

汪四成,方涵先,杨升高,等. 2013. H_2 释放扰动电离层的数值模拟[J]. 大气科学学报, 36(4): 499-503.

Wang Si-cheng, Fang Han-xian, Yang Sheng-gao, et al. 2013. Numerical simulation of ionospheric modification by H_2 release[J]. Trans Atmos Sci, 36(4): 499-503. (in Chinese)

H_2 释放扰动电离层的数值模拟

汪四成, 方涵先, 杨升高, 翁利斌

(解放军理工大学 气象海洋学院, 江苏 南京 211101)

摘要: 由于电离层中分子性离子与电子的复合要比氧离子与电子的复合快得多, 因此 H_2 在电离层高度释放可有效地引起电子的消耗。本文基于一个包括中性气体扩散方程和离子化学反应方程的二维动力学模型, 对 H_2 在电离层高度释放过程进行了数值模拟研究, 并分析了不同释放条件下的电子扰动特性。结果表明: 1) 500 mol H_2 释放后, 迅速向周围空间扩散, 释放中心处的电子密度 30 s 内下降了近 4%, F_2 层临界频率下降了 1% 左右; 2) 在不同高度处释放 H_2 时, 最大的电子密度相对变化率并不是在峰值高度附近处释放时出现的; 3) 释放化学物质的量越多, 电子密度的扰动幅度也越大, 但两者之间并不存在线性关系; 4) 相同量的 H_2 在电离层峰值高度处释放, 白天的电子密度扰动幅度要大于夜间的扰动幅度。

关键词: 化学物质释放; 电离层人工改变; 电离层 foF_2

中图分类号: P353 文献标志码: A 文章编号: 1674-7097(2013)04-0499-05

Numerical simulation of ionospheric modification by H_2 release

WANG Si-cheng, FANG Han-xian, YANG Sheng-gao, WENG Li-bin

(College of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science & Technology, Nanjing 211101, China)

Abstract: The recombination rate coefficients of molecular ion with electron are several orders greater than those of the dominant atomic oxygen ion in ionosphere F region, so the plasma densities in ionosphere can be greatly depleted by modest amounts of H_2 gas released at ionospheric altitudes. Based on a 2-D dynamics model including the neutral gas diffusion equation and the ion chemical reaction equation, this paper simulates the processes of H_2 released at ionospheric altitudes and analyzes the changes of ionospheric electron and foF_2 (critical frequency of F_2 layer) at different temporal and spatial release conditions. Results show that: 1) 500 mol H_2 gas released at the ionospheric altitude diffuses swiftly, where the electron density decreases nearly 4% after 30 s and the foF_2 (critical frequency of F_2 layer) decreases about 1%; 2) When the same amount of H_2 is released at different altitudes, the maximum relative change rate of electron density will not appear when H_2 is released nearby the peak altitude of F_2 layer (hmF_2); 3) The more amount of H_2 is released, the larger disturbance of electron density is caused, but there is not a linear relation between them; 4) The disturbance amplitude of electron density in daytime is larger than that in nighttime when the same amount of H_2 released at hmF_2 .

Key words: chemical release; artificial ionospheric modification; ionospheric foF_2

0 引言

1973 年美国 SKYLAB 升空期间,在电离层 300 km 左右的高度产生了一个直径达 1 000 km 的电子密度耗空区,该区的柱电子含量 (TEC) 减少了近 60%,临界频率下降到 2 MHz,且持续了约 4 h,严重影响了太平洋广大地区上空的无线电通信 (Mendillo et al., 1975)。这主要是因为电离层中的 O^+ 与火箭尾焰中的 H_2 和 H_2O 发生了快速的离子—原子交换反应,生成分子性离子,随后分子性离子迅速与电离层中的电子离解复合,造成了该区的等离子体快速消耗 (Mendillo and Forbes, 1978; Mendillo, 1988)。

