

北京地面紫外辐射与空气污染的关系研究

安俊琳^{1,2}, 王跃思^{2*}, 李昕^{2,3}, 孙扬², 申双和¹

(1. 南京信息工程大学应用气象学系, 南京 210044; 2. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029; 3. 北京市环境保护局, 北京 100044)

摘要: 基于北京城区太阳辐射和污染气体观测资料, 运用 TUV4.4 辐射传输模型, 研究了城市大气中太阳紫外辐射与空气污染的相互关系. 结果表明, 臭氧总量平均为 329DU, 并呈冬春季较高, 夏秋季较低的季节变化规律, 到达地面的紫外辐射呈现相反的变化趋势; 受城区大气污染的影响, 地面处的紫外辐射量大幅减少(最大 50%), 且在夏季波动较大; 云和污染物对紫外辐射的影响要大于总辐射, 紫外辐射衰减约为总辐射衰减的 2 倍; 城市低层大气中 O_3 和 NO_x 浓度的增加是造成紫外辐射衰减的重要原因, 午后 O_3 浓度与紫外辐射衰减相关系数为 0.70.

关键词: 紫外辐射; 空气污染; 臭氧; 大气气溶胶

中图分类号: X515 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2008)04-1053-06

Relationship Between Surface UV Radiation and Air Pollution in Beijing

AN Jun-lin^{1,2}, WANG Yue-si², LI Xin^{2,3}, SUN Yang², SHEN Shuang-he¹

(1. Department of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3. Beijing Municipal Environmental Protection Bureau, Beijing 100044, China)

Abstract: Based on the data of solar radiation and air pollutants collected in Beijing, the relationship between surface ultraviolet (UV) radiation and the content of air pollutants were analyzed, using the radiative transfer model TUV4.4 (Tropospheric Ultraviolet Visible). The results show that average total ozone content is 329 DU and higher in winter and spring, lower in summer and autumn. The inverse relationship exists between ground level UV radiation and total ozone content. This study also shows that a substantial reduction (up to 50%) in the UV radiation on days with high levels of air pollution. Larger fluctuations are found in UV radiation in the summer. The effects of clouds and air pollution on UV are higher than on total solar radiation, and the reduction in UV is about twice as large as the total solar radiation values. Strong reduction in the UV radiation reaching the ground is associated with the increase of tropospheric ozone and nitrogen oxides in Beijing. The correlation coefficient between ozone concentration and decrease in UV radiation is 0.70 in the early afternoon.

Key words: ultraviolet radiation; air pollution; ozone; atmospheric aerosol

工业化和城市化的过程对人类生存环境造成了重大的负面效应, 如大气污染、水污染、土地沙漠化, 并且许多环境恶化是很难或不可逆转的. 西方发达国家为此付出了惨重的代价, 多次发生重大的环境污染事件, 如伦敦烟雾事件和洛杉矶光化学事件, 给人类留下了深刻的记忆. 然而, 目前一些发展中国家, 包括中国, 在追求经济高速发展的同时, 环境污染问题日益严重, 这引起了政府和社会的高度关注. 据统计, 自工业化开始以来, 北半球 UV-B 辐射已降低了 6% ~ 18%^[1,2], 这远大于北半球中纬度地区臭氧层变薄所引起的 UV-B 辐射的增加程度. 波长范围为 100 ~ 400 nm 的紫外 (UV) 辐射, 虽然在大气上界其辐射能平均仅占太阳辐射能量 8% 左右, 但对地球环境和人类健康却起着作用^[3,4]. 在城市大气环境问题中, 随着城市规模不断扩大, 人口、车辆的不断增加, 由此引发的空气质量问题越来越严重, 特别是太阳紫外辐射所参与和驱动的光化学污染是当前

许多城市面临的棘手问题^[5]. 然而随着城市大气近地层中臭氧 (O_3) 和气溶胶等污染物浓度的增加, 其吸收和散射太阳紫外辐射作用对紫外辐射量到达地面具有减弱作用^[6]. 因此城市大气中污染物与太阳紫外辐射量之间的相互关系是研究城市光化学污染问题的重要方面.

