

# 基于DLNM的盐城市O<sub>3</sub>污染及气象因素研究

陈雯<sup>1</sup>, 周宏伟<sup>1</sup>, 张芮<sup>1</sup>, 王爽<sup>2</sup>, 盛也<sup>1</sup>, 裔传详<sup>1</sup>

<sup>1</sup>盐城市气象局, 江苏 盐城

<sup>2</sup>吉林省突发事件预警信息发布中心, 吉林 长春

收稿日期: 2026年1月5日; 录用日期: 2026年2月11日; 发布日期: 2026年3月6日

## 摘要

基于盐城大市区2019~2023年四个国控站点的O<sub>3</sub>浓度数据与气象因子数据, 分析年、月、日尺度的臭氧污染特征, 发现年浓度呈现出先下降后升高的趋势, 2021年最低, 2022年最高。各站点的臭氧月平均浓度在全年整体呈现先中间高、两边低的变化特征, 臭氧浓度高值主要出现在4~8月份。日浓度峰值出现在4~9月, 最高值出现在6月。斯皮尔曼系数表明臭氧浓度与气压和相对湿度呈显著负相关, 与气温呈显著正相关。DLNM模拟结果表明在滞后0~6天内, 温度、湿度、风速对臭氧浓度的影响均表现出显著的时变特征和条件依赖性。高温显著促进臭氧的生成, 低温则会在初期抑制臭氧的生成, 但抑制效果随时间逐渐减弱。低湿条件在短期内持续促进臭氧生成, 而高湿条件持续抑制臭氧的生成。低风速条件下, 臭氧浓度容易累积, 而高风速则能够有效稀释臭氧及其前体物, 显著降低臭氧浓度。中等风速则会在一定程度上保持臭氧的生成与扩散的平衡。

## 关键词

臭氧污染, 气象因素, 分布滞后非线性模型(DLNM), 相关性分析

## Study on O<sub>3</sub> Pollution and Meteorological Factors in Yancheng City Based on DLNM

Wen Chen<sup>1</sup>, Hongwei Zhou<sup>1</sup>, Rui Zhang<sup>1</sup>, Shuang Wang<sup>2</sup>, Ye Sheng<sup>1</sup>, Chuanxiang Yi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Yancheng Meteorological Bureau, Yancheng Jiangsu

<sup>2</sup>Jilin Provincial Emergency Warning Information Release Center, Changchun Jilin

Received: January 5, 2026; accepted: February 11, 2026; published: March 6, 2026

## Abstract

Based on the O<sub>3</sub> concentration data and meteorological factor data from four national control stations in the main urban area of Yancheng City during 2019~2023, this study analyzed the

文章引用: 陈雯, 周宏伟, 张芮, 王爽, 盛也, 裔传详. 基于 DLNM 的盐城市 O<sub>3</sub> 污染及气象因素研究[J]. 环境保护前沿, 2026, 16(3): 288-296. DOI: 10.12677/aep.2026.163029

characteristics of ozone pollution on annual, monthly, and daily scales. The results showed that the annual  $O_3$  concentration presented a trend of first decreasing and then increasing, with the lowest value in 2021 and the highest in 2022. The monthly average  $O_3$  concentrations at all stations exhibited an overall pattern of being high in the middle and low on both sides throughout the year, with high values mainly occurring from April to August. The daily concentration peaks appeared from April to September, and the highest value was recorded in June. Spearman's correlation analysis indicated that  $O_3$  concentration was significantly negatively correlated with atmospheric pressure and relative humidity, and significantly positively correlated with air temperature. The results of Distributed Lag Nonlinear Model (DLNM) simulation showed that within 0~6 days of lag, the effects of temperature, humidity, and wind speed on  $O_3$  concentration all exhibited significant time-varying characteristics and conditional dependence. High temperature significantly promoted  $O_3$  formation, while low temperature initially inhibited  $O_3$  formation, but the inhibitory effect gradually weakened over time. Low humidity conditions continuously promote ozone formation in the short term, while high humidity conditions consistently inhibit ozone generation. Under low wind speed conditions,  $O_3$  concentration was prone to accumulation, while high wind speed could effectively dilute  $O_3$  and its precursors, significantly reducing  $O_3$  concentration. Moderate wind speed maintained a certain balance between  $O_3$  formation and diffusion.