近年来国外利用火箭、卫星等平台搭载化学物质开展了电离层环境的人工扰动实验研究 (Holmgren et al., 1988; Choueiri et al., 2001)。这主要是因为:1) 在电离层高度活动的火箭和卫星日益增多,为进行实验提供了有利条件;2) 电离层是研究弱电离气体特性、等离子体不稳定性、电子和离子化学及物理过程的天然实验室,这种等离子体实验室与它的天然电磁场没有人为边界 (熊年禄等, 1999),这是地面实验室不能比拟的,因此通过人工扰动实验可以促进电离层物理的科学研究 (Bernhardt et al., 1975)。实验结果表明,中性气体可导致电离层电子密度的变化,形成可观的电离层“空洞”,并对经过该区域的无线电波产生很大影响 (Helms and Thompson, 1973; Kolomiitsev et al., 1999);中性气体可激发电离层不稳定性,产生人工扩展 F (Spread-F),形成沿磁力线方向的大尺度不规则体 (Ossakow et al., 1978; Zalesak and Ossakow, 1982; Sultan, 1994) 等。

国内对化学物质释放扰动电离层的研究起步较晚,目前主要处在理论研究阶段,实验鲜有报道。黄文耿和古士芬 (2005, 2006) 通过考虑中性气体的扩散过程和离子化学过程探讨了中性气体释放产生电离层“空洞”和人工气辉的机理。黄勇等 (2011) 研究了 CO_2 和 SF_6 两种气体在夜间电离层高度释放后电子密度的时空演变过程。胡耀垓等 (2010) 增加了等离子体扩散过程,并建立了化学物质释放的动力学模型,由于电离层惰性的存在,在较短时间 (小于等于 10 min) 内,等离子体扩散的影响不大 (Mendillo and Forbes, 1978)。由于本文研究的时间尺度短,因此采用黄文耿和古士芬 (2005, 2006) 建立的二维动力学模型,分析了 H_2 在不同条件下释

放对电离层电子密度的扰动特性,并计算了临界频率的变化,以期对实验提供一定的参考。

1 化学物质释放动力学模型

采用直角坐标系, x 轴指向东, y 轴指向北, z 轴竖直向上。释放气体在包含 K 种气体成分的背景大气中的扩散速度 (Vincenti and Kruger, 1965) 为

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

其中: $\mathbf{w}_n$ 是背景大气的运动速度; $\mathbf{a}_z$ 是 z 方向的单位矢量; n 是释放气体的数密度; $H = \frac{kT}{mg}$ 为释放气体的标高,其中 k 是玻尔兹曼常数, T 为释放气体的温度,并认为与背景中性大气温度相等, m 是释放气体的分子量; D 为扩散系数。在水平分层之假设下, $\mathbf{w}_n$ 、 D 及 T 只随高度 z 变化,扩散系数近似满足

$$D = D_0 \exp \left(\frac{z - z_0}{H_a} \right). \quad (2)$$

其中: H_a 是背景大气标高; D_0 是释放点 z_0 处的扩散系数。假设背景大气由 O 、 O_2 和 N_2 等组成,则 D_0 (Mendillo et al., 1993) 表示为

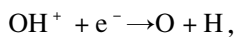
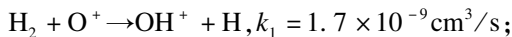
$$D_0 = \left(\frac{N(O)}{2.97 \times 10^{18} T^{0.5}} + \frac{N(N_2)}{2.8 \times 10^{17} T^{0.74}} + \frac{N(O_2)}{3.06 \times 10^{17} T^{0.732}} \right)^{-1}. \quad (3)$$

式中: $N(\)$ 表示括号内粒子的数密度。 D_0 的单位为 cm^2/s 。

释放气体的连续性方程 (Bernhardt, 1979) 为

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \nabla \cdot (n\mathbf{w}) = P - L + S. \quad (4)$$

