

洪盛茂, 焦荔, 何曦, 等. 2009. 杭州主城区 O_3 与前体物浓度变化特征 [J]. 气候与环境研究, 14 (6): 657-664. Hong Shengmao, Jiao Li, He Xi, et al. 2009. Characteristics of O_3 and precursors concentrations in Hangzhou urban areas [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (6): 657-664.

杭州主城区 O_3 与前体物浓度变化特征

洪盛茂 焦荔 何曦 孙鸿良 徐鸿 杨乐 何纪平

杭州市环境监测中心站, 杭州 310007

摘 要 利用 2004~2006 年杭州主城区环境空气监测资料, 研究了 O_3 、 NO_2 和 CO 浓度的分布特征和时间变化规律, 结果表明, 杭州主城区 3 年的 O_3 、 NO_2 、CO 的年均浓度都不大, 分别为 40、60、1400 $\mu g \cdot m^{-3}$ 。四季中 O_3 、 NO_2 和 CO 浓度相差较大, O_3 是夏季高冬季低, NO_2 和 CO 则是秋季较高, 夏季较低。 O_3 、 NO_2 和 CO 浓度日变化也很明显, 其中 O_3 是单峰形态, NO_2 和 CO 为双峰形态。不同天气条件下 O_3 与烃类的关系研究表明, 晴天时烃类浓度减少, O_3 浓度明显增加; 阴天时 O_3 浓度较低, 烃类浓度较高, 它们的变化不大。白天和夜晚不同风速时 O_3 、 C_2-C_{12} 的浓度变化不同, 白天风速增大时 C_2-C_{12} 浓度减小, O_3 浓度增加; 晚上无此变化。

关键词 前体物 C_2-C_{12} 天气条件

文章编号 1006-9585 (2009) 06-0657-08 **中图分类号** X515 **文献标识码** A

Characteristics of O_3 and Precursors Concentrations in Hangzhou Urban Areas

HONG Shengmao, JIAO Li, HE Xi, SUN Hongliang, XU Hong, YANG Le, and HE Jiping

Hangzhou Environmental Monitoring Center Station, Hangzhou 310007

Abstract Based on the air monitoring data in Hangzhou urban areas from 2004 to 2006, the concentrations of O_3 , NO_2 , CO, and their temporal variation characteristics were analyzed. The results showed that all the annual mean concentrations of O_3 , NO_2 , and CO were low in the three years, which were 40, 60, and 1400 $\mu g \cdot m^{-3}$, respectively. The concentrations of O_3 , NO_2 , and CO were different among seasons, O_3 concentration was the highest in summer and the lowest in winter, while both NO_2 and CO concentrations were higher in winter and lower in summer. The diurnal variations of the concentrations of O_3 , NO_2 , and CO were obvious, the diurnal variations of O_3 concentrations showed one peak, while the others had two peaks. The relationship between O_3 and hydrocarbons concentration in different weather conditions showed that O_3 concentration increased significantly and hydrocarbons reduced during cloudless days, but during cloudy days O_3 concentration was lower and hydrocarbons concentrations were higher, and their concentrations changed little. In the daytime and nighttime, O_3 and C_2-C_{12} hydrocarbons concentrations changed with different wind velocity. In the daytime, the C_2-C_{12} hydrocarbons concentrations reduced with the increase of wind speed, and O_3 was exactly opposite. The similar situation was not found in the nighttime.

Key words precursor, C_2-C_{12} hydrocarbons, weather condition

收稿日期 2009-03-27 收到, 2009-10-11 收到修定稿

资助项目 杭州市科技局重点项目 20092113A05

作者简介 洪盛茂, 男, 1962 年出生, 学士, 高级工程师, 研究领域为大气污染和污染监测。E-mail: honglaomao@hotmail.com

1 引言

随着经济的迅猛发展和城市化建设加快,城市中机动车数量急剧增长,污染物排放量迅速增加,大气污染问题尤其是光化学烟雾污染引人注目。自 20 世纪 40 年代发生洛杉矶光化学烟雾事件后,在东京、大阪、墨西哥城等城市陆续发生烟雾污染事件。光化学烟雾是由于对流层中大气光化学氧化剂超过一定限度造成的,而大气 O_3 是光化学氧化剂中最重要的组分,它主要来自自然源和人类源排放的 NO_x 、非甲烷烃 (NMHC) 在太阳辐射下光化学反应的产物。孔琴心等 (1999) 研究表明 O_3 浓度若是太高会严重影响人体健康, Sillman et al. (1995) 利用相关模式结合观测手段对 O_3 及其前体物及相互关系进行研究; 白建辉等 (2003, 2006) 研究表明前体物对 O_3 的影响很大, 对 O_3 具有促进和抑制的双重作用; 尤其是挥发性有机化合物 (VOCs) 的作用, 因它的组分繁多而变得复杂难以清晰确定 (张美根, 2005; 石玉珍等, 2008)。

