

临汾市臭氧时空变化特征及影响因素分析

宋 朕^{1,2}, 营 娜², 薛志钢², 宋宏利^{1*}

¹河北工程大学地球科学与工程学院, 河北 邯郸

²中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京

收稿日期: 2024年5月9日; 录用日期: 2024年6月12日; 发布日期: 2024年6月25日

摘 要

近年来, 我国城市环境空气中PM_{2.5}浓度逐年下降, O₃浓度日趋升高, O₃污染已成为制约空气质量改善的关键因素。临汾市作为中国重要焦煤基地之一, 拥有大量的钢铁、焦化等行业, 这些行业排放的污染物, 导致O₃浓度居高不下, 污染治理面临着严峻挑战。本研究基于2020~2022年临汾市监测站点的污染物浓度及气象数据, 采用因果性分析、复杂网络及相关性分析方法解析临汾市O₃浓度的时空变化特征和影响因素。2020~2022年临汾市O₃污染较为严重, 从时间上看, O₃污染期为5~9月, 非污染期为10~2月。从空间上看, 临汾市各站O₃日最大8小时滑动均值均超过160 μg/m³, O₃污染期内的O₃浓度传输网络模型连边值均超过0.5, 说明各站点间存在显著的O₃传输关系, 其中市委和城南的O₃污染最为明显, 传输能力最强。从影响因素上看, O₃与NO₂负相关关系显著, 与PM_{2.5}、CO、PM₁₀、SO₂负相关关系较弱。同时, O₃与气压、相对湿度呈负相关, 而与气温、露点温度、十分钟平均风速和能见度呈正相关。

关键词

O₃, 时空变化特征, 影响因素

Characteristics of Spatial and Temporal Variations of Ozone in Linfen City and Analysis of Influencing Factors

Zhen Song^{1,2}, Na Ying², Zhigang Xue², Hongli Song^{1*}

¹School of Earth Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan Hebei

²State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Science, Beijing

Received: May 9th, 2024; accepted: Jun. 12th, 2024; published: Jun. 25th, 2024

*通讯作者。

文章引用: 宋朕, 营娜, 薛志钢, 宋宏利. 临汾市臭氧时空变化特征及影响因素分析[J]. 地球科学前沿, 2024, 14(6): 743-752. DOI: 10.12677/ag.2024.146069

Abstract

In recent years, the concentration of $\text{PM}_{2.5}$ in China's urban ambient air has been decreasing year by year, and the concentration of O_3 has been increasing, and O_3 pollution has become a key factor restricting the improvement of air quality. Linfen city, as one of the important coking coal bases in China, has a large number of iron and steel and coking industries, which emit pollutants, resulting in high O_3 concentrations and facing serious challenges in pollution management. Based on the pollutant concentrations and meteorological data from the monitoring stations in Linfen City from 2020 to 2022, this study uses causality analysis, complex network and correlation analysis to analyse the spatial and temporal characteristics of the O_3 concentration and the influencing factors in Linfen City. In 2020~2022, Linfen City is more seriously polluted by O_3 , and from the time point of view, the O_3 polluted period is from May to September, and the non-polluted period is from October to February. From the spatial point of view, the daily maximum 8-hourly sliding mean values of O_3 at each station in Linfen City exceeded $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$, and the contiguous edge values of the O_3 concentration transport network model during the O_3 pollution period exceeded 0.5, which indicated that there was a significant O_3 transport relationship between stations, with the Municipal Party Committee and the southern part of the city being the most obvious O_3 pollutants with the strongest transport capacity. In terms of influencing factors, O_3 has a significant negative correlation with NO_2 , and a weaker negative correlation with $\text{PM}_{2.5}$, CO , PM_{10} , and SO_2 . Meanwhile, O_3 was negatively correlated with barometric pressure and relative humidity, while positively correlated with air temperature, dew point temperature, ten-minute average wind speed and visibility.

