

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2014.08.013

重庆夏季近地面臭氧变化规律及影响因素分析

刘姣姣, 蒋昌潭, 宋 丹, 安贝贝

(1. 重庆市环境监测中心, 重庆 401147;
2. 城市大气环境综合观测与污染防治重庆市重点实验室, 重庆 401147)

摘 要: 利用重庆市主城区近地面臭氧及前体物、气象因子的连续监测资料, 重点分析了主城区夏季典型日臭氧质量浓度时空变化规律, 以及臭氧与 NO、NO₂ 和 CO 等前体物及气象因素的相关性。结果表明, 近地表臭氧质量浓度具有主城核心区域较低而周围地区较高的空间分布特征; 臭氧质量浓度日分布呈“单峰型”, 最高小时质量浓度出现在午后 16 时左右, 与太阳辐射强度、温度等气象因素呈显著的正相关关系, 同时与 NO、NO₂ 和 CO 等前体物呈负相关关系; 高质量浓度臭氧污染易出现在高压天气系统中, 即太阳辐射强度大、微风、相对湿度低且气温较高的天气下; 臭氧质量浓度升高与大气压下降幅度密切相关, 大气压下降超过 0.4 kPa 时, 臭氧质量浓度较高。

关键词: 臭氧; 前体物; 气象因素

中图分类号: X515

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2014)08-091-08

Analysis of distribution characteristics of surface ozone and its influencing factors in summer in Chongqing

LIU Jiaojiao, JIANG Changtan, SONG Dan, AN Beibei

(1. Chongqing Center for Environmental Monitoring, Chongqing 401147, China;
2. Chongqing Key Laboratory of Urban Atmospheric Environmental for Integrated Observation and Pollution Prevention and Control, Chongqing 401147, China)

Abstract: Based on the observation data of ozone and its precursor compounds and meteorological factors in near surface layer of Chongqing urban area, this paper emphatically analyzes the temporal and spatial distribution characteristics of ozone in summer. Meanwhile, the correlation between ozone and its precursor compounds, such as NO, NO₂, CO, and some related meteorological factors are analyzed. Results show that the concentration of ozone in urban area is lower than that in the surrounding regions. Only one peak of ozone concentration appeared in about 4 p.m. The ozone concentration has an obvious negative correlation with precursor compounds, and has obvious positive correlation with meteorological factors, such as solar radiation and temperature. The appearance of high ozone concentrations resulted from the high pressure weather conditions, especially for the high intensity of solar radiation, breeze, low relative humidity and high temperature. Elevated ozone concentration is closely related to the decrease amplitude of atmospheric pressure. Higher ozone concentrations appear when the decrease amplitude is 0.4 kPa.

Key words: ozone; precursor compounds; meteorological factors

收稿日期: 2014-04-15

基金项目: 环保公益性行业科研专项经费资助(201009001)

作者简介: 刘姣姣(1982-), 女, 工程师, 主要从事大气环境监测及相关研究, (E-mail) sierra2687@yahoo.com.cn.

近地面臭氧是城市污染大气中的首要光化学污染物,主要是由工业活动和交通排放的 NO_x 和 VOCs 通过光化学反应产生的二次污染物^[1]。高质量浓度的臭氧会对人类健康、动植物生长和生态环境带来严重的危害^[2-4]。臭氧的形成、输送及沉积的机制非常复杂,研究表明,近地面臭氧的形成与太阳辐射所引起的光化学反应关系密切,主要是受局地大气光化学过程支配,远距离传输过程对近地面臭氧质量浓度的影响则相对较小^[5]。而产生高质量浓度臭氧污染是多项因子综合的结果,主要有气象条件和臭氧的前体物质量浓度两个方面^[6]。

中国的大气污染研究主要集中在一些传统的大气污染物及颗粒物方面,臭氧的监测与研究开展较晚,近年北京、上海、天津等地的学者开始利用多年连续观测资料对城市地面臭氧进行了一系列研究,取得了很多有价值的成果^[7-11]。但重庆地处西部,夏季温度高,太阳辐射强,气象条件与北京、上海等不尽相同;重庆有关臭氧的研究与其他直辖市相比较少,有学者分别进行了气象、前体物的相关性等方面的研究,但都不够全面,且数据仅来源于 2 个监测点位,不能代表重庆市主城区整体情况^[12-13]。笔者通过对重庆市主城区近地面的臭氧及其前体物 NO 、 NO_2 和 CO 及太阳辐射等气象条件进行连续观测,对夏季主城区臭氧质量浓度较高时段的质量浓度变化特征及其与 NO 、 NO_2 和 CO 等前体物和气象因素的相关性进行研究,以便进一步了解臭氧质量浓度的变化规律,为重庆市空气质量数值预报预警系统的建立提供依据和思路。

1 数据来源与监测方法

重庆市主城区臭氧监测点位共有 18 个,分别是解放碑、潘家坪、新山村、唐家沱、高家花园、虎溪、杨家坪、白市驿、南坪、茶园、鱼洞、南泉、两路、空港、礼嘉、天生、蔡家以及清洁对照点缙云山。

