

利用 GOME 卫星资料分析北京大气 NO₂ 污染变化*

江文华¹⁾²⁾ 马建中¹⁾ 颜 鹏¹⁾ Andreas Richter³⁾

John P. Burrows³⁾ Hendrik Nüß³⁾

¹⁾(中国气象科学研究院,北京 100081)

²⁾(重庆市气象台,重庆 401147)

³⁾(Institute of Environmental Physics, University of Bremen, Bremen, D 28334, Germany)

摘 要

利用 GOME(Global Ozone Monitoring Experiment,全球臭氧监测实验)1996 年 1 月—2002 年 12 月 NO₂ 对流层柱浓度月平均卫星遥感资料以及根据北京市 2001 年 1 月 1 日—2002 年 12 月 31 日 NO₂ 污染指数数据计算出的地面 NO₂ 日均质量浓度值,分析了北京市城市大气 NO₂ 污染变化的季节变化特征以及年际变化,并将 2001 年 1 月—2002 年 12 月北京上空 GOME NO₂ 对流层柱浓度月平均值变化与北京市地面 NO₂ 日均质量浓度月平均值变化进行了比较,结果表明两者随时间的变化趋势具有较好的一致性,据此可以利用 GOME NO₂ 对流层柱浓度月平均卫星遥感资料来分析特定区域大气 NO₂ 的季节变化和年际变化。

关键词:卫星遥感; GOME; NO₂ 空气污染指数; 城市环境

引 言

二氧化氮(NO₂)是对流层一种重要的痕量气体,它是臭氧及其他光化学二次污染物(如 PAN、二次气溶胶等)最重要的前体物之一,是形成硝酸性酸雨、酸雾以及光化学烟雾的主要污染物,主要影响呼吸系统,可引起支气管炎和肺气肿等疾病,对植物生长有不良影响,对大气环境、生态环境、人体健康都有很大的危害^[1]。从辐射来说,NO₂ 对光的吸收及大气能见度有着直接影响^[2]。NO₂ 在对流层中变化很大,主要来自化石燃料燃烧、生物质燃烧、氨的氧化、土壤排放、闪电、平流层输送^[3-4]。燃烧过程产生的含氮物质主要是一氧化氮(NO),但在大气中 NO 和 NO₂ 在臭氧和自由基的作用下可以相互转化,并在日光照射下很快达到稳态平衡^[5]。

近年来,随着我国产业结构由粗放型向集约型的转变和能源消耗结构的优化调整,能源消耗导致的 NO_x 排放不断增加的趋势有所缓解,但 NO_x 排在行业、燃料及地区分布上极为不平衡的特征并没

有得到根本改变,排放 NO_x 较多的依然是工业、电力和交通运输部门,占排放总量的 90% 以上,并且交通运输排放的 NO_x 无论是绝对量还是所占比例均在逐年稳步增长,全国由交通运输排放的 NO_x 从 1995 年的 1.17 Mt 增加到 1998 年的 1.45 Mt,排放比例也由 10.4% 快速上升到 13.0%。随着经济的持续发展,机动车保有量将持续快速增长,尤其是私人汽车数量的迅速增加,必将使交通运输对 NO_x 的贡献率越来越大^[6],其对环境的影响也越来越严重。研究表明^[7],北京 2000 年机动车 NO_x 排放量已经超过地表人为污染源 NO_x 总排放量的一半。据统计,北京市机动车保有量 1993 年约为 71 万辆,2003 年突破了 212 万辆,10 年增长了近 200% (<http://www.chinahighway.com/news/2004/79568.php>),机动车排放的迅速增加,势必对北京市 NO_x 污染以及 O₃ 污染造成重要的影响。2001 年 1 月—3 月 3 个不同时段在北京城市地区大气边界层进行的大气化学和气象现场观测表明^[8],北京城市冬季、初春低层大气中主要的气体污染物为 NO_x,在逆温、大气层结稳定天气条件下,易发生严重的 NO_x 污染,2 月

* 国家自然科学基金重点项目“华北地区大气污染对气溶胶和云微物理特征的影响”(40433008)和科技部国家重大基础规划研究项目“首都北京周边地区大气、水、土壤环境污染机理及调控原理”(G1999045700)共同资助。

