

西安市雁塔区 10 月 O_3 时空变化规律

李凌霜¹, 赵景波^{1,2}

(1. 陕西师范大学 旅游与环境学院, 西安 710062;

2. 中国科学院地球环境研究所 黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710061)

摘要: 根据 2013 年 10 月对西安市雁塔区 84 m 高度范围的昼夜观测资料, 研究了 O_3 的日变化规律、垂直分布以及气象因素对其的影响。结果表明: O_3 浓度日变化规律较为明显, 呈单峰型分布, 早晨浓度开始上升, 于 14:30 左右达到峰值, 在 16:30 之后开始降低并趋于平稳, 并且 O_3 浓度昼夜变化可分为 3 个阶段, 8:30—16:30 为 O_3 浓度最高阶段, 18:30—00:30 为 O_3 浓度居中阶段, 2:30—6:30 为 O_3 浓度最低和降低阶段。垂直高度上 O_3 浓度随高度上升而升高, 并且 O_3 浓度的垂直梯度变化分为低—中—高 3 个阶段, 1~30 m 为 O_3 浓度最低层段, 36~66 m 为 O_3 浓度居中层段, 70~84 m 为 O_3 浓度最高层段。 O_3 浓度与 NO_x 浓度的日变化呈明显负相关, 相关系数为 -0.21。 O_3 浓度的变化曲线与温度垂向变化曲线相似, 呈现出同升同降的特点, 两者呈明显正相关, 相关系数为 0.72。 O_3 浓度与湿度的日变化呈现出相反的趋势, 两者呈现明显的负相关性, 相关系数为 -0.76。

关键词: O_3 浓度; 日变化; 垂直分布; 西安雁塔区

中图分类号: X513 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-9901(2015)05-0299-08

Vertical and temporal variation of O_3 in October in the Yanta District of Xi'an

LI Ling-shuang¹, ZHAO Jing-bo^{1,2}

(1. College of Tourism and Environment, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China; 2. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China)

Abstract: According to the range of 84 m day and night observation data in October 2013 in the Yanta District of southern Xi'an City, this paper analysed the concentration of O_3 daily variation regularity, the vertical distribution, and the influence of various factors. The results showed that the concentration of O_3 variation was relatively obvious, the distribution type was unimodal and the concentration began to rise in the morning, arrived peak at 14:30 around and then leveled off. It also showed that the concentration of O_3 daily variation could be divided into 3 phases: O_3 concentration reached high level from 8:30 to 16:30, reached middle level from 18:30 to 00:30, reached low and reduced level from 2:30 to 6:30. In the vertical height, O_3 concentration increased with altitude and from 8:30 to 14:30 was the largest stage of O_3 concentration variation. It also showed that O_3 concentration in the vertical height can be divided into 3 phases: O_3 concentration reached lowest level from 1 m to 30 m, reached middle level from 36 m to 66 m, reached highest level from 70 m to 84 m. In the vertical height, O_3 concentration increased with altitude and from 8:30 to 14:30 was the largest stage of O_3 concentration variation. The daily variation of O_3 concentration and NO_x concentration showed the opposite trend, and they had significantly negative correlation, the correlation coefficient was -0.21. O_3 concentration variation curves and temperature

收稿日期: 2015-05-25

基金项目: 国家科技部科技支撑项目 (2007BAC30B01)

通讯作者: 赵景波, E-mail: zhaojb@snnu.edu.cn

variation curves were similar, presented the trend of rise and fall at the same time, they had significant positive correlation, the correlation coefficient was 0.72. O_3 concentration and the moisture daily variation presented a contrary trend, and they showed obvious negative correlation, the correlation coefficient was -0.76 .

Key words: O_3 concentration; diurnal variation; vertical variation; Yanta District of Xi'an City

O_3 是大气边界层最重要的污染物之一, 近年来对流层中 O_3 浓度增高 (魏鼎文等, 1994; Bojkov, 1995; Randel and Wu, 1999), 随之带来的一系列污染问题引发了人们的关注。 O_3 作为氮氧化物 (NO_x) 和挥发性有机物 (VOC_s) 在大气中通过一系列光化学反应形成的二次污染物 (唐孝炎等, 1991), 对地球上的生命包括人体、动物、植物、微生物等都会造成极大的伤害。 O_3 也是反映光化学烟雾污染的重要指标, 近地面高浓度的 O_3 不仅能对人体健康造成损伤, 还会加快材料老化, 导致农作物减产, 从而对人类生产生活造成一系列有害的影响 (Burnett et al, 1997; Rable and Eyre, 1998; Manning, 2003)。