Keywords

O_3 , Characteristics of Spatial and Temporal Variations, Influencing Factors

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

空气污染造成的危害十分严重，一直以来受到全球广泛关注[1] [2] [3]。为了进一步改善生态环境，推动可持续发展，我国提出了一系列综合性措施来解决严重的空气污染问题。2013年，国务院推出《大气污染防治行动计划》，强调 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的重要性；2018年，国务院发布《打赢蓝天保卫战三年行动计划》，对持续推动空气质量改善提出新要求。随着空气污染治理计划的推进，全国 $\text{PM}_{2.5}$ 快速下降，大气污染治理取得明显成就[4]。但臭氧(O_3)浓度仍处于较高水平，且逐渐呈蔓延趋势。如今， O_3 污染频繁发生[5] [6]，根据北京大学陈松蹊院士团队报告，2022年“3+110”城市春季和夏季的 O_3 八小时均值浓度比2021年整体增加2.9%，90%分位数浓度增加了 $2.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，78个城市 O_3 呈现上升状态[7]，以 O_3 为代表的大气污染物逐渐成为影响空气质量的重要因素。

持续的 O_3 污染对人民的生产生活造成重大威胁[8] [9] [10]。长期接触高浓度 O_3 会显著增加心脑血管和呼吸系统疾病的发病风险，导致器官衰竭甚至过早死亡[11]。此外， O_3 污染还会导致粮食作物减产，抑制农作物的生长和发育，严重影响粮食供应和经济稳定。这种经济损失不仅限于农业领域，整个社会经济系统都可能受到波及。

临汾市地形较为特殊,轮廓呈“凹”字形分布,群山在四周环绕,中间为平川。这种特殊的地形结构影响临汾市的大气污染传播,使得城市中心区的污染物在静稳天气条件下容易聚集,不易扩散,从而导致区域大气污染严重。2016年至2020年,临汾市O₃日最大8小时滑动均值第90百分位浓度高于130 μg/m³ [12]。临汾市O₃浓度水平高,污染分布较为集中,治理O₃污染面临着严峻挑战[13]。

当前,全球化学传输模型(GEOS-chem)和社区多尺度空气质量建模系统(CMAQ)等数值模拟方法被广泛应用在探索O₃来源及O₃对前体物和气象因素的敏感性上[14][15][16]。然而,数值模拟模型机理复杂,由于模型参数的设置和排放清单的不确定性,可能导致结果估计存在一定偏差[17]。统计方法在一定程度上摆脱了复杂物理参数和动力机制的困扰,在空气质量预测领域表现出了很好的适用性。随着复杂网络理论的不断深入,越来越多的专家学者将其应用到大气环境研究中来,并取得了诸多成果。收敛交叉映射作为一种非线性分析方法,可有效地识别弱耦合变量间的因果联系。相比于传统线性方法,利用收敛映射构建的复杂网络在分析系统因素之间的复杂关系时效果更为显著。本文基于2020~2022年临汾市监测站点的污染物浓度及气象数据,分析了临汾市O₃浓度的时间变化及空间分布特征。通过收敛交叉映射解析O₃污染期站点间非线性因果关系,结合复杂网络方法建立O₃传输网络模型,研究站点间O₃传输特征。通过相关性分析方法研究O₃与其他因素的相关性。

2. 数据与方法

2.1. 数据来源与预处理

2.1.1. 数据来源

本研究所使用的空气污染物浓度数据为2020~2022年临汾(111.52°E, 36.09°N)5个国控点的监测数据,由山西省临汾生态环境监测中心提供。5个国控点分别为市委、唐尧大酒店、临钢医院、技工学校 and 城南,污染物数据包括NO₂、SO₂、PM₁₀、PM_{2.5}、CO和O₃浓度。2020~2022年气象数据采集于中国气象数据网站(<http://data.cma.gov.cn/>)。气象数据包括气温(TEM)、气压(PRS)、露点温度(DPT)、湿度(RHU)、十分钟平均风速(WIN_10)和能见度(VIS)。所有数据采样时差均为1小时。此外,临汾环境监测中心提供人工校准的2020~2022年临汾市O₃日最大8小时滑动均值(MDA8)、站点MDA8年平均值及O₃超标天数也得到应用。

2.1.2. 数据预处理

剔除所有带异常标识的异常值数据以保证数据的真实性。采用拉格朗日插值法填充缺失值,使得填充值更加接近真实值。

2.2. 实验方法

2.2.1. 因果性分析

收敛交叉映射(Convergent Cross Mapping, CCM)是一种基于嵌入理论和混沌理论分析复杂系统中时序变量因果关系的方法,与传统线性分析方法不同,是通过将原始时序数据嵌入至多维相空间来获取变量的历史信息[18]。CCM的实现主要依赖于影子流形的创建、嵌入维度的确认和响应因素对触发因素的估计。考虑存在两个动态系统中时间长度为 L 的时序变量 X 与 Y :

$$\begin{aligned} \{X\} &= \{X(1), X(2), X(3), X(4), \dots, X(L)\} \\ \{Y\} &= \{Y(1), Y(2), Y(3), Y(4), \dots, Y(L)\} \end{aligned}$$

