

杨升高,方涵先,翁利斌等. 太阳和地磁活动对磁赤道地区低热层 NO 密度的影响研究. 地球物理学报, 2013, 56(5):1448-1456, doi:10.6038/cjg20130503.

Yang S G, Fang H X, Weng L B, et al. Lower thermospheric Nitric Oxide density over geomagnetic equator response to solar and geomagnetic activities. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2013, 56(5):1448-1456, doi:10.6038/cjg20130503.

太阳和地磁活动对磁赤道地区低热层 NO 密度的影响研究

杨升高^{1,2}, 方涵先^{1,2*}, 翁利斌^{1,2}, 汪四成^{1,2}

1 解放军理工大学气象海洋学院, 南京 211101

2 中国科学院空间天气学国家重点实验室, 北京 100190

摘 要 利用 SNOE 卫星 1998 年 3 月 11 日至 2000 年 9 月 30 日共计 935 天观测的 NO 密度和太阳软 X 射线数据, 分析了低热层 NO 的时空分布特征及其对太阳和地磁活动的响应, 得出了以下结论: NO 密度从 96.67 km 开始增加, 大约在 105~110 km 高度达到最大, 随后开始减小; 同一高度处一般夏季期间最大, 冬季次之, 春秋分季最小; 密度峰值大小变化范围约为 $(0.5 \sim 1.5) \times 10^8 \text{ mol/cm}^3$, 峰值高度基本分布在 107 km 和 113 km 高度处, 且不随太阳活动变化, 平均值约为 107 km; NO 密度与太阳软 X 射线及地磁 A_p 指数的相关系数在不同高度存在 0、1 和 2 天的最佳延迟时间, 而同太阳软 X 射线的统计关系在不同高度和季节存在“线性”、“放大”和“饱和”现象; 从统计和事件分析结果来看, 太阳活动对磁赤道地区低热层 NO 密度的气候尺度变化的影响远大于地磁活动, 但地磁活动对 NO 短期变化贡献非常明显.

关键词 太阳软 X 射线, 地磁 A_p 指数, 磁赤道地区, NO 密度

doi:10.6038/cjg20130503

中图分类号 P352

收稿日期 2012-11-07, 2013-04-17 收修定稿

Lower thermospheric Nitric Oxide density over geomagnetic equator response to solar and geomagnetic activities

YANG Sheng-Gao^{1,2}, FANG Han-Xian^{1,2*}, WENG Li-Bin^{1,2}, WANG Si-Cheng^{1,2}

1 Institute of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China

2 State Key Laboratory of Space Weather, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract The paper analyzes the relationships between solar soft X-ray irradiances, geomagnetic activity and the lower thermospheric Nitric Oxide density measured by SNOE (Student Nitric Oxide Explorer) satellite during 11 March 1998 and 30 September 2000, and the paper has got some conclusions: the NO density has altitude variation, increasing from 96.67 km, maximum at 105~110 km, and decreased in the topside. Usually, NO density in summer is larger than winter, and minimum in the equinox. The peak density is about $(0.5 \sim 1.5) \times 10^8 \text{ mol/cm}^3$, and the peak height is mainly 107 km or 113 km which are not varied with solar activity, about 107 km meanly. It has found that the correlation between the solar soft X-ray or geomagnetic A_p indices and the NO data in different altitude was better, usually when the space weather data is

基金项目 国家自然科学基金项目(40505005), 国家重点实验室专项基金项目, 解放军理工大学预研基金项目资助.

作者简介 杨升高, 1987 年生, 研究生, 研究方向为电离层物理.

* **通讯作者** 方涵先, 1974 年生, 教授, 研究方向为电离层物理. E-mail: fanghx@gmail.com

used from the previous one or two day. The relationship between solar soft X-ray and NO data present “linear”, “saturation”, “amplification”. As a result, the solar soft X-ray is the main cause of the variation in the geomagnetic equator lower thermospheric NO densities for longer intendency and middle time scales, but weaker in short-time scale for geomagnetic activity.

Keywords Solar soft X-ray, Geomagnetic A_p index, Geomagnetic equator region, NO density

1 引言

NO 由原子氮和氧分子化学反应产生,该气体是低热层重要的气体之一:一方面它是产生电离层 D 和 E 层电子密度的主要中性大气来源,其分布特征直接影响低电离层电子密度的形态特征;另一方面它是低热层主要的辐射冷却源,NO 的时空分布直接影响到该区域能量的变化;此外,低热层受到来自上层如太阳和地磁活动的调控,同时又与下层区域如中间层大气发生耦合作用,是连接上下层的关键区域,因此对 NO 的分布特征研究和其对上下层的响应研究都具有十分重要的意义。

目前主要通过卫星手段对 NO 进行测量,包括 OGO-4 (Orbiting Geophysical Observatory) 卫星、SME (Solar Mesosphere Explorer) 卫星、AE (Atmosphere Explorer) 系列卫星、UARS (Upper Atmosphere Research Satellite) 搭载的 HALOE (Halogen Occultation Experiment) 以及 SNOE 卫星等。研究人员利用这些卫星探测的数据,对低热层 NO 形态分布和变化特征进行了一些研究。在 1978 年 Cravens 等^[1]就对电离层 E 层高度区域 NO 的全球形态分布特征进行了一些介绍;Barth 等早在 1973 年^[2]就利用 AE 卫星对 NO 进行了观测实验;在 1988 年^[3]初步证实了低纬地区热层 NO 密度的变化主要由波段在 2~10 nm 太阳软 X 射线引起;在 1992 年^[4]利用 SME 卫星观测数据认为 NO 密度随高度变化,且最大值位于 110 km 高度处;在 1996 年^[5]综述了热层 NO 模式的进展情况;在 1999 年^[6]利用 SNOE 卫星观测的太阳软 X 射线辐射和热带地区上空 NO 密度数据,计算了两者之间的相关性,同时还检验了一个以太阳软 X 射线流量为输入参数的光化学模式的模拟能力;在 2003 年^[7]对全球低热层 NO 分布特征进行了较为全面的研究,结果表明中低纬地区 NO 受到太阳软 X 射线的作用,而高纬地区则受到电子沉降的作用,在磁暴发生时,向赤道风场能够将极光区的扰动传递到中纬地区;在 2009 年^[8]和 2010 年^[9]研究了磁暴期间热层 NO 的变化特征,结果表

