

长江三角洲地区臭氧污染特征与影响因素分析 ——以海宁市为例

邵一泓¹, 冯晓冬^{2*}, 冯晨¹, 王大义¹, 郭豫川³, 许渊杰²

¹嘉兴市海宁环境监测站, 浙江 嘉兴

²嘉兴市生态环境局海宁分局, 浙江 嘉兴

³海宁市生态环境保护行政执法队, 浙江 嘉兴

收稿日期: 2023年7月20日; 录用日期: 2023年8月21日; 发布日期: 2023年8月28日

摘要

利用海宁市空气质量自动监测数据与气象因子数据, 研究臭氧(O₃)污染特征、变化趋势以及主要影响因素。结果表明, 2022年海宁市共出现38个O₃轻度污染日, 且 $\rho(\text{O}_3\text{-8h-90per})$ 超标2.5%, 影响该市空气质量达标情况。 $\rho(\text{O}_3)$ 存在显著的季节变化与日变化特征, 其中季节变化呈“双峰”特征, 高值主要集中在3~9月; 日变化呈“单峰”特征, 于14时达到日最高值, 受日出时间等因素影响, 不同季节日变化特征略存差异。 $\rho(\text{O}_3)$ 与前体物浓度、颗粒物浓度均呈负相关关系, $\rho(\text{O}_3)$ 高值通常出现在NO₂/CO比值相对较高区域。 $\rho(\text{O}_3)$ 与温度呈正相关, 与相对湿度呈负相关, 与风速间存较弱的正相关关系, 其中春、夏两季受东南方向传输影响, 冬季还受西北方向传输影响。

关键词

臭氧, 二氧化氮, 污染特征, 气象要素

Analysis on Characteristics and Influencing Factors of Ozone Pollution in Yangtze River Delta —Taking Haining City as an Example

Yihong Shao¹, Xiaodong Feng^{2*}, Chen Feng¹, Dayi Wang¹, Yuchuan Guo³, Yuanjie Xu²

¹Haining Environmental Monitoring Station of Jiaxing, Jiaxing Zhejiang

²Jiaxing Ecological Environment Bureau Haining Branch, Jiaxing Zhejiang

³Ecological Environment Protection Administrative Law Enforcement Team of Haining, Jiaxing Zhejiang

*通讯作者。

文章引用: 邵一泓, 冯晓冬, 冯晨, 王大义, 郭豫川, 许渊杰. 长江三角洲地区臭氧污染特征与影响因素分析[J]. 自然科学, 2023, 11(5): 760-770. DOI: 10.12677/ojns.2023.115091

Abstract

The pollution characteristics, trends and mainly factors were studied under the using of automatic monitoring data of air quality and meteorological factors in Haining. The results demonstrated that there were 38 days of O₃ mild pollution during 2022, and $\rho(\text{O}_3\text{-8h-90per})$ exceeded 2.5%, which impacted the air quality of the city. $\rho(\text{O}_3)$ had significant seasonal and daily variation characteristics, among which the seasonal variation was characterized by “double peaks”, and the high value were mainly concentrated in March and September. The daily variation was characterized by “single peak” and reached the daily maximum at 14:00. Affected by factors such as sunrise time, the daily variation characteristics of different seasons were slightly different. $\rho(\text{O}_3)$ had a negative correlation with the concentration of precursors and particles. The high value of $\rho(\text{O}_3)$ usually occurred in the region with relatively high NO₂/CO ratio. $\rho(\text{O}_3)$ had a positive correlation with temperature, a negative correlation with relative humidity, and a weak positive correlation with wind speed. In spring and summer, it was affected by the southeast transmission, and in winter, it was also affected by the northwest transmission.

Keywords

O₃, NO₂, Pollution Characteristics, Meteorological Elements

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

自 2013 年《大气污染防治行动计划》颁布以来,我国大气污染防治工作稳步推进,空气质量明显改善,特别是可吸入颗粒物(PM₁₀)与细颗粒物(PM_{2.5})浓度均呈显著下降趋势[1] [2]。与此同时,我国对流层臭氧(O₃)浓度却呈快速上升态势,成为影响我国空气质量的关键要素之一,其中在某些城市已成为影响空气质量能否达标的决定性因素[3] [4]。近地面 O₃ 是典型的光化学污染产物,环境空气中 O₃ 除少量来自平流层输入外,主要来自近地面氮氧化物(NO_x)与挥发性有机物(VOCs)等前驱物的光化学反应生成[5]。过量 O₃ 不仅对动植物生长与大气环境等造成损害,且危及人体健康[6] [7],因此 O₃ 污染现象得到广泛关注。

近年来,针对京津冀、长三角、珠三角、成渝地区等区域环境空气 O₃ 污染研究表明: O₃ 正逐渐成为影响空气质量的关键污染物,且浓度呈明显的日变化和季节变化特征,前驱物与气象条件是影响区域 O₃ 分布与变化的主要因素[8]-[13]。

由于我国城市化与工业化进程的不断加快,我国空气污染已然从原来的单一型污染变为复合型污染,臭氧污染现象日益突出。现阶段,国内关于臭氧的研究多集中于上海、广州等经济高度发达的城市级地区,研究数据多以卫星遥感、数值模拟技术等为依托,且多针对某一污染事件展开研究,因而缺乏空间代表性。而当前阶段,针对海宁市 O₃ 污染变化特征鲜有报道,前驱物与气象条件等对 O₃ 污染成因影响尚不明确,为海宁市 O₃ 污染防治工作带来困难。本文选取 2022 年环境空气质量连续监测数据与气象要素数据,分析本区域 O₃ 变化特征与影响因素,为海宁市 O₃ 污染的防治提供科学依据。

