

文章编号: 2096-1618(2019)06-0664-07

# 杭州市臭氧污染特征及其气象成因分析

潘文琪, 肖国杰, 孟林夕, 聂椿力, 谢滨, 刘蕾蕾  
(成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都 610225)

**摘要:**为了定量分析杭州市臭氧污染特征及其气象成因,利用杭州市2011–2016年气象资料和2015–2016年地面臭氧污染监测数据,对气象要素和臭氧浓度进行分析。得到如下结论:臭氧污染浓度随季节呈周期性变化,臭氧污染指数日平均值在春季达到最大值。臭氧浓度最小值出现在5:00–8:00,最大值出现在16:00左右。影响臭氧浓度的主要气象因子有相对湿度、气温、日照时数、气压等。通过逐步回归选入日照时数、平均气温和相对湿度建立了臭氧浓度预报方程。

**关键词:**应用气象学;污染气象;杭州;臭氧污染;臭氧变化特征;气象成因

**中图分类号:**X511

**文献标志码:**A

**doi:**10.16836/j.cnki.jcuit.2019.06.016

## 0 引言

臭氧(O<sub>3</sub>)是一种有特殊气味的淡蓝色气体,主要分布在10~50 km的平流层大气中,平流层大气中的臭氧具有阻碍紫外线的作用,使人类与环境免遭伤害。而近期,分布在对流层中的臭氧浓度逐渐上升,这将会对人类、动植物以及周围环境造成巨大影响<sup>[1]</sup>。近地面的臭氧污染主要是由人类活动排放的NO<sub>x</sub>和VOCs经过复杂的大气化学过程造成的二次污染所导致<sup>[2]</sup>。当近地面的臭氧浓度增加时,高压后部以及暖锋前部将产生强暖性的天气系统,不利于臭氧的对外扩散,易造成近地面臭氧浓度持续增加,导致恶性循环。在台风入境时,也易使臭氧堆积在近地层,难以向四周扩散,导致当地臭氧浓度升高<sup>[3]</sup>。近地面的臭氧污染不仅会对气象因素和天气系统造成影响,而且高浓度的臭氧环境对地面生物,尤其是人类的健康损伤巨大。人体长时间暴露在臭氧中,将会使气喘发病率增加、呼吸阻力增加,影响人体肺功能,严重时会使人头昏、脉搏加快,甚至引发癌症<sup>[4]</sup>。

随着中国现代化的快速发展,长江三角洲成为中国制造业集中地区,经济发达,城市化进程与车辆的保有量均位于全国前列,但伴随而来的是日益严峻的汽车尾气浓度升高和光化学污染现象。早在20世纪末,京津地区、珠江三角洲、杭州地区就曾经出现过严重的区域性光化学烟雾污染,造成大气臭氧浓度有逐年升高的趋势,臭氧污染已成为中国大部分城市和区域的特征大气污染<sup>[5]</sup>。杭州市是浙江省会城市,地处中国

东南沿海、浙江省西北部,是长江三角洲的中心城市之一,若能降低杭州的臭氧浓度,将减少大量经济健康损失。在杭州地区,由于其地形因素,近地层的臭氧来源主要是水平传输和垂直扩散,而水平传输是臭氧浓度增加的最主要因素<sup>[6]</sup>。文中主要将杭州地区的气象数据与污染数据结合分析,得出气象因子与污染之间的关系。采用统计模型来进行预报,与数值模型相比,统计模型只需要气象数据与污染数据便可快速建立回归方程,避免了数值模型中对大气运动复杂的分析,利于预报方程的建立<sup>[7]</sup>。而建立预报方程后,即可通过气象数据预报出当地的臭氧浓度,便于及时提醒民众采取防护措施,并且也能更有效地制定出相应降低臭氧浓度的措施,减少当地的经济健康损失。

## 1 数据与研究方法

### 1.1 数据和资料介绍

使用了国家人口与健康科学数据共享服务平台“气象环境与健康出行服务专题”提供的杭州地区2011–2016年逐日气象资料(取自中国气象科学数据共享服务网)和2015–2016年逐时空气污染资料(取自中国环境监测网),资料包括:平均本站气压、日最高本站气压、日最低本站气压、平均气温、日最高气温、日最低气温、平均相对湿度、最小相对湿度、20–20时降水量、平均风速、最大风速(10分钟平均风速)、最大风速的风向、极大风速、极大风速的风向、日照时数和2015–2016年逐时的臭氧浓度数据。

其中2015年11月的3种气压要素缺测,12月所

收稿日期:2019-03-14

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金资助项目(41305076);四川省教育厅科研基金资助项目(2017Z048)