明焦耳加热在高纬地区形成了重力波,引起 140 km 高度处 NO 的增加,有时这种现象能够出现在 110 km 高度处。此外,Sætre 等^[10]利用 SNOE 卫星探测的 NO 数据,研究了 1998 年 5 月 2 日一次磁暴期间电子沉降对热层不同高度 NO 的作用,认为 1 keV 的电子能量可以产生约 8 个 NO;Solomon 等^[11]分别利用 DMSP 和 SNOE 卫星测量的高纬地区夜间极光边界指数和 SNOE 卫星观测的 NO 密度数据进行了统计分析,结果表明极光活动与 NO 密度有很强的相关关系,并且滞后极光活动约 1 天时间;Lu 等^[12]研究了磁暴期间焦耳加热作用以及 NO 辐射冷却热层大气能量的作用。

虽然已经有一些关于热层 NO 密度同太阳及地磁活动的研究,但是大部分工作关注极区粒子沉降的作用,且研究的区域集中在高纬地区,关于太阳活动对 NO 作用的研究较少,没有给出详细的定量统计结果。因此本文使用 SNOE 卫星观测的共计 935 天 NO 密度数据,分析其时空变化特性,并研究太阳和地磁活动的作用,研究结果将有助于加强对低热层 NO 变化的认识,为建立更加接近真实的 NO 密度模式奠定基础。

2 空间天气背景及 NO 密度数据来源

地球高层大气,包括电离层和热层大气等^[13-15],都不同程度受到太阳和地磁活动的影响,我们首先给出空间天气变化的情况,结果如图 1 所示。 $F_{10.7}$ 是最常见的太阳活动指数,但是已有的研究^[6-7]表明太阳软 X 射线辐射对热层 NO 的作用效果更加明显,为此我们给出太阳 $F_{10.7}$ 和软 X 射线指数的变化情况,对比两个指数的变化特征。图 1a 中实线是太阳软 X 射线流量,由 SNOE 卫星上太阳 X 射线光度计 (Solar X-ray Photometer, SXP) 观测得到,可以看出其变化范围为 0.3~1 mW/m²,虚线是太阳 $F_{10.7}$ 射电流量,变化范围为 100~300 sfu,可以看出 $F_{10.7}$ 和软 X 射线具有很好的一致性,均存在一定的周期性变化,与 Bailey 等^[16]的研究结果一致。图 1b 是地磁 A_p 指数日均值在 SNOE 卫星观测时段的变化情

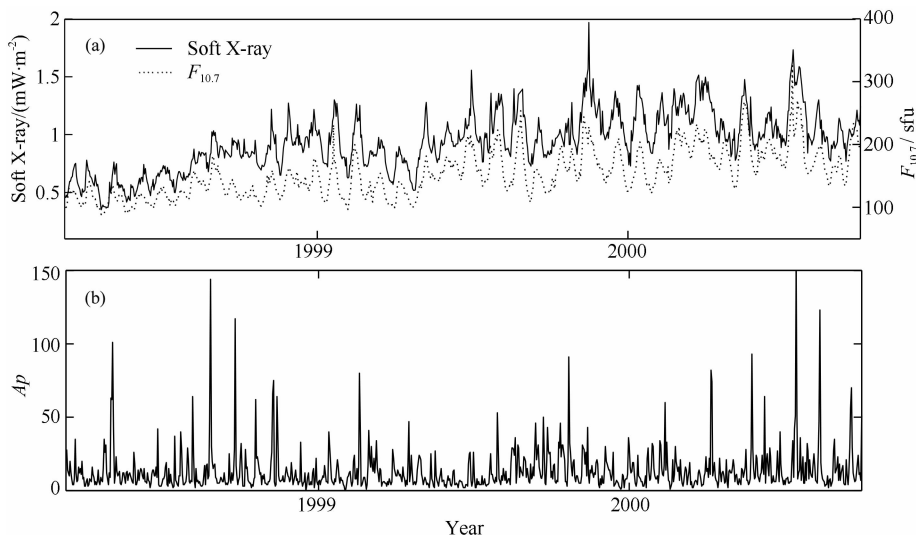


图1 太阳和地磁活动随时间变化

Fig. 1 Solar and geomagnetic indices for the SNOE observation period

况,可以看出在此期间发生了多次大磁暴事件,最大一次日均值超过了150. 太阳 $F_{10.7}$ 及地磁 A_p 指数均来源于 SPIDR (Space Physics Interactive Data Resource, <http://spidr.ngdc.noaa.gov/>).

本文使用的 NO 数据来源于 SNOE 卫星^[17] 上搭载的紫外分光计 (Ultraviolet Spectrometer, UVS) 观测结果,数据由 NSSDC (National Space Science Data Center) 提供. SNOE 卫星于 1998 年 2 月发射升空,近似圆形、太阳同步轨道,轨道高度约为 556 km,能够覆盖南北纬 80° 以内所有区域,星下点地方时约为 10:30 和 22:30,轨道周期为 96 min,该卫星主要科学目的就是观测全球 NO 分布以及相应的能量来源. 数据从 1998 年 3 月 11 日至 2000 年 9 月 30 日,共计 935 天,覆盖高度为 96.67~150 km,间隔为 3.33 km,共计分成 17 个高度层. 本文提到的 NO 均指磁赤道地区,季节定义均以北半球的为准,如夏季即为北半球夏季,其它季节依次类推.

