

# 武汉城市圈近地面臭氧时空分布影响因素研究

宫玺<sup>1,2</sup>, 邸忆<sup>3,4\*</sup>

<sup>1</sup>湖北经济学院低碳经济学院, 湖北 武汉

<sup>2</sup>碳排放权交易省部共建协同创新中心, 湖北 武汉

<sup>3</sup>湖北经济学院信息工程学院, 湖北 武汉

<sup>4</sup>湖北经济学院数字金融创新湖北省重点实验室, 湖北 武汉

收稿日期: 2024年10月1日; 录用日期: 2024年11月3日; 发布日期: 2024年11月19日

## 摘要

近地面臭氧已成为影响我国区域空气质量的主要大气污染物, 是臭氧前体物经过一系列的光化学反应生成的二次污染物。近地面高浓度臭氧会对生态、环境和人类健康等方面产生负面影响。本文以近地面臭氧为研究对象, 在分析城市臭氧时空分布规律的基础上, 通过对气象因子优选后利用广义相加模型以当地气象因子为变量对城市臭氧浓度进行拟合, 分析影响武汉城市圈近地面臭氧时空分布的主导气象因素。研究表明, 武汉城市圈臭氧污染一直未有缓解的趋势, 处于较高的污染水平, 武汉城市圈高浓度臭氧在相同的气候条件下(水热组合)具有一定的相似性, 即控制城市臭氧的主导气象因素有一定的地域性特征且主要受温度和下垫面等多方面综合因素的影响, 具有气温较高、内陆地区、城市化水平高等特征。

## 关键词

近地面臭氧, 时空分布, 气象因子, 武汉城市圈, 广义相加模型

# Study on the Influencing Factors of the Spatio-Temporal Distribution of Near-Surface Ozone in Wuhan City Group

Xi Gong<sup>1,2</sup>, Yi Di<sup>3,4\*</sup>

<sup>1</sup>School of Low Carbon Economics, Hubei University of Economics, Wuhan Hubei

<sup>2</sup>Collaborative Innovation Center for Emissions Trading System Co-Constructed by the Province and Ministry, Wuhan Hubei

<sup>3</sup>School of Information Engineering, Hubei University of Economics, Wuhan Hubei

<sup>4</sup>Hubei Key Laboratory of Digital Financial Innovation, Hubei University of Economics, Wuhan Hubei

\*通讯作者。

## Abstract

Near-surface ozone has become a major atmospheric pollutant affecting regional air quality in China, formed as a secondary pollutant through a series of photochemical reactions from ozone precursors. High concentrations of near-surface ozone can adversely affect ecology, the environment, and human health. This paper focuses on near-surface ozone and, based on an analysis of the spatio-temporal distribution patterns of urban ozone, uses a Generalized Additive Model (GAM) to fit urban ozone concentrations with local meteorological factors as variables after selecting optimal meteorological factors. The study analyzes the dominant meteorological factors influencing the spatio-temporal distribution of near-surface ozone in the Wuhan City Group. The research results indicate that ozone pollution in the Wuhan City Group has shown no trend of alleviation and remains at a relatively high pollution level. High concentrations of ozone in the Wuhan City Group exhibit certain similarities under the same climatic conditions (combinations of water and heat), suggesting that the dominant meteorological factors controlling urban ozone have regional characteristics and are mainly influenced by a combination of factors, such as temperature and underlying surface conditions, characterized by higher temperatures, inland locations, and high levels of urbanization.

## Keywords

Near-Surface Ozone, Spatio-Temporal Distribution, Meteorological Factors, Wuhan City Group, Generalized Additive Model

Copyright © 2024 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

臭氧是导致全球气候变暖的重要温室气体之一[1]。对流层臭氧(ground-level O<sub>3</sub>)是由臭氧前体物在光照的条件下生成的二次大气污染物[2],它对生态系统、人类健康和植物等都会产生一系列的负面影响[3]。

武汉城市圈的发展是实现“中部崛起”战略的重要环节。然而,经济发展的同时也带来了一系列环境问题。近年来,随着国家大气污染防治攻坚战的深入,武汉城市圈 PM<sub>2.5</sub>逐年降低,空气质量有所好转。但随着工业和机动车数量的增加,氮氧化物(NO<sub>x</sub>)和挥发性有机化合物(VOCs)等臭氧前体物有所增长,近地面臭氧浓度快速上升。臭氧在大气层上部是一种环境友好物质,而在人口集中的城市地表却是不折不扣的大气污染物。

在臭氧的生成过程中,气象因子发挥着重要作用,各气象因子在 O<sub>3</sub>的形成过程中发挥着独特的作用。近年来,随着全国范围内的臭氧监测站点的增多,国内学者对于气象因素对臭氧的影响方面的研究越来越多,但是上述分析得知,研究多集中在单个城市,尤其是京津冀、长三角和珠江三角洲等发达地区和重点城市,对全国范围内不同城市臭氧和气象因子之间的关系的研究较少[4]-[6]。

综上,臭氧的时空分布主要受气象因素的影响,但是目前对于此研究还存在以下不足:气象因素对臭氧的影响的研究多采用普通线性模型和相关性等方法探讨两者关系,以描述某些城市或者小规模区域臭氧与气象因子之间的特征关系为主,对于不同气象因素组合对臭氧时空分布规律的影响缺乏系统阐释,且普通线性模型在以气象因子为变量拟合臭氧的过程中存在不符合线性模型假设前提和拟合精度偏低的现象。因此,气象因素作为臭氧控制因素如何影响城市臭氧时空分布格局的问题还有待进一步研究。