通过滞后变量 τ ,生成 X 与 Y 的时滞向量,构建影子流形 M_X 与 M_Y :

$$M_X : x(t) = [X(t), X(t-\tau), X(t-2\tau), X(t-3\tau), \dots, X(t-(E-1)\tau)]$$

$$M_Y : y(t) = [Y(t), Y(t-\tau), Y(t-2\tau), Y(t-3\tau), \dots, Y(t-(E-1)\tau)]$$

其中, $\tau > 0$; $1 + (E + 1)\tau \leq t \leq L$, E 为影子流形所处空间的嵌入维度, 受时序长度、系统噪音等因素影响 [19], 在因果分析中, E 过小会导致信息缺失, E 过大则会使信息冗余。为保证 E 的选取相对合理, 采用预映射方法, 配合交叉验证策略筛选最优维度 E , 利用 pyEDM 包内的 Embed Dimension 函数完成该步骤。在影子流形 M_X 上找到最邻近的 $E + 1$ 个点构建权重 w_i , 进而对 $E + 1$ 个 Y 的值进行加权求和, 创建 $Y(t)$ 的交叉映射估计, 实现响应因素估计触发因素:

$$\hat{Y}(t) | M_X = \sum_{i=1}^{E+1} w_i Y(t_i)$$

其中, $\hat{Y}(t) | M_X$ 为 $Y(t)$ 的交叉映射估计表示, 即用 M_X 估计 $Y(t)$ 以探索 Y 是否为 X 的原因。若 Y 为响应因素, X 为触发因素, 则需要用 M_Y 来估计 $X(t)$, $Y(t_i)$ 代表 $Y(t)$ 的同期值, w_i 为影子流形 M_X 上第 i 个邻近点与 $X(t)$ 之间的距离, 计算如下所示:

$$w_i = u_i / \sum_{j=1}^{E+1} u_j$$

$$u_i = \exp\{-d[x(t), x(t_i)] / d[x(t), x(1)]\}$$

其中, d 代表向量之间的欧氏距离, \exp 代表指数函数的使用。通过计算交叉映射估计值与真实值之间的 Pearson 相关性系数量化响应因素对触发因素的预测能力, 该系数也可以称为预测值或 CCM 相关系数:

$$\rho_{x \rightarrow y} = \text{cor}[Y(t), \hat{Y}(t) | M_X]$$

随着时期长度 L 的增加, Y 的历史信息会变得更加完整, 使得 Y 对 X 的估计越来越好, 同时 CCM 相关系数显著提高, Y 的预测值逐渐收敛于 X 。这意味着, 当相关系数明显大于 0, 且 CCM 的预测曲线呈明显上升收敛状态时, 时序变量间可以判断为存在因果关系 [20] [21]。

2.2.2. 复杂网络

复杂网络可以描述现实世界中的诸多系统, 并识别隐藏在大量复杂系统中的常见规则。基于复杂网络技术构建的有向加权网络如公式所示:

$$G = \{V, E, W\}$$

G 表示为复杂网络模型, V 是节点的集合, $\{v_1, v_2, v_3, \dots\} \in V$ 是网络中的不同节点, 指临汾市内的不同站点。 $e = \{v_1, v_2\} \in E$ 是网络中的一条连边, 表示节点 v_1 定向连接到 v_2 , 如果 v_2 预测 v_1 的 CCM 数值明显大于 0 且预测曲线呈上升收敛状态, 则认为 v_1 连接到 v_2 , 否则, v_1 和 v_2 之间不连接。 $w_{v_1, v_2} \in W$ 代表 e 连边的权重, v_2 预测 v_1 的 CCM 相关系数代表 v_1 到 v_2 的权重值。按照上述规则, 建立临汾站点间的 O_3 浓度传输网络模型。

2.2.3. 相关性分析

相关性描述两个变量之间的相关程度。在数据分析中, 通常使用相关性方法发现数据中的模式和规律, 判断变量关系。相关性系数取值范围定义为 $[-1, 1]$, 越靠近 1 或 -1 , 变量的相关性越大。相反, 越靠近 0, 说明两者间相关性小。污染物浓度数据和气象数据属于连续变量, 符合正态分布特征。本文用 Pearson 相关系数进行衡量, 计算方法如公式:

$$\rho_{XY} = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sigma_X \cdot \sigma_Y}$$