3 结果与分析

3.1 时空分布特征

图 2 为磁赤道地区 NO 数密度随时间和高度分布情况. 从图中可以看出 NO 数密度变化范围在 $0.5 \times 10^7 \sim 17 \times 10^7 \text{ mol/cm}^3$ 之间,最大值和最小值变化幅度可以达到 35 倍; NO 密度存在明显的高度分布特征,从 96.67 km 开始增加,大约在 105~110 km 高度达到最大,随着高度的继续增加而减小; NO 还存在明显的半年变化特征,一般是夏季数值最大,冬

季次之,两个分季最小,在 100 km 以上区域更加明显.

图 3 给出了 4 个高度处 NO 随时间的变化. 从图 3 中可以看出: 100 km 高度处夏季 NO 数密度平均值为 $7 \times 10^7 \text{ mol/cm}^3$, 春秋季平均约为 $5 \times 10^7 \text{ mol/cm}^3$, 冬季约为 $4 \times 10^7 \text{ mol/cm}^3$, 夏季数值大小是春秋分季的 1.4 倍, 是冬季的 1.8 倍, 即夏季高于春秋分季节, 冬季最小, 季节变化最大幅度为 1.8; 116.67 km 高度处夏季 NO 数密度平均值约为 $7 \times 10^7 \text{ mol/cm}^3$, 春秋季平均约为 $5 \times 10^7 \text{ mol/cm}^3$, 冬季约为 $7 \times 10^7 \text{ mol/cm}^3$, 夏季和冬季的数值大小差不多, 春秋季节最小, 季节变化最大幅度为 1.4; 133.33 km 高度处夏季 NO 密度平均值为 $3 \times 10^7 \text{ mol/cm}^3$, 冬季平均值为 $2.5 \times 10^7 \text{ mol/cm}^3$, 春秋季节最小, 平均值为 $2 \times 10^7 \text{ mol/cm}^3$, 季节变化最大幅度为 1.5; 150 km 高度处夏季和冬季 NO 最大, 平均值约为 $2 \times 10^7 \text{ mol/cm}^3$, 春秋季节平均值为 $1 \times 10^7 \text{ mol/cm}^3$, 季节变化最大幅度为 2. 除了具有显著的季节性特征外, 各个高度处 NO 还存在幅度较为明显的周期性变化(例如 27 天等), 这与太阳活动的周期性有关^[18-19]. 值得注意的是, 2000 年 1 月份(即冬季时间) 133.33 km、150.0 km 的 NO 密度甚至高于 1999 年和 2000 年夏季 NO 密度大小, 可以称为“冬季异常”现象, 我们将在后续的工作中对此加以研究.

图 4 给出了 NO 最大值及其所处高度日均值分布情况, 从中可以看出峰值大小变化范围约为 $0.5 \sim 1.5 \times 10^8 \text{ mol/cm}^3$, 且存在明显的季节变化, 即夏季

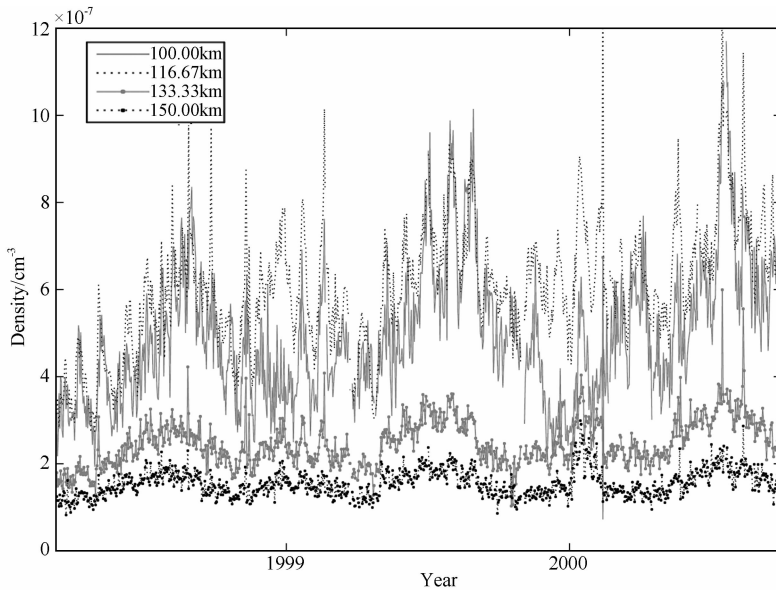


图 3 四个不同高度处 NO 数密度随时间变化

Fig. 3 Time plots of NO number density at four different altitudes

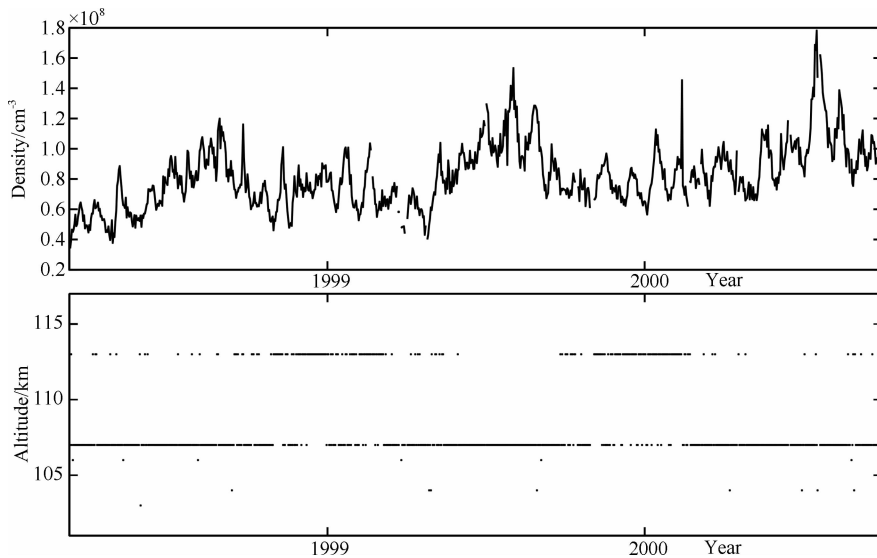


图 4 NO 最大值及其对应的高度

Fig. 4 The number density and altitude of NO peak

最高, 平均值约为 $1 \times 10^8 \text{ mol/cm}^3$, 冬季次之, 平均值约为 $0.8 \times 10^8 \text{ mol/cm}^3$, 春秋分季最小, 平均值约为 $0.6 \times 10^7 \text{ mol/cm}^3$, 季节变化幅度达到了 1.7. 最大值对应的高度基本分布在 2 个位置, 即 107 km 和 113 km, 冬季最大值位置主要位于 113 km, 其它季节基本上位于 107 km 高度, 并且峰值高度不随太阳活动水平变化而变化, 经过计算, 最大值高度平均值约为 107 km, 低于 Barth 等^[7]使用相同数据的研究结果, 因为 Barth 计算的是整个纬圈上的平均值, 而中高纬地区的峰值高度一般要高于低纬地区. 这个结果与 HALOE 观测得到的结果一致^[20], 低于

SME 的观测值^[4].

