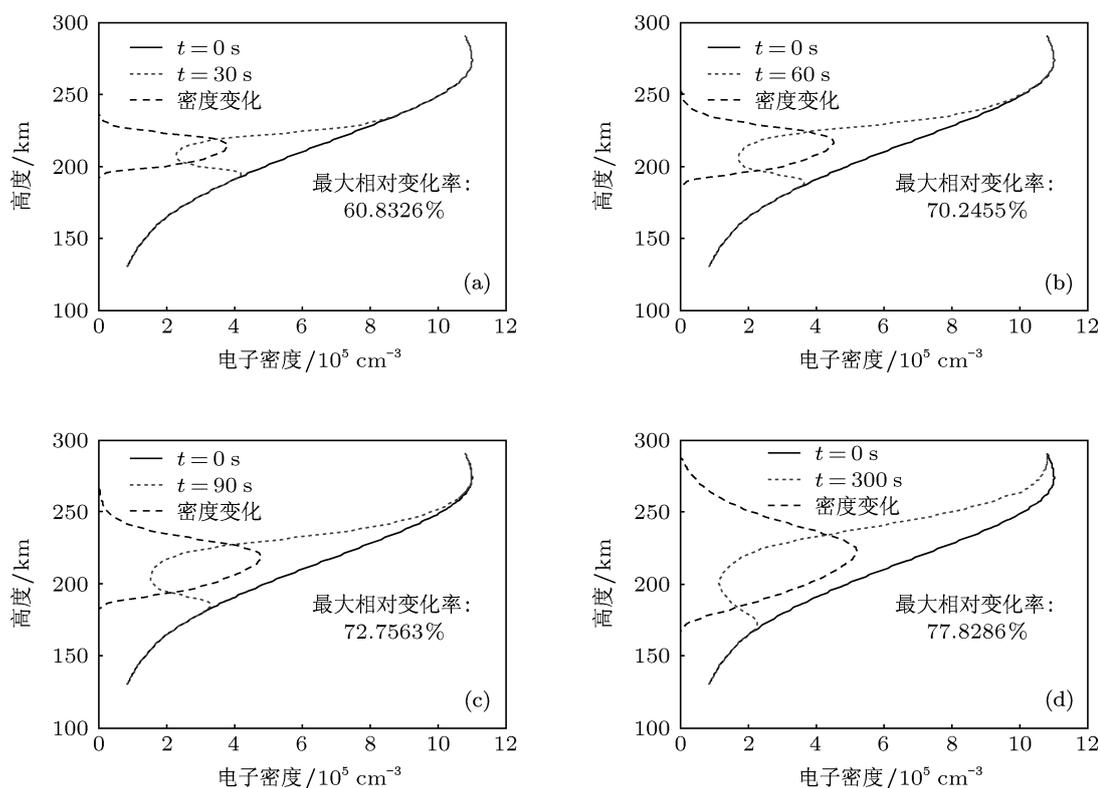


图 11 不同时刻释放中心电子密度及其变化剖面 (H_2O -210 km-2240 mol) (a) 30 s; (b) 60 s; (c) 90 s; (d) 300 s

224 mol 量级的 H_2O 也可使电离层处于扰动饱和状态. 图 12 与图 9 对比显示, 两种情况下释放中心电子密度随时间 (0—300 s) 的变化曲线区别很大, 不同于释放小剂量 224 mol (图 9) 在 100 s 时刻电子密度即达到最低值, 当释放量增大到 2240 mol (图 12), 释放中心电子密度在历经最初 50 s 左右骤降后进入缓慢下降区, 直至 300 s 电子密度仍缓慢下降, 表明同一释放高度下, 释放量的增加可提高电离层洞的维持时间. 另外, 从图 8 和图 11 可见, 最大电子密度损耗 (洞底) 基本处于释放高度 210 km 附近.

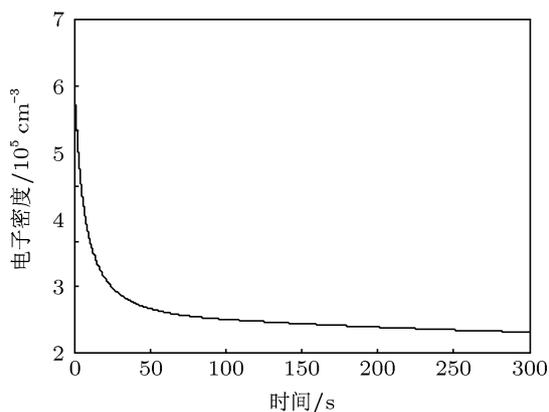


图 12 释放中心电子密度变化 (H_2O -210 km-2240 mol)

3.3 H_2O -300 km

1) H_2O -300 km-224 mol

图 13 为 224 mol 的 H_2O 在 300 km 高度释放, 历经 300 s 后电离层释放区域释放物质和电子密度分布, 图 14 为 30, 60, 90, 300 s 等不同时刻释放中心电子密度及其变化剖面, 图 15 为释放中心电子密度随时间的变化曲线.

图 14 显示, 224 mol 的 H_2O 在 300 km 高度释放 30 s 后, 电离层洞垂直方向半径即可达 45 km, 最大电子密度相当变化率为 10.44%. 图 15 显示, 释放中心电子密度在历经最初 20 s 左右骤降后达到电子密度最小值, 此后快速恢复, 约 120 s 后电子密度恢复速度逐渐减慢, 300 s 时刻电子密度几乎完全恢复至受扰前水平 (最大电子密度相对变化率仅为 1.30%).