2. 研究方法

2.1. 数据来源

O₃与其他常规污染物浓度监测数据来源于海宁市监测大楼与硖石街道2个1省控空气自动站点实时监测,采样频率为1 h,24 h连续自动监测;气象数据来源于海宁市气象局实时监测,采样频率为1 h,24 h连续自动监测。

2.2. 数据时间

污染物浓度数据与气象数据采样时间均为2022年1月1日~12月31日。其中,将3~5月划分为春季,6~8月划分为夏季,9~11月划分为秋季,12月、1月与2月划分为冬季。

2.3. 采样仪器

O₃监测:监测大楼站点采用OPS-AR500S型分析仪,硖石街道站点采用TE-49i型分析仪。

PM₁₀监测:监测大楼与硖石街道站点均采用TE-SHARP5030i型颗粒物监测仪进行监测分析。

PM_{2.5}监测:监测大楼与硖石街道站点均采用TE-SHARP5030i型颗粒物监测仪进行监测分析。

NO₂监测:监测大楼站点采用OPS-AR500S型分析仪,硖石街道站点采用TE-42i型分析仪。

2.4. 评价方法

环境空气质量评价方法严格依照《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)、《环境空气质量评价技术规范(试行)》(HJ 663-2013)、《环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)》(HJ 633-2012)中有关内容进行。根据AQI数值大小将环境空气质量分为6级:优(AQI≤50)、良(50<AQI≤100)、轻度污染(100<AQI≤150)、中度污染(150<AQI≤200)、重度污染(200<AQI≤300)、严重污染(AQI>300)。海宁市环境空气质量主要依据《环境空气质量评价技术规范(试行)》(HJ 663-2013)展开,要求执行评价项目年平均和日平均百分位数同时达到要求。

3. 结果与讨论

3.1. 区域污染概况与ρ(O₃)水平分析

3.1.1. 区域总体污染特征

2022年,海宁市日AQI最低值为24,最高值为183。共经历101个空气质量优等级天气、212个良等级天气、49个轻度污染日以及3个中度污染日,无重度污染日与严重污染日出现(图1),空气质量优良日占比为86%,污染日占比为14%,区域空气质量相对较好。其中,O₃作为首要污染物天数为186日。其它污染物中,PM_{2.5}为39日、PM₁₀为22日、NO₂为17日。

图2给出不同首要污染物对区域空气质量等级的影响。当首要污染物为PM_{2.5}时,污染天数占比最高,接近40%,还出现3个中度污染日;当首要污染物为O₃时,空气质量主要为良和轻度污染等级,但38个轻度污染日对海宁市空气质量有较大影响;当首要污染物为PM₁₀与NO₂时,空气质量均处于良好等级。表明颗粒物与O₃仍为影响区域空气质量的重要污染物,秋冬季主控颗粒物,夏秋季主控O₃仍需作为主要工作方向。

3.1.2. O₃污染特征概况

依照《环境空气质量评价技术规范(试行)》中有关评价标准,2022年海宁市ρ(O₃-8h-90per)为164 μg·m⁻³,超过环境空气质量标准二级标准限值(160 μg·m⁻³)2.5%,ρ(O₃-8h)范围为12~207 μg·m⁻³,超标天数共计38

天(图 3), 占据全年总天数的 10.4%。其中, 6 月和 8 月超标天数最多, 均为 8 天; 4 月和 7 月为 6 天; 5 月和 9 月为 4 天; 3 月和 10 月均仅有 1 天超标, 其它月份无 O₃ 超标日。

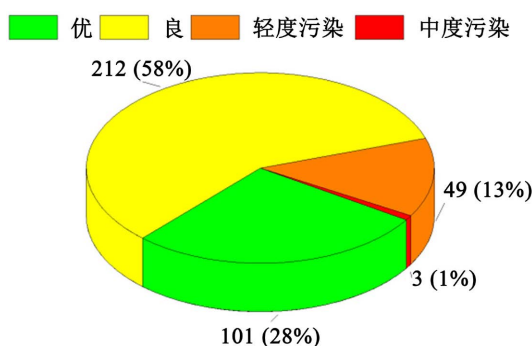


Figure 1. Days and proportion of different air quality levels in Haining in 2022

图 1. 2022 年海宁市不同空气质量等级日数及占比

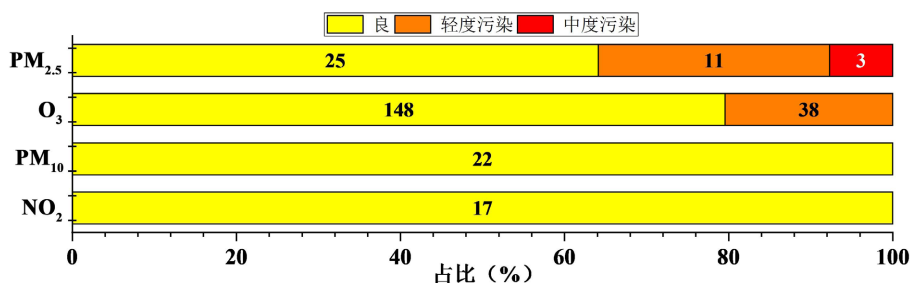


Figure 2. Impact of different primary pollutants on air quality levels in Haining City in 2022

