

# 郑州市2020年PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>污染特征及其驱动因素分析

冉航行, 陈阳\*, 张乐乐

郑州师范学院, 河南 郑州  
Email: \*voyageran@163.com

收稿日期: 2021年6月30日; 录用日期: 2021年7月30日; 发布日期: 2021年8月6日

## 摘要

PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>是大气污染研究的重要内容, 基于2020年郑州市自然气象和社会经济数据, 本文分析了PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>污染特征, 并借助地理探测器探讨影响污染物浓度的驱动因素。郑州市2020年PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>污染表现出明显的季节性, PM<sub>2.5</sub>污染主要分布在空气污染严重的秋冬季节, O<sub>3</sub>污染主要分布在空气质量优良的春夏季节。通过地理探测器分析自然气象因素和社会经济因素对污染物的影响表明: 对PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>浓度变化影响最大的前三位驱动因素分别是平均温度(0.39)、环境污染专用设备(0.37)、塑料制品(0.35)和平均温度(0.58)、露点(0.39)、塑料制品(0.31), 任何两种因子的交互作用都要大于单一因子对污染物浓度变化的影响, 露点和相对湿度交互后对PM<sub>2.5</sub>浓度变化的影响最大(0.61), 平均温度和二产用电占比交互后对O<sub>3</sub>浓度变化的影响最大(0.73)。研究显示自然气象因素和社会经济因素交互效应, 对郑州市2020年PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>浓度的变化起重要作用。

## 关键词

郑州, 地理探测器, 驱动因素

## The Pollution Characteristics and Their Driving Factors of PM<sub>2.5</sub> and O<sub>3</sub> in Zhengzhou of 2020

Hanghang Ran, Yang Chen\*, Lele Zhang

Zhengzhou Normal University, Zhengzhou Henan  
Email: \*voyageran@163.com

Received: Jun. 30<sup>th</sup>, 2021; accepted: Jul. 30<sup>th</sup>, 2021; published: Aug. 6<sup>th</sup>, 2021

\*通讯作者。

## Abstract

**PM<sub>2.5</sub> and O<sub>3</sub> are important contents of air pollution research. Based on the natural meteorological and socio-economic data of Zhengzhou in 2020, this paper analyzes the pollution characteristics of PM<sub>2.5</sub> and O<sub>3</sub> and discusses the driving factors affecting the concentrations of pollutants by using Geodetector. The concentrations of PM<sub>2.5</sub> and O<sub>3</sub> show obvious seasonal changes. PM<sub>2.5</sub> pollution was mainly distributed in autumn and winter with serious air pollutions, and O<sub>3</sub> pollution was mainly distributed in spring and summer with good air qualities. The results of Geodetector analyses indicate that the top three driving factors affecting the concentrations of PM<sub>2.5</sub> and O<sub>3</sub> were average temperature (0.39), special equipment for environmental pollution (0.37), plastic products (0.35) and average temperature (0.58), dew point (0.39), plastic products (0.31), respectively. The influence of the interaction of any two factors on the change of pollutant concentration is greater than that of a single factor. The interaction of dew point and relative humidity has the greatest impact on the concentration change of PM<sub>2.5</sub> (0.61), and the interaction of average temperature and the proportion of electricity consumption in secondary industry has the greatest impact on the concentration change of O<sub>3</sub> (0.73). Hence, the interaction of natural meteorological factors and socio-economic factors played an important role in the changes of PM<sub>2.5</sub> and O<sub>3</sub> concentrations in Zhengzhou.**

## Keywords

Zhengzhou, Geodetector, Driving Factors

Copyright © 2021 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

当前大气污染已经成为世界各国面临的重大挑战之一[1] [2], 大气污染严重危害人体健康, 给生态环境、气候变化等带来诸多不利影响[3] [4]。

2021年5月份中华人民共和国生态环境部颁布的《2020中国生态环境公报》[5]显示, 在337个地级及以上城市环境空气质量评价中, 以细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)、臭氧(O<sub>3</sub>)、可吸入颗粒物(PM<sub>10</sub>)、NO<sub>2</sub>和SO<sub>2</sub>为首要污染物的超标天数, 分别占总超标天数的51.3%、43.1%、5.0%、0.6%和不足0.1%, 未出现以CO为首要污染物的超标情况。与2019年相比, PM<sub>10</sub>和CO超标天数比例下降, NO<sub>2</sub>超标天数持平, PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>超标天数比例上升[6]。

PM<sub>2.5</sub>是导致霾污染的主要污染物[7], 它可以吸收和散射太阳光, 降低能见度, 具有显著的气候与环境效应[8]。PM<sub>2.5</sub>进入体内后, 会对人体的呼吸系统造成危害[9]。O<sub>3</sub>是光化学污染最主要的产物, 是一种强氧化剂, 对流层大气O<sub>3</sub>浓度增高, 会危害生态化境、影响植物生长, 并产生一系列不利于人体健康的影响[10] [11]。PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>虽属于不同类型的空气污染物, 但两者在化学上紧密联系, 具有共同的前体物NO<sub>x</sub>和VOC<sub>x</sub>, 当前体物浓度发生变化时会引发污染物浓度的复杂变化[12] [13]。