2) H_2O -300 km-2240 mol

图 16 为 2240 mol 的 H_2O 在 300 km 高度释放, 历经 300 s 后电离层释放区域释放物质和电子密度分布, 图 17 为 30, 60, 90, 300 s 等不同时刻释放中心电子密度及其变化剖面, 图 18 为释放中心电子密度随时间的变化曲线.

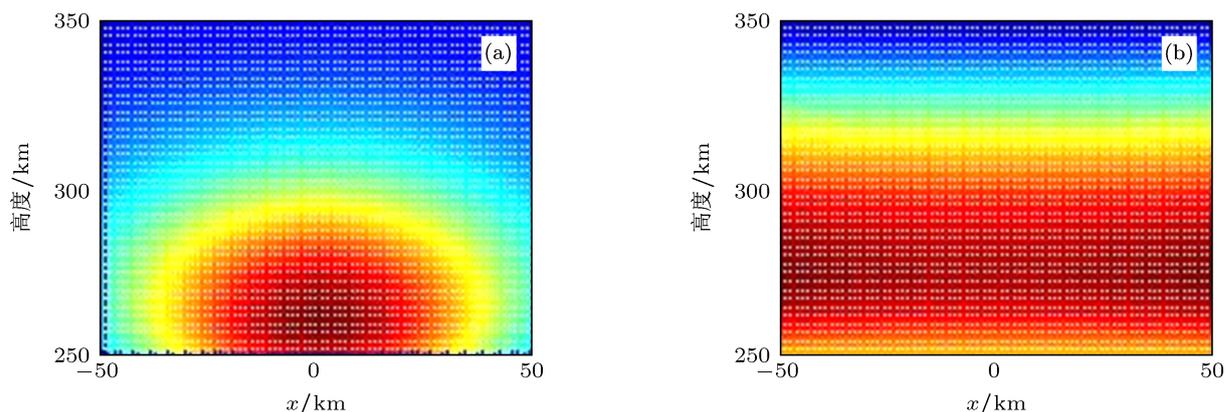


图 13 300 s 时刻电离层释放区域释放物质和电子密度分布 (H_2O -300 km-224 mol) (a) 释放物质密度分布 ($t = 300$ s); (b) 电子密度分布 ($t = 300$ s)

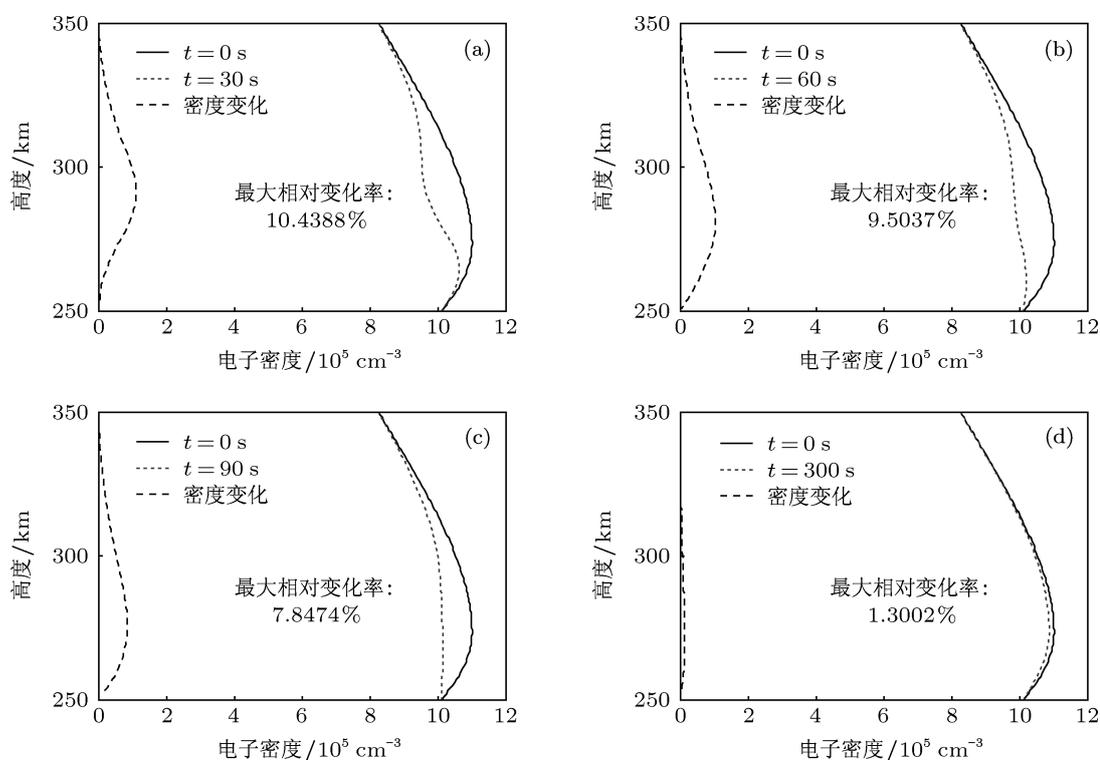


图 14 不同时刻释放中心电子密度及其变化剖面 (H_2O -300 km-224 mol) (a) 30 s; (b) 60 s; (c) 90 s; (d) 300 s

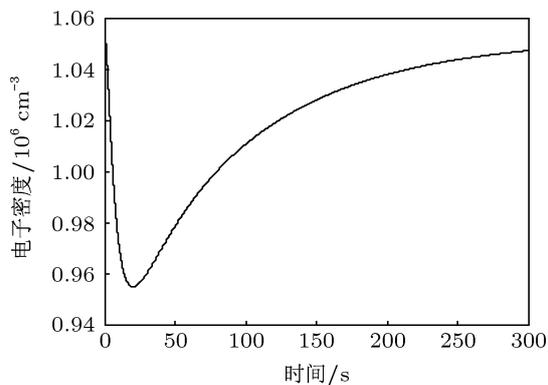


图 15 释放中心电子密度变化 (H_2O -300 km-224 mol)