世界上地面 O_3 的观测研究开展较早, 欧洲和北美的大气监测网中都把地面 O_3 作为一项长期的监测内容 (徐晓斌等, 1998)。随着我国大气环境的每况愈下, 越来越多的城市展开了对 O_3 的研究, 如北京 (吴瑞霞等, 2005; 石玉珍等, 2009)、天津 (韩素芹等, 2007)、南京 (沈毅等, 2009; 张敏等, 2009)、上海 (刘明花等, 2008; 顾莹和束炯, 2010; 彭丽等, 2011)、广州 (梁永贤等, 2013) 等地。刘烽等 (2002) 研究北京夏季低层大气 O_3 发现, 在辐射较强的夏季, 由于高浓度的前体物 NO 、 NO_2 存在, 光化学过程产生的 O_3 是夏季影响城市大气质量的主要因素之一。李善兰等 (2003) 根据 2003 年对延吉市春季观测大气中的 O_3 、 NO_x 、 CO 等的浓度研究, 认识到延吉市 NO_x 和 O_3 气体浓度之间有明显的负相关性, CO 浓度增加影响 NO_x 浓度。杨俊梅等 (2013) 根据 2008 年对南京北郊 O_3 、 NO_2 及 SO_2 的连续观测, 认识到 O_3 浓度上升时 NO_2 浓度下降, O_3 浓度最高时 NO_2 浓度最低, 二者呈现负相关。彭丽等 (2011) 通过分析 2007—2009 年上海市宝山国家气候观测台的 O_3 探空观测数据, 得出上海地区边界层内 O_3 浓度由上而下呈正梯度变化, 地面浓度最低, 1.6 km 高度 O_3 浓度达到峰值, NO_x 的垂直分布是影响 O_3 垂直分布的重要因素。虽然过去

对 O_3 浓度在垂向上的变化进行了一定的研究, 但对垂直高度分辨较低, 对昼夜变化规律研究很少。

西安作为西北最大的经济政治中心, 在城市高速发展的过程中出现了一些污染问题。本文通过观测 O_3 浓度日变化及垂直分布, 以期揭示西安城市空气中 O_3 昼夜变化规律和垂向变化特点和污染特性提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 观测地点

O_3 采集观测需要一定高度的采样平台, 为了能较好地获得数据反映 O_3 浓度变化特征, 将观测地点选在西安市雁塔区长安南路陕西师范大学高层楼上 ($34.21^\circ N$, $108.95^\circ E$)。该高层楼共 28 层, 高度为 87 m, 西距长安街 354 m, 东距翠华路 347 m, 北距商业中心小寨 2.2 km, 南距会展中心 653 m, 周围为文教及居民区, 所处地势平坦, 利于观测。

1.2 观测时间

观测时间为 2013 年 10 月 7 日、14 日和 21 日, 进行了三个昼夜 24 小时观测。每隔一层楼设置一个观测点, 对应高度分别为 1 m、6 m、12 m、18 m、24 m、30 m、36 m、42 m、48 m、54 m、60 m、66 m、72 m、78 m、84 m。每两个小时进行一次观测, 每次观测获得 O_3 浓度、 NO_x 浓度、温度、湿度各 28 组数据。3 个昼夜观测结果基本相似, 表明观测结果可靠。

1.3 观测仪器

实验观测 O_3 采用的仪器为便携式智能 O_3 气体检测仪, 检测原理为电化学原理, 测量范围为 0~1 ppm, 测量精度 $\leq \pm 3\%$ (F.S), 响应时间为 30 s。观测 NO_x 的仪器为便携式智能 NO_x 气体检测仪, 检测原理为电化学原理, 测量范围为 0~100 ppm, 测量精度 $\leq \pm 3\%$ (F.S), 响应时间为 20 s。两种仪器都能够连续检测空气中指定气体浓度, 具有响应灵敏、测量精度高、稳定性和重复性好等优点。观测前需对仪器进行标定, 确保数据准确性和有效性。

2 结果

2.1 O₃ 浓度总体变化特征

图1给出了O₃浓度逐日变化特征。由箱图(图1a)可知:观测3 d的O₃逐日浓度变化范围分别为0.013~0.076 ppm, 0.027~0.088 ppm,

0.026~0.098 ppm;日均浓度值分别为0.044 ppm, 0.048 ppm, 0.055 ppm;标准差分别为0.013 ppm, 0.011 ppm, 0.016 ppm。垂直高度上的O₃浓度标准差变化趋势如图1b所示,标准差变化范围为0.005~0.014 ppm,波动较为明显。

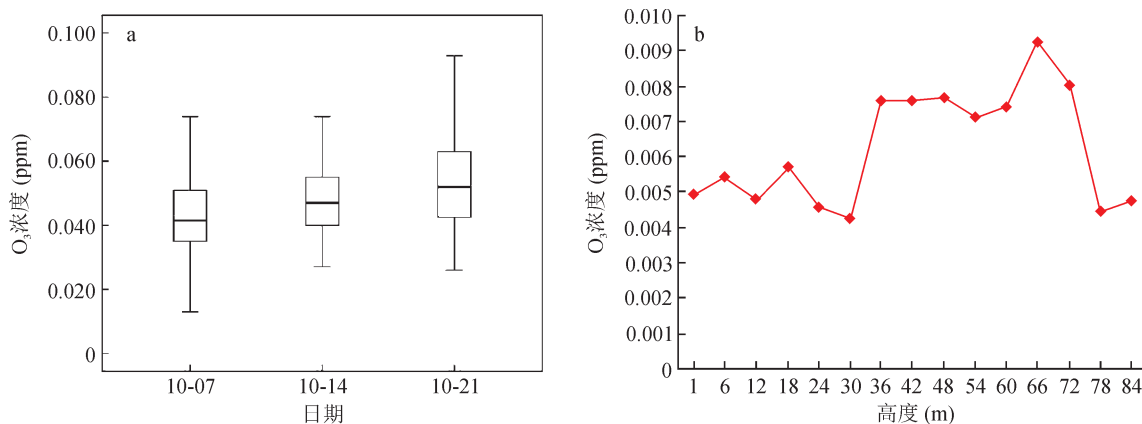


图1 O₃浓度逐日变化及垂直高度标准差变化趋势

Fig.1 Diurnal variations of O₃ concentration and standard deviation variations at different altitudes