3. 结果与分析

3.1. 临汾市 O₃ 时间变化特征分析

表 1 展示了临汾市 2020~2022 年的 O₃ 污染状况。其中,2020~2022 年 MDA8-90th 分别为 184 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、197 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、179 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 均超过 160 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 表明临汾市近三年 O₃ 污染频繁发生。2020 年 O₃ 超标率为 21%, 2021 年超标率相比 2020 年有所上升, 这是因为 2020 年整体气象条件良好所致[22]。临汾市三年 O₃ 轻度污染天数均超过 60 天, 2020 年中度污染天数为 8 天, 2021 年为 17 天, 2022 年相比 2021 年, 中度污染天数减少 8 天。尽管 O₃ 污染情况有所改善, 2022 年 MDA8 的超标率仍高达 20.27%, 这说明临汾市 O₃ 污染严重, 面临长期接触 O₃ 污染的风险, 因此进一步加大 O₃ 污染治理十分重要。

Table 1. O₃ pollution in Linfen city, 2020~2022

表 1. 2020~2022 年临汾市 O₃ 污染情况

年份	MDA8 最小值($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	MDA8 最大值($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	MDA8 超标率 (%)	MDA-90th ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	轻度污染 (天)	中度污染 (天)	重度污染 (天)
2020	9	262	21.00%	184	68	8	0
2021	6	253	22.20%	197	64	17	0
2022	15	236	20.27%	179	65	9	0

由图 1 可知, 2020~2022 年临汾市 MDA8 呈现夏秋高、春冬低的变化特征。O₃ 污染主要发生在 5~9 月份, 其中 6 月份的 MDA8 数值最高, 这是因为夏季太阳辐射强、温度高, 使得大气氧化性增强, 促进 O₃ 的生成。2020~2022 年临汾市污染天数与 MDA8 变化趋势大体一致。10~2 月不存在 O₃ 污染天数, 这是因为冬季气温低、阴雨天较多, 太阳辐射的减少抑制了 O₃ 的生成。每年的 6 月份污染天数最多, 分别为 22、22 和 24 天。

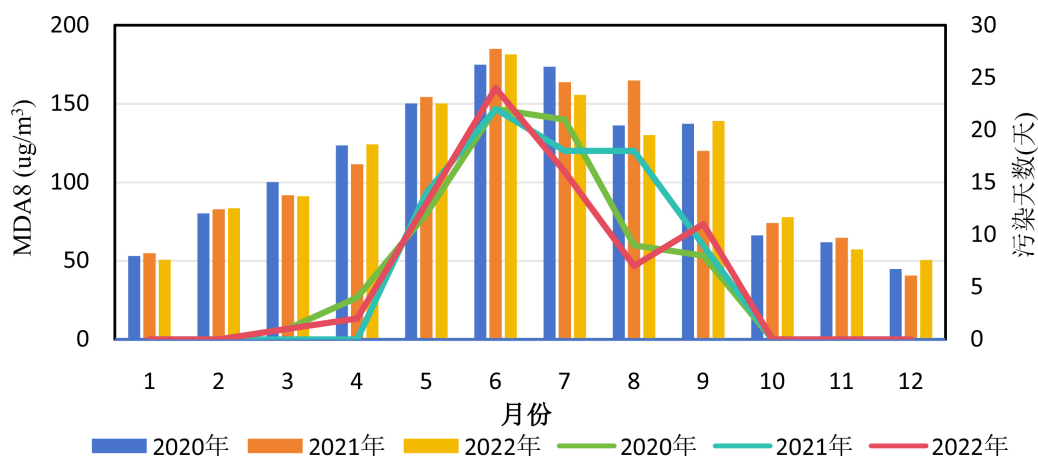


Figure 1. Monthly changes of MDA8 and O₃ pollution days in Linfen City, 2020~2022

图 1. 2020~2022 年临汾市 MDA8 和 O₃ 污染天数月变化

3.2. 临汾市 O₃ 空间变化特征分析

图 2 给出了 2020~2022 年临汾市 5 个站点 MDA8 的年平均值和超标天数。整体上看, 5 个站点的 MDA8 年平均值都超过了 160 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 均未达标。其中, 市委和城南的 MDA8 均值最大, 为 192 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,