## 2. 数据与方法

### 2.1. 研究区域及数据来源

本文研究对象为武汉城市圈, 选取国家设置大气污染监测站点且有近地面臭氧监测数据的武汉市、黄石市、鄂州市、黄冈市、孝感市与咸宁市六城市为具体的研究区域。

本文臭氧浓度(MDA8 O<sub>3</sub>)数据来源于中国空气质量在线监测分析平台(<https://www.aqistudy.cn/>), 剔除异常值和错误数据。本文所涉及的气象数据来源于 NCEP/NCAR 全球再分析气象数据集(<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/timeseries/daily/>)。

### 2.2. 研究方法与相关模型理论

本文以气象因子为变量运用 GAM 对武汉城市圈 6 城市 MDA8 O<sub>3</sub> 进行拟合。

#### 2.2.1. 相关性分析

由于城市近地面臭氧是臭氧前体物在气象因素作用下生成的二次大气污染物, 气象因子对近地面臭氧有着重要的影响, 因此利用城市近地面臭氧浓度与单个气象因子之间进行相关性分析作为因素筛选, 作为后续建模的重要依据。

#### 2.2.2. 广义相加模型

##### (一) 模型理论

广义相加模型(Generalized Additive Model, GAM)为非参数函数估计模型, 它可以灵活地探测数据间的复杂关系, 不需要满足线性回归模型的假设前提, 模型中每一个加性项使用单个光滑函数来估计, 每一加性项可以解释因变量如何随自变量变化而变化[7]。GAM 模型的建立需使用统计软件 R 语言中“mgcv”安装包, 其基本方程式为:

$$g(\mu_i) = X_i\theta + f_1(x_{1i}) + f_2(x_{2i}) + \dots + \varepsilon_i \quad (1)$$

在以气象因子为变量拟合臭氧浓度的模型中, 式中  $i$  代表第  $i$  天观测气象值。 $f_j(x)$  代表因变量和气象因子之间线性或非线性的光滑函数拟合[8]。 $X_i\theta$  表示线性回归, 例如普通的一次线性回归或者是矢量二元参数。 $g(\mu_i)$  是连接函数, 表示公式右端的自变量与公式左端的因变量之间的预期响应  $\mu_i$ 。

##### (二) 建模过程

###### 1) 参数选取

通过相关性分析发现温度、湿度、风速、风向等气象因子和时间因子对城市臭氧浓度较大, 为了使不同城市之间的模型具有可比性, 决定采用对 6 个城市臭氧浓度都具有重要影响的同一组气象参数组合来对不同的城市进行拟合。本文最终建模所用的自变量如表 1 所示。

**Table 1.** List of meteorological parameters for building GAM

**表 1.** GAM 建模气象参数列表

No.	变量名称	数据类型
1	500 mb 位势高度	数值型
2	700 mb 纬向平均风速	数值型
3	1000 mb 相对湿度	数值型
4	地表气压	数值型
5	地表 2 米最高温	数值型
6	DOY (Day of Year)	数值型

续表

7	DOW (Day of Week)	二分类
8	传输距离(12 小时)	数值型
9	传输方向(12 小时)	二分类

## 2) 建模参数优化

① 赤池信息准则: R 软件中的 “mgcv” 安装包提供了模型变量的多种选择方式, 采用更为系统性的选择方法, 赤池信息准则 AIC 的方法来让所有城市使用统一的气象参数组合[9]。

$$AIC = 2k - 2\ln(L) \quad (2)$$

② 应该删去的自变量: 在模型初步建好之后, 做自变量相对于  $f(x)$  的散点图, 若图中自变量  $X$  (某气象因素) 对应的  $f(x)$  值总是在 0 附近徘徊, 且 95% 置信区间全部在 0 附近徘徊, 表明此自变量  $X$  对  $f(x)$  未起到任何解释作用, 则应该删去此类自变量。

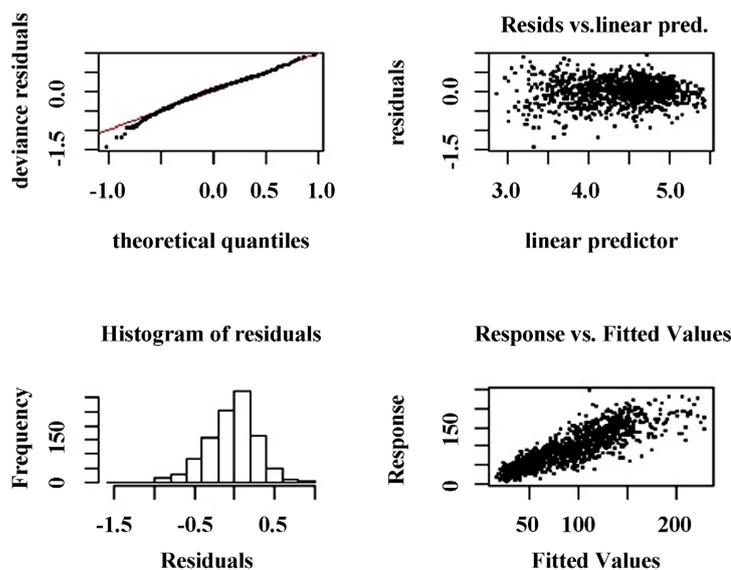
## 3) 模型控制

① 处罚立方回归样条函数(CRS): 公式(1)介绍了广义相加模型的基本公式。处罚立方回归样条函数(CRS)用作函数  $f(x)$  与各个气象因素之间的非线性响应。

② 自由度: 各个函数  $f$  的光滑拟合程度由自由度(edf)的节点个数决定。

## 4) 模型验证

图 1 是以武汉市为例, 运用 `gam.check` 代码运行生成的模型验证结果。在图 1 中, 图的左上方是样本分位点相对于理论分位点的 QQ 检验图, 从图中可以看出 QQ 散点与对角线非常接近, 这表明假设分布是合理的; 右上方为残差相对于模型拟合值的散点图, 随着自变量值的增大, 残差始终处于近乎恒定的 0 附近徘徊; 左下方是模型残差频数图, 残差近乎恒定, 始终在 0 附近且呈正态分布; 右下方是观测值相对于拟合值的散点图, 随着观测值的增大, 拟合值也随之增大, 变量响应之间呈现出积极的线性关系。