有气象要素均缺测,此外  $O_3$  污染数据也存在一定的缺测情况。因此在研究  $O_3$  污染与各个气象要素的相关性时,采用剔除  $O_3$  污染数据及气象要素同时缺测天数的方法,最终从 2015–2016 年 731 组  $O_3$  污染数据中得到可用数据 390 组,由此根据各个要素对  $O_3$  浓度的影响进行进一步的分析。

## 1.2 研究方法

主要采用了相关分析方法分析了  $O_3$  与各气象要素的相关性,利用逐步回归建立  $O_3$  浓度和气象要素的回归方程。通过对  $O_3$  污染数据与杭州各气象因子的相关系数的计算,将各相关系数与皮尔逊相关系数  $r$  进行对比,选取出多个有代表性的气象要素,对选取的要素与  $O_3$  浓度再次分析,得出各个要素对  $O_3$  浓度的影响。 $O_3$  浓度与各个气象要素之间的具体关系则由 SPSS 软件进行逐步回归分析,得出回归系数,建立最优回归方程。

## 1.3 杭州地理条件

杭州地理坐标为东经  $118^{\circ}21'$  ~  $120^{\circ}30'$ , 北纬  $29^{\circ}11'$  ~  $30^{\circ}33'$ , 地处长江三角洲南部边沿和钱塘江流域,地形复杂多样<sup>[8]</sup>。杭州西部主要是地势较高的丘陵区,丘陵山地面积占全市总面积的 65.6%。东部属于浙江平原,地势较为低平,因此整个地势高低悬殊,自西向东呈阶梯状分布。杭州处于亚热带季风区,属于亚热带季风气候,全年四季温度差异较为明显,雨量充足,由图 1 可见,杭州全年降水主要集中在 6–8 月,这 3 个月份 20–20 时的降水量均超过了 100 mm。经过统计,2016 年杭州全年的降水量达到了 1797.3 mm,平均气温为 18.2  $^{\circ}C$ 。

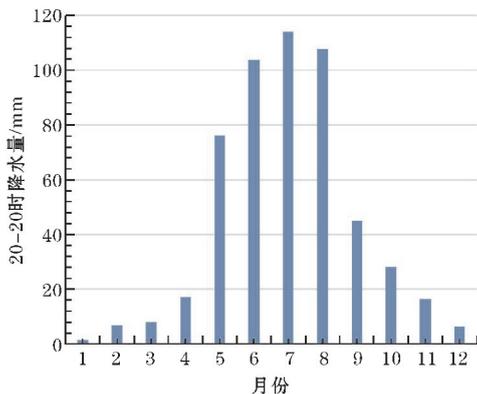


图 1 2011–2016 年月平均降水量年变化

## 2 杭州气象要素年变化特征

由图 2 可见,杭州全年平均气温在 4.8  $^{\circ}C$  ~

29.8  $^{\circ}C$  波动,并在 7 月达到最大值。由图 3 可见,杭州全年平均气压在 999.0 ~ 1022.5 hPa 波动,并在 7 月份达到最小值。且气温和气压的最大值及最小值均与其对应的平均值变化趋势一致。由图 4 可见,杭州全年平均相对湿度在 66% ~ 80% 波动,并且在 6 月达到最大值。由图 5 可见,杭州全年平均风速保持在 2.0 ~ 2.2 m/s,风向主要集中于东和东南向,然而最大风速变化较为明显,主要在 4.1 ~ 5.1 m/s 波动。平均风速和最大风速均在 8 月达到最大值,分别为 2.3 m/s 和 5.2 m/s,并且在 4–6 月和 9–11 月都呈下降趋势。由图 6 可见,杭州日照时数的峰值主要集中在春秋两个季节,在 3 月达到峰值 216.8 h。由于杭州地形复杂,扩散条件较为一般,因此易导致各类污染物的沉降。