## Keywords

Ozone Pollution, Meteorological Factors, Distributed Lag Nonlinear Model (DLNM), Correlation Analysis

Copyright © 2026 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

随着经济和城市化的快速发展,环境空气问题已开始成为制约经济发展的因素,引起人们的广泛关注。“十三五”期间,我国重点区域大气污染防治已取得阶段性成效,细颗粒物( $PM_{2.5}$ )浓度持续下降[1][2],空气质量不断提升。然而,大气臭氧( $O_3$ )污染呈现缓慢上升态势[3][4],以长时间、大范围  $O_3$  污染为特点的二次污染频发。在一些重点区域,包括京津冀地区和长三角地区,以  $O_3$  为首要污染物的超标天数显著增加[5]。由于近地面层中的高浓度  $O_3$  会对人类身体健康、生产生活及生态系统等造成严重危害[6][7],  $O_3$  污染已成为我国空气质量持续改善亟需解决的关键问题[8],  $O_3$  的时空分布也已成为国内外学者研究的热点问题[9]-[12]。

为了有效预测和管理  $O_3$  污染,全面了解  $O_3$  浓度的主要驱动因素至关重要。除人为排放外,气象条件强烈影响地面  $O_3$  的产生、分解和扩散[13]-[17]。

中国城市  $O_3$  的相关研究多数集中在经济发达地区,目前针对盐城市区  $O_3$  的研究仍相对较少,特别是针对盐城市区较长时间序列下  $O_3$  时空分布特征及气象影响的研究还不够充分。吉祝美等[18]分析了盐城市区夏季  $O_3$  浓度变化规律及其影响因素,发现  $O_3$  浓度日变化特征显著,最高值与最低值分别出现在早晨 7 点及午后 15 点,不同季节污染物的浓度存在差异,其小时浓度与  $NO_2$ 、 $NO_x$ 、CO 呈此消彼长关系,并于气温、风速和湿度呈现较好的相关性;咸月等[19]对 2015~2016 年盐城城区  $O_3$  的数据进行分析,结果表明各站点  $O_3$  污染水平较为接近,全年逐月值呈双峰分布,日变化曲线呈单峰分布,  $O_3$  与前体物浓度呈显著负相关,各站点  $O_3$  浓度随风速增大而增大;程焕友等[20]基于 2015~2019 年三个代表站点的大气环境监测数据,通过空气质量指数计算,分析评价盐城地区大气污染状况及特征,发现黄淮平原、里

下河平原臭氧污染趋势为增-减-增，滨海平原先减后增。赵玉敏等[21]发现 2020 年盐城市大丰区大气污染以臭氧污染为主，呈现明显的季节、月份分布特征， $O_3$  浓度与  $NO_2$  浓度呈显著的负相关， $O_3$  浓度与气温呈明显的正相关关系，与相对湿度呈明显的负相关关系。

以上研究都从不同角度对盐城  $O_3$  污染现状进行了分析，虽有个别研究涉及了与气象因素的相关性分析，但是仅限于对温度、湿度、风速等的简单变化趋势的讨论，存在一定的局限性，因此，对盐城市区  $O_3$  的污染特征及气象因素研究仍十分重要。

## 2. 研究数据来源与研究方法

### 2.1. 研究区概况

研究区域为盐城市大市区，盐城市位于江苏省北部，东临黄海，属于亚热带季风气候，四季分明，光照充足，雨量充沛，其独特的地理位置和气候特征为  $O_3$  的生成和积累提供了特定的环境条件。

### 2.2. 数据来源

$O_3$  浓度数据：选取盐城大市区盐城电厂、市监测站、开发区管委会、宝龙广场 4 个国控站点 2019~2023 年的  $O_3$  日最大 8 小时平均浓度数据，数据来源于盐城市环境空气质量自动监测系统，剔除无效和缺失数据后用于后续分析。

气象数据：同期日平均气温、日平均相对湿度、日平均气压、日平均风速等气象数据来源于盐城市气象局，数据经过质量控制，确保准确性和完整性。

### 2.3. 研究方法

基于 2019~2023 年盐城市 4 个国控点的  $O_3$  监测数据，分析盐城  $O_3$  浓度的年际、月际、日变化；斯皮尔曼相关系数，是衡量两个变量的依赖性的非参数指标，它利用单调方程评价两个统计变量的相关性。利用斯皮尔曼相关性分析法研究  $O_3$  浓度与气压、温度、湿度、平均风速等气象因子的相关性；DLNM 是一种分布滞后非线性模型，利用记忆学习法识别污染物与各种气象因素的关系。

