

2018121602DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2018121602

冯新宇.2013—2017年太原市臭氧浓度变化特征[J].环境化学,2019,38(8):1899-1905.

FENG Xinyu. Variation characteristics of ozone concentration in Taiyuan from 2013 to 2017[J].Environmental Chemistry,2019,38(8):1899-1905.

2013—2017年太原市臭氧浓度变化特征

冯新宇*

(太原市环境监测中心站,太原,030002)

摘要 利用2013—2017年太原市近地面O₃的连续观测资料以及气象数据,分析了太原市O₃浓度的变化特征及其与气象要素的关系.结果表明,太原市2013—2017年O₃浓度整体呈上升的趋势,特别是2017年,O₃-8 h浓度超标天数达到66 d,O₃污染形势严峻.O₃浓度的月变化峰值出现在6月份,日变化特征呈现单峰型分布,5—7时浓度较低,15—16时出现峰值.除上兰背景点外,太原市不同监测点位O₃浓度变化总体表现为城市周边点位高于城市中心.气象因素分析表明,O₃与NO₂、PM_{2.5}及相对湿度呈负相关性,而与气温、风速呈正相关性.当风向为南风或西南方风时,O₃浓度较高,说明太原市O₃浓度升高可能与区域污染输送有关.

关键词 臭氧,变化特征,光化学反应,太原,气象参数.

Variation characteristics of ozone concentration in Taiyuan from 2013 to 2017

FENG Xinyu*

(Environment Monitoring Center Station of Taiyuan, Taiyuan, 030002, China)

Abstract: The characteristics of surface ozone concentration and its relationship with meteorology were analyzed by continuous observation from 2013 to 2017 in urban site of Taiyuan. The results showed that the annual averaged concentration of ozone was increasing from 2013 to 2017, the over polluted days of ozone were 66 d and the situation of ozone pollution in Taiyuan became worse. Ozone concentration reached its peak in June in a year, the diurnal distribution of ozone presented a clear unimodal with its peak appearing at 15:00 or 16:00 and trough at 05:00 or 07:00. For the spatial distribution of ozone, the concentration was lower in central sites than suburbs sites except for Shanglan site. The research showed that the ozone concentration was positively correlated with temperature and wind speed, while negatively correlated with NO₂, PM_{2.5} and relative humidity. The higher ozone concentration was found under southwest and southern winds, which indicated that ozone may be related to regional pollution transport.

Keywords: ozone, variation characteristics, photochemical reaction, Taiyuan, meteorological factor.

臭氧是大气中的一种微量气体,正常存在于平流层中的臭氧能够吸收太阳辐射出的紫外线而保护地球^[1];近地面大气中的臭氧主要是由人类活动排放的氮氧化物(NO_x)和挥发性有机物(VOCs)等污染物在大气中经过光化学反应所产生^[2],它可对地球上的生命包括人类、动物、植物等产生危害.近年来,O₃浓度在我国甚至全球都呈现上升趋势,特别是我国一些经济快速增长、人口密集的长三角、珠三角以及京津冀地区,O₃污染问题日益突出^[3-5].目前,关于这方面的研究已经有许多相关报道^[6-17],吴锴等^[8]

2018年12月16日收稿(Received:December 16, 2018).

*通讯联系人,Tel:15536643309, E-mail:liyongqi103@126.com

Corresponding author, Tel:15536643309, E-mail:liyongqi103@126.com

对成都市 2014—2016 年 6 个国控监测站和气象观测数据进行了研究分析,揭示了成都市 O_3 变化的规律及其与气象因素的关系;段晓瞳等^[11]根据 2015 年全国 189 个城市的近地面臭氧浓度数据,从不同时空、地形特征、温度等方面详细研究了中国近地面臭氧浓度的变化特征;Sicard 等^[14]比较了欧洲地中海区域 214 个城郊区域近地面 O_3 浓度的变化趋势,揭示了城市区域 O_3 存在上升趋势,而且指出气候变化对城市臭氧污染具有很强的影响性;Seo 等^[15]研究了韩国区域气象因子对近地面 O_3 时空变化的影响。

