第15卷 第1期　　空间科学学报　　Vol. 15, No. 1
1995 年 1 月　　CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE　　Jan., 1995

一氧化氮对电离层电子密度的影响*

徐 秀 娟
（中国科学院空间科学与应用研究中心，北京 100080）

摘　　要

本文利用电离层电子密度的理论计算模式，研究了一氧化氮对中、低纬度100—200km间电子密度的影响，发现电子密度与一氧化氮密度间存在着正、负相关．正相关，只有当 $NO + h\nu \xrightarrow{121.6nm} NO^+ + e$ 这一光电离成为一氧化氮离子的主要生成源时才出现．

关键词　一氧化氮，电子密度，电离层

一、引　　言

100—200km 间电子密度的分布影响着整个电离层的电导率和电场分布．在电离层各种物理现象的形成中它起着重要作用．谭子勋等[1]在分析武昌上空 E_s 的发生、发展过程后指出：各种 E_s 的形成机制不同，但除外来电离源所致外，其出现的频度似应与背景电离有关．因此弄清背景电离是弄清电离层各种物理现象的前提．

另外用文献[2]中指出的理论计算模式去研究 100—200km 间电离层电离情况，可弥补 IRI-86 模式计算的不足．但在用文献[2]中的模式研究该区内电子密度分布时发现，理论计算得到的E区峰值电子密度低于实测值．这要求我们弄清产生这一现象的原因和机理．一氧化氮是热层大气中的次要成分，但一氧化氮离子是电离层E区的一种主要成分．而一氧化氮随时间的变化是相当大的，一天内可变化几倍．因此研究一氧化氮密度变化对电子密度的作用，对弄清电离层各种物理现象的机理是十分有价值的．

二、计算和讨论

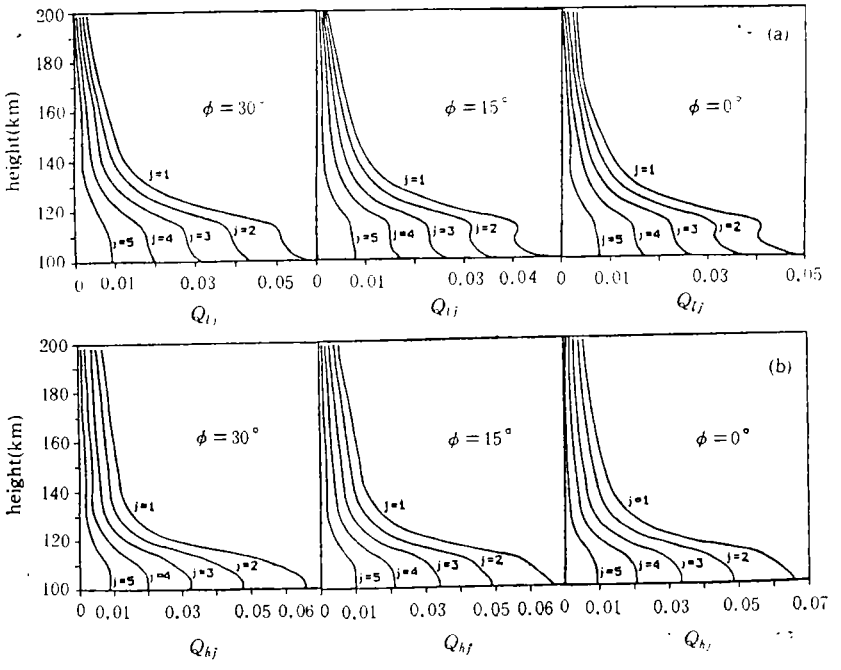
利用文献[2]中提出的中、低纬 100—200km 间电子密度 Ne 的计算模式和一氧化氮密度 NO_{0i} ($i = l$、h，分别表示太阳活动低、高年)，Tobiska 等[3]提出的太阳 EUV 辐射通量模式计算经度为 113°E、纬度分别为 30°N、15°N、0°，太阳活动低、高年，春分，当地时间为 12 点时，100—200km 间电子密度 Ne_{0i}．在同一太阳活动条件下，同一时间和地点，分别选取一氧化氮的密度为 NO_{0i} 的 0.5、0.6、0.7、0.8 和 0.9 倍代入模式计算得到的电子密度分别为 Ne_{ij}($j = 1$、2、3、4、5)．为了清楚地表示由于一氧化氮含量的变化

* 国家自然科学基金资助项目．
本文于 1993 年 12 月 30 月收到．

引起电子密度变化的程度，引入电子密度的相对变化 Q_{ij}：

$$Q_{ij}=\frac{Ne_{ij}-Ne_{0i}}{Ne_{0i}}, \tag{1}$$

并把它们随太阳活动、高度和纬度的变化示于图 1。从图 1 可清楚地看到：1. Q_{ij} 是正值，它随 NO 的密度减小而增大；2. 随高度增加 Q_{ij} 减小；3. 随太阳活动增强 Q_{ij} 增



