

# 化学物质释放人工改变电离层<sup>\*</sup>

黄文耿 古士芬

(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100080)

**摘 要** 考虑中性气体在电离层高度的扩散过程和相应的电离层离子化学过程,研究了利用主动化学物质释放来改变电离层的方法,理论计算了  $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{SF}_6$  两种气体释放后电离层随时间的响应过程.结果表明,在电离层高度上气体的扩散过程非常迅速,电离层 F 区的电子密度有很大程度的减少,而扩散慢且化学反应快的气体对电离层的影响更大,就更加有利于电离层洞的形成.

**关键词** 化学释放; 电离层扰动; 扩散过程

中图分类号 P 352

## Ionospheric Disturbances Produced by Artificially Chemical Releases

HUANG Wengeng GU Shifen

(Center for Space Science and Applied Research, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

**Abstract** Active experiments in the ionosphere, which give rise to artificial disturbances of electron density, are usually conducted by the injection of chemical clouds at ionospheric altitudes. Their effect has often been called an ionospheric hole simply to dramatize the localized nature of the disturbances, which had been observed in many experiments. For example, the injection of rocket exhaust neutral molecules into ionosphere, predominantly  $\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{H}_2$ , can result in ionospheric electron density depletion. Main physical mechanism in these experiments is due to ion and molecule exchange reactions, which enhance the effective rate of recombination of electron. Ionospheric disturbances produced by artificially chemical releases have many applications in radio propagation and exploring ionosphere and plasma physics study. In terms of diffusion process of neutral gas and relevant chemical reactions in terrestrial ionosphere, the theoretical model of ionospheric modification created by active chemical releases is investigated in this paper. The influences of injected  $\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{SF}_6$  gas on the ionosphere under exponential atmosphere background are theoretically calculated, respectively. The results show that diffusion process of the injected neutral gas at ionospheric height is very quick, and the two released chemical materials can produce localized electron density depletions in F-regions, and those released materials, which have slow diffusion speed and large chemical reaction rates, will substantially affect ionosphere, and facilitate formation of artificial ionospheric hole.

**Key words** Chemical releases, Ionospheric modification, Diffusion process

---

\* 中国科学院空间科学与应用研究中心创新课题资助 (2401175)

2004-11-20 收到原稿, 2005-05-08 收到修定稿

## 1 引言

由于太阳爆发引起的近地空间环境的扰动往往是灾害性的空间天气事件, 人们给予了足够的重视, 如磁暴和电离层暴等. 这些大尺度的全球空间暴给人类的生产和生活带来很大的影响, 如电离层  $F_2$  层暴, 它使得电波群速度时延增加,  $F_2$  层虚高变化, 使得无线电短波最大可用频率发生大幅度变化等. 对于这类全球范围内的电离层暴我们只能通过观测数据来预报或警报, 作好防护和采取紧急应对措施, 尽量减小损失. 近年来, 随着人类太空活动的增加, 以及空间科学研究的向前发展, 一些非天然因素也会对近地空间环境产生影响, 特别是对电离层环境. 我们将这类扰动称之为空间环境的主动扰动, 包括有意识和无意识的扰动. 例如 1973 年土星 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  $H_2$  和  $H_2O$ ), 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%, 持续了几个小时, 使得大西洋广大地区上空的地-地通信中断, 电离层的最大反射频率降至 2 MHz 左右, 另外在发射 HEAO 等卫星时, 也观测到了相类似的结果<sup>[1]</sup>. 由此可见, 这种无意识的人工电离层扰动是十分巨大的.