国内外一些大城市的大气光化学污染越来越严重, 如欧洲的意大利 (EEA, 2007, 2008)、北京 (马一琳等, 2000; 王淑兰等, 2002)、珠三角地区 (广东环境保护监测中心站等, 2007, 2008) 等地, 光化学污染已经比较严重, O_3 的最大小时浓度都在 $400 \mu g \cdot m^{-3}$ 以上。蔡咏安 (2002) 对台湾高屏地区的空气质量研究结果表明, 1996~2001 年主要指标污染物中 O_3 高居首位 (占 62.5%), 而可吸入颗粒物 (PM10) 为 37.5%。

杭州作为浙江省省会城市, 现代化建设水平较高, 城市环境污染问题也较多, 尤其是大气污染方面问题比较突出, 市区大气 O_3 污染也比较严重。本文研究 2004~2006 年 O_3 与前体物 NO_x 、CO 的关系, 并在 2006 年 9 月 20 日~10 月 11 日先后对 5 个不同功能区的 O_3 、 NO_2 、CO、 C_2-C_{12} 及气象因子进行同步观测, 得到一些比较重要的结论。

2 监测地点和监测仪器

2.1 监测地点

杭州主城区设有 7 个环境空气质量监测点,

分别是和睦小学 (原来的工业生活混合区)、朝晖五区 (居民区)、浙江农大 (文教生活混合区)、南星桥 (商业生活混合区)、植物园 (风景区)、下沙 (高教工业园区)、云栖 (清洁对照点)。这些点的区划功能区特点在过去几年比较明显, 随着现在城市化进程的加快, 这种划分已经比较模糊, 区划特性不再明确, 由于机动车的迅速增加, 各点位受到交通的影响越来越大。

2.2 监测仪器

在 7 个监测点位上所用的仪器主要有二类: 一类是美国 TE 公司的仪器, 另一类是瑞典 OPSIS 公司的差分吸收光谱仪器。杨丽萍 (2005) 和丁胜等 (2006) 对这两类仪器进行了对比分析, 结果表明它们的监测结果具有较好的相关性和一致性, 两者无显著性差异。对于 TE 公司生产的仪器, 使用 TE146 校准仪半个月进行一次校准; OPSIS 公司生产的仪器, 使用 OPSIS 配套校准系统进行校准, 所用的标准气体都在有效期内。各监测点位和相关监测设备见表 1。

3 结果与讨论

3.1 O_3 与 NO_2 、CO 的年际及季节变化特征

2004~2006 年主城区 O_3 年日均浓度分别为 41、35、36 $\mu g \cdot m^{-3}$, 3 年的变化幅度不大 (图 1); O_3 最大小时浓度分别为 275、259、292 $\mu g \cdot m^{-3}$, 超标幅度接近 0.5, 超标频率分别为 6.3%、6.0%、6.9%, 略有差异。 O_3 的年均浓度变化不大, 但最大小时浓度却有较大幅度的增加, 这与 Xu et al. (2008) 研究结果比较一致。

不论是与远郊的临安本底站 (杨关盈等, 2008) (年均浓度为 70 $\mu g \cdot m^{-3}$, 最大小时浓度为 320 $\mu g \cdot m^{-3}$) 相比, 还是与北京 (年均浓度为 50 $\mu g \cdot m^{-3}$, 最大小时浓度为 410 $\mu g \cdot m^{-3}$) (安俊岭等, 2007)、广州 (最大小时浓度为 458 $\mu g \cdot m^{-3}$)、上海 (年均浓度为 52 $\mu g \cdot m^{-3}$, 最大小时浓度为 350 $\mu g \cdot m^{-3}$) (张爱东等, 2006) 等大城市相比, O_3 年平均浓度和最大小时浓度都要低得多。

这 3 年 O_3 前体物 NO_2 和 CO 的年均浓度变化不大, 前者分别为 60、62 和 61 $\mu g \cdot m^{-3}$, 后者分别为 1305、1569 和 1399 $\mu g \cdot m^{-3}$ 。其

表 1 各监测点位的相关监测设备
Table 1 Measure equipments at different monitoring sites

监测仪器	校准仪器	监测点位	标准气体
TE 公司仪器（美国） NO ₂ : TE42C NO _x 分析仪	146 校准仪器	植物园、云栖、天目山路、杭大路	国家标准物质研究中心生产的 NO 标准气体
O ₃ : TE49C O ₃ 分析仪	OPSISOC500 O ₃ 校准仪	植物园、云栖、天目山路、杭大路	
CO: TE48C CO 分析仪	146 校准仪器	和睦小学、朝晖五区、浙大华家池、南星桥、云栖、天目山路、杭大路	国家标准物质研究中心生产的 CO 标准气体
OP SIS 公司仪器（瑞典） NO ₂ : AR500	OP SIS 校准系统	和睦小学、朝晖五区、浙大华家池、南星桥、下沙	国家标准物质研究中心生产的 NO 标准气体
O ₃ : AR500	OP SIS 校准系统, OP-SISOC500 O ₃ 校准仪	和睦小学、朝晖五区、浙大华家池、南星桥、下沙	
SYNSPEC 公司（荷兰） C ₂ -C ₁₂ : GC955 高低碳氢分析仪（在线式仪器）	标准气体（PAMS）	朝晖五区、下沙、云栖、天目山路、杭大路	美国 RESTEK3400（PAMS）

