

北京市夏季 O_3 、 NO_x 等污染物“周末效应”研究

石玉珍^{1,3}, 徐永福^{1*}, 王庚辰², 石立庆¹

(1. 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029; 2. 中国科学院大气物理研究所中层大气遥感与探测开放实验室, 北京 100029; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 采用了 2000-06-25 ~ 2000-07-07 以及 2000-07-26 ~ 2000-08-22 在北京 325 m 气象塔观测平台观测到的 O_3 、 NO_x (NO 和 NO_2)、 CO 和 SO_2 数据, 分析了周末与工作日 O_3 、 NO_x 、 NO 、 NO_2 、 CO 和 SO_2 浓度变化的差异及成因. 结果表明, 除 SO_2 之外, O_3 、 NO_x 、 NO 、 NO_2 和 CO 的周末浓度与对应工作日浓度相关性显著, 均通过了显著性水平 $\alpha = 0.05$ 的 t 检验, 相关系数 (R) 依次为 0.99、0.61、0.56、0.80 和 0.61. 交通高峰时段 (06:00 ~ 08:00) NO_x 和 CO 的周末浓度明显低于工作日浓度, 该时段 NO_x 和 CO 的周末浓度与工作日浓度的平均偏差分别为 -28% 和 -9%. O_3 周末浓度与工作日浓度的回归系数为 1.25 ± 0.02 . 此外, 周末 O_3 的最大小时浓度值与最大 8 h 平均浓度值分别比工作日高 23% 和 26%, 表现出十分明显的“周末效应”.

关键词: 臭氧; 氮氧化物; 工作日; 周末; 特性

中图分类号: X502; X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)10-2832-07

Study of the “Weekend Effect” of O_3 , NO_x and Other Pollutants in Summer of Beijing

SHI Yu-zhen^{1,3}, XU Yong-fu¹, WANG Geng-chen², SHI Li-qing¹

(1. State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. Division for Middle Atmosphere and Remote Sensing, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The data of O_3 , NO_x (NO and NO_2), CO and SO_2 observed at Beijing 325m meteorological tower from June 25 to July 7, 2000 and from July 26 to August 22, 2000 are used to analyze the difference of pollutant concentrations on weekends and weekdays, and its causes. Results show that except SO_2 , the correlations of O_3 , NO_x , NO , NO_2 and CO concentrations between weekends and weekdays are very significant, since they all pass the t -test significance level at $\alpha = 0.05$. The correlation coefficients (R) are 0.99, 0.61, 0.56, 0.80 and 0.61 for O_3 , NO_x , NO , NO_2 and CO , respectively. Weekend NO_x and CO concentrations are lower than weekday concentrations in rush hours (06:00 ~ 08:00), and the mean deviations for NO_x and CO concentrations are -28% and -9%, respectively. The regression coefficient of O_3 concentrations between weekends and weekdays is 1.25 ± 0.02 . Furthermore, the maximum 1-h average O_3 concentration and maximum 8-h average O_3 concentration on weekends are 23% and 26% higher than those on weekdays, respectively, indicating an obvious O_3 “weekend effect”.

Key words: ozone; nitrogen oxides; weekday; weekend; characteristics

随着我国城市化的快速发展、机动车保有量的持续增长, 城市光化学烟雾现象已经屡见不鲜. 自北京市 1986 年首次出现光化学烟雾迹象以来, 近年来光化学污染日趋严重^[1]. 我国目前在用车的 NO_x 、 CO 和 NMHC 排放因子 (行驶每公里污染物排放量) 都很高^[2,3], 这些污染物在适宜的气象条件下就会产生高浓度的臭氧, 导致威胁人类健康和生态环境的光化学烟雾^[4]. 观测资料也显示北京市 O_3 小时浓度超标的时数和日数逐年增加^[5], 部分学者针对北京市低层大气中 O_3 、 NO_x 等污染物进行过具体的分析和研究, 但主要集中在污染物的垂直变化特征^[6~9]、 O_3 与 NO 和 NO_2 的相关性^[10]、污染物与气象因子的关系^[3,11,12] 以及污染物变化特征的城郊对

比^[13]等方面, 关于工作日与周末 O_3 等污染物浓度特征差异的研究目前还鲜见相关报道.

