

生物质燃烧对清洁地区地面 O₃ 含量的影响

徐敬^{1,2,3} 张小玲^{1,3} 刘洁^{1,3} 马建中² 董璠^{1,3}

1 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089

2 中国气象科学研究院, 北京 100081

3 北京上甸子大气成分本底国家野外站, 北京 101507

摘要 使用美国热电子公司的 TE Model 49C 型 O₃ 监测仪、TE Model 48C 型 CO 监测仪和 TE Model 42C 型 NO_x 监测仪, 对上甸子区域大气本底站 2005 年 9 月地面 O₃、CO 和 NO_x 的浓度进行了连续监测, 获得了同步的气象数据, 并详细记录了测站附近生物质燃烧的现象。结果表明, 生物质燃烧影响了 O₃ 浓度日变化规律, 最大小时平均浓度出现在 18 时 (北京时间, 下同), 峰值过后的 5~6 h 内 O₃ 的浓度仍明显高于无燃烧现象的情况, 且从燃烧集中时段 (15 时左右) 至傍晚 (19 时), O₃ 浓度逐时上升; NO_x 和 CO 浓度日变化规律和城市地区的观测结果也有不同, 浓度高值时段和燃烧时间吻合, 其中 CO 浓度在燃烧集中时段上升明显; 生物质燃烧情况下, $\Delta\varphi(O_3)/\Delta\varphi(CO)$ 高于无燃烧情况, 在午后至傍晚燃烧集中且太阳辐射条件较好的时段内, NO_x、CO 浓度与 O₃ 浓度呈现正相关关系。相同天气条件下的个例对比结果显示: 测站受生物质燃烧排放输送的影响, 主导风向下燃烧个例中 O₃ 浓度明显高出无燃烧个例约 0.02 mg·m⁻³。

关键词 生物质燃烧 本底站 O₃

文章编号 1006-9585 (2008) 06-0775-08 **中图分类号** P412 **文献标识码** A

Influence of Biomass Burning on Surface Ozone in Clean Area

XU Jing^{1,2,3}, ZHANG Xiao-Ling^{1,3}, LIU Jie^{1,3}, MA Jian-Zhong², and DONG Fan^{1,3}

1 *Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089*

2 *Chinese Academy of Meteorological Sciences, China Meteorological Administration, Beijing 100081*

3 *Shangdianzi National Station for Atmospheric Background Observation, Beijing 101507*

Abstract In order to research the effects to surface O₃ in clean area by biomass burning, the concentration of O₃, CO, and NO_x were monitored at Shangdianzi regional atmospheric background station in September 2005, with TE model 49C-type ozone analyzer, TE model 48C-type carbon monoxide analyzer and TE model 42C-type nitric oxide and nitrogen dioxide analyzer manufactured by US Thermo Electron Corporation, respectively. Meteorological data was obtained and biomass burning cases were recorded in detail synchronously. Results show that diurnal variation of surface O₃ was affected by the biomass burning. In biomass burning cases, maximum hourly average O₃ concentration displayed at 1800 LST. Besides the O₃ concentration was higher than non-biomass burning cases in the following 5 to 6 hours, NO_x and CO diurnal variation character was different from that observed in urban area. High concentration of NO_x and CO correlated with concentrated biomass burning closely. The concentration of CO went up greatly during concentrated burning time. In biomass burning cases, NO_x and CO concentration recorded during concentrated biomass burning time showed a good linear correlation with O₃ concentration. The rate of photochemical O₃ production in the boundary layer O₃ by biomass burning calculated from the production ratio $\Delta\varphi(O_3)/\Delta\varphi(CO)$

收稿日期 2007-06-26 收到, 2008-07-10 收到修定稿

资助项目 中国气象局气候变化专项 CCSF2007-15 和北京区域气象中心科技创新基金项目 BRMCCX200604

作者简介 徐敬, 女, 1977 年出生, 博士研究生, 工程师, 主要从事大气环境的监测和研究工作。E-mail: jxu07@126.com

was 0.04 much higher than by non-biomass burning, which was 0.02. Studying of the biomass and non-biomass burning cases under the same weather condition showed that effected by the transportation of biomass burning emission, surface O_3 concentration was about $0.02 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ higher than that of non-biomass burning cases obtained in the leading wind direction. Hourly variation of surface O_3 concentration during noon and afternoon displays that O_3 concentration goes up hourly from 1500 LST to 1900 LST in biomass burning cases. It agrees well with the biomass burning time recorded.