图 2. 2022 年海宁市不同首要污染物对空气质量等级的影响

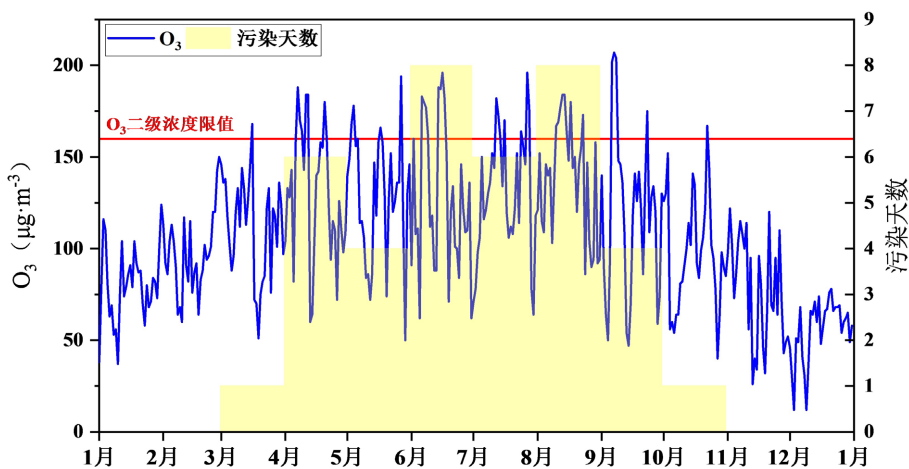


Figure 3. Haining City in 2022 $\rho(O_3-8h)$ and statistics of exceeding standard days

图 3. 2022 年海宁市 $\rho(O_3-8h)$ 与超标天数统计

3.1.3. 2022 年 O₃ 污染变化整体趋势

图 4 给出 2022 年海宁市 $\rho(O_3)$ 与主要气象要素月变化趋势。由图可见, 海宁市月均 $\rho(O_3)$ 呈“双峰”分布趋势。1~4 月 $\rho(O_3)$ 受温度上升以及太阳辐射增强等因素影响, 呈逐月上升特征, 并在 4 月出现本年

度第一次峰值；5~6月随相对湿度上升， O_3 及其前体物受到清除效应影响[14]，导致 $\rho(O_3)$ 出现小幅回落；7~8月，降雨与相对湿度环比出现回落，气温则始终处于高位， $\rho(O_3)$ 出现本年度第二次峰值；9月后，温度与光辐射同步减弱， $\rho(O_3)$ 快速下降，至12月达到本年度最低值。

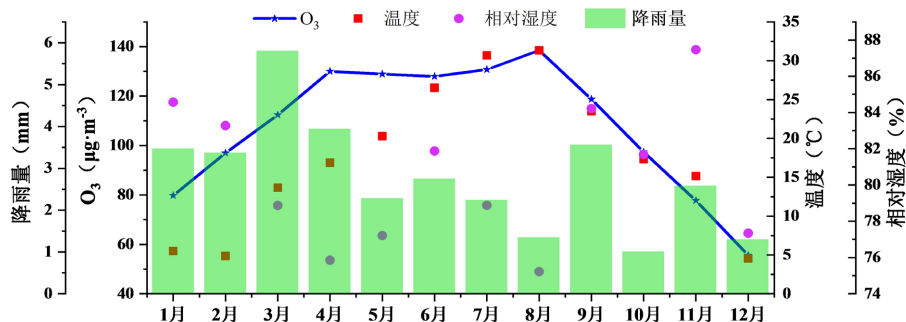


Figure 4. Haining City in 2022 ρ Monthly variation trend of (O_3) and meteorological elements
图 4. 2022 年海宁市 $\rho(O_3)$ 与气象要素逐月变化趋势

3.1.4. $\rho(O_3)$ 日变化特征分析

海宁市环境空气中 $\rho(O_3)$ 呈显著的单峰日变化趋势，总体呈现日间高(8~20时 $\rho(O_3)$ 平均值为 $93 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、夜间低(21时~次日7时 $\rho(O_3)$ 平均值为 $54 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 的分布特征，且昼夜浓度水平存较大差异(图 5)。夜间至日出前后(0~6时) $\rho(O_3)$ 处相对较低水平，且夜间因 O_3 滴定效应存在导致 $\rho(O_3)$ 不断降低，直至 6 时左右达一天中最低值；6 时起，受光辐射增强、气温上升以及前体物浓度上升等因素影响，光化学反应速率不断增强并导致环境空气中 O_3 不断生成、积累，最终导致 $\rho(O_3)$ 水平上升，至 14 时前后达到一天中最高值；16 时后，随光辐射水平降低、温度下降、以及 O_3 自身消耗作用等共同影响，导致 O_3 浓度不断下降。本研究观测到 O_3 日变化特征与浙江省其他研究中观测到日变化特征相一致[15] [16]。

此外， $\rho(O_3)$ 小时超标时间集中分布于 11~17 时。其中，14 时和 15 时超标 10 次，16 时超标 9 次，13 时超标 7 次，11、12 与 17 时超标次数均不超过 5 次。

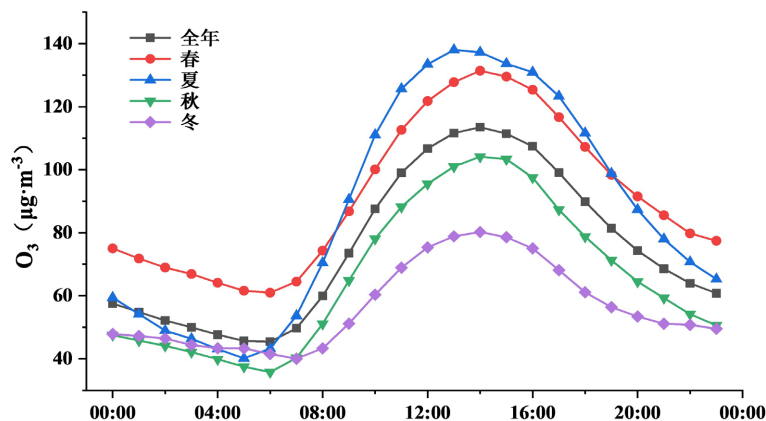


Figure 5. Annual and different quarters ρ schematic diagram of daily variation of (O_3)