本研究利用北京市城区太阳辐射 (总辐射和紫外辐射) 的观测资料, 结合同期的环境空气质量监测数据, 分析不同天气条件下太阳紫外辐射特征和变化规律及其与污染物成分之间的关系, 以期为北京地区城市大气污染的防治及预测提供科学依据.

收稿日期: 2007-05-14; 修订日期: 2007-07-24

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目 (40525016)

作者简介: 安俊琳 (1978 ~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为大气环境, E-mail: junlinan@nuist.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: wys@dq.cern.ac.cn

1 材料与方法

1.1 样品采集

观测地点位于中国科学院大气物理研究所铁塔分部(39°9'N, 116°4'N, 海拔高度: 49 m), 其位于北京市北三环路 与 北四环路 之间, 距三环路约 1 km, 其东面 200 m 处为南北走向的八达岭高速公路, 北边 50 m 处为东西走向的北土城西路, 采样点设在大气化学试验楼楼顶(相对地面高度 8 m). 2004-08-19 ~ 2005-07-14 对 O₃、NO_x 和 SO₂ 体积分数进行了连续观测, 并同步观测辐射要素, 记录天气现象.

1.2 仪器设备

1.2.1 O₃、NO_x 和 SO₂ 观测设备

美国热电环境设备公司生产的 49C 紫外光度法 O₃ 分析仪. 其原理为 O₃ 分子吸收波长 254 nm 的紫外光, 该波段紫外光被吸收的程度直接与 O₃ 浓度相关, 通过检测样品气通过时紫外光被吸收的程度来计算出 O₃ 浓度. 分析仪最低检测限: 2 × 10⁻⁹ (体积分数); 精度: 1 × 10⁻⁹ (体积分数); 零漂: 0.4% (24 h); 跨漂: ± 1% (24 h), ± 2% (7 d).

美国热电环境设备公司生产的 42CTL 高精度化学发光 NO-NO₂-NO_x 分析仪原理基于 NO 与 O₃ 的化学发光反应产生激发态的 NO₂ 分子, 当激发态的 NO₂ 分子返回基态时发出一定波长的光, 所发出光的强度与 NO 的浓度呈线性正相关. 检测 NO₂ 时先将 NO₂ 通过钼转换器转换成 NO, 然后再通过化学发光反应进行定量分析. 42CTL 型 NO-NO₂-NO_x 分析仪最低检测限: 0.05 × 10⁻⁹ (体积分数); 零漂: 小于 0.025 × 10⁻⁹ (24 h); 跨漂: ± 1% (24 h, 满度值).

美国热电环境设备公司生产的 43CTL 高精度脉冲荧光 SO₂ 分析仪, 该仪器基于 SO₂ 分子吸收紫外线, 并能被一定波长的紫外线激发, 当被激发的 SO₂ 分子返回到基态时释放出另一波长的紫外光, 光的强度与 SO₂ 的浓度呈线性正相关, 检测其光强即可对 SO₂ 定量测定. 其最低检测限: 0.06 × 10⁻⁹ (体积分数); 零漂: < 0.2 × 10⁻⁹ (24 h); 跨漂: ± 1% (7 d).

1.2.2 辐射观测设备

自动辐射观测使用荷兰 Kipp&zionne 生产的辐射表. 太阳总辐射采用 CM11 辐射表, 测量范围: 305 ~ 2 800 nm; 精度: ± 1%. 紫外辐射采用 CUV3 辐射表, 测量范围: 290 ~ 400 nm; 精度: ± 1%, 详细技术参数参见文献[7].

观测前后对所有仪器进行了统一标定, 以减少仪器造成的系统误差.