臭氧监测仪器为法国 ESA O_3 42M 型,监测方法为紫外光度法。氮氧化物监测仪器为法国 ESA AC32M 型,监测方法为化学发光法。一氧化碳监测仪器为法国 ESA CO12M 型,监测方法为气体滤波相关红外吸收法。在监测过程中按照国家环境保护部《环境空气质量自动监测技术规范》(HJ/T 193-2005)利用配套校准系统对仪器进行定期标定和校准。

文中所用臭氧质量浓度资料为重庆市主城区 18 个监测子站臭氧小时质量浓度连续观测资料,主城区臭氧质量浓度为各测点(缙云山除外)臭氧平均质量浓度;气象资料中温度数据采用重庆市气象站资料;太阳辐射资料来自重庆大气超级站。

2 结果与讨论

2.1 典型日臭氧质量浓度时空分布

主城区夏季臭氧高质量浓度时段的质量浓度空间分布如图 1 所示。主城臭氧高质量浓度主要分布在主城西北部地区,最高值出现在清洁对照点缙云山,其次出现在离市中心较远的蔡家测点,而主城东北和东南部地区以及市中心解放碑等测点臭氧质量浓度相对较低。这与其他城市的变化规律较为一致^[10],符合主城核心区臭氧质量浓度较低而周围地区较高的分布特征,这表明二次污染物臭氧的高质量浓度中心与一次污染物的高质量浓度中心不完全一致,是多项因子综合的结果。

夏季典型日臭氧小时质量浓度变化见图 2,可看出臭氧小时质量浓度呈明显“单峰型”变化规律,夜间至清晨(23 时至翌日 8 时)臭氧基本维持在一个相对稳定的低值区,小时质量浓度变化不大;8 时起臭氧质量浓度开始上升,在午后 16 时左右达到峰值,并在 13—19 时保持较高质量浓度水平,随后质量浓度逐渐下降,在夜间 23 时左右达到谷值。

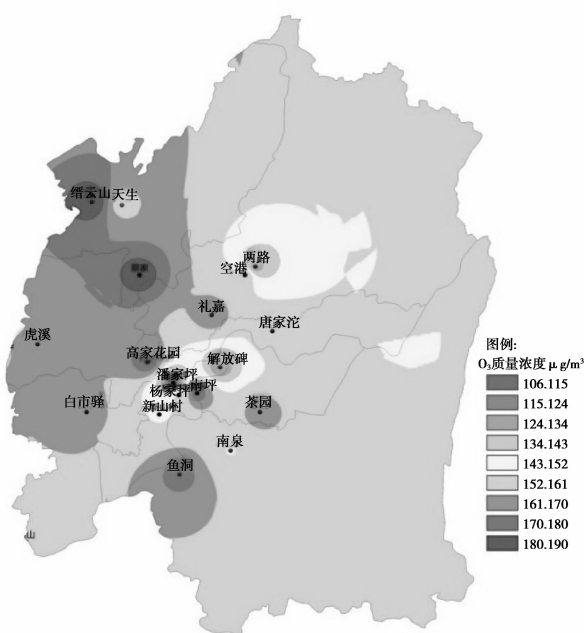


图 1 主城区夏季臭氧高质量浓度时段质量浓度空间分布图

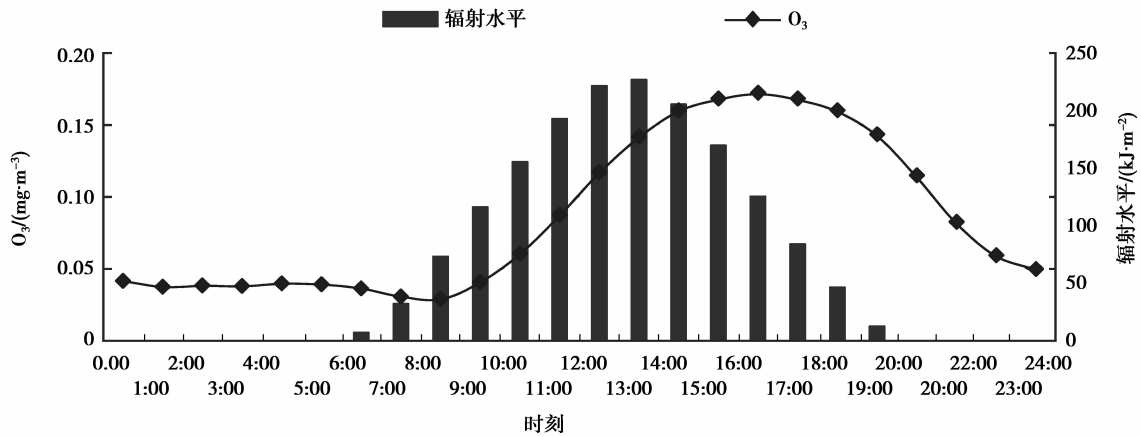


图 2 主城区夏季臭氧质量浓度较高时段太阳辐射水平与臭氧质量浓度的关系

2.2 臭氧与气象因素的相关性分析

气象条件是影响近地面臭氧质量浓度的最主要因素之一,在各种气象条件中比较重要的影响因素包含影响光化学反应的条件(如太阳辐射、温度、湿度等)和影响区域输送与累积作用条件(如风向、风速等)两个方面^[9]。对主城区臭氧质量浓度较高时段分析发现,高质量浓度臭氧污染一般出现在高压天气系统中,即太阳辐射强度大、微风、相对湿度低且气温较高的天气下,天气条件对臭氧的影响非常明显^[14]。