其次为唐尧大酒店($188 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 最低为临钢医院($184 \mu\text{g}/\text{m}^3$)。从 MDA8 超标天数上看, 城南、市委、唐尧大酒店和技工学校均超过 230 天, 城南比市委多 1 天。相较于其他站点, 城南远离市中心, 位于临汾市南面, 车流量较少, 排放量低于市区, 导致 NO 滴定消耗的 O_3 较少[23]。此外, 城南附近存在较多汽修店, 且该站点以南有焦化和化工企业, 大量排放的 VOCs, 利于 O_3 的生成, 造成 O_3 污染。市委和唐尧大酒店周边日常生活设施较多, 车流量较大。洗衣店、餐饮店和加油站等会产生 O_3 前体物, 使 O_3 浓度偏高, 污染情况不容小视[24]。

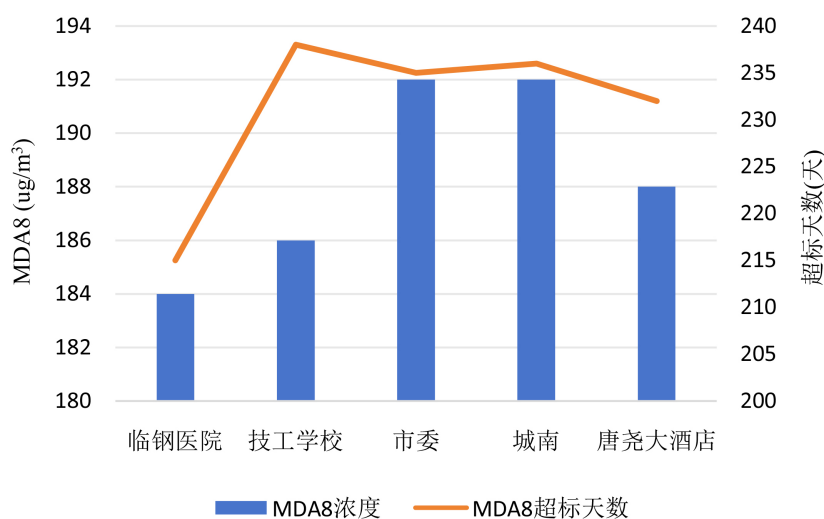


Figure 2. MDA8 annual mean and number of exceedance days at Linfen sites, 2020~2022

图 2. 2020~2022 年临汾各站点 MDA8 年平均值和超标天数

除本地的 O_3 生成外, O_3 传输对 O_3 污染存在重要影响[25]。而临汾市国控点较为接近, 用传统的线性相关方法研究站点间的 O_3 联系时, 往往会出现极高的相关系数, 导致研究 O_3 传输较为困难。因此利用能检测因果关系的 CCM 方法结合复杂网络, 对临汾市 5 个站点的 O_3 浓度进行建模, 能分析站点间 O_3 的非线性关系, 更加清晰地表现出 O_3 传输特征。在 O_3 污染期内, 各站点间的 CCM 相关系数均大于 0.5, 呈现上升收敛状态, 将曲线收敛后的 CCM 相关系数作为复杂网络连边权重, 构建 O_3 污染期各站点的 O_3 浓度传输网络模型。如图 3 所示, 箭头代表 O_3 的传输方向, 颜色越深说明 O_3 的传输量越大, 对其他站点的 O_3 影响越明显。权重值如表 2 所示, 在排名前十的 O_3 传输权重中, 市委占了 3 位。其中, 市委对城南 O_3 传输权重值高达 0.703, 对技工学校和唐尧大酒店分别为 0.676、0.667。说明市委的 O_3 传输最为显著, 对其他站点的 O_3 影响最大。这是因为市委周边 O_3 前体物排放量大, 会产生并累积大量 O_3 , 向周边“溢出”, 造成 O_3 传输污染。同时, 市委与其他站点距离较近, 传输效率高。