1.3 计算方法

太阳紫外辐射的计算采用美国 NCAR (National Center for Atmospheric Research) 发展的 TUV4.4 (Tropospheric Ultraviolet-Visible Model) 辐射传输模式. 采用假球二流近似离散坐标法求解辐射传输方程. 模式可计算 121 ~ 750 nm 范围内波长的光谱辐射、光辐射通量、分子光离解系数和生物效应权重辐射等. 模式中臭氧总量采用美国 NASA (National Aeronautic and Space Administration) TOMS 卫星观测资料. 模式中具体参数参见文献[8].

晴空太阳总辐射 TS_c 采用 Kasten 等^[9] 提出的参数化计算方法:

$$TS_c = \alpha_1 \cos \theta + \alpha_2$$

(1)

式中, θ 是太阳天顶角, α_1 和 α_2 为拟合系数.

2 结果与讨论

2.1 臭氧总量年际变化

图 1 给出了 2000 ~ 2005 年期间 TOMS 卫星观测的北京地区臭氧总量的变化曲线. 计算发现: 6 a 臭氧总量均值为 329DU (DU 为 dobon unit 的缩写, 表示多布森单位, 臭氧柱浓度是采用从地面到高空垂直柱中臭氧在标准状况下的总厚度来反映大气中臭氧的含量, 以 10⁻³ cm 厚的臭氧层作为 1 个 DU), 日臭氧总量存在最大 50% 和 -23% 的上下波动. 年际间臭氧总量总体略有下降, 从 2000 年的年均臭氧总量 331DU, 降低到 2005 年的 327DU. 同时北京上空臭氧总量呈现明显的季节性变化, 冬春季出现峰值, 夏秋

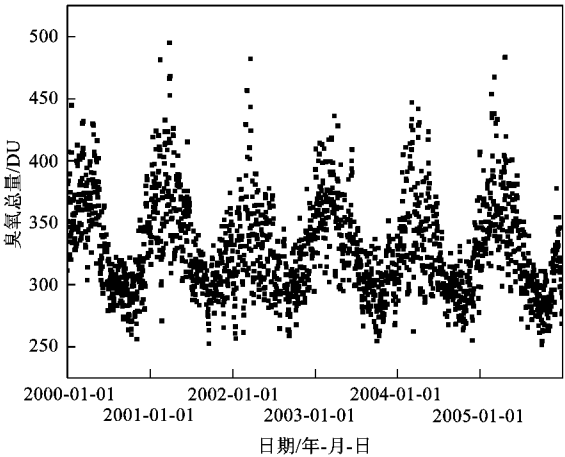


图 1 TOMS 卫星观测日均臭氧总量变化(2000 ~ 2005)

Fig.1 Daily ozone column measured by TOMS for 2000 ~ 2005

季出现谷值,6 a 期间臭氧总量最大值出现在 2001-03-28,为 495DU;最小值出现在 2001-09-19,为 253DU.

2.2 紫外辐射变化特征

由于太阳辐射通过地球大气的过程较为复杂,要受到测站纬度、太阳天顶角、大气臭氧吸收、空气分子散射、气溶胶粒子及云滴粒子散射等因素的影响.一些研究指出,伴随着大气臭氧总量的减少,地面获得得紫外辐射量是增加的^[10],但由于影响太阳辐射过程因素众多,也出现过地面紫外辐射量与臭氧关系不明显的报道^[11].因此对太阳紫外辐射量到达地面的影响因素分析就显得尤为重要.图 2 给出了 2004-08~2005-07 期间 TOMS 观测的臭氧总量,紫外辐射计算值和观测值日最大值的变化曲线.其中紫外辐射计算值采用 TUV4.4 辐射传输模式,在晴空条件下计算紫外辐射到达地面的量.从图 2 中可以看出,由于太阳紫外辐射本身的周期性变化,造成北京地区紫外辐射呈现出冬季较小,夏季较大的变化趋势,同时臭氧总量呈现出春季较高,冬季较低的变化趋势.紫外辐射计算值(UV_C)和观测值(UV_M)变化趋势基本一致,但 UV_M 比 UV_C 总体偏低 50% 左右,而且 UV_C 在夏季离散程度要大于冬季,这种差异主要由于在计算 UV_C 时采用晴空,大气洁净的假设条件,没有将云,气溶胶,大气污染气体等大气底层的对到达地面紫外辐射量影响因素加以考虑而造成的.可见,云的辐射效应、大气中气溶胶散射和污染气体吸收是影响地面紫外辐射的重要因素.