注: 左上角为 QQ 检验(样本分位点相对于理论分位点); 右上角为散点图(模型残差相对于模型拟合值散点图); 左下方为模型残差频数分布图; 右下方为散点图(观测值相对于模型拟合值散点图)。

Figure 1. Model validation results for Wuhan

图 1. 武汉市模型验证结果

本文武汉城市圈 6 城市以气象参数拟合臭氧浓度的所有 GAM 模型中, 运用 `gam.check` 命令生成的模型检验图均未见异常且表现良好。

### 2.2.3. F 统计值

采用 GAM 模型中的 F 统计值(F-statistic)来确定每个城市的主导气象因子, F 统计值是确定模型中主导变量的有效工具[10]。GAM 模型中的 F 统计值越大, 表明该变量在模型中的地位越重要。

### 2.2.4. 样条拟合曲线

样条拟合曲线(Spline fit plot)是  $f(x)$  对  $x$  的样条拟合图, 即以模型中的任意参数  $x$  为横坐标,  $f(x)$  为纵坐标, 以  $K-1$  为结点控制  $f(x)$  对  $x$  的拟合。

### 2.2.5. 后向轨迹模型

本文采用后向轨迹模型(HYSPLIT V4.9) GDAS  $1^\circ \times 1^\circ$  分辨率数据计算北京时间下午 3 点监测点向前推 12 小时的后向轨迹数据信息加入到 GAM 模型中。

## 3. 武汉城市圈近地面臭氧时空分布特征

### 3.1. 臭氧空气质量超标分析

表 2 显示了武汉城市圈 6 城市 2015~2020 年间 MDA8 O<sub>3</sub> 浓度值的统计结果。从表中可以看出 MDA8 O<sub>3</sub> 浓度最大值排名前三位的城市为黄冈( $262 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) > 孝感( $259 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) > 鄂州( $242 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )。在这 6 个城市中, MDA8 O<sub>3</sub> 浓度均值排名前三位的城市为黄冈( $102.77 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) > 孝感( $98.12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) > 咸宁( $97.33 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )。6 个城市 3 年间均未全部达到环境空气质量标准(GB 3095-2012)的臭氧 II 级浓度限值(日最大 8 小时平均值  $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 黄冈、武汉和咸宁超标天数最多, 分别为 250、226 和 204 天, 全年超标天数占有效数据比为 11.47%、10.37%和 9.36%。

**Table 2.** Statistics of ozone concentration (MDA8 O<sub>3</sub> value) for 6 cities in Wuhan city group (2015~2020)

**表 2.** 武汉城市圈 6 城市臭氧浓度(日最大八小时平均值)统计(2015~2020)

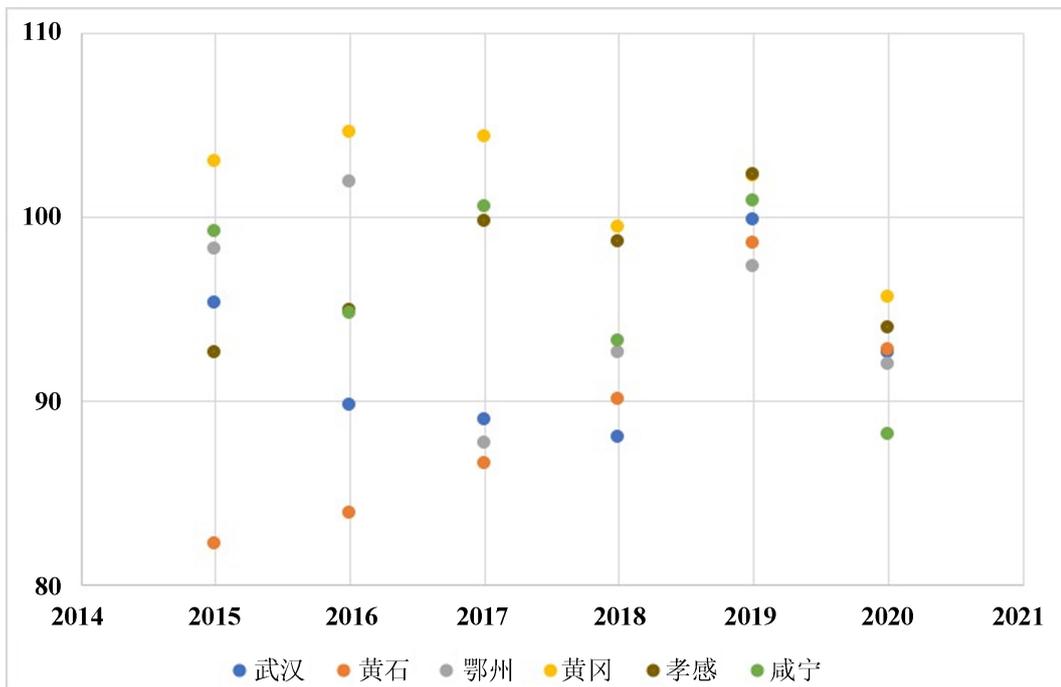
No.	城市	最大值	最小值	平均值	标准偏差	未达标天数*
1	武汉	239	4	93.65	48.70	226
2	黄石	220	3	90.08	45.64	155
3	鄂州	242	2	96.24	46.03	202
4	黄冈	262	3	102.77	45.21	250
5	孝感	259	3	98.12	44.05	197
6	咸宁	226	3	97.33	44.96	204