在这些无意识人工电离层扰动观测结果的启发下, 国外利用火箭和卫星做为搭载平台作了大量的化学物质释放扰动电离层环境主动实验<sup>[2],[3]</sup>, 其中一个重要的研究内容是考察扰动后的电离层对电波传播的影响<sup>[4]</sup>, 从而与军事应用研究紧密联系起来, 因此受到了人们强烈的关注. 国内在此方向上还未系统地开展工作, 不论是实验还是理论研究都

空间在极短的时间内电子密度大大增加; 另外一类是中性气体分子, 如  $H_2$ 、 $CO_2$ 、 $SF_6$  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, 由于分子离子与电子的复合比  $O^+$  的直接复合快几个数量级, 因此所释放区域电离层中的电子密度会有很大程度的降低, 将产生所谓的电离层洞或者电子洞. 一般而言, 在大尺度的空间等离子体环境中, 一团局部高密高压的电子会在很短的时间内通过输运过程而衰减到与背景相同, 即通过第一种化学物质释放使局部电离层电子密度增加的状态很难维持较长的时间, 另外它们也很容易被氧化, 还没有来得及扩散到较远的空间就被大大消耗, 因此它们的影响区域不大. 但是对于第二类物质 (如  $H_2O$ ) 就不同, 太阳的直接电离和离解损失很少, 能影响到很大的区域, 产生的效果比较明显, 而且也能维持比较长的时间, 所以在大型空间实验中被广泛使用.

化学物质释放的开始阶段, 在巨大的压力差作用下, 释放物质像铲雪机一样将周围的等离子体推开, 这一过程以声速的速度进行, 经历的时间很短, 一般只有几秒. 然后压力差骤减, 当它们可以相比拟时, 释放物质和周围等离子体充分混合, 从而向空间扩散, 这过程可以经历较长的时间, 离子化学反应也主要发生在这一阶段. 将开始释放时的物质看作一个点源, 在背景电离层和热层平面分层的假设下, 化学物质的扩散过程可以用下式近似<sup>[5]</sup>,

$$n_i(r, z, t) = \frac{N_0}{(4\pi D_0 t)^{1.5}} \exp \left\{ - (z - z_0) \left( \frac{3}{4H_a} + \frac{1}{2H_i} \right) - \alpha t - \frac{H_a^2 \{ 1 - \exp[-(z - z_0)/(2H_a)] \}^2}{D_0 t} - \frac{r^2}{2D_0 t \exp[-(z - z_0)/(2H_a)]} \right\}$$

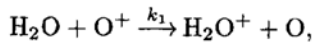
## 2 中性气体的扩散

空间化学释放的物质按其作用后果分为两类, 一类是使电离层电子密度增加的物质, 如钡等碱金属原子, 在太阳紫外光的照射下, 这类物质非常容易发生光致电离而失去电子, 使所释放化学物质的

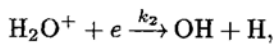
层高度),  $z_0$  为释放点的高度,  $N_0$  为释放的总分子数,  $D_0$  为扩散系数.  $H_a = kT/m_a g$  为大气标高,  $H_i = kT/m_i g$  为被释放气体的标高, 其中,  $k$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为中性气体温度,  $m_a, m_i$  分别为大气平均分子量和释放气体的分子量,  $g$  为重力加速度,  $\alpha t$  为由于化学反应引起的损失项.

### 3 离子化学过程

对于常见的中性气体而言, 在空间的某一固定点, 光致电离和光离解而造成释放物质的损失相对于扩散和化学损失而言是小量, 一般可以忽略不计<sup>[6]</sup>. 下面的计算以  $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{SF}_6$  为例, 它们在热层背景中的扩散系数和离子化学过程如下<sup>[7]</sup>:



$$k_1 = 3.2 \times 10^{-9} \text{ cm}^3/\text{s};$$



$$k_2 = 6.5 \times 10^{-7} (300/T_e)^{0.5} \text{ cm}^3/\text{s};$$

我国中纬度地区的 5 月份白天中午附近进行数值计算. 计算方法为, 首先由公式 (1) 计算释放物质的时空分布, 然后加入相应的离子化学过程, 最后利用电离层的准中性条件得到电子密度的变化, 时间向前推进一步, 重复以上循环, 本文中的时间步长  $\Delta t = 1.0 \text{ s}$ , 释放物质的初始参数为  $N_0 = 500 N_A$ , 其中,  $N_A = 6.022 \times 10^{23}/\text{mol}$  为阿伏伽德罗常数. 为了更加直观地说明释放后的效果, 将释放高度选在电离层峰值电子密度高度, 本文为 325 km,  $\text{H}_2\text{O}$  释放后的 30, 60, 200 s 的计算结果如图 1—图 3 所示, 单位为  $\text{cm}^{-3}$ .