3.2 太阳和地磁活动的影响

已有研究表明^[6-7, 21], 低纬地区 NO 密度受到太阳活动的强烈控制, 特别是太阳软 X 射线辐射的作用非常明显, 图 5 给出了两者之间的相关系数随不同延迟时间和高度分布. 可以看出: 130~150 km 高度范围内相关系数最大值所对应的延迟时间均为 0, 即当天的太阳活动对 NO 的作用最大; 106.67~126.67 km 高度范围内相关系数最大值所对应的延迟时间均为 -1, 即 NO 对太阳软 X 射线的最佳响应滞后 1 天时间; 103.33 km 以下高度最佳延迟时

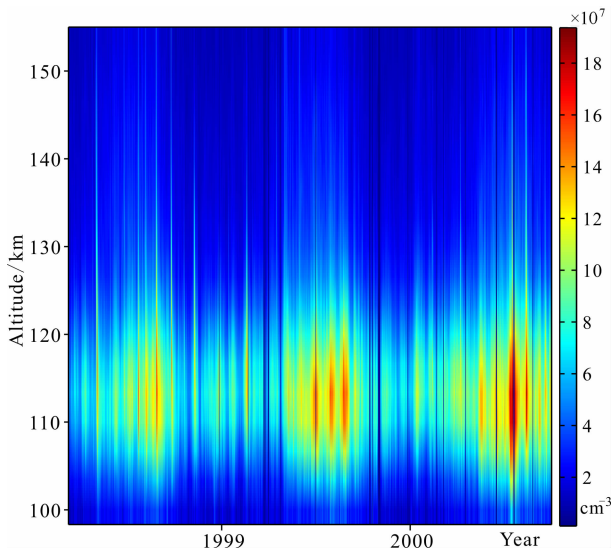


图 2 NO 随高度和时间变化

Fig. 2 Time-altitude plots of daily NO

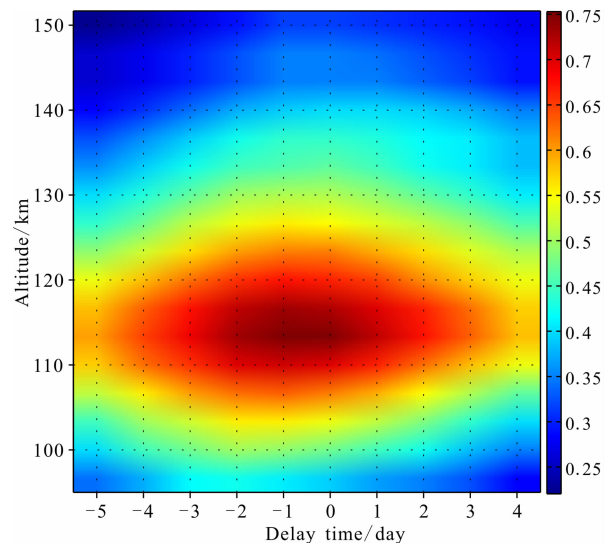


图 5 NO 密度和太阳软 X 射线的相关关系

Fig. 5 The relationship between NO and solar soft X-ray

间为 2 天,即太阳软 X 射线 2 天后对此高度 NO 的作用效果最为明显;相关系数最大值为 0.7531,位于 113.33 km 高度处,而该高度处延迟时间为 0 时的相关系数为 0.749.

地磁活动对高纬地区 NO 的作用非常明显^[8,12,22-24],随着地磁扰动由高纬地区向赤道方向传播,低纬地区也可能出现一定的响应,也就是说赤道地区的 NO 与地磁活动存在一定的相关性.图 6 给出了地磁 Ap 指数和 NO 相关关系的时空分布.从色条可以看出地磁活动与 NO 日均值的相关系数小于太阳软 X 射线.136.67 km 高度以上区域相关系数最大值的延迟时间为 0,113.67~133.67 km 高度区域延迟时间为 -1,110 km 以下为 -2,即 NO

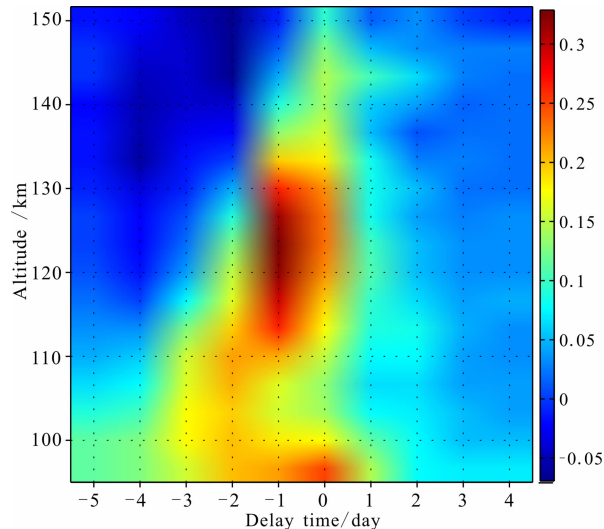


图 6 NO 和地磁 Ap 指数的相关关系

Fig. 6 Same as Fig. 5, but for geomagnetic Ap index

对地磁 Ap 指数的最佳响应时间为滞后 2 天.相关系数最大值为 0.3287,对应高度为 123.33 km,滞后时间为 1 天.