2.2 O₃ 浓度昼夜变化特征

图2所示为西安雁塔区10月份不同高度O₃浓度随时间变化特征。由图2可知,不同时间段O₃的变化波动较为明显,按不同高度的昼夜变化叙述如下。1~6 m O₃昼夜浓度均值为0.038 ppm,变化范围为0.029~0.051 ppm,变化幅度为0.022 ppm,呈单峰型分布;O₃浓度从8:30—12:30一直呈上升趋势并于14:30到达峰值,之后逐渐下降至平稳。12~30 m O₃昼夜浓度均值为0.044 ppm,变化范围为0.032~0.064 ppm,变化幅度为0.032 ppm,与之前高度分布相似,也是于14:30到达峰值,之后逐渐下降至平稳。36~72 m O₃昼夜浓度均值为0.055 ppm,变化范围为0.042~0.076 ppm,变化幅度为0.034 ppm,变化特点与上述分布相似。78~84 m O₃昼夜浓度均值为0.063 ppm,变化范围为0.059~0.071 ppm,变化幅度为0.012 ppm,总体变化趋于平稳,于10:30和16:30出现较为微小的波动,浓度在16:30达到最高。此外,根据图2可将不同时间O₃浓度昼夜变化分为3个阶段。8:30—16:30为O₃浓度最高阶段,O₃浓度平均值为0.052 ppm,变化范围为0.029~0.073 ppm,变化幅度为0.044 ppm。18:30—0:30为O₃浓度居中阶段,O₃浓度平均值为0.049 ppm,变化范围为0.033~0.064 ppm,变化幅度为0.031 ppm。

2:30—6:30为O₃浓度最低和降低阶段,O₃浓度平均值0.048 ppm,变化范围为0.033~0.068 ppm,变化幅度为0.035 ppm。

综合上述,可得出在1~84 m高度范围内O₃浓度于14:30左右达到一天峰值并在之后趋于平稳的规律,且三个昼夜的观测结果均具有以上规律,表明这种规律确实存在。

2.3 O₃ 浓度垂直梯度变化特征

图3所示为西安雁塔区10月份O₃浓度不同时间随高度的变化。由图3可知,O₃浓度随高度的升高而呈明显增加的趋势,这虽然与以往的研究结果相一致(任丽红等,2005;马志强等,2007),但本文在高度上昼夜变化划分较细,能够揭示以往未认识到的O₃浓度高度上的昼夜变化规律。图3a为8:30—14:30 O₃浓度的垂向变化,O₃浓度平均值为0.053 ppm,变化范围为0.029~0.073 ppm,变化幅度为0.044 ppm,是O₃浓度最高且变化幅度最大层段。图3b为16:30—22:30 O₃浓度的垂向变化特征,O₃浓度平均值为0.050 ppm,变化范围为0.036~0.071 ppm,变化幅度为0.035 ppm。图3c为0:30—6:30 O₃浓度的垂向变化特征,O₃浓度平均值为0.049 ppm,变化范围为0.033~0.068 ppm,变化幅度为0.035 ppm。由上可知,O₃浓度在8:30—14:30、16:30—22:30、0:30—6:30三个时间段内随高度升

高逐渐增大,变化幅度在不同时间段内呈增大趋势。此外,本项研究结果与以往研究不同的是O₃浓度的垂直梯度变化呈现出了一定的分层段差异特征。根据图3可将O₃浓度的垂直梯度变化分为低—中—高3个层段。1~30 m为O₃浓度最低层段,O₃浓度平均值为0.042 ppm,变化范围

为0.029~0.056 ppm,变化幅度为0.027 ppm。36~66 m为O₃浓度居中层段,O₃浓度平均值为0.052 ppm,变化范围为0.037~0.070 ppm,变化幅度为0.033 ppm。70~84 m为O₃浓度最高层段,O₃浓度平均值为0.061 ppm,变化范围为0.040~0.073 ppm,变化幅度为0.033 ppm。