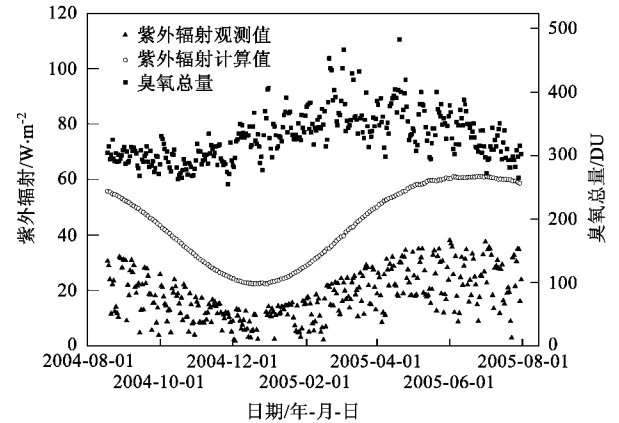


图 2 臭氧总量、紫外辐射观测值和计算值日最大值日际变化
Fig.2 Daily variations of max values of UV radiation measured and model solution, and the TOMS values of ozone

由于近地层光化学反应的强弱是影响城市低层大气中 O_3 浓度高低的主要因素之一,因此地面处太

阳辐射强度对 O_3 浓度的高低有重要影响.图 3 给出了地面观测的 O_3 浓度、紫外辐射和总辐射的日变化曲线,可以看出,总辐射和紫外辐射在 12:00 出现日最大值,而 O_3 浓度在 14:00~15:00 出现最大值, O_3 浓度变化比辐射量的变化滞后约 2 h,这主要由于光化学反应时间的原因.将 07:00~14:00 的紫外辐射与 09:00~16:00 的 O_3 浓度小时均值进行相关分析,相关系数为 0.62,表明紫外辐射强度是近地层白天 O_3 浓度变化的重要影响因子.

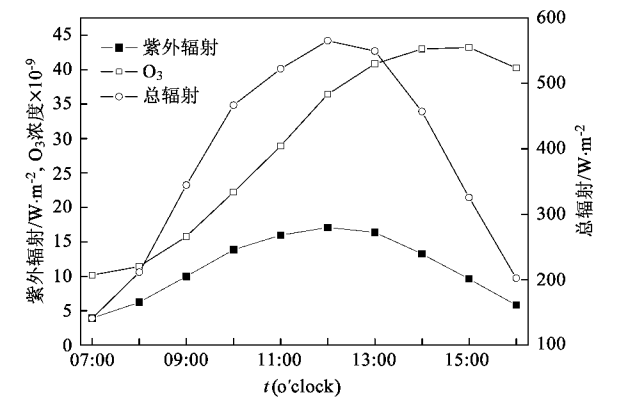


图 3 地面臭氧、紫外辐射和总辐射日变化
Fig.3 Diurnal variation of ozone concentrations, UV radiation and total solar radiation

为了对比不同天气情况下太阳紫外辐射变化规律,将北京地区大气污染程度的高低采用国家环境保护总局提供的城市空气质量日报作为依据划分,其空气污染指数(API)对应的空气质量状况如表 1 所示.