由图 17 可见, 2240 mol 的 H_2O 在 300 km 高度释放 30 s 后, 电离层洞垂直方向半径即不小于 50 km, 最大电子密度相当变化率达 50.36%. 图 17 与图 14 (H_2O -300 km-224 mol) 对比显示, 在较低的 140 km 和 210 km 高度不同释放量级所形成的电离层洞没有显著区别, 当释放高度达 300 km 时, 释放量增大 (224 mol \rightarrow 2240 mol), 可形成更大、更深的电离层洞, 显示在 300 km 高度释放 224 mol 的 H_2O 没有导致电离层进入扰动饱和状态, 因而电离层洞形态对释放量具有较强的敏感性.

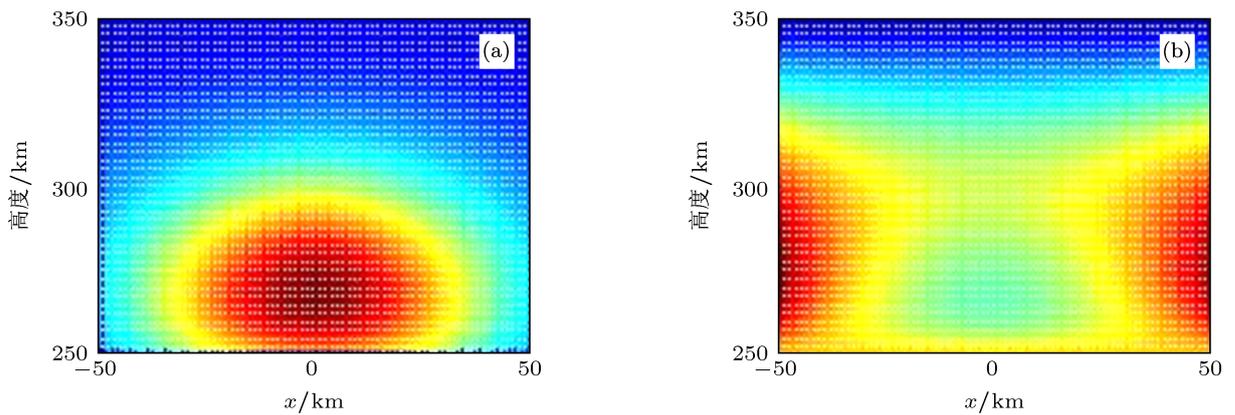


图 16 300 s 时刻电离层释放区域释放物质和电子密度分布 (H_2O -300 km-2240 mol) (a) 释放物质密度分布 ($t = 300$ s); (b) 电子密度分布 ($t = 300$ s)

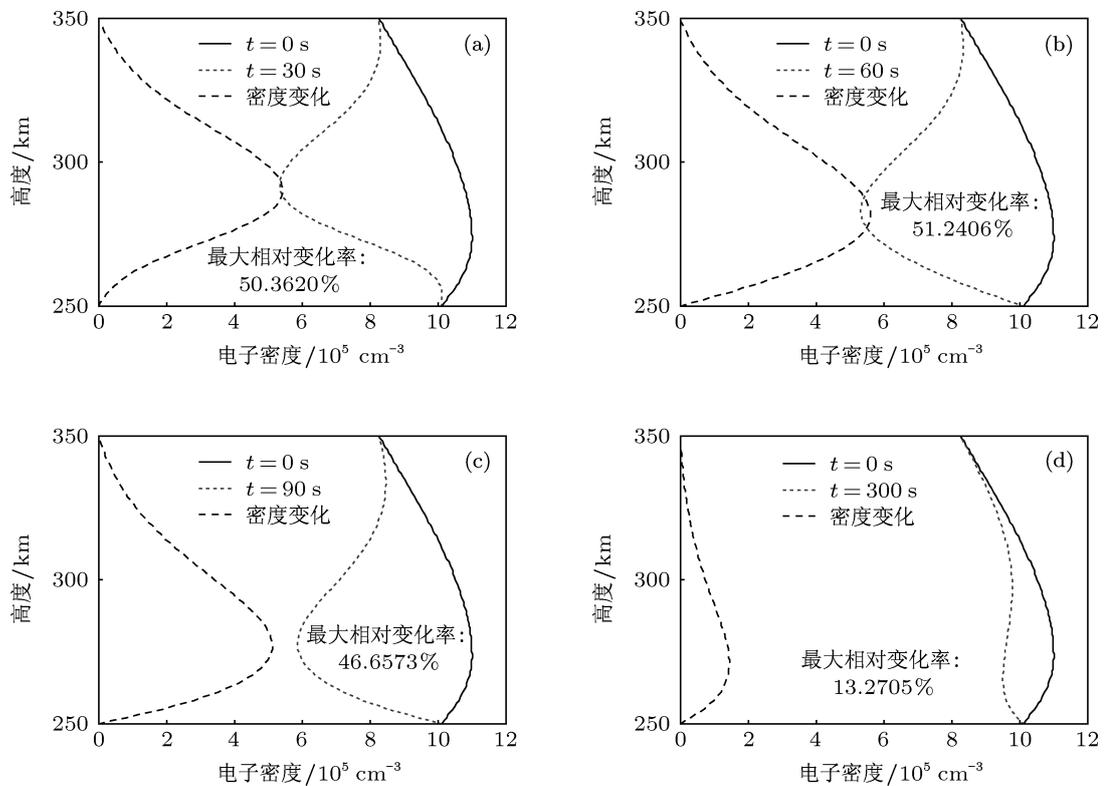


图 17 不同时刻释放中心电子密度及其变化剖面 (H_2O -300 km-2240 mol) (a) 30 s; (b) 60 s; (c) 90 s; (d) 300 s

