

# 绍兴市臭氧污染特征及气象因素分析

孙国金<sup>1,2</sup> 朱绍东<sup>3</sup> 李优楠<sup>4</sup> 何奕<sup>4</sup> 施耀<sup>4\*</sup>

(1.绍兴市生态环境局,浙江 绍兴 312000;2.浙江省辐射环境监测站,浙江 杭州 310015;  
3.绍兴市环境监测中心站,浙江 绍兴 312000;4.浙江大学工业生态与环境研究所,浙江 杭州 310027)

**摘要** 针对日益严重的臭氧污染问题,利用绍兴市3个国控监测站点2016—2018年的监测数据,对绍兴市臭氧污染的时空分布特征进行研究,并综合考量温度、湿度、风向、风力等气象因素的影响。结果表明,绍兴市2017年臭氧最高日均质量浓度为 $355\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,显著高于2016年( $267\mu\text{g}/\text{m}^3$ )。臭氧日浓度曲线呈单峰型特征,峰值出现于14:00左右,谷值出现于6:00左右。2016年夏季臭氧浓度最高,而2017年与2018年春季臭氧浓度最高。臭氧高值首次出现日期提前与温度有关。气象因素上,温度 $\geq 30^\circ\text{C}$ ,  $40\%\leq$ 相对湿度 $<70\%$ ,风向为东北风时,绍兴市更易出现臭氧高值。2018年绍兴市西南部臭氧浓度峰值显著低于其他区域,可能是 $\text{NO}_x$ 等污染物减排后传输作用变化所致。

**关键词** 绍兴市 臭氧 污染特征 气象因素

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2020.05.017

**Analysis of ozone pollution characteristics and meteorological factors in Shaoxing** SUN Guojin<sup>1,2</sup>, ZHU Shaodong<sup>3</sup>, LI Younan<sup>4</sup>, HE Yi<sup>4</sup>, SHI Yao<sup>4</sup>. (1. Shaoxing Ecology and Environment Bureau, Shaoxing Zhejiang 312000; 2. Radiation Environment Monitoring Station of Zhejiang Province, Hangzhou Zhejiang 310015; 3. Shaoxing Environmental Monitoring Centre, Shaoxing Zhejiang 312000; 4. Industrial Ecology and Environment Research Institute, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang 310027)

**Abstract:** Aiming at the problem of increasingly serious ozone pollution, the monitoring data of three national monitoring stations in Shaoxing from 2016 to 2018 was used to study the time and spatial distribution characteristics of ozone pollution in Shaoxing. The effects of temperature, humidity, wind direction, wind power on ozone concentration were analyzed. The results showed that the highest ozone concentration of Shaoxing in 2017 was  $355\mu\text{g}/\text{m}^3$ , which was significantly higher than the peak value of  $267\mu\text{g}/\text{m}^3$  in 2016. Ozone diurnal variation showed single-peak type, the peak hour appeared at 14:00 and the bottom value hour appeared at 6:00. The summer of 2016 and the spring of 2017 and 2018 were the seasons with the highest ozone concentration in the year. The advance of the first date of high ozone concentration value was related to the changes in temperature. Temperature $\geq 30^\circ\text{C}$ ,  $40\%\leq$  relative humidity $<70\%$ , wind direction of northeast wind were prone to high ozone values in Shaoxing. In 2018, the peak concentration of ozone in the southwest was significantly lower than that in the other directions. After investigation and analysis, it might be caused by changes in the transmission of pollutants such as  $\text{NO}_x$ .

**Keywords:** Shaoxing; ozone; pollution characteristics; meteorological factors

自然界中有约10%的臭氧( $\text{O}_3$ )分布在对流层中,主要由人为排放的挥发性有机化合物(VOCs)与氮氧化物( $\text{NO}_x$ )在紫外线作用下进行光化学反应生成<sup>[1]</sup>,是光化学污染的重要特征污染物之一<sup>[2]</sup>。 $\text{O}_3$ 浓度过高会对人类身体健康<sup>[3]</sup>、农作物生长<sup>[4]</sup>等造成一定的危害。近些年来,随着我国经济不断发展,快速城市化所带来的空气污染问题也逐渐受到人们的重视<sup>[5]</sup>。针对 $\text{O}_3$ 污染问题,国内外学者开展了大量的研究工作,对局部区域 $\text{O}_3$ 浓度的时空分布特征、污染来源以及 $\text{O}_3$ 污染对健康的影响等<sup>[6-8]</sup>进行

了深入的探讨。

绍兴市位于浙江省中北部、杭州湾南岸,随着纺织印染、装备制造、化工材料生产、金属制品加工等行业的蓬勃发展,绍兴市大气污染问题日益凸显。2017年绍兴市 $\text{O}_3$ 平均质量浓度为 $170\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,较2016年上升16.4%。从优良天数来看,2017年绍兴市城区空气质量优良天数为275d,达标率为75.3%,其中,仅因 $\text{O}_3$ 单项因子超标导致空气质量不达标的有49d,占总超标天数的54.4%。 $\text{O}_3$ 污染已成为影响绍兴市优良天数及空气综合指数的重要