2005-01-27 收到,2005-05-07 收到再改稿。

19—22日出现逆温天气,车道沟莲花小区楼顶测点的观测显示,在这次严重空气污染过程中,该测点 NO_x 浓度长时间维持在 150×10^{-9} 以上,在21日13:00高达 298.8×10^{-9} ;在1月、2月观测时段车道沟一测点 NO_2 浓度最高值超过了 110×10^{-9} ,高浓度的 NO_x 污染势必对北京城市环境、人体健康造成严重危害。

卫星遥感资料具有覆盖范围广、实时、连续、分辨率高等优点,目前已广泛应用于气象、环境、海洋等领域。GOME NO_2 对流层柱浓度卫星资料是德国 Bremen 大学环境科学学院研究人员通过对搭载于欧洲空间局发射的 ERS-2 遥感卫星上的 GOME 仪器 425~450 nm 波段的光谱数据进行反演得到的。这些资料有很高的科学应用价值,如可以利用它们研究对流层 NO_2 分布和大尺度输送,根据区域和季节变化研究各种人为源和自然源对对流层 NO_2 量的影响以及对全球化学-气候模式验证^[9-12]。

本文利用北京市环保局公布在互联网(<http://www.bjepb.gov.cn>)上的 NO_2 污染指数以及德国 Bremen 大学环境科学学院提供的 GOME NO_2 对流层柱浓度月平均资料(第二版)(<http://www-iup.physik.uni-bremen.de/gome/>),对北京市近年来大气 NO_2 污染变化进行了研究。

1 北京市地面 NO_2 日均质量浓度变化

空气污染指数(air pollution index: API)是一种定量反映和评价空气质量状况的指标,是将常规监测的几种空气污染物简化成为单一的数值形式,是表征空气污染程度的一种方法,适合于表示城市的短期空气质量状况和变化趋势^[13]。我国城市空气质量日报 API 分级标准如表 1(<http://www.zhb.gov.cn/quality/background.php>)。

表 1 我国城市空气污染指数对应的污染物浓度限值

污染指数 API	SO_2 (日均值)	NO_2 (日均值)	PM_{10} (日均值)	CO(小时均值)	O_3 (小时均值)
50	0.050	0.080	0.050	5	0.120
100	0.150	0.120	0.150	10	0.200
200	0.800	0.280	0.350	60	0.400
300	1.600	0.565	0.420	90	0.800
400	2.100	0.750	0.500	120	1.000
500	2.620	0.940	0.600	150	1.200

污染指数 API 的计算如下^[13]:

设 I 为某污染物的污染指数, C 为该污染物的浓度,则

$$I = \frac{I_{\text{大}} - I_{\text{小}}}{C_{\text{大}} - C_{\text{小}}}(C - C_{\text{小}}) + I_{\text{小}} \quad (1)$$

式(1)中, $C_{\text{大}}$ 与 $C_{\text{小}}$ 是在 API 分级限值表(表 1)中最接近 C 值的两个值, $C_{\text{大}}$ 为大于 C 的限值, $C_{\text{小}}$ 为小于 C 的限值; $I_{\text{大}}$ 与 $I_{\text{小}}$ 是在 API 分级限值表(表 1)中最接近 I 值的两个值, $I_{\text{大}}$ 为大于 I 的值, $I_{\text{小}}$ 为小于 I 的值。

根据表 1 中 NO_2 污染指数对应的浓度限值和污染指数的计算方法,推导下列分段函数,通过 NO_2 污染指数计算地面 NO_2 日均质量浓度值(单位: $\mu\text{g}/\text{m}^3$):

$$\begin{aligned} C &= 1.6I & 0 < I \leq 50 \\ C &= 0.8I + 40 & 50 < I \leq 100 \\ C &= 1.6I - 40 & 100 < I \leq 200 \end{aligned}$$

$$C = 2.85I - 290 \quad 200 < I \leq 300 \quad (2)$$

$$C = 1.85I + 10 \quad 300 < I \leq 400$$

$$C = 1.9I - 10 \quad 400 < I \leq 500$$

从式(2)可以看出, NO_2 污染指数与其质量浓度呈线性正相关关系。

根据北京市 2001 年 1 月 1 日—2002 年 12 月 31 日 NO_2 污染指数数据计算这段时段地面 NO_2 日均质量浓度值,作时间序列图。北京市 2001 年、2002 年地面 NO_2 日均质量浓度日变化如图 1 所示。