Key words biomass burning, background station, O_3

1 引言

对流层 O_3 在近地层大气中占有特殊的地位, 它不仅是一种重要的温室气体, 还具有很强的氧化性, 参与许多大气化学反应^[1,2]。全球范围对流层 O_3 浓度的增加会影响地气系统的辐射平衡, 进而引起气候的变化^[3]。对流层 O_3 含量直接关系到大气的氧化能力, 其通过参与大气化学反应而影响其他组分在大气中的含量。此外, 对流层 O_3 浓度过高会直接影响人类健康和动植物生长, 对生态环境产生严重危害。

研究表明, 自然排放、人类生产以及大气中化学反应生成的非甲烷碳氢化合物 (NMHC)、 CO 、 NO_x 等对地面 O_3 的变化有着重要的影响^[4,5]。生物质燃烧排放大量的 NO_x 、NMHC 和 CO , 这些燃烧产物在光的作用下会产生高浓度的 O_3 , 燃烧产物及所产生的 O_3 除了可以被直接输送到下游地区^[6,7], 还会影响近地层 O_3 的含量及对流层 O_3 的垂直分布^[8,9]。有研究显示, 从全球范围来看, 大西洋西部的非洲海岸^[10~12]、印度尼西亚等地^[13]和东南亚地区^[14]是生物质燃烧排放的主要源区, 他们对对流层 O_3 的生成有很大贡献。我国也监测到了东南亚地区生物质燃烧影响华南地区对流层 O_3 垂直分布的现象^[15]。

O_3 污染已成为人类活动集中的诸多大城市的重要环境问题。研究结果表明, 随着人类活动引起的污染物排放量的增加, 不仅城市地区污染大气中 O_3 浓度升高, 干净背景大气中 O_3 的浓度也明显上升^[16]。目前, 国内在部分大城市已经进行了较长时间的研究工作, 但在本底地区开展 O_3 的监测和研究工作尚不充分。本文通过对本底站秋季地面 O_3 、 CO 连续监测的数据分析, 揭示在非城市污染排放条件下生物质燃烧对清洁地区地面

O_3 含量的影响。开展清洁地区 O_3 的研究工作, 对大气本底状态下人类活动引发的 O_3 污染连续监测, 将有助于了解大气的清洁状态, 评估人类活动的影响, 从而为环境治理提供科学依据。

2 资料和方法

2.1 观测站点

上甸子区域大气本底观测站位于北京市东北方向 ($40^\circ 39' N$, $117^\circ 07' E$), 海拔高度为 293.3 m。该站远离城市, 座落在山区乡村中, 距离北京市区 100 km。与其所属的密云县城相距约 55 km。距离最近的居民聚居村落上甸子村约 2 km, 海拔高度相差约 150 m, 方圆 30 km 范围内无大规模的污染排放源。因此, 该站能够代表华北区域清洁地区的大气本底特征。

上甸子测站所处位置山势平缓, 地形开阔。测站背靠 (测站以北) 燕山余脉, 山区人口稀少; 面临 (测站以南) 上甸子村, 该村农业生产以栽种果树和农田耕种为主。

2.2 观测仪器和方法

本文选用的 O_3 资料采用 TE Model 49C 型 O_3 监测仪监测, 测量方法为紫外吸收光度法, 该仪器最低检测限为 $0.002 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 响应时间小于 20 s。 CO 资料采用 TE Model 48C 型 CO 监测仪监测, 测量方法为红外吸收法, 该仪器最低检测限为 $0.046 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 响应时间小于 30 s。 NO_x 资料采用 TE Model 42C 型 NO_x 监测仪监测, 测量方法为化学发光法, 该仪器最低监测限为 $6.1 \times 10^{-5} \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 响应时间小于 60 s。上述仪器在使用之前均经标准仪器进行了校准, 并定期对仪器进行维护, 每个季度进行一次多点校准, 每天进行一次零点检查, 以保证观测结果的准确性。

2.3 生物质燃烧现象的记录

上甸子测站周围是大面积的农田, 栽种的农

表 1 2005 年 9 月测站附近生物质燃烧现象的记录
Table 1 Records of the biomass burning cases in Sep 2005

日期	时间(LST)	燃烧点相对方位	风向
9月4日	1455	西南	西南
9月5日	1000	西南	东北
9月8日	1510	西南	西南
9月11日	1223	南	西南
9月12日	1345	南	西南
9月14日	1030	南	东
9月15日	0740, 1530	东南, 西南	东北, 西南
9月16日	1450	西南	西南
9月17日	1600	东北	西南
9月22日	1430	东	西南
9月25日	1505	西南	西
9月28日	0900	西南	东

作物以玉米和豆类为主, 这两种作物的成熟期均在秋季的 9~10 月, 当地农民有在秋收后就地焚烧秸秆为土地施肥的习惯。因此, 每年秋季测站附近此类燃烧现象十分频繁。2005 年 9 月共记录了 12 个燃烧日。因为测站位于斜坡上, 北面为相对较高的山地, 南面为大片的农田, 因此几乎所有的燃烧点都处于测站南部, 其中以西南方向居多, 燃烧点与观测点的直线距离约在 300~500 m 左右, 每次燃烧的时间约几十分钟至 2 h 不等。表 1 中记录了观测到的测站附近燃烧现象的日期、开始时间、燃烧点相对测站所处的位置及记录时的风向。