京津冀大气污染传输通道“2+26”城市是我国开展大气污染研究的重点对象。郑州市作为其中的典型城市, 人口众多, 交通发达, 经济发展, 城市化建设不断加快, 且气候冷暖适中, 四季分明[14]。按照空气质量综合评价指数, 在168个城市环境空气质量排名中, 郑州市已连续多年位于空气质量最差的城

市之列。如 2019 年排名为倒数 19 位[6]，2018 年排名倒数 18 位[15]，2017 年排名倒数第 9 位[16]等。

韩晋仙等(2019) [17]研究发现郑州市 2018 年的空气质量和首要污染物具有明显的季节变化特征，夏秋季节空气环境质量优于春冬季节。于世杰等(2017) [18]通过对空气质量在线监测数据分析，发现郑州市夏季 O<sub>3</sub> 每日最大 8 h 浓度具有显著“周末效应”，O<sub>3</sub> 小时浓度日变化呈单峰型分布，在 15:00~16:00 达到峰值，早晨 07:00 达到谷值。

目前关于污染物来源和传输的研究主要有正交矩阵因子分析 PMF (Positive Matrix Factorization) [19]，该方法可对污染物的本底来源进行解析[20]；空气质量模型法 CAMx (Potential Source Contribution Function) [21]，该方法和气象要素相结合可推导不同来源污染物的贡献及污染时段的传输特征[22]；化学质量平衡受体模型 CMB (Chemical Mass Balance) [23]，该方法可分析污染物组成成分贡献及与气象条件之间的关系[24]；高时空分辨率的排放清单与大气动力-化学在线耦合模式 WRF/Chem (Weather Research and Forecasting/Chemistry)是气象研究和预报模型的结合，有利于探究污染物本底污染源的排放和区域输送特性[25]；向后轨迹模式等多种算法，以研究地区污染物的输送途径和潜在源区[26] [27] [28]。但以上研究方法除了对数据有限定条件外，都只是分析自变量对因变量的单一影响，难以揭示和分析时空差异造成的影响，较少涉及自然气象因素和社会经济因素的综合影响。

本文通过对郑州市 2020 年不同季节污染物的特征进行分析，并借助地理探测器(Geodetector) [29] 探究自然气象因素和社会经济要素对污染物特征的影响。目前地理探测器在该区域的应用主要集中在文化设施布局、城市住宅价格和零售业空间格局等[30] [31] [32]，尚未见到对污染物驱动因素的分析。因此本研究可用于了解郑州市不同季节污染特征及不同影响因子对污染特征的影响，对郑州市有效防控 PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub> 污染，提高环境空气质量，走上城市环境保护与经济发展协调的可持续发展道路具有重要意义。

## 2. 数据来源及研究方法

### 2.1. 数据来源

郑州市 2020 年 AQI、PM<sub>2.5</sub> 浓度和 O<sub>3</sub> 浓度等逐小时数据源于空气质量历史数据查询网 (<https://www.aqistudy.cn/historydata>)。气象数据来自 Weather Underground (<https://www.wunderground.com>)，记录了郑州市新郑机场站点 2020 年包括温度、相对湿度、气压、降水、风速、风向等指标的逐小时数据。

郑州市 2020 年规模以上工业综合能源消费量(万吨标准煤)、工业用电量(万千瓦时)、塑料制品(万吨)、环境污染专用设备(万台)、发电量(亿千瓦时)、第二产业用电量/工业总用电量(二产用电占比)和节能环保支出(亿元)等社会经济逐月数据来自于郑州市统计局的统计月报

(<http://tjj.zhengzhou.gov.cn/tjyb/index.jhtml>)。

### 2.2. 研究方法

本研究采用地理探测器研究影响 PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub> 浓度的驱动因素，其核心思想基于若自变量对因变量有重要影响，则自变量和因变量的空间或时间分布应该具有相似或一致性[29]。基于上述原理，本文利用自然气象因素和社会经济因素分析影响 PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub> 浓度的驱动因素。

## 3. 结果分析与讨论

为分析郑州市 2020 年空气污染的季节特征，表 1 中给出了郑州市 2020 年各月份 AQI 达标和超标天数、PM<sub>2.5</sub> 月均浓度、PM<sub>2.5</sub> 月超标天数、O<sub>3</sub>-8h (O<sub>3</sub> 日最大 8 h 滑动平均浓度)月均浓度及月超标天数等数据。

### 3.1. 郑州市 AQI、PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub> 时间分布特征

从表 1 中可看出, 2020 年郑州市空气优良的天数为 288 天, 全年占比 78.7%, 轻度、中度、重度和严重污染的天数为 48、20、9、1 天, 分别占比 13.1%、5.5%、2.5% 和 0.3%。从月份来看, 3 月至 10 月空气质量优良, 轻度和中度污染天数占总天数的 6.5%。1 月和 12 月污染程度最高, 优良天数在当月分别占比为 45.2% 和 16.1%, 11 月和 2 月次之, 优良天数占比为 63.3% 和 72.4%, 这四个月份中出现了不同程度的中度和重度的天气污染状况。从季节角度分析, 空气优良的月份主要集中在春季和夏季, 空气污染严重的季节主要集中在秋季和冬季。