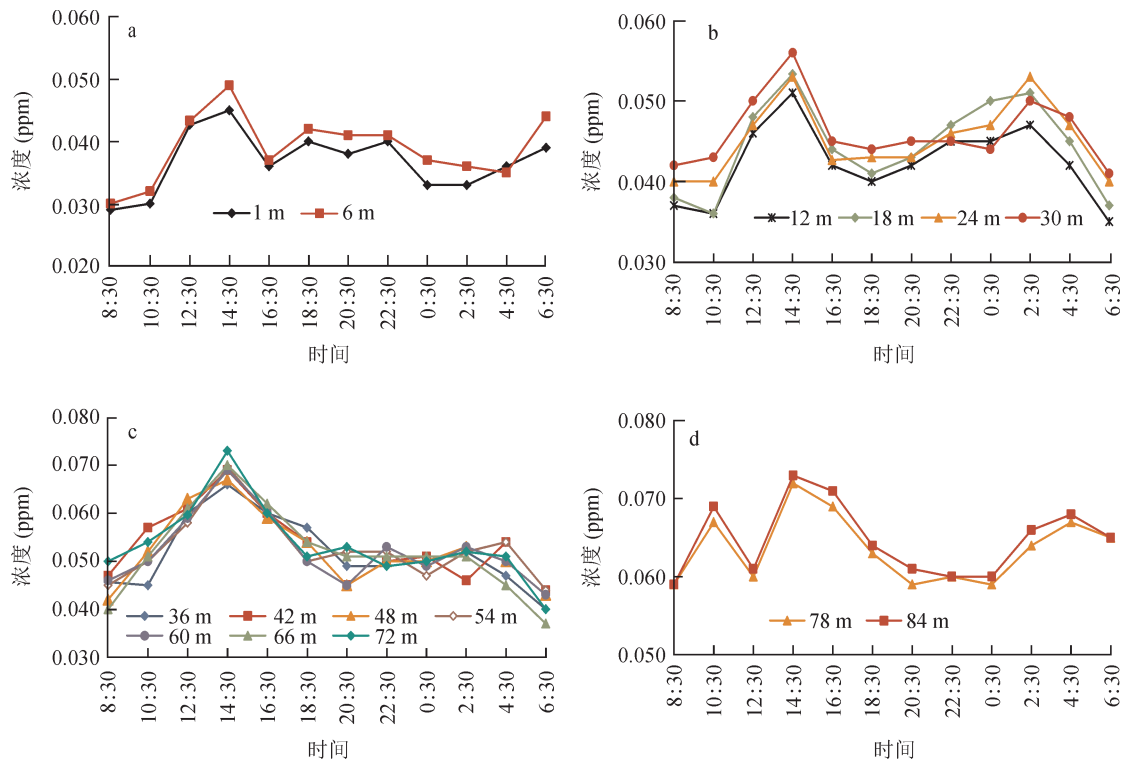


图 2 10 月份不同高度 O₃ 浓度日变化
Fig.2 Diurnal variations of O₃ concentration at different altitudes during October

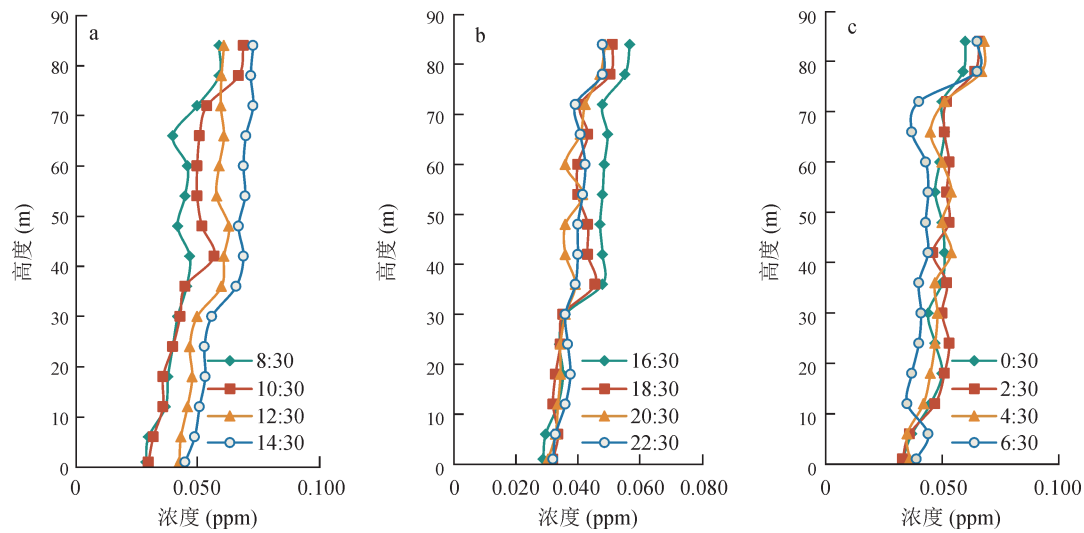
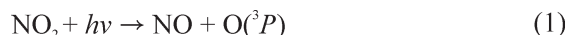


图 3 10 月份不同时间 O₃ 浓度随高度变化特征
Fig.3 Vertical variations of O₃ concentration at different time during October

3 讨论

3.1 O₃ 浓度昼夜变化原因

O₃ 浓度昼夜呈现高—中—低的变化规律的原因是 O₃ 为二次污染物,其生成依赖于 NO、NO₂ 和 CO 等前体物的浓度和化学反应(单文坡等,2006)。随着人类活动的增加,这些前体物在中午出现高浓度值,光化学反应得以充分发生,对流层中与 O₃ 生成相关的光化学反应过程如下:



反应(1)~(3)是一个快速的循环过程,一定条件达到化学平衡,O₃ 浓度并未增加,(3)是 O₃ 主要的消耗途径。但在实际大气中,O₃ 除了与 NO 发生氧化反应生成 NO₂,也可与其他污染物如 NMHC 和 CO 发生反应,同样使 NO 氧化为 NO₂,但这一转化中并未造成 O₃ 消耗,其中生成的 NO₂ 经过光解后造成 O₃ 的净增加(安俊岭等,1998)。随着反应的不断循环进行,O₃ 浓度得到积累,导致 O₃ 浓度出现图 2 所示在 8:30—16:30 不断增大,并在 14:30 左右即一天中光化学反应最强烈的时段出现 O₃ 浓度最大值,1~84 m 各高度范围 O₃ 浓度峰值均出现在这一阶段,最大峰值浓度达到 0.076 ppm,使得这一阶段成为一天中 O₃ 浓度最高阶段。到了傍晚太阳辐射减弱,光化学反应停止,白天积累的 O₃ 与 NO 等其他还原性物质发生氧化反应而被消耗,此外 O₃ 的沉积作用也是造成其消耗的一个重要原因(Lal et al, 2000; Cheung and Wang, 2001),导致 O₃ 浓度出现图 2 所示在 20:30—0:30 逐渐减小的趋势,但 O₃ 浓度并未出现最低值,此阶段为 O₃ 浓度居中阶段。傍

晚时分前体物对 O₃ 的消耗一直持续到日出之时,导致 O₃ 浓度出现图 2 所示在 2:30—6:30 不断下降并达到最低的现象,此阶段为 O₃ 浓度最低阶段。

O₃ 浓度随高度的升高而增加的规律也是由于其前体物 NO_x 导致的,白天大气湍流作用明显,而夜间层结稳定,造成了夜间近地层的 NO 很难向上输送,即使输送到上层大气也已转化为 NO₂,造成了上层 NO 浓度低而 NO₂ 浓度高的现象。因此,低浓度的 NO 减少了对 O₃ 的消耗而高浓度的 NO₂ 通过光化学反应却增加了 O₃ 浓度,从而造成了 O₃ 浓度随垂直高度升高而逐渐升高的现象。30 m 以下由于近地面的源排放,NO_x 浓度显然要比高层范围的增长要快,从而抑制了 O₃ 的生成,随着高度的升高,太阳辐射增强,光化学反应更加充分,导致高空的 O₃ 浓度明显增高,因此呈现出如图 3 所示的 O₃ 浓度随高度上升而呈现分阶段增高的现象。

3.2 O₃ 浓度与 NO_x 的关系

图 4a 为西安雁塔区 10 月份 O₃ 浓度与 NO_x 浓度之间的日变化关系曲线。由该图可知:当 O₃ 浓度上升时 NO_x 浓度下降,O₃ 浓度在 14:30 达到一天最高值时 NO_x 浓度恰好为最低值,傍晚过后 O₃ 浓度呈平稳下降趋势时 NO_x 浓度就基本呈上升趋势。总体来说 O₃ 浓度与 NO_x 浓度的日变化呈相反的趋势。图 4b 显示了 O₃ 浓度与 NO_x 浓度的相关性,可知两者呈明显负相关,相关系数为 -0.21。这也印证了前文所述 O₃ 浓度日变化及垂直高度变化的规律,NO_x 作为 O₃ 产生的前体物与 O₃ 之间呈现了此消彼长的态势。白天由于人类工业与交通排放的 NO、NO₂ 等氮氧化物在太阳辐射的作用下,通过一系列光化学反应生成 O₃,也就是说 O₃ 是通过消耗 NO_x 而产生的,因此出现了实验数据呈现的负相关性。

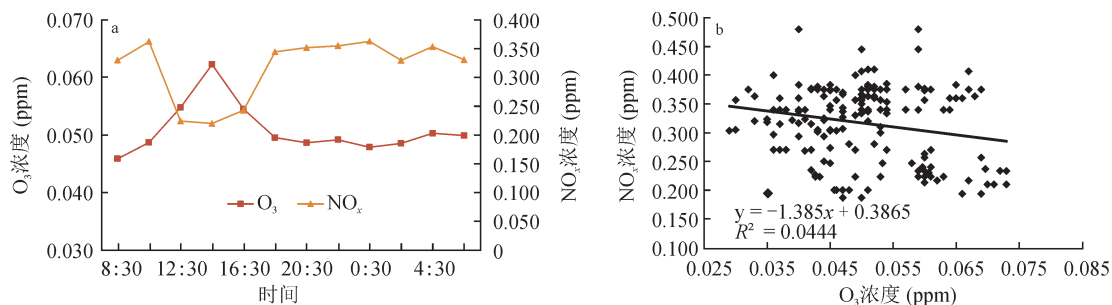


图 4 O₃ 浓度与 NO_x 浓度变化相关曲线

Fig.4 Correlation between the concentration of O₃ and NO_x

3.3 O₃ 浓度与温度的关系

图 5a 为西安雁塔区 10 月份不同温度下 O₃ 浓度随时间变化的曲线。由该图可知当气温上升时 O₃ 浓度也随之升高, 当温度达到一天的最高值时 O₃ 浓度也达到其峰值。总体来说 O₃ 浓度的变化曲线与温度变化曲线比较相似, 呈现出同升同降的趋势。