3 结果与分析

3.1 有无燃烧记录日的对比分析

3.1.1 O₃、NO_x和 CO 浓度日变化

人类最初将对流层 O₃ 的 90% 来源归为平流层的输送, 其他 10% 归为对流层中的光化学反应^[17]。随着城市的不断扩大, 各类能源消耗和工业生产不断增长, 人们逐渐意识到人类排放和自然源排放是近地面层 O₃ 的主要来源。汽车尾气、工业排放以及各类自然源排放所产生的 NO_x、CO、可挥发性有机物 (VOC) 是产生 O₃ 的前体物, 它们在太阳辐射的作用下经一系列复杂反应生成 O₃。因此, 对流层 O₃ 含量的变化与辐射条件密切相关。图 1 为 2005 年 9 月上甸子本底站

O₃、NO_x和 CO 浓度在有燃烧记录和无燃烧记录的平均日变化, 其中燃烧记录为 7 个 (从表 1 中选取的燃烧点相对测站方向与风向一致的 7 个燃烧日), 无燃烧记录为 18 个。图 1 中显示, 两种情况下 O₃ 的最低浓度均出现在每天的 6 时 (北京时间, 下同), 随着辐射条件的改善, O₃ 浓度逐渐上升。在没有燃烧记录的情况下, 于 16 时达到最大值, 这个结果和刘洁等^[18]对上甸子本底站 2004 年秋季的统计结果一致, 和北京地区的郊区监测站定陵测点的观测结果吻合^[19], 但上甸子站和定陵站均比城区的 O₃ 浓度日变化峰值出现的时间晚 3~4 h^[19]。这种情况可能源于清洁地区本身没有强的 O₃ 前体物排放源, 该地 O₃ 前体物浓度受其上游地区的输送影响, 因此在 O₃ 浓度峰值上出现了几小时的滞后。有燃烧记录情况下, O₃ 最高浓度出现在 18 时, 为 0.129 mg·m⁻³, 比无燃烧情况下的峰值 0.093 mg·m⁻³ 高出 0.036 mg·m⁻³; 随后 O₃ 浓度逐渐下降, 和无燃烧情况下的统计结果相比, 峰值之后的逐时浓度仍明显偏高 (高出无燃烧情况下 0.022~0.051 mg·m⁻³)。NO_x 浓度日变化显示, 峰值区出现在夜间, 谷值区出现在中午前后; 有燃烧和无燃烧情况下的日变化规律一致, 但是在有燃烧的情况下 NO_x 小时平均浓度要高出无燃烧情况下 0.003~0.006 mg·m⁻³。有燃烧情况下, CO 浓度自 15 时开始明显上升, 19 时达到最大值 1.277 mg·m⁻³, 傍晚前后 (16~21 时) 其浓度明显高于无燃烧情况 (0.329~0.481 mg·m⁻³)。城市地区观测结果显示, NO_x

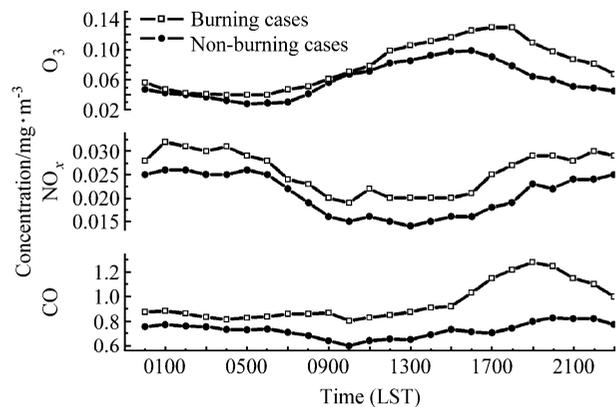


图 1 O₃、NO_x和 CO 浓度日变化对比分析
Fig. 1 Comparison of the diurnal variation of surface O₃, NO_x and CO

和 CO 的高浓度出现在早晨, 和交通运输高峰时段一致^[20], 而本文结果显示 NO_x 和 CO 都在下午 15 时左右浓度开始上升、傍晚达到峰值, 而近 70% 的焚烧情况都发生在午后 (集中于 15 时前后)。从时间上来看, NO_x 和 CO 浓度较高的时段与附近焚烧情况频发时段吻合。

3.1.2 O₃ 与 CO 浓度对应关系

研究表明^[6, 21]: 尽管对流层中的 CO 经氧化反应生成 O₃ 在较短的时间范围内不是一个有效的途径, 但 CO 的浓度水平可以作为生物质燃烧产生碳氢化合物的浓度水平标志; 而碳氢化合物经光化学反应生成 O₃ 的过程是对流层 O₃ 产生的最有效途径。因此, 可以用 CO 与 O₃ 浓度的对应关系来研究生物质燃烧对 O₃ 生成的贡献^[22~25]。对有燃烧记录日中午前后 O₃ 与 CO 浓度的对应关系统计结果表明, 在有燃烧记录的情况下, O₃ 与 CO 浓度存在很好的线性相关, 相关系数为 0.85 ($n=54$; 0.01 的信度检验临界相关系数为 0.33), 明显高出无燃烧情况下的相关系数 0.55 ($n=80$; 0.01 的信度检验临界相关系数为 0.22)。这反映了生物质燃烧排放活性很强的碳氢化合物, 在高浓度的 NO_x 参与下经光化学反应生成 O₃ 的现象。