Table 2. O_3 concentration transmission network model connected edge values

表 2. O_3 浓度传输网络模型连边值

Source	Target	Weight
市委	城南	0.703
市委	技工学校	0.676
唐尧大酒店	城南	0.672
市委	唐尧大酒店	0.667

续表

城南	市委	0.661
临钢医院	城南	0.660
城南	技工学校	0.657
技工学校	城南	0.650
技工学校	唐尧大酒店	0.649
城南	唐尧大酒店	0.649
唐尧大酒店	技工学校	0.647
唐尧大酒店	市委	0.644
技工学校	市委	0.639
临钢医院	市委	0.638
市委	临钢医院	0.625
临钢医院	唐尧大酒店	0.622
临钢医院	技工学校	0.614
城南	临钢医院	0.606
唐尧大酒店	临钢医院	0.580
技工学校	临钢医院	0.575

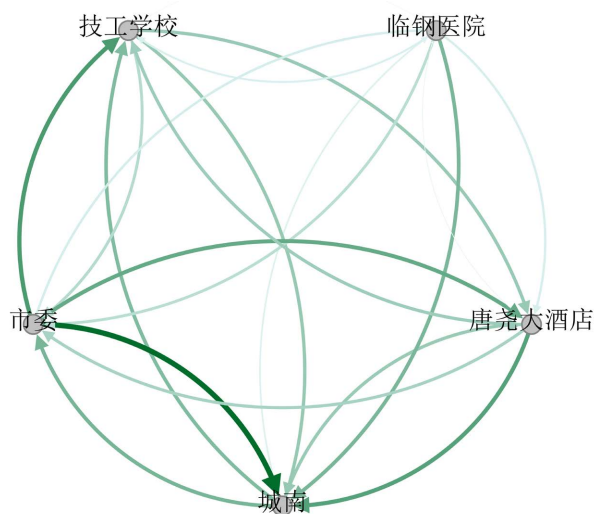


Figure 3. Modelling of the station O₃ concentration transport network

图 3. 站点 O₃ 浓度传输网络模型

城南对市委、技工学校和唐尧大酒店的 O₃ 传输权重值均超过 0.64，位于前十。据相关研究表明[26]，在 5~9 月，刮南风 and 西南风时 O₃ 小时浓度超标数最多。城南由于来自南面污染气团传输的影响，O₃ 污染贡献大。临钢医院因为其他站点的距离较远，受到其他站点的 O₃ 影响强度偏低，使得与其为目标的 O₃ 传输强度较弱。通过上述分析可知，O₃ 浓度、风向和站点距离是影响 O₃ 传输的重要因素。在临汾站点中，市委、城南的 O₃ 传输影响明显，需要重点关注。

3.3. 临汾市 O₃ 影响因素分析

如图 4 所示, 红色代表各变量之间呈正相关关系, 蓝色呈负相关关系, 随着颜色的加深, 各变量间的相关性越强。整体来看, 其他污染物和气象因素与 O₃ 之间的相关性系数均通过了 0.001 显著性检验。在污染物中, O₃ 与 NO₂ 相关系数绝对值最高, 为-0.62, 呈现显著负相关关系。这是因为 NO₂ 是 O₃ 生成的重要前体物之一, 通过光化学反应生成 O₃。另外, O₃ 与 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、CO 之间存在弱负相关关系, 与 PM_{2.5} 负相关程度较高, 相关系数为-0.33, 这是因为 PM_{2.5} 干扰辐射照度, 减少 O₃ 生成。在气象因素中, 气温和露点温度与 O₃ 之间的正相关性最为明显, 相关系数分别为 0.51、0.38。强太阳辐射和高温会加速 NO_x 与 VOCs 发生光化学反应, 促进 O₃ 生成; 气压对 O₃ 负相关性显著, 相关系数为-0.49。在低压情况下, 天气晴好, 导致太阳辐射增强, 大气干燥, 有利于 O₃ 生成; 十分钟平均风速和能见度与 O₃ 呈弱正相关性, 均为 0.1; 相对湿度与 O₃ 为弱负相关, 为-0.11。通过分析可知, 其他污染物和气象因素与 O₃ 之间的关系较为复杂。