注：SYNSPEC 公司的 C₂-C₁₂ 高低碳氢分析仪只在 2006 年 9 月 20 日~10 月 11 日进行观测。

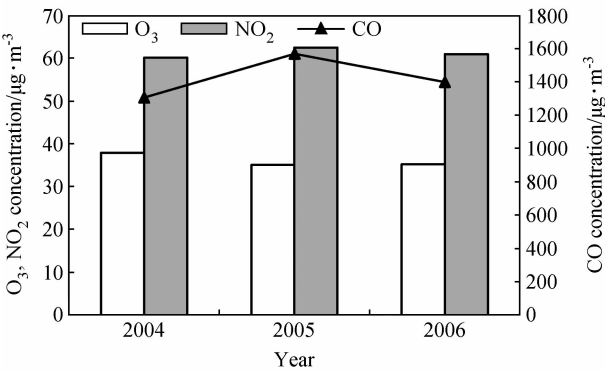


图 1 2004~2006 年 O₃、NO₂ 和 CO 浓度变化
Fig. 1 The annual mean concentration variations of O₃, NO₂, and CO from 2004 to 2006

中 NO₂ 的超标天数有所增加，从前 2 年的 2 天增加到 2006 年的 5 天，总的超标天数增加不算多，但较高浓度（>120 μg·m⁻³）的天数增加较快。

从 2004~2006 年主城区的 O₃ 及其前体物 NO₂、CO 的月平均浓度变化来看（见图 2），NO₂ 和 CO 具有相似的变化规律，均呈现非常明显的单谷变化曲线，秋末冬初浓度最高，春季次高；夏季出现最低值。O₃ 的变化与 NO₂、CO 大体呈现出相反的状态，当冬季 NO₂、CO 较高时，O₃ 较低，而夏季 NO₂、CO 的浓度较低时，O₃ 则较

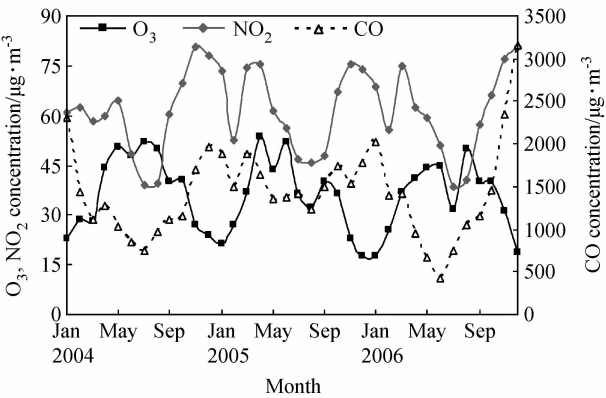


图 2 O₃、NO₂ 和 CO 月均浓度对比
Fig. 2 Comparison of monthly mean concentration among O₃, NO₂, and CO from 2004 to 2006

高。O₃ 夏季浓度最高，冬季最低，春秋二季居中的变化特点，与远郊的临安本底站（杨关盈等，2008）、北京上甸子本底站（刘洁等，2006）、北京城区（段欲晓等，2001）监测的结果是一致的，均呈现夏季、春季、秋季、冬季逐渐递减的特点。秋冬季节主城区前体物浓度较高，但大气 O₃ 浓度却很低，说明 O₃ 的形成在更大程度上取决于太阳辐射及其他的一些相关气象条件。这是因为冬季夜间 NO₂ 处于较高浓度时对 O₃ 的滴定作用也较强，降低了 O₃ 的浓度，白天太阳辐射较弱，光化学反应较慢，O₃ 最大小时浓度也较低；而夏季夜

间由于 NO_2 浓度相对较低, 对 O_3 的滴定作用也较弱, 白天太阳辐射强, 大气光化学反应速度快, O_3 生成量大。

3.2 O_3 与 NO_2 、 CO 浓度的日变化特征

从各监测点位 O_3 、 NO_2 和 CO 的 2004~2006 年平均日变化曲线上可以看到 (图 3), O_3 是单峰型, 与 NO_2 和 CO 的峰谷对应关系比较明显, 与许多研究成果是比较一致的 (杨昕等, 1999; 白建辉等, 2001)。

从和睦小学等点位的日变化曲线可以看到, 08 时到 19 时 NO_2 和 CO 具有相同的变化规律, CO 的反应和 NO_2 的光解作用从增强到减弱, 导致 O_3 变化较大, 具有单峰变化特征; 在 20 时至 07 时 NO_2 和 CO 的变化规律相反时, O_3 的变化比较平缓, 变化幅度不大。 O_3 与前体物 NO_2 和 CO 的这种日变化关系是由于城市污染区域的地面 O_3 浓度主要受到局地光化学作用控制。Pudasainee et al. (2006) 的研究也表明城市区域的这些前体物浓度较高, O_3 产生和损耗取决于光化学反应。日出后由于人类活动加剧, NO_2 和 CO 出现早高峰, 太阳辐射增强后光化学反应加快, NO_2 和 CO 逐渐被消耗, 产生 O_3 促使其浓度增高, 与安俊岭等 (2008) 的研究结果相符。下午浓度达到最大值后逐渐减小, 夜间恢复到较低浓度。夜晚 19 时后受到另一次交通高峰以及城市热岛效应影响 (杨雅琴等, 2008), NO_2 有另一次较大幅度回升, CO 浓度也有较大幅度的上升 (单文坡等, 2006; 张凯杨等, 2007)。