郑州市 2020 年 PM<sub>2.5</sub> 的月均浓度变化范围为 22~120  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 超标天数分布在 1~3 月和 10~12 月, 对应的浓度变化范围为 47~120  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 平均值 72  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。PM<sub>2.5</sub> 月均最高浓度(120  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )和最多超标天数(25 天), 均出现在 1 月份。PM<sub>2.5</sub> 的高浓度分布主要集中在秋冬季节, 与 AQI 的污染分布一致。

郑州市 2020 年 O<sub>3</sub>-8h 的月均浓度变化范围为 46~172  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 超标天数分布在 4~9 月, 对应的浓度变化范围为 125~172  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 平均值 148  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。月均高浓度(172  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )和最多超标天数(17 天), 均出现在 6 月份。O<sub>3</sub>-8h 的高浓度分布主要集中在春夏季节, 与 AQI 污染分布和 PM<sub>2.5</sub> 的超标分布相反(表 1)。

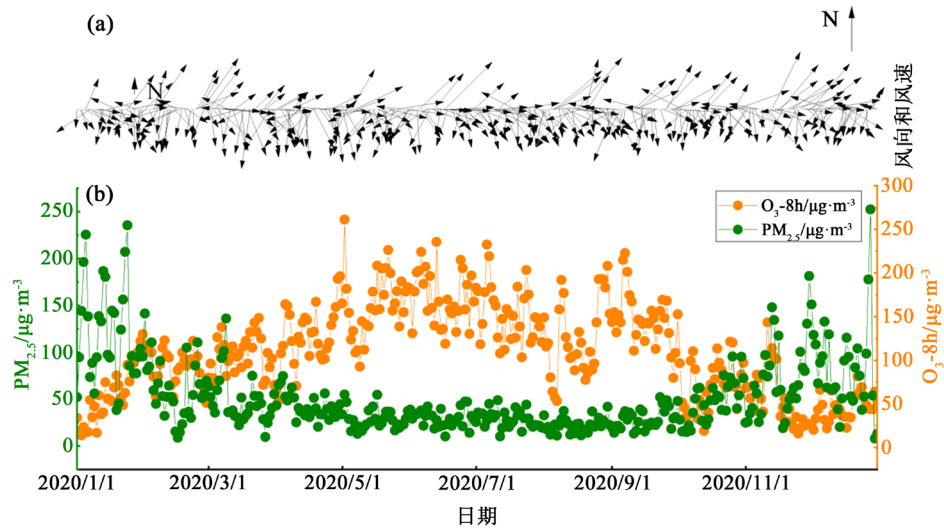
**Table 1.** Distribution of the monthly AQI, the monthly mean concentrations of PM<sub>2.5</sub> and O<sub>3</sub>-8h and days of non-attainment  
**表 1.** 2020 年郑州市各月份 AQI 分布情况和 PM<sub>2.5</sub>、O<sub>3</sub>-8h 月均浓度及超标天数

	AQI					PM <sub>2.5</sub>		O <sub>3</sub> -8h	
	优良	轻度	中度	重度	严重	月均浓度 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	超标天数/d	月均浓度 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	超标天数/d
1 月	5	12	7	7	0	120	25	61	0
2 月	21	7	1	0	0	60	8	93	0
3 月	25	4	2	0	0	48	3	105	0
4 月	29	1	0	0	0	43	0	128	6
5 月	28	3	0	0	0	29	0	164	15
6 月	29	1	0	0	0	30	0	172	17
7 月	31	0	0	0	0	29	0	153	12
8 月	31	0	0	0	0	22	0	125	7
9 月	30	0	0	0	0	28	0	147	7
10 月	26	4	1	0	0	47	3	75	0
11 月	19	6	4	1	0	70	11	58	0
12 月	14	10	5	1	1	84	15	46	0
总计	288	48	20	9	1		65		64
比例	78.7%	13.1%	5.5%	2.5%	0.3%		17.8%		17.5%

### 3.2. PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub> 污染与气象要素的相互关系

气象要素对大气污染的形成和消除有重要影响, 风向和风速等对污染物的水平输送起着重要作用, 而大气的温度、相对湿度等直接影响了大气的化学反应速率。图 1 展示了全年风速风向图和 PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub>-8h 的全年浓度分布。