自 Cleveland 等^[14]于 1974 年首次提出“周末效应”的概念以来, 国外很多学者在美国图森^[15]、加利福尼亚^[16,17]以及法国马赛^[18]等大城市都发现了这一现象, 即在周末 NO_x 浓度低于工作日浓度的情况下 O_3 浓度值反而高于工作日浓度. 殷永泉等^[19]指出济南市 12:00 ~ 19:00 之间 O_3 周末浓度高于工作日浓度的现象, 认为产生这种现象的原因是平日人

收稿日期: 2008-11-26; 修订日期: 2009-02-19

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目 (KJCX2-SW-H8)

作者简介: 石玉珍 (1980 ~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为大气环境化学, E-mail: shiyz@mail.iap.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: xyf@mail.iap.ac.cn

类活动频繁导致大气颗粒物浓度较高,使大气光透过率降低,因此大气光化学反应弱于周末.本研究利用北京市 325 m 气象塔观测资料,分析了 2000 年夏季 O₃、NO_x 等污染物周末与工作浓度日变化特征的差异,并从 O₃ 形成机制的角度分析“周末效应”的成因,以期为今后进一步研究北京市 O₃ 污染特征及治理措施提供依据.

1 材料与方法

本研究数据来自中国科学院大气物理研究所北京 325 m 气象塔,该气象塔位于北京市北三环与北四环之间,距三环路约 1 km,气象塔东 200 m 处为南北走向的京昌高速公路,北 50m 处为东西走向的北土城西路.本研究数据中 O₃、NO、NO₂ 和 NO_x (NO_x = NO + NO₂) 的观测时段为 2000 年夏季的 6 月 25 日~7 月 7 日以及 7 月 26 日~8 月 22 日共 2 个时段,高度为近地面 8 m 处的实测资料,其中 7 月 26 日~8 月 22 日的观测时段与刘烽等^[8]、李昕等^[9]和任丽红等^[11]的分析资料相同. SO₂ 和 CO 的观测时段为 6 月 25 日~7 月 7 日. 根据白天(06:00~18:00)的天气状况和气象条件将观测日分为晴好天气与阴雨天气(气象参数引自: <http://www.wunderground.com>),晴好天气对应各气象参数特征(温度、湿度和风速)如表 1 所示,白天温度平均值在 26.2~34℃之间、相对湿度平均值在 27%~86%之间、风速平均值在 0.8~4.2 m/s 之间. 此外,对晴好天气下各小时的天气状况进行统计,结果显示在 06:00~18:00 时段内天气状况为晴占 43%、多云和有云分别占 19%和 13%、烟雾占 10%、阴占 8%、晴间多云占 5%、小雷雨和小阵雨各占 1%. 晴好天气工作日包括 6 月 26 日、27 日、29 日、30 日,7 月 6 日、7 日、8 月 1 日、4 日、9 日、11 日、14 日、15 日、16 日,晴好天气周末包括 7 月 1 日、2 日和 8 月 5 日. 本研究重点针对晴好天气下工作日与周末污染物(包括 O₃、NO₂、NO、SO₂ 和 CO)的浓度变化特性进行对比分析. 无特殊说明时,以下所指的浓度均为小时平均值.

表 1 晴好天气各气象参数特征

项目	气象参数特征值范围		
	温度/℃	湿度/%	风速/m·s ⁻¹
最大值	29~40	73~100	1.0~7.0
最小值	21~26	13~74	0.0~1.0
平均值	26.2~34.0	27~86	0.8~4.2

O₃、NO_x、CO 和 SO₂ 的观测均采用美国热电公

司的自动连续观测仪,型号依次为 Model 49C 紫外光度法 O₃ 分析仪、Model 42C 化学发光法 NO-NO₂-NO_x 分析仪、Model 48C 红外吸收法 CO 分析仪以及 Model 43S 脉冲荧光法 SO₂ 分析仪.

2 结果与讨论

2.1 周末与工作日污染物日变化特征比较

图 1 给出了晴好天气周末与工作日 O₃、NO、NO₂、NO_x、SO₂、CO 的日变化特征曲线,各污染物的工作日小时浓度由其对应观测期间所有工作日在相同时刻的浓度平均得到,周末小时浓度通过同样方式获得. 表 2 给出了各污染物周末与工作日小时浓度的偏差,偏差计算公式为 $Dev = [(c_{周末} - c_{工作日}) / c_{工作日}] \times 100\%$,式中, $c_{周末}$ 和 $c_{工作日}$ 分别表示污染物的周末浓度和工作日浓度.

结合图 1 和表 2 可以看出各污染物在工作日和周末的浓度均存在不同程度的差异,周末 O₃ 浓度在大部分时间里都大于对应工作日浓度(02:00~04:00 和 20:00 除外). 工作日 O₃ 出现了 2 次峰值,在 12:00 和 15:00,浓度(体积分数,下同)分别为 113.0×10^{-9} 和 112.9×10^{-9} ,2 个峰值浓度十分一致,且 2 个峰值时刻之间的小时浓度也与峰值浓度接近. 因此,可以认为 12:00~15:00 为工作日 O₃ 浓度高值的典型时段. 周末 O₃ 浓度的峰值时段为 11:00~14:00,在 11:00 和 14:00 的浓度分别为 138.7×10^{-9} 和 135.7×10^{-9} . 这么高的小时浓度,以及高浓度持续时间之久也说明了该时段内光化学过程比较强烈,使 O₃ 保持了较高的浓度. 从图 1 可见周末的 O₃ 峰值浓度出现时刻比工作日早 1 h,比工作日 O₃ 峰值浓度高 23%. O₃ 周末浓度与工作日浓度的最大偏差为 79%,出现在 23:00. 白天(06:00~18:00)最大偏差为 42%,出现在 10:00. 周末 O₃ 的最大小时浓度值与最大 8 h 平均浓度值分别比工作日高 23%和 26%,表现出十分明显的“周末效应”.