其中: P 和 L 分别为化学物质的产生项和损失项; S 是源函数项。 H_2 在电离层消耗 O^+ 和电子是通过以下两步来实现的 (Mendillo et al., 1993):



$$k_2 = 7.5 \times 10^{-8} (300/T_e)^{0.5} cm^3/s.$$

其中: k_1 和 k_2 为反应系数; T_e 是电子温度,则化学物质的损失项 $L = k_1 n(O^+) n(H_2)$ 。忽略背景热层风场的影响,方程 (4) 简写为

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D \left[\frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 n}{\partial y^2} \right] + \frac{d}{dz} \left[D \left(\frac{\partial n}{\partial z} + \frac{n}{H} \right) \right] - k_1 n(O^+) n. \quad (5)$$

由方程 (5) 可近似得到 H_2 的密度分布表达式,具体推导过程参见文献 (Bernhardt et al., 1975)。

$$n = \frac{N_0}{(4\pi D_0 t)^{\frac{3}{2}}} \exp \left\{ - (z - z_0) \left(\frac{3}{4H_a} + \frac{1}{2H} \right) - \frac{H_a^2 \{ 1 - \exp [- (z - z_0) / (2H_a)] \}^2}{D_0 t} - \alpha t - \frac{r^2 \exp [- (z - z_0) / (2H_a)]}{4D_0 t} - \left(\frac{1}{H_a} - \frac{1}{H} \right)^2 \frac{D_0 t \exp [(z - z_0) / (2H_a)]}{4} \right\} \quad (6)$$

其中: N_0 是释放气体的总分子数; αt 为由于化学反应引起的损失项; r 为离释放点的径向距离,即扩散半径。

2 数值模拟方法

背景电离层参数和中性热层大气参数分别由经验模式 IRI-2007 和 NRLMSISE-00 得到。计算流程为:首先利用扩散方程得到 H₂ 的空间分布,再由离子化学反应方程得到释放区域正离子的密度分布,利用准中性条件 $\sum N_{i+} = N_e$,确定出电子密度分布。时间向前推进一步,重复以上循环,就可得到下一时刻的电子密度分布。时间步长取为 1 s,空间竖直步长为 2.5 km,水平步长为 1 km,临界频率的计算采用 $foF_2 = \sqrt{80.6N_e}$ (其中 N_e 为峰值高度处的电子数密度)。

3 数值模拟结果

释放地点选在南京 (118.5°E、32°N,磁倾角为 47.3°),时间为 2011 年冬季正午,此时的电子浓度峰值高度约为 280 km。释放 H₂ 的量为 500 mol (在大型实验中通常注入上千千克的化学物质),释放高度 280 km。H₂ 释放后迅速扩散,如图 1 所示,在

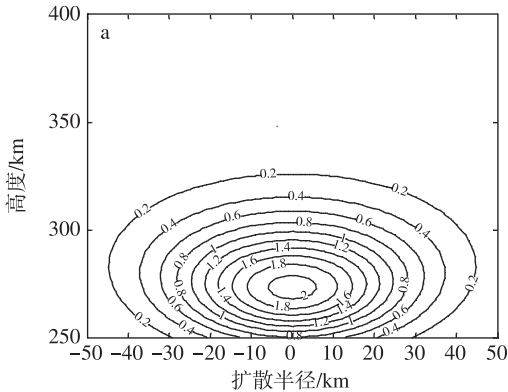


图 1 释放 30 s (a) 和 60 s (b) 后 H₂ 密度的空间分布 (单位:10⁶ cm⁻³)

Fig.1 Distributions of the H₂ density after 500 mol H₂ released for (a) 30 s and (b) 60 s (units: 10⁶ cm⁻³)

30 s 时水平扩散半径可达 50 km,且向上的扩散要比向下的扩散强。在重力作用下,H₂ 的峰值高度不断下降。

图 2 是释放 30 s 和 120 s 后 $r=0$ km 处的电子密度剖面,在释放高度附近,电子密度有不同程度地减少,有效地形成了电离层耗空,同时电子密度的消耗主要发生在化学物质释放后的 30 s 内,30 s 后的变化比较缓慢。

