

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. 地球物理学报, 2011, 54(1): 1~5, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.01.001

Huang Y, Shi J M, Yuan Z C. Ionosphere electron density depletion caused by chemical release. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, 54(1): 1~5, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.01.001

释放化学物质耗空电离层电子密度的研究

黄 勇^{1,2}, 时家明^{1,2}, 袁忠才^{1,2}

1 合肥电子工程学院脉冲功率激光技术国家重点实验室, 合肥 230037

2 合肥电子工程学院安徽省红外与低温等离子体重点实验室, 合肥 230037

摘 要 电离层作为电波传播的主要通道和载体, 影响着无线电通信的质量, 因此人工电离层扰动具有广阔的应用前景. 在电离层中释放具有较强电子亲和力的化学物质可以耗空电离层 F 区的电子密度, 是人工电离层扰动的有效手段之一. 本文通过对 CO₂ 和 SF₆ 气体在电离层中的扩散和离子化学反应过程的分析, 理论计算了在我国北京地区上空释放这两种气体后电离层电子密度的时空演变过程. 结果表明: (1) 在电离层高度上释放 100 kg 的 CO₂ 或 SF₆ 气体后, 电离层电子密度迅速减少, 释放点周围局部区域的电子密度被耗空, 能够形成一定尺度的电离层空洞, 上述现象能够维持数小时之久; (2) 与 CO₂ 气体相比, SF₆ 气体具有扩散慢且化学反应快的优点, 对电离层的影响较大, 具有更好的电离层扰动效果.

关键词 化学释放, 电离层扰动, 电离层空洞, 扩散

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.01.001

中图分类号 P352

收稿日期 2009-11-27, 2010-11-24 收修定稿

Ionosphere electron density depletion caused by chemical release

HUANG Yong^{1,2}, SHI Jia-Ming^{1,2}, YUAN Zhong-Cai^{1,2}

1 Key Lab of Pulsed Power Laser Technology of State, Hefei Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China

2 Key Lab of Infrared and Low Temperature Plasma of Anhui Province, Hefei Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China

Abstract The propagation of radiowaves can be affected by the ionosphere plasma parameters, such as electron density, so active ionospheric modification has a wide application prospect in military use. Release of a chemically reactive gas into the ionospheric F-region can result in the depletion of electron density. In terms of diffusion process of neutral gas and relevant chemical reactions in the ionosphere, the theoretical model of ionospheric modification is investigated in this paper. The influences of CO₂ and SF₆ gas on the ionosphere of Beijing area are theoretically calculated respectively. The results show that: (1) The localized electron density depletion in F-regions is remarkable after release of 100 kg CO₂ or SF₆ gas, it can form an ionospheric hole which can persist for hours. (2) Compared to CO₂ gas, SF₆ gas has slow diffusion speed and large chemical reaction rates, so it will substantially affect ionosphere and facilitate the formation of artificial ionospheric hole.

Keywords Chemical release, Ionospheric modification, Ionospheric hole, Diffuse

1 引言

地球电离层是由大量自由电子和多种离子构成,总体上呈电中性的等离子体介质.近三十多年来对人造地球卫星应用与空间环境研究的实践表明,太阳扰动引起的电离层等离子体环境改变,如磁暴和电离层暴等,可能给电离层研究甚至是人们的日常生活带来严重的影响.人类太空活动的增加,也使得电离层空间环境受到一定程度的扰动影响.例如美国天空实验室发射期间,来自 ATS-3 和 ATS-5 地球同步卫星的观测结果显示,电离层中形成了一个直径达 1000 km 的电离层电子密度耗空区域,该区域的电子密度减少约 50%~60%,持续时间接近 4 h.这一空间等离子体环境扰动直接导致电离层的最大反射频率降至 2 MHz 左右,使得大西洋广大地区上空的短波通信中断^[1],我国的 DF-5 火箭发射时也有类似的现象.