第一作者:孙国金,男,1977年生,博士,高级工程师,研究方向为环境污染防治。\*通讯作者。

因素。目前,对于绍兴市  $O_3$  污染的相关研究文献较少,因此本研究利用绍兴市 3 个国控监测站点 2016—2018 年  $O_3$  监测数据,分析绍兴市辖区内  $O_3$  污染时空分布特征,并对影响  $O_3$  浓度的温度、湿度、风向、风力等气象因素进行探讨,为绍兴市的  $O_3$  污染科学防控治理提供参考。

## 1 研究方法

采用 SPSS 等软件对 2016—2018 年绍兴市 3 个国控监测站点监测数据中  $O_3$  时均浓度和日最大 8 h 平均浓度数据进行统计分析。3 个国控监测站点分别为城东开发委站、树下王站、袍江站。其中,城东开发委站位于绍兴市越城区城东经济开发区,树下王站位于绍兴市生态环境局附近,袍江站位于绍兴市袍江经济开发区,3 个站点分别位于绍兴市区东部、西南部、北部,具体位置如表 1 所示。气象数据源自绍兴市生态环境局和中国气象网。

## 2 结果与讨论

### 2.1 绍兴市 $O_3$ 污染概况

表 1 绍兴市 3 个国控监测站点分布

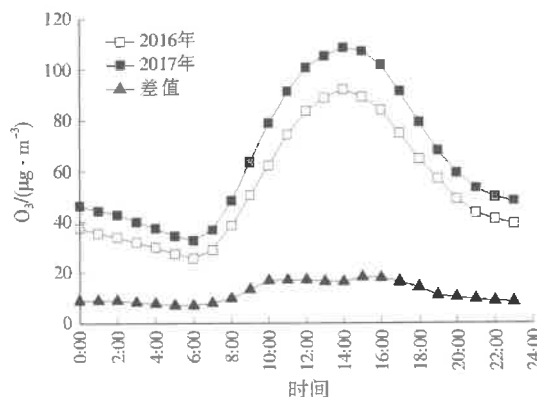
Table 1 The distribution of three national monitoring stations in Shaoxing

| 监测站点   | 方位     | 经度             | 纬度            |
|--------|--------|----------------|---------------|
| 袍江站    | 绍兴市北部  | 120°37'58.75"E | 30°5'9.46"N   |
| 树下王站   | 绍兴市西南部 | 120°32'52.45"E | 29°59'47.23"N |
| 城东开发委站 | 绍兴市东部  | 120°36'20.57"E | 29°59'30.76"N |

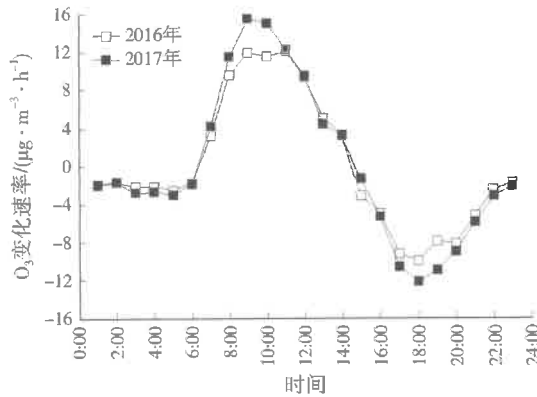
表 2 绍兴市 2016—2018 年  $O_3$  污染形势

Table 2 The  $O_3$  pollution situation in Shaoxing during 2016-2018

| 年份   | $O_3$ 高值首次出现日期 | $O_3$ 高值持续时长/h | $O_3$ 污染事件次数 | $O_3$ 污染事件持续天数/d | $O_3$ 最高时均质量浓度/ $(\mu g \cdot m^{-3})$ |
|------|----------------|----------------|--------------|------------------|----------------------------------------|
| 2016 | 6 月 6 日        | 45             |              |                  | 267                                    |
| 2017 | 4 月 6 日        | 156            | 3            | 5~6              | 355                                    |
| 2018 | 4 月 18 日       | 122            | 2            | 3~4              | 320                                    |



(a)  $O_3$  质量浓度



(b)  $O_3$  变化速率

图 1 绍兴市 2016 年与 2017 年  $O_3$  日变化

Fig.1 Diurnal variation of  $O_3$  in Shaoxing from 2016 to 2017

2016—2018 年绍兴市  $O_3$  污染形势如表 2 所示。从观测数据中可以看出,绍兴市  $O_3$  浓度高值(时均  $O_3$  质量浓度高于  $200 \mu g/m^3$ )首次出现日期提早,2017 年与 2018 年较 2016 年约提前两个月。 $O_3$  高值持续时长、污染事件(连续 3 d 出现  $O_3$  浓度高值)发生次数、 $O_3$  最高时均浓度等指标均在 2017 年达到最高,2018 年有所改善,但与 2016 年相比仍较为严重。