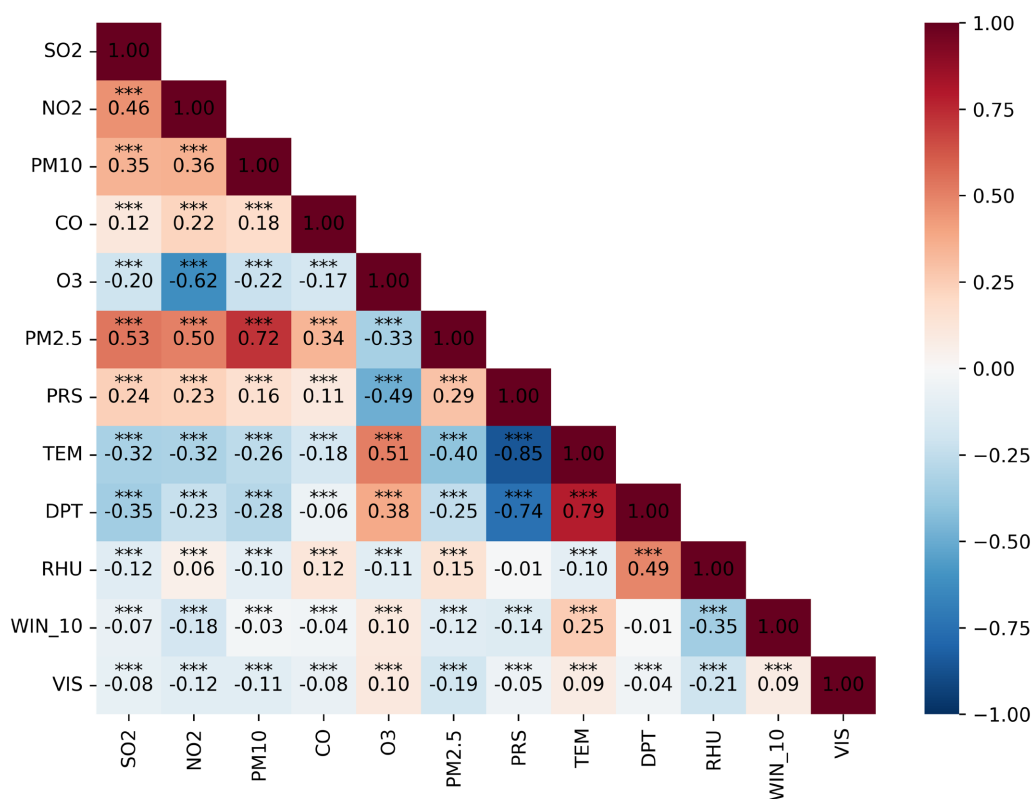


Figure 4. Correlation analysis of pollutants with meteorological factors

图 4. 各污染物与气象因素的相关性分析

4. 总结

1) 临汾市近三年 O₃ 污染情况不容乐观。三年年均 MDA8 都超过了 160 μg/m³。其中, 5~9 月为 O₃ 主要污染期, 6 月 O₃ 污染最为明显, 10~2 月为 O₃ 非污染期。

2) 临汾市 5 个站点的平均 MDA8 均超标, 城南、市委、唐尧大酒店和技工学校的超标天数均超过 230 天。其中, 城南和市委 O₃ 污染最为明显。O₃ 污染期内, 临汾市站点间的 O₃ 传输联系密切, 其中市委、城南对其他站点传输最为显著, 临钢医院受到其他站点的 O₃ 传输影响最弱。

3) O_3 与 SO_2 、 NO_2 、 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 CO 均呈现负相关状态, 与 NO_2 的负相关最为显著。气温、露点温度、十分钟平均风速和能见度均与 O_3 呈正相关, 气压和相对湿度与 O_3 为负相关。上述相关性分析均通过显著性检验。