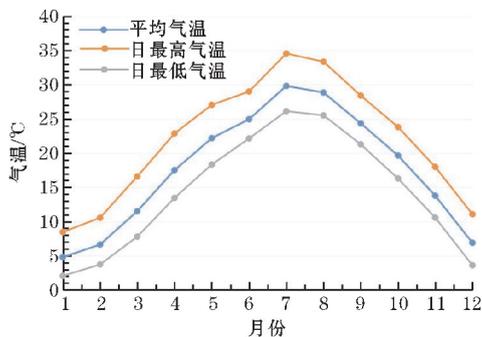


图 2 2011–2016 年月平均气温年变化

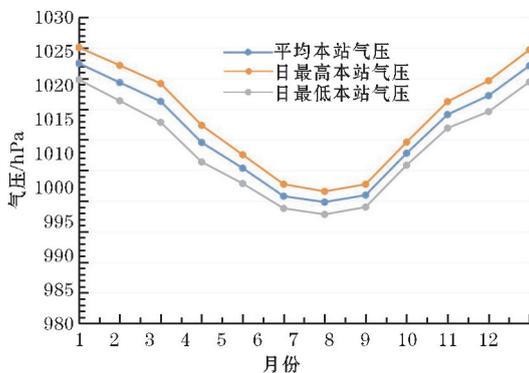


图 3 2011–2016 年月平均气压年变化

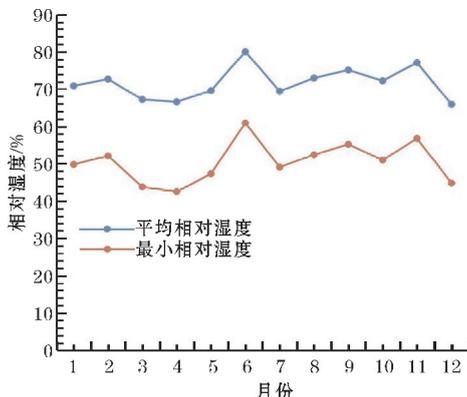


图 4 2015–2016 年月平均相对湿度年变化

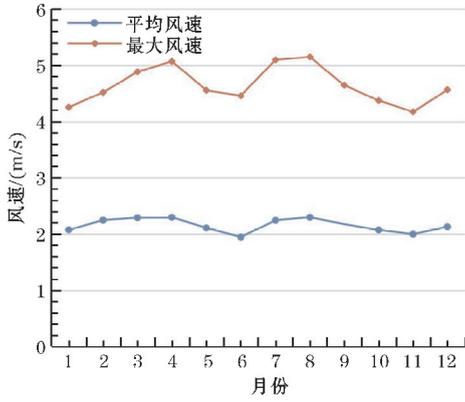


图5 2015-2016年月平均风速年变化

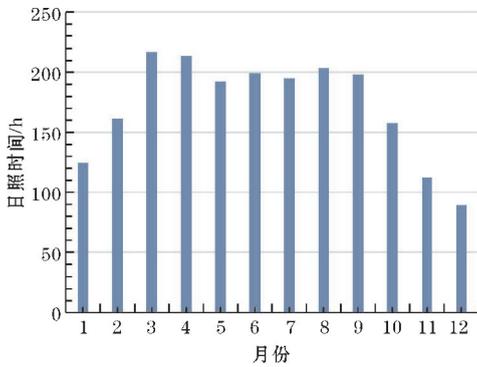
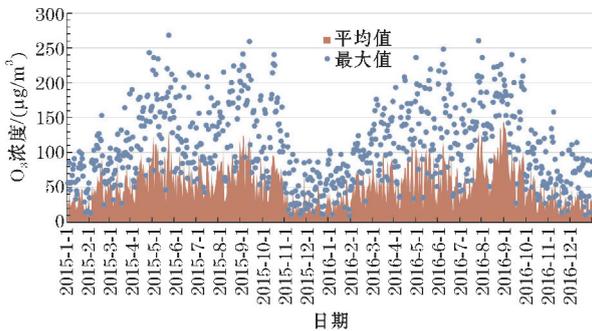


图6 2011-2016年月平均日照时数年变化

### 3 O<sub>3</sub> 污染特征变化

#### 3.1 O<sub>3</sub> 浓度的日变化特征

由图7可见,2015年1月-2016年12月杭州市O<sub>3</sub>日平均浓度变化范围为6.00~144.92 μg/m<sup>3</sup>。平均值为55.86 μg/m<sup>3</sup>,日均值分布主要集中在16.00~83.00 μg/m<sup>3</sup>,占比74.9%。其中O<sub>3</sub>日平均浓度>100.00 μg/m<sup>3</sup>共计54天,主要分布在4-9月。

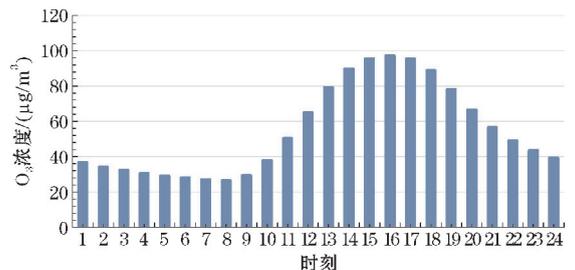
图7 O<sub>3</sub> 日均浓度和日最大浓度的时间序列

观测期间,O<sub>3</sub>小时最大浓度>250.00 μg/m<sup>3</sup>的情况仅出现3次,2015年2次,2016年1次,最大值出现在2015年5月22日16时,为268.00 μg/m<sup>3</sup>。

利用《环境空气质量标准》<sup>[9]</sup>小时均值二级标准浓度限值200.00 μg/m<sup>3</sup>进行评价,O<sub>3</sub>小时浓度共有159 h(52 d)超过国家二级标准,超标时段主要出现在11:00-18:00。

O<sub>3</sub>小时浓度>200.00 μg/m<sup>3</sup>且连续4 h以上的情况共出现24 d,其中5、8、9月出现次数较多,分别为4、5、5天,最长一次连续出现7 h,在2016年7月25日,时间段为11:00-17:00。