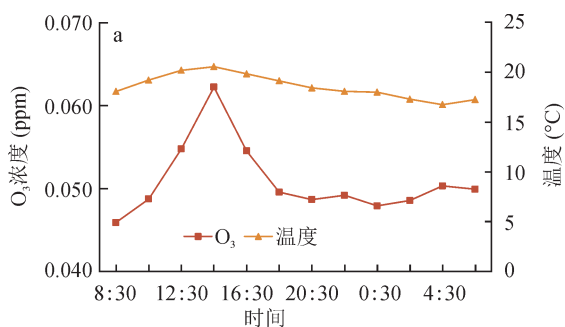


图 5b 显示了 O₃ 浓度与温度的相关性, 经分析可知, 两者呈明显正相关, 相关系数为 0.72。O₃ 是由于其前体物在太阳辐射的作用下经过光化学反应产生的, 温度是随着太阳辐射的增大而升高的, 温度的升高较太阳辐射的增大滞后 2~3 h, 因此温度可作为衡量 O₃ 污染水平的重要指标 (陈魁等, 2010)。

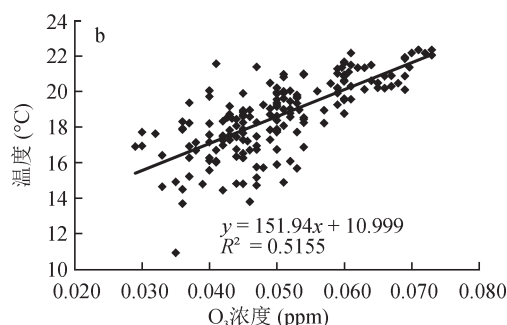


图 5 O₃ 浓度与温度变化相关曲线

Fig.5 Correlation between the concentration of O₃ and temperature

3.4 O₃ 浓度与湿度的关系

图 6a 为西安雁塔区 10 月份不同湿度下 O₃ 浓度随时间变化的曲线。由该图可知, 湿度与 O₃ 浓度的变化关系和 O₃ 浓度与 NO_x 浓度变化关系较为相似, 当湿度达到一天最低值时 O₃ 浓度达到 14:30 的峰值, 傍晚之后随着湿度的缓慢上升 O₃ 浓度呈现出平缓的下降趋势。总体来说 O₃ 浓度与湿度的日变化也呈现出相反的趋势。图 6b 显示了 O₃ 浓度与湿度的相关性, 经分析两者呈现明显的负相关性, 相关系数为 -0.76。湿度的变化受到各种天气条件的影响, 一方面水分的含量越大湿度

越高, 从图 6a 中可以看出清晨由于夜间温度降低, 空气中水分增多等因素导致湿度较大, 而中午时分是一天中太阳辐射最为剧烈的时候, 因空气中水分大量蒸发湿度达到了最低值, O₃ 浓度反而达到了峰值。另一方面, 湿度高低还受到了温度的影响, 温度越高, 相对湿度越小。其变化主要取决于空气中水分来源, 包括水面、蒸汽流或气流扩散系数等。相关文献表明当温度到达峰值时湿度较其晚 1 h 到达最低值 (刘萍等, 2013), 与本文数据结论表现相似, 进一步可得出湿度与 O₃ 浓度的关系及湿度与 O₃ 浓度呈现负相关性。

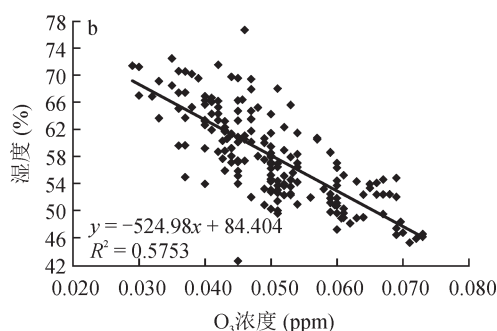
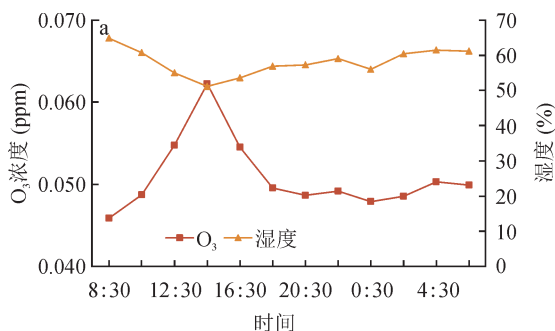


图 6 O₃ 与湿度变化相关曲线

Fig.6 Correlation between the concentration of O₃ and humidity

4 结论

综上所述, 可得出以下结论:

(1) 西安雁塔区 10 月份 O₃ 浓度日变化规律

较为明显, 呈单峰型分布, 早晨浓度开始上升, 于 14:30 左右达到峰值, 之后浓度降低并趋于平稳。

(2) 西安雁塔区 10 月份垂直高度上 O₃ 浓度

随高度上升而升高,在8:30—14:30的时间段内是O₃浓度最高变化幅度最大的阶段,且在垂直高度上呈现出分层段上升的变化趋势。

(3) 西安雁塔区10月份O₃浓度与NO_x浓度的日变化呈相反的趋势,两者呈明显负相关,相关系数为-0.21,两者是此消彼长的态势。西安雁塔区10月份O₃浓度与湿度的日变化呈现出相反的趋势,两者呈现明显的负相关性,相关系数为-0.76。

(4) 西安雁塔区10月份O₃浓度的变化曲线与温度变化曲线相似,呈现出同升同降的趋势,两者呈明显正相关,相关系数为0.72。

致谢: 本论文工作受到国家科技部科技支撑项目基金资助。同时,楚纯洁教授对O₃和NO_x浓度在高度变化研究方面给予了宝贵的指导;吴灿、谢凯毅等参加了野外观测。在此一并致谢!

参考文献

安俊岭,高会旺,王自发,等. 1998. 高NO_x条件下的非甲烷烃体积分数的变化对O₃生成量的影响[J]. *气候与环境研究*, 3(2): 147-150. [An J L, Gao H W, Wang Z F, et al. 1998. Effects of changes in the concentration of no methane hydrocarbon (NMHC) at high NO_x content on amount of ozone formation [J]. *Climatic and Environmental Research*, 3(2): 147-150.]

陈魁,郭胜华,董海燕,等. 2010. 天津市臭氧浓度时空分布与变化特征研究[J]. *环境与可持续发展*, 1: 17-20. [Chen K, Guo S H, Dong H Y, et al. 2010. Observation of vertical and temporal variation of O₃ in Tianjin [J]. *Environment and Sustainable Development*, 1: 17-20.]

单文坡,殷永泉,杜世勇,等. 2006. 夏季城市大气O₃浓度影响因素及其相关关系[J]. *环境科学*, 27(7): 1276-1281. [Shan W P, Yin Y Q, Du S Y, et al. 2006. Ozone pollution, influence factors and their correlation at urban area in summer [J]. *Environmental Science*, 27(7): 1276-1281.]

顾莹,束炯. 2010. 上海城市化对气象要素和臭氧浓度的影响[J]. *环境污染与防治*, 32(5): 7-13. [Gu Y, Shu J. 2010. The impact of urbanization on meteorological factors and ozone in Shanghai [J]. *Environmental Pollution and Control*, 32(5): 7-13.]

韩素芹,黄岁樑,边海,等. 2007. 天津市秋季臭氧浓度影响因素及相关关系研究[J]. *环境污染与防治*, 29(12):

893-895. [Han S Q, Huang S L, Bian H, et al. 2007. Correlations of affecting environmental factors with the ozone pollution in Tianjin [J]. *Environmental Pollution and Control*, 29(12): 893-895.]

李善兰,金大成,陈铁,等. 2003. 延吉市2003年春季大气中O₃、NO_x、CO、SO₂浓度观测分析[J]. *延边大学学报(自然科学版)*, 29(4): 257-269. [Li S L, Jin D C, Chen T, et al. 2003. Measurements and analyses of the concentrations of O₃, NO_x, CO and SO₂ over Yanji in spring [J]. *Journal of Yanbian University (Natural Science)*, 29(4): 257-269.]

梁永贤,尹魁浩,胡泳涛,等. 2013. 深圳市机动车限行对臭氧浓度影响分析[J]. *环境科学与技术*, 36(1): 197-201. [Liang Y X, Yin K H, Hu Y T, et al. 2013. Analysis of motor vehicle restriction effect on ozone concentration in Shenzhen [J]. *Environment Science and Technology*, 36(1): 197-201.]

刘烽,陈辉, Liu Yangang, 等. 2002. 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*, 32(2): 179-185. [Liu F, Chen H, Liu Y G, et al. 2002. Study on the vertical observation of NO_x and O₃ in the low level of ABL in Beijing area [J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 32(2): 179-185.]

刘明花,乐群,吕劲文. 2008. 上海市城郊臭氧浓度变化分析及模拟预报[J]. *环境科技*, 21(6): 1-4. [Liu M H, Le Q, Lü J W. 2008. Analysis and prediction of ozone concentration in urban and suburb of Shanghai [J]. *Environment Science and Technology*, 21(6): 1-4.]

刘萍,余家燕,黄伟,等. 2013. 重庆城区与郊区臭氧的对比及气象的相关性分析[J]. *三峡环境与生态*, 3(35): 11-24. [Liu P, Yu J Y, Huang W, et al. 2013. Comparison analysis for impacts on ozone from meteorological factors in suburb and urban Chongqing [J]. *Environment and Ecology in the Three Gorges*, 3(35): 11-24.]