图 5. 全年与不同季度 $\rho(O_3)$ 日变化示意图

值得注意的是，不同季节中 $\rho(O_3)$ 日变化趋势存在一定程度差异。日变化差异($\rho(O_3-1h)$ 极差)由高到低分别为：夏季($98 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、春季($70 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、秋季($68 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、冬季($40 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)。夏季午后较高气温与较强

光辐射导致该季节 $\rho(\text{O}_3)$ 日变化差异显著于其他季节。春、夏、秋、冬四季 $\rho(\text{O}_3)$ 峰值时间均出现在 14 时；夏季 $\rho(\text{O}_3-1\text{h})$ 最低值出现在 5 时，春、秋季 $\rho(\text{O}_3-1\text{h})$ 最低值均出现在 6 时，早于冬季的 8 时，可能与日出时间密切相关。

3.2. O_3 与其他污染物关联分析

3.2.1. O_3 -CO- NO_2 关系

2022 年海宁市 $\rho(\text{O}_3)$ 、 $\rho(\text{CO})$ 以及 $\rho(\text{NO}_2)$ 日变化趋势见图 6。如图所示， $\rho(\text{O}_3)$ 与 $\rho(\text{CO})$ 、 $\rho(\text{NO}_2)$ 间均存在较显著的负相关关系，存在前体物向 O_3 转化趋势。与 O_3 所呈现的单峰变化趋势不同， $\rho(\text{CO})$ 以及 $\rho(\text{NO}_2)$ 均呈早晚双峰型日变化。早 6 时左右， $\rho(\text{O}_3)$ 经夜间消耗达到日最低值；受到机动车排放以及其它人类生产生活活动影响， $\rho(\text{CO})$ 以及 $\rho(\text{NO}_2)$ 在早 7 时左右达日最大值。日出后，随太阳辐射增强与温度上升， NO_2 等前体物经光化学反应生成 O_3 的速率加快，自身不断消耗，导致其浓度降低，于 13~14 时出现日最低值，达到日低谷期。傍晚前后，光化学条件减弱并伴随交通晚高峰等因素影响， $\rho(\text{CO})$ 与 $\rho(\text{NO}_2)$ 上升并达到第二个峰值。本研究所得 O_3 -CO- NO_2 关系与长三角地区其他研究结果相对一致[17]。值得注意的是， O_3 与 NO_2 间的负相关关系 ($R = -0.61$) 显著高于与 CO 间的负相关关系 ($R = -0.20$)，可能原因是 CO 的大气化学惰性相对较高[18]。

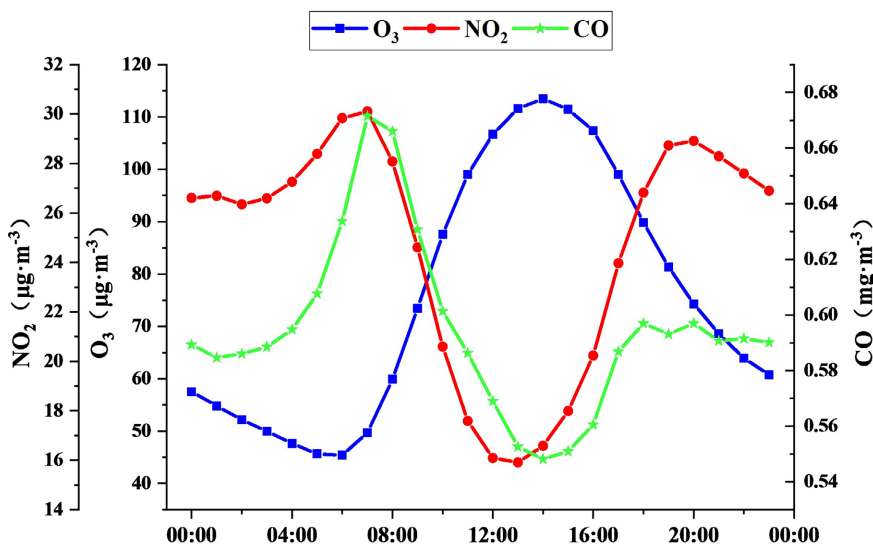


Figure 6. Schematic diagram of daily changes in O_3 , NO_2 , and CO concentrations

图 6. O_3 、 NO_2 、CO 浓度日变化示意图

筛选 2022 年 O_3 污染相对严重的 3~9 月时段大气污染物浓度数据，制作 O_3 - NO_2 -CO 散点图，并以颜色着重区分 $\rho(\text{O}_3)$ 水平，见图 7。由图所示， $\rho(\text{O}_3)$ 高值通常出现在 NO_2/CO 比值相对较高区域，而 $\rho(\text{O}_3)$ 低值则相对分散。其中，当 $\rho(\text{NO}_2)$ 小 $30 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时，随 $\rho(\text{CO})$ 上升， $\rho(\text{O}_3)$ 也出现显著上升趋势。由于 CO 通常情况下与 VOCs 具有较好相关性，因此有较大概率表明该区域处于 VOCs 控制区[19] [20]。

3.2.2. 与颗粒物的关系

图 8 给出海宁市 $\rho(\text{O}_3)$ 、 $\rho(\text{PM}_{10})$ 以及 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 日变化趋势。由图可知，海宁市 O_3 与颗粒物浓度日变化总体呈现负相位关系。其中，0~18 时 O_3 浓度相对较高，颗粒物浓度水平则较低；傍晚后， $\rho(\text{O}_3)$ 与 $\rho(\text{PM}_{10})$ 均呈下降趋势， $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 则相对稳定。造成该现象的可能原因是：日间颗粒物浓度上升后，随大气扩散