图 4 分别给出晴天、阴天条件下不同污染程度的紫外辐射日变化曲线.由图 4(a)中晴天条件下 3 d 的紫外辐射变化曲线,可以看出,城市大气中污染成分(包括气溶胶和气体)浓度的高低影响着紫外辐射到达地面的数值,高污染日(2004-12-15)同低污染日(2004-09-21)比较,虽然受太阳辐射和臭氧总量季节波动,未受城市污染影响的紫外辐射(即 UV_C)呈现出从 2004-09-21 到 2004-12-15 减小,但这 3 d 的 UV_M 相对于 UV_C 的峰值变化率分别为:46.1% (2004-09-21)、49.6% (2004-10-31)、63.9% (2004-12-15).从中可看出大气中污染成分的变化对紫外辐射具有较强的影响.在图 4(b)中同样可以发现这种的影响,只是由于云和污染成分的共同作用使得紫外辐射的衰减更加剧烈,图 4 中 UV_M 相对于 UV_C 的峰值变化率分别为:59.8% (2004-08-22)、59.4% (2004-10-17)、

表 1 空气污染指数							
Table 1 Air pollution index							
空气污染指数(API)	0 ~ 50	51 ~ 100	101 ~ 150	151 ~ 200	201 ~ 250	251 ~ 300	> 300
空气质量状况	优	良	轻微污染	轻度污染	中度污染	中度重污染	重污染

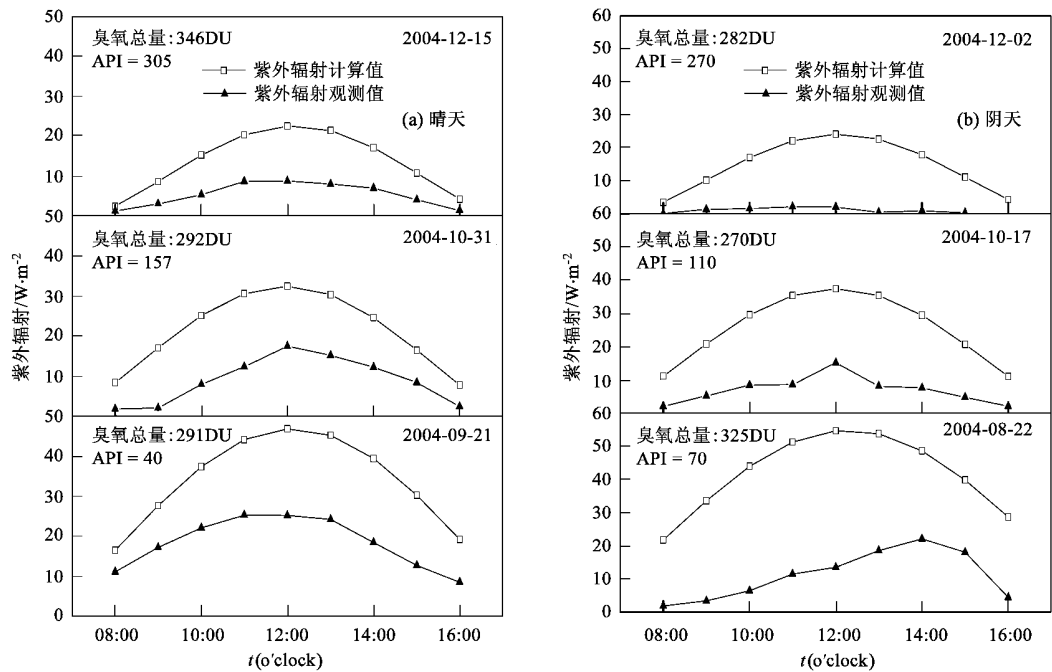


图 4 紫外辐射日变化

Fig.4 Diurnal variations of the UV radiations measured and model clear sky solution

90.5%(2004-12-02). 因此, 对于城市中紫外辐射的衰减主要受城市中大气污染成分和云的影响, 由观测数据可以估算它们分别占总衰减的 60% 和 40% 左右.