图 1 显示,北京市 2001 年地面 NO_2 日均质量浓度超过 $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的重污染日为 16 d,出现在 1 月 2 月 3 月、10 月、11 月、12 月,其中 10 月、11 月地面 NO_2 日均质量浓度超过 $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的日数分别为 5 d 和 6 d,全年最高值出现在 2 月 19 日,达到 $180.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (约为 88.0×10^{-9} ,标准条件下, $1 \mu\text{g}/\text{m}^3 \approx 0.487 \times 10^{-9}$),2002 年北京市地面 NO_2 日均质量浓度超过 $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的日数为 28 d,出现

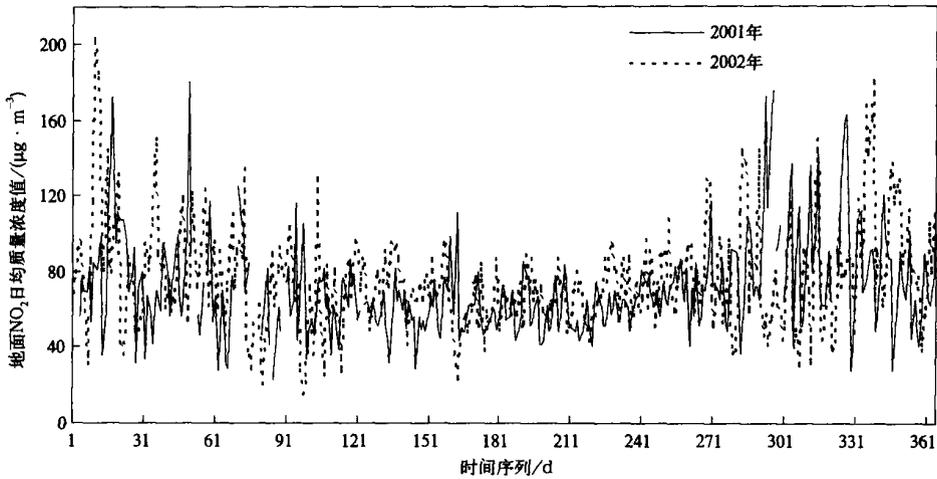


图1 北京市 2001 年、2002 年地面 NO₂ 日均质量浓度日变化图

在1月、2月、3月、4月、9月、10月、11月、12月,其中1月、12月地面 NO₂ 日均质量浓度超过 120 μg/m³ 的日数分别为 6 d、8 d,全年最高值出现在1月10日,达到 203.2 μg/m³ (约为 98.9 × 10⁻⁹)。与2001年相比,北京市2002年 NO₂ 重污染日数有所增加,其重污染程度有所加重,重污染出现的时间范围有所扩大。大气 NO₂ 是一种高度活性的气体,其浓度主要受局地源排放、大气扩散、太阳辐射影响。北京市大气 NO₂ 重污染多出现在1月、2月、11月、12月,与其特有的地形特征、气候特征密切相关。北京市位于华北平原的北部边缘,地处太行山脉、燕山山脉与华北平原的交接地带,西部、北部和东北部三面环山,东部和南部为地势比较平坦的平原,山区约占全市面积的 62%,平原约占 38%,为半干旱、半湿润的地区,具有典型的暖温带大陆性季风气候特征,稳定类型天气出现频率较高,受地面辐射、地形气候和天气形势的影响,冬春季易出现持续时间较长的强逆温^[14],当强逆温生成时,湍流运动受到抑制,大气扩散能力弱,污染物难以扩散。一方面,1月、2月、11月、12月北京处于采暖期,煤使用量较非采暖期有较大的增加,使得 NO_x 的排放量大为增加,另一方面,这段时间太阳辐射较弱,光化学反应较为缓慢,与夏秋相比 NO₂ 寿命更长,加上这段时间低空易出现较厚的逆温层,因此易出现严重 NO₂ 污染。