NO_x、NO 和 NO₂ 浓度日变化特征比较复杂,但三者之间以及各自的工作日和周末浓度的日变化趋势有很好的相似性. 00:00~02:00 时段内 NO_x 的周末浓度明显高于工作日浓度,03:00~10:00 间周末浓度低于工作日浓度,最明显的是 06:00~08:00,在该时段每小时 NO_x 的相对偏差依次为 -30.3%、-35.4%和 -17.9%,平均值为 -28%. 由于此时段是工作日的上班交通高峰期,因此周末相对少的尾

气排放是导致 NO_x 浓度较工作日低的主要原因. 周末 11:00~14:00 的 NO_x 浓度又比工作日高, 该时段小时浓度相对偏差依次为 19.0%、34.4%、37.9%和 2.5%. 产生这种现象的原因是由于周末市民的出行时间通常会比工作日推迟数个小时,

NO_x 浓度在 11:00 或 12:00 左右会出现一个小的峰值. 工作日 NO_x 最大浓度出现在 23:00, 其值为 131.0×10^{-9} , 周末最大浓度出现在 20:00, 浓度值为 128.8×10^{-9} , 这可能与北京市允许夜间重型机动车过境的政策有关^[6,9].

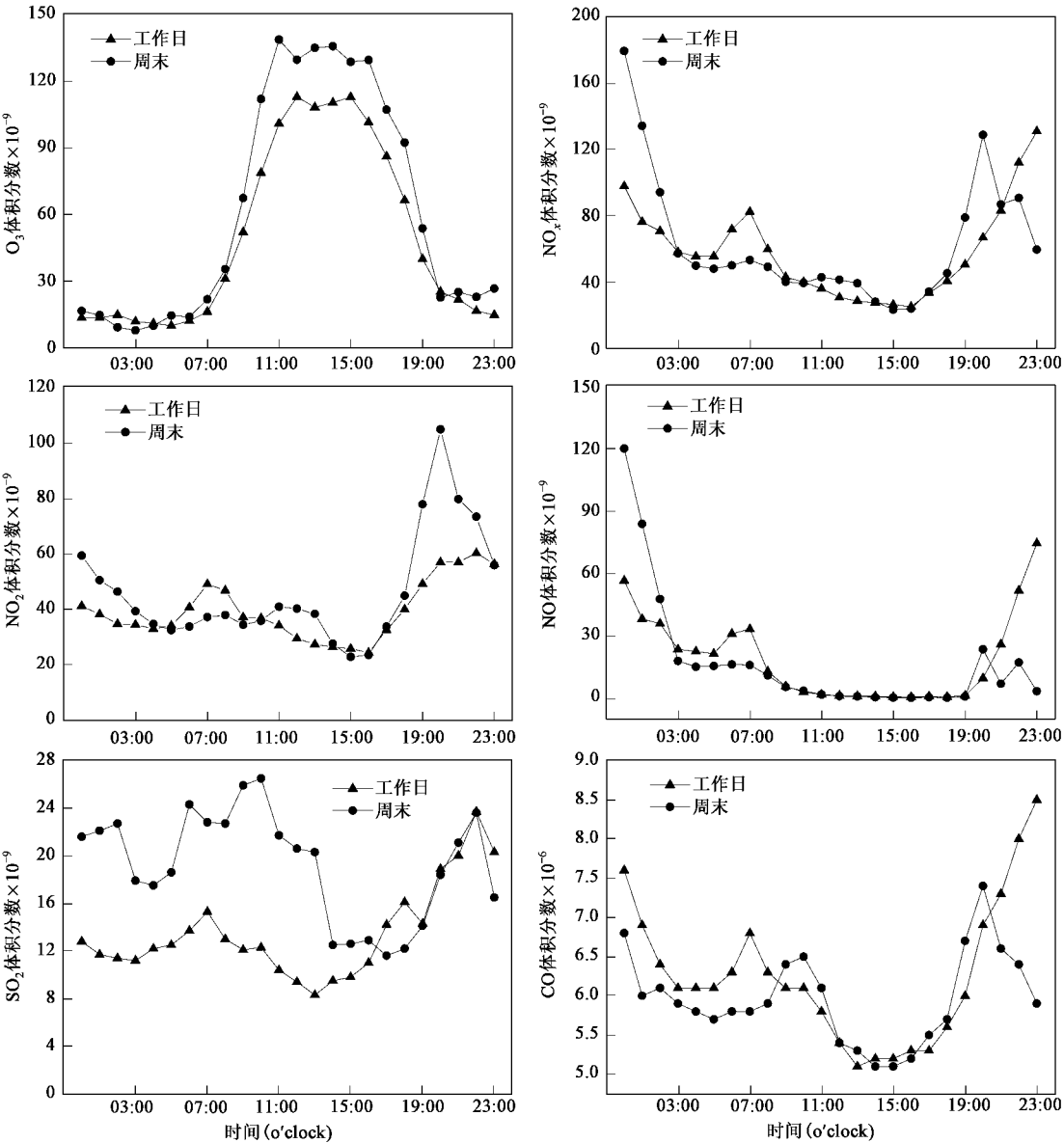


图 1 工作日与周末的污染物浓度变化

Fig.1 Variations of the pollutant concentrations on weekdays and weekends

NO 的周末浓度在大部分时间段低于工作日浓度, 特别是在 03:00~19:00 期间, 除了 10:00 比工作日浓度高 0.5×10^{-9} 以及 11:00 与工作日浓度相同之外均表现为周末浓度低于工作日浓度. 偏差较大的时段有 2 个, 03:00~08:00 和 12:00~19:00, 2

个时段内的最大偏差值分别达到了 - 51.5% 和 - 50%, 出现在 07:00 和 16:00. NO 的工作日浓度峰值出现在 23:00, 为 74.5×10^{-9} ; 周末浓度峰值为 119.9×10^{-9} , 出现在 00:00. NO_2 的工作日和周末浓度变化特征与 NO 不尽相同, 05:00~10:00 时

表 2 周末与工作日污染物浓度相对偏差
Table 2 Relative deviations of pollutant concentrations on weekends against those on weekdays

时间(o'clock)	偏差(Dev)%					
	O ₃	NO _x	NO	NO ₂	SO ₂	CO
00:00	21.9	83.5	111.9	44.4	69.5	-10.6