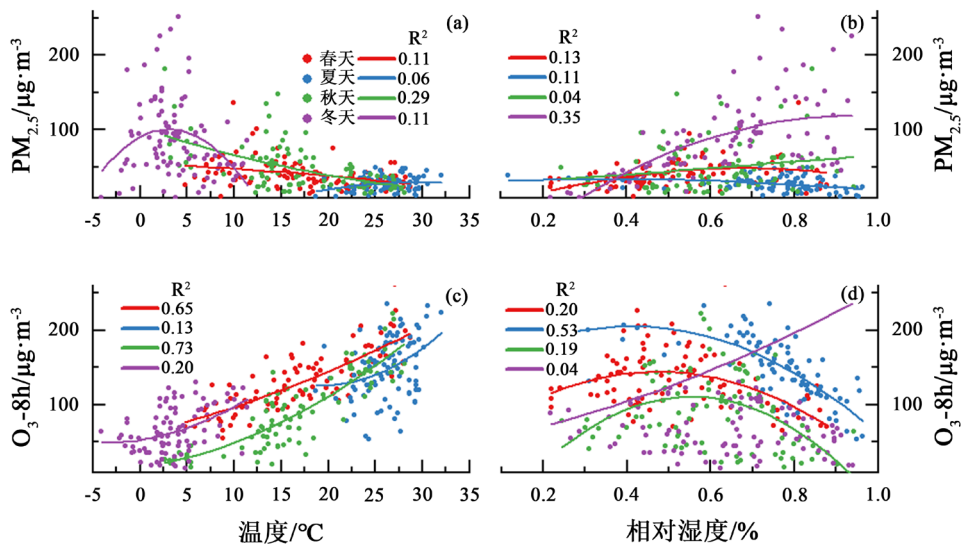
从图 1(a) 全年的风速风向图中可以看出郑州市全年盛行南风, 在秋冬季节来自西北方向的风增多。全年的 PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub>-8h 分布表明两者浓度在全年呈现出此消彼长的趋势(图 1(b)), 尤以春夏季节最为明显, 但风速风向和 PM<sub>2.5</sub>、O<sub>3</sub>-8h 的浓度变化之间未表现出明显的相关性。



**Figure 1.** (a) Annual wind speed and direction of Zhengzhou; (b) Annual variation of  $PM_{2.5}$  and  $O_3$ -8h concentrations in Zhengzhou

**图 1.** (a) 郑州市全年风速风向图; (b) 郑州市全年  $PM_{2.5}$  和  $O_3$ -8h 浓度变化

图 2 中展示了不同季节  $PM_{2.5}$  和  $O_3$ -8h 日均浓度与温度和相对湿度的相关性。 $PM_{2.5}$ -温度的拟合优度( $R^2$ )在不同季节具有不同表现,且差异较大。春夏秋冬四季的拟合优度分别为 0.11、0.06、0.29 和 0.11 (图 2(a))。除了秋季  $PM_{2.5}$ -温度拟合优度较大,为 0.29 外,其余季节拟合优度均较低。 $PM_{2.5}$ -相对湿度的相关性在不同季节,也具有不同的表现,其拟合优度在春夏秋冬四季分别为 0.13、0.11、0.04 和 0.35 (图 2(b))。除了冬季  $PM_{2.5}$ -相对湿度拟合优度较大为 0.35 外,其余季节拟合优度较低。 $PM_{2.5}$  的高浓度值基本均出现在秋冬季节,受平均温度和相对湿度的影响较大。较低的拟合优度表明除了温度和相对湿度外,还有其他因素控制了  $PM_{2.5}$  的浓度变化。



**Figure 2.** Scatter and fitting diagrams of (a)  $PM_{2.5}$  daily mean concentration versus temperature; (b)  $PM_{2.5}$  daily mean concentration versus relative humidity; (c)  $O_3$ -8h daily mean concentration versus temperature; (d)  $O_3$ -8h daily mean concentration versus relative humidity, under different seasons

**图 2.** 不同季节(a)  $PM_{2.5}$  日均浓度 - 温度; (b)  $PM_{2.5}$  日均浓度 - 相对湿度; (c)  $O_3$ -8h 日均浓度 - 温度; (d)  $O_3$ -8h 日均浓度 - 相对湿度散点图及拟合关系图



$O_3$ -8h-温度的拟合优度在春夏秋冬四季分别为 0.65、0.13、0.73 和 0.20，在春季和秋季出现了较高的相关性，分别为 0.65 和 0.73 (图 2(c))，说明  $O_3$ -8h 在春、秋季的高浓度受温度影响较大，在夏季和冬季  $O_3$ -8h 和温度的相关性较低。尽管拟合优度有所差异， $O_3$ -8h 和温度之间整体表现出了正相关性。 $O_3$ -8h-相对湿度的拟合优度在春夏秋冬四季分别为 0.20、0.53、0.19 和 0.04 (图 2(d))，在夏季出现了较高的相关性为 0.38，但其余季节相关性较低。以上分析表明  $O_3$ -8h 在夏季的高浓度值受到了其他因素的共同作用 [33] [34]。从图中也可得出  $O_3$ -8h 相对湿度的相关性随相对湿度大小发生改变(图 2(d))，在相对湿度大于 0.6 时，两者之间则表现出了明显的相关性( $R^2 = 0.62$ )。为了进一步研究影响郑州地区  $PM_{2.5}$  和  $O_3$ -8h 污染特征的因素，本文接下来采用地理探测器进行分析。

## 4. 地理探测器

### 4.1. 驱动因素的选择和数据处理

$PM_{2.5}$  和  $O_3$  的浓度变化原因复杂，概括而言可分为自然气象因素和社会经济因素。社会经济因素中规模以上工业综合能源消费量(X1)和工业用电量(X2)、塑料制品(X3)、发电量(X4)、二产用电占比(X5)等参数可以反映经济增长对环境的污染[35]，而环境污染专用设备(X6)和节能环保支出(X7)等反映了经济增长对环境污染的抑制作用。气象因素中选择气温(X8)、露点(X9)、相对湿度(X10)、风速(X11)、 $NO_2$ (X12)、 $PM_{2.5}$ (X13)、 $O_3$ -8h(X14)等因子。选择这些因子的原因在于：气温对  $O_3$  的光化学反应速率有密切影响[36] [37] [38]，风速会影响  $O_3$  及其前体物的扩散和传输速度[39] [40]，相对湿度对  $O_3$  及其前体物有显著的冲刷、沉降等清除作用[41] [42]。同时  $O_3$  和  $PM_{2.5}$  之间具有复杂的相互作用，因此气象因素也会影响到  $PM_{2.5}$  的浓度变化[43] [44]。