图 5 给出了 2004-12 期间晴天情况下不同空气质量时, 地面观测的 O_3 浓度、紫外辐射和总辐射的日变化曲线. 图 5 中分别选取了 $\text{API} < 100$ 的低污染日和 $\text{API} > 300$ 的重污染日进行比较, 从中可以看出, 总辐射和紫外辐射在重污染日都有不同程度的减小, 并且在正午前后差异最大. O_3 浓度在低污染日表现出典型的 O_3 浓度日变化特征^[12], 而在重污染日, O_3 最大浓度比低污染日降低了 55%, 并且最大值出现时间推迟了约 2 h. 由此可见, 受大气污染程度的影响, 到达大气低层的太阳辐射在重污染日明显减弱, 导致光化学反应减缓, 从而使 O_3 浓度与低污染日相比存在显著差异.

为了比较总辐射和紫外辐射在污染大气中衰减的差异, 利用式(1)计算晴空的太阳总辐射 TS_C , 计算时选取 $\theta < 70^\circ$ 观测资料进行拟合, 得 $\alpha_1 = 977.7$,

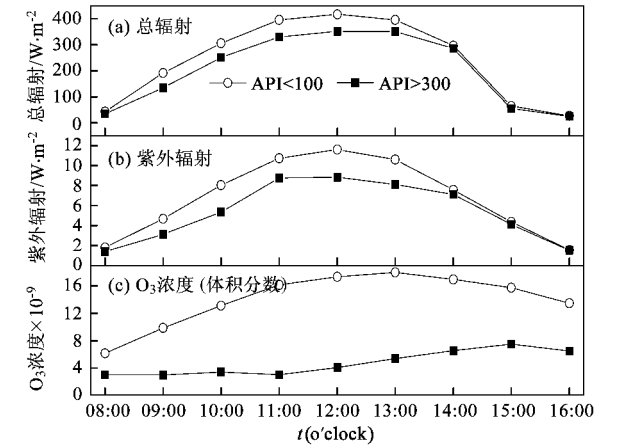


图 5 2004-12 晴天条件下地面臭氧、紫外辐射和总辐射日变化

Fig.5 Diurnal variation of ozone concentrations, UV radiation and total solar radiation in clear-sky days in December 2004

$\alpha_2 = -48.9$. 由此可计算 TS_C . 定义总辐射衰减比 R_TS 和紫外辐射衰减比 R_UV , 分别为:

$$R_\text{TS} = \text{TS}_\text{M}/\text{TS}_\text{C} \tag{2}$$

$$R_\text{UV} = \text{UV}_\text{M}/\text{UV}_\text{C} \tag{3}$$

式中, TS_M 为地面总辐射观测值.

图 6 给出了 R_{TS} 和 R_{UV} 相关性曲线, 可以看出 R_{UV} 的取值范围在 0~0.8 之间, R_{TS} 取值范围在 0~1.4 之间, 两者的比值接近 0.5, 说明到达地面的紫外辐射衰减要远大于总辐射衰减, 这主要由于大气中气溶胶, 臭氧等气体污染成分对于紫外辐射吸收作用要强于总辐射, 这与墨西哥城^[1]、雅典^[9]等城市的观测结果一致. 此外, 对比观测期间空气质量状况分别为优和重污染天情况下, 紫外辐射与相对大气质量的关系, 如图 7 所示, 重污染情况下紫外辐射相对于优等情况下, 紫外辐射平均减少 30% 左右, 而且随着相对大气质量的增加(即太阳天顶角不断变大), 差异增大.