太原市作为山西省省会,人口密集,工业、交通业发展迅速,机动车保有量持续增加,容易形成臭氧污染.因此,针对大气 O_3 浓度进行连续监测,开展分析和研究工作具有十分重要的意义.目前,关于太原市臭氧污染特征分析相关文献较少,且研究时间跨度较小,不能反映长时间序列的 O_3 浓度变化特征及影响因素.本文利用 2013—2017 年太原市环境监测中心站自动监测网络监测的 O_3 数据,系统分析了太原市 O_3 浓度的变化特征及其气象影响因素,以期对太原市大气污染防治提供理论基础和科学依据。

1 实验部分(Experimental section)

1.1 监测点位分布

太原市位于东经 $111^{\circ}30'$ — $113^{\circ}09'E$,北纬 $37^{\circ}27'$ — $38^{\circ}25'N$,西、北、东三面环山,平均海拔约 800 m,中、南部为河谷平原,整个地形北高南低,属温带季风性气候,室外近地面风速年均值为 $0.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,大气压年均 920 hPa,空气湿度年均 49%^[18].目前,太原市空气质量监测点主要包括 9 个国控自动监测点,点位设置如图 1 所示,从图 1 可知,9 个国控点基本覆盖了太原市主要的建成区(巨轮点位由于其它原因于 2018 年 9 月开始重新监测,本文监测时间段不包括该点位),其中上兰点位为清洁对照点,各点位布设均符合国家《环境空气质量监测点位布设技术规范(试行)HJ 664—2013》的要求。



图 1 太原市 9 个监测点位的位置分布

Fig.1 Location of 9 air quality monitoring sites in Taiyuan

1.2 监测仪器

各监测点采样口距地面高度及样品分析方法均依据国家相关标准进行, O_3 监测仪器全部使用美国热电公司 Model i 系列 O_3 自动分析仪,仪器精度 $1.0\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,最低检测限 $0.5\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.监测指标参考中国环境空气质量标准统计臭氧小时平均浓度(O_3 1 h)、臭氧日最大 8 h 平均浓度(O_3 -8 h)、 O_3 -8 h 百分位浓度(臭氧月、年浓度),其它监测项目均使用国控点位热电公司设备数据,观测期间,严格按照环境空气质量自动监测技术规范(HJ_T 193—2005)的要求对系统设备进行日常维护和校准,保证监测数据准确有效。

本研究选取太原市空气质量自动监测系统 2013—2017 年 6 项污染物的连续监测数据,并按照 GB3095—2012 的相关规定进行数据进行有效性检验。

2 结果与讨论(Results and discussion)

2.1 2013—2017 年太原市 O_3 浓度总体变化情况

图 2 是太原市与 74 城市及京津冀 11 地市 O_3 -8 h 年百分位浓度比较情况,从图 2 中可知,2013—2017 年,全国 74 个空气质量重点城市及京津冀 11 个地市环境空气中的 O_3 浓度均呈逐年上升的趋势,在 2017 年之前, O_3 -8 h 年百分位浓度还在《环境空气质量标准》GB3095—2012 中规定的二级标准 ($160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 以下,但在 2017 年 O_3 -8 h 年百分位浓度有比较明显的上升.太原市环境空气中 O_3 污染物浓度变化趋势与 74 城市和京津冀 11 地市基本一致(除了 2013 年),总体上污染程度低于 74 城市和京津冀 11 地市平均水平,但近年来上升趋势比较明显,特别是 2017 年, O_3 -8 h 年百分位浓度达到 $189 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,超过国家二级标准 ($160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 0.18 倍,是 74 城市平均水平的 0.12 倍, O_3 污染情况日趋严重.(太原市以外其他城市的 O_3 监测数据来自真气网, <http://palm.zq12369.com>)

2.2 O_3 浓度年变化情况

图 3 为不同年份太原市 O_3 -8 h 月百分位浓度变化曲线,从图 3 中可知, O_3 -8 h 浓度年变化规律呈现倒“V”字形,春季(3—5 月份)开始浓度逐渐升高,在春末夏初(6 月份)浓度达到峰值(除了 2014 年、2017 年峰值在 7 月)、夏季(6—8 月份)浓度均保持在较高的水平;秋季(9—11 月份)浓度逐渐下降;冬季(12 月份—次年 1 月份)浓度基本维持在较低水平。 O_3 在大气中发生复杂的光化学反应,包括自由基的生成、传递等^[19-20],其反应速率与温度、湿度、太阳辐射等气象条件以及 O_3 前体物浓度等众多因素有关.夏季太阳辐射强,气温较高,光化学反应较强,造成 O_3 二次生成浓度较高;冬季光化学反应较弱,且在一定条件下,高浓度颗粒物导致气溶胶光学厚度增大,降低了 O_3 光化学速率,两者共同作用导致冬季 O_3 浓度最低.