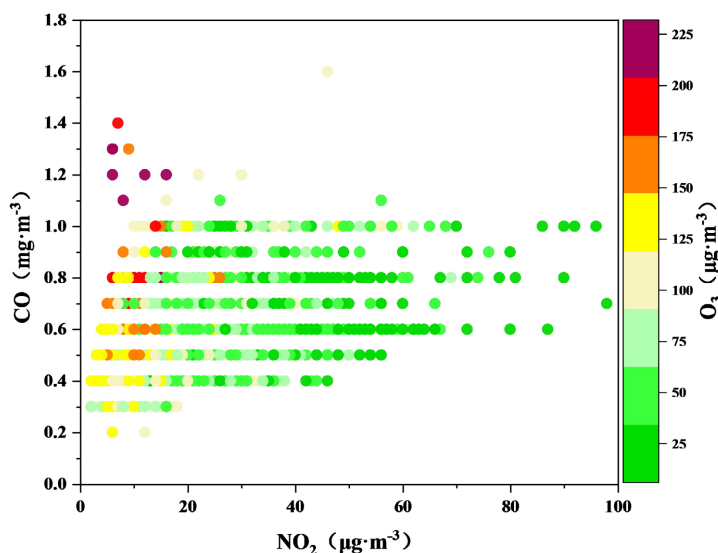


Figure 7. Scatter plot of O₃, NO₂, CO
图 7. O₃、NO₂、CO 散点图

条件转好而稀释降低,同时 O₃ 浓度则受到光辐射增强、温度上升等因素影响不断升高。此外,在相对高水平颗粒物浓度条件下,大气能见度下降,影响光辐射强度,并导致光化学反应速率降低,最终影响 O₃ 生成,造成其浓度下降。

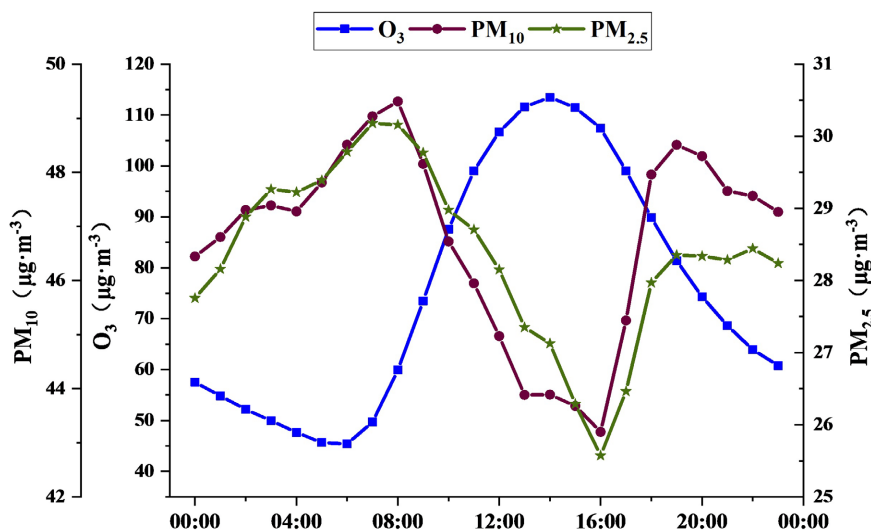


Figure 8. Schematic diagram of daily changes in O₃, PM₁₀, and PM_{2.5} concentrations
图 8. O₃、PM₁₀、PM_{2.5} 浓度日变化示意图

为进一步研究海宁市 O₃ 与颗粒物浓度间的关系,利用 SPSS 软件对相关数据进行 Pearson 相关性分析。如表 1 所示,不同季节 O₃ 与颗粒物浓度呈现不同的相关性关系。其中,夏季 O₃ 与颗粒物浓度呈现较显著的正相关关系(均超过 0.40, $p < 0.01$),在冬季呈现出弱负相关。研究表明, O₃ 与颗粒物在对流层中相互作用机制主要包括两个过程:过程一,颗粒物浓度升高通过影响光辐射强度降低 $\rho(\text{O}_3)$ 水平;过程二,高浓度的 O₃ 通过影响区域大气氧化性促进新粒子的生成并提高颗粒物浓度水平。在不同季节下,过程一

与过程二可能分别占据主导地位。冬季颗粒物浓度加高，过程一起到主导作用，抑制区域 O₃ 生成过程；夏季 $\rho(\text{O}_3)$ 水平高，大气氧化性强，过程二占据主导地位，并促进二次颗粒物的生成过程[20]。综合上述两个过程影响，导致冬季与夏季 O₃ 与颗粒物浓度呈现相反的相关性关系。

Table 1. Pearson correlation coefficient between O₃ and particle concentration under different seasonal conditions

表 1. 不同季节条件下 O₃ 与颗粒物浓度的 Pearson 相关系数

| 季节 | | PM ₁₀ | PM _{2.5} |
|----|----------------|------------------|-------------------|
| 春 | O ₃ | -0.01 | -0.02 |
| 夏 | O ₃ | 0.42 | 0.42 |
| 秋 | O ₃ | 0.02 | 0.07 |
| 冬 | O ₃ | -0.21 | -0.13 |