3.3 秋季 C_2-C_{12} 的浓度及其与 O_3 浓度的关系

根据杭州市区 O_3 多年观测资料, O_3 最大小时浓度高值一般出现在春、秋二季, 更以秋季的浓度较高和高浓度出现频率较多, 因此在秋季 (2006 年 9 月 20 日~10 月 11 日) 在不同功能区进行 C_2-C_{12} 的在线监测, 同时进行 NO_x 、 CO 、 O_3 等项目观测和气象要素观测。

3.3.1 O_3 与 C_2-C_{12} 浓度的日值变化

从表 2 中看到, C_2-C_{12} (分为芳香烃、烷烃和烯烃三种烃类) 总浓度以交通干道最高, 为 $177.4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 高教工业园区浓度也较高, 为 $161.8 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; 清洁对照区最低, 为 $74.1 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。其他前体物浓度也有类似情况, 以交通干道上较高, 以清洁对照区最低, 高教工业比清洁对照区要高一些。

比较不同功能区的 O_3 浓度可以看到, 在交通干道监测到的 O_3 浓度平均为 $28.7 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 而在城区边缘的高教工业区和清洁对照区监测到的 O_3 浓度较高, 分别为 $81.2 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $64.6 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 呈现城市中心 O_3 浓度低于郊区的特点, 王雪梅等 (2003) 的研究也表明这一点。从前体物浓度看, 高教工业区和清洁对照区均是比较低的, 而它们的 O_3 浓度却比较高, 表明受到交通干道排放源影响较大的地方 O_3 浓度受到抑制, 而其他远一些的地方 O_3 相对较高, 说明 O_3 前体物浓度与 O_3 生成效率之间具有非线性特征。

3.3.2 不同天气条件下 O_3 与烃类的关系

为了比较不同天气条件下 O_3 与烃类的关系, 选取晴天 (云栖点位 9 月 21、22 日) 和阴天 (9 月 28、29 日) 进行对比分析, 结果见图 4。

从图 4 a 中可以看到, 晴天时由于太阳辐射较强, 光化学反应活跃, 芳烃和烯烃浓度大致呈现降低的趋势, 烷烃变化比较复杂, O_3 浓度增加较快。在 3 种烃类中烷烃的浓度虽然最高, 从图中看出, 尽管烷烃的波动变化最大, 但由于它的化学活性弱, 对 O_3 浓度的影响不大。芳烃和烯烃由于活性较强, 与 O_3 变化较为密切。

从图 4 b 中可以看到, 阴天时则是另一种情况。虽然 3 种烃类的浓度均处于较高水平, 但 O_3 浓度始终在较低水平上变化, 最高小时浓度也只有 $70 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 左右, 烃类浓度变化对 O_3 浓度变化的影响不明显。

表 2 不同功能区 O_3 与 C_2-C_{12} 浓度的变化

Table 2 The variations of concentrations of O_3 and C_2-C_{12} in different areas

$\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$

区域	C_2-C_{12}	芳烃	烷烃	烯烃	NO_2	CO	O_3
清洁对照区	109.9	28.9	53.6	27.4	32.2	1296	64.6
交通干道	177.4	43.8	81.1	52.5	67.4	4046	28.7
居民区	133.0	29.2	58.9	44.9	69.9	1316	47.1
高教工业区	161.8	72.5	65.6	23.7	58.1	1354	81.2