除火箭排气这类无意识的电离层扰动之外,近年来国外还利用火箭、卫星等搭载化学物质开展有意识的空间等离子体环境人工扰动实验的研究^[2~4].此项研究的意义在于,一方面,电离层是等离子体研究的优良场所,利用化学释放来主动改变电离层可为研究等离子体物理过程提供研究手段,对电离层等离子体环境的认识和探测有着重要的意义;另一方面,可考察扰动后的电离层对电波传播的影响^[5,6],进而与军事应用研究联系起来.目前,人工扰动电离层常用的途径主要有通过高频或低频电波加热和化学物质释放两种,Bernhardt 等^[7]将两种方法结合使用.国内对电波加热法已经进行了理论上的研究^[8~10],其研究表明,对于一定参数的发射机,一定的吸收模型,电离层电子密度和温度均有明显的变化;对于化学释放法的研究与国外相比起步较晚,目前主要在理论研究阶段.本文主要从中性气体的扩散方程出发,结合释放物质与电离层等离子体的离子化学反应过程,通过有限元方法^[11]数值模拟了电离层等离子体电子密度随时间的变化,直观地给出了电离层人工扰动的过程,为人工释放化学物质扰动电离层的主动实验提供必要的理论支持.

2 基本原理

空间释放的化学物质可分为两类,一类是使电

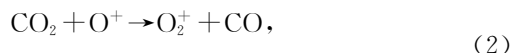
离层电子密度增加的物质,如钡等碱金属原子^[12~14],这类物质在太阳紫外光的照射下,非常容易发生光致电离而失去电子,使释放化学物质的电离层空间在极短的时间内电子密度大大增加,形成人工电离层“电子稠团”;另外一类是使电子密度降低的中性气体分子,如 CO₂、SF₆ 等,主要作用于电离层的 F 层.在 F 层中,占绝对多数的 O⁺ 与电子的复合系数约为 10⁻¹² cm³/s,在电离层中释放一定的中性气体分子,很容易将原子性的 O⁺ 转变为分子性的离子,而分子性的离子与电子的复合系数一般可以达到 10⁻⁹ cm³/s 甚至更大^[15],因此 F 层的电子复合大大加快,相应的电子密度就有可能大大减少,从而形成人工电离层“电子空洞”.通常,第一类化学物质产生的电离层扰动时间短、区域小,因为在电离层中局部高密高压的“电子稠团”会在很短的时间通过扩散以及输运过程而衰减到与背景相同,另外它们也容易被氧化,还没来得及扩散到较远的空间就被大大消耗.因此,对于空间主动扰动实验而言,第二类物质被广泛使用,本文将重点研究此类物质.

在中性气体被释放的初始阶段,在巨大的压力差作用下,中性气体会像铲雪机一样将周围的等离子体推开,这一过程经历的时间很短,一般为几秒^[16].随着压力差的减小,中性气体与电离层背景等离子体充分混合,从而向空间扩散.扩散过程因中性气体的不同可以经历不同的时间,离子化学反应也主要发生在这一阶段.若不计电离层中的中性风、传热等因素的影响,扩散方程为

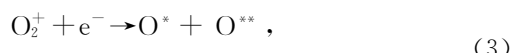
$$\frac{\partial n_i}{\partial t} = \nabla \cdot (D_i \nabla n_i + G_i n_i) - L_i, \quad (1)$$

其中, n_i 为中性气体的密度,它是时间和空间的函数, D_i 为粒子的扩散系数, G_i 为粒子在重力场作用下的漂移速度, L_i 为损失项.对于常见的中性气体,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化学反应引起的损失而言是小量,因此 L 的大小一般只考虑化学反应因素^[17].

下面以 CO₂ 和 SF₆ 为例来研究电离层的人工扰动效应,它们在电离层背景中的离子化学过程^[4]如下:



$$k_1 = 9.4 \times 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s};$$



$$k_2 = 1.9 \times 10^{-7} (300/T_e)^{0.5} \text{ cm}^3/\text{s};$$



$$k_3 = 2.2 \times 10^{-7} / [1 + 0.0016 \exp(4770/T_e)] \text{ cm}^3/\text{s}. \quad (4)$$

式(2)~(4)中的 T_e 是电子温度, k 表示各化学反应的速率. 近似认为电离层背景主要由 O , O_2 和 N_2 组成, 因此 CO_2 和 SF_6 的扩散系数^[11]表示为

$$D_{CO_2} = \left(\frac{n_O}{8.46 \times 10^{17} T^{0.5}} + \frac{n_{N_2}}{2.04 \times 10^{17} T^{0.623}} + \frac{n_{O_2}}{2.02 \times 10^{17} T^{0.623}} \right)^{-1} \text{cm}^2/\text{s}, \quad (5)$$

$$D_{SF_6}(h, r, t) = \frac{8.56 \times 10^{16} T^{0.5}}{n_O + n_{O_2} + n_{N_2}} \text{cm}^2/\text{s}, \quad (6)$$