2.2.1 臭氧质量浓度与太阳辐射强度

大气环境中发生光化学反应与太阳辐射中紫外线的波长有关,一般紫外线波长在 290~424 nm,NO₂ 容易光解,产生臭氧;而光化学反应速度则取决于太阳辐射强度,辐射强度越大,光化学反应越明显,臭氧质量浓度越容易升高。对重庆市主城区明显发生大气光化学反应(臭氧质量浓度明显升高)的天数进行统计,结果显示,主城区的太阳辐射强度大于 50 kJ/(m²·h)时明显发生大气光化学反应。

主城区夏季臭氧质量浓度较高时段小时变化与太阳辐射水平分布如图 2 所示。由图可见,太阳辐射强度变化与臭氧小时变化呈明显正相关性。清晨 6 时起太阳辐射强逐渐增强,至 8 时左右太阳辐射强度超过 50 kJ/(m²·h),同时随着太阳光中的短波紫外辐射加强,大气中氧分子的分解增强,加快了臭氧形成的光化学反应速率,促使臭氧形成,从而导致臭氧质量浓度从 8 时起开始大幅上升。臭氧质量浓度随着太阳辐射强度的增强而上升,在下午 16 时左右达到峰值,然后随着太阳辐射强度的减少而降低。臭氧质量浓度峰值比太阳辐射最大值出现的时间滞后 2 小时左右,这说明臭氧是由于太阳辐射经过一系列复杂光化学反应而形成的二次污染物^[15-16]。

为了进一步了解太阳辐射对臭氧的影响,根据太阳辐射水平把天气条件划分为高辐射、中辐射、低辐射 3 种情况。当辐射水平小于 50 kJ/m²判定为低辐射,辐射水平为 50~100 kJ/m²判定为中辐射,辐射水平大于 100 kJ/m²判定为高辐射。统计不同辐射水平下主城区臭氧小时平均质量浓度变化情况(见图 3),可见不同太阳辐射水平状态下臭氧质量浓度小时变化规律是基本相似的。在凌晨 4—6 时之间臭氧质量浓度有一个

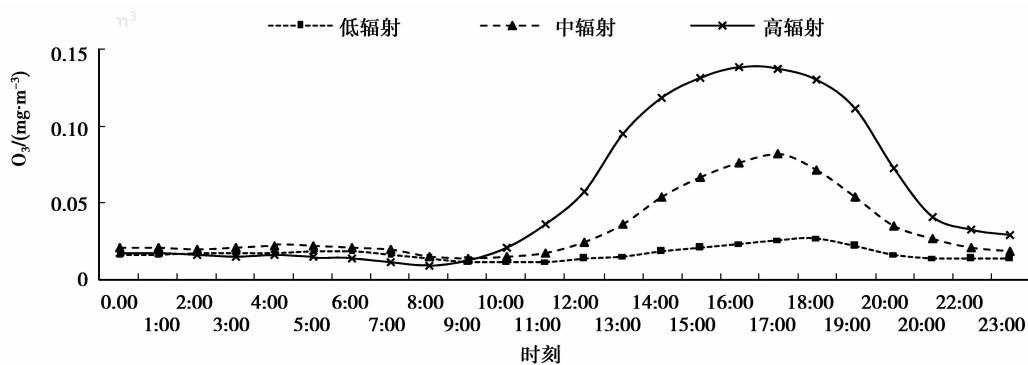


图 3 主城区不同太阳辐射水平下臭氧质量浓度的小时变化特征

很小次峰,低辐射条件下臭氧质量浓度主峰和次峰均推迟 1~2 h,臭氧质量浓度也明显降低,平均质量浓度只有中辐射的一半左右,而中辐射水平臭氧峰值只有高辐射水平的一半左右,这进一步说明太阳辐射对臭氧质量浓度变化的影响非常显著。