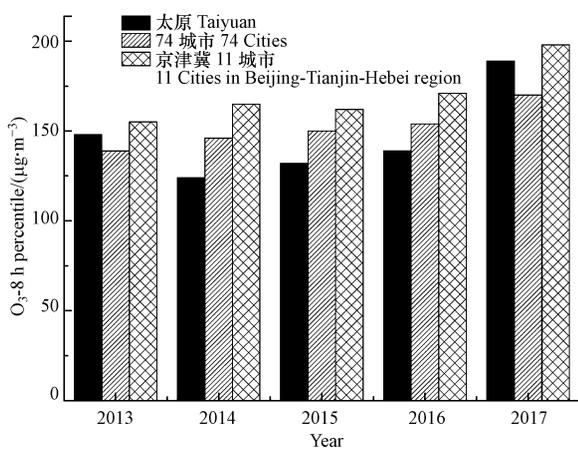


图 2 不同年份太原市与其它城市 O_3 -8 h 百分位浓度比较

Fig.2 The percentile concentration variation of O_3 -8 h in Taiyuan and other cities in different years

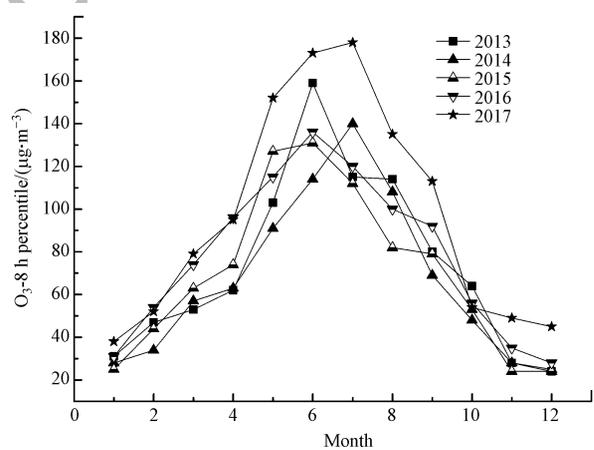


图 3 不同年份太原市 O_3 -8 h 月百分位浓度变化曲线

Fig.3 Monthly percentile concentration of O_3 -8 h in Taiyuan in different months

2.3 O_3 浓度日变化情况

图 4 为太原市 2013—2015 年年均及 5—7 月 O_3 小时浓度的日变化曲线.从图 4 可知,整个曲线变化呈现单峰型分布,白天浓度明显高于夜间,这与许多城市和地区的日变化特征一致^[21-22].早上 8 时开始受太阳辐射影响, O_3 浓度逐渐上升,午后太阳辐射最强,在光化学反应作用下,15 时左右 O_3 浓度达到最大值,之后随着太阳辐射强度的减弱又逐渐降低.就图 4(a) 全年平均浓度而言, O_3 浓度在早上 5 时至 7 时较低,其值处于 $17—22 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间;峰值浓度主要集中在 15 时或 16 时,浓度值在 $68—108 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.对于图 4(b) 不同年份 5—7 月 O_3 平均浓度,处于低值和峰值区的时间段与全年基本一致,但是各个时

段浓度明显上升,低值浓度集中在 $28\text{--}44\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,峰值浓度值集中在 $109\text{--}179\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,由于5—7月太原市气温相对较高,有利于光化学反应的进行,另外,外来 O_3 及其前体物污染物输送也可能推高了本地的 O_3 浓度^[23].