为了更好地说明太阳和地磁活动对赤道地区 NO 密度的影响,我们分成太阳高活动(X-ray > 1 mW/m²)、中等活动(X-ray < 1 mW/m²)和地磁平静(Ap < 15)、扰动(Ap > 15)四种情况分别组合讨论 NO 的剖面分布情况,结果如图 7 所示.经过统计分析,图 7 中四种情况下有效数据的个数分别为 117,238,139 和 441,说明结果具有很高的可信度.从图中可以看出太阳和地磁活动对赤道低热层 NO 都产生影响,100 km 高度以下作用效果不明显,在 NO 峰值高度附近区域太阳软 X 射线对 NO 的影响明显强于地磁活动.例如 107 km 高度处地磁平静时太

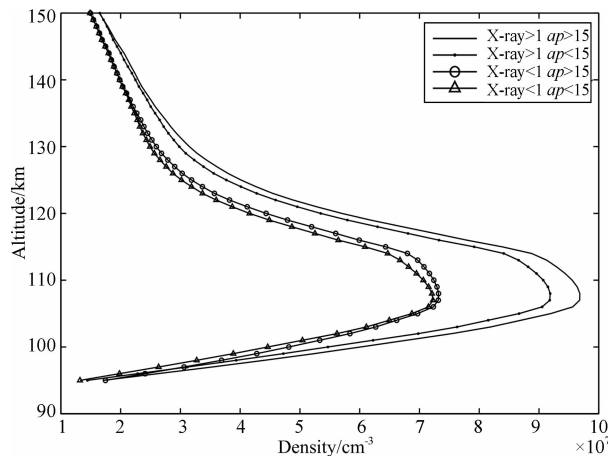


图 7 不同太阳和地磁活动水平下 NO 密度随高度分布情况

Fig. 7 Altitude profile of NO number density under different solar and geomagnetic activities

阳活动对 NO 的影响幅度为 27%，地磁活跃时达到了 34%，而太阳活动高水平条件下地磁活动的影响幅度为 5%，低水平时仅为 1% 左右。130 km 高度以上区域太阳和地磁活动的影响相对较小，特别是相同太阳活动水平下，地磁活动的影响几乎可以忽略。总的来看，太阳活动对磁赤道地区低热层 NO 的影响作用远大于地磁活动，也与图 5 和图 6 的结论一致。

从图 3 已经可以看出 NO 存在一定的变化趋势和周期性变化，我们选取 110 km 高度处的 NO 对此进行研究，结果如图 8 所示。图 8a 实线为 NO 日变化情况，虚线为 10 阶多项式拟合结果，可以看出两者具有很好的一致性，110 km 高度处 NO 季节特征明显，夏季数值大小高于其它季节。图 8b 实线为太阳软 X 射线流量日变化分布，虚线为 2 阶多项式拟合结果，可以看出太阳活动水平存在一个上升的变化趋势。图 8c 虚线为 NO 拟合结果相对平均值变化情况，实线为太阳软 X 射线流量拟合结果相对平均值变化情况，可以看出随着太阳活动水平的不断增加，NO 数密度也呈现出相应的增长趋势，即太阳活动长期变化也引起 NO 密度出现相应的长期变化。图 8 黑线和浅灰线分别为 NO 数密度和太阳软 X 射线流量剔除变化趋势以后偏离平均值的结果，可以看出两者不管是变化趋势还是变化幅度都具有很好的一致性，说明太阳活动中期变化(27 天左右)控制 NO 密度产生相同的周期变化。

为了进一步研究太阳软 X 射线与 NO 的关系，将两者的统计结果示于图 9。图 9 左侧三幅图为夏季 NO 的统计结果，106.67 km 和 126.67 km 处太阳软 X 射线与 NO 呈“线性”关系，相关系数分别为 0.8570 和 0.7345，146.67 km 高度出现“放大”现象，即随着太阳软 X 射线流量的增加，NO 数密度的增加速度加快。右侧三幅图为所有数据的统计结果，可以看出在 106.67 km 处太阳软 X 射线与 NO 呈“线性”关系，相关系数为 0.6263，126.67 km 和 146.67 km 处表现为“饱和”关系，即 NO 数密度随着太阳软 X 射线流量的增加而增加，但是当流量达到一定阈值后，NO 不再增长。在电离层里也可以看到类似的统计结果^[25-27]。总的来说，夏季期间相同高度的 NO 与太阳软 X 射线流量的相关性要高于平均值，更高于其它季节。

3.3 事件研究

为了研究短期内太阳和地磁活动对 NO 分布的影响，我们选取两个事件分别进行讨论。图 10 为两个事件期间太阳和地磁指数的变化情况。图 10a 为事件 1，太阳软 X 射线流量在第 616 天时达到 1.969 mW/m^2 ，是 935 天内最大值，明显高于前后几天的流量大小，太阳软 X 射线比月均值增加约 25%，而与此对应的是地磁 A_p 指数均小于 20，基本处于平静状态，因此可以认定此时地磁的影响可以忽略，只剩下太阳辐射对 NO 的作用；图 10b 为事件 2，第 858 天地磁 A_p 指数为 164，达到特大磁暴强度，