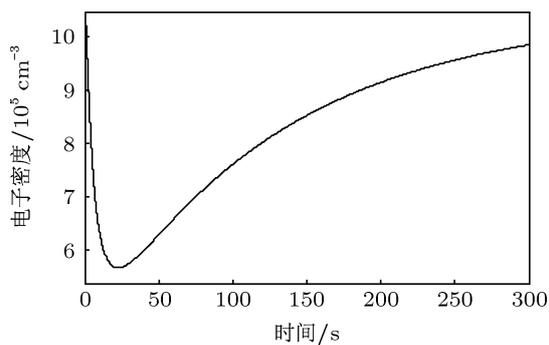


图 18 释放中心电子密度变化 (H_2O -300 km-2240 mol)

图 18 与图 15 (H_2O -300 km-224 mol) 基本变化趋势相似, 释放中心电子密度在历经最初 25 s 左右骤降后达到电子密度最小值, 此后快速恢复, 300 s 时刻电子密度得到很大程度恢复(最大电子密度相对变化率为 13.27%), 表明在 300 km 高度, 一定释放量级范围内 (224—2240 mol) 具有相似的电子密度变化规律, 增大释放量可延长其电离层洞维持时间.

3.4 结果分析

3.1, 3.2 和 3.3 节对比显示, 不同释放高度 140, 210 和 300 km 下, 相同释放量所形成的电离层洞形态具有显著区别, 以释放 224 mol 的 H_2O (H_2O -140 km-224 mol, H_2O -210 km-224 mol, H_2O -300 km-224 mol) 为例, 释放高度越高 (140 km \rightarrow 300 km), 形成的电离层洞区域越大, 维持时间越短. 考察一定时间内 (0—300 s) 的最大电子密度相对变化率 (洞底) 及其所在位置, 140 km 高度下 (图 2), 最大电子密度相对变化率约 8.56% ($t = 300$ s), 所在位置明显高于释放中心; 210 km 情况下 (图 8), 最大电子密度相对变化率约 66.10% ($t = 90$ s), 所在位置基本处于释放中心; 300 km 高度下 (图 14), 最大电子密度相对变化率约 10.44% ($t = 30$ s), 所在位置明显低于释放中心. 以上结果表明, 释放高度过低 (140 km), 所形成电离层区域很小, 且深度 (电子密度损耗) 也较浅, 但具有很长的电离层洞维持时间; 随着释放高度的增加 (140 km \rightarrow 210 km), 可以形成更大、更深的电离层洞, 但维持时间有所缩短; 随着释放高度的进一步提升 (210 km \rightarrow 300 km), 可以快速形成更大区域电离层洞, 但其深度也变浅, 且维持时间显著减少. 释放量为 2240 mol 情况下的对比结果也符合以上规律.

综上所述可见: 随释放高度的增加 (140 km \rightarrow 300 km), 电离层洞区域显著增大、维持时间缩短, 但释放高度过低 (140 km) 或过高 (300 km), 都导致电离层洞深度减小. 究其原因, 主要是电离层洞形态及其时空演化直接受中性释放物质扩散运动和电离层离子化学反应等过程支配, 其中: 电离层洞大小主要决定于中性释放物质的扩散区域大小, 电子密度损耗 (电离层洞深度) 则决定于有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 D_0 是温度和释放气体与背景大气组成成分的函数, 由 (2) 和 (3) 式可以分别计算出不同高度处 H_2O 和 SF_6 的 D_0 , 如图 19 所示. 可见在所讨论的释放高度范围内, 高度越低 D_0 越小, 释放物越能更长时间富集在较小区域, 随着高度增加 D_0 增大, 释放物扩散区域也增大, 因而可形成更大区域电离层洞, 但维持时间会缩短.

如本文第 2 节所述, 释放 H_2O 和 SF_6 的电子密度损耗分别决定于电离层离子化学反应式 (4) 和 (5) 的累积效应. 由 (4), (5) 式可见, 电子损耗速

率 (离子化学反应速率) 决定于氧离子/电子密度与释放物密度乘积 $[\text{O}^+][\text{H}_2\text{O}]$ 的大小, 该乘积值越大, 电子损耗速率越快, 因而历经相同时间后, 可以造成更大的电子密度相对变化. 100—300 km 高度范围内, 随着高度的增加, 氧离子/电子密度增大. 不同高度下氧离子/电子密度典型分布^[13] 如图 20 所示, 可见释放高度过低 (140 km), 氧离子/电子密度过小, 因而即使有较高的释放物浓度 (本文所