通过对2015-2016年两年的O<sub>3</sub>浓度进行平均处理,得到图8的日变化图。由图8可见,2015-2016年平均日变化范围在26.48~97.19 μg/m<sup>3</sup>,O<sub>3</sub>日变化呈现单峰型分布的特征,其变化规律与Eric M. Fujita等<sup>[10]</sup>研究的结果类似,大致可分为3个阶段:O<sub>3</sub>及前体物积累阶段,O<sub>3</sub>光化学生成阶段和O<sub>3</sub>消耗阶段。在00:00-08:00,O<sub>3</sub>浓度处于全天范围的低值区。引起这种变化的原因可能是夜间光化学反应较弱,导致近地层NO会不断消耗O<sub>3</sub><sup>[11]</sup>,从而使O<sub>3</sub>浓度不断降低,此外温度、湿度、辐射以及风速也会对O<sub>3</sub>浓度产生一定的影响,低温高湿的条件不利于O<sub>3</sub>的生产,大风条件易冲淡O<sub>3</sub>,使其浓度降低<sup>[12]</sup>。浓度最低值出现在05:00-08:00。此后,开始进行光化学生成阶段,随着O<sub>3</sub>前体物的大量释放,温度的升高和太阳辐射的增强,光化学反应得以增强,从而催生O<sub>3</sub>浓度的升高并逐渐积累,又由于午后的湍流天气所产生的动力交换,使得O<sub>3</sub>向下输送,在16:00左右达到一天中的最大值。O<sub>3</sub>达到最大值后由于太阳辐射的削弱和温度的下降以及15:00后相对稳定的天气现象,使O<sub>3</sub>浓度又一次下降。

图8 2015-2016年O<sub>3</sub>浓度日变化

#### 3.2 O<sub>3</sub> 浓度的各月变化特征

图9为统计分析两年O<sub>3</sub>浓度月均值变化柱状图,发现杭州O<sub>3</sub>浓度按年呈周期变化,存在一定的显著性,总体呈中间高两边低的特点,如每年的4-9月为O<sub>3</sub>浓度较大值区域,且峰值集中在4-5月及8-9月,到11月O<sub>3</sub>浓度明显下降,并在12月达到了最小值。

4、5月杭州进入梅雨季节,相对湿度较大,气温回升慢,日辐射量小,但月均 $O_3$ 浓度却很高,这通常可以用“对流层折叠”现象解释。研究表明对流层顶折叠常引发平流层对流层交换,这是春季对流层 $O_3$ 增加的重要来源。随着高空槽的发展与切断,其底部及切断低压的四周臭氧浓度有显著增加。对流层顶折叠使高空臭氧向下输送,这种向下的输送可到达对流层中部,对上对流层的臭氧影响最大<sup>[13]</sup>。而6月杭州市正处于梅雨季末,对比7-8月日照时数明显偏少,同时降水量也是一年中最高的月份之一,这样的气象条件会抑制 $O_3$ 的形成,因此6月 $O_3$ 浓度相对偏低的情况得以解释。7-9月气温高,日照时数长,相对湿度下降,这样的气象条件极易出现高浓度的 $O_3$ 。目前为止,依然没有确切的研究结果能够解释杭州市4-5月 $O_3$ 浓度较高的原因。

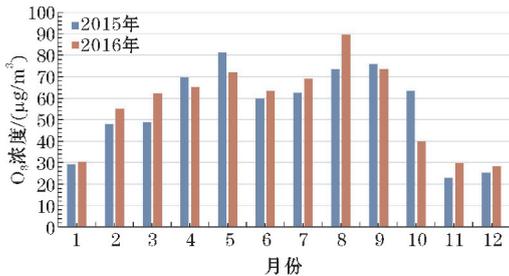
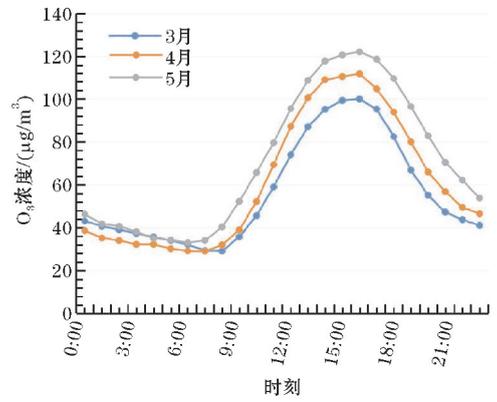
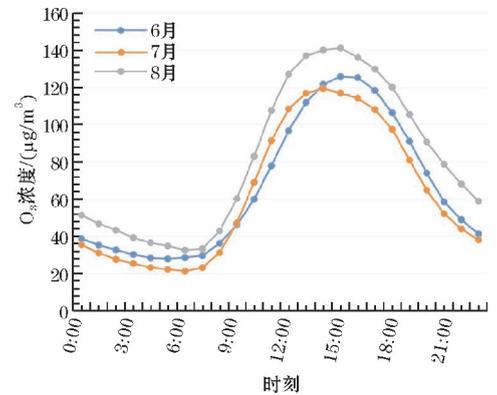