本次计算取自然气象因子的日均值，对社会经济因素和自然气象因素数值进行离散化处理，用地理探测器探测不同影响因子与  $PM_{2.5}$  和  $O_3$  浓度之间的相关性，并计算相关因子的贡献。

### 4.2. 影响 $PM_{2.5}$ 浓度变化的因素

#### 4.2.1. 因子探测分析

利用因子探测器来确定影响因子对  $PM_{2.5}$  浓度变化影响程度的结果如图 3 所示。影响因子值  $q$  的范围为

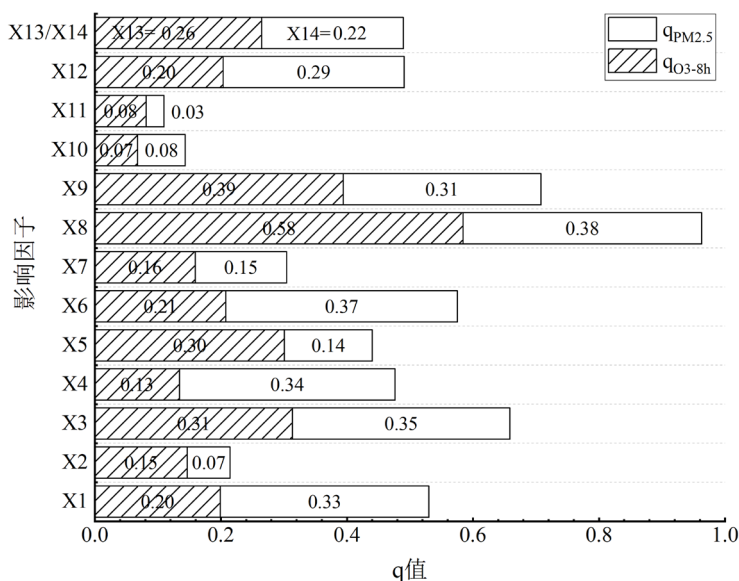


Figure 3.  $q$  statistic of factor detection on  $PM_{2.5}$  and  $O_3$ -8h  
图 3.  $PM_{2.5}$  和  $O_3$ -8h 因子探测  $q$  统计量

0.03~0.38, 对其有显著性影响的有平均温度(0.39), 环境污染专用设备(0.37), 塑料制品(0.35), 发电量(0.34), 规模以上综合能源消费量(0.33)和露点(0.31)等。平均温度对  $PM_{2.5}$  浓度影响最大, 与  $PM_{2.5}$  浓度在不同季节发生较大变化吻合; 其次是环境污染专用设备, 表明环境污染设备的使用对大气中  $PM_{2.5}$  浓度影响显著; 塑料制品、发电量和规模以上综合能源消费量往往和化石能源密切相关, 塑料制品来源于煤化工过程获得的含苯环物质。目前大部分城市以火力发电为主, 主要利用煤炭等化学燃料产生电能, 这些化石能源的提炼和燃烧会产生大量  $SO_2$ 、 $NO_x$  等有害气体, 导致  $PM_{2.5}$  的大幅升高。露点也表现出了对  $PM_{2.5}$  浓度的明显影响。尽管多位学者在研究中提出相对湿度与  $PM_{2.5}$  浓度的相关性[45] [46] [47], 从本文分析来看, 露点较相对湿度而言, 对  $PM_{2.5}$  浓度的影响更为显著。

#### 4.2.2. 交互作用探测分析

交互探测器探测影响因子之间交互后对  $PM_{2.5}$  浓度变化的影响。由表 2 可见, 任何两种因子的交互作用都要大于单独一种因子对  $PM_{2.5}$  浓度变化的影响。例如露点和相对湿度交互后作用于  $PM_{2.5}$  浓度变化的  $q$  值为 0.61, 对  $PM_{2.5}$  浓度的影响最大; 发电量和塑料制品与  $NO_2$  交互后  $q$  值均为 0.60, 对  $PM_{2.5}$  的影响次之; 发电量、二产用电占比和污染防治专用设备等等和露点的交互, 对  $PM_{2.5}$  的影响也较为显著。