### 2.2 $O_3$ 浓度日变化规律

考虑到 2016 年与 2017 年的  $O_3$  污染状况差异较大,对这两年  $O_3$  浓度日变化规律进行了分析,结果见图 1。绍兴市 2016、2017 年  $O_3$  浓度变化趋势整体一致,浓度曲线呈单峰型特征。 $O_3$  浓度较高值集中于 12:00—16:00,峰值出现于 14:00 左右,谷值出现于 6:00 左右。日出后,太阳辐射强度增强,温度逐渐升高,汽车夜间货运和早高峰通行排放并积累的  $NO_2$  开始光解,光化学反应增强,导致  $O_3$  浓度逐渐累积升高,而午后至夜间在滴定效应<sup>[9-10]</sup>下  $O_3$  被消耗, $O_3$  浓度逐渐降低,在 6:00 左右达到最低值。此变化规律与陆晓波等<sup>[11]13-14</sup>的研究结果一致。

2017 年绍兴市全天  $\text{O}_3$  浓度均高于 2016 年,且在 10:00—17:00 两者差值最大,约为  $17\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。2016、2017 年  $\text{O}_3$  浓度变化速率趋势大致相同, $\text{O}_3$  浓度在 8:00—12:00 上升最快,在 17:00—20:00 下降最快。但 2017 年  $\text{O}_3$  变化速率最高值高于 2016 年,说明与 2016 年相比,2017 年绍兴市  $\text{O}_3$  具有积累快的特点, $\text{O}_3$  污染问题更为严重。

2.3  $\text{O}_3$  浓度季节变化规律

图 2 显示了 2016—2018 年  $\text{O}_3$  浓度日变化的季节差异。绍兴市不同季节  $\text{O}_3$  浓度日变化趋势一致,

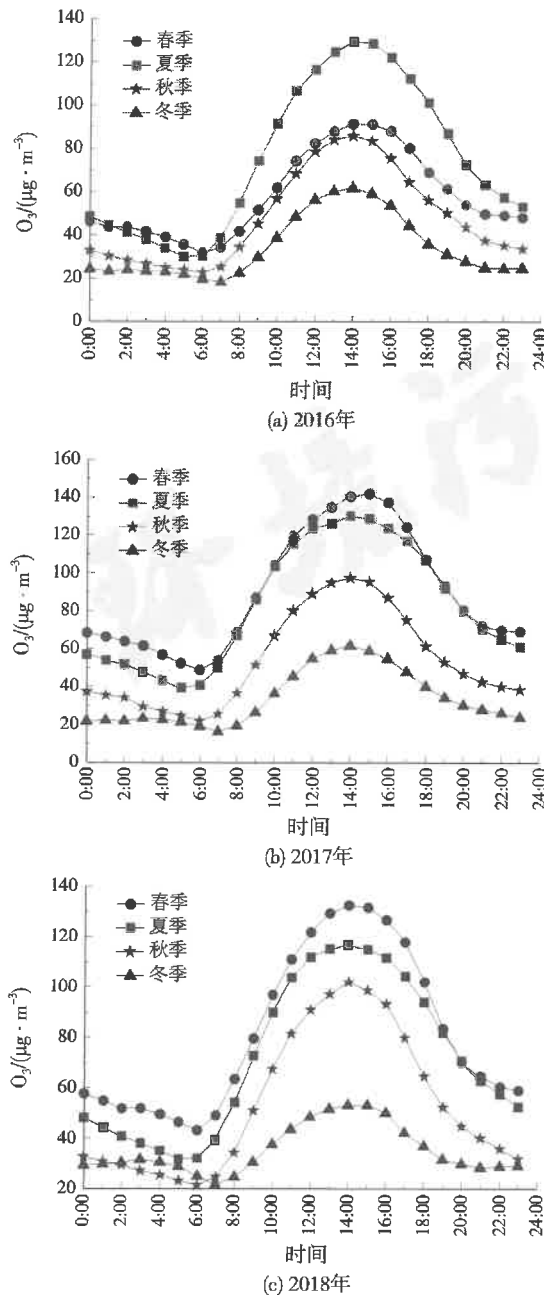


图 2 绍兴市 2016—2018 年四季  $\text{O}_3$  浓度日变化曲线  
 Fig.2 Diurnal variation of  $\text{O}_3$  concentration in Shaoxing in the four seasons during 2016-2018

均于 14:00 左右到达峰值,但不同年份峰值最高的季节略有不同。2016 年  $\text{O}_3$  浓度的季节变化规律为夏季>春季>秋季>冬季;而 2017、2018 年的  $\text{O}_3$  浓度季节变化规律为春季>夏季>秋季>冬季。这与表 1 中  $\text{O}_3$  高值首次出现日期相符。