2.2.2 臭氧质量浓度与温度

温度同太阳辐射强度一样,是决定臭氧质量浓度高低的重要因素之一。气温大于 5 °C 时,即可发生光化学反应;当气温超过 25 °C 时,光化学反应明显;当气温超过 35 °C 时,臭氧质量浓度容易超标。高温直接加强了光化学反应速率,而且随着温度的升高,生物排放加大,臭氧的前体物质质量浓度增加,也促进了臭氧质量浓度的增大。主城区夏季臭氧质量浓度与温度小时变化如图 4 所示。可见臭氧小时变化与气温变化基本同步,但臭氧在达到最大值前其变化较气温存在 1 h 左右的滞后,这与臭氧生成不仅取决于光强度,与前体物等参与的光化学反应需要消耗一定的时间有关。臭氧质量浓度在 16 时达到最高值后降低,到日落前后其下降速率超过气温下降速率,这与日落后大气中光强度迅速降低,臭氧光化学反应趋于缓慢,而气温下降是一个渐进的过程有关。相关性分析表明,臭氧质量浓度与温度呈显著的正相关性,相关系数为 0.97。

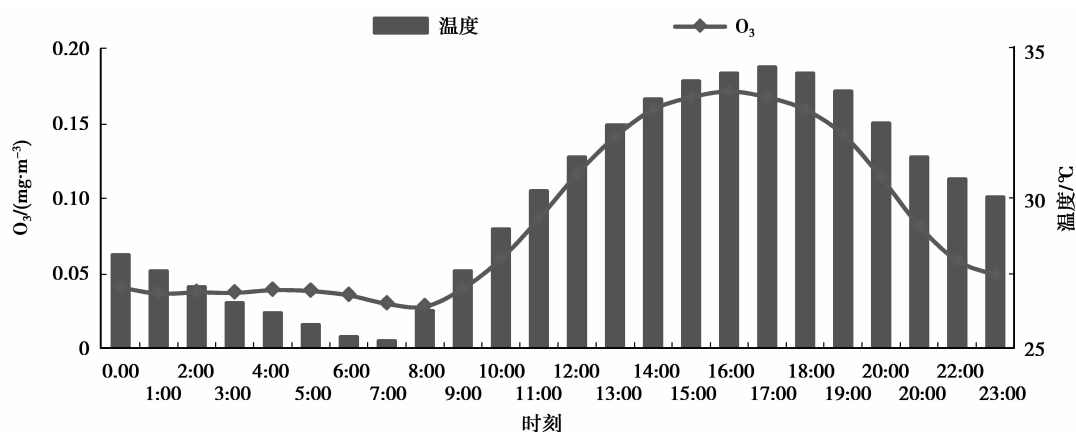


图 4 主城区夏季臭氧质量浓度较高时段温度与臭氧质量浓度的关系

研究表明,水汽与臭氧质量浓度的反应是对流层臭氧质量浓度的一个重要的汇,反应生成的自由基(OH,HO₂)是大气光化学过程的重要触发机制^[17],丰富的水汽是反应的前提条件。对重庆市臭氧质量浓度较高时段统计表明,湿度与臭氧的变化基本上呈相反关系,臭氧在低湿的条件下(相对湿度小于 40%)更容易积累,而在晴朗的夏季,温度高和相对湿度低总是同时出现的。

2.2.3 臭氧质量浓度与风速、风向

对主城区不同风速条件下臭氧质量浓度值进行统计,统计表明,在局地光化学反应为主时小风速对臭氧质量浓度的增加有明显影响,当主城区风速小于 2 m/s 时,臭氧容易积累;风速超过 4 m/s 时,臭氧不易积累。图 5 为 7 月 7—8 日主城区臭氧质量浓度与部分气象要素之间的关系,可看出,7 月 8 日太阳辐射强度、气压下降幅度与前一日基本相同,但由于风速较前一日明显增大,臭氧质量浓度不易积累,使 8 日臭氧质量浓度明显低于前一日的臭氧质量浓度,进一步说明臭氧在低风速的条件下容易积累。

风向对臭氧的生成也有一定影响。对夏季地面和 850 hPa 不同风向(8 个方位)下臭氧质量浓度变化进行统计(见图 6),主导风向为 NEE-SEE 的区间内,容易产生高臭氧质量浓度污染(小时质量浓度大于 200 μg/m³),这与主城东南向的污染源远距离传输有关。在风速较大的情况下,垂直动量输送加强,边界层不稳定,有利于臭氧从较高质量浓度的高空往地面输送。

2.2.4 臭氧质量浓度与气压

对臭氧与气压的小时变化分析表明,高压条件下容易出现高质量浓度臭氧污染,主城区日均大气压在 97 kPa 左右时,臭氧质量浓度可能会明显升高。另外,在高压天气下,臭氧质量浓度升高与当日下午大气压下降幅度密切相关。当日下午大气压下降超过 0.4 kPa 时,当日臭氧质量浓度往往超标,下降幅度低于 0.4 kPa 降幅较小时,臭氧质量浓度明显相对较低。从图 7 可以看出,7 月 28—29 日风速、太阳辐射强度等与 30—31