**Table 2.** Interactive exploration results of  $PM_{2.5}$  in Zhengzhou of 2020

**表 2.** 2020 年郑州市  $PM_{2.5}$  交互探测结果

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X14
X1	0.33												
X2	0.50	0.07											
X3	0.50	0.49	0.35										
X4	0.44	0.50	0.45	0.34									
X5	0.46	0.48	0.50	0.41	0.14								
X6	0.46	0.49	0.50	0.47	0.49	0.37							
X7	0.50	0.27	0.45	0.45	0.39	0.42	0.15						
X8	0.51	0.50	0.46	0.52	0.54	0.52	0.51	0.38					
X9	0.52	0.41	0.49	0.58	0.59	0.58	0.43	0.55	0.31				
X10	0.46	0.21	0.55	0.52	0.45	0.55	0.40	0.56	0.61	0.08			
X11	0.37	0.12	0.40	0.41	0.22	0.42	0.20	0.44	0.37	0.16	0.03		
X12	0.51	0.36	0.60	0.60	0.47	0.59	0.49	0.58	0.52	0.49	0.36	0.29	
X14	0.46	0.30	0.46	0.50	0.42	0.50	0.40	0.44	0.43	0.41	0.27	0.42	0.22

### 4.3. 影响 $O_3$ -8h 浓度变化的因素

#### 4.3.1. 因子探测分析

利用因子探测器来确定影响因子对  $O_3$ -8h 浓度变化影响程度的结果如图 3 所示。影响因子值  $q$  的范围为 0.07~0.58, 对其有显著性影响的有平均温度(0.58), 露点(0.39), 塑料制品(0.31), 二产用电占比(0.30),  $PM_{2.5}$  含量(0.26)和污染防治设备(0.21)等。平均温度对  $O_3$ -8h 浓度影响最大; 其次是露点, 露点和空气湿度之间具有正相关, 空气中的水分影响了臭氧的转化过程; 塑料制品、二产用电比和  $PM_{2.5}$  含量这三者, 前两者促使了  $PM_{2.5}$  形成的同时, 产生的  $SO_2$ 、 $NO_x$  和  $PM_{2.5}$  共同作用, 从化学角度促使了  $O_3$  的形成; 污染防治设备则对控制大气中  $O_3$  浓度影响显著。

### 4.3.2. 交互作用探测分析

交互探测器探测影响因子之间交互后对  $O_3$ -8h 浓度变化的影响, 如表 3 所示, 基本上任何两种因子的交互作用都要大于单独一种因子对  $O_3$ -8h 浓度变化的影响。例如平均温度和第二产用电占比交互后作用于  $O_3$ -8h 浓度变化的 q 值为 0.73, 对  $O_3$ -8h 变化的影响最大。整体而言, 温度和社会经济因素(规模以上工业综合能源消费量、工业用电量、塑料制品、发电量、环境污染防治设备、节能环保支出)和其他气象因素的相互作用后, 对  $O_3$ -8h 浓度变化的影响非常显著, 大于其他因素之间的相互作用。

**Table 3.** Interactive exploration results of  $O_3$ -8h in Zhengzhou of 2020

**表 3.** 2020 年郑州市  $O_3$ -8h 交互探测结果

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X14
X1	0.20												
X2	0.65	0.15											
X3	0.65	0.51	0.31										
X4	0.38	0.65	0.48	0.13									
X5	0.64	0.54	0.65	0.47	0.30								
X6	0.50	0.63	0.65	0.54	0.62	0.21							
X7	0.64	0.46	0.48	0.48	0.56	0.41	0.16						
X8	0.72	0.66	0.73	0.72	0.73	0.70	0.67	0.58					
X9	0.57	0.47	0.55	0.56	0.66	0.58	0.55	0.62	0.39				
X10	0.33	0.26	0.52	0.35	0.51	0.45	0.35	0.69	0.67	0.07			
X11	0.30	0.28	0.41	0.26	0.38	0.33	0.25	0.64	0.48	0.18	0.08		
X12	0.40	0.37	0.47	0.36	0.51	0.44	0.35	0.67	0.54	0.30	0.27	0.20	
X14	0.39	0.38	0.42	0.36	0.50	0.42	0.43	0.62	0.47	0.36	0.33	0.33	0.26

综上分析, 城市空气污染是自然和社会经济因素综合作用的结果, 随着人类活动的加剧, 人为因素对空气质量的影响越来越大。因此, 调整产业结构, 控制污染源, 降低塑料制品使用, 加强污染治理对改善郑州大气环境质量具有重要意义。

## 5. 结论

郑州市 2020 年  $PM_{2.5}$  和  $O_3$  的全年分布呈此消彼长的状态, 尤以春夏季节最为明显, 风速风向变化和污染物的分布未表现出相关性。

$PM_{2.5}$  污染主要发生在秋冬季节,  $O_3$  污染主要分布在春夏季节。影响  $PM_{2.5}$  和  $O_3$  浓度的变化因素随季节变化。 $PM_{2.5}$  的浓度在秋、冬季分别受到温度、相对湿度的影响较大,  $O_3$  浓度在春、夏季节分别受到温度、相对湿度的影响较大。

地理探测器探测结果表明: 对  $PM_{2.5}$  浓度变化影响较大的因素有平均温度、环境污染专用设备和塑料制品等, 其中露点和相对湿度交互后对  $PM_{2.5}$  浓度变化的影响最大, 对于  $O_3$  浓度变化影响较大的驱动因素有平均温度、露点和塑料制品等, 平均温度和其他自然气象及社会经济因素交互后, 对  $O_3$  浓度影响显著提升, 如平均温度和二产用电占比交互后对  $O_3$  浓度变化的影响最为显著。