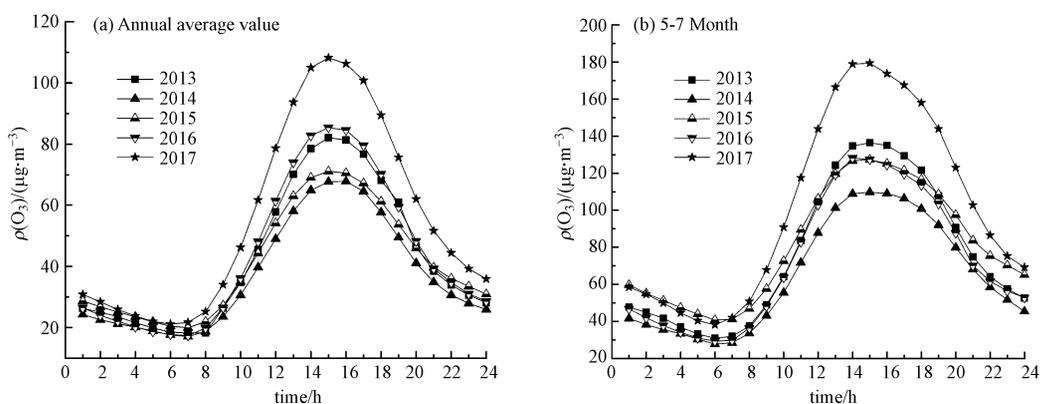


图4 不同年份太原市 O_3 浓度日变化曲线

(a) annual average value (b) 5—7 Month

Fig.4 Diurnal variation of O_3 in Taiyuan in different years

2.4 超标情况分析

根据2013年新标准及《环境空气质量指数(AQI)技术规定》(HJ633—2012)分级方法, O_3 -8 h 大于 $160\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 为超标日,本文对2013—2017年太原市 O_3 -8 h 出现超标的情况进行了统计,结果见表1.从表1可知,2013—2017年 O_3 -8 h 出现的超标天数分别为24、15、15、13、66 d,2017年前各年超标天数及不同级别天数变化不大(2013除外),而2017年超标天数明显增加,特别是轻度和中度污染天数, O_3 污染水平有明显的增加趋势.根据相关监测数据,2017年 O_3 作为首要污染物的天数达到了92 d,对综合指数的贡献率为14.9%,是迄今为止太原市开展 O_3 监测以来污染最为严重的一年.根据气象资料,2017年太原市日最高温度为 $30\ \text{C}$ 及以上天数达77 d,为2013年以来持续高温最多的一年,高温天气有利于光化学反应的进行,促使了 O_3 超标天数的增加;另一方面,随着近年来环境空气治理力度的不断加大,大气中颗粒物浓度持续降低,也为光化学反应的进行提供了有利的条件,这些原因共同作用导致2017年 O_3 浓度出现大幅度的增加.

表1 不同年份 O_3 -8 h 污染超标天数统计(天)

Table 1 Statistical number of O_3 -8 h exceeding the standard days in different days (d)

污染级别 Pollution level	2013	2014	2015	2016	2017
3级	20	14	14	13	54
4级	4	1	1	-	11
5级	-	-	-	-	1
共超标天数	24	15	15	13	66

图5为不同年份太原市 NO_2 、CO 浓度年变化曲线,从图5中可知, NO_2 和 CO 浓度曲线具有相似的季节变化特征,冬季较高,夏季较低,这与 O_3 -8 h 浓度变化(图3)情况正好相反,冬季大气层结构较为稳定,光化学反应弱,导致 O_3 前体物 NO_2 和 CO 浓度的积累;夏季光化学反应活跃,前体物大量转化为 O_3 , 导致其浓度增加.

2.5 不同点位比较

为了便于比较不同国控站点 O_3 浓度变化情况,将各个点位的 O_3 -8 h 百分位浓度按5年(2013—2017)以及2017年来进行统计,结果见图6.从图6可知,按5年统计,太原市区 O_3 污染整体呈现市区周边点位相对较高,中心区域相对较低的特征.其中,污染最重的点位是金胜,该站点位于太原市西南方向城乡结合部,属传统的化工产业区,临近第一热电厂,因此来自本区域 O_3 前体物 VOCs 及 NO_x 排放量较

大,继而通过光化学反应生成 O_3 ,这是 O_3 浓度较高的一个原因.另外,在太原市南部及附近县市分布着大量的工业,受夏季偏南气流的影响,高浓度的 O_3 及其前体物的外来输送老化也容易造成该点位 O_3 浓度偏高.其次是南寨点位,该站点位于太原市东北方向城乡结合部,位于兴安化工场内,临近第二热电厂,植被情况在所有监测点位中最好,因此本区域的 O_3 生成,加之城市中心区域的传输是该点位 O_3 浓度较高的主要原因.2017 年 O_3 -8 h 百分位浓度总体偏高,城市南部点位的 O_3 浓度上升较为明显,其中以小店点位上升最大.小店区是近年来太原市各城区中经济发展最为活跃的区域, O_3 的各种前体物排放量较大,因此本地污染物的排放及二次生成是 O_3 主要来源.图 7 是不同点位 2013—2017 年超标天数总和比较图.从图 7 可看出,金胜和南寨的 O_3 -8 h 超标天数明显高于其它点位,这与 O_3 -8 h 百分位浓度变化情况是一致的.