其中 T 为电离层背景温度. 从上面的分析, 可得到释放 CO_2 和 SF_6 中性气体后, 电离层背景电子密度减少量分别为^[16]

$$\Delta n_{eCO_2} = k_2 [k_1 n_O + n_{CO_2} \Delta t] n_e \Delta t, \quad (7)$$

$$\Delta n_{eSF_6} = k_3 n_{SF_6} n_e \Delta t. \quad (8)$$

3 计算结果与讨论

利用有限元方法, 对 2000 年 1 月 1 日凌晨北京地区 (39.8°N , 116.3°E) 上空的电离层扰动实验进行了数值模拟计算. 背景电离层的参数和电子密度分布分别由经验模式 MSIS90 和 IRI_2001 得到, 分别如图 1 和图 2 所示. 进行数值模拟时, 首先由公式(1)计算释放物质的时空分布, 然后考虑其相应的离子化学反应过程, 利用公式(7)和(8)得到不同时间以及空间的电离层电子密度变化情况. 释放点高度选择为 275 km; 释放化学物质的质量都为 100 kg, 即分别为 2250 mol 的 CO_2 气体和 680 mol 的 SF_6 气体; 通过编程计算得到两种气体释放前、后不同时刻的电离层电子密度分布变化情况, 如图 3 和图 4 所示.

图 3 和图 4 表明, 化学气体释放后迅速扩散, 并与电离层中的电子反应, 使得电离层电子密度减小, 出现电子耗空现象; 随着时间的推移, 影响到的区域越来越大, 其密度衰减的程度也越来越大; 随着释放物质分子的不断扩散稀释以及周围电子的不断填充, 扰动区域电子密度最终恢复原样.

对比图 3 和图 4 可以看出, CO_2 气体释放 10 s 后, 在 275 km 处的电子密度减少到 92%, 1 min 后减少到约 12%, 到 20 min 左右时, 电子全部参加反应, 电离层“电子空洞”开始形成, 30 min 后“电子空洞”的高度范围达到最大, 约为 100 km. 而 SF_6 气体释放 10 s 后, 在 275 km 处的电子密度即可减少到 6%, 15 s 左右时, 电子就全部参加反应, 一直到 50 min 后“电子空洞”的高度范围才达到最大值, 接近 200 km. 从以上对比的数据易知, SF_6 气体的电离层扰动效果