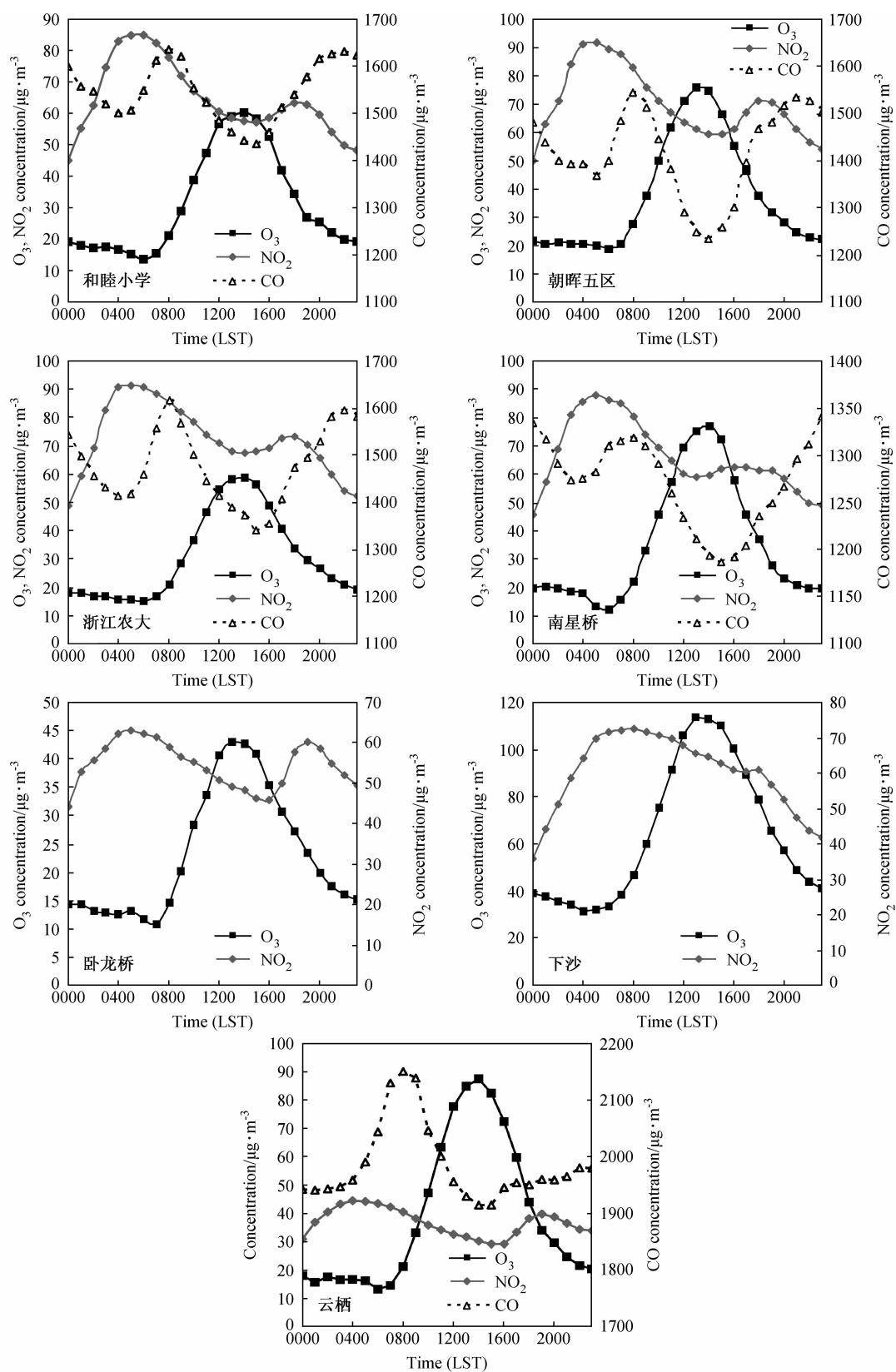


图 3 各监测点位 O₃、NO₂ 和 CO 浓度的年平均日变化

Fig. 3 Diurnal variations of concentrations of O₃, NO₂, and CO at the monitoring sites

4 O_3 最大小时浓度、 C_2-C_{12} 浓度与风场的关系

为了更好地反映白天 (07 时至 18 时) 和夜间 (19 时至次日 06 时) 不同风速时 O_3 浓度、 C_2-C_{12}

C_{12} 浓度的变化, 以云栖为例进行分析, 结果见图 5。

从监测结果来看, 白天随着风速增加时 C_2-C_{12} 的浓度有较大幅度的减小, O_3 呈现增高趋势, 这是由于风速增大, C_2-C_{12} 浓度因稀释作用降低, 形成有利于 O_3 产生的条件, 引起 O_3 增升; 同时,