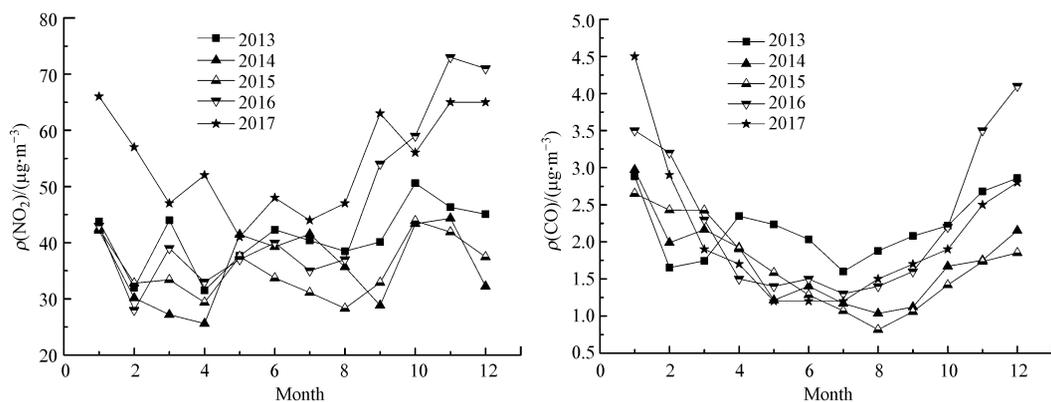


图 5 不同年份太原市 NO_2 、CO 浓度月变化曲线

Fig.5 Monthly average concentration of NO_2 , CO in Taiyuan in different months

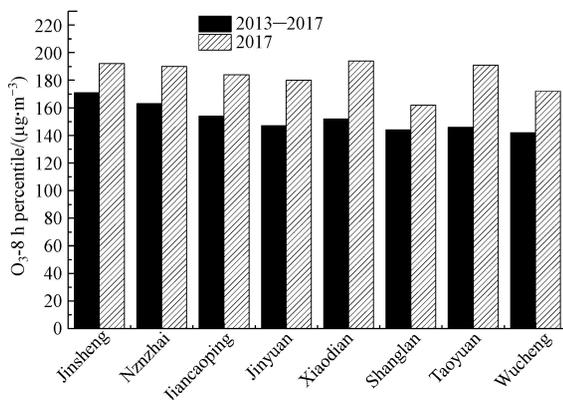


图 6 不同点位 O_3 -8 h 百分位值变化情况

Fig.6 The variation of O_3 -8 h percentile in different observation sites

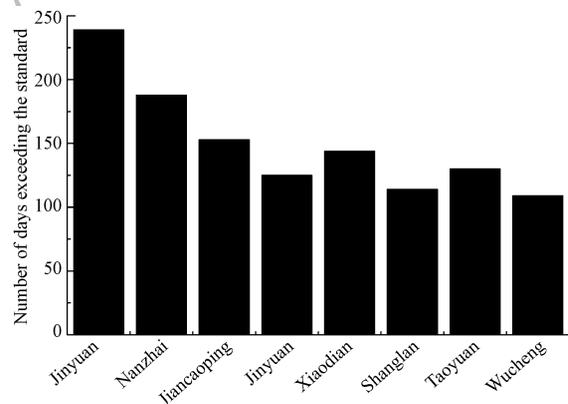


图 7 不同点位 O_3 -8 h 超标情况(2013—2017)

Fig.7 The number of O_3 -8 h exceeding the standard days in different observation sites(2013—2017)