注: \*臭氧浓度单位:  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。未达标天数: 超过环境空气质量标准(GB 3095-2012)中臭氧 II 级浓度限值(日最大 8 小时平均值  $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )的天数(2015~2020)。

### 3.2. 臭氧浓度时间分布特征

#### 3.2.1. 年均值分布特征

图 2 与表 3 为武汉城市圈 6 城市 2015~2020 年 MDA8 O<sub>3</sub> 浓度年均值时间序列分析结果。图 2 横坐标为年份, 纵坐标为 MDA8 O<sub>3</sub> 浓度值(单位  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )。从图中可以看出, 2015~2020 年间武汉城市圈 6 个主要城市近地面臭氧浓度变化幅度不大, 处于  $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ~ $110 \mu\text{g}/\text{m}^3$  之间, 黄冈市 6 年间臭氧浓度年均值处于很高的水平。



**Figure 2.** Time series analysis of yearly mean ozone concentration (MDA8 O<sub>3</sub> value) for 6 cities in Wuhan city group (2015~2020)  
**图 2.** 武汉城市圈 6 城市年均臭氧浓度(日最大八小时平均值)时间序列分析(2015~2020)

表 3 为此 6 城市臭氧年均浓度值数据, 从表中可以看出 2019 年孝感市臭氧年均浓度值略高于黄冈市。

**Table 3.** Statistics of annual average concentration values of ozone concentration (MDA8 O<sub>3</sub> value) for 6 cities in Wuhan city group (2015~2020)  
**表 3.** 武汉城市圈 6 城市臭氧浓度(日最大八小时平均值)年均浓度值统计(2015~2020)

年份/城市	武汉	黄石	鄂州	黄冈	孝感	咸宁
2015	95.33	82.19	98.23	102.97	92.61	99.22
2016	89.77	83.88	101.85	104.57	94.87	94.72
2017	88.96	86.57	87.66	104.31	99.71	100.54
2018	88.01	90.09	92.58	99.40	98.66	93.25
2019	99.84	98.54	97.32	102.20	102.27	100.88
2020	92.59	92.74	91.95	95.58	93.98	88.16

综上, 结合图 2 与表 3 分析得知黄冈市臭氧污染在武汉城市圈 6 城市中污染最为严重, 且在武汉城市圈 6 城市臭氧污染中一直未有缓解趋势。

### 3.2.2. 季节均值分布特征

表 4 为武汉城市圈 6 城市季均臭氧浓度统计表。从表中可以看出, 武汉城市圈 6 城市臭氧夏季均值均高于其他季节的臭氧均值, 且冬季为臭氧均值最低的季节。

武汉城市圈 6 城市均属于“臭氧夏季高峰期”。这种类型比较常见。臭氧低值常年处于冬季, 臭氧

浓度随着气温的增高而上升, 特别是夏季, 臭氧达到峰值。武汉城市圈 6 城市臭氧呈现出明显的夏季 > 春季 > 秋季 > 冬季的特征, 这与安俊琳等的研究结论一致[11]。

**Table 4.** Statistics of seasonal mean ozone concentration (MDA8 O<sub>3</sub> value) for 6 cities in Wuhan city group (2015~2020)  
**表 4.** 武汉城市圈 6 城市季均臭氧浓度(日最大八小时平均值)统计(2015~2020)

城市/季节	春季	夏季	秋季	冬季
武汉	103.45	122.89	92.14	50.32
黄石	100.51	112.79	93.21	48.83
鄂州	105.56	121.64	97.57	54.45
黄冈	114.27	124.78	104.69	61.70
孝感	111.22	117.57	100.40	58.21
咸宁	109.83	110.16	103.77	60.48

### 3.2.3. 臭氧浓度空间分布特征

本文研究对象为武汉城市圈的武汉市、黄石市、鄂州市、黄冈市、孝感市和咸宁市六城市。根据上文此 6 城市年均臭氧与季均臭氧浓度分布来看, 位于武汉城市圈东部区域的黄冈是污染最为严重的, 而位于东南部的黄石市污染较轻。总体来说, 武汉城市圈 6 城市臭氧污染属于具备区域性, 但臭氧污染值波动无较大的变化, 这可能与武汉市属于中国中部地区, 东南西北方向未有一个相对较为清洁即大气污染背景值较低而对区域臭氧污染造成稀释的结果[12]。