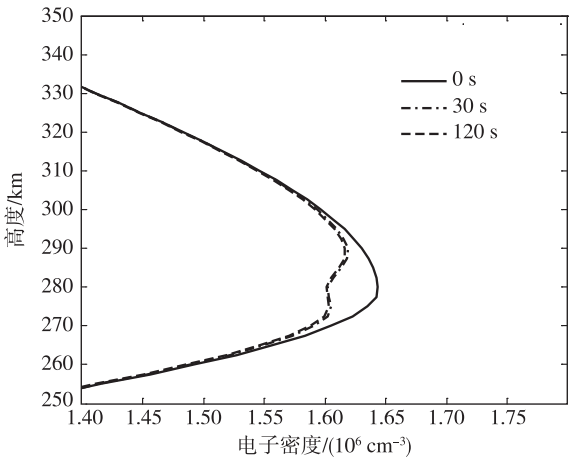


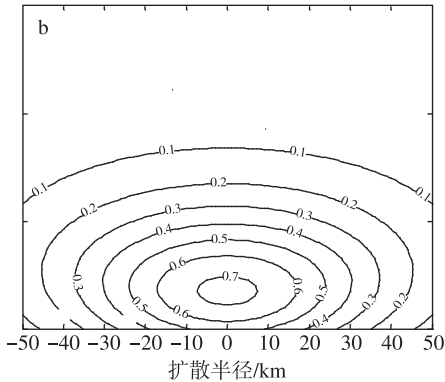
图 2 H₂ 释放后不同时刻的电子密度剖面

Fig.2 The profile of electron density at different times after H₂ released

3.1 电子密度及临界频率随释放高度的变化

释放 H₂ 的量为 500 mol,释放高度分别为 260 ~ 290 km,以 5 km 为间隔,60 s 后 $r=0$ km 处的电子密度剖面如图 3 所示,其中释放高度 255 km 处的廓线为未扰动时的电子密度剖面。由图可知,在不同高度处释放后电子密度均有不同程度地减小,表 1 计算了电子密度和临界频率的变化。

表 1 表明,60 s 时 260 km 高度附近的电子密度



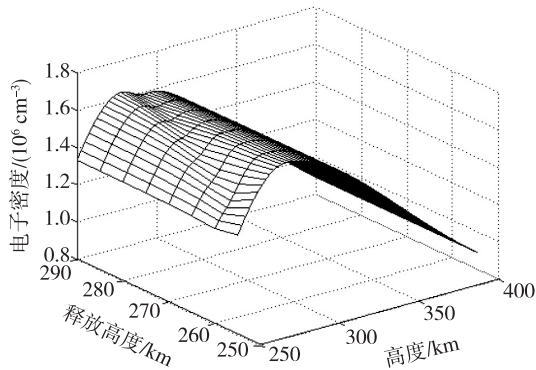


图 3 在不同高度释放 60 s 后的电子密度剖面
Fig.3 The profile of electron density after H_2 released at different heights for 60 s

已经开始回升,而其他高度上电子密度仍在减少,一般释放中心处的电子密度相对变化率最大,而最大的相对变化率并不是在峰值高度 280 km 处,但电离层临界频率的最大相对变化率是在峰值高度处释放时出现的。

表 1 释放 30 s 和 60 s 后不同释放高度处的电子密度和临界频率的相对变化率

Table 1 The relative change rates of electron density and foF₂ after H_2 released at different heights for 30 s and 60 s

%				
释放高度/km	电子密度变化率(30 s)	电子密度变化率(60 s)	临界频率变化率(30 s)	临界频率变化率(60 s)
260	4.272 6	4.258 5	0.172 7	0.257 6
270	4.069 5	4.087 1	0.456 3	0.540 1
280	3.503 3	3.545 6	0.980 7	1.043 4
290	2.808 4	2.861 0	0.504 6	0.575 5