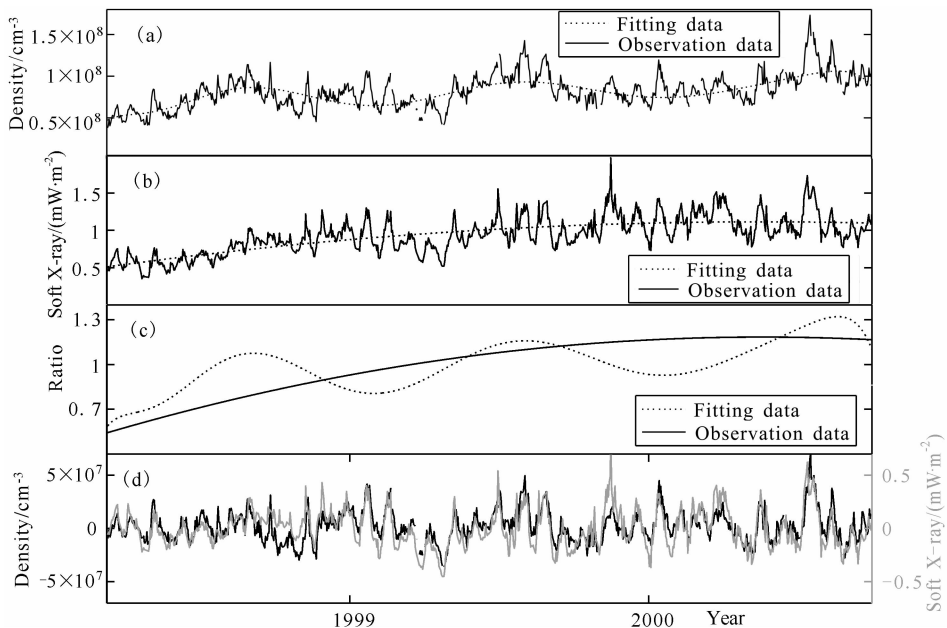


图 8 110 km 高度处 NO 密度(a)、太阳软 X 射线(b)、长期变化趋势(c)以及周期性特征(d)分布
Fig. 8 The distribution of NO number density, solar soft X-ray, varied trend and period variations

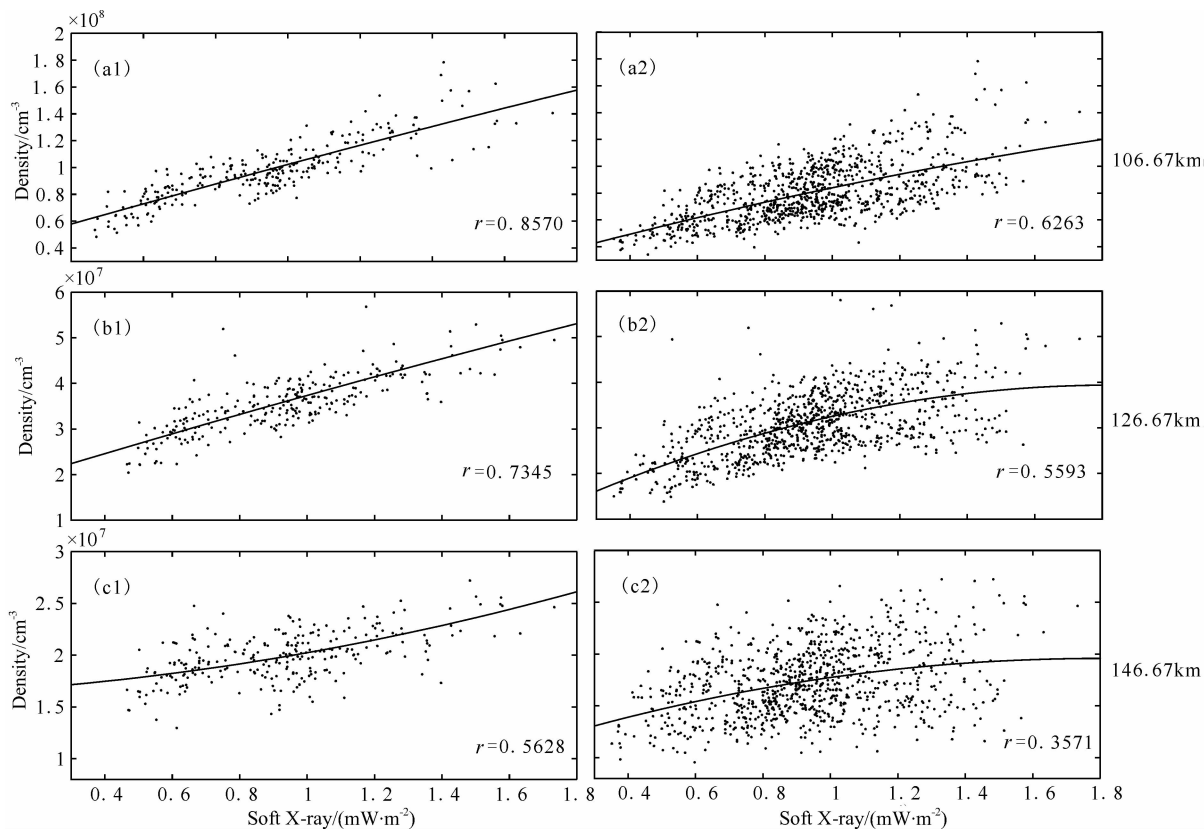


图 9 太阳软 X 射线流量与不同高度 NO 数密度统计关系

Fig. 9 The relationship between solar X-ray and NO density (Summer period (left) and all date (right))

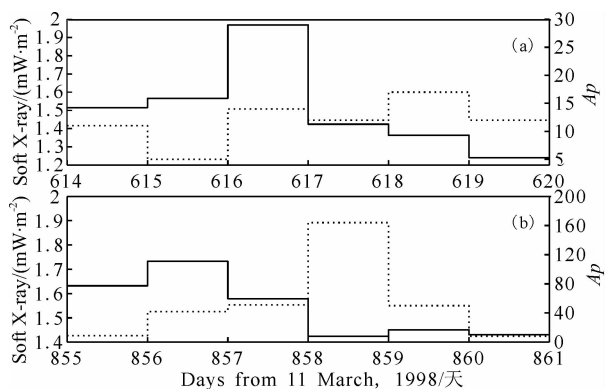


图 10 两次事件期间太阳软 X 射线流量(实线)和地磁 Ap 指数(虚线)变化

Fig. 10 The solar soft X-ray (real line) and geomagnetic Ap index (dashed) for two examples