3.3. 气象要素对 O₃ 的影响

气象参数中，温度表征地表吸收太阳辐射的强弱，温度越高，越有利 O₃ 生成。风向和风速表征地表 O₃ 的传输来源，较高的风速一方面导致 O₃ 及其前体物向下风向输送，另一方面又会对 O₃ 进行稀释和扩散[21]。表 2 给出 $\rho(\text{O}_3)$ 与 $\rho(\text{NO}_2)$ 和气象参数间的相关性水平。其中， $\rho(\text{O}_3)$ 与温度、风速等参数呈正相关，相关系数分别为 0.48 以及 0.22。与风速间存在的弱相关性关系表明海宁市在部分程度上受到 O₃ 外来传输影响。 $\rho(\text{O}_3)$ 与 $\rho(\text{NO}_2)$ 、相对湿度、气压均呈负相关，其中与相对湿度负相关系数较大(-0.65)，源于较高相对湿度条件下空气中水汽所含 HO、HO₂ 等自由基与 O₃ 相互作用并将其还原为 O₂ [22]。

Table 2. Pearson correlation coefficients between O₃ concentration, NO₂ concentration, and other meteorological parameters

表 2. O₃ 浓度与 NO₂ 浓度以及其他气象参数间的 Pearson 相关系数

| | Pearson 相关系数(*代表在 $p < 0.10$ 下显著性相关) | | | | |
|----------------|--------------------------------------|-------|--------|--------|-------|
| | NO ₂ | 温度 | 相对湿度 | 气压 | 风速 |
| O ₃ | -0.61* | 0.48* | -0.65* | -0.26* | 0.22* |

3.3.1. 温度与相对湿度的影响

高温低湿的气象条件有利于本区域 $\rho(\text{O}_3)$ 上升[22]。图 9 给出 $\rho(\text{O}_3)$ 与气温、相对湿度间的关系。由图可知，温度大于 25℃，相对湿度 20%~70% 为海宁市臭氧污染高值区。图 10 进一步给出不同温度、相对湿度下 $\rho(\text{O}_3)$ 平均值与超标率。由图可见，当温度高于 27℃ 时，开始出现 $\rho(\text{O}_3-1\text{h})$ 超标现象；随温度不断上升， $\rho(\text{O}_3-1\text{h})$ 超标率不断升高，平均浓度也存在显著上升；温度高于 31℃ 时， $\rho(\text{O}_3-1\text{h})$ 超标率呈现波动变化，但平均浓度仍呈不断升高趋势，其中温度处于 37℃~38℃ 区间时，超标率处于最高水平。值得注意的是，温度超过 40℃ 时， $\rho(\text{O}_3-1\text{h})$ 平均值处于各温度段最高水平，但未出现超标现象，与相关研究中发现极高温度可能遏制地面 $\rho(\text{O}_3)$ 水平结果一致[23]。但本研究监测数据中温度大于 40℃ 的样本数量较少(5 个)，尚缺乏统计学意义，O₃ 浓度在高温区间下的特征仍需在未来数据累积的基础上进一步分析。

3.3.2. 风向与风速的影响

图 11 给出不同季节条件下，不同方向与强度的气流对海宁市 $\rho(\text{O}_3)$ 影响情况。由图可见，春、夏两季海宁市主导风向为 E、S、ESE 等(频率范围 9%~19%)，秋、冬两季主导风向为 NNW、NW (频率范围 12%~19%)。春、夏季受较高太阳辐射与温度影响，O₃ 本地生成作用较强。此外，春季 ESE、SE、SSE

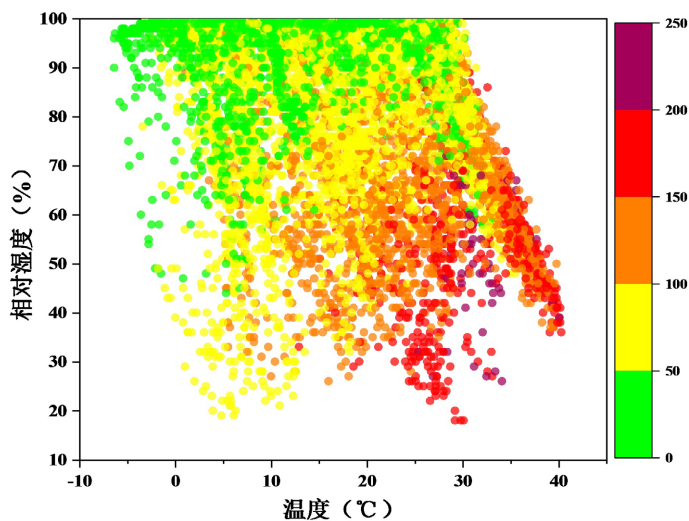


Figure 9. Relationship between O_3 and temperature, relative humidity
图 9. O_3 与温度、相对湿度间的关系

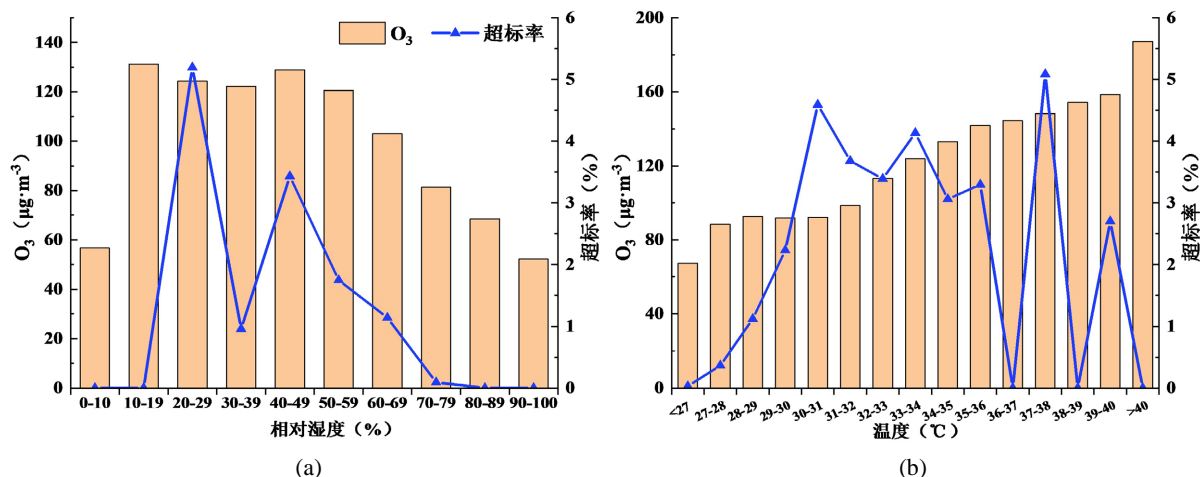


Figure 10. Average O_3 concentration and excess rate at different relative humidity and temperature
图 10. 不同相对湿度与温度下 O_3 平均浓度与超标率