2.4  $\text{O}_3$  空间变化规律

由图 3 可知,2016—2018 年绍兴市 3 个方位  $\text{O}_3$  浓度日变化趋势一致,但不同年份、不同方位浓度存在明显差异,可能与局部地区污染物排放有关。2016 年绍兴东部和北部  $\text{O}_3$  浓度全天变化趋势较为

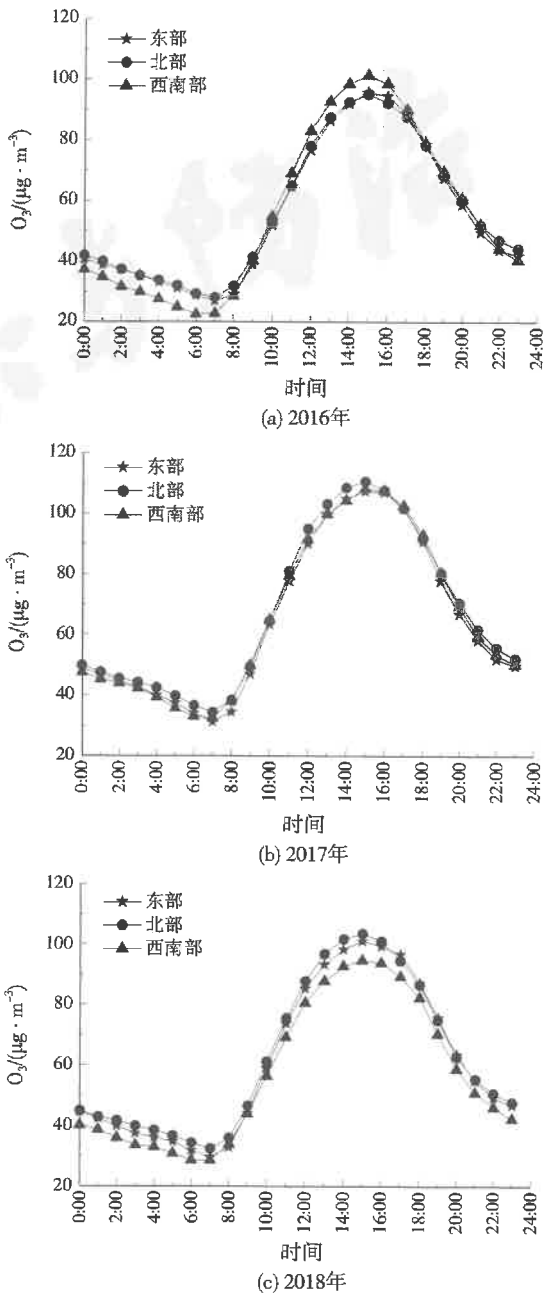


图 3 绍兴市 2016—2018 年 3 个方位  $\text{O}_3$  浓度日变化曲线  
 Fig.3 Diurnal variation of  $\text{O}_3$  concentration in three directions of Shaoxing during 2016-2018

一致,西南部  $\text{O}_3$  浓度峰值明显偏高,而谷值明显偏低,  $\text{O}_3$  上升时间也提前 1 h,这可能是由于夜间绍兴市西南部存在较强的  $\text{NO}_x$  排放源,消耗  $\text{O}_3$  发生滴定效应,致使该方位夜间  $\text{O}_3$  浓度偏低。2017 年 3 个方位  $\text{O}_3$  浓度日变化趋势无明显差异,浓度较 2016 年均有所上升,上升幅度以绍兴市北部最为明显。2018 年绍兴市东部和北部  $\text{O}_3$  浓度全天变化趋势较为一致,西南部  $\text{O}_3$  浓度全天均偏低。其中,绍兴市西南部与其他两处的夜间  $\text{O}_3$  浓度差值显著减小,说明夜间滴定效应减弱,与严茹莎等<sup>[12]</sup>描述的  $\text{NO}_x$  排放量减少导致  $\text{O}_3$  减排相符。此外,西南部  $\text{O}_3$  浓度变化与污染物传输也可能有一定关系。位于该区域北风向的东浦企业集聚区于 2016 年进行工地施工,运输车及工程机械等排放  $\text{NO}_x$  较多,造成绍兴市西南部 2016 年  $\text{O}_3$  浓度昼夜差异较大;而 2018 年该企业集聚区已完成施工,对  $\text{O}_3$  浓度的影响也随之减小。

## 2.5 $\text{O}_3$ 浓度的气象因素影响分析

与 2016 年相比,绍兴市 2017 年  $\text{O}_3$  污染最为严重,2018 年略有好转。2018 年  $\text{O}_3$  浓度降低可能与污染控制政策的实施(如涉污产业的关停、转移等)有关,气象因素对  $\text{O}_3$  浓度的变化影响并非主要因素。因此,只选取 2016 年与 2017 年的  $\text{O}_3$  数据进行分析。