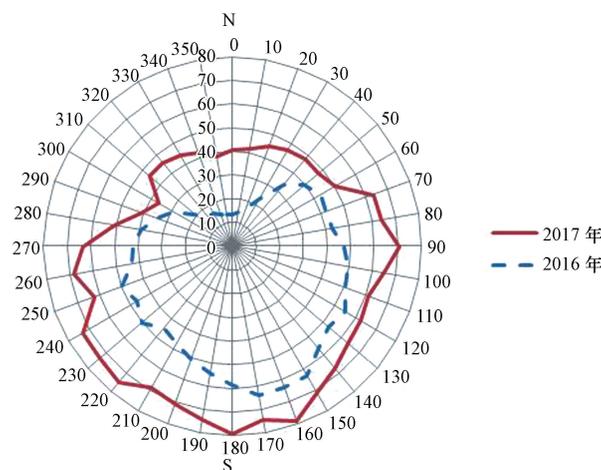
2.6 O_3 与其它污染物及气象参数的关系

为研究太原市 O_3 浓度与污染物及气象参数的关系,将 2017 年全年太原市国控点位与 O_3 相关的监测因子(不包括风向)小时值进行逐时平均,各监测因子对 O_3 进行相关性分析,结果见表 2.从表 2 中可知,除了 CO、气压与 O_3 相关性较弱外,其它各项浓度及参数都与 O_3 有较强的相关性.其中, NO_2 、 $PM_{2.5}$ 及湿度与 O_3 呈负相关性,气温、风速与 O_3 呈正相关性. NO_2 是生成 O_3 的重要前体物,是光化学反应的主要参与者; $PM_{2.5}$ 浓度的大小会影响气溶胶光学厚度,进而影响 O_3 光化学生成速率;高温、低湿是形成高浓度 O_3 的重要气象条件;风速与 O_3 浓度有较高的相关性,其对 O_3 浓度的影响主要体现在两方面:一是抬高了大气边界层高度,垂直动量输送加强,进而促使对流层顶高浓度 O_3 向地面传输;二是增强了 O_3 的水平扩散作用,对稀释 O_3 具有一定贡献^[24].

表 2 O_3 与其它监测项目的相关性(R^2)Table 2 The correlation coefficients of O_3 and other monitoring object (R^2)

监测项目 Monitoring items	$NO_2/$ ($\mu g \cdot m^{-3}$)	$CO/$ ($mg \cdot m^{-3}$)	$PM_{2.5}/$ ($\mu g \cdot m^{-3}$)	风速 Wind speed/ ($m \cdot s^{-1}$)	气压 Pressure/ hpa	气温 Temperature/ $^{\circ}C$	湿度 Humidity/%
O_3 1 h/ ($\mu g \cdot m^{-3}$)	-0.796	-0.383	-0.733	0.960	-0.537	0.947	-0.939

为进一步分析 O_3 浓度变化及传输过程,结合研究时段 O_3 整体变化情况,本文将太原市 2016 年和 2017 年太原市 O_3 小时数据与风向数据按每 10 度一档进行归类统计,结果见图 8。从图 8 可知,2016 年和 2017 年 O_3 浓度受风向影响规律基本一致,当太原市区风向为南风时, O_3 浓度相对最高,西南风时次之,当风向为北风或西北风时较低。由于太原市特殊的地理形势,来自北边的风会将污染物吹向地势较为开阔的南部地区,因此污染物扩散较为有利;当以南风为主时,来自周边县市高浓度的 O_3 及逐渐老化的前体物会输送到太原市区,造成 O_3 浓度值偏高。

图 8 O_3 浓度随风向变化分布图Fig.8 O_3 concentrations corresponding with wind direction

3 结论 (Conclusion)

(1) 太原市 2013—2017 年 O_3 浓度整体呈上升的趋势,特别是 2017 年, O_3 浓度超标天数增加明显, O_3 -8 h 百分位浓度达到 $189 \mu g \cdot m^{-3}$,超过国家二级标准 ($160 \mu g \cdot m^{-3}$) 0.18 倍,是 74 城市平均水平的 0.12 倍, O_3 污染情况日益严重。

(2) 太原市每年 6 月左右 O_3 浓度达到一年中的峰值, O_3 浓度日变化在早上 5—7 时浓度较低, 15—16 时出现小时浓度峰值。不同点位 O_3 浓度变化呈现城市周边点位高于城市中心(背景点上兰除外)的规律,这与太原市产业分布特征及城市发展规划有关。