等主导风向存在 O_3 传输，在风频较低的 NNE 方向也存在 O_3 传输贡献；夏季在 SE 方向，风速 3~4 m/s 时，存在相对明显的 O_3 传输贡献；秋、冬两季 $\rho(O_3)$ 相对较低，受本地影响较强，其中秋季还存在来自西北方向传输影响。

4. 结论

1) 2022 年 O_3 作为海宁市首要污染物的天数为 186 天，其中包含 38 个轻度污染日，对污染日贡献比超过 70%。 $\rho(O_3-8h-90per)$ 为 $164 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，超过环境空气质量二级标准 2.5%，超标日主要集中在 4~8 月，其中 6 月和 8 月超标日最多，均为 8 天。

2) 2022 年 $\rho(O_3)$ 存在显著的季节变化与日变化特征。 $\rho(O_3)$ 呈双峰季节变化特征，高值主要集中在 3~9 月，其中 5~6 月因降水、相对湿度上升等原因导致 $\rho(O_3)$ 略有降低。 $\rho(O_3)$ 呈显著的单峰日变化特征，6 时最低，随后逐渐上升，于 14 时前后达到日最高值。不同季节 $\rho(O_3)$ 略有差异，主要受到日照时长、温度等因素影响。

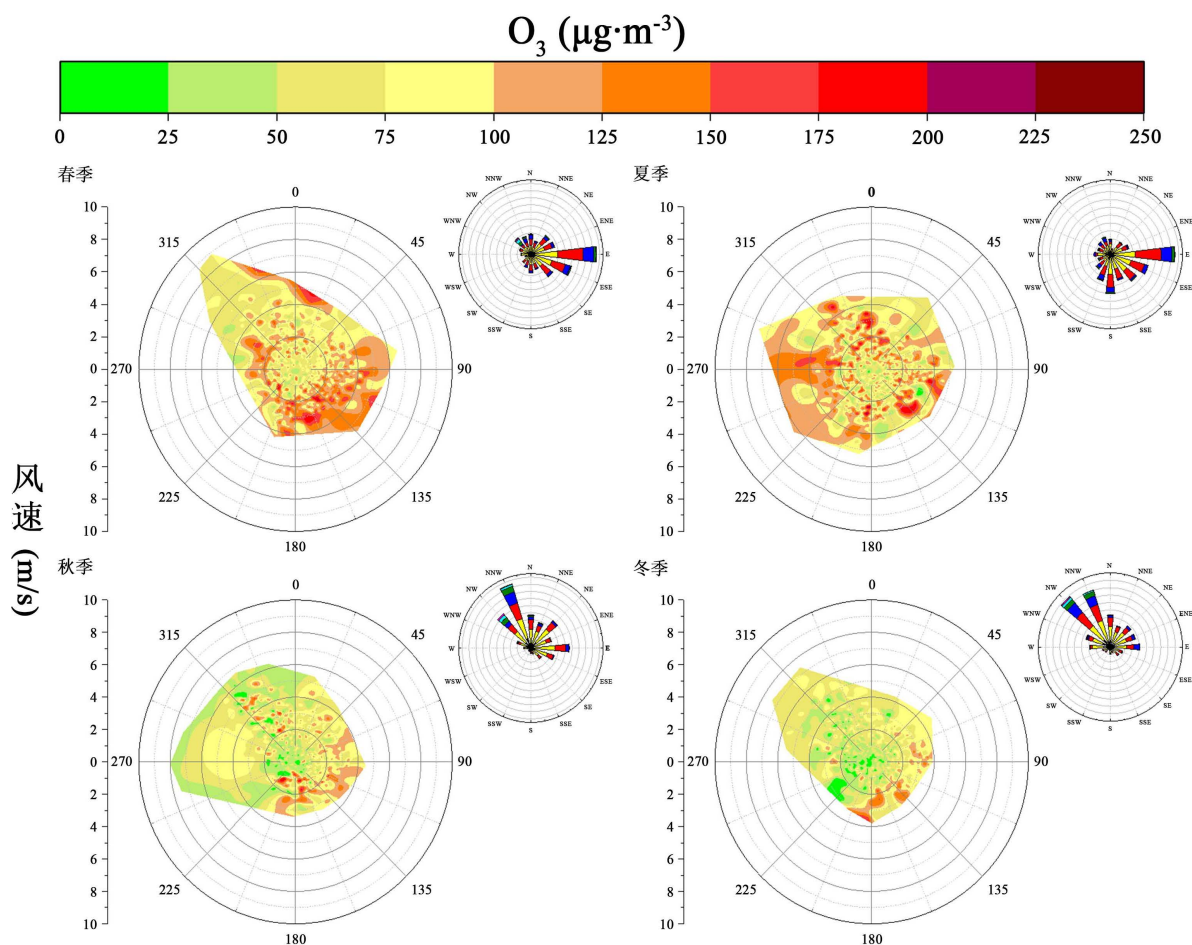


Figure 11. ρ The variation law of (O_3) with wind speed
图 11. $\rho(O_3)$ 随风向风速的变化规律