图9 2015-2016年 $O_3$ 月平均浓度年变化

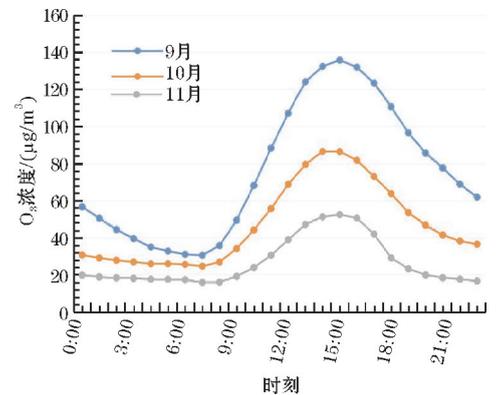
通过不同季节的 $O_3$ 浓度的日变化图(图10)可以看出,4个季节 $O_3$ 浓度日变化趋势基本相似,从22:00到第二天的8:00, $O_3$ 浓度基本呈稳定状态。此后开始逐步上升,直到16:00左右达到峰值,其变化符合光化学反应产生 $O_3$ 的特征。其中春夏两个季节在白天时段 $O_3$ 浓度明显高于秋冬时节。在夏季,局地光化学反应是产生高 $O_3$ 浓度的主要原因,同时由于温度较高,日照时间长且太阳光照强烈,大气活动较为活跃,有利于氮氧化物和挥发性有机物发生光化学反应,从而生成近地臭氧和过氧乙酰硝酸酯等强氧化剂<sup>[14]</sup>。因此 $O_3$ 平均浓度的单峰值也在夏季达到了全年的最高水平 $139.90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。秋冬季的 $O_3$ 平均浓度呈下降趋势,1月的日平均浓度最大值降到了 $49.85 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,约为8月的36%。这与中国许多城市的 $O_3$ 日均浓度变化具有一致性。当大气中的氧气受到短波紫外照射时,氧分子会被分解成原子状态。由于氧原子的不稳定性非常强,极易与其他物质发生化学反应,氧原子与氧分子反应时就形成臭氧<sup>[15]</sup>。而在午后14:00左右紫外辐射强度达到最大值,因此推测 $O_3$ 浓度峰值滞后于紫外辐射峰值1~2 h。



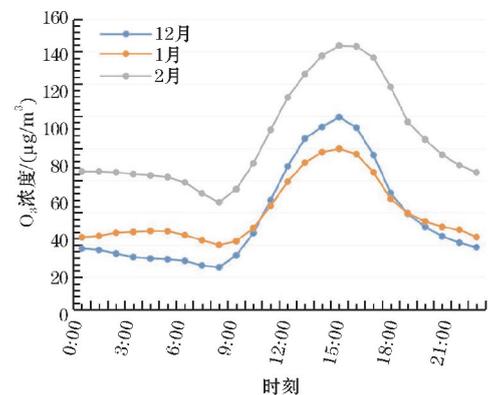
(a) 春季



(b) 夏季



(c) 秋季



(d) 冬季

图10 各季节 $O_3$ 浓度日变化

## 4 O<sub>3</sub>浓度与气象成因分析

### 4.1 O<sub>3</sub>浓度与气象要素的相关分析

影响 O<sub>3</sub>浓度的气象要素众多,现选取平均本站气压、日最高本站气压、日最低本站气压、平均气温、日最

表1 2015年1月-2016年12月 O<sub>3</sub>浓度和气象要素的相关系数

| 气象要素 | 平均相对湿度   | 最小相对湿度   | 20-20时降水量 | 平均风速    | 最大风速(10分钟平均风速) | 极大风速    | 日照时数    |
|------|----------|----------|-----------|---------|----------------|---------|---------|
| 相关系数 | -0.460** | -0.447** | -0.144**  | 0.051   | 0.117*         | 0.122*  | 0.536** |
| 样品个数 | 390      | 390      | 390       | 390     | 390            | 390     | 390     |
| 气象要素 | 平均本站气压   | 日最高本站气压  | 日最低本站气压   | 平均气温    | 日最高气温          | 日最低气温   |         |
| 相关系数 | -0.359** | -0.387** | -0.352**  | 0.461** | 0.510**        | 0.382** |         |
| 样品个数 | 390      | 390      | 390       | 390     | 390            | 390     |         |