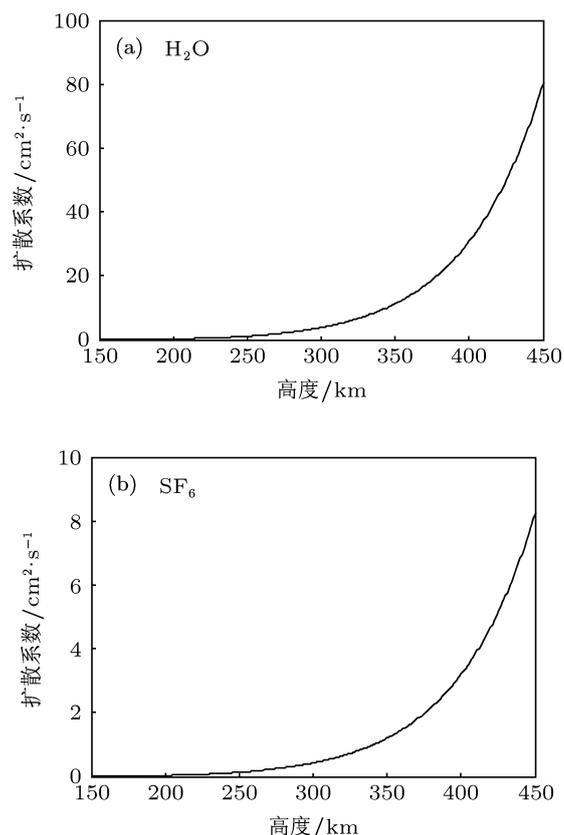


图 19 中性释放气体在不同高度处的扩散系数 (a) H_2O ; (b) SF_6 .

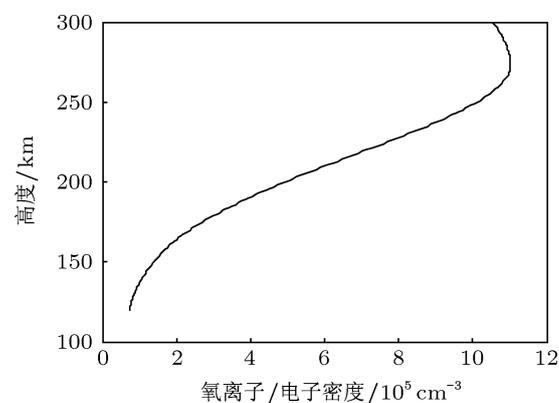


图 20 不同高度下氧离子/电子密度典型分布^[13]

讨论释放量级 224—2240 mol) 下也无法造成显著的电子密度损耗. 这也解释了释放高度越低, 越容易 (电离层扰动饱和和所需最小释放量越少) 出现电离层扰动饱和和状态现象的原因: 释放高度越低, 扩散系数也越小, 导致更小区域内富集更高浓度的释放物, 而过小氧离子/电子密度使得再高浓度的释放物质也无法产生大的电子密度损耗, 出现所谓电离层洞形态对释放量不敏感的现象——电离层扰动饱和状态; 而释放高度过高 (300 km), 尽管有更高的氧离子/电子密度, 但因过快的扩散, 导致释放物浓度也太低, 因而也不能造成显著的电子密度损耗; 只有在适中的高度范围 (~210 km), 氧离子/电子密度与释放物密度乘积值最大, 方可形成较深的电离层洞. 以上原因也导致: 在 140 km 释放高度下, 最大电子密度相对变化 (洞底) 所在高度明显高于释放中心, 210 km 高度下洞底所在高度基本处于释放中心, 而 300 km 高度下洞底所在高度明显低于释放中心.

为了验证所归纳出的扰动规律及解释机制的有效性, 以下给出 SF₆ 在不同释放高度 (210, 300 km) 下产生的受扰电离层形态时空结构模拟结果.

3.5 SF₆ 释放模拟

图 21—24 依次为 SF₆-210 km-57 mol, SF₆-210 km-1410 mol, SF₆-300 km-57 mol, SF₆-300 km-141 mol 在 30, 60, 90, 300 s 等不同时刻释放中心电子密度及其变化剖面.

图 21 和图 22 对比显示: 210 km 高度处释放 57 mol 和 1410 mol 的 SF₆ 产生的电离层洞形态 (大小和深度) 在 300 s 内没有显著区别, 表明在此高度处释放 57 mol 的 SF₆ 即导致电离层进入扰动饱和和状态. 电离层洞底在 210 km 高度上下. 图 23 和图 24 对比显示: 在 300 km 高度释放, SF₆ 释放量的增加 (57 mol→141 mol) 可显著扩大电离层受扰区域, 显然 57 mol 的 SF₆ 尚未导致电离层扰动饱和和状态. 300 s 时刻电离层洞底明显低于释放高度 300 km. 图 21 和图 23 对比显示: 相同释放量情况下, 释放高度的增加 (210 km→300 km), 可以快速形成更大区域的电离层洞, 但电离层洞深度变浅, 且维持时间显著减少.

以上对比结果与 3.1, 3.2 和 3.3 所得出的结果完全一致, 也完全能通过 3.4 所述机制进行合理解释, 在此不再赘述.