北京市2001年、2002年地面 NO₂ 日均质量浓度月平均变化如图2所示。

从北京市2001年、2002年地面 NO₂ 日均质量浓度月平均变化上看,2001年北京市地面 NO₂ 污染程度在1月、10月、11月较重,在5月、6月、7月、

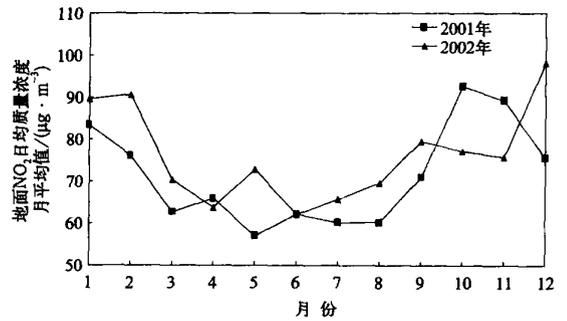


图2 北京市 2001 年、2002 年地面 NO₂ 日均质量浓度月平均变化图

8月相对较轻,2002年北京市地面 NO₂ 污染程度在1月、2月、12月较重,在4月、6月、7月相对较轻。2002年12月北京大气 NO₂ 污染总体上比较严重。

2 北京上空 NO₂ 对流层柱浓度月平均变化

GOME NO₂ 对流层柱浓度卫星资料是德国 Bremen 大学环境学院研究人员通过对搭载于欧洲空间局发射的 ERS-2 上遥感卫星的 GOME 仪器 425 ~ 450 nm 波段的光谱数据进行反演得到的。ERS-2 遥感卫星于 1995 年 4 月 21 日发射,采用了先进的微波遥感技术来获取全天时的图像,比起传统的光学遥感图像有着独特的优点,它采用椭圆形太阳同步轨道,卫星高度约为 777 km,轨道倾角为 98.52°,节点周期为 100.465 min,每天运行轨道数为 14.3,降交点的当地时间为 10:30,它载有主动微波装置(AMI)、雷达高度计(RA)、沿轨迹扫描辐射

计(ATSR-M)、全球臭氧监测实验仪器(GOME)、精确测距设备(PRARE)和激光回反射装置(LRR)(<http://earth.esa.int/ers/satcon/>)。GOME仪器由欧洲航天局开发,用于监测大气O₃、NO₂等痕量或微量气体以及气溶胶含量和分布。

根据北京的地理位置,我们选择了GOME NO₂对流层柱浓度月平均资料中心在39.75°N,116.75°E格点的数据来反映北京市大气NO₂污染的变化。

NO₂是一种高度活性的污染气体,主要存在于排放源的附近以及低层大气中,其日均质量浓度反映了局地地面大气NO₂污染程度,NO₂对流层柱浓度值则反映了局地低层大气NO₂污染程度。为了

反映GOME NO₂对流层柱浓度值与地面NO₂日均质量浓度值之间的相关性,我们将2001年1月—2002年12月北京上空GOME NO₂对流层柱浓度月平均变化与北京市地面NO₂日均质量浓度的月平均变化进行了比较,见图3。从图3可以看出,两曲线变化趋势具有较好的一致性。

图4为2001年1月—2002年12月北京上空GOME NO₂对流层柱浓度月平均值与北京市地面NO₂日均质量浓度月平均值的相关性分析图。从图4可以看出,两者呈现较好的正相关关系,相关系数达0.86。据此可以利用该卫星遥感资料来分析特定区域大气NO₂污染的季节变化和年际变化。