注:\*\*表示通过 $\alpha=0.01$ 的显著性检验。

\*表示通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验。

### 4.2 气象要素对 O<sub>3</sub>污染浓度的影响

#### 4.2.1 温度和日照时数对 O<sub>3</sub>的影响

由图 11 可以看出,温度以及日照时数均与 O<sub>3</sub>浓度具有一定的正相关性,即 O<sub>3</sub>浓度的变化与温度以及日照时数的变化均呈现出较明显的一致性。2015年1月-2016年12月杭州市 O<sub>3</sub>月平均浓度在 29.78 ~ 89.58  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,此时的月平均气温在 4.9  $^{\circ}\text{C}$  ~ 30.5  $^{\circ}\text{C}$ ,日照时数在 33.7 ~ 256.9 h,而 O<sub>3</sub>浓度出现较大值的时间是在 7-9月,此时 O<sub>3</sub>的平均浓度在 69.08 ~ 89.58  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,而这正是一年之中温度最高的时间,月平均温度在 25.1  $^{\circ}\text{C}$  ~ 30.5  $^{\circ}\text{C}$ ,同时这也是日照时数最长的时间,在 105.9 ~ 256.9 h。并且在温度低、日照时数短的 11-1月, O<sub>3</sub>的浓度也相应较低,平均浓度在 28.36 ~ 30.40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

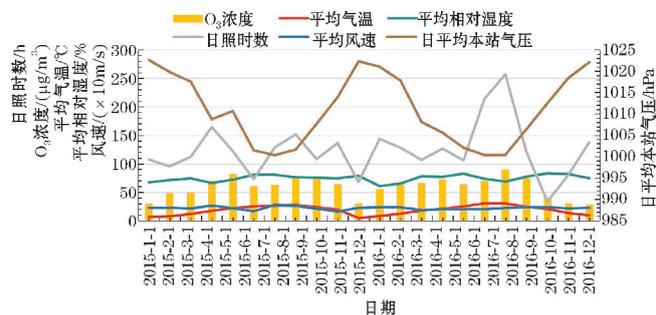


图 11 2015-2016 年平均 O<sub>3</sub>浓度与气象因子月变化

日照对 O<sub>3</sub>浓度的影响还体现在,当日平均温度低于 16.0  $^{\circ}\text{C}$ 时, O<sub>3</sub>平均浓度为 43.47  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , O<sub>3</sub>浓度与日平均温度的相关系数为 0.17,而当日平均温度高于 16.0  $^{\circ}\text{C}$ 时, O<sub>3</sub>平均浓度为 64.95  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,相关系数则升至

0.35。由此可见,在不同的温度条件下, O<sub>3</sub>浓度的差别也较为明显,从而验证了温度对 O<sub>3</sub>的生成有较大的影响。这主要是由于日照时数在一定程度上决定了太阳紫外辐射的强度,而太阳辐射强度对大气光化学反应具有重要影响,大气温度的变化能较好地反映出太阳辐射强度的变化,同时大气温度又往往受到日照时数的影响,因此也能够较好地解释温度以及日照时数对 O<sub>3</sub>浓度产生正相关性影响的原因<sup>[16]</sup>。此外,温度的变化往往能够影响光化学反应的快慢,而日照是光化学反应的条件之一,这也在一定程度上影响了 O<sub>3</sub>的浓度。

#### 4.2.2 相对湿度对 O<sub>3</sub>的影响

由图 11 可见,2015-2016 年杭州的平均相对湿度在 61% ~ 83%,并且可以看出 O<sub>3</sub>的浓度与平均相对湿度呈现出了较明显的负相关性。根据数据分析,可发现在相对湿度低于 70%时,相关系数绝对值为 0.22, O<sub>3</sub>平均浓度在 70.00  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上,而在相对湿度高于 70%时,相关系数绝对值为 0.37, O<sub>3</sub>平均浓度在 50.00  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下,在不同相对湿度条件下,不论是相关系数还是 O<sub>3</sub>的平均浓度都有较为显著的差异,进一步验证了 O<sub>3</sub>浓度与相对湿度的负相关性。且在图 11 中也可以明显地看出, O<sub>3</sub>浓度最高为 89.58  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,出现在 8 月前后,此时平均相对湿度处于低值区,这时的平均相对湿度只有 69%。并且整体来看,在平均相对湿度下降时 O<sub>3</sub>浓度上升,如图 11 中的 1-2 月和 6-8 月;而平均相对湿度上升时 O<sub>3</sub>的浓度在下降,如图 11 中的 8-12 月。这主要是由于水汽会影响太阳紫外辐射强度,高相对湿度条件下,空气中水汽所含的 OH、HO<sub>2</sub>等自由基迅速将 O<sub>3</sub>分解为 O<sub>2</sub>,降低了 O<sub>3</sub>浓度<sup>[5]</sup>。