图 1 的结果表明, 500 mol 的  $\text{H}_2\text{O}$  分子在 325 km 的高度释放后迅速扩散. 在释放后的 30 s, 使

Fig.2 Evolution of electron density at different moment after 500 mol  $\text{H}_2\text{O}$  released at ionospheric 325 km height, unit in  $10^5 \text{ cm}^{-3}$

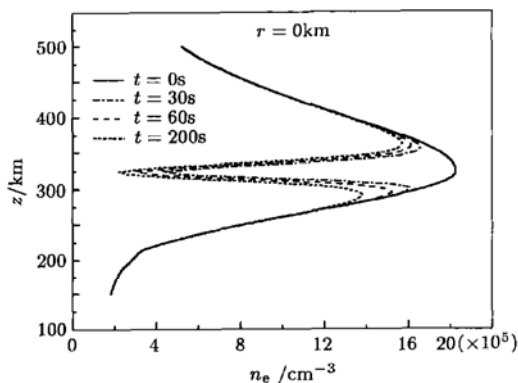


图3  $r = 0 \text{ km}$  处, 不同时刻的电子密度剖面  
Fig.3 The profile of electron density at different moment where  $r = 0 \text{ km}$

度达到较高的数值 ( $\geq 5.5 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ ), 随着时间的推移, 影响到的区域越来越大, 其密度衰减得越来越快. 在水平方向上, 由于热层大气平面分层的假设, 使扩散过程是以释放点为中心的圆形对称, 但在垂直高度上并不对称, 原因是热层大气随高度呈指数分布的事实, 它导致在释放点以上的高度空间上比其下方的扩散要快, 图 1 也正好说明了这一点. 图 2 是电离层电子密度在释放后的 30、60 和 200 s 的变化, 可以明显地看出, 电子密度有不同程度的扰动, 随时间的增加, 其扰动范围也越来越大, 在释放后的 200 s, 电子密度在中心 ( $r = 0 \text{ km}$ ) 减少到 20%, 在  $r = 20 \text{ km}$  约减少到 70%, 影响的空间大约为  $40 \text{ km} \times 50 \text{ km}$ , 可以直观地看出电离层洞的形成. 图