### 2.5.1 温度

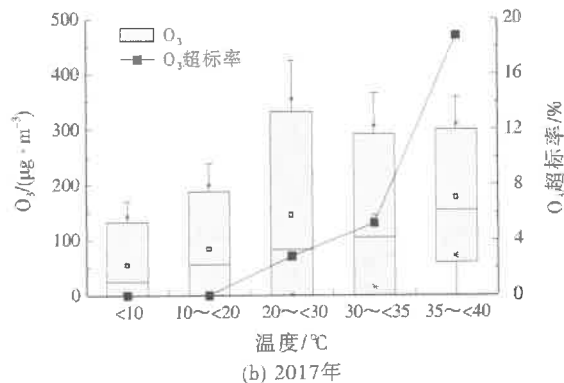
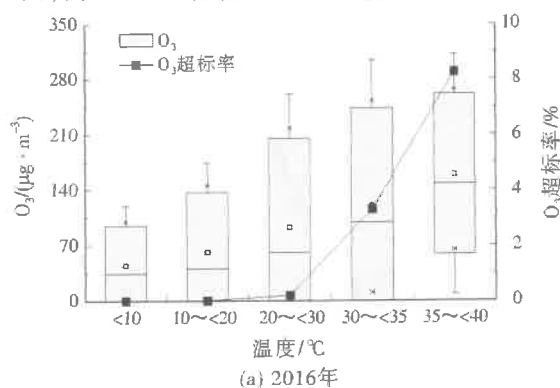
由图 4 可见,随着温度升高,  $\text{O}_3$  浓度呈上升趋势,这与赵辉等<sup>[13]</sup>的研究结果一致。当温度  $\geq 20$   $^{\circ}\text{C}$  时,  $\text{O}_3$  浓度开始出现超标。随着温度升高,  $\text{O}_3$  浓度超标率也快速升高。20  $^{\circ}\text{C} \leq \text{温度} < 30$   $^{\circ}\text{C}$  时,2016 年与 2017 年的  $\text{O}_3$  超标率分别为 0.2% 和 3.0%;而 35  $^{\circ}\text{C} \leq \text{温度} < 40$   $^{\circ}\text{C}$  时,2016 年与 2017 年

的  $\text{O}_3$  超标率分别为 8.3% 和 18.8%。相同温度范围内,2017 年  $\text{O}_3$  浓度与超标率均高于 2016 年,可能由于 2017 年  $\text{O}_3$  前体污染物排放较多,因而导致  $\text{O}_3$  污染问题更为严重。2016 年 20  $^{\circ}\text{C} \leq \text{温度} < 30$   $^{\circ}\text{C}$  时的  $\text{O}_3$  浓度显著低于 2017 年,这与 2016 年春季  $\text{O}_3$  浓度偏低,  $\text{O}_3$  浓度高值出现于夏季有关。当温度  $\geq 30$   $^{\circ}\text{C}$  时,  $\text{O}_3$  超标率大幅增加,因此,根据气象预报,当气温较高时应提前加强污染防控,以削减  $\text{O}_3$  浓度峰值。

从中国气象网查询到 2016—2018 年 4—6 月温度及天气变化情况,2016 年 4—5 月绍兴市温度较低,均不超过 30  $^{\circ}\text{C}$ ,且这两个月中晴朗天气仅为 11 d,气象上不利于  $\text{O}_3$  的光化学反应生成<sup>[14]</sup>;而 2016 年 6 月绍兴市温度持续升高,共有 13 d 最高温度超过 30  $^{\circ}\text{C}$ 。而 2017、2018 年 4—5 月平均温度均高于 2016 年,2017 年 4 月 6 日、2018 年 4 月 18 日前后均为高温,天气为晴或多云,在一定程度上导致了  $\text{O}_3$  高值首次出现日期较 2016 年提前。此外,春夏季  $\text{O}_3$  浓度高,秋冬季  $\text{O}_3$  浓度低,主要是春夏季光照强,温度高,光化学反应较强所致<sup>[11]13-14</sup>。但 2017、2018 年春季  $\text{O}_3$  浓度高于夏季的现象,可能也与人为排放源强度等方面的变化有关。

### 2.5.2 湿度

随着相对湿度(RH)增加,  $\text{O}_3$  整体呈先上升后下降趋势(见图 5)。当 40%  $\leq \text{RH} < 70\%$  时,2016 年和 2017 年  $\text{O}_3$  浓度易出现较高值,说明适当增加湿度会促使  $\text{O}_3$  浓度升高,但湿度过高不利于  $\text{O}_3$  积累。在低湿度情况下( $\text{RH} < 40\%$ ),2017 年的  $\text{O}_3$  超标率显著高于 2016 年,这一定程度上可归结于 2017 年春季  $\text{O}_3$  浓度偏高,造成低湿度的春季  $\text{O}_3$  超标率偏高。随着湿度增大,  $\text{O}_3$  超标率大体呈下降趋