马志强,王跃思,孙扬,等. 2007. 北京大气中常规污染物的垂直分布特征[J]. *环境科学研究*, 20(5): 1-6. [Ma Z Q, Wang Y S, Sun Y, et al. 2007. Characteristics of vertical air pollutants in Beijing [J]. *Research of Environmental Sciences*, 20(5): 1-6.]

彭丽,高伟,耿福海,等. 2011. 上海地区臭氧垂直分布特征分析[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 47(5): 805-811. [Analysis of ozone vertical distribution in Shanghai area [J]. *Acta Scientiarum Naturalium*

- Universitatis Pekinensis*, 47(5): 805–811.]
- 任丽红, 胡 非, 周德刚, 等. 2005. 北京夏季近地层臭氧垂直变化及其环境效应的观测研究 [J]. *中国科学院研究生院学报*, 22(4): 429–435. [Ren L H, Hu F, Zhou D G, et al. 2005. Observation study of ozone vertical variation and its impact on environment in summer in Beijing [J]. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences*, 22(4): 429–435.]
- 沈 毅, 王体健, 韩 永, 等. 2009. 南京近郊主要大气污染物的观测分析研究 [J]. *南京大学学报 (自然科学版)*, 45(6): 746–756. [Shen Y, Wang T J, Han Y, et al. 2009. Observation of main air pollutants at a suburban site in Nanjing [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 45(6): 746–756.]
- 石玉珍, 徐永福, 王庚辰, 等. 2009. 北京市夏季 O_3 、 NO_x 等污染物“周末效应”研究 [J]. *环境科学*, 30(10): 2832–2838. [Shi Y Z, Xu Y F, Wang G C, et al. 2009. Study of the "Weekend Effect" of O_3 , NO_x and other pollutants in summer of Beijing [J]. *Environmental Science*, 30(10): 2832–2838.]
- 唐孝炎, 李金龙, 栗 欣. 1991. 大气环境化学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 164–166. [Tang X Y, Li J L, Li X. 1991. Atmospheric environment chemistry [M]. Beijing: Higher Education Press, 164–166.]
- 魏鼎文, 秦 芳, 赵延亮, 等. 1994. 中国北京和昆明地区大气臭氧层的异常变化 [J]. *科学通报*, 39(16): 1509–1511. [Wei D W, Qin F, et al. 1991. The abnormal changes in atmospheric ozone layer in the Beijing and Kunming China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 39(16): 1509–1511.]
- 吴瑞霞, 浦一芬, 张美根, 等. 2005. 北京市夏季臭氧变化特征的观测研究 [J]. *南京气象学院学报*, 28(5): 116–120. [Wu R X, Pu Y F, Zhang M G, et al. 2005. Analysis of O_3 vertical variation in summer in Beijing area [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 28(5): 116–120.]
- 徐晓斌, 丁国安, 李兴生, 等. 1998. 龙凤山大气近地层 O_3 浓度变化及与其它因素的关系 [J]. *气象学报*, 56(5): 560–572. [Xu X B, Ding G A, Li X S, et al. 1998. Variability and related factors of the surface O_3 at Longfengshan in northeast China [J]. *ACTA Meteorologica Sinica*, 56(5): 560–572.]
- 杨俊梅, 李培仁, 李义宇, 等. 2013. 南京北郊 O_3 、 NO_2 和 SO_2 变化特征分析 [J]. *气象与环境学报*, 30(6): 66–70. [Yang J M, Li P R, Li Y Y, et al. 2013. Characteristics of SO_2 , NO_2 , and O_3 in the northern suburb of Nanjing [J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 30(6): 66–70.]
- 张 敏, 朱 彬, 王东东, 等. 2009. 南京北郊冬季大气 SO_2 、 NO_2 和 O_3 的变化特征 [J]. *大气科学学报*, 32(5): 695–702. [Zhang M, Zhu B, Wang D D, et al. 2009. Characteristics of SO_2 , NO_2 and O_3 over north suburb of Nanjing in winter [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 32(5): 695–702.]
- Bojkov R D. 1995. The international ozone assessment—1994 [J]. *Bulletin of WMO*, 44: 42–50.
- Burnett R T, Brook J R, Yung W T, et al. 1997. Association between ozone and hospitalization for respiratory diseases in 16 Canadian cities [J]. *Environmental Research*, 72(1): 24–31.
- Cheung V T F, Wang T. 2001. Observational study of ozone pollution at a rural site in the Yangtze Delta of China [J]. *Atmospheric Environment*, 35: 4947–4958.
- Lal S, Naja M, Subbaraya B H. 2000. Seasonal variations in surface ozone and its precursors over an urban site in India [J]. *Atmospheric Environment*, 34: 2713–2724.
- Manning W J. 2003. Detecting plant effects is necessary to give biological significance to ambient ozone monitoring data and predictive ozone standards [J]. *Environmental Pollution*, 126(3): 375–379.
- Rabl A, Eyre N. 1998. An estimate of regional and global O_3 damage from precursor NO_x and VOC emissions [J]. *Environmental International*, 24(8): 835–850.
- Randel W, Wu F. 1999. A stratospheric ozone trends data set for global modeling studies [J]. *Geophysical Research Letters*, 26(20): 3089–3092.