(3) 相关性分析表明, O_3 与 NO_2 、 $PM_{2.5}$ 及湿度呈负相关性,气温、风速与 O_3 呈正相关性。当风向为南风或西南方风时, O_3 浓度较高,说明太原市 O_3 浓度升高除了本地生成外,还与南部外来传输有关。

参考文献 (References)

- [1] 黄丽,段书音,朱佳城,等. 郑州市 2015—2016 年臭氧污染特征分析[J]. 郑州大学学报(医学版), 2018, 53(1): 64-67.
HUANG L, DUAN S Y, ZHU J C, et al. Characteristics analysis of ozone pollution in Zhengzhou City in 2015-2016[J]. Journal of Zhengzhou University (Medical Sciences), 2018, 53(1): 64-67(in Chinese).
- [2] 齐兵,牛彥文,杜荣光,等. 杭州市近地面大气臭氧浓度变化特征分析[J]. 中国环境科学, 2017, 37(2): 443-451.
QI B, NIU Y W, DU R G, et al. Characteristics of surface ozone concentration in urban site of Hangzhou[J]. China Environmental Science, 2017, 37(2): 443-451(in Chinese).
- [3] 姚青,韩素芹,蔡子颖,等. 2012 年夏季天津城区 BTEX 污染特征与臭氧潜势分析[J]. 中国环境科学, 2013, 33(5): 793-798.
YAO Q, HAN S Q, CAI Z Y, et al. The diurnal variation and ozone production potential of BTEX in Tianjin in the summer of 2012[J].