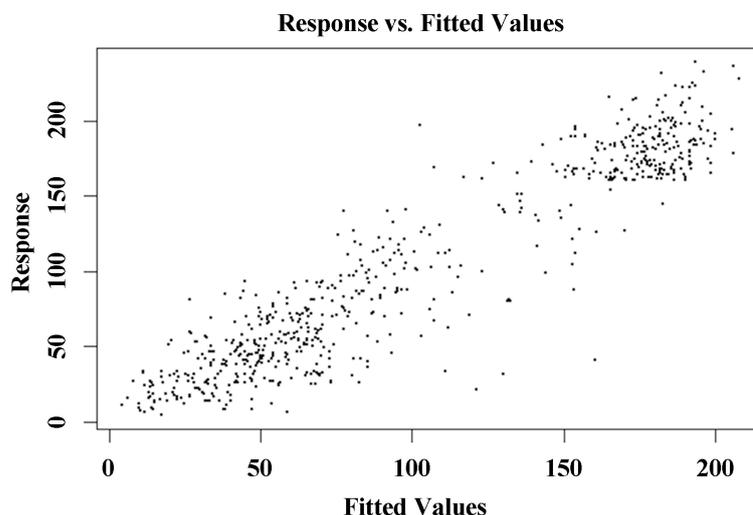
## 4. 气象因素对武汉城市圈臭氧时空分布规律的影响

### 4.1. 武汉城市圈臭氧 GAM 拟合结果

每个城市都用表 1 中的气象数据单独建立 GAM 模型, 调整 R<sup>2</sup> 用来评估 GAM 模型的拟合程度, 表 5 显示了武汉城市圈 6 城市的调整 R<sup>2</sup> 和模型残差的标准偏差。从表中可以看出, GAM 模型能很好地拟合 MDA8 O<sub>3</sub> 的日变化。在这 6 个城市中, 调整 R<sup>2</sup> 从 0.84 (孝感)到 0.9 (咸宁/黄石)不等, 模型残差的标准偏差从 18.41 (咸宁)到 23.87 (孝感)不等, 每个城市模型的残差都呈现出正态分布且围绕 0 附近徘徊。图 3 是以武汉市 MDA8 O<sub>3</sub> 观测值相对于拟合值散点图。以上结果表明, GAM 模型能很好地以气象因素为变量拟合 MDA8 O<sub>3</sub>。

**Table 5.** Adjusted R<sup>2</sup> results of GAM model for 6 cities in Wuhan city group (2015~2020)  
**表 5.** 武汉城市圈 6 城市 GAM 模型调整 R<sup>2</sup> 结果(2015~2020)

NO.	城市	调整 R <sup>2</sup>	模型残差标准偏差
1	武汉	0.88	22.27
2	黄石	0.90	19.03
3	鄂州	0.87	21.65
4	黄冈	0.88	19.94
5	孝感	0.84	23.87
6	咸宁	0.90	18.41



**Figure 3.** Scatterplot of model fit MDA8 O<sub>3</sub> values versus observed MDA8 O<sub>3</sub> values for Wuhan (2015~2020)  
**图 3.** 武汉市模型拟合臭氧值与观测臭氧值散点图(2015~2020)

## 4.2. 影响城市臭氧时空分布规律的主导气象因子

### 4.2.1. 城市臭氧主导气象因子识别

表 6 是根据 F 统计值计算得出的武汉城市圈 6 个城市前 3 位对臭氧最具影响力的因素, F 统计值越大, 表明该因素对模型的贡献越大。从表中可以看出, 所有的城市在全年数据分析中, DOY 因素都处于非常重要的地位(前三位), 武汉和鄂州的 DOY 的 F 统计值分别高达 37.3 和 13.68, 这表明季节/时段因素在这两个城市中的影响远远高于其他气象因素。从表 6 中可以看出, DOY 和 4 个气象因素 1000 mb 相对湿度、地表 2 米最高温、700 mb 纬向平均风速和地表气压是这 6 个城市中最为敏感和对模型起主导作用的影响因素。武汉城市圈 6 个城市前三位主导气象因素的重要性顺序各不相同, 体现了在此区域内部不同的主导气象因素组合会对近地面臭氧产生不同的影响。

**Table 6.** Leading impact factors of ozone for 6 cities in Wuhan city group

**表 6.** 武汉城市圈 6 城市臭氧主导影响因子

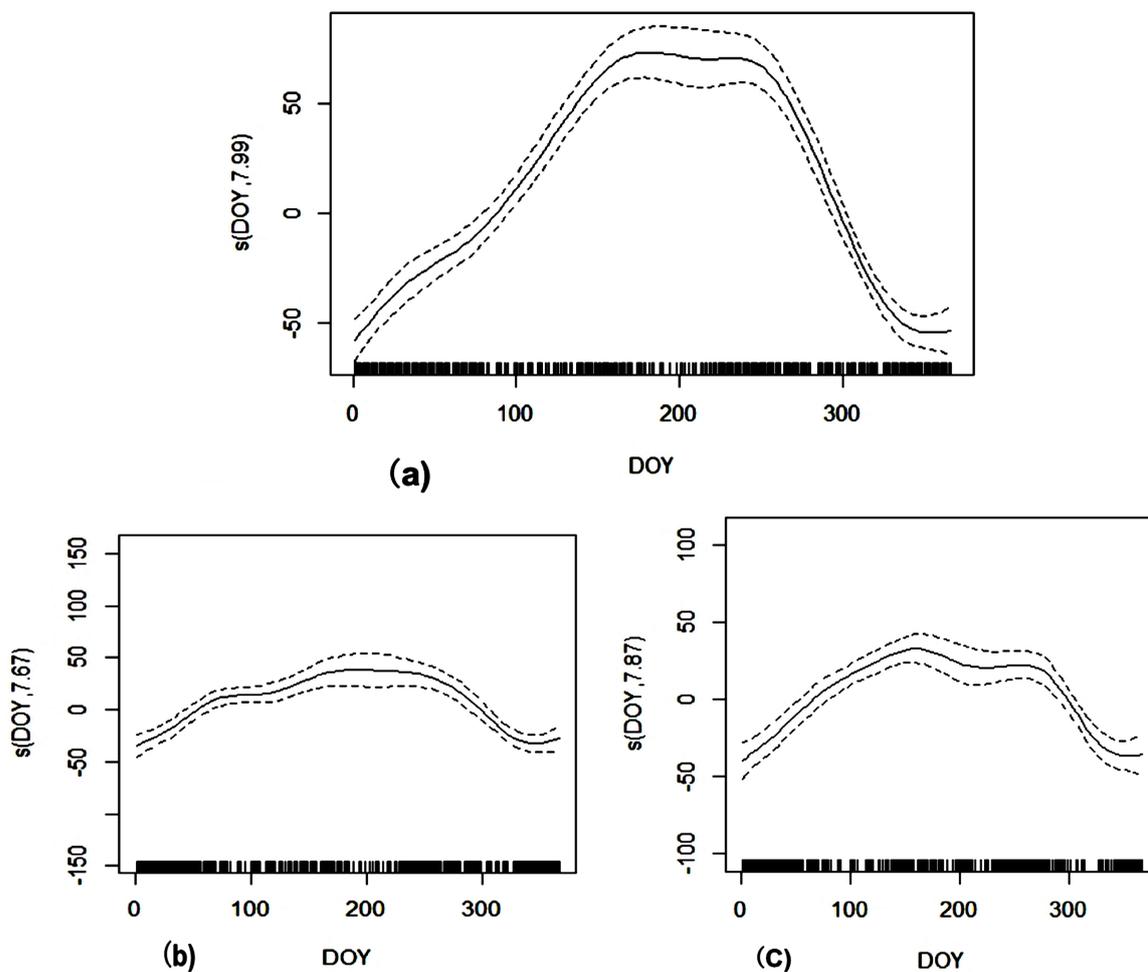
城市	重要性排名					
	1		2		3	
	变量名称	F 统计值	变量名称	F 统计值	变量名称	F 统计值
武汉	DOY	37.30	1000 mb 相对湿度	33.25	地表 2 米最高温	6.10
黄石	1000 mb 相对湿度	18.62	DOY	14.75	地表 2 米最高温	5.73
鄂州	DOY	13.68	地表 2 米最高温	8.22	700 mb 纬向平均风速	3.62
黄冈	DOY	13.94	地表 2 米最高温	7.92	地表气压	5.10
孝感	1000 mb 相对湿度	18.59	地表 2 米最高温	10.30	DOY	6.63
咸宁	1000 mb 相对湿度	24.10	DOY	10.99	地表气压	3.15