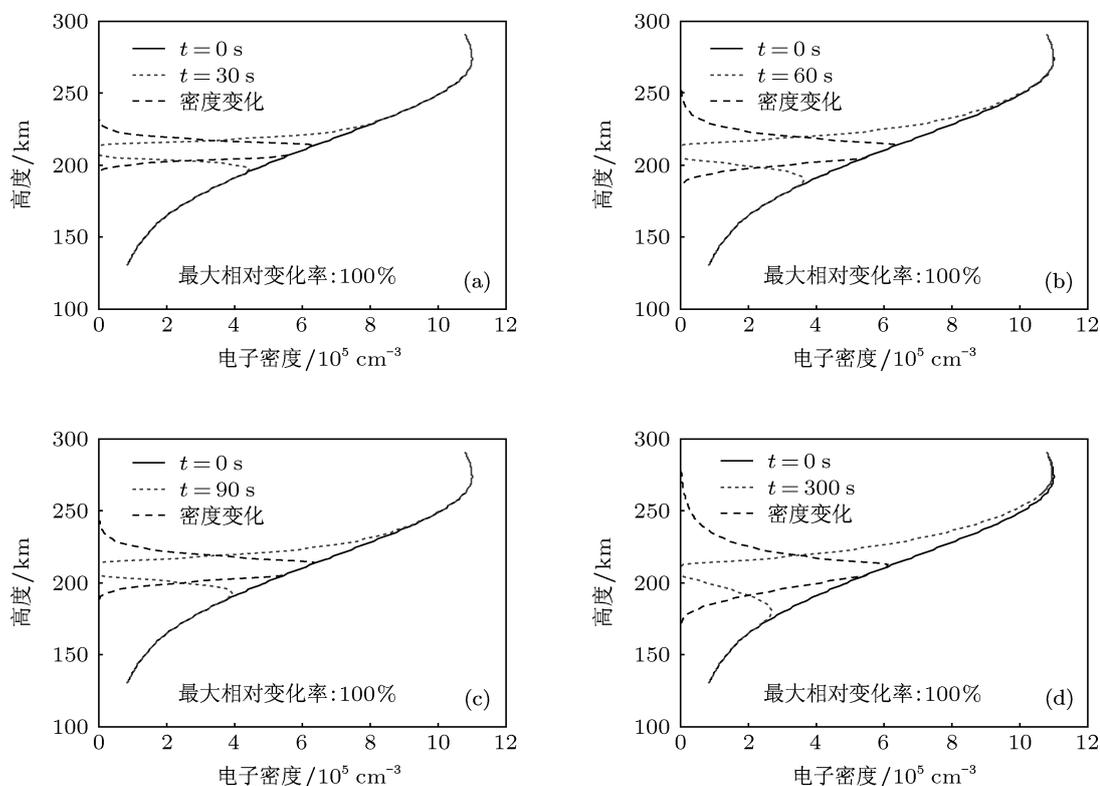


图 21 不同时刻释放中心电子密度及其变化剖面 (SF₆-210 km-57 mol) (a) 30 s; (b) 60 s; (c) 90 s; (d) 300 s

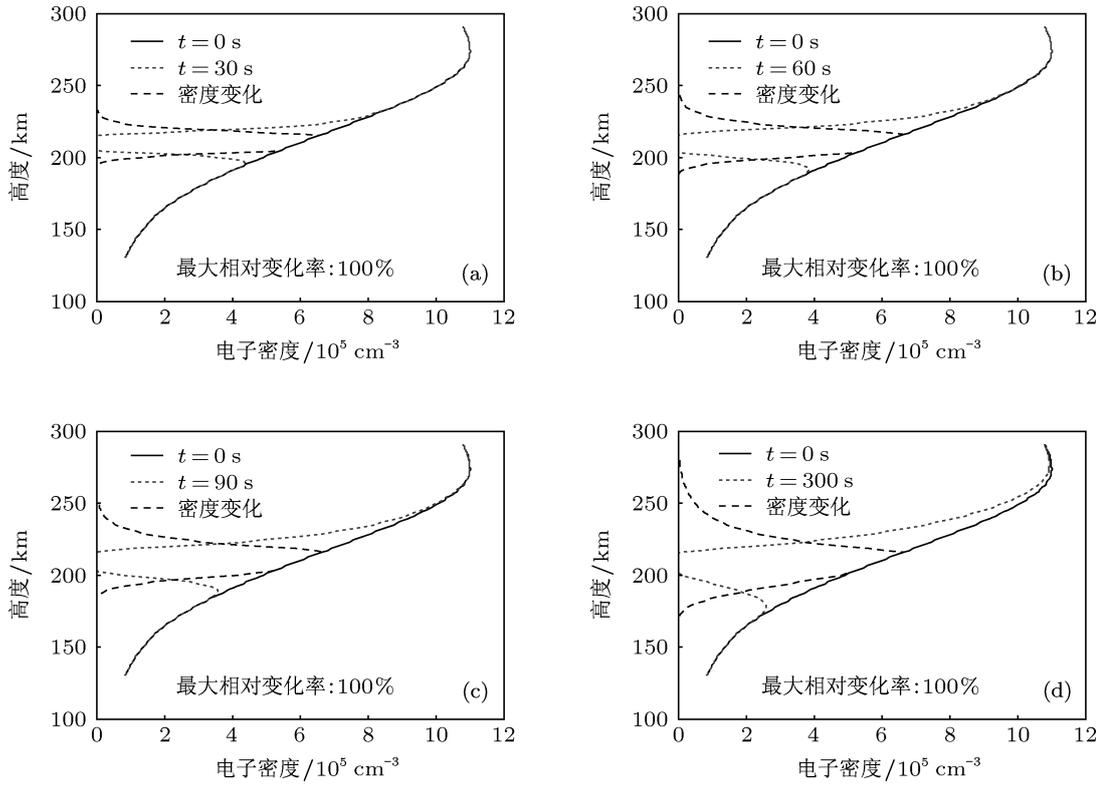


图 22 不同时刻释放中心电子密度及其变化剖面 (SF_6 -210 km-1410 mol) (a) 30 s; (b) 60 s; (c) 90 s; (d) 300 s