图 2 中拟合曲线的斜率为 0.04, 该值反应了中午前后 O₃ 生成比率, 代表了边界层中碳氢化合物经氧化反应生成 O₃ 分子的效率。从世界上有大范围生物质燃烧排放源的焚烧集中季节的统计结果来看, $\Delta\varphi(O_3)/\Delta\varphi(CO)$ 在 0.03 ~ 0.3 之间^[6, 21, 26~29]。本文受生物质燃烧影响得到的统计结果为 0.04, 为上述参考范围内的较低水平, 这种情况与燃烧的范围和持续时间有关。引文中的

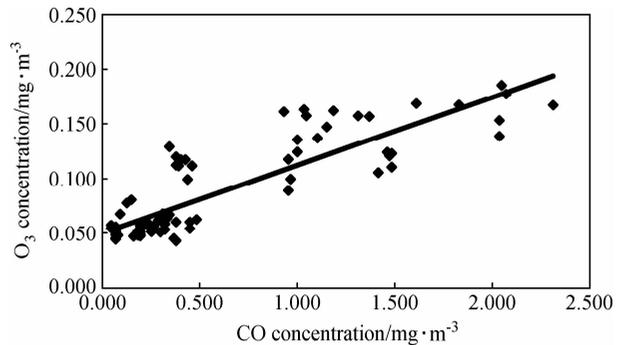


图 2 有燃烧情况下中午前后 O₃ 与 CO 浓度的对应关系
Fig. 2 Relation between noontime concentrations of O₃ and CO under biomass burning cases

观测站点属于大规模长时间出现生物质焚烧后统计的结果, 而上甸子本底站秋季的生物质焚烧现象属于个别燃烧点短时间内的现象, 因此该值偏低, 但仍比 2005 年 9 月无燃烧记录情况下得到的结果 (拟合得到的曲线斜率为 0.02) 偏高。

3.2 相同天气条件下的个例对比分析

3.2.1 天气条件分析

分别选取了 4 个燃烧日 (9 月 4、8、16 和 25 日) 和 4 个无燃烧日 (9 月 7、18、26 和 27 日) 作为个例, 进行对比分析。选取个例的原则主要从相同天气条件角度出发, 晴空或少云日主导风向日变化一致, 风速、温度和湿度接近 (见表 2)。另外, 燃烧现象发生时的记录显示, 燃烧个例处于测站的西南方向 (地面流场图略), 与当时地面风向一致, 说明测点处于燃烧点的下风方向, 受输送影响, 这也是选取燃烧个例的另一个重要原因。

3.2.2 主导风向 O₃ 浓度的对比分析

从上节分析中可看到, 燃烧日和无燃烧日个

表 2 燃烧和无燃烧个例的天气条件对比

Table 2 Weather conditions of biomass burning and non-biomass burning cases

个例	日期	日照时数/h	日平均温度/℃	日平均相对湿度/%	主导风向	日平均风速/ m·s ⁻¹
有燃烧	9月4日	11.1	19.9	54		2.4
	9月8日	11.6	21.6	54	上午东北风,	2.6
	9月16日	9.2	18.8	79	下午西南风	2.3
	9月25日	7.7	16.1	70		3.1
无燃烧	9月7日	11.0	20.1	58		2.3
	9月8日	11.1	18.1	50	上午东北风,	2.6
	9月16日	8.3	19.6	65	下午西南风	2.8
	9月25日	9.2	18.7	68		2.1