01:00	8.4	75.7	119.2	32.2	88.5	-12.8
02:00	-37.9	33.1	32.6	33.6	99.6	-4.5
03:00	-34.0	-1.5	-23.8	13.8	60.1	-3.9
04:00	-9.3	-10.3	-33.0	5.4	43.8	-4.1
05:00	45.2	-13.7	-27.4	-5.1	48.7	-6.7
06:00	14.4	-30.3	-47.7	-17.0	78.0	-7.7
07:00	34.0	-35.4	-51.5	-24.6	49.0	-13.7
08:00	14.3	-17.9	-14.3	-18.9	74.1	-6.9
09:00	29.2	-7.0	-5.8	-7.2	113.0	4.9
10:00	42.1	-1.3	16.4	-2.8	115.2	6.9
11:00	37.3	19.0	0.0	20.0	109.2	5.2
12:00	14.7	34.4	-18.4	36.8	119.4	1.2
13:00	24.7	37.9	-13.7	40.1	144.4	2.6
14:00	23.0	2.5	-46.8	4.4	30.8	-1.3
15:00	14.0	-11.5	-31.8	-11.0	29.0	-1.9
16:00	27.4	-4.8	-49.7	-3.5	17.6	-0.5
17:00	24.3	2.3	-38.6	3.7	-18.1	2.2
18:00	39.0	11.4	-47.0	12.5	-24.4	1.1
19:00	34.5	55.9	-37.8	58.6	-0.9	11.3
20:00	-9.9	92.8	140.7	84.5	-2.9	6.4
21:00	15.3	4.5	-72.7	39.8	5.7	-9.5
22:00	38.3	-19.1	-66.6	21.8	-0.4	-20.9
23:00	79.4	-54.6	-95.3	-0.7	-18.8	-29.8

NO₂ 的周末浓度低于工作日浓度,此期间内的最大偏差为 -24.6%,出现在 07:00,NO₂ 周末浓度除了在 15:00 和 16:00 略低于工作日以及 23:00 与工作日本基本相同之外,其余时间周末浓度高于工作日的浓度,11:00~22:00 之间偏差较为明显.工作日和周末 NO₂ 的峰值分别出现在 22:00 和 20:00,对应浓度分别为 60.3×10^{-9} 和 105.1×10^{-9} .从 NO_x、NO 和 NO₂ 的浓度日变化可以看出,夜间 NO_x 中 NO 的贡献大于 NO₂ 的贡献,由于夜间产生 O₃ 的光化学过程明显减弱,相对高的 NO 浓度会消耗白天产生的 O₃ 而进行夜间的化学反应^[20].