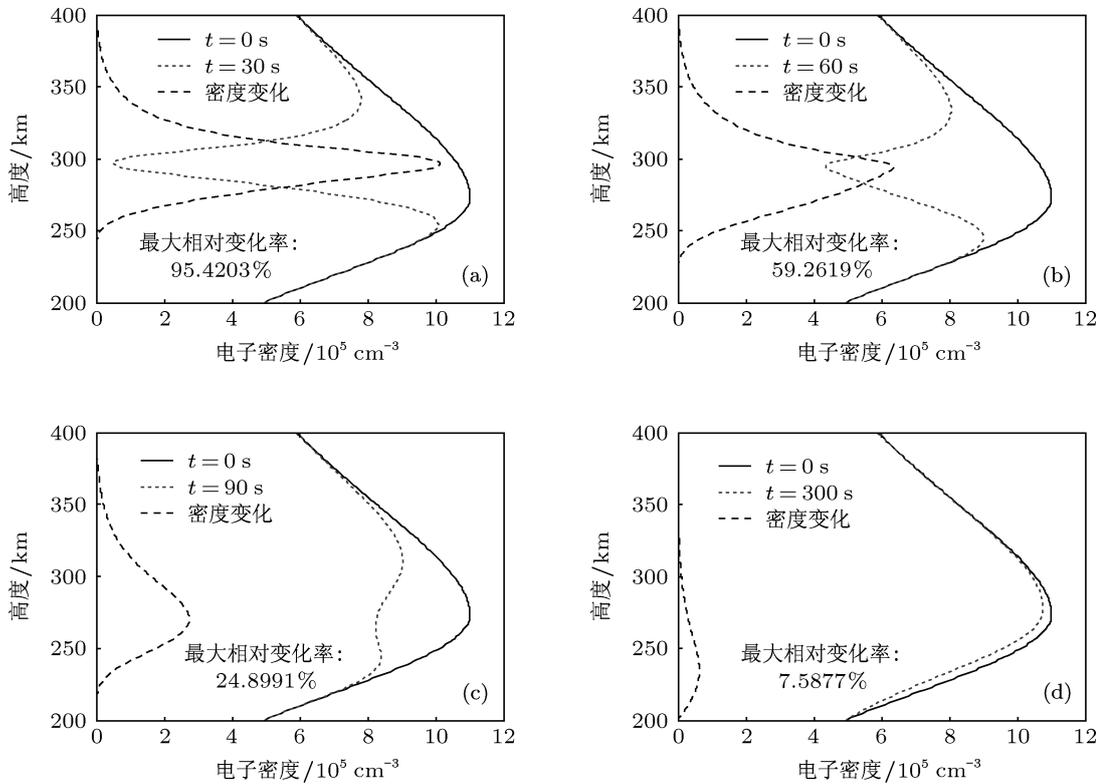
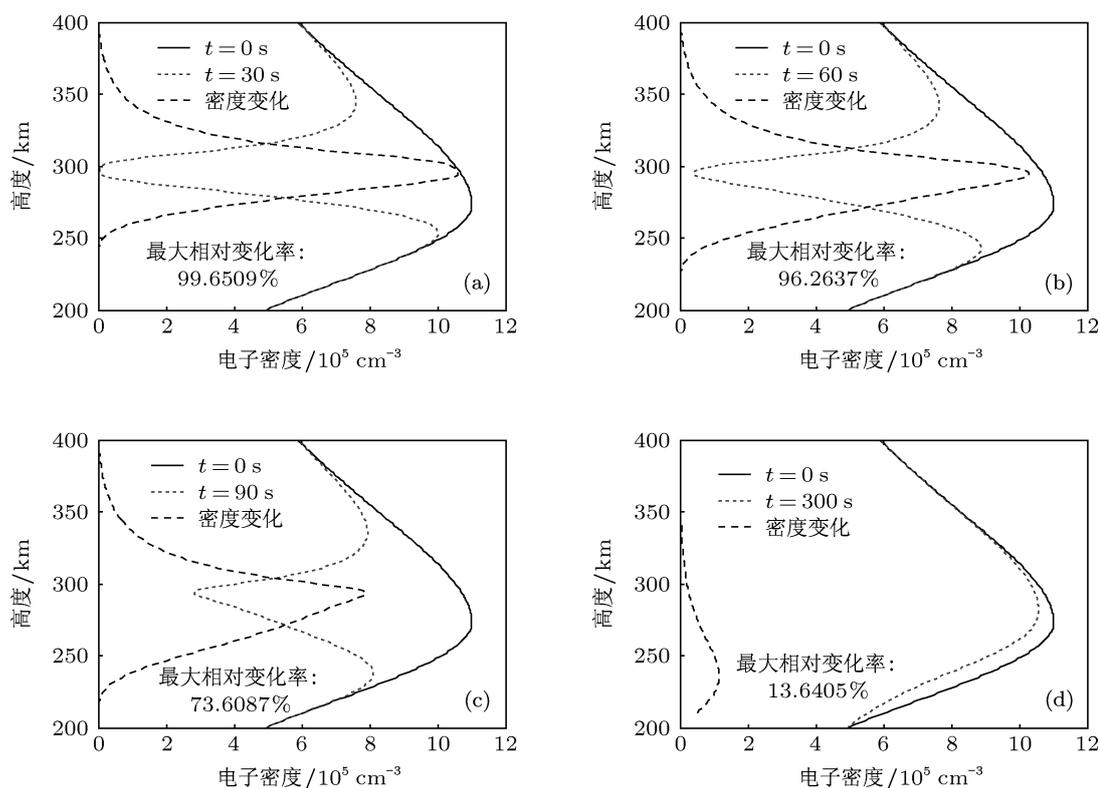


图 23 不同时刻释放中心电子密度及其变化剖面 (SF_6 -300 km-57 mol) (a) 30 s; (b) 60 s; (c) 90 s; (d) 300 s


 图 24 不同时刻释放中心电子密度及其变化剖面 (SF_6 -300 km-141 mol) (a) 30 s; (b) 60 s; (c) 90 s; (d) 300 s

4 结论

本文以改进的电离层化学物质释放三维动力学模型为基础, 对不同释放量级 (224, 2240 mol) 的 H_2O 在不同高度释放 (140, 210, 300 km) 的受扰电离层形态结构及其时空演化规律进行了系统对比研究, 揭示了释放高度和释放量对化学物质释放电离层扰动效果、电离层洞形态及其动力学特性等的影响, 并对其成因进行了深入分析与讨论. 类似的扰动规律也在 SF_6 释放模拟结果中得到体现, 进一步验证了本文归纳的扰动规律及解释机制的有效性. 基于已有模拟结果, 可以得出以下一些初步结论.