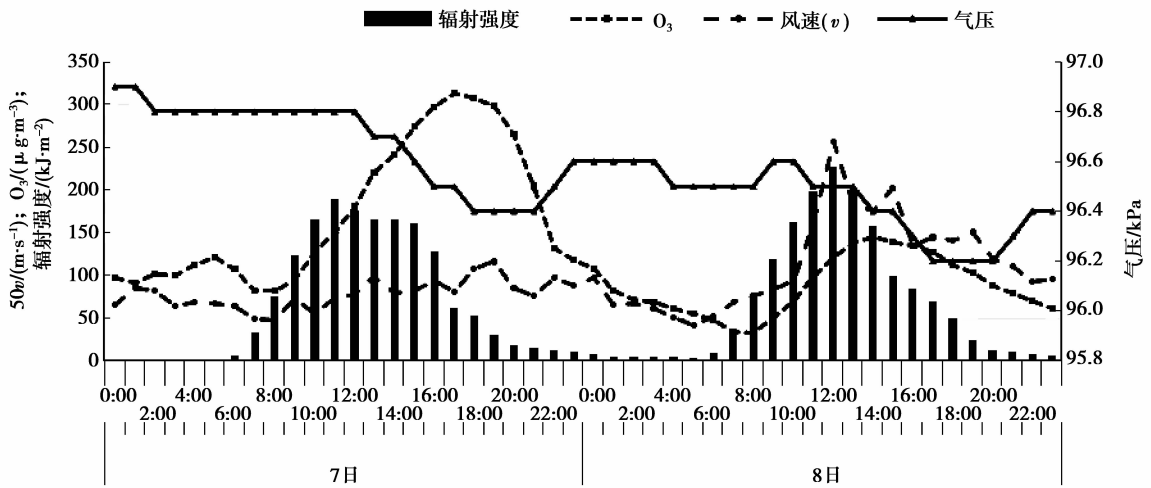


图 5 7月7-8日主城区臭氧质量浓度与部分气象要素之间的关系

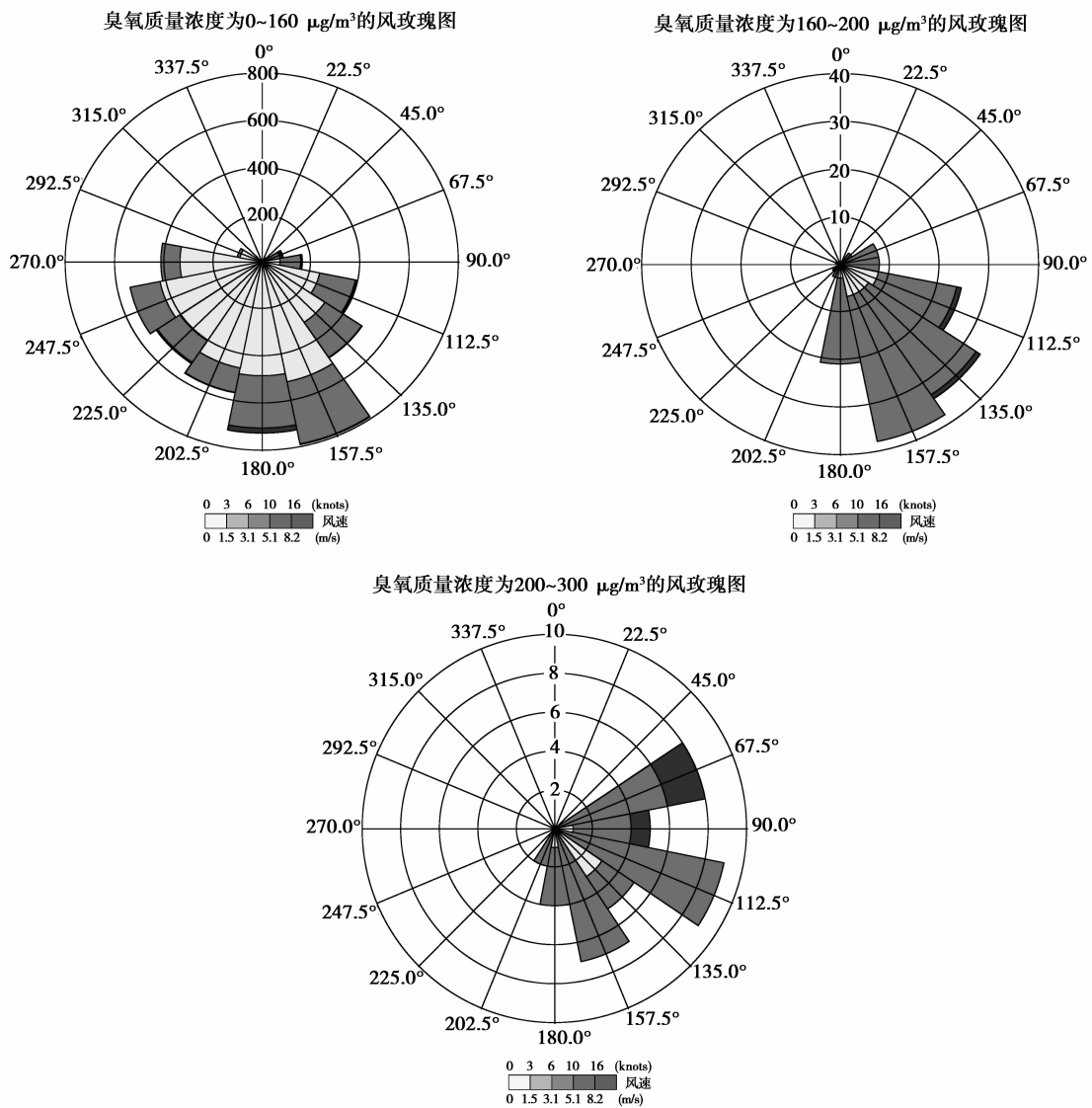


图 6 不同臭氧小时质量浓度下风速风向统计(风玫瑰图)