3) $\rho(O_3)$ 与前体物浓度间呈现负相关关系, $\rho(O_3)$ 高值通常出现在 NO_2/CO 比值相对较高区域。此外, O_3 与颗粒物间的相互作用导致二者浓度总体呈负相位关系。

4) $\rho(O_3)$ 受到诸多气象要素的影响。其中, $\rho(O_3)$ 与温度呈正相关关系, 与相对湿度呈负相关关系, 温度大于 $25^\circ C$, 相对湿度 20%~70% 有利于 O_3 生成; $\rho(O_3)$ 与风速存在较弱的正相关关系, 结合风向传输表明除本地生成外, 春、夏两季受到来自东南方向传输影响, 冬季还受到来自西北方向传输影响。

基金项目

嘉兴市生态环境局海宁分局臭氧激光雷达等设备及配套技术服务项目(ZDCG2022084)。

参考文献

- [1] Zhai, S., Jacob, D.J., Wang, X., *et al.* (2019) Fine Particulate Matter ($PM_{2.5}$) Trends in China, 2013-2018: Separating Contributions from Anthropogenic Emissions and Meteorology. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **19**, 11031-11041. <https://doi.org/10.5194/acp-19-11031-2019>
- [2] 赵伟, 高博, 卢青, 等. 2006-2019 年珠三角地区臭氧污染趋势[J]. 环境科学, 2021, 42(1): 97-105.
- [3] Dang, R. and Liao, H. (2019) Radiative Forcing and Health Impact of Aerosols and Ozone in China as the Consequence of Clean Air Actions over 2012-2017. *Geophysical Research Letters*, **46**, 12511-12519. <https://doi.org/10.1029/2019GL084605>

- [4] Sillman, S. (1999) The Relation between Ozone, NO_x and Hydrocarbons in Urban and Polluted Rural Environments. *Atmospheric Environment*, **33**, 1821-2845. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(98\)00345-8](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(98)00345-8)
- [5] Lombardozi, D., Sparks, J. and Bonan, G. (2013) Integrating O₃ Influences on Terrestrial Processes: Photosynthetic and Stomatal Response Data Available for Regional and Global Modeling. *Biogeosciences*, **10**, 6815-6831. <https://doi.org/10.5194/bg-10-6815-2013>
- [6] Aris, R.M., Christian, D., Hearne, P.Q., et al. (1993) Ozone-Induced Airway Inflammation in Human Subjects as Determined by Airway Lavage and Biopsy. *The American Review of Respiratory Disease*, **148**, 1363-1372. <https://doi.org/10.1164/ajrccm/148.5.1363>
- [7] Feng, Z.Z. and Kobayashi, K. (2009) Assessing the Impacts of Current and Future Concentrations of Surface Ozone on Crop Yield with Meta-Analysis. *Atmospheric Environment*, **43**, 1510-1519. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.11.033>
- [8] 崔蕾, 倪长健, 王超, 等. 成都市 O₃ 浓度的时间变化特征及相关因子分析[J]. 中国环境监测, 2015, 31(6): 41-46.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 刘芷君, 谢小训, 谢旻, 等. 长江三角洲地区臭氧污染时空分布特征[J]. 生态与农村环境学报, 2016, 32(3): 445-450.
- [12] 程念亮, 李云婷, 张大伟, 等. 2014 年北京市城区臭氧超标日浓度特征及与气象条件的关系[J]. 环境科学, 2016, 37(6): 2041-2051.
- [13] 赵旭辉, 董昊, 季星, 等. 合肥市 O₃ 污染时空变化特征及影响因素分析[J]. 环境科学学报, 2018, 38(2): 649-660.
- [14] 董昊, 王含月, 程龙, 等. 芜湖市臭氧污染特征与影响因素分析[J]. 环境化学, 2022, 41(7): 2364-2374.
- [15] 齐兵, 牛彧文, 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.
- [16] 潘文琪, 肖国杰, 孟林夕, 等. 杭州市臭氧污染特征及其气象成因分析[J]. 成都信息工程大学学报, 2019, 34(6): 664-670.
- [17] 咸月, 祁梦, 刘倩, 等. 盐城市臭氧污染特征及影响因素[J]. 环境监控与预警, 2018, 10(3): 45-49.
- [18] 王占山, 李云婷, 陈添, 等. 北京城区臭氧日变化特征及与前体物的相关性分析[J]. 中国环境科学, 2014, 34(12): 3001-3008.
- [19] Ding, A.J., Fu, C.B., Yang, X.Q., et al. (2013) Ozone and Fine Particle in the Western Yangtze River Delta: An Overview of 1 yr Data at the SORPES Station. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **13**, 5813-5830. <https://doi.org/10.5194/acp-13-5813-2013>
- [20] Jia, M., Zhao, T., Cheng, X., et al. (2017) Inverse Relations of PM_{2.5} and O₃ in Air Compound Pollution between Cold and Hot Seasons over an Urban Area of East China. *Atmosphere*, **8**, 59-71. <https://doi.org/10.3390/atmos8030059>
- [21] An, J.L., Shi, Y.Z., Wang, J.X. and Zhu, B. (2016) Temporal Variations of O₃ and NO_x in the Urban Background Atmosphere of Nanjing, East China. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, **71**, 224-234. <https://doi.org/10.1007/s00244-016-0290-8>
- [22] 刘晶淼, 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.
- [23] Steiner, A.L., Davis, A.J., et al. (2010) Observed Suppression of Ozone Formation at Extremely High Temperatures Due to Chemical and Biophysical Feedback. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **107**, 19685-19690. <https://doi.org/10.1073/pnas.1008336107>