从图 1 可以看出,工作日和周末 SO₂ 的日变化特征均比较明显,16:00 之前的周末浓度均高于工作日浓度,最大偏差为 144.4%,出现在 13:00,此时工作日和周末浓度分别为 8.3×10^{-9} 和 20.3×10^{-9} .大气中 SO₂ 的产生途径包括含硫化石燃料的燃烧以及含硫原料的工业过程^[21].周凌晞等^[22]曾指出在燃煤和机动车排放并行的北京、兰州、昆明等城市大气中 SO₂ 和 NO₂ 的含量基本相当,而上海、

广州、武汉等以机动车排放为主的城市大气中 NO₂ 含量约为 SO₂ 含量的 2 倍.本研究中工作日和周末 NO₂ 与 SO₂ 浓度的比值均在 2.5 左右,这在一定程度上反映了北京市夏季机动车排放对污染物浓度的显著贡献.CO 的周末和工作日浓度差异较小,大多数时段的偏差都在 ±10% 之间.06:00~08:00 交通高峰时段的偏差依次为 -7.7%、-13.7% 和 -6.9%,平均值为 -9%.全天偏差最大值出现在 23:00,达 -30%.偏差较小的原因有 2 个:一方面是 CO 在大气中的寿命较长,另一方面是 CO 浓度水平较高(10^{-6} ,体积分数).总体来看 CO 的日变化趋势与 NO_x 相似,特别是 20:00 以后,说明了 CO 与 NO_x 的来源基本相同.

2.2 周末与工作日污染物浓度相关性分析
图 2 给出了 O₃、NO_x、NO、NO₂、CO 和 SO₂ 周末浓度与工作日浓度的相关性,其中横纵坐标分别表示污染物的工作日浓度和周末浓度.用回归方程 $Y = A \times X$ 来表示各污染物周末浓度与工作日浓度的相关性,式中,Y 为周末浓度,X 为工作日浓度,A 为回归系数.表 3 给出上述污染物回归方程的回归