太阳软 X 射线流量在此期间基本维持在月均值附近,因此可以认定此时太阳辐射的作用可以近似忽略,剩下地磁活动对 NO 的影响为主。

图 11 给出了两个事件 NO 随高度分布情况. 图 11a 为事件 1 前后共 7 天内的变化,可以看出 NO 在太阳软 X 射线流量增加(616 天)前后并没有出现明显变化,特别是峰值高度以上区域呈现一致的变化,NO 在峰值区出现 $0.5 \times 10^7 \text{ mol/cm}^3$ 的增加,增

加幅度约为 6%,远小于太阳软 X 射线增加幅度,峰值区以下发生一定幅度的增加. 图 11b 为事件 2 前后共 7 天内 NO 峰值高度的变化,可以看出 NO 在地磁剧烈扰动前后发生明显变化,第 855 天至 857 天时间内 NO 剖面分布基本一致;第 858 天 100 km 至峰值区域 NO 出现显著增加,其中峰值增加了 $3 \times 10^7 \text{ mol/cm}^3$,增加幅度约为 22%,峰值以上区域没有发生变化;第 856 天即磁暴发生一天后,NO 峰值高度增加了约 5 km,值得注意的是峰值以上区域出现显著增加,120 km 高度 NO 数密度由 $4.649 \times 10^7 \text{ mol/cm}^3$ 增加到 $8.958 \times 10^7 \text{ mol/cm}^3$,增加幅度达 93.94%;第 860 天 NO 峰值以上区域恢复到正常水平,峰值则增加到 $1.783 \times 10^8 \text{ mol/cm}^3$,比平均值增加了约 28%,而 103.33 km 高度处比平均值增加的幅度达到 41%,即峰值以下区域发生较大幅度变化;第 861 天 NO 剖面分布恢复到正常水平. 总体来说地磁活动对 NO 日变化作用非常明显。

4 结 论

本文使用 SNOE 卫星观测的 935 天 NO 密度日均值数据,研究了太阳和地磁活动对磁赤道地区

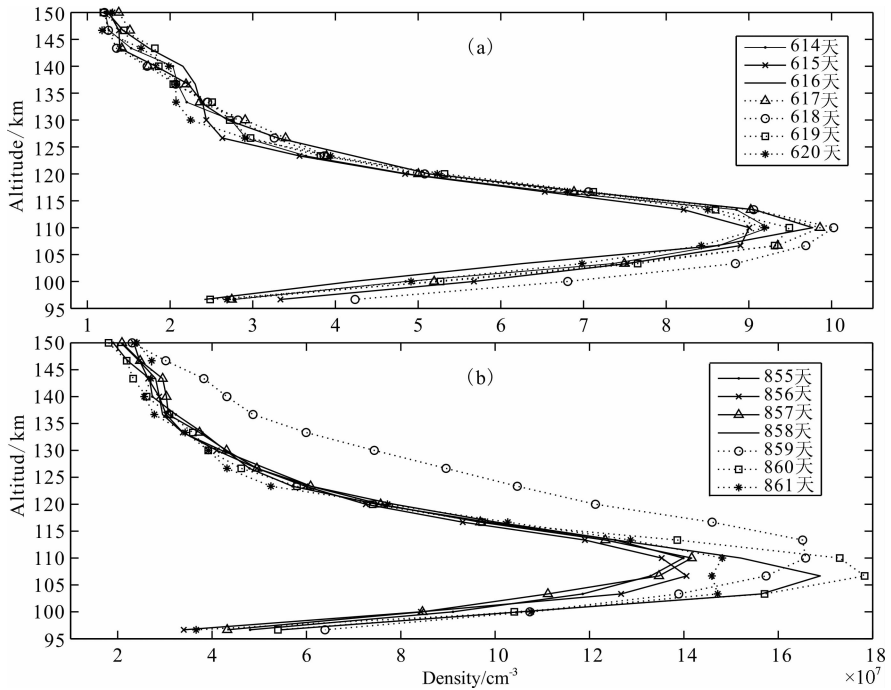


图 11 两次事件期间 NO 数密度高度剖面分布

Fig. 11 Same as Fig. 10, but for altitude profiles of NO

低热层 NO 密度的影响, 得出了以下结论:

(1) NO 密度存在明显的高度分布特征, 从 96.67 km 开始增加, 大约在 105~110 km 高度达到最大, 随着高度的继续增加而减小; NO 还存在明显的季节变化特征, 一般是夏季数值最大, 冬季次之, 两个分季最小, 在 100 km 以上区域更加明显; 2000 年 1 月份 133.33 km、150.0 km 的 NO 密度甚至高于夏季, 即“冬季异常”现象。

(2) NO 密度峰值大小变化范围约为 $(0.5 \sim 1.5) \times 10^8 \text{ mol/cm}^3$, 且存在明显的季节变化, 即夏季最高, 冬季次之, 春秋分季最小, 季节变化幅度达到了 1.7; 峰值高度基本分布在 107 km 和 113 km 高度处, 平均值约为 107 km, 冬季最大值位置主要位于 113 km, 且峰值高度分布特征不随太阳活动而变化。

(3) 太阳软 X 射线与 NO 日均值相关性在 130~150 km 高度范围内相关系数最大值所对应的延迟时间均为 0, 106.67~126.67 km 高度范围内相关系数最大值所对应的延迟时间均为 -1, 103.33 km 以下高度最佳延迟时间为 2 天; 相关系数最大值为 0.7531, 位于 113.33 km 高度处; 地磁活动与 NO 日均值相关系数小于太阳软 X 射线; 136.67 km 高度以上区域相关系数最大值的延迟时间为 0, 113.67~133.67 km 高度区域最佳延迟时间为 1 天, 110 km 以下为 2 天; 相关系数最大值为 0.3287, 对应高度为 123.33 km, 滞后 1 天时间。

(4) 太阳活动长期变化可以引起 NO 密度出现相应的长期变化, 并且中尺度的时间变化 (27 天左右) 也控制 NO 密度产生相同的周期变化; 太阳软 X 射线与 NO 密度的统计关系在不同高度和季节呈现“线性”、“饱和”和“放大”结果, 且夏季期间相同高度两者的相关性大小高于平均值, 更高于其它季节的。