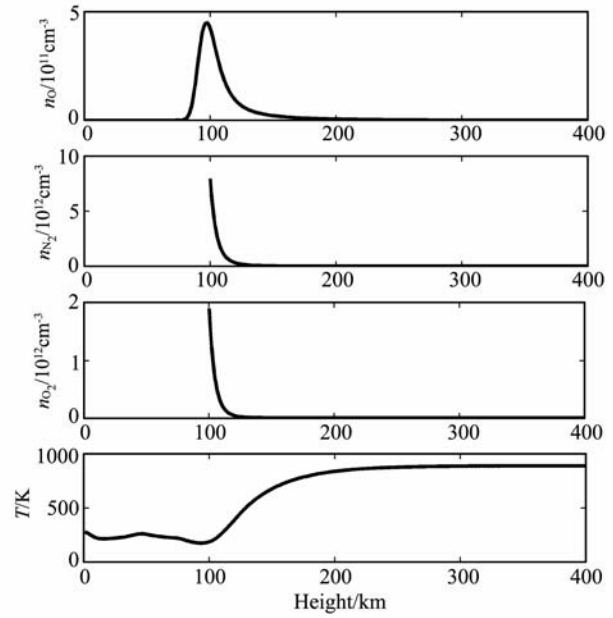


图 1 电离层大气参数分布

Fig. 1 Ionosphere neutral atmosphere distribution

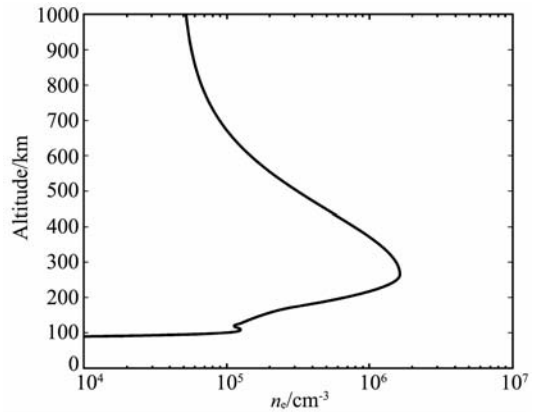


图 2 电离层电子密度分布

Fig. 2 The distribution of ionosphere electron density

比 CO_2 气体要好很多, 这是因为与 CO_2 相比, SF_6 分子量较大, 因此分子扩散较慢; 并且 SF_6 分子直接与电子发生反应, 而 CO_2 则不然(参考式(2)~(4)即知), 所以 SF_6 与电子反应的速度较快. 另外, 很容易从图 4e 中看出, “电子空洞”并不是以释放点为中心对称, 这是由于电离层电子密度的梯度决定了气体在释放点以上高度空间比在其下方的扩散要快, 因此更容易产生电子耗空现象, 相应的“电子空洞”半径在释放点以上要大.

以上计算忽略了释放物质的初始速度、电离层中的中性风以及粒子相互间的传热, 这些因素对中性气体扩散有一定程度的影响, 但其影响只局限于“电子空洞”整体性位置的漂移, 并不影响其中的基本物理和化学过程.

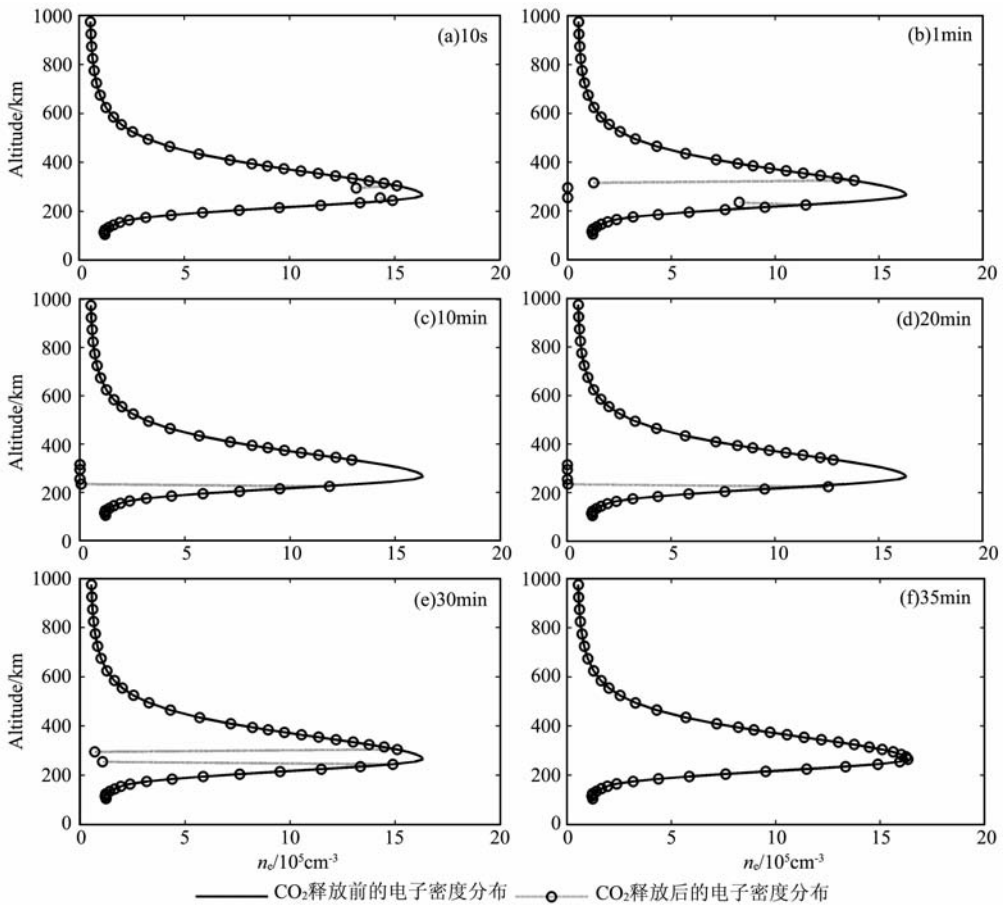


图3 CO₂ 释放后不同时刻电离层电子密度空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of electron density at different times after CO₂ gas release