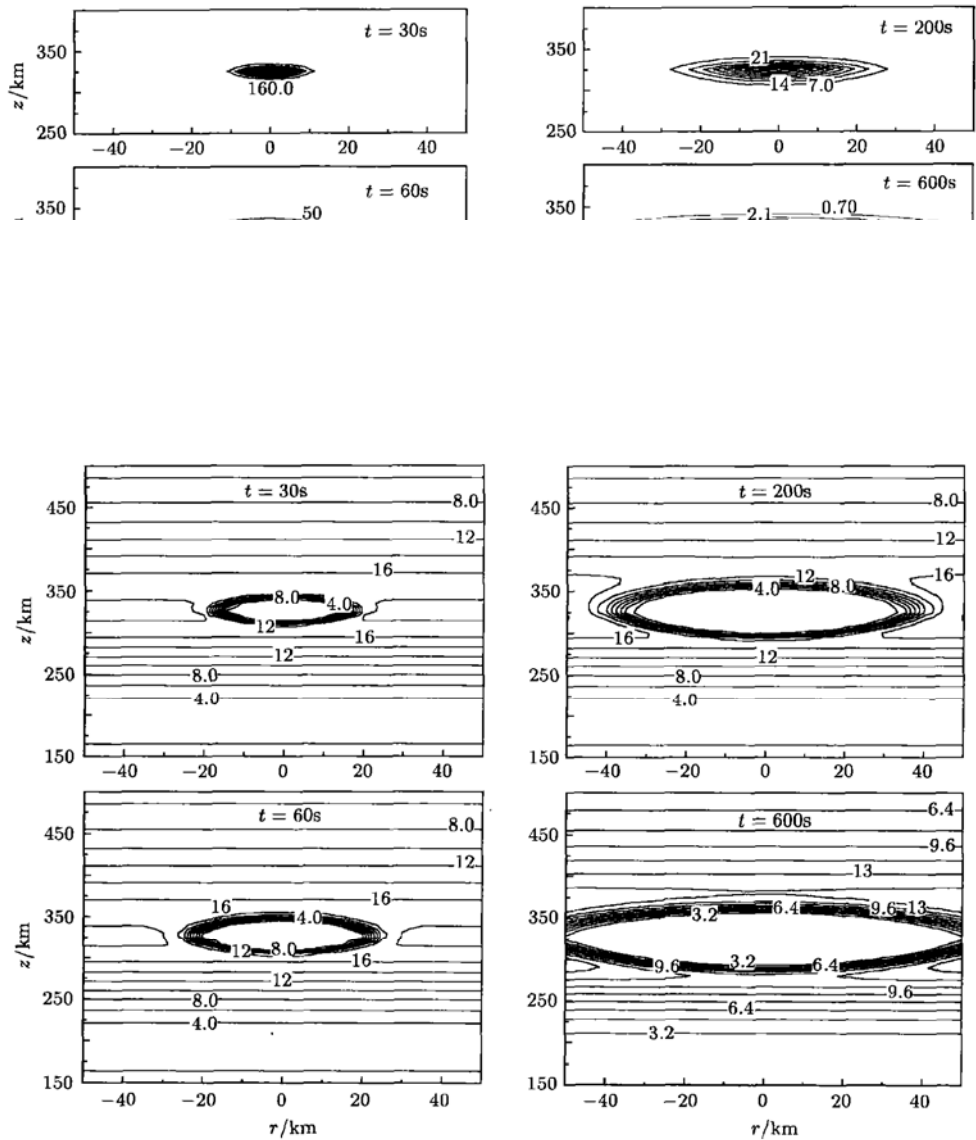


图5  $\text{SF}_6$  分子释放后对电离层的影响  
Fig.5 The same as Fig.2 but for  $\text{SF}_6$

3 是  $r = 0 \text{ km}$  处, 几个时刻的电子密度剖面, 可以看出电子密度的减少非常迅速.

图 4、图 5 和图 6 是针对  $\text{SF}_6$  的计算结果, 其初始参数与图 1—3 完全相同, 我们也得到类似的结果.  $\text{SF}_6$  分子对电子有很强的吸附力, 与  $\text{H}_2\text{O}$  分子相比, 它的特点是扩散较慢、反应较快, 因此它对电离层影响的程度和区域更大更广, 这一结果可以从相应示图的对比看出. 正因此性质,  $\text{SF}_6$  也成为在大型释放实验中用得最多的物质之一.