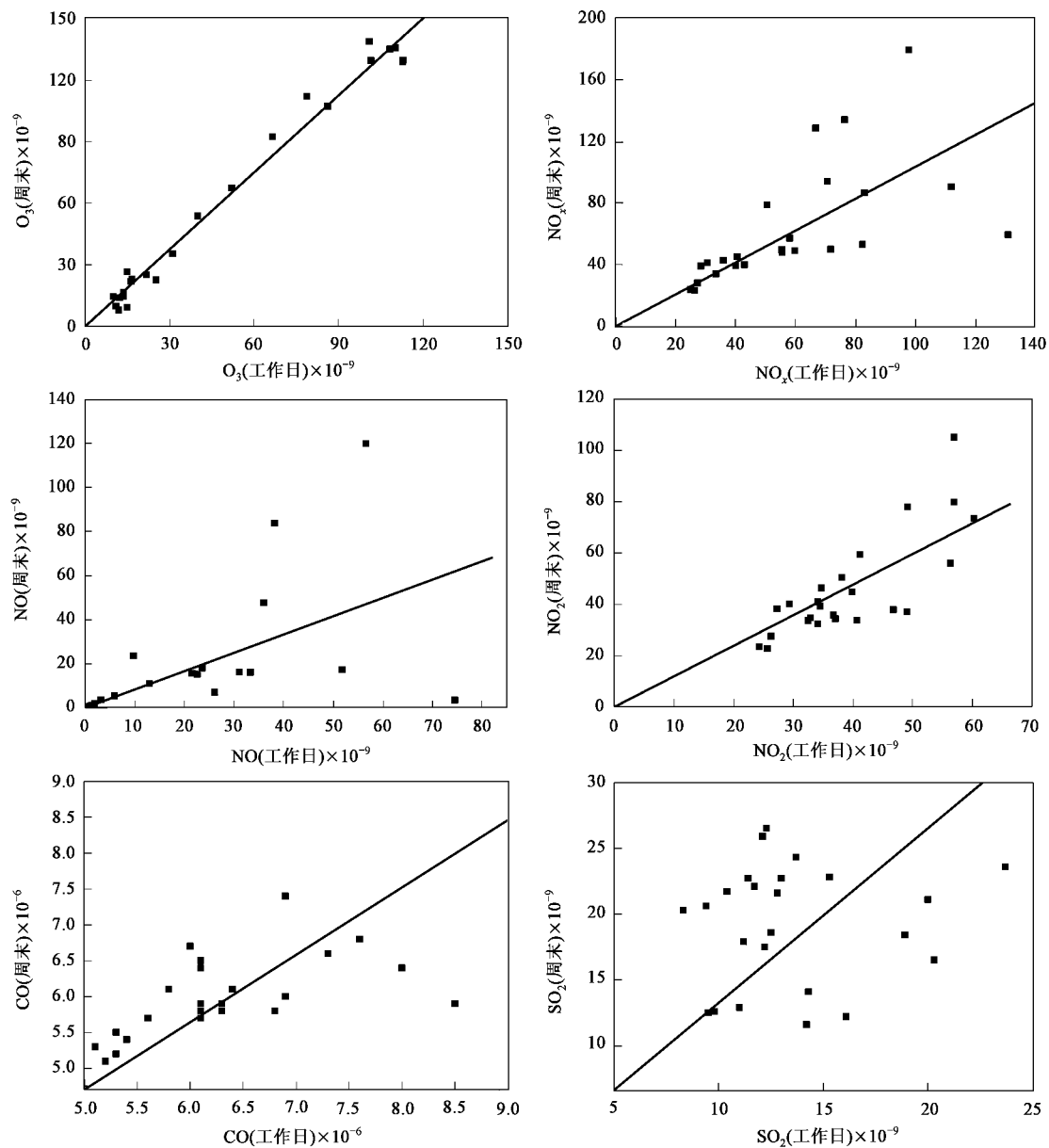


图 2 工作日与周末污染物浓度的相关性

Fig.2 Correlations of the pollutant concentrations at the same time between weekdays and weekends

参数	污染物名称					
	O ₃	NO _x	NO	NO ₂	CO	SO ₂
回归系数(A)	(1.25±0.02)	(1.03±0.10)	(0.83±0.17)	(1.19±0.06)	(0.94±0.02)	(1.33±0.10)
相关系数(R)	0.99	0.61	0.56	0.80	0.61	0.08

系数 A 以及相关系数 R.

从图 2 可以看出相同时刻 O₃ 的周末浓度大于工作日浓度, 这点与 Marr 等^[16] 和 Qin 等^[17] 得出的结论一致, 即夏季 O₃ 浓度存在明显的“周末效应”. O₃ 周末浓度与工作日浓度的偏差范围在 - 37.9%

~ 79.4%之间. 将 05:00 ~ 07:00 的 O₃ 浓度进行平均作为早高峰时段特征浓度, 得到该时段周末与工作日浓度的偏差为 31.2%, 与 Qin 等^[17] 得到的 06:00 偏差 38% 接近. 周末 O₃ 的最大小时浓度值与最大 8 h 平均浓度值分别比工作日高 23% 和 26%,

也与 Q_{in} 等^[17]得到结果(20%和 22%)相近. 从相关方程可以看出 O₃ 的周末浓度几乎为同时刻工作日浓度的 1.25 倍.

从 NO_x、NO 和 NO₂ 的相关性可以看出 NO 的周末浓度明显低于工作日浓度, 尤其是白天. 除了上下班交通高峰期外, 其他时段 NO₂ 的周末浓度略高于工作日浓度. 交通高峰期 NO_x 的周末浓度比工作日浓度低, 但是正午时段的周末浓度高于工作日的浓度. 根据污染物的来源分析, NO_x 和 CO 的主要来源是汽车尾气以及矿物质的燃烧, 所以周末与工作日上下班时段汽车行驶辆的多少在很大程度上影响污染物的浓度. SO₂ 周末浓度与工作日浓度的相关性最差, 相关系数仅为 0.08, 且周末浓度明显高于工作日浓度, 特别是凌晨至 14:00(图 1), 这说明 SO₂ 的主要来源与 NO_x 和 CO 有所不同. 初步推测是由于夏天 SO₂ 浓度本身较低, 周末与工作日餐饮活动所用燃料量的差异可能是引起这种差异的主要原因. 除此之外, 周边地区的污染源也会对北京的污染物浓度的变化产生一定的影响^[23].

为了明确各污染物周末小时浓度与工作日小时浓度相关关系的显著性水平, 对分析结果做了 *t* 检验, 得到结果如表 4 所示.

项目	污染物名称					
	O ₃	NO _x	NO	NO ₂	CO	SO ₂
相关系数(<i>R</i>)	0.99	0.61	0.56	0.80	0.61	0.08
<i>t</i> 检验值	32.92	3.61	3.17	6.21	3.61	0.38
相关性	十分显著	显著	显著	显著	显著	不显著

所有的相关系数均为正值, 故选择在显著性水平 $\alpha = 0.05$, 自由度 $n = 22$ 的情况下进行单侧检验, 查 *t* 分布表得 $t_{0.05(22)} = 1.72$, O₃、NO_x、NO、NO₂ 和 CO 的 *t* 检验值均大于 1.72, 在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 的条件下, 这 5 种污染物周末浓度与工作日浓度的相关性显著, 其中 O₃ 的相关性最为显著, 说明北京市 O₃ 的夏季污染特征确实存在典型的“周末效应”. 很显然此水平下 SO₂ 周末小时浓度与工作日小时浓度的相关性不显著.