1) 释放高度越低, 电离层进入扰动饱和状态所需最小释放量越少. 由于处于扰动饱和状态, 导致在 140—210 km 高度范围内, 不同量级的释放物质 (224, 2240 mol 的 H_2O 或 57, 1410 mol 的 SF_6) 在 300 s 内所产生的电离层洞形态 (大小、深度) 没有显著区别.

2) 释放高度过低 (140 km), 所形成电离层区域很小, 且深度 (电子密度损耗) 也较浅, 但具有很长的电离层洞维持时间; 随着释放高度的增加

(140 km→210 km), 可以形成更大、更深的电离层洞, 但维持时间有所缩短; 随着释放高度的进一步提升 (210 km→300 km), 可以快速形成更大区域电离层洞, 但其深度也变浅, 且维持时间显著减少.

3) 在 140 km 释放高度下, 电离层最大电子密度相对变化 (电离层洞洞底) 所在高度明显高于释放中心, 210 km 高度下洞底所在高度基本处于释放中心, 而 300 km 高度下洞底所在高度明显低于释放中心.

4) 300 km 高度释放, 释放量的增加 (H_2O 224 mol→2240 mol 或 SF_6 57 mol→141 mol) 可显著扩大电离层受扰区域, 延长电离层洞维持时间. 表明随着释放高度上升, 电离层越不容易进入扰动饱和状态, 表现在受扰电离层区域对释放量的敏感性增强.

5) 本文所讨论释放高度范围 (140—300 km) 内, 为了获得较大电离层受扰区域, 在提高释放高度的基础上, 再增加释放量是行之有效的手段.

究其原因, 是由于电离层洞形态及其时空演化主要决定于中性释放物质的扩散运动和中性释放物参与下的电离层离子化学反应累积效应, 而这两类过程直接受释放气体浓度、释放气体扩

散系数以及氧离子/电子密度随高度变化等因素支配。

以上结论基于数值模拟对比试验得出,并得到

相应物理机制的合理解释,尽管其有效性仍有待实验验证,但对开展电离层化学物质释放实验及其方案制定、效应评估仍具有一定的指导意义。

- [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] Johnson C Y, Sjolander G W, Oran E S 1980 *J. Geophys. Res.* **85** 4205
 [5] Bernhardt P A, Park C G, Banks P M 1975 *Geophys. Res. Lett.* **2** 341
 [6] Bernhardt P A 1976 *Tech. Rep.* 17 (California: Stanford University) p1
 [7] Bernhardt P A 1979 *J. Geophys. Res.* **8** 793
 [8] Bernhardt P A, Weber E J, Moore J G, Baumgardner J, Mendillo M 1986 *J. Geophys. Res.* **91** 8937
 [9] Bernhardt P A 1987 *J. Geophys. Res.* **92** 4617
 [10] 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]
 [11] Hu Y G, Zhao Z Y, Xiang W, Zhang Y N 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 099402 (in Chinese) [胡耀垓, 赵正予, 项薇, 张援农 2011 物理学报 **60** 099402]
 [12] Hu Y G, Zhao Z Y, Xiang W, Zhang Y N 2011 *J. Geophys. Res.* **116** A07307
 [13] Bilitza D, Reinisch B W 2008 *Adv. Space Res.* **42** 599
 [14] Hedin A E 1991 *J. Geophys. Res.* **96** 1159
 [15] McGuire R 2010 DGRF/IGRF Geomagnetic Field Model 1900-2015 and Related Parameters (Goddard Space Flight Cent., Natl. Aeron. and Space Admin., Greenbelt, Md.) [Available at <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/igrf.vitmo.html>.]

Ionospheric disturbances produced by chemical releases at different release altitudes*

Hu Yao-Gai[†] Zhao Zheng-Yu Zhang Yuan-Nong

(College of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

(Received 3 May 2013; revised manuscript received 26 July 2013)

Abstract

As one of important and effective means for modifying the ionosphere, releases of neutral gases including H₂O, CO₂, H₂, SF₆, etc. can produce artificial ionospheric holes. In this paper, the ionospheric disturbances produced under various release conditions, including use of different release species (H₂O and SF₆), different release altitudes, and different amounts of released substance, are investigated based on an improved three-dimensional chemical release dynamics model which includes neutral gas diffusion, chemical reaction and the ambipolar diffusion of the plasma. The effects of release altitudes and release amount on ionospheric disturbances, morphology and the dynamics of ionospheric hole are studied. Furthermore, the results are also briefly discussed.

Keywords: chemical releases, artificial ionospheric hole, ionospheric disturbance, three-dimensional chemical release dynamics model

PACS: 94.20.Vv, 94.20.dv

DOI: 10.7498/aps.62.209401

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2011AA7122019), the Fundamental Research Fund for the Central Universities, China (Grant No. 3103001), and the Natural Science Foundation of Hubei Province, China (Grant No. 2011CDA099).

[†] Corresponding author. E-mail: farawayhu@sohu.com