## 3. 主要结论和成果综述

### 3.1. 盐城大市区臭氧的时间变化特征

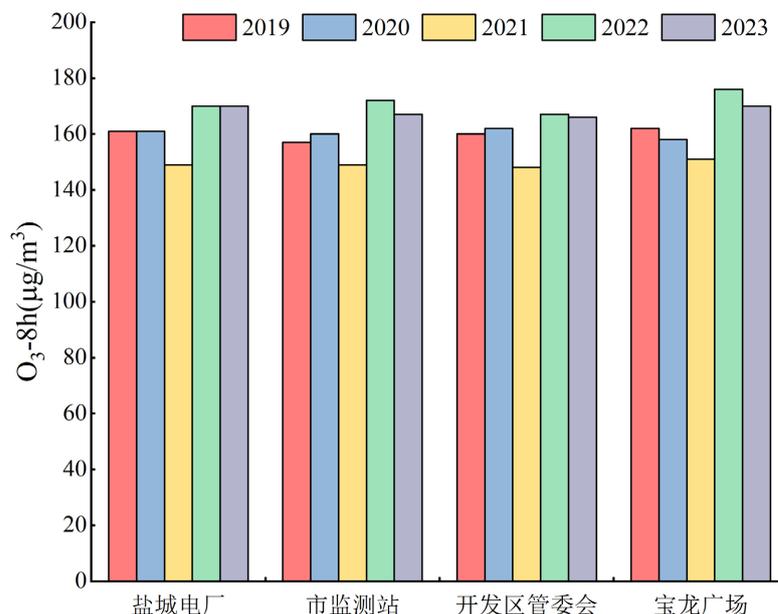
#### 3.1.1. 年际变化

2019~2023 年间盐城大市区  $O_3$  年均浓度变化如图 1 所示，站点分别为盐城电厂、市监测站、开发区管委会、宝龙广场。总的来看，5 年间  $O_3$  日最大 8 h 第 90 百分位数年浓度呈现出先下降后升高的趋势，2021 年最低，2022 年最高。臭氧浓度年度变化可分为 2 个阶段，第一阶段为 2019~2021 年，受疫情影响，年浓度有所下降，2021 年 4 个国控监测站点年浓度均不高于  $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，达到良好级别。第二阶段为 2022~2023 年，臭氧浓度快速上升至 2022 年达到峰值，均高于  $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，超过了环境空气质量二级标准，达到了轻度污染，2023 虽略有下降，年浓度仍处在轻度污染范围，采取措施控制日益加剧的臭氧污染势在必行。

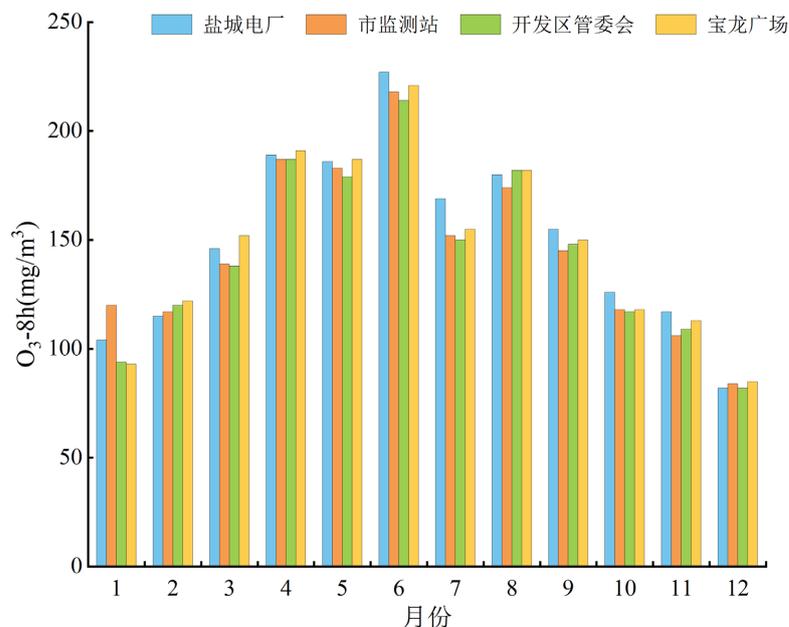
#### 3.1.2. 月变化

考虑到 2022 年能更好地反应盐城大市区的污染情况，故在此选择污染最为严重的 2022 年作为研究对象， $O_3$  月均浓度如下图 2 所示。各站点的臭氧月平均浓度在全年整体呈现中间高、两边低的变化特征，臭氧浓度高值主要出现在 4~8 月份。一般 1~2 月份及 12 月份为冬季，臭氧处在一年最低的水平，整体上小于  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，臭氧浓度级别为优；从 3 月开始，臭氧浓度逐步上升，但上升幅度有限，3 月份臭氧月

均浓度在  $100\sim 160\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，臭氧浓度级别为良；4~8 月份，光化学反应显著增强，同时夏季边界层高度较高，臭氧的垂直传输过程较强，臭氧浓度维持在高浓度水平[5]。期间，臭氧在 6 月达到峰值  $184\sim 227\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，在 7 月小幅下降至  $176\ \mu\text{g}/\text{m}^3$  及以下，这是由于盐城在 7 月处于梅雨季节，降水增多所致，8 月臭氧小幅回升。4~8 月各站点臭氧月均浓度大多都在  $160\sim 227\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，臭氧分级为轻度污染。9~10 月仅个别站点臭氧月均浓度超过  $160\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，11 月各站点浓度在  $114\sim 136\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，臭氧分级为良好。



**Figure 1.** Variation of annual average O<sub>3</sub> concentration in the main urban area of Yancheng City from 2019 to 2023  
**图 1.** 2019~2023 年盐城大市区 O<sub>3</sub> 年均浓度变化