(a) 太阳活动低年　(b) 太阳活动高年

图 1　Q_{ij} 随太阳活动和纬度的变化

Fig. 1　Variation of Q_{ij} with solar activity and latitude

大；4. 太阳活动低年，纬度从 30°N 到 15°N，Q_{ij} 明显减小，而从 15°N 到 0°，Q_{ij} 变化不大；太阳活动高年 Q_{ij} 随纬度没有明显的变化。从以上分析得出，电子密度受 NO 含量变化的影响在 E 区比 F 区大；电子密度 Ne 与 NO 密度间存在负相关。从而找到了理论计算中，E 区峰值电子密度小于实测值的原因之一是计算过程中选取的一氧化氮密度偏大。Stewart 等[4]指出 E 区一氧化氮在纬度 40°—70° 明显地依赖地磁活动，因此这一发现有可能解释在 Millstone Hill 上空探测发现的，高度位于 120km 附近的电子密度受地磁暴的影响不明显这一结果[5]。

取一氧化氮的密度为 $0.5NO_{0i}$，代入模式计算 Q_{i1} 随太阳天顶角的变化。并示于图 2。从图 2 可知：1. 高度在 150km 以上，随太阳天顶角增大 Q_{i1} 增大。也就是说太阳天顶角越大，一氧化氮密度的增加使电子密度下降得越快；2. 在 150km 以下，在太阳天顶角小于某个临界值 χ_c 时，Q_{i1} 随太阳天顶角增大而增大，与 150km 以上情况相同。当太阳天顶角大于 χ_c 时，在比较低的高度上 Q_{i1} 随天顶角增大而减小，甚至出现负值。这一结果与 Swider 等[6]指出的，在宁静太阳活动期间近太阳升起和落下时，E 区的电子

密度与一氧化氮密度的平方根成正比这关系相一致.

为了从物理上对以上结论给予解释,以太阳活动低年、春分、30°N,天顶角 χ 分别为 30°、83.5°、90°,一氧化氮密度变化 0.5 倍为例,引入参数 S_{Lk} 表示 O_2^+、NO^+ 密度和 Ne 随 NO 变化的百分比:

$$S_{lk}=\frac{N_{lk}-N_{0lk}}{N_{0l3}}. \tag{2}$$

$k=1$ 表示 O_2^+ 密度, $k=2$ 表示 NO^+ 密度, $k=3$ 表示电子密度; N_{0lk} 和 N_{lk} 分别表示一氧化氮密度变化前后以上三种成分的密度. 把 S_{lk} 随高度和太阳天顶角的变化示于图 3. 从图 3 得到: 1. 一氧化氮含量减少, O_2^+ 和电子含量增加, 而 NO^+ 减少, O_2^+ 的增加比 NO^+ 的减少来得快; 2. 当太阳天顶角大到一定程度后, 在比较低的高度, NO^+ 的减少超过 O_2^+ 的增加. 这是因为一氧化氮的最大电离高度随太阳天顶角增大而升高, 引起 100km 以上一氧化氮

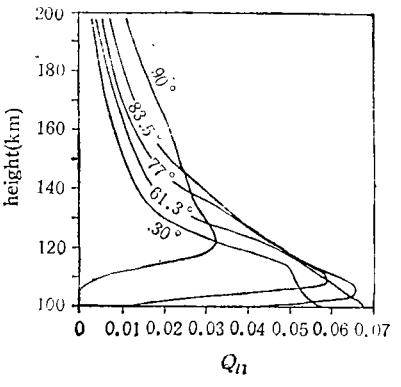


图 2 Q_{l1} 随太阳天顶角的变化

Fig. 2 Variation of Q_{l1} with solar zenith angle

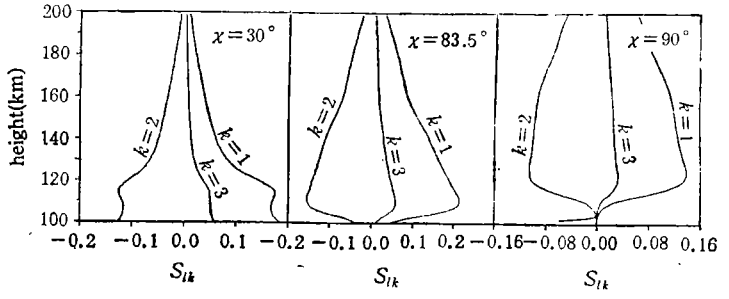


图 3 S_{lk} 随太阳天顶角的变化

Fig. 3 Variation of S_{lk} with solar zenith angle

的电离相对增强, 以致在比较低的高度, 太阳天顶角近于 90° 时, $NO+h\nu \xrightarrow{121.6nm} NO^+ + e$ 这一光化反应起了主导作用. 所以在 NO 减少时, NO^+ 明显减少, 使 S_{L3} 负向增大, 从而出现 Ne 随 NO 减少而减少的正相关现象.