3.2 不同量的物质释放对比

分别取 100 mol、400 mol、700 mol 和 1 000 mol

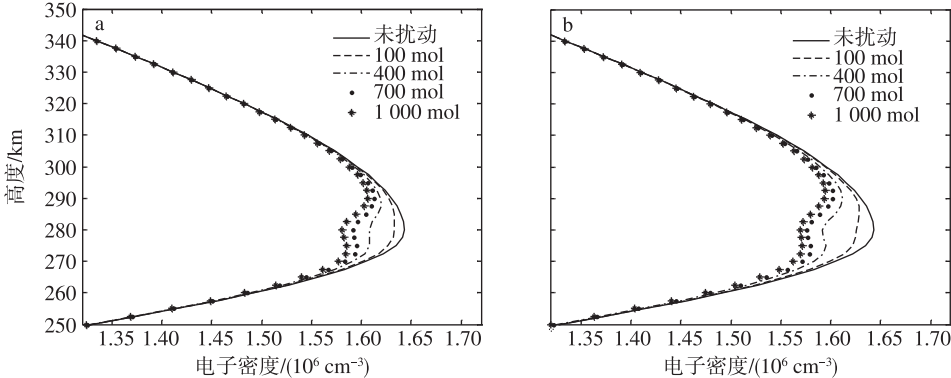


图 4 不同质量的 H_2 在峰值高度处释放 60 s(a)和 120 s(b)后的电子密度剖面
Fig.4 The profiles of electron density after H_2 with different mass released at hmF_2 for (a) 60 s and (b)120 s

的 H_2 在峰值高度处释放,60 s 和 120 s 后的电子密度剖面如图 4 所示,释放物质的量越多,电子密度的扰动幅度也越大,但两者间并不存在线性关系,同时释放的量越多,扰动的范围也越广。

3.3 白天和夜晚的释放效果对比

在不同时间点进行释放实验,时间间隔为 1 h,分别在峰值高度处释放 500 mol H_2 。由图 5 可知,白天电子密度的扰动幅度要比夜间的大,夜间的扰动幅度一般在 1% 以下,这可能是因为:1)夜间电离层电子密度要比白天小很多,在相同条件下参与离子化学反应造成的电子损耗也少;2)白天和夜晚的背景中性大气参数相差不大,可以近似认为在一天内背景中性大气参数是不变的,夜间电离层峰值高度比白天高,扩散系数是随高度增加的,因此在白天峰值高度处释放时, H_2 扩散的较慢,更能与电子充分接触而发生离子化学反应,造成电子的大量消耗。

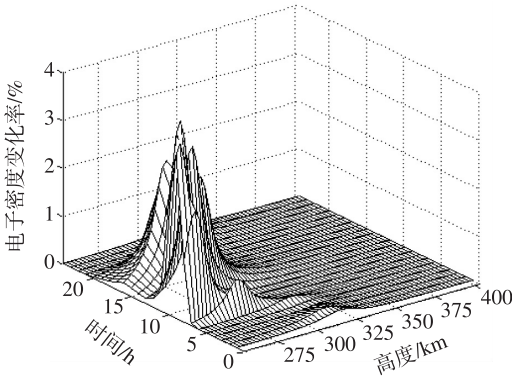


图 5 H_2 在白天和夜间释放 60 s 后的电子密度变化
Fig.5 Variation of electron density after H_2 released for 60 s in daytime and nighttime

4 结论及讨论

本文基于二维动力学模型研究了在电离层高度释放 H₂ 后的电子密度变化过程。通过数值计算,得出如下结论:

1)H₂ 释放后能在较大空间范围内扩散,大量消耗该区域的电子,形成一定尺度的电离层“空洞”;释放化学物质的量越多,电子密度的扰动幅度越大,但两者之间并不存在线性关系;相同量的 H₂ 在电离层峰值高度处释放后,白天电子密度的扰动幅度要大于夜间的扰动幅度。