**Figure 2.** Monthly variation of O<sub>3</sub> concentration in the main urban area of Yancheng City in 2022  
**图 2.** 2022 年盐城大市区 O<sub>3</sub> 的月浓度变化

### 3.1.3. 日变化

盐城大市区臭氧浓度的逐日变化如图 3 所示, 各站点的趋势分布较为一致, 呈现多峰分布, 日浓度峰值出现在 4~9 月, 最高值出现在 6 月, 在 243~264  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 超过了环境空气质量二级标准。

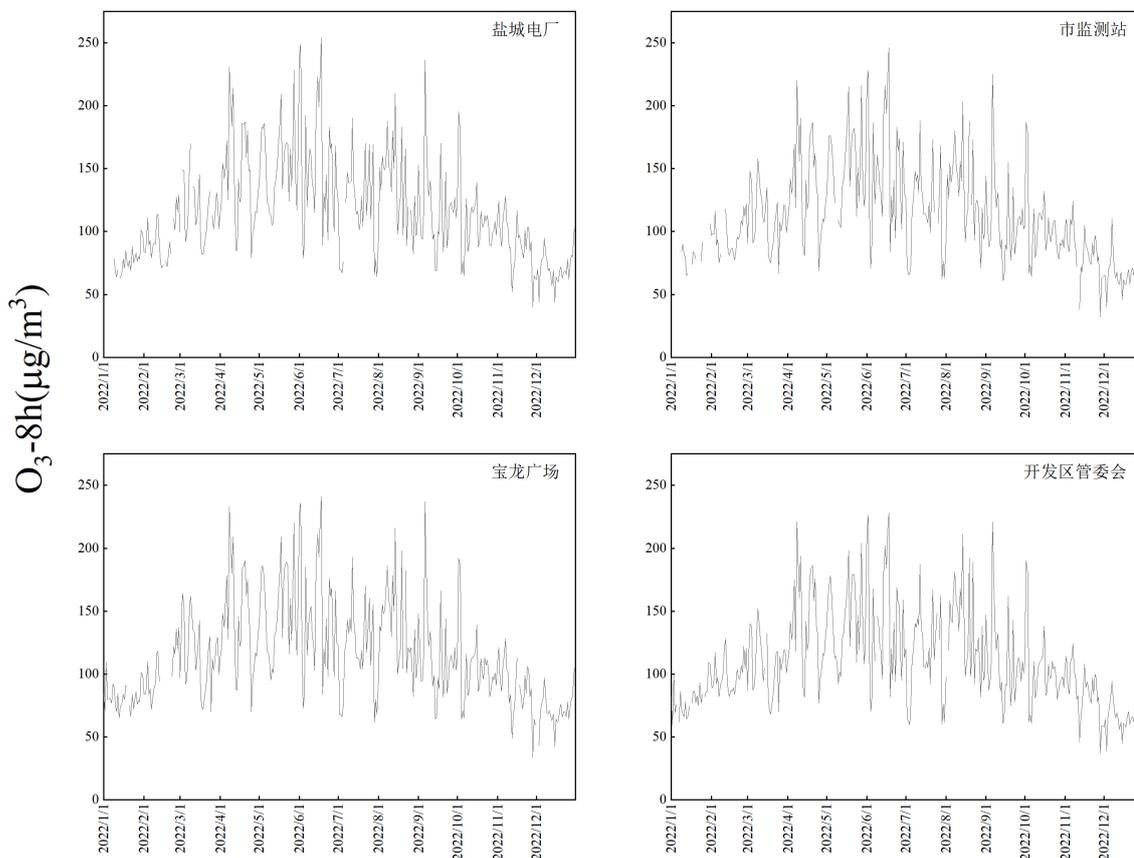


Figure 3. Daily variation of ozone concentration in the main urban area of Yancheng City

图 3. 盐城大市区臭氧日变化

### 3.2. 盐城大市区臭氧与气象因素的斯皮尔曼相关性分析

选取常见的气象因子——日平均温度、日平均相对湿度、日平均气压、日平均风速作为此次研究的自变量, 在 SPSS 软件中计算其与臭氧日浓度的相关性系数, 结果如下表所示:

Table 1. Correlation analysis between ozone and meteorological factors in the main urban area of Yancheng City

表 1. 盐城大市区臭氧与气象因素相关性分析

斯皮尔曼系数	O <sub>3</sub> 日均浓度	日平均气压	日平均温度	日平均相对湿度	日平均风速
O <sub>3</sub> 日均浓度		-0.429**	0.498**	-0.262**	-0.056*
日平均气压	-0.429**		-0.887**	-0.311**	-0.121**
日平均温度	0.498**	-0.887**		0.244**	0.038
日平均相对湿度	-0.262**	-0.311**	0.244**		-0.152**
日平均风速	-0.056*	-0.121**	0.038	-0.152**	