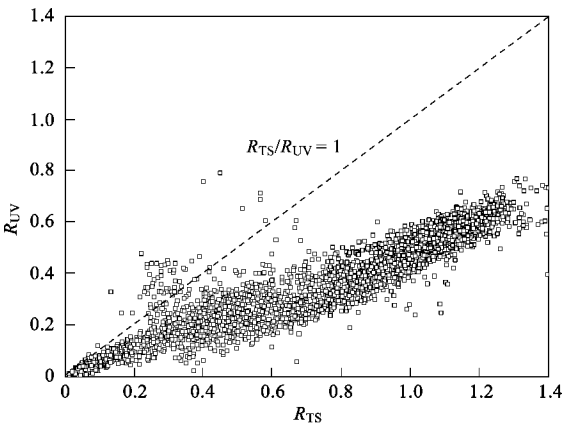


图 6 R_{TS} 和 T_{UV} 变化曲线

Fig.6 Reduction factors of total solar radiation measured simultaneously with the UV

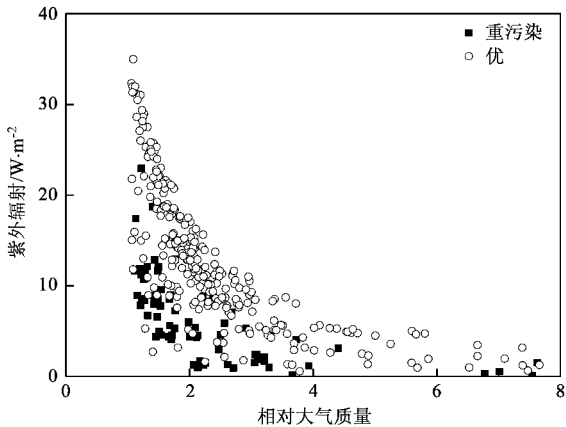


图 7 不同空气质量情况下紫外辐射相对于大气质量的变化

Fig.7 UV radiation vs optical mass for low pollution and high pollution

2.3 污染气体对紫外辐射的影响

由于本研究中紫外辐射计算值是仅考虑臭氧总

量对紫外辐射的影响并没有考虑城市大气近地层污染气体对紫外辐射的影响, 因此紫外辐射模式计算值与地面紫外辐射的观测值的差异(以 ΔUV 表示), 反映了由于城市污染气体对于城市区域紫外辐射的衰减. 为了比较污染气体对紫外辐射传输的影响, 同时减少云和气溶胶对统计结果的影响, 选取晴空且低污染(空气质量状况为优良等级)的资料进行统计分析. 发现, 北京城市大气中影响紫外辐射传输的主要污染气体是 O_3 和 NO_x , 且随着 O_3 和 NO_x 浓度日变化规律的演变, 其对应的影响也有所变化, O_3 与相关性随着 O_3 浓度逐渐增加, 在 15:00 左右出现最大值, 达到 69.7%, 此时也是 O_3 浓度日最大值出现的时间. NO_x 与相关性变化复杂, 上午 NO_2 与 ΔUV 呈正相关变化, 相关系数最高值达 35.9%, 而下午 NO 与 ΔUV 呈负相关, 最大值为 44.8%, 综合之前对 O_3 和 NO_x 浓度日变化规律的研究^[13], O_3 和 NO_x 浓度与 ΔUV 相关性的变化规律受 O_3 和 NO_x 光化学反应的作用. 而对 SO_2 与紫外辐射的相关性分析并没有发现它们之间存在明显的相关, 这与其他一些城市, 如希腊 Thessaloniki 的观测结果^[14]有一些不同, 这可能与北京市目前城市大气主要污染源有一定的关系, 随着能源结构的调整, 北京市已从煤烟型污染为主转变为以燃油型污染为主, 而机动车尾气所排放的含氮化合物是城市 O_3 的重要前体物, 在吸收紫外辐射后, 造成大气低层 O_3 浓度高值, 减少到达地面的紫外辐射量. 因此, 受平流层臭氧层变薄的影响, 臭氧总量略有下降, 增加了紫外辐射进入对流层的辐射量, 而人类活动增加了大气低层中气溶胶、 NO_x 等成分的浓度, 诱发城市光化学烟雾, 直接或间接的增强了对紫外辐射的衰减作用, 导致到达地面的紫外辐射量减弱.