2.3 “周末效应”的原因分析

由于 O₃ 是二次产物, 所以其浓度的变化明显受前体物(包括 NO_x 以及 VOC_s)浓度的影响. 初步分析周末产生高浓度 O₃ 的主要原因是周末上午的 NO_x 浓度比工作日的浓度低造成的. 根据 O₃ 与前

体物初始浓度的关系 EKMA (empirical kinetic modeling approach, 经验动力学模拟方法)^[24,25]可知, 在 VOC_s 的控制区 O₃ 最大浓度值随 NO_x 浓度的减小而增大. 图 3 给出了在假定排放条件下得到的北京市 6 月 26 日的 EKMA 曲线^[25], 该排放假设为来自动源源的 VOC_s、NO_x 和 CO 排放量与机动车流量线性相关, 其他源的逐时排放为 24 h 平均值. 图 3 显示了 O₃ 最大小时浓度与前体物(NO_x 和 VOC_s)的初始浓度(一般以 06:00 的浓度值为代表)之间的非线性关系. 将图中各条等值线的拐点连接起来, 称为脊线. 脊线将 EKMA 曲线分为两部分, 脊线上 VOC_s 与 NO_x 的比值一致, 此比值也代表了产生臭氧的最合适的 VOC_s 与 NO_x 比值. 在脊线的右侧, 当 NO_x 浓度固定时 VOC_s 的浓度改变对 O₃ 浓度的影响并不明显, 而固定 VOC_s 的浓度时, NO_x 初始浓度的降低也令臭氧浓度明显降低, 由此可知, 在脊线的右侧 NO_x 是影响 O₃ 生成浓度的主要因素. 同理, 脊线左侧是 VOC_s 的控制区^[26]. 关于 O₃ “周末效应”的结论通过 EKMA 曲线可以得到进一步的解释, 首先北京市 O₃ 的形成处于 EKMA 曲线的左侧, 即在 VOC_s 的控制区; 其次, 大气中 VOC_s 的种类以及来源比较广泛, 包括人为源和自然源, 因此周末与工作日 VOC_s 浓度差异较小. 相比之下, NO_x 的来源比较单一, 受机动车排放的影响显著. 本研究推测这 2 个条件导致在周末 NO_x 浓度比工作日浓度有所下降的情况下 O₃ 浓度明显升高.

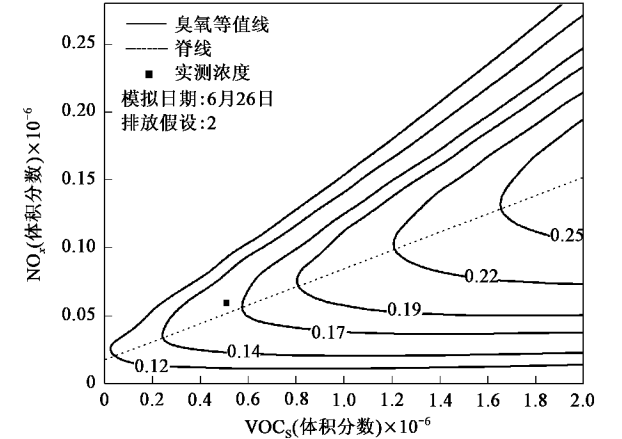


图 3 2000-06-26 O₃ 最大小时浓度随其前体物 VOC_s 和 NO_x 初始浓度的变化曲线

Fig.3 Variations of maximum hourly-mean ozone concentrations with initial concentrations of its precursors (VOC_s and NO_x) on 6 June, 2000

3 结论

(1)交通高峰时段(06:00~08:00)NO_x 和 CO 的周末浓度明显低于工作日浓度,这 3 h 的 NO_x 浓度偏差依次为 -30.3%、-35.4%和 -17.9%,平均值为 -28%. CO 浓度偏差依次为 -7.7%、-13.7%和 -6.9%,平均值为 -9%.周末与工作日 O₃ 浓度的最大偏差达 42.1%,出现在 10:00. O₃ 周末浓度与工作日浓度的回归系数为 1.25 ± 0.02 . 周末 O₃ 的最大小时浓度值与最大 8 h 平均浓度值分别比工作日高 23%和 26%,表现出十分明显的“周末效应”.

(2)O₃、NO_x、NO、NO₂ 和 CO 的周末浓度与对应工作日浓度相关性显著,相关系数依次为 0.99、0.61、0.56、0.80 和 0.61,均通过了显著性水平 $\alpha = 0.05$ 的 *t* 检验,这在一定程度上说明汽车尾气对 NO_x 浓度的贡献. SO₂ 的相关系数为 0.08,非显著相关.

(3)周末 NO_x 浓度的降低致使 O₃ 的周末浓度高于工作日浓度,这说明北京市夏季 O₃ 的形成处于 VOC_s 控制区,减少前体物 VOC_s 的排放是降低 O₃ 的有效途径.