- China Environmental Science, 2013, 33(5): 793-798 (in Chinese).
- [4] 易睿, 王亚林, 张殷俊, 等. 长江三角洲地区城市臭氧污染特征与影响因素分析[J]. 环境科学学报, 2015, 35(8): 2370-2377.
YI R, WANG Y L, ZHANG Y J, et al. Pollution characteristics and influence factors of ozone in Yangtze River Delta[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(8): 2370-2377 (in Chinese).
- [5] ZHANG Y N, XIANG Y R, CHAN L Y, et al. Procuring the regional urbanization and industrialization effect on ozone pollution in Pearl River Delta of Guangdong, China[J]. Atmospheric Environment, 2011, 45(28): 4898-4906.
- [6] 黄俊, 廖碧婷, 吴兑, 等. 广州近地面臭氧浓度特征及气象影响分析[J]. 环境科学学报, 2018, 38(1): 23-31.
HUANG J, LIAO B T, WU D, et al. Guangzhou ground level ozone concentration characteristics and associated meteorological factors[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38(1): 23-31 (in Chinese).
- [7] 程念亮, 李云婷, 张大伟, 等. 2004-2015 年北京市清洁点臭氧浓度变化特征[J]. 环境科学, 2016, 37(8): 2847-2854.
CHENG N L, LI Y T, ZHANG D S, et al. Characteristics of ozone background concentration in Beijing from 2004 to 2015 [J]. Environmental Science, 2016, 37(8): 2847-2854 (in Chinese).
- [8] 吴锴, 康平, 王占山, 等. 成都市臭氧污染特征及气象成因研究[J]. 环境科学学报, 2017, 37(11): 4241-4252.
WU K, KANG P, WANG Z S, et al. Ozone temporal variation and its meteorological factors over Chengdu City [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(11): 4241-4252 (in Chinese).
- [9] 马志强, 王跃思, 张小玲, 等. 北京城区与下游地区臭氧对比研究[J]. 环境科学, 2011, 32(4): 924-929.
MA Z Q, WANG Y S, ZHANG X L, et al. Comparison of ozone between Beijing and downstream area [J]. Environmental Science, 2011, 32(4): 924-929 (in Chinese).
- [10] 刘湾湾, 刘琼, 陈勇航, 等. 上海地区对流层低层臭氧及硫酸盐气溶胶时空分布特征研究[J]. 环境科学学报, 2018, 38(6): 2214-2222.
LIU W W, LIU Q, CHEN Y H, et al. The temporal and spatial distribution characteristics of lower tropospheric ozone and sulfate aerosols in Shanghai [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38(6): 2214-2222 (in Chinese).
- [11] 段晓瞳, 曹念文, 王潇, 等. 2015 年中国近地面臭氧浓度特征分析[J]. 环境科学, 2017, 38(12): 4976-4982.
DUAN X T, CAO N W, WANG X, et al. Characteristics analysis of the surface ozone concentration of China in 2015 [J]. Environmental Science, 2017, 38(12): 4976-4982 (in Chinese).
- [12] 岳婷婷, 柴发合, 张新民, 等. 天津武清地区夏季臭氧光化学研究[J]. 环境科学研究, 2009, 22(1): 23-27.
YUE T T, CHAI F H, ZHANG X M, et al. Ozone photochemistry in summer in Wuqing, Tianjin [J]. Research of Environmental Sciences, 2009, 22(1): 23-27 (in Chinese).
- [13] 程麟钧, 王帅, 宫正宇, 等. 京津冀区域臭氧污染趋势及时空分布特征[J]. 中国环境监测, 2017, 33(1): 14-21.
CHENG L J, WANG S, GONG Z Y, et al. Pollution trends of ozone and its characteristics of temporal and spatial distribution in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Environmental Monitoring in China, 2017, 33(1): 14-21 (in Chinese).
- [14] SICARD P, DE MARCO A, TROUSSIER F, et al. Decrease in surface ozone concentrations at Mediterranean remote sites and increase in the cities [J]. Atmospheric Environment, 2013, 79: 705-715.
- [15] SEO J, YOUN D, KIM J Y, et al. Extensive spatio-temporal analysis of surface ozone over South Korea for 1999-2010 considering meteorological factors // EGU General Assembly Conference Abstracts [C]. Vienna, Austria, 2013.
- [16] PFISTER G G, WALTERS S, EMMONS L K, et al. Quantifying the contribution of inflow on surface ozone over California during summer 2008 [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013, 118(21): 12282-12299.
- [17] SAMUEL R S, PADMA K, MILTON B B, et al. Seasonal variation of surface ozone and its association with meteorological parameters, UV-radiation, rainfall and cloud cover over Chennai, India [J]. Current Science, 2013, 105(5): 20-23.
- [18] 温彦平. 太原市近地面臭氧浓度变化规律及其与气象要素的关系[J]. 环境工程学报, 2015, 11(9): 5545-5554.
WEN Y P, Temporal variations of surface ozone and its relations with meteorological parameters in Taiyuan City [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 11(9): 5545-5554 (in Chinese).
- [19] 陆克定, 张远航, 苏杭, 等. 珠江三角洲夏季臭氧区域污染及其控制因素分析[J]. 中国科学: 化学, 2010, 40(4): 407-420.
LU D K, ZHANG Y H, SU H, et al. Regional ozone pollution and key controlling factors of photochemical ozone production in Pearl River Delta during summer time [J]. Scientia Sinica Chimica, 2010, 40(4): 407-420 (in Chinese).
- [20] 安俊琳, 王跃思, 孙杨. 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 J L, WANG Y S, SUN Y. Assessment of ozone variations and meteorological effects in Beijing [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(3): 944-951 (in Chinese).
- [21] 齐冰, 刘寿东, 杜荣光, 等. 杭州地区气候环境要素对霾天气影响特征分析[J]. 气象, 2012, 38(10): 1225-1231.
QI B, LIU S D, DU R G, et al. The characteristic analysis of climatic and environmental factors on the haze weather in Hangzhou [J]. Meteorological Monthly, 2012, 38(10): 1225-1231 (in Chinese).
- [22] 齐冰, 杜荣光, 于之锋, 等. 杭州地区大气细颗粒物浓度变化特征分析[J]. 环境化学, 2015, 34(1): 77-82.
QI B, DU R G, YU Z F, et al. Characteristic of atmospheric fine particles concentrations in Hangzhou region [J]. Environmental Chemistry, 2015, 34(1): 77-82 (in Chinese).
- [23] 严茹莎, 陈敏东, 高庆先, 等. 北京夏季典型臭氧污染分布特征及影响因子[J]. 环境科学研究, 2013, 26(1): 43-49.
YAN R S, CHEN M D, GAO Q X, et al. Characteristics of typical ozone pollution distribution and impact factors in Beijing in summer [J]. Research of Environmental Sciences, 2013, 26(1): 43-49 (in Chinese).
- [24] LIU S C, TRAINER M, FEHSENFELD F C, et al. Ozone production in the rural troposphere and the implications for regional and global ozone distributions [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1987, 92: 4191-4207.