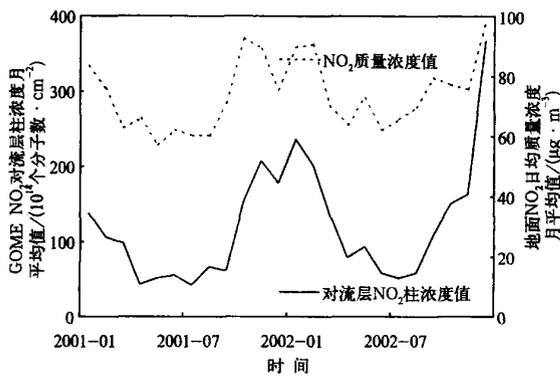


图3 2001年1月—2002年12月北京上空GOME NO₂对流层柱浓度月平均变化与北京市地面NO₂日均质量浓度月平均变化的比较图

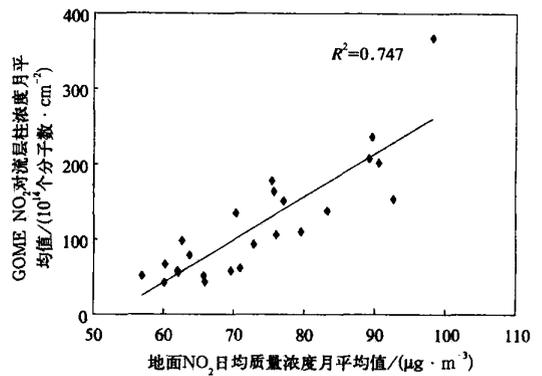


图4 2001年1月—2002年12月北京上空GOME NO₂对流层柱浓度月平均值与北京市地面NO₂日均质量浓度月平均值相关性分析图

1996年1月—2002年12月北京上空GOME NO₂对流层柱浓度月平均变化如图5所示。由图5可以看到,北京上空GOME NO₂对流层柱浓度月平均值呈现明显的季节变化,在1月、2月、11月、12月较高,在6月、7月、8月较低。从其年际变化来看,北京市大气NO₂污染程度在1996年—2002年总体上呈现加重趋势,与1996年相比,1997年大气NO₂污染变化不大,1998年、1999年大气NO₂污染总体上呈现加重趋势,1998年12月、1999年12月北京市发生了严重大气NO₂污染,与1999年相比,2000年、2001年大气NO₂污染总体上有所改善,与2001相比,2002年大气NO₂污染总体上有所加重,2002年12月北京市发生了严重NO₂污染。与此前北京上空GOME NO₂对流层柱浓度月平均值最大值(1999年12月月平均值 2.5×10^{16} 个分子数·cm⁻²)

以及2002年11月月平均值(1.6×10^{16} 个分子数·cm⁻²)相比,2002年12月的月平均值(3.7×10^{16} 个分子数·cm⁻²)分别增加了45%、125%,其原因有待进一步研究。

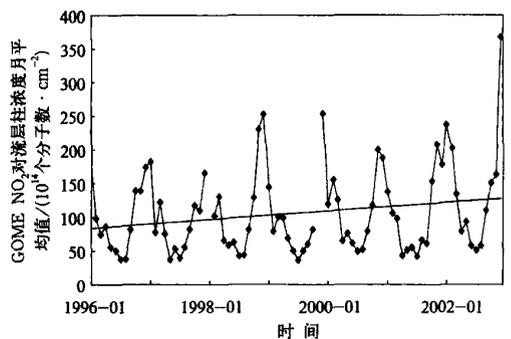


图5 1996年1月—2002年12月北京上空GOME NO₂对流层柱浓度月平均变化图

3 结 论

根据北京市 2001 年、2002 年 NO₂ 污染指数数据计算出的地面 NO₂ 日均质量浓度值分析了北京市大气 NO₂ 污染的日变化和季节变化,并将 2001 年 1 月—2002 年 12 月北京上空 GOME NO₂ 对流层柱浓度月平均变化与北京市地面 NO₂ 日均质量浓度月平均变化进行了比较,结果表明,两者随时间的变化趋势具有较好的一致性,相关性分析表明,两者呈现较好的正相关关系,相关系数达 0.86,据此可以利用该卫星遥感资料来分析特定区域大气 NO₂ 的季节变化和年际变化。

从 1996 年 1 月—2002 年 12 月北京上空 GOME NO₂ 对流层柱浓度月平均变化来看,1996 年—2002 年北京市大气 NO₂ 污染程度总体呈现加重趋势,1998 年 12 月、1999 年 12 月、2002 年 12 月北京市发生了严重 NO₂ 污染。与此前北京上空 GOME NO₂ 对流层柱浓度月平均值的最大值(2.5×10^{16} 个分子数·cm⁻²)以及 2002 年 11 月月平均值(1.6×10^{16} 个分子数·cm⁻²)相比,2002 年 12 月月平均值(3.7×10^{16} 个分子数·cm⁻²)分别增长了 45%,125%,其原因需作进一步深入研究。