## 基金项目

郑州师范学院大创项目资助(编号: DCY2020010)。



## 参考文献

- [1] Zhang, R.Y., Wang, G.H., Guo, S., *et al.* (2015) Formation of Urban Fine Particulate Matter. *Chemical Reviews*, **115**, 3803-3855. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00067>
- [2] Song, C., Wu, L., Xie, Y., *et al.* (2017) Air Pollution in China: Status and Spatiotemporal Variations. *Environmental Pollution*, **227**, 334-347. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.04.075>
- [3] Li, Y., An, J.L., Kajino, M., *et al.* (2015) Impacts of Additional HONO Sources on O<sub>3</sub> and PM<sub>2.5</sub> Chemical Coupling and Control Strategies in the Beijing-Tianjin-Hebei Region of China. *Tellus B*, **67**, Article No. 23930. <https://doi.org/10.3402/tellusb.v67.23930>
- [4] Xu, L.Z., Stuart, B., Chen, F., *et al.* (2017) Spatiotemporal Characteristics of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> at Urban and Corresponding Background Sites in 23 Cities in China. *Science of the Total Environment*, **599-600**, 2074-2084. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.048>
- [5] 中华人民共和国生态环境部. 2020 中国生态环境状况公报[R]. 2021-05-26.
- [6] 中华人民共和国生态环境部. 2019 中国生态环境状况公报[R]. 2020-06-02.
- [7] Gao, J.J., Tian, H.Z., Cheng, K., *et al.* (2015) The Variation of Chemical Characteristics of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> and Formation Causes during Two Haze Pollution Events in Urban Beijing, China. *Atmospheric Environment*, **107**, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.02.022>
- [8] 张小曳, 孙俊英, 王亚强, 等. 我国雾-霾成因及其治理的思考[J]. 科学通报, 2013, 58(13): 1178-1187.
- [9] Zhao, B., Zheng, H.T., Wang, S.X., *et al.* (2018) Change in House-Hold Fuels Dominates the Decrease in PM<sub>2.5</sub> Exposure and Premature Mortality in China in 200-2015. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **115**, 12401-12406. <https://doi.org/10.1073/pnas.1812955115>
- [10] Tilmes, S., Kinnison, D.E., Garcia, R.R., *et al.* (2012) Impact of Very Short-Lived Halogens on Stratospheric Ozone Abundance and UV Radiation in a Geo-Engineered Atmosphere. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **12**, 10945-10955. <https://doi.org/10.5194/acp-12-10945-2012>
- [11] Tang, H., Liu, G., Zhu, J., *et al.* (2013) Seasonal Variations in Surface Ozone as Influenced by Asian Summer Monsoon and Biomass Burning in Agricultural Fields of the Northern Yangtze River Delta. *Atmospheric Research*, **122**, 67-76. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.10.030>
- [12] Meng, Z., Dabdub, D. and Seinfeld, J.H. (1997) Chemical Coupling between Atmospheric Ozone and Particulate Matter. *Science*, **277**, 116-119. <https://doi.org/10.1126/science.277.5322.116>
- [13] 中国环境科学学会臭氧污染控制专业委员会. 中国大气臭氧污染防治蓝皮书(2020) [M]. 北京: 中环博宏, 2021.
- [14] 陈慕白, 袁明浩, 林秋菊, 等. 郑州市 PM<sub>2.5</sub> 组分季节性特征及来源研究[J]. 中国环境监测, 2020(4): 61-68.
- [15] 中华人民共和国生态环境部. 2018 中国生态环境状况公报[R]. 2019-05-29.
- [16] 中华人民共和国生态环境部. 2017 中国生态环境状况公报[R]. 2018-05-31.
- [17] 韩晋仙, 朱笑歌, 李建华. 郑州市空气环境质量变化研究[C]//中国环境科学学会科学技术年会. 北京: 国家图书馆出版社, 2019: 551-557.
- [18] 于世杰, 尹沙沙, 张瑞芹, 等. 郑州市近地面臭氧污染特征及气象因素分析[J]. 中国环境监测, 2017, 33(4): 140-149.
- [19] 余光明, 李法松, 韩铖. 安庆大气颗粒物污染外来输送轨迹及源区研究[J]. 长江流域资源与环境, 2017(12): 2111-2119.
- [20] 陈刚, 刘佳媛, 皇甫延琦, 等. 合肥城区 PM<sub>10</sub> 及 PM<sub>2.5</sub> 季节污染特征及来源解析[J]. 中国环境科学, 2016, 36(7): 1938-1946.
- [21] Jia, J., Cheng, S.Y., Liu, L., *et al.* (2017) An Integrated WRF-CAMx Modeling Approach for Impact Analysis of Implementing the Emergency PM<sub>2.5</sub> Control Measures during Red Alerts in Beijing in December 2015. *Aerosol and Air Quality Research*, **17**, 2491-2508. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2017.01.0009>
- [22] 李璇, 聂滕, 齐珺, 等. 2013 年 1 月北京市 PM<sub>2.5</sub> 区域来源解析[J]. 环境科学, 2015, 36(4): 1148-1153.
- [23] Shi, G.L., Tian, Y.Z., Zhang, Y.F., *et al.* (2011) Estimation of the Concentrations of Primary and Secondary Organic Carbon in Ambient Particulate Matter: Application of the CMB-Iteration Method. *Atmospheric Environment*, **45**, 5692-5698. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.07.031>
- [24] 杨妍妍, 李金香, 梁云平, 等. 应用受体模型(CMB)对北京市大气 PM<sub>2.5</sub> 来源的解析研究[J]. 环境科学学报, 2015, 35(9): 2693-2700.
- [25] 张亮, 朱彬, 高晋徽, 等. 长江三角洲夏季一次典型臭氧污染过程的模拟[J]. 环境科学, 2015, 36(11): 3981-3988.