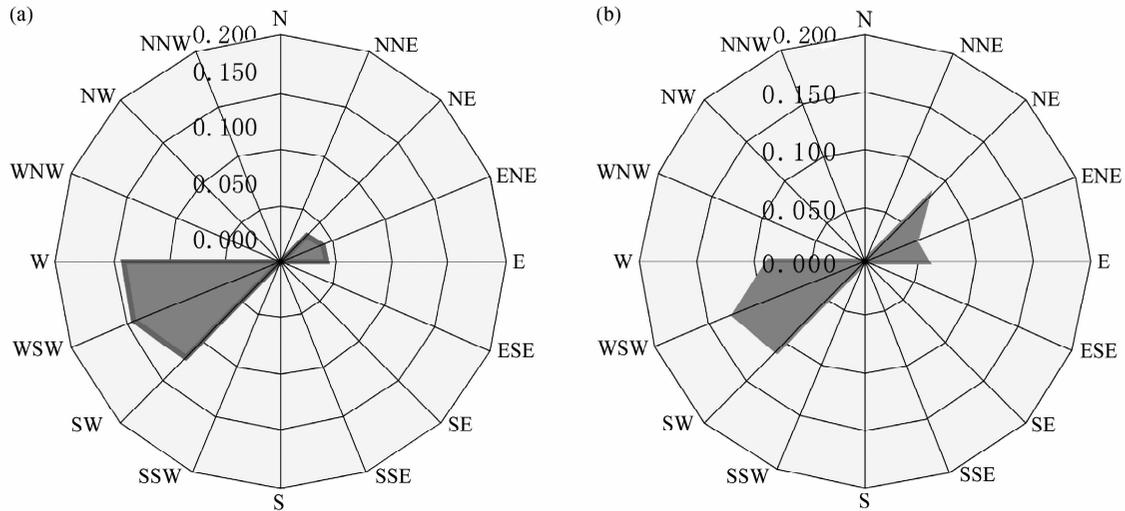


图3 主导风向下 O₃浓度的个个对比：(a) 有燃烧；(b) 无燃烧（单位：mg·m⁻³）
Fig. 3 Comparison of surface O₃ concentration observed in leading wind direction of biomass burning and non-biomass burning cases; (a) biomass burning; (b) non-biomass burning (units: mg·m⁻³)

例中每日的主导风向均为上午东北风，下午西南风。因此分别统计了两种情况主导风向下 O₃ 浓度（图 3）。有燃烧记录的情况，西南和东北风向下 O₃ 的平均浓度在 0.137 和 0.039 mg·m⁻³ 左右；无燃烧情况，西南和东北风向下 O₃ 的平均浓度在 0.118 和 0.049 mg·m⁻³ 左右。比较得出，在西南风输送下，燃烧个例中 O₃ 浓度比无燃烧个例高出 0.002 mg·m⁻³。因为所选的燃烧个例中燃烧点所处位置与风输送的方向一致，因此这个比较结果大体可以反映出在风的输送下燃烧点对测站 O₃ 浓度的影响。

3.2.3 午后 O₃ 浓度逐时变化的对比分析

燃烧个例中生物质燃烧的现象均出现在每日 15 时左右，而此时也正是每天中日照条件最好、光化学反应强烈的时间。图 4 中给出了有燃烧和无燃烧两种情况下午后 O₃ 浓度的逐时变化率。比较可以看出，12~15 时前后，两种情况下的 O₃ 浓度逐时变化率接近，均逐渐增加，其中 13 时较 12 时增加量超过了 0.020 mg·m⁻³；13~16 时 O₃ 浓度的逐时变化率在 0.004~0.006 mg·m⁻³ 左右；16 时开始，有燃烧的情况下，O₃ 浓度的逐时增加量明显高于无燃烧的情况，其中 16~17 时有燃烧情况下增加的浓度为 0.013 mg·m⁻³，而无燃烧的情况下增加量为 0.009 mg·m⁻³，低于燃烧情况 0.004 mg·m⁻³；最为突出的是 17~19 时，有

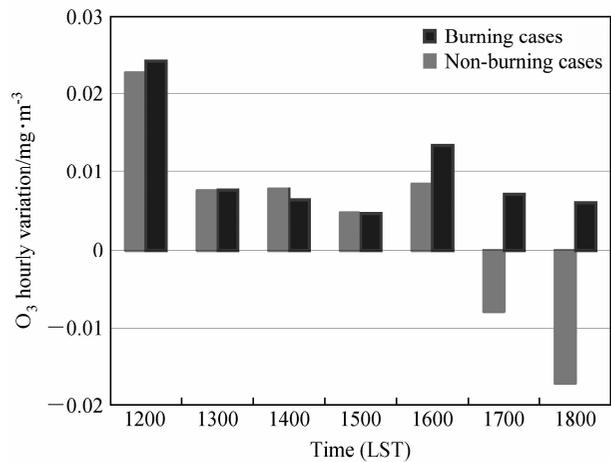


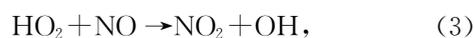
图4 午后 O₃ 浓度逐时变化率的个个对比
Fig. 4 Hourly variation of surface O₃ concentration of biomass burning and non-biomass burning cases during afternoon time

燃烧的情况下 O₃ 浓度逐时变化仍呈现增加的趋势，17~18 时和 18~19 时的增加量分别为 0.006 和 0.007 mg·m⁻³，而无燃烧的情况下 O₃ 浓度的逐时变化则呈现下降的趋势，减少量分别为 0.008 和 0.017 mg·m⁻³。从有燃烧和无燃烧个例的比较来看，在生物质燃烧现象发生后（约 15 时），O₃ 浓度的逐时增长率上升；没有燃烧的情况下，随着日落太阳辐射条件的减弱，17~18 时前后 O₃ 浓度的逐时变化呈下降趋势。受生物质燃烧的影响，燃烧个例在傍晚时段内仍呈增长趋势，说明