注: \*\*表示在 0.01 级别(双尾)相关性显著, \*表示在 0.05 级别(双尾)相关性显著。

由表 1 可知, 盐城大市区臭氧浓度与气压和相对湿度呈显著负相关, 与气温呈显著正相关。

低气压情况下大气层结稳定容易形成静稳、小风天气, 造成污染物的积累, 同时促进了气态污染物之间发生转化反应。因此, 气压越低, 臭氧浓度越高。

臭氧峰值往往出现在夏季高温时段, 这可能是因为 (1) 气温升高通常伴随着高紫外线辐射的大气条件, 从而增加臭氧的生成速率; (2) 气温升高导致臭氧前体物的主要汇项——过氧酰基硝酸酯(PAN)浓度降低, 导致臭氧浓度增加; (3) 气温升高往往伴随着辐射增强、水汽的减少, 并有利于异戊二烯的自然排放, 导致臭氧浓度增加[5]。

臭氧浓度与湿度呈负相关关系, 这是因为湿度越大, 水汽越多, 不仅能够通过相变不断吸热和放热, 而且可以与臭氧发生反应, 消耗近地面的臭氧[22]。此外, 相对湿度越高, 降水的概率就会越高。湿清除也会迅速地降低大气中臭氧的浓度。

臭氧浓度与日平均风速呈现负相关关系, 且相关性较低, 这是因为研究站点位于市区, 臭氧大多为本地生成, 低风速对臭氧堆积有一定促进作用[17]。

### 3.3. 臭氧的非线性滞后效应

由于气象参数之间可能存在一定相关性, 为提高模型运行结果稳定性, 需要排除具有共线性的自变量, 表 1 可知, 臭氧与日平均温度、日平均气压都有较高相关性, 且气压与温度存在明显的负相关性, Spearman 相关系数为-0.887, 这种情况下会导致模型模拟的误差, 因此气压和温度不应同时作为自变量[23]。考虑到臭氧与气温的相关性更强, 保留气温作为自变量, 因此输入 DLNM 模型中的自变量最终为日平均温度、日平均相对湿度和日平均风速。

在基于泊松(Poisson)分布的 DLNM 模型建立中, 对纳入模型中的每个自变量(日平均温度、日平均相对湿度、日平均风速)均选择自然三次样条函数作为转换基对自变量进行暴露和滞后维度上的转换, 从而进一步建立各自变量的交叉基。构建 DLNM 模型, 获取气象因素与 O<sub>3</sub> 的三维影响效应(暴露 - 滞后 - 响应关系)。

#### DLNM 建模过程

---

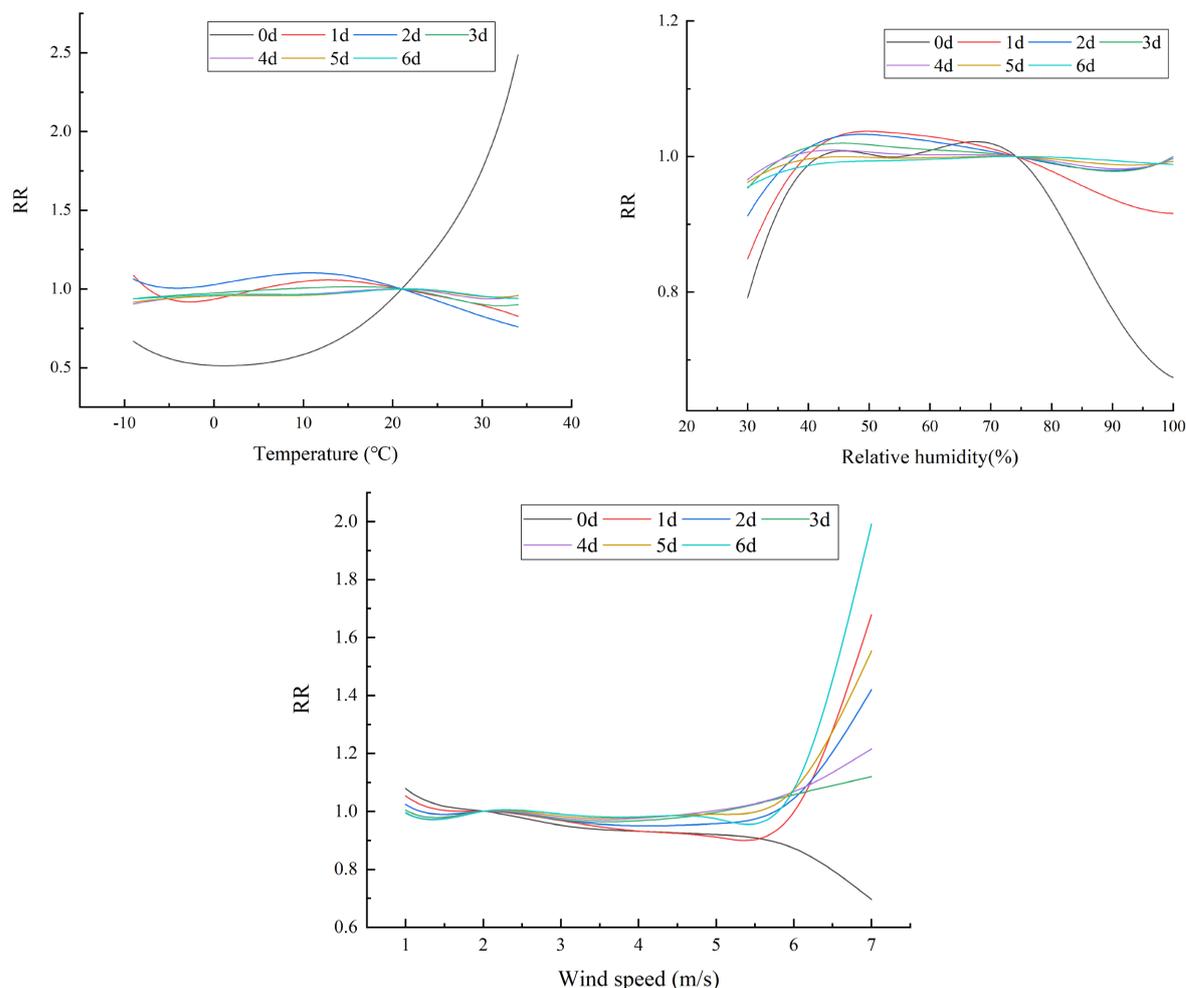
输入数据集  
调用 DLNM 程序  
为每个自变量建立交叉基进行形式转换  
构建 DLNM 模型  
获取各气象因素与 O<sub>3</sub> 的三维影响效应(暴露 - 滞后 - 响应关系)  
结束 DLNM 程序