注:考虑到  $\text{O}_3$  质量浓度为负值没有实际意义,  $\text{O}_3$  箱式图只展示正值部分;  $\text{O}_3$  小时浓度超过《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)1 h 浓度二级限值(200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )为超标,图 5 同。

图 4 2016 年与 2017 年不同温度范围内  $\text{O}_3$  小时质量浓度与超标率

Fig.4  $\text{O}_3$  hour concentration and over-standard rate in different temperature ranges from 2016 to 2017

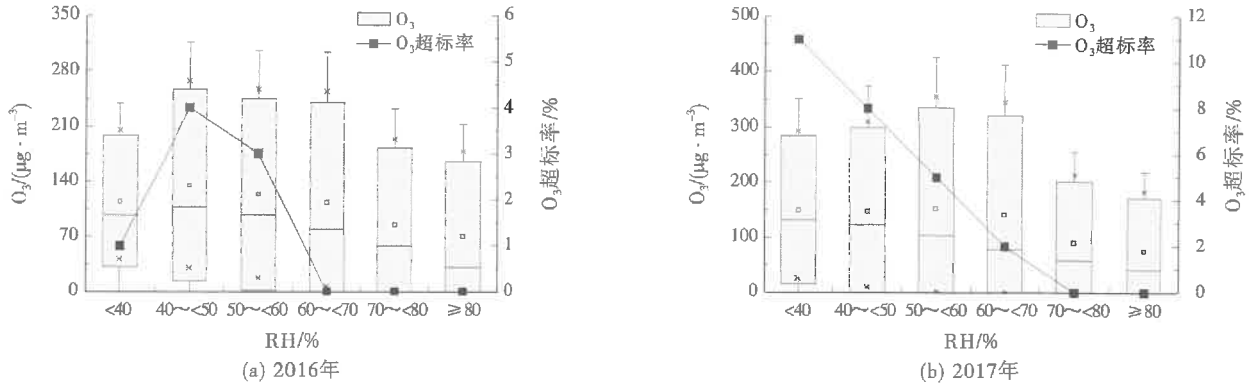


图 5 2016 年与 2017 年不同湿度范围内  $\text{O}_3$  小时质量浓度与超标率  
Fig.5  $\text{O}_3$  hour concentration and over-standard rate in different humidity ranges from 2016 to 2017

势。湿度对  $\text{O}_3$  浓度的影响原因归结为：在水汽参与下，紫外辐射因消光机制产生衰减，影响光化学反应的进行；高 RH 有利于对  $\text{O}_3$  进行湿清除；水汽中自由基直接参与反应，将  $\text{O}_3$  分解<sup>[15-18]</sup>。总体而言， $\text{O}_3$  超标事件主要发生在湿度较低的天气，因此在晴天或多云天气下应重点加强  $\text{O}_3$  污染防控。

2.5.3 风向与风力

风对  $\text{O}_3$  具有一定的输送作用，可根据风向与风

力判断  $\text{O}_3$  传输作用的强弱<sup>[19]</sup>。参考  $\text{O}_3$  峰值时段（见图 1），选取 12:00—18:00 的风向频率进行分析，结果如表 3 所示。此时段内东北风、东风和北风占主导作用。对不同  $\text{O}_3$  浓度下的风向频率情况进行了分析，结果见表 4。东北风最高频率为 63.41%，出现在  $\text{O}_3$  质量浓度为  $>200 \sim 220 \mu\text{g}/\text{m}^3$  时，且当  $\text{O}_3$  浓度超标时，东北风一直占据最高频率。由表 5 与表 6 可知，当风力  $\geq 3$  级时，相同  $\text{O}_3$  浓度区

表 3 12:00—18:00 风向频率  
Table 3 Percentages of wind direction of 12:00-18:00 %

| 时间    | 北风    | 东北风   | 东风    | 东南风   | 南风   | 西北风   | 西风   | 西南风  |
|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|------|------|
| 12:00 | 14.06 | 24.22 | 16.02 | 9.77  | 5.86 | 14.45 | 6.64 | 8.98 |
| 13:00 | 11.76 | 27.21 | 17.65 | 6.99  | 5.88 | 12.87 | 8.46 | 9.19 |
| 14:00 | 14.39 | 33.95 | 13.28 | 9.23  | 7.75 | 9.59  | 4.80 | 7.01 |
| 15:00 | 12.36 | 36.36 | 11.64 | 12.73 | 8.73 | 5.82  | 5.82 | 6.55 |
| 16:00 | 13.49 | 34.54 | 17.43 | 11.84 | 7.89 | 4.28  | 3.62 | 6.91 |
| 17:00 | 11.93 | 31.19 | 18.96 | 11.93 | 9.79 | 5.20  | 2.14 | 8.87 |
| 18:00 | 10.78 | 29.64 | 25.45 | 10.48 | 8.68 | 3.29  | 1.80 | 9.88 |