生物质燃烧排放的强活性碳氢化合物、活性相对较弱的氮氧化物及 CO 等经累积后,即使在光照条件减弱的情况下仍能够在一段时间内维持 O₃ 的生成反应。研究表明^[30],边界层内 O₃ 的产生率约为 0.0004 mg·m⁻³·h⁻¹,最高可以达到 0.0008 mg·m⁻³·h⁻¹。从本文得到的结果推测,O₃ 浓度的逐时变化除了有局地排放源经光化学反应生成 O₃ 的贡献外,输送也有很大作用。测站的西南方向为人口相对集中的城市地区(分别距离密云县城和北京市区约 55 和 100 km),已有的统计结果显示^[18],西南风(来自城市地区)与本底站 O₃ 的浓度水平有明显的正相关关系,因此研究远距离输送作用对清洁地区 O₃ 污染影响,特别是定量研究其影响程度亦十分重要。

3.2.4 O₃ 与前体物浓度日变化的关系

O₃ 是二次污染物,它的生成依赖于 NO_x 和 CO 等前体物的浓度及化学反应,其中白天的光化学反应是全天 O₃ 浓度变化的基础。图 5 是选取的 4 个燃烧个例中 O₃、NO_x 和 CO 浓度的逐时日变化趋势。CO 是 O₃ 重要的前体物之一,其促进 O₃ 生成的化学反应如下:

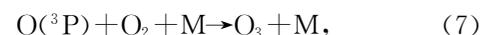


总反应方程式为



已有的观测资料显示^[20],城市 CO 浓度的日变化呈双峰型,峰值出现在 8 时和 21 时,和交通运输高峰期一致;最低值出现在 O₃ 浓度较高的 13 时;CO 浓度与 O₃ 浓度呈负相关。本底站生物质燃烧情况下得到的结果显示,CO 浓度在每日的午后开始上升,19 时左右达到最高(除第 2 个个例外),早晨没有峰值出现。CO 浓度上升的时间和燃烧现象集中的时段吻合,其峰值的出现略滞后于 O₃ 浓度峰值出现的时刻(18 时),说明生物质燃烧排放导致 CO 浓度上升,从而为 O₃ 的生成提供了高浓度的前体物,但随着傍晚辐射条件的减弱,O₃ 生成效率降低,导致 CO 浓度累积。

生物质燃烧情况下观测得到的本底站 NO_x 浓度日变化规律显示,NO_x 浓度自午后 15 时左右开始上升,次日凌晨随着 O₃ 浓度上升而下降,中午前后达到最低。本文测得的 NO_x 浓度日变化规律同样与城市早晚偏高、午后最低的观测结果不同^[20]。O₃ 与 NO_x 之间存在如下链式反应:



从上述方程中可以看出,高浓度的 NO₂ 为 O₃ 生成提供了基础,而随着 O₃ 浓度的增加,大量的 NO 消耗 O₃ 被氧化成 NO₂,但总的来看,O₃ 浓度与 NO₂/NO 之间存在正相关关系。由本文的观测结

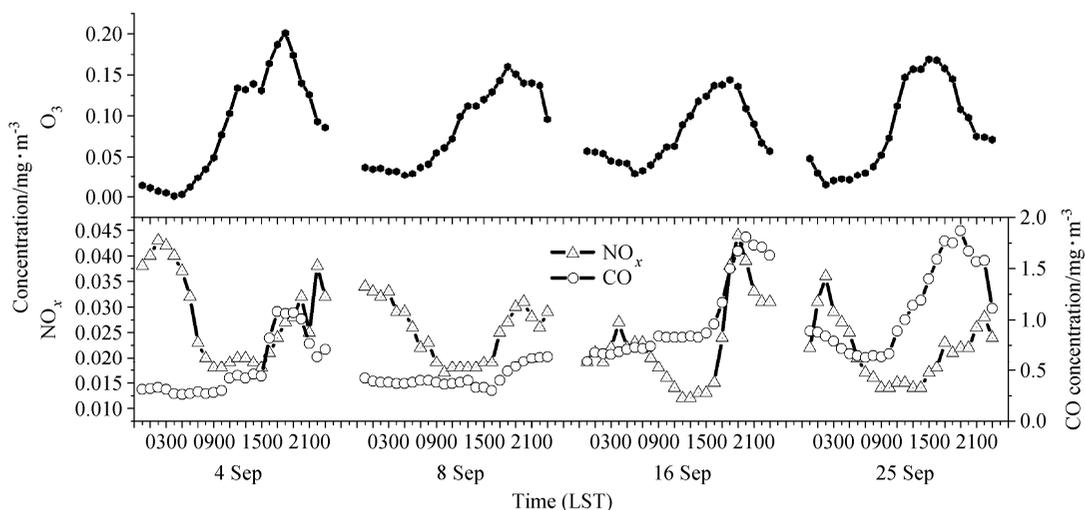


图 5 燃烧个例中 O₃、NO_x 和 CO 浓度逐时日变化

Fig. 5 Diurnal variation of concentration of O₃, NO_x and CO in burning cases

果可以看出, 午后至傍晚随着 NO_x 排放量的增加, 在太阳辐射条件较好的情况下, O₃ 与 NO_x 之间主要为加速 O₃ 生成的正贡献过程 (方程 6 和 7 所示), 而入夜后, 随着 NO_x 排放量的减少, 太阳辐射条件减弱, O₃ 与 NO_x 浓度变化呈负相关关系。