参考文献:

- [1] 张远航,邵可声,唐孝炎.中国城市光化学烟雾污染研究[J].北京大学学报(自然科学版),1998,34(2-3):392-400.
- [2] 范秀英,张微,韩圣慧.我国汽车尾气污染状况及其控制对策分析[J].环境科学,1999,20(5):102-108.
- [3] 刘小红,洪钟祥,李家伦,等.北京地区严重大气污染的气象和化学因子[J].气候与环境研究,1999,4(3):231-236.
- [4] 孔琴心,刘广仁,李桂忱.近地面臭氧浓度变化及其对人体健康的可能影响[J].气候与环境研究,1999,4(1):61-66.
- [5] 马一琳,张远航.北京市大气光化学氧化剂污染研究[J].环境科学研究,2000,13(1):14-17.
- [6] 刘小红,洪钟祥,李家伦,等.北京气象塔秋季大气 O₃, NO_x,及 CO 浓度变化的观测实验[J].自然科学进展,2000,10(4):338-342.
- [7] 安俊琳,李昕,王跃思,等.北京气象塔夏季大气 O₃, NO_x 和 CO 浓度变化的观测实验[J].环境科学,2003,24(6):43-47.
- [8] 刘烽,陈辉, Liu Y G.北京市夏季低层大气 NO_x、O₃ 垂直分布观测研究[J].青岛海洋大学学报,2002,32(2):179-185.
- [9] 李昕,安俊琳,王跃思,等.北京气象塔夏季大气臭氧观测

研究[J].中国环境科学,2003,23(4):353-357.

- [10] 安俊琳,王跃思,李昕,等.北京大气中 NO、NO₂ 和 O₃ 浓度变化的相关性分析[J].环境科学,2007,28(4):706-711.
- [11] 任丽红,胡非,王玮.北京夏季 O₃ 垂直分布与气象因子的相关研究[J].气候与环境研究,2005,10(2):166-174.
- [12] 姚小红,何东全,周中平,等.北京城市大气中 NO_x、CO、O₃ 的变化规律研究[J].环境科学,1999,20(1):23-26.
- [13] 刘洁,张小玲,徐晓峰,等.北京地区 SO₂、NO_x、O₃ 和 PM_{2.5} 变化特征的城郊对比分析[J].环境科学,2008,29(4):1059-1065.
- [14] Cleveland W S, Graedel T E, Kleiner B, *et al.* Sunday and weekday variations in photochemical air pollutants in New Jersey and New York [J]. Science, 1974, 186: 1037-1038.
- [15] Diem J E. Comparisons of weekday-weekend ozone: importance of biogenic volatile organic compound emissions in the semi-arid southwes USA [J]. Atmospheric Environment, 2000, 34: 3445-3451.
- [16] Marr L, Harley R A. Spectral analysis of weekday-weekend differences in ambient ozone, nitrogen oxide, and non-methane hydrocarbon time series in California [J]. Atmospheric Environment, 2002, 36: 2327-2335.
- [17] Qin Y, Tonnesen G S, Wang Z. Weekend/weekday differences of ozone, NO_x, CO, VOCs, PM₁₀ and the light scatter during ozone season in southern California [J]. Atmospheric Environment, 2004, 38: 3069-3087.
- [18] Pont V, Fontan J. Comparison between weekend and weekday ozone concentration in large cities in France [J]. Atmospheric Environment, 2001, 35: 1527-1535.
- [19] 殷永泉,单文坡,纪霞,等.济南大气臭氧浓度变化规律[J].环境科学,2006,27(11):2299-2302.
- [20] Jenkin M E, Clemitshaw K C. Ozone and other secondary photochemical pollutants: chemical processes governing their formation in the planetary boundary layer [J]. Atmospheric Environment, 2000, 34: 2499-2527.
- [21] 钱群,潘金芳,张大年.上海市大气中 NMHC、NO_x、O₃ 和 SO₂ 变化规律[J].上海环境科学,1998,17(10):12-15.
- [22] 周凌晞,汤洁,于晓岚,等.拉萨地区夏季大气 CO, SO₂ 及 NO₂ 变化初探[J].环境科学研究,2001,14(6):16-19.
- [23] 王淑兰,柴发合.北京市 O₃ 污染的区域特征分析[J].地理科学,2002,22(3):360-364.
- [24] Sillman S, Al-Wali K I, Marsik F J, *et al.* Photochemistry of ozone formation in Atlanta, GA-models and measurements [J]. Atmospheric Environment, 1995, 29(21):3055-3066.
- [25] 石玉珍,王庚辰,徐永福.北京市城近郊区光化学烟雾模拟研究[J].气候与环境研究,2008,13(1):84-92.
- [26] 李冰,陈长和,余金香.利用 EKMA 曲线制定光化学烟雾污染区域总量控制方案[J].高原气象,1998,17(2):111-119.