虽然水汽没有直接吸收太阳的紫外辐射,但其消光机制可能会使紫外辐射衰减,从而影响了  $O_3$  浓度<sup>[17]</sup>。由此可见,高相对湿度是形成污染物湿清除条件的一个重要指标,不利于  $O_3$  浓度的积累。

#### 4.2.3 风速与风向对臭氧浓度的影响

风速对  $O_3$  浓度的影响主要体现在其搬运效应,其中存在两方面的叠加效应,一是水平扩散的稀释作用,二是对流引起的上层  $O_3$  向下输送混合<sup>[18]</sup>。风速的变化如图 11 所示,从中可以看出平均风速总体变化不明显。于是通过对无雨日风速与  $O_3$  浓度进行相关性分析得出,当平均风速  $\leq 1.7$  m/s 时,风速与  $O_3$  浓度之间存在显著的正相关性,即随着风速的增加,  $O_3$  浓度随之增加。当风速较小时,对近地面臭氧的扩散稀释作用减弱,混合作用强于扩散作用,造成  $O_3$  在近地面积累。平均风速  $> 1.7$  m/s 时,风速和浓度之间没有显著的相关性,随着风速的增加,对  $O_3$  扩散作用随之增强,最终扩散作用与混合作用相当。在平均风速  $> 2.0$  m/s 时,风速与  $O_3$  浓度呈负相关,表明扩散作用使  $O_3$  难以在近地面聚集,不易形成  $O_3$  污染。

在  $O_3$  浓度最大的 4-5 月及 7-9 月,最大风速和极大风速的主导风向为 E、SE,到  $O_3$  浓度明显下降的 11 月,则以 NNE 方向为主。风向与  $O_3$  浓度的关系与杭州市的地形分布是相吻合的。杭州市西部为地势较高的丘陵区,不利于污染物的扩散,东部属于浙北平原,地势低平,污染物难以聚集。

#### 4.2.4 日平均本站气压对 $O_3$ 的影响

由图 11 可以看出,日平均本站气压整年的波动较大,但它与  $O_3$  浓度仍然具有一定的负相关性:在日平均本站气压处于高值区时,  $O_3$  浓度处于低值区。在 1-5

月,日平均本站气压下降时,  $O_3$  浓度在上升,而 8-12 月日平均本站气压上升时,  $O_3$  浓度却在下降,可明显看出二者呈负相关。这可能是由于低压控制时大气辐合运动加强,大气对流活动相对活跃,自上而下运动的空气也容易将大气中上部的  $O_3$  传输至近地面大气<sup>[19]</sup>。而气压还表现出了明显的季节性变化,即在夏季气压较低,在冬季和春季气压较高,说明气压受其他气象因素影响较大,这也是影响  $O_3$  浓度的一个重要原因。

## 5 $O_3$ 浓度与气象要素回归分析

由上述的相关分析可得,近地层  $O_3$  污染受到多个基本气象要素制约,考虑到降水对  $O_3$  浓度产生的影响较大,现选取 2015-2016 年无雨日的平均相对湿度、最小相对湿度、日平均气温、平均风速、平均气压、日最高本站气压、日最低本站气压、日最高气温、日最低气温、平均风速、最大风速、极大风速、日照时数这 13 个基本参数对  $O_3$  日平均浓度进行逐步线性回归分析。

由各个基本参数对  $O_3$  浓度产生相关影响的显著程度来选择需要进一步分析的敏感型参数,再逐个引入标准化线性回归方程。对所统计的参数模型进行联合假设检验 ( $F$ -test),得到 3 个影响无雨日  $O_3$  浓度  $Y$  的最优参数分别为日照时数  $X_1$ 、日平均气温  $X_2$ 、平均相对湿度  $X_3$ (表 2),最终得到的结论符合上述的相关分析,最后建立最优回归方程:

$$Y = 91.983 + 0.769X_1 + 1.396X_2 - 0.853X_3$$

$R = 0.679$ ,方程通过了  $\alpha = 0.01$  的显著性检验,利用该回归方程可以进行无雨日  $O_3$  浓度的气象预报工作。

表 2 线性逐步回归模型最优参数

| 模型入选参数 | 非标准化系数 |       | 标准系数 $B_0$ | t      | Sig.  |
|--------|--------|-------|------------|--------|-------|
|        | B      | 标准误差  |            |        |       |
| 常量     | 91.983 | 8.990 | —          | 10.232 | 0.000 |
| 日照时数   | 0.769  | 0.403 | 0.111      | 1.910  | 0.057 |
| 平均气温   | 1.396  | 0.133 | 0.454      | 10.522 | 0.000 |
| 平均相对湿度 | -0.853 | 0.112 | -0.418     | -7.591 | 0.000 |

## 6 结论

(1) 2015-2016 年杭州市  $O_3$  浓度日变化呈单峰型分布,在每日 05:00-08:00 达到最低值,16:00 左右达到最高值,此时段建议加强防护,减少室外暴露。日平均值在春夏季较高,并在春季达到最大值,需引起重视。