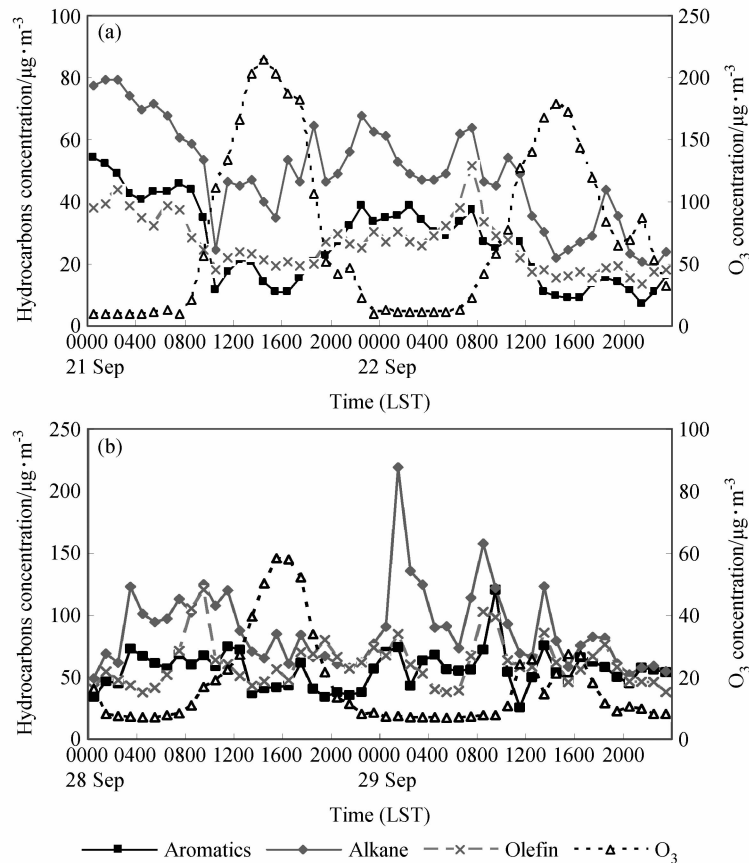


图 4 不同天气 O_3 与烃类的关系

Fig. 4 Relationships of hourly mean concentrations between O_3 and hydrocarbons under different weather conditions

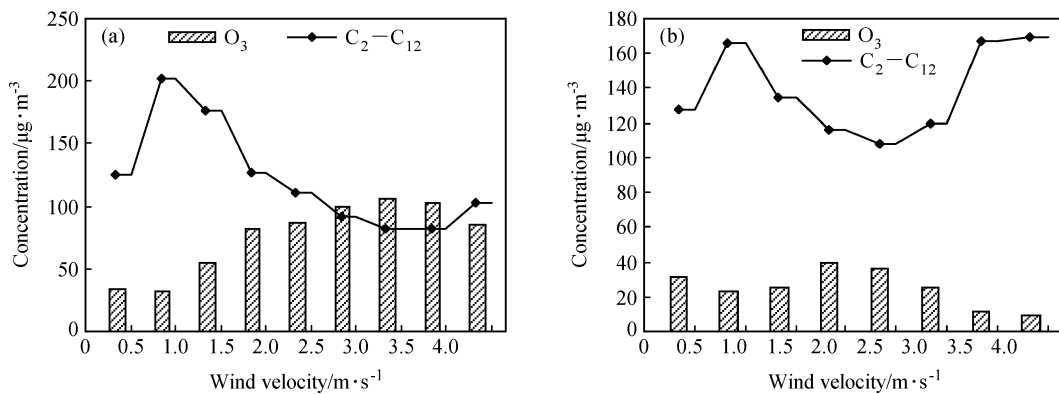


图 5 不同风速时 O_3 浓度与 C_2-C_{12} 浓度对比

Fig. 5 Comparison of concentrations between O_3 and C_2-C_{12} under different wind velocity

风速增大有利于 O_3 的长距离输送, 较远距离处的 O_3 也可能输送过来引起当地 O_3 浓度的增大。同时由于风速大时垂直输送利于 O_3 从浓度较高的高空向下输送, 增加地面 O_3 的浓度, 与任丽红等 (2005) 的研究结果一致。而夜间这种关系就不存在, 夜间 O_3 浓度均比较低, 随着风速增大时, O_3 和 $C_2 - C_{12}$ 的浓度没有明显的降低趋势。从图上看, 风速在 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上时有相反的变化, 原因尚有待于进行更深入的研究。

5 结论

(1) 对 2004~2006 年杭州主城区环境空气监测数据研究的结果表明, 这 3 年 O_3 、 NO_2 和 CO 的年均浓度变化都不大, 其中 O_3 为 $40 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, NO_2 和 CO 分别为 $60 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $1400 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

(2) O_3 、 NO_2 和 CO 均有明显的季节变化, 其中 O_3 呈现夏季高冬季低的特点, 而 NO_2 、CO 浓度则是冬季高, 夏季低。

(3) O_3 、 NO_2 和 CO 的日变化特征也很明显, 其中 O_3 呈单峰形态, 与 NO_2 和 CO 的双峰形态有很好的对应关系。

(4) 对不同天气条件下 O_3 与烃类浓度关系研究表明, 晴天时芳烃、烯烃浓度减少, O_3 浓度增加, 二者关系比较密切, 烷烃波动变化与 O_3 浓度变化关系不大; 阴天时 3 种烃类的浓度较高, 它们的浓度波动变化与 O_3 浓度变化关系不明显。

(5) 白天和晚上不同的风速对 O_3 浓度和 $C_2 - C_{12}$ 浓度变化的作用完全不同。白天风速增大能够促进光化学反应活性, 增大 $C_2 - C_{12}$ 的消耗, 又使得 O_3 从浓度较高的高空向地面输送, 增加地面 O_3 的浓度; 晚上较大风速时则不同, $C_2 - C_{12}$ 浓度较高, O_3 浓度较低。

参考文献 (References)