下面用近似推算进一步说明 Ne 与 NO 存在正、负相关的原因. E 区的主要离子成分是 O_2^+ 和 NO^+. 由文献 [2], 方程 (4)—(9) 式计算也得到白天 O^+ 和 N_2^+ 比 O_2^+、NO^+ 的密度小两个量级以上. 因此在研究 NO 变化对 Ne 的影响时, 只考虑 NO 对 O_2^+ 和 NO^+ 的作用则可. 在太阳活动低年、春分、$\chi=0°$ 时, 可不计 NO 的光电离率[7], 则文献[2]中(8)和(9)式可近似写成

$$[O_2^+]=\frac{q_3+\{K_{16}[O^+(^4S)]+K_{11}[N_2^+]\}[O_2]}{K_{18}[NO]+\alpha_2 Ne}, \tag{3}$$

$$[NO^+]=\frac{K_{18}[O_2^+][NO]+K_{14}[O][N_2^+]+K_{15}[N_2][O^+(^4S)]}{\alpha_3 Ne}. \tag{4}$$

把一氧化氮变化前所对应的 O_2^+、NO^+、NO 及电子的密度分别记作 n_{10}、n_{20}、n_{30}、n_{40}。一氧化氮变化后所对应的以上四种成分的密度分别记作 n_1、n_2、$n_3(=C_3n_{30})$、$n_4(=C_4n_{40})$。C_3、C_4 分别表示一氧化氮和电子密度的变化倍数。q_3 是氧分子的光电离率，$O^+(^4S)$ 和 N_2^+ 可认为不随 NO 变化[8]，因此(3)式分子可记作常数 A，$K_{14}[O][N_2^+]+K_{14}[N_2][O^+(^4S)]$ 可记作常数 B。反应速率系数 K_{18} 记作 K。复合系数 α_2、α_3 不变。则由(3)和(4)式可得出

$$n_{10}=\frac{A}{Kn_{30}+\alpha_2n_{40}}, \tag{5}$$

$$n_{20}=\frac{B(Kn_{30}+\alpha_2n_{40})+AKn_{30}}{\alpha_3n_{40}(Kn_{30}+\alpha_2n_{40})}, \tag{6}$$

$$n_1=\frac{A}{C_3Kn_{30}+C_4\alpha_2n_{40}}, \tag{7}$$

$$n_2=\frac{B(C_3Kn_{30}+C_4\alpha_2n_{40})+C_3AKn_{30}}{C_4\alpha_3n_{40}(C_3Kn_{30}+C_4\alpha_2n_{40})}. \tag{8}$$

(3)和(4)式表明 O_2^+ 随 NO 的含量减少而增加，随 NO 含量的增加而减少；NO^+ 随 NO 的变化与 O_2^+ 正好相反。把 O_2^+，NO^+ 的变化量分别记作 $\Delta_1=n_1-n_{10}$，$\Delta_2=n_2-n_{20}$，这两个变化量间的差记作

$$\Delta=|\Delta_1|-|\Delta_2|=|n_1-n_{10}|-|n_2-n_{20}|. \tag{9}$$

因为 O_2^+ 和 NO^+ 随 NO 的变化是反相位的，所以(9)式可写成

$$\Delta=(n_1-n_{10})+(n_2-n_{20})=(n_1+n_2)-(n_{10}+n_{20}). \tag{10}$$

在此近似条件下，$n_{10}+n_{20}$ 和 n_1+n_2 分别为 NO 变化前后的电子密度 Ne_0 和 Ne'，因此

$$\Delta=Ne'-Ne_0 \tag{11}$$

从(3)—(11)式看出，当 NO 减少时，$\Delta_1>0$，$\Delta_2<0$，如果 $\Delta>0$，那么 Ne' 必定大于 Ne_0，Ne 与 NO 间存在负相关；如果 $\Delta<0$，Ne' 必定小于 Ne_0，Ne 与 NO 间才可能出现正相关。NO 增加时，$\Delta_1<0$，$\Delta_2>0$，当 $\Delta<0$ 时，Ne 与 NO 间存在负相关；$\Delta>0$ 时，才可能出现正相关。把(5)—(8)代入(10)式，整理得

$$\begin{aligned}\Delta'=&-C_4^2[A\alpha_2\alpha_3n_{40}^2+(B+A)Kn_{30}\alpha_2n_{40}+B\alpha_2^2n_{40}^2]\\&+C_4\{(Kn_{30}+\alpha_2n_{40})(A\alpha_3n_{40}+B\alpha_2n_{40})-C_3[AKn_{30}\alpha_3n_{40}+(B+A)K^2n_{30}^2\\&+BKn_{30}\alpha_2n_{40}]\}+C_3Kn_{30}(A+B)(Kn_{30}+\alpha_2n_{40}),\end{aligned} \tag{12}$$

$$\Delta=\frac{\Delta'}{C_4\alpha_3n_{40}(Kn_{30}+\alpha_2n_{40})(C_3Kn_{30}+C_4\alpha_2n_{40})}. \tag{13}$$