---

DLNM 模拟结果中相对风险(Relative risk, RR)代表各影响因素变化引起的臭氧浓度改变的百分比, 当 RR 大于 1 时说明影响因素对臭氧浓度有正面影响, 当 RR 小于 1 时说明影响因素对臭氧浓度有负面影响[24]。图 4 显示了气象参数对臭氧浓度的多维影响效应。

DLNM 模拟结果表明, 在滞后 0~6 天内, 温度、湿度、风速对臭氧浓度的影响均表现出显著的时间变化特征和条件依赖性。高温(如 25℃及以上)显著促进臭氧的生成, 尤其在滞后 6 天内产生累积效应。低温则会在初期抑制臭氧的生成, 但抑制效果随时间逐渐减弱。湿度的影响既可促进也可抑制臭氧生成。在低湿度条件下, 臭氧生成在初期受到抑制, 但随后由于其他化学反应的累积, 抑制作用开始减弱。相对湿度对臭氧的影响呈现为“低湿短期促进、高湿持续抑制”的滞后效应模式: 低湿条件在滞后 0~4 天

持续促进臭氧生成, 较高相对湿度对臭氧生成有着持续的抑制作用。风速对臭氧浓度的影响主要体现在扩散作用。低风速条件下, 臭氧浓度容易累积, 而高风速则能够有效稀释臭氧及其前体物, 显著降低臭氧浓度。中等风速则会在一定程度上保持臭氧的生成与扩散的平衡。



**Figure 4.** Lagged effects of multiple influencing factors on ozone in Yancheng City

**图 4.** 盐城市多影响因素对臭氧的滞后影响效应

#### (1) 温度的滞后效应分析

滞后 0 天: 温度为 $-9^{\circ}\text{C}$ 时 RR 为 0.67, 表现为负相关, 这表明在极端低温条件下, 臭氧生成的风险显著降低。而在高温条件下(如  $25^{\circ}\text{C}$ ), RR 为 1.15, 表明高温对臭氧生成的显著促进作用。

滞后 2 天: 低温( $-9^{\circ}\text{C}$ )条件下臭氧生成的 RR 上升至 1.06, 这表明低温对臭氧的初期抑制作用逐渐减弱。而在气温达到  $25^{\circ}\text{C}$ 时, RR 达到了 1.38, 显示高温在滞后 2 天内对臭氧的促进作用更加明显。

滞后 4 天: 当温度为 $-7^{\circ}\text{C}$ 时的臭氧生成的 RR 为 0.90, 表明低温对臭氧生成的抑制效果逐渐恢复。而在  $25^{\circ}\text{C}$ 时, RR 为 1.40, 进一步表明高温在较长滞后期内能够持续促进臭氧生成。

滞后 6 天: 温度达到  $0^{\circ}\text{C}$ 时, RR 为 1.12, 这说明中等温度条件可能会逐渐促使臭氧生成, 尤其是在短时间内臭氧的前体物得以累积的情况下。而在高温( $25^{\circ}\text{C}$ )下, RR 上升至 1.32, 显示出高温对臭氧的强烈促进效应。

### (2) 湿度的滞后效应分析

滞后 0 天: 在相对湿度大于 75% 时 RR 始终小于 1, 表现为负相关, 这表明在高湿度条件下, 臭氧生成的风险显著降低。而在低湿度条件下(如 35%), RR 为 1.03, 表明较低相对湿度会促进臭氧的生成。