- [26] 章群英, 麻金继, 沈非, 李超. 安徽省冬季 PM<sub>2.5</sub> 污染来源及其成因分析[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(12): 2737-2746.
- [27] Zhao, M.F., Huang, Z.S., Qiao, T., *et al.* (2015) Chemical Characterization, the Transport Pathways and Potential Sources of PM<sub>2.5</sub> in Shanghai: Seasonal Variations. *Atmospheric Research*, **158-159**, 66-78. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.02.003>
- [28] 王浩, 高健, 李慧, 等. 2007-2014年北京地区 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度变化特征[J]. 环境科学研究, 2016, 29(6): 783-790.
- [29] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
- [30] 李江苏, 孟琳琳, 曹红梅, 等. 郑州市零售业空间格局及影响因素分析[J]. 地理与地理信息科学, 2021, 3(27): 50-58.
- [31] 王银苹. 基于自发地理信息的城市住宅价格时空分析[D]: [硕士学位论文]. 开封: 河南大学, 2019.
- [32] 赵宏波, 余涤非, 苗长虹, 等. 基于 POI 数据的郑州市文化设施的区位布局特征与影响因素研究[J]. 地理科学, 2018, 38(9): 1525-1534.
- [33] Jasaitis, D., Vasiliauskien, E.V., Chadyien, E.R., *et al.* (2016) Surface Ozone Concentration and Its Relationship with UV Radiation, Meteorological Parameters and Radon on the Eastern Coast of the Baltic Sea. *Atmosphere*, **7**, 27. <https://doi.org/10.3390/atmos7020027>
- [34] Wang, Y., Du, H., Xu, Y., *et al.* (2018) Temporal and Spatial Variation Relationship and Influence Factors on Surface Urban Heat Island and Ozone Pollution in the Yangtze River Delta, China. *Science of the Total Environment*, **631-632**, 921-933. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.050>
- [35] Wang, Z.B., Li, J.X. and Liang, L.W. (2020) Spatio-Temporal Evolution of Ozone Pollution and Its Influencing Factors in the Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration. *Environmental Pollution*, **256**, Article ID: 113419. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113419>
- [36] 王玫, 郑有飞, 柳艳菊, 等. 京津冀臭氧变化特征及与气象要素的关系[J]. 中国环境科学, 2019, 39(7): 2689-2698.
- [37] 曹庭伟, 吴锴, 康平, 等. 成渝城市群臭氧污染特征及影响因素分析[J]. 环境科学学报, 2018, 38(4): 1275-1284.
- [38] Wang, T., Xue, L., Brimblecombe, P., *et al.* (2016) 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>
- [39] 陈雪萍, 咸龙, 巨天珍, 等. 基于 OMI 的宁夏臭氧时空分布特征及影响因素研究[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(2): 167-173.
- [40] 陆倩, 王国辉, 冯一淳, 等. 气象条件对承德市臭氧重污染天气的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(8): 992-999.
- [41] Chen, Z., Li, R., Chen, D., *et al.* (2019) Understanding the Causal Influence of Major Meteorological Factors on Ground Ozone Concentrations across China. *Journal of Cleaner Production*, **242**, Article ID: 118498. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118498>
- [42] 黄小刚, 邵天杰, 赵景波, 等. 气象因素和前体物对中国东部 O<sub>3</sub> 浓度分布的影响[J]. 中国环境科学, 2019, 39(6): 35-44.
- [43] Li, J., Han, Z. and Zhang, R. (2014) Influence of Aerosol Hygroscopic Growth Parameterization on Aerosol Optical Depth and Direct Radiative Forcing over East Asia. *Atmospheric Research*, **140-141**, 14-27. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.01.013>
- [44] Jia, M., Zhao, T., Cheng, X., *et al.* (2017) Inverse Relations of PM<sub>2.5</sub> and O<sub>3</sub> in Air Compound Pollution between Cold and Hot Seasons over an Urban Area of East China. *Atmosphere*, **8**, 59. <https://doi.org/10.3390/atmos8030059>
- [45] 张云伟, 王晴茹, 陈嘉, 等. 城市街谷内 PM<sub>2.5</sub> 浓度时空变化及影响因素分析[J]. 中国环境科学, 2016, 36(10): 2944-2949.
- [46] 肖雪, 曹云刚, 张敏. 成都市 PM<sub>2.5</sub> 浓度时空变化特征及影响因子分析[J]. 地理信息世界, 2018, 25(1): 65-70.
- [47] 卢文, 王红磊, 朱彬, 等. 南京江北 2014-2016 年 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度分布特征及气象和传输影响因素分析[J]. 环境科学学报, 2019, 39(4): 1039-1048.