4 结论

(1) 2005 年 9 月统计结果显示, 上甸子本底站 O₃ 最低浓度出现在每日 6 时。最高值无燃烧情况下出现在 16 时, 峰值为 0.093 mg · m⁻³; 有燃烧情况下出现在 18 时, 峰值为 0.129 mg · m⁻³。峰值之后有燃烧的逐时浓度 (0.022~0.051 mg · m⁻³) 仍明显高于无燃烧。此外, NO_x 和 CO 浓度有燃烧也较无燃烧偏高, 其中 CO 浓度在燃烧集中时段上升明显。

(2) 燃烧个例中 O₃ 与前体物 NO_x 和 CO 浓度日变化的关系表现为, 午后至傍晚燃烧集中、太阳辐射条件较好的时段, NO_x 和 CO 浓度上升, 并且 NO_x 和 CO 浓度与 O₃ 浓度存在明显的正相关关系; $\Delta\varphi(\text{O}_3)/\Delta\varphi(\text{CO})$ 为 0.04, 比无燃烧情况的统计结果高 0.02。上述结果大体反映了生物质燃烧排放的碳氢化合物在高浓度 NO_x 参与下经光化学反应生成 O₃ 的过程。

在相同气流输送 (燃烧点向测站方向输送) 条件下, 燃烧个例中 O₃ 浓度比无燃烧个例高 0.020 mg · m⁻³ 左右; 受燃烧点输送的影响, 中午至傍晚 19 时 O₃ 浓度逐时上升, 而无燃烧的情况下, 17~18 时前后 O₃ 浓度逐时下降。

致谢 感谢上甸子本底站工作人员在观测资料收集过程中的辛勤劳动。

参考文献 (References)

[1] Logan J A, Kirchhoff V W J H. Seasonal variations of tropospheric ozone at Natal, Brazil. *J. Geophys. Res.*, 1986, **91**: 7875~7888

[2] Crutzen P J. Role of the Tropics in atmospheric chemistry. *The Geophysiology of Amazonia*, Dickinson R E, Ed. New York: Wiley Press, 1987. 107~130

[3] 王卫国, 吴润, 刘红年, 等. 中国及邻近地区污染排放对

对流层臭氧变化与辐射影响的研究. *大气科学*, 2005, **29** (5): 734~746

Wang Weiguo, Wu Jian, Liu Hongnian, et al. Researches on the influence of pollution emission on tropospheric Ozone variation and radiation over China and its adjacent area. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29** (5): 734~746

[4] 白建辉, 王明星. 地面臭氧光化学过程规律的初步研究. *气候与环境研究*, 2001, **6** (1): 91~102

Bai Jianhui, Wang Mingxing. The primary study on the regularity of atmospheric photochemical process for surface ozone. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2001, **6** (1): 91~102

[5] 朱彬, 王韬, 徐永福, 等. 临安秋季近地层非甲烷碳氢化合物特征. *气候与环境研究*, 2005, **10** (2): 185~192

Zhu Bin, Wang Tao, Xu Yongfu, et al. Characteristics of non-methane hydrocarbons collected in Lin'an, a rural/agriculture site of eastern China during 1999 autumn. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2005, **10** (2): 185~192

[6] Mauzerall D L, Logan J A, Jacob D J, et al. Photochemistry in biomass burning plumes and implications for tropospheric ozone over the tropical South Atlantic. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103** (D7): 8401~8423

[7] Chan L Y, Chan C Y, Liu H Y, et al. A case study on the biomass burning in Southeast Asia and enhancement of tropospheric ozone over Hong Kong. *Geophys. Res. Lett.*, 2000, **27** (10): 1479~1482

[8] Eugenio Sanhueza, Crutzen P J, Emmanuel Fernández. Production of boundary layer ozone from tropical American Savannah biomass burning emissions. *Atmos. Environ.*, 1999, **33**: 4969~4975

[9] 陈新梅, 王卫国, 吴润, 等. 对流层垂直臭氧分布变化量对生物质燃烧响应的模拟研究. *云南大学学报 (自然科学版)*, 2006, **28** (1): 45~50

Chen Xinmei, Wang Weiguo, Wu Jian, et al. Simulation of response of variation of the vertical distribution of tropospheric ozone to biomass burning. *Journal of Yunnan University* (Natural Sciences Edition) (in Chinese), 2006, **28** (1): 45~50

[10] Portmaann R W, Solomon S, Fishman J, et al. Radiative forcing of the Earth~climate system due to tropical tropospheric ozone production. *Geophys. Res. Lett.*, 1997, **102** (D8): 9409~9417

[11] Fishman J. The global consequences of increasing tropospheric ozone concentration. *Chemosphere*, 1999, **22** (7): 685~695