### 4.2.2. 主要气象因素对臭氧浓度的影响

通过 4.2.1 的分析, 得出了 6 个城市臭氧影响因素重要性排名前三名。

1) DOY: Day of Year

由 F 统计值结果可知, 在 6 个城市中有 3 个城市的 DOY (Day of Year)为臭氧的最重要的影响因素, 分别为武汉、鄂州和黄冈市, 由表 6 可知, DOY 的 F 统计值分别为 37.3、13.68 和 13.94。图 4 是根据表 6 选取了武汉、鄂州和黄冈市 DOY 因素的样条拟合曲线图, 图中虚线是 95%置信区间, 沿 X 轴的线段为气象因子频率。X 轴为各个自变量的值, Y 轴为  $f(x)$ 值, 图 4 的 X 轴为 DOY (Day of Year), Y 轴则为  $f(DOY)$ , 此处设置控制节点默认值  $K = 10$ , 即最多 9 个节点对数据进行样条拟合, 武汉、鄂州与黄冈市 DOY 样条拟合图中 95%的置信区间非常小, 这说明武汉、鄂州与黄冈市 DOY 的样条拟合程度很好。

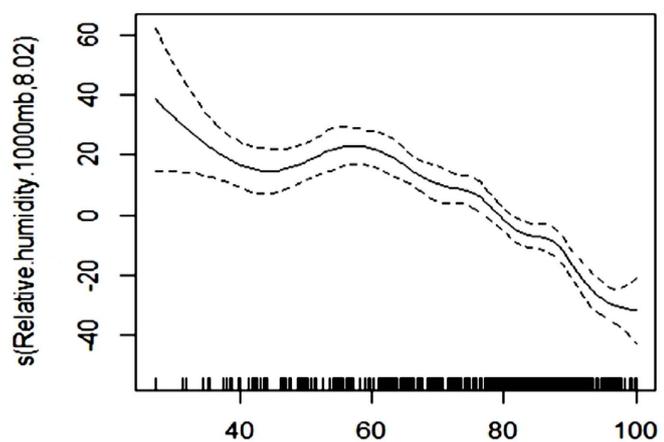


注: 图中虚线为变量响应的 95%置信区间。

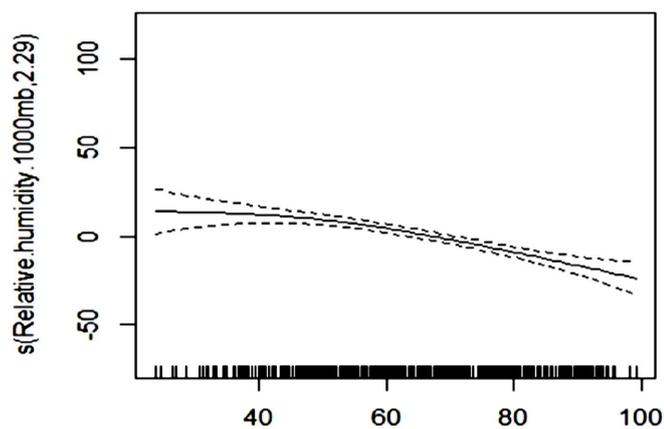
**Figure 4.** Spline fit curves of MDA8 O<sub>3</sub> to DOY for Wuhan (a), Ezhou (b), and Huanggang (c)  
**图 4.** 武汉(a)、鄂州(b)、黄冈(c)臭氧浓度(日最大八小时平均值)与 DOY 样条拟合曲线