参 考 文 献

- [1] 任剑锋,王增长,牛志卿. 大气中氮氧化物的污染与防治. 科技情报开发与经济,2003,13(5):92-93.
- [2] Appel B R, Tokiwa Y, Hsu J, et al. Berkeley visibility as related to atmospheric aerosol constituents. *Atmos Environ*, 1985, 19(9):1525-1534.
- [3] Lee D S, Köhler I, Grobler E, et al. Estimation of global NO_x emissions and their uncertainties. *Atmos Environ*, 1997, 31(12):1735-1749.
- [4] Bradshaw J, Davis D, Grodzinsky G, et al. Observed distributions of nitrogen oxides in the remote free troposphere from NASA global tropospheric experiment programs. *Rev Geophys*, 2000, 38(1):61-116.
- [5] 唐孝炎. 大气环境化学. 北京:高等教育出版社,1990:151-153.
- [6] 田贺中,郝吉明,陆永琪,等. 中国氮氧化物排放清单及分布特征. 中国环境科学, 2001, 21(6):493-497.
- [7] 孙庆贺,陆永琪,傅立新,等. 我国氮氧化物排放因子的修正和排放量的计算:2000 年. 环境污染治理技术与设备, 2004, 5(2):90-94.
- [8] 丁国安,孟昭阳,于海青,等. 北京城区大气边界层空气污染特征观测研究. 应用气象学报, 2002, 13(特刊):82-91.
- [9] Leue C, Wenig M, Klimm O, et al. Quantitative analysis of NO_x emissions from Global Ozone Monitoring Experiment satellite image sequences. *J Geophys Res*, 2001, 106(D6):5493-5505.
- [10] Velders G J M, Granier C, Portmann R W, et al. Global tropospheric NO₂ column distributions: Comparing 3-D model calculations with GOME measurements. *J Geophys Res*, 2001, 106(D12):12643-12660.
- [11] Richter A, Burrows J P. Retrieval of tropospheric NO₂ from GOME measurements. *Adv Space Res*, 2002, 29(11):1673-1683.
- [12] Martin R V, Chance K, Jacob D J, et al. An improved retrieval of tropospheric nitrogen dioxide from GOME. *J Geophys Res*, 2002, 107(D20):4437, doi:10.1029/2001JD001027.
- [13] 佟彦超,万本太. 城市空气质量周报及其进展. 气候与环境研究, 1999, 4(3):275-282.
- [14] 夏恒霞. 北京城区逆温气象特征及其对大气污染的影响. 城市管理与科技, 2004, 6(2):63-68.

Characterization of NO₂ Pollution Changes in Beijing Using GOME Satellite Data

Jiang Wenhua¹⁾²⁾ Ma Jianzhong¹⁾ Yan Peng¹⁾
Andreas Richter³⁾ John P. Burrows³⁾ Hendrik Nüß³⁾

¹⁾ (Chinese Academy of Meteorological Sciences , Beijing 100081)

²⁾ (Chongqing Meteorological Office , Chongqing 401147)

³⁾ (Institute of Environmental Physics , University of Bremen , Bremen , D-28334 , Germany)

Abstract

Nitrogen dioxide (NO₂) is known to cause respiratory problems for humans in the urban atmosphere and plays a key role in the control of the strong oxidant such as ozone of the atmosphere . Measurements of the global distribution of tropospheric NO₂ column densities have become available with the Global Ozone Monitoring Experiment (GOME) instrument which is launched in April 1995 on board the ERS-2 satellite . The seasonal variation and trend of NO₂ over Beijing is analyzed using monthly averaged tropospheric NO₂ column data from GOME measurements from January 1996 to December 2002 . The monthly averaged GOME NO₂ column present distinct variation characteristics with high values in January , February , November and December , and with low values in June , July and August . The results of analysis of GOME data reveal that NO₂ pollution in Beijing had been aggravated from 1996 to 2002 in general , with serious pollution happening in the years of 2002 . The highest monthly averaged NO₂ column is found to occur in December 2002 with a value of 3.7×10^{16} molecules \cdot cm⁻² , increasing by 45 percent and 125 percent with comparison to the highest GOME monthly averaged NO₂ column before December 2002 (that is 2.5×10^{16} molecules \cdot cm⁻² in December 1999) and the monthly averaged NO₂ column in November 2002 (that is 1.6×10^{16} molecules \cdot cm⁻²) , respectively . Furthermore , the seasonal variation of GOME tropospheric NO₂ column over Beijing is compared with that of monthly averaged surface mass concentration of NO₂ , which are calculated according to the daily pollution index of NO₂ for Beijing for a period from 1 January 2001 to 31 December 2002 . Both GOME tropospheric NO₂ column density and surface NO₂ mass concentration present the same distinct seasonal variation characteristics , with high values in winter and low values in summer . It shows that for the comparison period the variations of monthly averaged tropospheric NO₂ columns over Beijing are well consistent with the variations of the monthly averaged surface NO₂ mass concentrations in Beijing . The correlative coefficient is as high as 0.86 . It can be concluded that GOME tropospheric NO₂ column data can be used to analyze the seasonal variation and trend of NO₂ pollution over a specific region .

Key words : satellite remote sensing ; GOME ; NO₂ air pollution index ; urban environment