表 4 不同  $\text{O}_3$  浓度下的风向频率分布  
Table 4 Percentage of wind direction at different  $\text{O}_3$  concentrations %

| $\text{O}_3/(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$ | 北风    | 东北风   | 东风    | 东南风  | 南风   | 西北风  | 西风   | 西南风   |
|------------------------------------------------|-------|-------|-------|------|------|------|------|-------|
| $>100 \sim 160$                                | 12.95 | 28.96 | 14.84 | 8.19 | 7.57 | 7.27 | 7.27 | 12.95 |
| $>160 \sim 180$                                | 16.39 | 33.77 | 15.08 | 8.52 | 4.92 | 7.54 | 5.25 | 8.52  |
| $>180 \sim 200$                                | 16.67 | 41.67 | 16.11 | 2.22 | 5.00 | 9.44 | 5.56 | 3.33  |
| $>200 \sim 220$                                | 10.98 | 63.41 | 10.98 | 3.66 | 1.22 | 4.88 | 2.44 | 2.44  |
| $>220 \sim 240$                                | 14.81 | 57.41 | 7.41  | 5.56 | 0    | 9.26 | 1.85 | 3.70  |
| $>240 \sim 260$                                | 12.90 | 58.06 | 22.58 | 3.23 | 3.23 | 0    | 0    | 0     |
| $>260$                                         | 9.52  | 57.14 | 28.57 | 4.76 | 0    | 0    | 0    | 0     |

表 5 2016 年的风力频率矩阵  
Table 5 Matrix of frequency of wind force in 2016 %

| $\text{O}_3/(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$ | 风力 1 级 | 风力 2 级 | 风力 3 级 | 风力 4 级 | 风力 5 级 | 风力 6 级 | 风力 7 级 |
|------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $>100 \sim 160$                                | 22.56  | 44.25  | 9.33   | 0.87   | 0.11   | 0      | 0      |
| $>160 \sim 180$                                | 2.17   | 7.59   | 1.63   | 0.11   | 0      | 0      | 0      |
| $>180 \sim 200$                                | 0.98   | 5.42   | 0.87   | 0.33   | 0      | 0      | 0      |
| $>200 \sim 220$                                | 0.54   | 0.98   | 0.11   | 0      | 0      | 0      | 0      |
| $>220 \sim 240$                                | 0.33   | 0.98   | 0.22   | 0      | 0      | 0      | 0      |
| $>240 \sim 260$                                | 0.11   | 0.43   | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      |
| $>260$                                         | 0      | 0.11   | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      |

表 6 2017 年的风力频率矩阵  
Table 6 Matrix of frequency of wind force in 2017

%

| $O_3/(\mu g \cdot m^{-3})$ | 风力 1 级 | 风力 2 级 | 风力 3 级 | 风力 4 级 | 风力 5 级 | 风力 6 级 | 风力 7 级 |
|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| >100~160                   | 9.50   | 28.43  | 21.73  | 9.89   | 3.19   | 0.26   | 0      |
| >160~180                   | 0.98   | 3.12   | 4.68   | 2.15   | 0.46   | 0      | 0      |
| >180~200                   | 0.65   | 2.67   | 1.89   | 1.30   | 0.13   | 0      | 0      |
| >200~220                   | 0.26   | 1.30   | 1.24   | 1.11   | 0.07   | 0      | 0      |
| >220~240                   | 0.07   | 0.91   | 0.59   | 0.65   | 0      | 0      | 0      |
| >240~260                   | 0.07   | 0.65   | 0.20   | 0.65   | 0      | 0      | 0      |
| >260                       | 0      | 0.59   | 0.26   | 0.39   | 0      | 0      | 0      |

间下 2017 年的风力频率显著大于 2016 年。由此判断, 2017 年  $O_3$  浓度受污染物输送的影响高于 2016 年。

### 3 结 论

(1) 绍兴市 2016、2017 年  $O_3$  日浓度呈单峰型变化趋势, 峰值出现于 14:00 左右, 谷值出现于 6:00 左右。2017 年  $O_3$  最高时均质量浓度为  $355 \mu g/m^3$ , 显著高于 2016 年 ( $267 \mu g/m^3$ )。

(2) 绍兴市 2016 年  $O_3$  浓度季节规律为夏季>春季>秋季>冬季; 2017、2018 年  $O_3$  浓度季节规律为春季>夏季>秋季>冬季。2017、2018 年  $O_3$  浓度高值首次出现日期较 2016 年显著提前, 与 2017 年与 2018 年春季高温存在联系。

(3) 绍兴市西南部  $O_3$  浓度峰值 2016 年偏高。但 2018 年偏低, 可能是  $NO_x$  排放企业产业调整, 尤其是 2016—2018 年期间北风向上的东浦集聚区施工产生的污染物传输作用变化所致。