2)H₂ 在不同高度处释放对电子数密度的影响是不同的,一般释放中心处的电子密度相对变化率最大,而最大的相对变化率并不是在峰值处释放时出现的,但电离层临界频率的最大相对变化率是在电子密度峰值高度处释放时出现的。

在扰动实验中,电离层洞的维持时间一般可达到十几分钟到半个小时,有的甚至可以达到小时的量级,本文的模型忽略了等离子体沿磁力线的扩散作用,在较短时间内等离子体的扩散作用不明显,若要研究化学物质释放后电子的恢复过程,则不能忽略等离子体的扩散作用。同时,忽略背景大气风场的作用,会使计算的化学物质空间分布与真实的分布存在差别,这些都是下一步的工作。

参考文献:

胡耀垓,赵正予,张援农. 2010. 几种典型化学物质的电离层释放效应研究[J]. 物理学报,59(11):8293-8303.
黄文耿,古士芬. 2005. 化学物质释放人工改变电离层[J]. 空间科学学报,25(4):254-258.
黄文耿,古士芬. 2006. 中性气体释放人工产生气辉[J]. 空间科学学报,26(2):81-85.
黄勇,时家明,袁忠才. 2011. 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,54(1):1-5.
熊年禄,唐存琛,李行健. 1999. 电离层物理概论[M]. 武汉:武汉大

学出版社.
Bernhardt P A. 1979. Three-dimensional, time-dependent modeling of neutral gas diffusion in a nonuniform, chemically reactive atmosphere[J]. J Geophys Res,84:793-802.
Bernhardt P A, Park C G, Banks P M. 1975. Depletion of the F₂ region ionosphere[J]. Geophys Res Lett,2(8):341-344.
Choueiri E Y, Oraevsky V N, Dokukin V S. 2001. Observations and modeling of neutral gas releases from the APEX satellite[J]. J Geophys Res,106(A10):25673-25681.
Helms W J, Thompson A D. 1973. Ray-tracing simulation of ionization trough effects upon radio waves[J]. Radio Sci,8(12):1125-1132.
Holmgren G, Marklund G, Eliasson L. 1988. Ionospheric response to chemical releases in the high latitude E and F regions[J]. Adv Space Res,8(1):79-83.
Kolomiitsev O P, Ruzhin Y Y, Egorov B, et al. 1999. Ionosphere plasma holes-modeling and diagnostic[J]. Phys Chem Earth, 24(4):393-399.
Mendillo M. 1988. Ionospheric holes: A review of theory and recent experiments[J]. Adv Space Res,8(1):51-62.
Mendillo M, Forbes J M. 1978. Artificially created holes in the ionosphere[J]. J Geophys Res,83:151-163.
Mendillo M, Hawkins G S, Klobuchar J A. 1975. A large-scale hole in the ionosphere caused by the launch of the Skylab[J]. Science, 187:343-346.
Mendillo M, Semeter J, Noto J. 1993. Finite element simulation (FES): A computer modeling technique for studies of chemical modification of the ionosphere[J]. Adv Space Res,13:55-64.
Ossakow S L, Zalesak S T, McDonald B E. 1978. Ionospheric modification: An initial report on artificially created equatorial spread-F[J]. Geophys Res Lett,5(8):691-694.
Sultan. 1994. Chemical release experiments to induce F region ionospheric plasma irregularities at the magnetic equator[D]. Boston: Boston University.
Vincenti W G, Kruger C H. 1965. Introduction to physical gas dynamics[M]. New York: John Wiley Press.
Zalesak S T, Ossakow S L. 1982. On the prospect for artificially inducing equatorial Spread-F[R]//Memorandum Report 4899. Washington: Naval Research Laboratory.

(责任编辑:刘菲)