## 2) 1000 mb 相对湿度

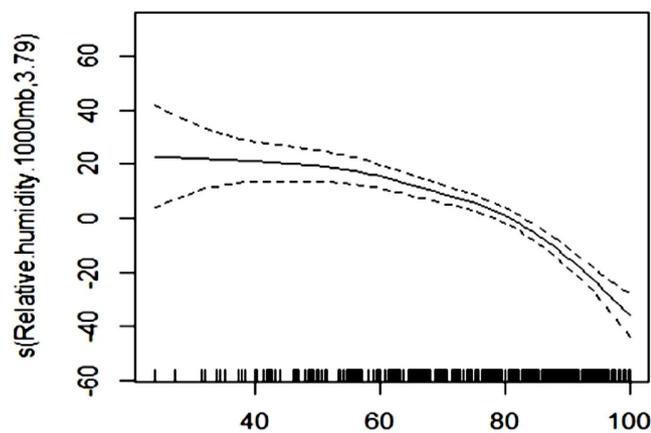
由 F 统计值结果可知, 1000 mb 相对湿度为黄石、孝感和咸宁最重要的主导气象因素, 从图 5(a)黄石、图 5(b)孝感和图 5(c)咸宁看出, 这 3 个城市  $f(x)$ 与 1000 mb 相对湿度都为反比例关系, 随着相对湿度的增加,  $f(x)$ 下降, 且拟合效果非常好, 95%置信区间非常小。这充分印证了表 6 中的结果即 1000 mb 相对湿度是这 3 个城市影响臭氧最为重要的气象因素, 且  $f(x)$ 黄石、孝感和咸宁的自由度(edf)分别为 7.79、7.13 和 8.78, 样条拟合曲线非常平滑, 这说明 1000 mb 相对湿度是这两个城市臭氧最直接的气象影响因子。



(a) Relative.humidity.1000mb



(b) Relative.humidity.1000mb



(c) Relative.humidity.1000mb

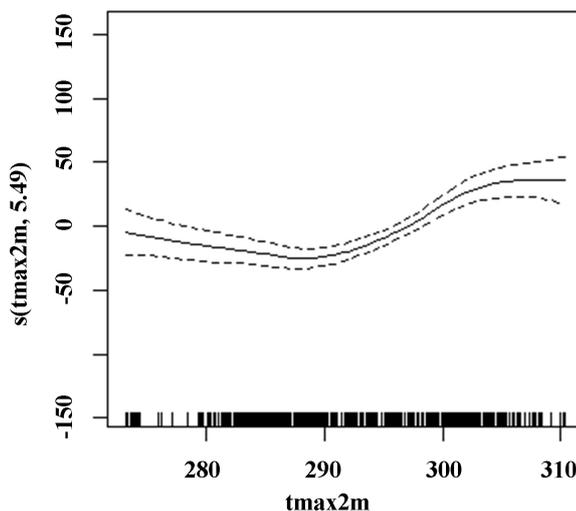
注：图中虚线为变量响应的 95%置信区间。

**Figure 5.** Spline fit curves of MDA8 O<sub>3</sub> to 1000 mb relative humidity samples for for Huangshi (a), Xiaogan (b) and Xianning (c)

**图 5.** 黄石(a)、孝感(b)和咸宁(c)臭氧浓度(日最大八小时平均值)与 1000 mb 相对湿度样条拟合曲线

### 3) 地表 2 米最高温

从表 6 可以看出, 地表 2 米最高温为武汉城市圈控制近地面臭氧浓度的主导气象因素的现象。图 6 是以鄂州市为例,  $f(x)$ 与地表 2 米最高温的样条拟合曲线图, 从图中可以看出, 在 290 K (17°C)之后, 随着气温的升高,  $f(x)$ 升高, 两者呈现出明显的正比例关系。这个结果和 Pearce 等的研究结果一致, 他们发现当温度高达 17°C 和 22°C 的时候, 臭氧会随着温度的升高而增加[9]。虽然当温度高于 305 K (32°C)时, 响应函数值相对较低, 但是温度对臭氧的影响依然具有很强的统计学意义, 因为从图中可以看出  $f(x)$ 的 95%置信区间不在 0 附近徘徊。



注: 图中虚线为变量响应的 95%置信区间。

Figure 6. Spline fit curves of MDA8 O<sub>3</sub> to 2-meter maximum temperature samples for Ezhou

图 6. 鄂州市臭氧浓度(日最大八小时平均值)与地表 2 米最高温样条拟合曲线

## 4.3. 社会因素对武汉城市圈臭氧时空分布规律的影响

### 4.3.1. 城市下垫面的影响

结合上文分析发现, 武汉城市圈处于高臭氧浓度水平, 与其所处亚热带季风气候区有着直接的关系, 其气候特点为夏季高温多雨, 冬季温和少雨, 由于受到海洋气流的影响, 降水是这一区域最为明显的特征。位于亚热带季风气候区的高臭氧浓度城市均是由于气温较高、年/日温差较小引起的。亚热带季风气候区属于湿润型, 1000 mb 相对湿度、地表 2 米最高温是该区域除 DOY 外影响臭氧最重要的气象因子。由主导气象因子与气候带之间的关系结果可知, 城市臭氧的主导气象因素在相同的气候条件下(水热组合)具有一定的相似性, 即控制城市臭氧的主导气象因素有一定的地域性特征。

下垫面同样会对城市臭氧浓度产生影响。通过对高臭氧浓度水平的城市的下垫面特征分析发现, 武汉城市圈 6 城市均位于内陆地区, 从四个方向来的气团都容易使武汉市臭氧浓度升高, 由于武汉处于长江中下游平原地区, 四周均为较发达的工业区, 所以, 没有任何一个方向的气团可以减弱武汉的臭氧浓度水平, 从而使武汉城市圈臭氧浓度过高。

### 4.3.2. 社会经济发展水平的影响

以武汉为首的武汉城市圈在中部经济发展中处于重要地位, 武汉为超大城市, 人口超 1000 万, 武汉城市圈区域城市化明显, 人口较多, 拥有相当数量的机动车和工业企业。

综上, 高臭氧浓度城市主要受温度和下垫面等多方面综合因素的影响, 具有气温较高、内陆地区、城市化水平高等特征。

## 5. 结论

本文以近地面臭氧为研究对象, 在分析城市臭氧时空分布规律的基础上, 通过对气象因子优选后利用统计模型 GAM 以当地气象因子为变量对城市 MDA8 O<sub>3</sub> 进行拟合, 分析影响武汉城市圈近地面臭氧时空分布的主导气象因素。主要研究结论如下:

### 1) 武汉城市圈城市臭氧浓度时空变化规律

2015~2020 年间, 武汉城市圈均未全部达到环境空气质量标准(GB 3095-2012)的臭氧 II 级浓度限值(日最大 8 小时平均值 160  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 超标天数城市排名为黄冈(250 天) > 武汉(226 天) > 咸宁(204 天), MDA8 O<sub>3</sub> 最大值排名为黄冈(262  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) > 孝感(259  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) > 鄂州(242  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), MDA8 O<sub>3</sub> 均值排名为黄冈(102.77  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) > 孝感(98.12  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) > 咸宁(97.33  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )。年均臭氧浓度武汉城市圈 6 个城市近地面臭氧浓度变化幅度不大, 处于 80  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ~110  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  之间, 黄冈市 6 年间臭氧浓度年均值处于很高的水平。此结果表明, 武汉城市圈 6 个城市臭氧污染一直未有缓解的趋势; 季均臭氧浓度武汉城市圈 6 个城市均属于“臭氧夏季高峰型”。这种类型比较常见。臭氧低值常年处于冬季, 臭氧浓度随着气温的增高而上升, 特别是夏季, 臭氧达到峰值。从臭氧浓度空间分布来看, 位于武汉城市圈东部区域的黄冈市污染最为严重, 而位于东南部的黄石市污染较轻。总体来说, 武汉城市圈 6 个城市臭氧污染属于具备区域性, 但臭氧污染值波动无较大的变化。

### 2) 气象因素对武汉城市圈城市臭氧时空分布规律的影响

武汉城市圈城市在全年数据分析中, DOY 和 4 个气象因素 1000 mb 相对湿度、地表 2 米最高温、700 mb 纬向平均风速和地表气压是这 6 个城市中最为敏感和对模型起主导作用的影响因素。其中, DOY 因素都处于非常重要的地位(前三位), 武汉和鄂州的 DOY 的 F 统计值分别高达 37.3 和 13.68, 这表明季节/时段因素在这两个城市中的影响远远高于其他气象因素。

### 3) 社会因素对武汉城市圈臭氧时空分布规律的影响

武汉城市圈 6 个城市均位于内陆地区, 从四个方向来的气团都容易使武汉市臭氧浓度升高, 由于武汉处于长江中下游平原地区, 四周均为较发达的工业区, 所以, 没有任何一个方向的气团可以减弱武汉的臭氧浓度水平, 从而使武汉城市圈臭氧浓度过高。且以武汉为首的武汉城市圈在中部经济发展中处于重要地位, 武汉为超大城市, 人口超 1000 万, 武汉城市圈区域城市化明显, 人口较多, 拥有相当数量的机动车和工业企业。

综上, 武汉城市圈高浓度臭氧在相同的气候条件下(水热组合)具有一定的相似性, 即控制城市臭氧的主导气象因素有一定的地域性特征且主要受温度和下垫面等多方面综合因素的影响, 具有气温较高、内陆地区、城市化水平高等特征。

## 参考文献

- [1] Sitch, S., Cox, P.M., Collins, W.J. and Huntingford, C. (2007) Indirect Radiative Forcing of Climate Change through Ozone Effects on the Land-Carbon Sink. *Nature*, **448**, 791-794. <https://doi.org/10.1038/nature06059>
- [2] Tu, J., Xia, Z., Wang, H. and Li, W. (2007) Temporal Variations in Surface Ozone and Its Precursors and Meteorological Effects at an Urban Site in China. *Atmospheric Research*, **85**, 310-337. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2007.02.003>
- [3] Lelieveld, J., Evans, J.S., Fnais, M., Giannadaki, D. and Pozzer, A. (2015) The Contribution of Outdoor Air Pollution Sources to Premature Mortality on a Global Scale. *Nature*, **525**, 367-371. <https://doi.org/10.1038/nature15371>
- [4] 洪盛茂, 焦荔, 何曦, 等. 杭州市区大气臭氧浓度变化及气象要素影响[J]. 应用气象学报, 2009, 20(5): 602-611.
- [5] 叶芳, 安俊琳, 王跃思, 等. 北京近地层 O<sub>3</sub>、NO<sub>x</sub>、CO 及相关气象因子的分析[J]. 生态环境, 2008, 17(4): 1425-1432.

- [6] 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.
- [7] Wood, S.N. (2006) Generalized Additive Models: An Introduction with R. Chapman and Hall/CRC.
- [8] Lou Thompson, M. (2001) A Review of Statistical Methods for the Meteorological Adjustment of Tropospheric Ozone. *Atmospheric Environment*, **35**, 617-630. [https://doi.org/10.1016/s1352-2310\(00\)00261-2](https://doi.org/10.1016/s1352-2310(00)00261-2)
- [9] Pearce, J.L., Beringer, J., Nicholls, N., Hyndman, R.J. and Tapper, N.J. (2011) Quantifying the Influence of Local Meteorology on Air Quality Using Generalized Additive Models. *Atmospheric Environment*, **45**, 1328-1336. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.11.051>
- [10] Camalier, L., Cox, W. and Dolwick, P. (2007) The Effects of Meteorology on Ozone in Urban Areas and Their Use in Assessing Ozone Trends. *Atmospheric Environment*, **41**, 7127-7137. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.04.061>
- [11] 安俊琳, 王跃思, 孙扬. 气象因素对北京臭氧的影响[J]. 生态环境学报, 2009, 18(3): 944-951.
- [12] Gong, X., Kaulfus, A., Nair, U. and Jaffe, D.A. (2017) Quantifying O<sub>3</sub> Impacts in Urban Areas Due to Wildfires Using a Generalized Additive Model. *Environmental Science & Technology*, **51**, 13216-13223. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b03130>