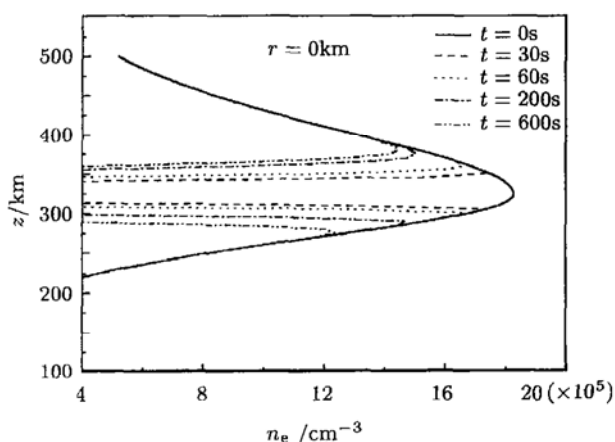


图 6  $r = 0 \text{ km}$  处, 电离层电子密度的变化  
Fig.6 The same as Fig.3 but for  $\text{SF}_6$

## 5 结论和讨论

本文计算了 500 mol 的两种化学物质在 325 km 高度上释放后的扩散和电离层的响应过程, 结果表明, 在电离层高度上中性分子的扩散非常迅速, 对电离层电子密度有很大程度的影响, 对  $\text{H}_2\text{O}$  而言最大有 5 倍的下降, 而对  $\text{SF}_6$ , 电子密度则有一个量级以上的减少, 明显看出电离层洞的形成. 释放物质性质的不同导致了电离层洞的大小和密度减少多少的不同, 为了突出电离层洞的大小, 应该选择像  $\text{SF}_6$  扩散较慢、化学反应较快的物质, 但是由于这类物质如  $\text{CF}_2\text{Br}$  等, 它们的分子量较大, 释放相同的分子数, 将会增加火箭或者卫星的发射成本 (本文中 500 mol 的  $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{SF}_6$  的质量分别为 9 kg 和

73 kg), 实施中应全面地加以考虑.

本文的数值计算结果与一些实验观测结果近似一致<sup>[1]—[3]</sup>, 在计算中, 由于忽略了释放物质的初始速度和热层风场, 这将会给扩散过程带来影响, 因此电离层洞的形态会有所不同, 背景条件电离层和热层参数也会有一定的影响, 但是它们不会影响到其中的基本物理过程. 另外, 没有考虑周围等离子体的扩散, 由于电离层惰性的存在, 对于较短时间 ( $\leq 10 \text{ min}$ ) 而言, 它的影响不大<sup>[6]</sup>, 电离层洞的维持时间一般可以达到十几分钟到半个小时, 有的甚至可以达到小时的量级, 这要视释放物质的多少和种类而定. 人工电离层洞的形成对电波传播的影响是很重要的问题, 我们将在下一步工作中考虑.

## 参考文献

- [1] Michael Mendillo. Ionospheric holes: a review of theory and recent experiments. *Adv. Space Res.*, 1988, 8(1):51—62
- [2] Holmgren G, Marklund G, Eliasson L *et al.* Ionospheric response to chemical releases in the high latitude E and F regions. *Adv. Space Res.*, 1988, 8(1):79—83
- [3] Choueiri E Y, Oraevsky V N, Dokukin V S *et al.* Observations and modeling of neutral gas releases from the APEX satellite. *J. Geophys. Res.*, 2001, 106(A10):25 673—25 681
- [4] Kolomiitsev O P, Ruzhin Y Y, Egorov I B *et al.* Ionosphere plasma holes-modeling and diagnostic. *Phys. Chem. Earth*, 1999, 24(4):393—399
- [5] Bernhardt P A. Three-dimensional, time-dependent modeling of neutral gas diffusion in a nonuniform, chemically reactive atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 1979, 84(a3):793—802
- [6] Mendillo M, Forbes J M. Artificially created holes in the ionosphere. *J. Geophys. Res.*, 1978, 83(A1):151—162
- [7] Mendillo M, Semeter J, Noto J. Finite element simulation (FES): a computer modeling technique for studies of chemical modification of the ionosphere. *Adv. Space Res.*, 1993, 13(10):55—64
- [8] Bilitza D. International Reference Ionosphere-status 1995/1996. *Adv. Space Res.*, 1997, 20:1751—1754
- [9] Hedin A E. Extension of the MSIS thermospheric model into the middle and lower atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 1991, 96(A2):1159—1172