4 结 论

本文研究了在电离层高度上释放化学物质后电离层电子密度的响应过程. 通过计算得出, 气体物质释放后在电离层高度上能够在较大尺度范围内扩散, 并且对电子有很强的吸附作用, 从而对电离层电子密度有显著的影响, 能够形成一定尺度的电离层“电子空洞”.

与 CO₂ 气体相比, SF₆ 气体具有更好的电离层扰动效果. 能够产生电离层人工扰动效应的化学物质还有 H₂、H₂O、CF₃Br 和 Ni(CO)₄ 等, 不同种类、不同质量的物质以及不同的释放高度对“电子空洞”的尺度、形成时间以及维持时间都有很大的影响. 另外, 电离层人工扰动的一个重要的应用是它可以影响电波的传播, 上述两方面将在今后的工作中加以研究.

参考文献 (References)

[1] Mendillo M. A sudden vanishing of the ionospheric F region

due to the launch of Skylab. *J. Geophys. Res.*, 1975, **50** (16):2217~2228

[2] Holmgren G, Marklund G, Eliasson L, et al. Ionospheric response to chemical releases in the high latitude E and F region. *Adv. Space Res.*, 1988, **8**(1):79~83

[3] Choueri 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):25673~25681

[4] Bernhardt P A. Chemistry and dynamics of SF₆ injections into the F region. *J. Geophys. Res.*, 1984, **89**(A6):3929~3937

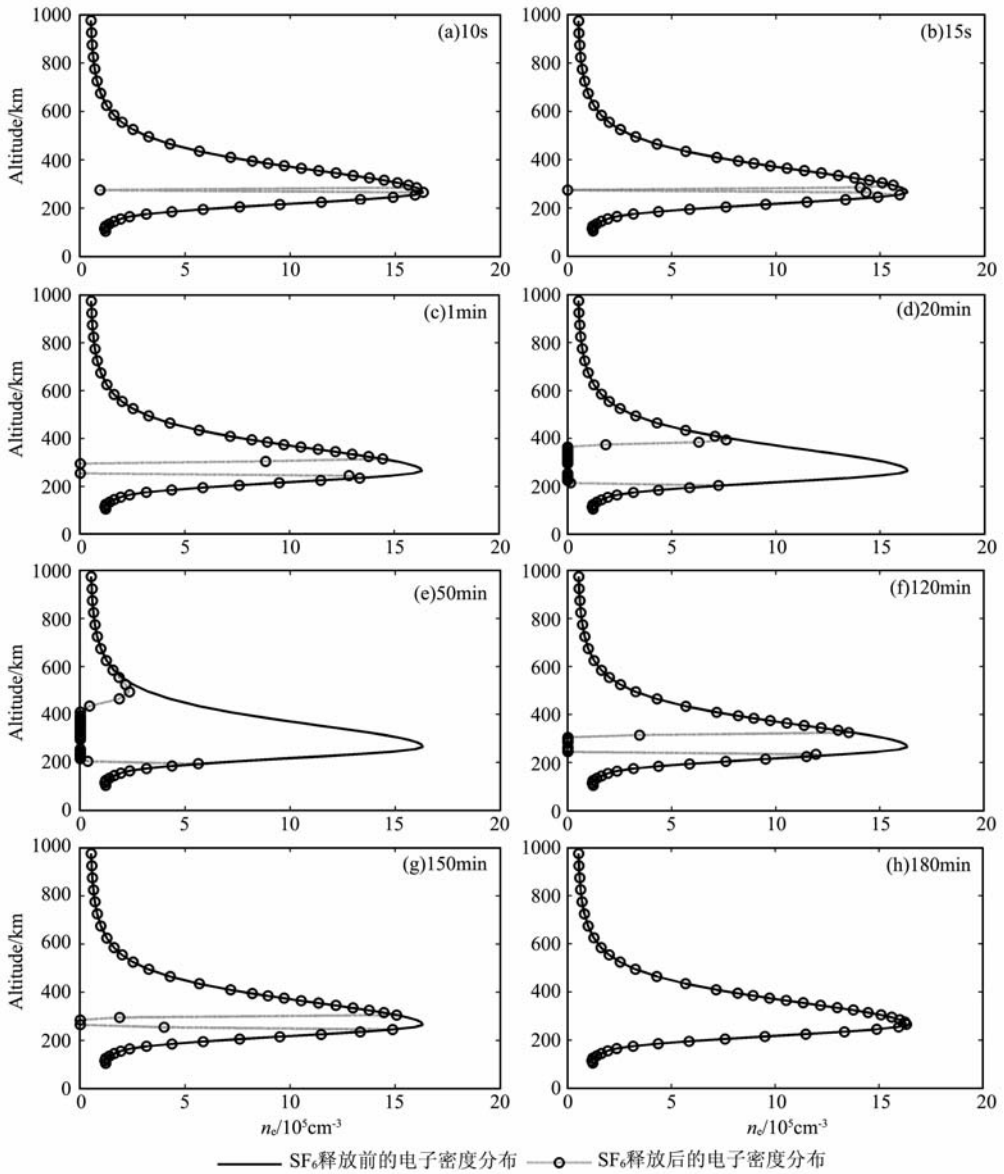
[5] Smith R L, Helliwell R A. A theory of trapping of whistler in field-aligned columns of enhanced ionization. *J. Geophys. Res.*, 1960, **65**(3):815~823