现以 105km 为例，把取自文献[2]的 $A=3.124\times10^3cm^{-3}s^{-1}$、$B=1.726\times10^2cm^{-3}s^{-1}$、$K=6.3\times10^{-10}cm^3s^{-1}$、$\alpha_2=3.007\times10^{-7}cm^3s^{-1}$、$\alpha_3=6.228\times10^{-7}cm^3s^{-1}$、$n_{30}=1.2589\times10^7cm^{-3}$、$n_{40}=9.42\times10^4cm^{-3}$，及不同的 C_3 值代入(12)和(13)式，同时求解。解得结果列于表 1。

表 1

C_3	0.5	0.8	1.5	2	3
$\Delta>0$	$C_4<1.058$	$C_4<1.022$	$C_4<0.950$	$C_4<0.908$	$C_4<0.841$
$\Delta<0$	$C_4>1.058$	$C_4>1.022$	$C_4>0.950$	$C_4>0.908$	$C_4>0.841$

从以上推论和表 1 看出，Ne 与 NO 间存在负相关;在 $\chi \leqslant 90^\circ$ 时,它们间一般不出现正相关，只有当 NO 的光电离在 NO^+ 的生成中起主导作用，而 $O_2^+ + NO \longrightarrow NO^+ + O_2$ 这一电荷转换反应生成的 NO^+ 成为次要时,才出现正相关.

在以上的讨论中，选取一氧化氮的变化量比较小。根据目前探测获得，一天中 NO 在 140km 以下可变化 7 倍，在 180km 以上可变化 3 倍,磁暴时变化更大[9]。因此一氧化氮对电离层的作用,特别在地磁暴时的作用是值得注意的,有待进一步研究.

三、结 语

本文利用文献[2]中计算电子密度的模式，研究了一氧化氮对 100—200km 间电子密度的影响随太阳活动，太阳天顶角，地理纬度和高度的变化。得出如下结论：1.一氧化氮的光电离可忽略不计的情况下，O_2^+ 与 NO^+ 随一氧化氮变化的速率，O_2^+ 总是大于 NO^+,因而电子密度与一氧化氮间呈现负相关。2.当 NO 的光电离在 NO^+ 的生成中占统治地位时,电子密度与一氧化氮间才出现正相关。3.太阳活动增强,电子密度随一氧化氮密度变化的变化增大.

致谢：感谢陈耀武研究员为本文的完成给予的支持.

参 考 文 献

[1] 谭子勋,黄信榆和王燊，空间科学学报,第 **3** 卷,第 305 页,1983.
[2] 徐秀娟和陈耀武,空间科学学报,第 **12** 卷,第 305 页，1992.
[3] Tobiska, W. K. and Charles A. B., *J. Geophys. Res.*, Vol. **95**, p. 8243, 1990.
[4] Stewart, A. I. and T. E. Cravers, *J. Geophys. Res.*, Vol. **83**, p. 2453, 1978.
[5] Fesen, C. G., M. E. Hagan, C. A. Tepley and R. G. Roble, *J. Geophys. Res.*, Vol. **98**, p. 1545, 1993.
[6] Swider, W. and T. J. Keneshea, *J. Geophys. Res.*, Vol. **98**, p. 1725, 1993.
[7] 徐秀娟和陈耀武,地球物理学报,第 **35** 卷,第 380 页，1992.
[8] Buonsanto, M. J., *J. Geophys. Res.*, Vol. **95**, p. 7735, 1990.
[9] Rusch, D. W., J. C. Gerard and C. G. Fesen, *J. Geophys. Res.*, Vol. **96**, p. 11331, 1991.

THE EFFECTS OF NITRIC OXIDE ON ELECTRON DENSITY

Xu Xiu-juan

(Center for Space Science and Applied Research, Academia Sinica, Beijing 100080)

Abstract

In this paper, The effects of Nitric Oxide on electron density content in the 100—200km region at mid-low latitudes is studied by using the model of ionospheric electron density. It is found that the correlation of Nitric Oxide with electron density can be either negative or positive. The positive correlation occurs as the $NO + h\nu \rightarrow NO^+ + e$ is the dominant production source of NO^+.

Key words Nitric Oxide, Electron density, Ionosphere