总的来看, 从长期变化趋势和中期变化尺度上说, 太阳活动对磁赤道地区低热层 NO 密度的影响远大于地磁活动, 但地磁活动对 NO 短期变化作用非常明显。

致谢 感谢 NSSDC 提供的 NO 密度和太阳软 X 射线数据, 以及 SPIDR 提供的地磁 A_p 指数数据。

参考文献 (References)

- [1] Cravens T E, Stewart A I. Global morphology of nitric oxide in the lower E region. *Journal of Geophysical Research*, 1978, 83(A6): 2446-2452.
- [2] Barth C A, Rusch D W, Stewart A I. The UV nitric-oxide experiment for Atmosphere Explorer. *Radio Science*, 1973, 8(4): 379-385.
- [3] Barth C A, Tobiska W K, Siskind D E, et al. Solar-terrestrial coupling: Low-latitude Thermospheric Nitric Oxide. *Geophysical Research Letters*, 1988, 15(1): 92-94.
- [4] Barth C A. Nitric oxide in the lower thermosphere. *Planetary and Space Science*, 1992, 40(2-3): 315-336.
- [5] Barth C A. Reference models for thermospheric nitric oxide. *Advances in Space Research*, 1990, 10(6): 103-115.

- [6] Barth C A, Bailey S M, Solomon S C. Solar-terrestrial coupling: Solar soft x-rays and thermospheric nitric oxide. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26(9): 1251-1254.
- [7] Barth C A, Mankoff K D, Bailey S M, et al. Global observations of nitric oxide in the thermosphere. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(A1): 1027, doi: 10.1029/2002JA009458.
- [8] Barth C A, Lu G, Roble R G. Joule heating and nitric oxide in the thermosphere. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114(A5): A05301, doi: 10.1029/2008JA013765.
- [9] Barth C A. Joule heating and nitric oxide in the thermosphere, 2. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115: A10305, doi: 10.1029/2010JA015565.
- [10] Sætre C, Stadsnes J, Nesse H, et al. Energetic electron precipitation and the NO abundance in the upper atmosphere: A direct comparison during a geomagnetic storm. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109: A09302, doi: 10.1029/2004JA010485.
- [11] Solomon S C, Barth C A, Bailey S M. Auroral production of nitric oxide measured by the SNOE satellite. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26(9): 1259-1262.
- [12] Lu G, Mlynczak M G, Hunt L A, et al. On the relationship of Joule heating and nitric oxide radiative cooling in the thermosphere. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115: A05306, doi: 10.1029/2009JA014662.
- [13] Fang H X, Weng L B, Sheng Z. Variations in the thermosphere and ionosphere response to the 17-20 April 2002 geomagnetic storms. *Advances in Space Research*, 2012, 49(10), 1529-1536, doi: 10.1016/j.asr.2012.02.024.
- [14] 翁利斌, 方涵先, 季春华等. 基于卫星加速度数据反演的热层大气密度与 NRLMSISE-00 模式结果的比较研究. *空间科学学报*, 2012, 32(5): 713-719.
Weng L B, Fang H X, Ji C H, et al. Comparison between the CHAMP/STAR derived thermospheric density and the NRLMSISE-00 model. *Chinese Journal of Space Science* (in Chinese), 2012, 32(5): 713-719.
- [15] 牛俊, 方涵先, 翁利斌. 太阳活动与热层大气密度的相关性研究. *空间科学学报*, 2013, 待刊.
Niu J, Fang H X, Weng L B. Correlations between solar activity and thermospheric density. *Chinese Journal of Space Science* (in Chinese), 2013, in press.
- [16] Bailey S M, Woods T N, Barth C A, et al. Measurements of the solar soft X-ray irradiance by the Student Nitric Oxide Explorer: First analysis and underflight calibrations. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105(A12): 27179-27193.
- [17] Solomon S C, Barth C A, Axelrad P, et al. The student nitric oxide explorer. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, 1996, 2810, 121-132.
- [18] Shindell D, Rind D, Balachandran N, et al. Solar cycle variability, ozone, and climate. *Science*, 1999, 284(5412): 305-308.
- [19] Webb D F, Howard R A. The solar cycle variation of coronal mass ejections and the solar wind mass flux. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99(A3): 4201-4220.
- [20] Siskind D E, Barth C A, Russell J M III. A climatology of nitric oxide in the mesosphere and thermosphere. *Advances in Space Research*, 1998, 21(10): 1353-1362.
- [21] Siskind D E, Barth C A, Cleary D D. The possible effect of solar soft X-rays on thermospheric nitric oxide. *Journal of Geophysical Research*, 1990, 95(A4): 4311-4317.
- [22] Siskind D E, Barth C A, Roble R G. The response of thermospheric nitric oxide to an auroral storm; 1. Low and middle latitudes. *Journal of Geophysical Research*, 1989, 94(A12): 16885-16898, doi: 10.1029/JA094iA12p16885.
- [23] Siskind D E, Barth C A, Evans D S, et al. The response of thermospheric nitric oxide to an auroral storm, 2. Auroral latitudes. *Journal of Geophysical Research*, 1989, 94(A12): 16899-16911.
- [24] Crowley G, Ridley A, Winningham D, et al. Nitric oxide variations in the mesosphere and lower thermosphere during the November 1993 storm period. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(A11): 26395-26407.
- [25] 翁利斌, 方涵先, 张阳等. Athens 地区电离层 TEC、NmF₂ 以及板厚. *地球物理学报*, 2012, 55(11): 3558-3567.
Weng L B, Fang H X, Zhang Y, et al. Ionospheric TEC, NmF₂ and slab thickness over the Athens region. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(11): 3558-3567.
- [26] Liu L B, Wan W X, Chen Y D, et al. Solar activity effects of the ionosphere: A brief review. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(12): 1202-1211, doi: 10.1007/s11434-010-4226-9.
- [27] Liu L, Wan W, Yue X, et al. The dependence of plasma density in the topside ionosphere on the solar activity level. *Annals of Geophysics*, 2007, 25(6): 1337-1343.

(本文编辑 胡素芳)