滞后 2 天: 高湿度(85%)条件下臭氧生成的 RR 上升至 0.95, 这表明高湿度对臭氧的初期抑制作用逐渐减弱。而在相对湿度降至 35% 时, RR 达到了 1.08, 显示在滞后 2 天内低湿度对臭氧的促进作用更加明显。

滞后 4 天: 当相对湿度为 80% 时的臭氧生成的 RR 为 0.92, 表明高湿度对臭氧生成的抑制效果有所恢复。而在 35% 低湿度条件下, RR 为 1.06, 进一步表明低湿度在较长滞后期内能够促进臭氧生成。

滞后 6 天: 相对湿度达到 60% 时, RR 为 1.01, 这说明中等湿度条件可能会逐渐促使臭氧生成, 尤其是在短时间内臭氧的前体物得以累积的情况下。而在湿度(>75%)条件下, RR 小于 1, 显示出在长滞后期间内高湿度对臭氧生成的抑制作用。另外, 低湿条件下 RR 值接近 1, 表明低湿对臭氧的生成没有显著影响。

### (3) 风速的滞后效应分析

滞后 0 天: 在风速为 1 m/s 的条件下, 滞后 0 天时的 RR 为 1.08, 表明低风速有利于臭氧累积。而风速为 5 m/s 时, RR 降低为 0.92, 显示高风速有助于臭氧的扩散, 降低其浓度。

滞后 2 天风速为 1 m/s 时的 RR 降为 1.02, 说明低风速对臭氧浓度的影响有所减弱。而在风速为 5 m/s 时, RR 为 0.96, 表明高风速对臭氧扩散的促进作用持续存在。

滞后 4 天: 风速为 3 m/s 时的 RR 为 0.97, 显示出中等风速条件下臭氧浓度变化趋于平稳。在高风速条件下, RR 为 1.00, 表明风速对臭氧浓度的影响逐渐达到一种平衡状态。

滞后 6 天: 风速为 4 m/s 时, RR 为 0.98, 说明中等风速对臭氧的扩散和生成保持平衡状态。而在高风速(6 m/s)下, RR 为 0.93, 表明高风速能够有效地稀释臭氧及其前体物, 从而降低臭氧浓度。

## 4. 讨论

(1) 盐城市 O<sub>3</sub> 浓度年际呈先降后升趋势, 月际呈中间高、两边低特征, 日际峰值集中在 4~9 月。

(2) 斯皮尔曼相关性分析显示, O<sub>3</sub> 浓度与气温呈显著正相关, 与气压、相对湿度呈显著负相关, 与风速呈弱负相关。

温度、湿度、风速与 O<sub>3</sub> 浓度具有显著的时变特征和条件依赖性。高温对 O<sub>3</sub> 生成的促进作用在滞后 0~6 天内持续存在并累积; 低温初期抑制 O<sub>3</sub> 生成, 后续抑制作用减弱。相对湿度对 O<sub>3</sub> 生成有明显的非线性影响, 呈现为“低湿短期促进、高湿持续抑制”的滞后效应模式: 低湿条件(≤35%)在滞后 0~4 天持续促进臭氧生成(RR > 1), 高湿条件(≥75%)在所有滞后期均表现为抑制(RR < 1), 且抑制强度在滞后 6 天仍显著。风速对 O<sub>3</sub> 浓度的影响主要体现在扩散作用, 低风速利于 O<sub>3</sub> 累积, 高风速促进 O<sub>3</sub> 扩散, 中等风速维持生成与扩散平衡。

## 基金项目

盐城市气象科技项目(YQK2023013)。

## 参考文献

- [1] 耿冠楠, 肖清扬, 郑逸璇, 等. 实施《大气污染防治行动计划》对中国东部地区 PM<sub>2.5</sub> 化学成分的影响[J]. 中国科学: 地球科学, 2020, 50(4): 469-482.
- [2] 杨欣, 杨元琴, 李红, 等. 基于气象条件指数的我国重点区域 PM<sub>2.5</sub> 和臭氧复合污染气象影响评估[J]. 环境科学, 2023, 44(12): 6433-6440.