(2) 2015-2016 年杭州市  $O_3$  浓度月变化的峰值出现在 4-5 月及 7-9 月,到 11 月  $O_3$  浓度明显下降,并在 12 月

达到了最低值。对月均值进行逐小时分析,也呈单峰型,与日变化特征相吻合,浓度变化呈逐年递增趋势。

(3) 近地层  $O_3$  污染受到诸多气象要素影响。  $O_3$  浓度主要与空气温度和日照时数呈正相关,与相对湿度、降水量和气压呈负相关,其中  $O_3$  浓度与温度的相关性最好。

(4) 通过分析 13 个气象因子与无雨日  $O_3$  浓度之间的关系,最终建立预报方程并通过联合假设检验 ( $F$ -test)。逐步线性回归分析表明,无雨日  $O_3$  日平均

浓度可通过日照时数、日平均气温和平均相对湿度,建立良好的统计预报模型,复相关系数  $R$  高达0.679,可以为杭州市的预报工作提供了一定参考依据。

## 参考文献:

- [1] 徐锬,刘志红,何沐金,等.成都市夏季近地面臭氧污染气象特征[J].中国环境监测,2018,34(5):36-45.
- [2] 齐冰,牛彧文.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.
- [3] 王宏,林长城.天气条件对福州近地层臭氧分布的影响[J].生态环境学报,2011,20(8-9):1320-1325.
- [4] 孔琴心,刘广仁,李桂忱,等.近地面臭氧浓度变化及其对人体健康的能影响[J].气候与环境研究,1999,4(1):61-66.
- [5] 段玉森,张懿华.我国部分城市臭氧污染时空分布特征分析[J].环境监测管理与技术,2011,23(S1):34-39.
- [6] 李莉.典型城市群大气复合污染特征的数值模拟研究[D].上海:上海大学,2012:57-68.
- [7] 张灿,蒋昌潭.气象因子对臭氧的影响及其在空气质量预报中的应用[J].中国环境监测,2017,33(4):221-228.
- [8] 江蓝.钱塘江流域经济发展与环境污染关系研究[D].浙江:浙江大学,2014:17-18.
- [9] GB3095-2012.环境空气质量标准[S].
- [10] Fjita E M, Stockwell W, Campbell D E, et al.

Weekend/weekday ozone observations in the south coast air basin: retrospective analysis of ambient and emissions data and refinement of hypothesis. Volume I-Executive Summary [R]. National Renewable Energy Laboratory, 2000.

- [11] 段欲晓,徐晓峰.北京地面  $O_3$  污染特征及气象条件分析[J].气象科技,2001,29(4):15-18.
- [12] 朱毓秀,徐家骝.上海市臭氧浓度的某些特征及其与气象的关系[J].中国环境科学,1993,13(4):267-272.
- [13] 杨健,吕达仁.东亚地区平流层、对流层交换对臭氧分布影响的模拟研究[J].大气科学,2004,28(4):579-588.
- [14] 安俊琳,王跃思.气象因素对北京臭氧的影响[J].生态环境学报,2009,18(3):944-951.
- [15] 陈世俭,童俊超.气象因子对近地面层臭氧浓度的影响[J].华中师范大学学报(自然科学版),2005,39(2):273-276.
- [16] 吴兑.到达地面的紫外辐射强度预报[J].气象,2000,26(12):38-42.
- [17] 刘晶森,丁裕国.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.
- [18] 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.
- [19] 张吉喆.大连市近地面环境空气中臭氧浓度的变化特征及成因分析[J].环境与可持续发展,2014,39(6):174-176.

## Characteristics of Ozone Pollution and Analysis of Meteorological Causes in Hangzhou City

PAN Wenqi, XIAO Guojie, MENG Linxi, NIE Chunli, XIE Bin, LIU Leilei  
(College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

**Abstract:** In order to quantitatively analyze the characteristics of ozone pollution and its meteorological causes in Hangzhou, the meteorological factors and ozone concentration were analyzed by this article which uses the meteorological data of Hangzhou from 2011 to 2016 and the monitoring data of surface ozone pollution from 2015 to 2016. The conclusions are as follows: the concentration of ozone pollution varies periodically with seasons, and the daily average value of ozone pollution index reaches its maximum in spring. The minimum ozone concentration arises in the phase between 5:00 and 8:00 while the maximum value appears approximately at 16:00. The main meteorological factors affecting ozone concentration are relative humidity, air temperature, sunshine duration, atmospheric pressure, etc. By stepwise regression, the sunshine duration, average temperature and relative humidity were selected to establish the prediction equation of concentration prediction.

**Keywords:** applied meteorology; pollution meteorology; Hangzhou; ozone pollution; ozone variation characteristics; meteorological factors