3 结论

- (1)2000~2005 年期间北京地区臭氧总量总体略有下降, 平均为 329DU, 并存在季节性波动, 冬春季较高, 夏秋季较低.
- (2)对照城市地区紫外辐射计算值和观测值发现受云、城市区域大气低层气溶胶和污染气体的吸收、散射的影响, 地面处接受的紫外辐射可减少 50%, 且受到这些因素在夏季变化较大的影响, 紫外辐射在夏季离散程度强. 紫外辐射衰减率大于总辐射衰减率, R_{UV}/R_{TS} 接近于 0.5.
- (3)重污染天气状况下, 紫外辐射衰减 30% 左

右,城市大气中影响紫外传输的主要污染气体是 O_3 和 NO_x , 且其相关性的高低与污染气体的日变化规律有关, O_3 浓度与紫外辐射衰减相关性在午后最高,达到 69.7% . SO_2 浓度与紫外辐射衰减相关性较低,这与北京市能源结构的调整有关.

致谢: 马志强和吉东生参与了部分实验工作; 胡波提供了辐射数据, 在此表示衷心的感谢.

参考文献:

[1] Acosta L R, Evans W F J. Design of the Mexico City UV monitoring network: UV-B measurements at ground level in the urban environment [J]. Journal of Geophysical Research, 2000, **105**: 5017-5026.

[2] 张武,张蕾,张婕,等.兰州地区太阳紫外辐射及其与空气污染的关系[J].兰州大学学报(自然科学版),2004,**40**(3): 100-105.

[3] Dickerson R R, Kondragunta S, Stenchikov G, *et al.* The impact of aerosols on solar ultraviolet radiation and photochemical smog [J]. Science, 1997, **278**:827-830.

[4] Terje B. Impact of increased anthropogenic emission in Asia on tropospheric ozone and climate [J]. Tellus, 1996, **23**:251-254.

[5] Palancar G G, Toselli B M. Erythmal ultraviolet irradiance in Cordoba, Argentina [J]. Atmospheric Environment, 2002, **36**:287-292.

[6] Palancar G G, Toselli B M. Effects of meteorology on the annual and interannual cycle of the UV-B and total radiation in Cordoba City, Argentina [J]. Atmospheric Environment, 2002, **36**:287-292.

[7] 胡波.中国紫外与光合有效辐射的联网观测及其时空分布特征研究[D].北京:中国科学院大气物理研究所,2005.33-38.

[8] Madronich S, Flocke S. Theoretical estimation of biologically effective UV radiation at the Earth's surface [A].In: Zerefos C S, Bais A F. (eds)Solar Ultraviolet Radiation-Modeling [C]. Berlin: Springer, 1997. 23-48.

[9] Kasten F, Czeplak G. Solar and terrestrial radiation dependent on the amount and type of cloud [J]. Solar Energy, 1980, **24**: 177-189.

[10] Repapis C G, Mantis H F, Paliatsos A G, *et al.* Case study of UV-B modification during episodes of air pollution [J]. Atmospheric Environment, 1998, **32**:2203-2208.

[11] Scotto T, Cotton G, Urbach F, *et al.* Biologically Effective Radiation: Surface Measurements in the US [J]. Science, 1988, **239**:762-764.

[12] 殷永泉,李昌梅,马桂霞,等.城市臭氧浓度分布特征[J].环境科学,2004,**25**(6):16-20.

[13] 安俊琳,王跃思,李昕,等.北京大气中 NO 、 NO_x 和 O_3 浓度变化的相关性分析[J].环境科学,2007,**28**(4):706-711.

[14] Zerefos C S, Meleti C, Bais A F, *et al.* The recent variability of total ozone over southeastern Europe [J]. Journal of Photochemical and Photopathology B: Biology, 1995, **31**:15-19.