(4) 温度、湿度、风向与风力等气象条件均会对绍兴地区  $O_3$  浓度产生影响。温度  $\geq 30^\circ C$ ,  $40\% \leq RH < 70\%$ , 风向为东北风时, 绍兴市易出现  $O_3$  浓度高值。2017 年相比 2016 年,  $O_3$  浓度受污染物传输影响更明显。

### 参考文献:

- [1] SWACKHAMER D L. Rethinking the ozone problem in urban and regional air pollution[J]. Journal of Aerosol Science, 1993, 24(7): 977-978.
- [2] 徐晓斌. 我国霾和光化学污染观测研究进展[J]. 应用气象学报, 2016, 27(5): 604-619.
- [3] 陈仁杰, 陈秉衡, 阚海东. 上海市近地面臭氧污染的健康影响评价[J]. 中国环境科学, 2010, 30(5): 603-608.
- [4] 张璐, 贾丽丽, 隋佳欣, 等. 臭氧污染对园艺作物影响的研究述评[J]. 北方园艺, 2015(16): 188-195.
- [5] WANG T, XUE L, BRIMBLECOMBE P, et al. Ozone pollution in China: a review of concentrations, meteorological influences, chemical precursors, and effects[J]. Science of the Total Environment, 2017, 575: 1582-1596.
- [6] 李波兰, 罗彬, 张巍, 等. 四川省臭氧时空分布特征及污染特征分析[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(增刊 1): 293-298.
- [7] 王俏丽, 董敏丽, 李素静, 等. 舟山市臭氧污染分布特征及来源解析[J]. 环境科学, 2019, 40(3): 1143-1151.

- [8] TAO X, GUAN T J, LIU Y L, et al. A national case-crossover study on ambient ozone pollution and first-ever stroke among Chinese adults: interpreting a weak association via differential susceptibility[J]. Science of the Total Environment, 2019, 654: 135-143.
- [9] CHOU C C, LIU S C, LIN C Y, et al. The trend of surface ozone in Taipei, Taiwan, and its causes: implications for ozone control strategies [J]. Atmospheric Environment, 2006, 40(21): 3898-3908.
- [10] 黄鹤, 张文煜, 韩素芹, 等. 东部沿海城市与西部半干旱地区近地层臭氧浓度观测研究[J]. 环境污染与防治, 2012, 34(10): 45-50.
- [11] 陆晓波, 丁峰, 朱志峰, 等. 南京市臭氧污染现状及变化特征的研究[J]. 环境监测管理, 2019, 31(2).
- [12] 严茹莎, 李莉, 安静宇, 等. 上海市夏季臭氧生成与其前体物控制模拟研究[J]. 环境污染与防治, 2016, 38(1): 30-35, 40.
- [13] 赵辉, 郑有飞, 徐静馨, 等. 南京市北郊夏季臭氧浓度变化特征分析[J]. 地球与环境, 2016, 44(2): 161-168.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 刘晶森, 丁裕国, 黄永德, 等. 太阳紫外辐射强度与气象要素的相关分析[J]. 高原气象, 2003, 22(1): 45-50.
- [17] 王磊, 刘端阳, 韩桂荣, 等. 南京地区近地面臭氧浓度与气象条件关系研究[J]. 环境科学学报, 2018, 38(4): 1285-1296.
- [18] 姚青, 孙玫玲, 刘爱霞. 天津臭氧浓度与气象因素的相关性及其预测方法[J]. 生态环境学报, 2009, 18(6): 2206-2210.
- [19] 沈劲, 陈皓, 钟流举. 珠三角秋季臭氧污染来源解析[J]. 环境污染与防治, 2015, 37(1): 25-30.

编辑: 徐婷婷 (收稿日期: 2019-06-27)

(上接第 607 页)

- [17] 王立明, 李文君. 永定河山区河流生态水量现状及亏缺原因分析[J]. 海河水利, 2017(2): 25-28.
- [18] 于森, 魏源送, 刘俊国, 等. 永定河(北京段)水资源、水环境的变迁及流域社会经济发展对其影响[J]. 环境科学学报, 2011, 31(9): 1817-1825.
- [19] 周亮, 徐建刚, 孙东琪, 等. 淮河流域农业非点源污染空间特征解析及分类控制[J]. 环境科学, 2013, 34(2): 547-554.
- [20] 胡钰, 金书秦, 吴娜伟, 等. 畜禽养殖业布局调整政策环境风险评估——以黑龙江省为例[J]. 环境保护, 2019, 47(6): 61-64.
- [21] 安思羽, 李艳霞, 张雪莲, 等. 我国果菜茶中畜禽粪便有机肥替代化肥潜力[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(8): 1712-1722.
- [22] 安莹. 京津冀协同发展背景下的张家口市产业结构调整研究[J]. 经济研究导刊, 2017(7): 33-35.
- [23] 乔艳丽, 章杏杏, 吉晓光. 现代农业产业体系中冀西北农业结构调整的思考[J]. 干旱区地理, 2011, 34(1): 165-172.

编辑: 胡翠娟 (收稿日期: 2019-10-18)