日大致相当,但由于 28-29 日大气压降幅比较小,而 30-31 日气压降幅则超过 0.4 kPa,使得 30-31 日臭氧质量浓度明显高于 28-29 日,并严重超标。

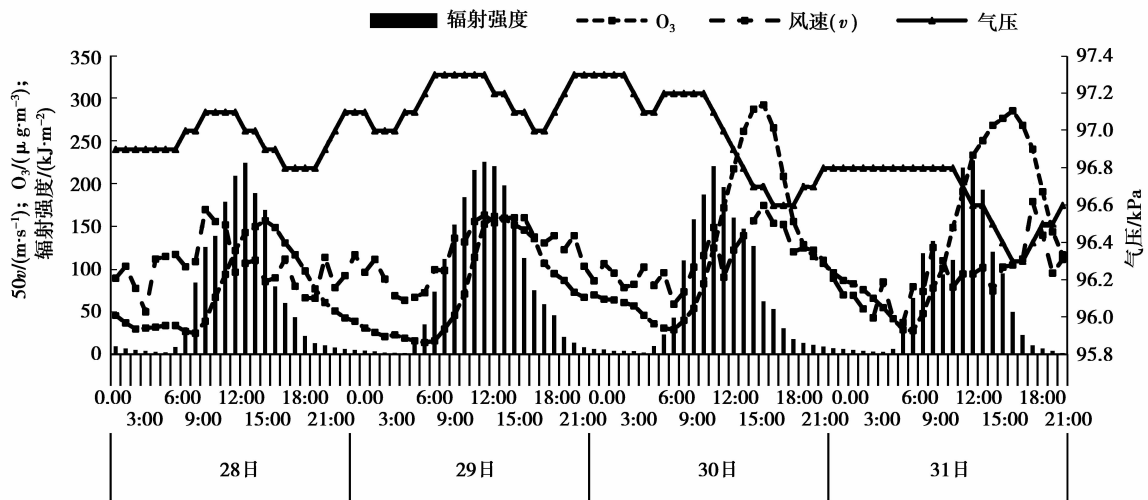


图 7 7月 28—31 日主城区臭氧质量浓度与部分气象要素之间的关系

2.3 臭氧与前体物的相关性分析

臭氧是二次污染物,研究表明,大气中臭氧质量浓度与其前体物质量浓度密切相关,其生成依赖于 NO_x 、VOCs、CO 等前体物的质量浓度和化学反应^[7,18]。图 8 为主城区夏季臭氧质量浓度较高时段臭氧和前体物小时值变化,可见前体物 NO 、 NO_2 和 CO 则呈现相似的双峰型变化规律,即在早上 8 时左右第一次达到峰值,然后逐步回落,至下午 16 时左右最低,同时臭氧质量浓度达到峰值;夜间 23 时左右出现第二次峰值,同时臭氧质量浓度基本达到谷值。