[12] Fishman J, Brackett V G. The climatological distribution of tropospheric ozone derived from satellite measurements using version 7 Total Ozone Mapping Spectrometer and

- Stratospheric Aerosol and Gas Experiment data sets. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102** (D15): 19275~19278
- [13] Hauglustaine D A, Brasseur G P, Levine J S. A sensitivity simulation of tropospheric ozone changes due to the 1997 Indonesian fire emission. *Geophys. Res. Lett.*, 1999, **26** (21): 3305~3308
- [14] 吴润, 蒋维楣, 陈新梅, 等. 生物质燃烧对东南亚及中国南方对流层臭氧含量影响的模拟研究. *环境科学*, 2004, **25** (2): 1~6
- Wu Jian, Jang Weimei, Chen Xinmei, et al. Simulation of effects to tropospheric ozone over south east Asia and south China from biomass burning. *Chinese Journal of Environmental Science* (in Chinese), 2004, **25** (2): 1~6
- [15] 郑永光, 朱佩君, 陈尊裕, 等. 东南亚地区生物体燃烧影响华南地区对流层臭氧垂直分布的个例分析. *地球物理学报*, 2004, **47** (5): 767~775
- Zheng Yongguang, Zhu Peijun, Chen Zunyu, et al. Influence of biomass burning in southeast Asia on the lower tropospheric ozone distribution over South China. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 2004, **47** (5): 767~775
- [16] Cox R A, Eggleton A E J, Derwent R D, et al. Long-range transport of photochemical ozone in northern Europe. *Nature*, 1975, **255**: 118~121
- [17] Roelofs G J, Lelieveld J. Model study of the influence of cross-tropopause O₃ transports on tropospheric O₃ levels. *Tellus*, 1997, **49B**: 38~55
- [18] 刘洁, 张小玲, 张晓春, 等. 上甸子本底站地面臭氧变化特征及影响因素. *环境科学研究*, 2006, **19** (4): 19~25
- Liu Jie, Zhang Xiaoling, Zhang Xiaochun, et al. Surface ozone characteristics and the correlated factors at Shangdianzi atmospheric background monitoring station. *Research of Environmental Sciences* (in Chinese), 2006, **19** (4): 19~25
- [19] 王淑兰, 柴发合. 北京市 O₃ 污染的区域特征分析. *地理科学*, 2002, **22** (3): 360~364
- Wang Shulan, Chai Fahe. Provincial characteristics of ozone pollution in Beijing. *Scientia Geographical Sinica* (in Chinese), 2002, **22** (3): 360~364
- [20] 单文坡, 殷永泉, 杜世勇, 等. 夏季城市大气 O₃ 浓度影响因素及其相关关系. *环境科学*, 2006, **27** (7): 1276~1281
- Shan Wenpo, Yin Yongquan, Du Shiyong, et al. Ozone pollution, influence factors and their correlation at urban area in summer. *Environmental Science* (in Chinese), 2006, **27** (7): 1276~1281
- [21] Kirchoff V W J H. Biomass burning in the Brazilian Amazon region: Measurements of CO and O₃. In: *Global Biomass Burning: Atmospheric, Climatic and Biosphere Implications*, Levine J S, Ed. Cambridge, MA: MIT Press, 1991. 108~111
- [22] Andreae M O, Anderson B E, Blake D R, et al. Influence of plumes from biomass burning on atmospheric chemistry over the equatorial and tropical South Atlantic during CITES 3. *J. Geophys. Res.*, 1994, **99**: 12793~12808
- [23] Crutzen P J, Delany A C, Greenberg J, et al. Tropospheric chemical composition measurements in Brazil during the dry season. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 1985, **2**: 233~256
- [24] Kirchoff V W J H, Rasmussen R A. Time variations of CO and O₃ concentrations in a region subject to biomass burning. *J. Geophys. Res.*, 1990, **99**: 7521~7532
- [25] Waston C E, Fishman J, Reichle H G. The significance of biomass burning as a source of carbon monoxide and ozone in the Southern Hemisphere tropics: A satellite analysis. *J. Geophys. Res.*, 1990, **95D**: 16443~16450
- [26] Parrish D D, Holloway J S, Trainer M, et al. Export of North American ozone pollution to the North Atlantic Ocean. *Science*, 1993, **259**: 1436~1439
- [27] Chin M, Jacob D J, Munger J W, et al. Relationship of ozone and carbon monoxide over north America. *J. Geophys. Res.*, 1994, **99**: 14565~14573
- [28] Greenberg J P, Zimmerman P R, Heidt L, et al. Hydrocarbon and carbon monoxide emission from biomass burning in Brazil. *J. Geophys. Res.*, 1984, **89**: 1350~1354
- [29] Helas G, Lobert J, Scharffe D, et al. Ozone production due to emissions from vegetation burning. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 1995, **22**: 163~174
- [30] Colette A, Ancellet G, Menut L, et al. A Lagrangian analysis of the impact of transport and transformation on the ozone stratification observed in the free troposphere during the ESCOMPTE campaign. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006, **6**: 3487~3503