[6] Helms W J, Thompson A D. Ray-tracing simulation of ionization trough effects upon radio waves. *Radio Sci.*, 1973, **8**(12):1125~1132

[7] Bernhardt P A, Posa A V. A refracting radio telescope. *Radio Sci.*, 1977, **12**(2):327~336

[8] 刘立波, 吴向阳, 涂剑南. 甚低频电磁波变态低电离层的数值模拟. *空间科学学报*, 1997, **17**(2):130~135

Liu L B, Wu X Y, Tu J N. Modeling study of modification of the lower ionosphere by VLF electromagnetic waves. *Chin. J. Space Sci.* (in Chinese), 1997, **17**(2):130~135

图 4 SF₆ 释放后不同时刻电离层电子密度分布Fig. 4 Spatial distribution of electron density at different times after SF₆ gas release

- [9] 黄文耿,古士芬. 大功率无线电波与低电离层的相互作用. 空间科学学报,2003,23(3):181~188
Huang W G, Gu S F. Interaction of the powerful high-frequency radio wave with the lower terrestrial ionosphere. *Chin. J. Space Sci.* (in Chinese), 2003, 23(3):181~188
- [10] 黄文耿,古士芬,龚建村. 大功率高频无线电波加热电离层. 电波科学学报,2004,19(3):296~301
Huang W G, Gu S F, Gong J C. Ionospheric heating by powerful high-frequency radio waves. *Chin. J. Radio Sci.* (in Chinese), 2004, 19(3):296~301
- [11] 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
- [12] Mitchell H G. Transverse motion of high-speed barium clouds in

- the ionosphere. *J. Geophys. Res.*, 1985, 90(A11):11091~11095
- [13] Rosenberg N W, Best G T. Chemistry of barium released at high altitudes. *J. Phys. Chem.*, 1971, 75(3):1412~1418
- [14] Li L, Xu R L. Neutral barium cloud evolution at different altitudes. *Chin. Phys. Lett.*, 2002, 19(8):1214~1216
- [15] Ferguson E E. Rate constants of thermal energy binary ion-molecular reactions of aeronomic interest. *At. Data Nucl. Data Tables*, 1973, 2(2): 159~178
- [16] Bernhardt P A, Scales W A. Ionospheric chemical release. In: Conf. Proc. Ionospheric Modification and Its Potential to Enhance or Degrade the Performance of Military Systems. Norway;Bergen,1990. 348~357
- [17] Bruskin L G, Koen M A, Sidorov I M. Modeling of neutral-gas release into the earth's ionosphere. *Pure and Applied Geophysics*, 1988, 127(2):415~446