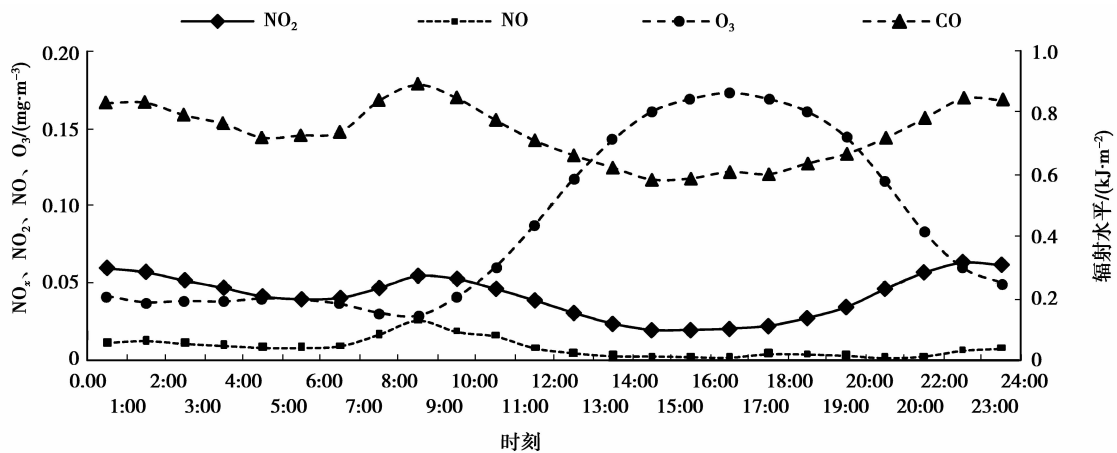


图 8 主城区夏季典型日臭氧及前体物小时变化特征

这一变化规律与污染物排放特征有关, NO_x 和 CO 很大程度来源于机动车尾气排放,早晚为出行高峰,第一次峰值的出现与上班高峰期有关,清晨大量碳氢化合物和 NO 由汽车尾气排入大气。日出后 NO_2 光解离提供原子氧,然后 NO_2 光解反应及一系列次级反应发生,OH 自由基开始氧化碳氢化合物,并生成一批自由基,它们有效地将 NO 转化为 NO_2 ,使 NO_2 质量浓度上升,碳氢化合物及 NO 质量浓度下降。当 NO_2 达到一定值时,臭氧开始积累,而自由基与 NO_2 的反应又使 NO_2 的增长受到限制;当 NO 向 NO_2 转化速率等于自由基与 NO_2 的反应速率时, NO_2 质量浓度达到极大,此时臭氧仍在积累之中;当 NO_2 下降到一定程度时,就影响臭氧的生成量;当臭氧的积累与消耗达成平衡时,臭氧达到极大,并稳定一段时间。直到下午随着日照强度的减弱, NO_2 光解受到抑制,反应趋于缓慢,在 16 点左右质量浓度开始下降,而夜间大气层结趋于稳定,不利于大气污染物的稀释扩散,导致前体物重新累积,质量浓度逐渐升高^[8,11]。

根据臭氧小时质量浓度白天变化大,夜间波动小的特征,对臭氧及其前体物质量浓度按昼间和夜间分别进行相关性分析(昼间指 8—19 时,夜间指 20—次日 7 时),昼间对应着臭氧质量浓度高值区。昼间臭氧与其前体物的相关性见表 1,可见臭氧质量浓度与 NO、NO₂ 和 CO 质量浓度昼间变化呈线性负相关关系,且相关性较好,相关系数分别为 0.937、0.968 和 0.970。夜间由于相互作用较为复杂,相关性显著降低,臭氧质量浓度与前体物的相关系数均低于昼间,除与 NO 相关系数较高外为 0.843 外,与 NO₂ 和 CO 的相关系数均较小,见表 2。这一研究结果与济南、天津等地区相似^[6,11],与污染物的排放特性有关。

表 1 昼间臭氧质量浓度与 NO、NO₂ 和 CO 等前体物质量浓度的相关关系(12 个样本)

	O ₃	NO ₂	NO	CO
O ₃	1	-0.968	-0.937	-0.970
NO ₂	-0.968	1	0.927	0.985
NO	-0.937	0.927	1	0.969
CO	-0.970	0.985	0.969	1

表 2 夜间臭氧质量浓度与 NO、NO₂ 和 CO 等前体物质量浓度的相关关系(12 个样本)

	O ₃	NO ₂	NO	CO
O ₃	1	0.145	-0.843	-0.274
NO ₂	0.145	1	-0.066	0.828
NO	-0.843	-0.066	1	0.460
CO	-0.274	0.828	0.460	1

3 结 论

1) 臭氧质量浓度小时值呈明显“单峰型”变化规律,午后 16 时左右达到峰值,凌晨 8 时左右出现最低值,白天质量浓度较高,夜间在低质量浓度范围波动。

2) 臭氧空间分布具有主城核心区臭氧质量浓度较低而周围地区较高的分布特征。

3) 高质量浓度臭氧污染一般出现在高压天气系统中,即太阳辐射强度大、微风、相对湿度低且气温较高的天气下。

4) 在高压天气中,臭氧质量浓度升高与大气压下降幅度密切相关,当日下午大气压下降超过 0.4 kPa 时,臭氧质量浓度往往较高,下降幅度低于 0.4 kPa 降幅较小时,臭氧质量浓度明显相对较低。

5) 臭氧质量浓度与太阳辐射强度、温度呈显著的正相关关系;在相对湿度小于 40%、风速小于 2 m/s 时容易累积;在主导风向为 NEE-SEE 时容易产生臭氧高质量浓度污染。

6) NO、NO₂ 和 CO 作为臭氧前体物,其质量浓度变化与臭氧质量浓度呈负相关关系,特别是在昼间高太阳辐射强度条件更为明显;而夜间由于相互作用较为复杂,相关性显著降低。

参考文献:

- [1] 唐孝炎,张远航,邵敏. 大气环境化学[M]. 北京:高等教育出版社,2006:221-231.
- [2] Lippmann M. Health effects of tropospheric ozone[J]. Environmental science & technology,1991,25(12):1954-1962.
- [3] Tingey D T, Hogsett W E, Rodecap K D, et al. Impact of O₃ on leaf construction cost and carbon isotope discrimination[R]. Corvallis, OR (United States): Environmental Protection Agency, Environmental Research Lab, 1994.
- [4] 刘建栋,周秀骥,于强,等. 近地层大气臭氧对作物光合作用影响的数值模拟研究[J]. 大气科学,2004,28(1):59-68.
LIU Jiandong, ZHOU Xiujie, YU Qiang, et al. A numerical simulation of the impacts of ozone in the ground layer