- [3] 谢静晗, 李飒, 肖钟湧. 50年来中国臭氧总量时空变化特征[J]. 中国环境科学, 2022, 42(7): 2977-2987.
- [4] 严文莲, 刘端阳, 王磊, 等. 江苏 PM<sub>2.5</sub>-O<sub>3</sub> 复合污染特征及气象条件分析[J]. 中国环境科学, 2023, 43(10): 5098-5106.
- [5] 王骏星, 陈进, 成海容, 等. 武汉城市圈 O<sub>3</sub> 时空特征及气象因素的影响[J]. 环境科学与技术, 2023, 46(5): 142-151.
- [6] Liu, H., Liu, S., Xue, B., Lv, Z., Meng, Z., Yang, X., *et al.* (2018) Ground-Level Ozone Pollution and Its Health Impacts in China. *Atmospheric Environment*, **173**, 223-230. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.11.014>
- [7] 赵楠, 卢毅敏. 中国地表臭氧浓度估算及健康影响评估[J]. 环境科学, 2022, 43(3): 1235-1245.
- [8] Lu, X., Hong, J., Zhang, L., Cooper, O.R., Schultz, M.G., Xu, X., *et al.* (2018) Severe Surface Ozone Pollution in China: A Global Perspective. *Environmental Science & Technology Letters*, **5**, 487-494. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.8b00366>
- [9] 李飞, 孔少杰, 屈志光, 等. 中国臭氧时空分异及热点城市群气象关联特征[J]. 中国环境科学, 2023, 43(4): 1539-1549.
- [10] 胥雯, 杨皓, 何敏, 等. 成渝地区臭氧生成敏感性时空分布及影响因素[J]. 环境科学, 2025, 46(2): 736-745.
- [11] 陈燕玲, 周媛, 钱悦, 等. 基于 OMI 的江西省臭氧柱浓度时空分布特征及影响因素研究[J]. 生态环境学报, 2026, 35(1): 99-111.
- [12] 何雨璐, 王薇, 张小玲, 等. 2015-2022 年四川盆地臭氧污染时空分布特征及其人口暴露水平评估[J]. 生态与农村环境学报, 2025, 41(4): 506-516.
- [13] 王治非, 付华轩, 边萌, 等. 2019-2022 年济南市臭氧浓度变化特征及气象影响因素分析[J]. 中国环境监测, 2025, 41(2): 23-35.
- [14] Wang, T., Xue, L., Brimblecombe, P., Lam, Y.F., Li, L. and Zhang, L. (2017) Ozone Pollution in China: A Review of Concentrations, Meteorological Influences, Chemical Precursors, and Effects. *Science of the Total Environment*, **575**, 1582-1596. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.081>
- [15] 王俊彬, 李婷苑, 陈靖扬, 等. 临近热带气旋引发粤港澳大湾区臭氧污染的气象成因及预报模型构建[J/OL]. 中国环境科学, 1-18. [https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=Z3g7xh44\\_Zgr6JHhvHRLQjAW2BoeDskFG3zYiBMEF6JbcLDmYt-GRx-PWGs-iKubndyt\\_s7ES-9dKd0dotV8t1m7VeD5IZJDP-EpYa2PFtg980rGo\\_vl-PeqS4Bz0ZjcNsCdNes8oVH0kYnov2Pi6OTjbk2Uspsq8DytMmh89UP3o=&uniplatform=NZKPT&language=CHS,2026-03-01](https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=Z3g7xh44_Zgr6JHhvHRLQjAW2BoeDskFG3zYiBMEF6JbcLDmYt-GRx-PWGs-iKubndyt_s7ES-9dKd0dotV8t1m7VeD5IZJDP-EpYa2PFtg980rGo_vl-PeqS4Bz0ZjcNsCdNes8oVH0kYnov2Pi6OTjbk2Uspsq8DytMmh89UP3o=&uniplatform=NZKPT&language=CHS,2026-03-01).
- [16] 汤驰, 韩静, 李雨珊, 等. 海口市臭氧污染及气象条件特征[J]. 中国环境监测, 2022, 38(6): 125-132.
- [17] 李婷苑, 陈靖扬, 龚宇, 等. 2022 年广东省冬季一次臭氧污染过程的气象成因及潜在源区分析[J]. 环境科学, 2023, 44(7): 3695-3704.
- [18] 吉祝美, 马晶晶, 张俊. 盐城市区夏季环境空气中臭氧浓度变化规律及其影响因素分析[J]. 黑龙江环境通报, 2015, 39(3): 58-63.
- [19] 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.
- [20] 程焕友, 徐一凡, 等. 2015-2019 年盐城地区大气污染状况及特征分析[J]. 广东化工, 2022, 23(49): 191-194.
- [21] 赵玉敏, 等. 2020 年盐城市大丰区 O<sub>3</sub> 污染特征及气象影响因素[J]. 绿色科技, 2021, 6(23): 12.
- [22] 任丽红, 胡非, 王玮. 北京夏季 O<sub>3</sub> 垂直分布与气象因子的相关研究[J]. 气候与环境研究, 2005(2): 166-174.
- [23] Duan, W., Wang, X., Cheng, S., Wang, R. and Zhu, J. (2021) Influencing Factors of PM<sub>2.5</sub> and O<sub>3</sub> from 2016 to 2020 Based on DLNM and WRF-CMAQ. *Environmental Pollution*, **285**, Article ID: 117512. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117512>
- [24] 王乾恒. 郑州市大气 PM<sub>2.5</sub> 污染特征、健康风险及经济损失评价[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 中原工学院, 2023.