- 安俊岭, 王跃思, 李昕, 等. 2007. 北京大气中 NO 、 NO_2 和 O_3 浓度变化的相关性分析 [J]. 环境科学, 28 (4): 706-711. An Junling, Wang Yuesi, Li Xin, et al. 2007. Analysis of the relationship between NO , NO_2 and O_3 concentrations in Beijing [J]. Environmental Science (in Chinese), 28 (4): 706-711.
- 安俊岭, 王跃思, 李昕, 等. 2008. 北京大气 O_3 与 NO_x 的变化特征 [J]. 生态环境, 17 (4): 1420-1424. An Junling, Wang Yuesi, Li Xin, et al. 2008. Characteristics of atmospheric O_3 and NO_x concentrations in the urban area [J]. Ecology and Environment (in Chinese), 17 (4): 1420-1424.
- 白建辉, 王明星. 2001. 地面臭氧光化学过程规律的初步研究 [J]. 气候与环境研究, 6 (1): 91-102. Bai Jianhui, Wang Mingxing. 2001. The primary study on the regularity of atmospheric photochemical process for surface ozone [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 6 (1): 91-102.
- 白建辉, 徐永福, 陈辉, 等. 2003. 鼎湖山森林地区臭氧及其前体物的变化特征和分析 [J]. 气候与环境研究, 8 (3): 370-380. Bai Jianhui, Xu Yongfu, Chen Hui, et al. 2003. The variation characteristics and analysis of ozone and its precursors in the Dinghushan mountain forest areas [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 8 (3): 370-380.
- 白建辉. 2006. 漠河地区臭氧的观测和计算 [J]. 气候与环境研究, 11 (2): 221-228. Bai Jianhui. 2006. The measurement and the calculation of atmospheric ozone in the Mohe Area [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 11 (2): 221-228.
- 蔡咏安. 2002. 气象条件与臭氧事件日相关性之探讨: 以高高屏地区为例 [D]. 中国台湾: 中山大学环境工程研究所, 1-5. Cai Yongan. 2002. Investigations of the relationship between the meteorological factors and the ozone episodes in the Kao-ping area [D]. Zhongshan University Graduate Institute of Environmental Engineering in Taiwan (in Chinese), 1-5.
- 丁胜, 庄玮. 2006. 两种空气自动监测系统的比较 [J]. 污染防治技术, 2: 23-24. Ding Sheng, Zhuang Wei. 2006. Comparison between two air automatic monitoring systems [J]. Pollution Control Technology (in Chinese), 2: 23-24.
- 段欲晓, 徐晓峰, 张小玲. 2001. 北京地面 O_3 污染特征及气象条件分析 [J]. 气象科技, 29 (4): 15-18. Duan Yuxiao, Xu Xiaofeng, Zhang Xiaoling. 2001. Analysis of surface ozone pollution characteristics and meteorological elements in Beijing [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 29 (4): 15-18.
- EEA. 2007. Technical report air pollution by ozone across Euro. during summer 2006 [R]. ISSN 1725-2237, 5: 9.
- EEA. 2008. Technical report air pollution by ozone across Euro. during summer 2007 [R]. ISSN 1725-2237, 5: 9.
- 广东环境保护监测中心站, 香港特别行政区环境保护署. 2007. 粤港珠江三角洲区域空气监控网络 2006 年监测结果报告 [R], 11. <http://www.gdepb.gov.cn/gsgg/200710>. Guangdong Provincial Environmental Protection Monitoring Centre, Environmental Protection Department. 2007. HKSAR Pearlriver delta regional air quality monitoring network a report of monitoring results in 2006 [R], 11. <http://www.gdepb.gov.cn/gsgg/200710>.
- 广东环境保护监测中心站, 香港特别行政区环境保护署. 2008. 粤港珠江三角洲区域空气监控网络 2007 年监测结果报告 [R], 11. <http://www.gdepb.gov.cn/gsgg/200710>. Guangdong Provincial Environmental Protection Monitoring Centre, Environmental Protection Department. 2008. HKSAR Pearlriver delta regional air quality monitoring network a report of monitoring results in 2007 [R], 11. <http://www.gdepb.gov.cn/gsgg/200710>.