- atmosphere on crop photosynthesis[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2004, 28(1): 59-68.
- [5] 张远航, 邵可声, 唐孝炎, 等. 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.
ZHANG Yuanhang, SHAO Kesheng, TANG Xiaoyan, et al. The study of urban photochemical smog pollution in China[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinesis, 1998, 34(2/3): 392-400.
- [6] 单文坡. 大气臭氧浓度变化规律及相关影响因素研究[D]. 济南: 山东大学, 2006.
- [7] 安俊岭, 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.
AN Junlin, WANG Yuesi, LI Xin, et al. Analysis of the relationship between NO, NO₂ and O₃ concentrations in Beijing[J]. Environmental Science, 2007, 28(4): 706-711.
- [8] 叶芳, 安俊琳, 王跃思, 等. 北京近地层 O₃, NO_x, O 及相关气象因子的分析[J]. 生态环境, 2008, 17(4): 1425-1432.
YE Fang, AN Junlin, WANG Yuesi, et al. Analysis of O₃, NO_x, CO and correlation meteorological factor at the ground layer in Beijing[J]. Ecology and Environment, 2008, 17(4): 1425-1432.
- [9] 谈建国, 陆国良, 耿福海, 等. 上海夏季近地面臭氧浓度及其相关气象因子的分析和预报[J]. 热带气象学报, 2007, 23(5): 515-520.
TAN Jianguo, LU Guoliang, GENG Fuhai, et al. Analysis and prediction of surface O₃ concentration and related meteorological factors in summertime in urban area of Shanghai[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2007, 23(5): 515-520.
- [10] 陈魁, 郭胜华, 董海燕, 等. 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, 2010, 17(4): 18-21.
CHEN Kui, GUO Shenghua, DONG Haiyan, et al. Study on the space-time distribution and change characteristics of ozone concentration in Tianjing[J]. Environment and Sustainable Development, 2010, 17(4): 18-21.
- [11] 姚青, 樊文雁, 黄鹤, 等. 天津夏季地面 O₃ 浓度变化规律与影响因素[J]. 生态环境学报, 2009, 18(1): 12-16.
YAO Qing, FAN Wenyan, HUANG He, et al. Surface ozone characteristics and the correlated factors in summer in Tianjin[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(1): 12-16.
- [12] 刘萍, 翟崇治, 余家燕, 等. 重庆大气中臭氧浓度变化及其前体物的相关性分析[J]. 环境科学与管理, 2013, 38(1): 40-43.
LIU Ping, ZHAI Chongzhi, YU Jiayan, et al. Correlation analysis on variation characteristics of surface ozone concentration and its precursor compounds in Chongqing[J]. Environmental Science and Management, 2013, 38(1): 40-43.
- [13] 刘萍, 余家燕, 黄伟, 等. 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, 2013, 35(3): 11-13.
LIU Ping, YU Jiayan, HUANG Wei, et al. Comparison analysis for impacts on ozone from meteorological factors in suburb and urban Chongqing[J]. Environment and Ecology in the Three Gorges, 2013, 35(3): 11-13.
- [14] 洪盛茂, 焦荔, 何曦, 等. 杭州市区大气臭氧浓度变化及气象要素影响[J]. 应用气象学报, 2009, 20(5): 602-609.
HONG Shengmao, JIAO Li, HE Xi, et al. The variation of ozone concentrations in urban districts of Hangzhou and their relationship with meteorological factors[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2009, 20(5): 602-609.
- [15] 安俊琳, 王跃思, 孙扬. 气象因素对北京臭氧的影响[J]. 生态环境学报, 2009, 18(3): 944-951.
AN Junlin, WANG Yuesi, SUN Yang. Assessment of ozone variations and meteorological effects in Beijing[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(3): 944-951.
- [16] 王宏, 陈晓秋, 余永江, 等. 福州近地层臭氧分布及其与气象要素的相关性[J]. 自然灾害学报, 2012, 21(4): 175-181.
WANG Hong, CHEN Xiaoqiu, YU Yongjiang, et al. Distribution of ozone in land surface layer in Fuzhou and its relationship with meteorological factors[J]. Journal of Natural Disasters, 2012, 21(4): 175-181.
- [17] 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.
REN Lihong, HU Fei, WANG Wei. A study of correlations between O₃ concentration and meteorological factors in summer in Beijing[J]. Climatic and Environmental Research, 2005, 10(2): 166-174.
- [18] 漏嗣佳, 朱彬, 廖宏. 中国地区臭氧前体物对地面臭氧的影响[J]. 大气科学学报, 2010, 33(4): 451-459.
LOU Sijia, ZHU Bin, LIAO Hong. Impacts of O₃ precursor on surface O₃ concentration over China[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2010, 33(4): 451-459.