- mental Protection Department. 2008. HKSAR Pearl river delta regional air quality monitoring network a report of monitoring results in 2007 [R], 11. <http://www.gdepb.gov.cn/gsgg/200710>.
- 孔琴心, 刘广仁, 李桂忱. 1999. 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, 4 (1): 61-65.
- Kong Qinxin, Liu Guangren, Li Guichen. 1999. Surface ozone concentration variation and possible influence on human health [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 4 (1): 61-65.
- 刘洁, 张小玲, 张晓春, 等. 2006. 上甸子本底站地面臭氧变化特征及影响因素 [J]. 环境科学研究, 19 (4): 19-25.
- Liu Jie, Zhang Xiaoling, Zhang Xiaochun, et al. 2006. Surface ozone characteristics and the correlated factors at Shangdianzi atmospheric background monitoring station [J]. Research of Environmental Sciences (in Chinese), 19 (4): 19-25.
- 马一琳, 张远航. 2000. 北京市大气光化学氧化剂污染研究 [J]. 环境科学研究, 13 (1): 14-17.
- Ma Yilin, Zhang Yuanhang. 2000. The study on pollution of atmospheric photochemical oxidants in Beijing [J]. Research of Environmental Sciences (in Chinese), 13 (1): 14-17.
- Pudasainee D, Sapkota B, Shrestha M L, et al. 2006. Ground level ozone concentrations and its association with NO_x and meteorological parameters in Kathmandu valley, Nepal [J]. Atmos. Environ., 40: 8081-8087.
- 任丽红, 胡非, 王玮. 2005. 北京夏季 O_3 垂直分布与气象因子的相关研究 [J]. 气候与环境研究, 10 (2): 166-174.
- Ren Lihong, Hu Fei, Wang Wei. 2005. A study of correlations between O_3 concentration and meteorological factors in summer in Beijing [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 10 (2): 166-171.
- 单文坡, 殷永泉, 杜世勇, 等. 2006. 夏季城市大气 O_3 浓度影响因素及其相关关系 [J]. 环境科学, 27 (7): 1276-1291.
- Shan Wenpo, Yin Yongquan, Du Shiyong, et al. 2006. Ozone pollution, influence factors and their correlation at urban area in summer [J]. Environmental Science (in Chinese), 27 (7): 1276-1291.
- 石玉珍, 王庚辰, 徐永福. 2008. 北京市近郊区光化学烟雾模拟研究 [J]. 气候与环境研究, 13 (1): 84-92.
- Shi Yuzhen, Wang Gengchen, Xu Yongfu. 2008. Simulation study of photochemical smog in Beijing urban and suburban areas [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 13 (1): 84-92.
- Sillman S, Alwali K I, Marsik F J, et al. 1995. Photochemistry of ozone formation in Atlanta GA-models and measurements [J]. Atmos. Environ., 29: 3055-3066.
- 王淑兰, 柴发合. 2002. 北京市 O_3 污染的区域特征分析 [J]. 地理科学, 22 (3): 360-364.
- Wang Shulan, Chai Fahe. 2002. Provincial characteristics of ozone pollution in Beijing [J]. Scientia Geographica Sinica (in Chinese), 22 (3): 360-364.
- 王雪梅, 韩志伟, 雷孝恩. 2003. 广州地区臭氧浓度变化规律研究 [J]. 中山大学学报 (自然科学版), 42 (4): 106-109.
- Wang Xuemei, Han Zhiwei, Lei Xiaoen. 2003. Study on ozone concentration change of Guangzhou district [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunytseni (in Chinese), 42 (4): 106-109.
- Xu X, Lin W, Wang T, et al. 2008. Long-term trend of surface ozone at a regional background station in Eastern China 1991-2006: Enhanced variability [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 8: 2595-2607.
- 杨关盈, 樊曙先, 汤洁, 等. 2008. 临安近地面臭氧变化特征分析 [J]. 环境科学研究, 21 (3): 31-35.
- Yang Guanying, Fan Shuxian, Tang Jie, et al. 2008. Characteristic of surface ozone concentrations at Lin'an [J]. Research of Environmental Sciences (in Chinese), 21 (3): 31-35.
- 杨丽萍. 2005. 差分吸收光谱法 (DOAS) 与紫外荧光法自动测量空气中 SO_2 的对比 [J]. 城市环境与城市生态, 3: 11-12.
- Yang Liping. 2005. The contrast research for auto monitoring SO_2 between differential optical absorption spectroscopy (DOAS) and U. V. Fluorescence [J]. Urban Environment and Urban Ecology (in Chinese), 3: 11-12.
- 杨昕, 李兴生. 1999. 近地面 O_3 变化化学反应机理的数值研究 [J]. 大气科学, 23 (4): 427-438.
- Yang Xin, Li Xingsheng. 1999. A numerical study of photochemical reaction mechanism of ozone variation in surface layer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 23 (4): 427-438.
- 杨雅琴, 高会旺. 2008. 青岛大气臭氧及其前体物时间变化与污染特征 [J]. 气象与环境学报, 24 (2): 1-5.
- Yang Yaqin, Gao Huiwang. 2008. Dynamics of ozone and its precursors in the atmosphere and their pollution characteristics in Qingdao, Shandong Province [J]. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 24 (2): 1-5.
- 张爱东, 王晓燕, 修光利. 2006. 上海市中心城区低空大气臭氧污染特征和变化状况 [J]. 环境科学与管理, 31 (6): 21-26.
- Zhang Aidong, Wang Xiaoyan, Xiu Guangli. 2006. Pollution characterization and variation of ground ozone in Shanghai central urban area [J]. Environmental Science and Management (in Chinese), 31 (6): 21-26.
- 张凯杨, 许春晓, 崔桂香, 等. 2007. 城市热岛成因及其对污染物扩散影响的数值模拟 [J]. 气象与环境学报, 23 (3): 10-14.
- Zhang Kaiyang, Xu Chunxiao, Cui Guixiang, et al. 2007. Numerical simulation of heat island evolution and its effect on pollutant transport [J]. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 23 (3): 10-14.
- 张美根. 2005. 多尺度空气质量模式系统及其验证 II. 东亚地区对流层臭氧及其前体物模拟 [J]. 大气科学, 29 (6): 926-936.
- Zhang Meigen. 2005. A multiscale air quality modeling system and its evaluation II. Simulation of tropospheric ozone and its precursors in East Asia [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29 (6): 926-936.