致 谢

感谢山西省临汾生态环境监测中心提供的数据支持, 感谢段丽琴主任和临汾市细颗粒物和臭氧污染协同防控综合解决方案研究项目组全体成员的大力支持和帮助。

基金项目

临汾市细颗粒物和臭氧污染协同防控综合解决方案研究(DOGG202111)。

参考文献

- [1] Murray, C.J.L., Aravkin, A.Y., Zheng, P., Abbafati, C., Abbas, K.M., Abbasi-Kangevari, M., *et al.* (2020) Global Burden of 87 Risk Factors in 204 Countries and Territories, 1990-2019: A Systematic Analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. *The Lancet*, **396**, 1223-1249. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(20\)30752-2](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(20)30752-2)
- [2] Bowdalo, D., Petetin, H., Jorba, O., Guevara, M., Soret, A., Bojovic, D., *et al.* (2022) Compliance with 2021 WHO Air Quality Guidelines across Europe Will Require Radical Measures. *Environmental Research Letters*, **17**, Article ID: 021002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac44c7>
- [3] Martins, N.R. and Carrilho da Graça, G. (2018) Impact of $PM_{2.5}$ in Indoor Urban Environments: A Review. *Sustainable Cities and Society*, **42**, 259-275. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.07.011>
- [4] 佚名. 2021 年中国生态环境状况公报(摘录) [J]. 环境保护, 2022, 50(12): 61-74.
- [5] 张晓娟. 基于 Stacking 模型的北京市近地面臭氧浓度预测[D]: [硕士学位论文]. 太原: 山西大学, 2023. <https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2021.05.20>
- [6] Wei, J., Li, Z., Xue, W., Sun, L., Fan, T., Liu, L., *et al.* (2021) The Chinahighpm10 Dataset: Generation, Validation, and Spatiotemporal Variations from 2015 to 2019 across China. *Environment International*, **146**, Article ID: 106290. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106290>
- [7] 北京大学统计科学中心环境统计组. 空气质量评估报告(十): “3 + 110”城市 2013-2022 年区域污染状况评估[R]. 北京: 北京大学, 2023.
- [8] Orellano, P., Reynoso, J., Quaranta, N., Bardach, A. and Ciapponi, A. (2020) Short-Term Exposure to Particulate Matter (PM_{10} and $PM_{2.5}$), Nitrogen Dioxide (NO_2), and Ozone (O_3) and All-Cause and Cause-Specific Mortality: Systematic Review and Meta-Analysis. *Environment International*, **142**, Article ID: 105876. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105876>
- [9] Xiao, Q., Geng, G., Xue, T., Liu, S., Cai, C., He, K., *et al.* (2021) Tracking $PM_{2.5}$ and O_3 Pollution and the Related Health Burden in China 2013-2020. *Environmental Science & Technology*, **56**, 6922-6932. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c04548>
- [10] Feng, Z., Sun, J., Wan, W., Hu, E. and Calatayud, V. (2014) Evidence of Widespread Ozone-Induced Visible Injury on Plants in Beijing, China. *Environmental Pollution*, **193**, 296-301. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.06.004>
- [11] 郑旭曼. 基于集成学习的 O_3 浓度逐小时预测模型研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 华东师范大学, 2018.
- [12] 宋晓伟, 郝永佩, 朱晓东, 等. 临汾市臭氧污染变化特征、气象影响及输送源分析[J]. 中国环境科学, 2022, 42(8): 3626-3634.
- [13] 景琼琼, 吕爱丽. 临汾市近地面臭氧污染特征及与气象条件的关系[J]. 山西气象, 2022(3): 121-123.
- [14] 严加琪. 基于数据挖掘的臭氧时空分布特征分析及趋势预测研究[D]: [硕士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2020. <https://doi.org/10.26918/d.cnki.gnhgc.2020.000862>
- [15] 李金龙, 张其苏, 唐孝炎, 等. 兰州西固地区光化学烟雾污染气质模式[J]. 环境科学学报, 1988(2): 125-130.
- [16] Lefohn, A.S., Shadwick, D. and Oltmans, S.J. (2010) Characterizing Changes in Surface Ozone Levels in Metropolitan and Rural Areas in the United States for 1980-2008 and 1994-2008. *Atmospheric Environment*, **44**, 5199-5210. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.08.049>
- [17] Wang, T., Ding, A., Gao, J. and Wu, W.S. (2006) Strong Ozone Production in Urban Plumes from Beijing, China.

Geophysical Research Letters, **33**, Article ID: 21806. <https://doi.org/10.1029/2006gl027689>

- [18] 王丹雨, 朱媛君, 杨晓晖. 收敛交叉映射方法及其在生态学中的应用[J]. 应用生态学报, 2021, 32(12): 4539-4548.
- [19] Ye, H. (2015) Nonlinear Tools for a Nonlinear World: Applications of Empirical Dynamic Modeling to Marine Ecosystems. Master's Thesis, University of California, San Diego.
- [20] Clark, A.T., Ye, H., Isbell, F., Deyle, E.R., Cowles, J., Tilman, G.D., *et al.* (2015) Spatial Convergent Cross Mapping to Detect Causal Relationships from Short Time Series. *Ecology*, **96**, 1174-1181. <https://doi.org/10.1890/14-1479.1>
- [21] Sugihara, G., May, R., Ye, H., Hsieh, C., Deyle, E., Fogarty, M., *et al.* (2012) Detecting Causality in Complex Ecosystems. *Science*, **338**, 496-500. <https://doi.org/10.1126/science.1227079>
- [22] 逯艳丽. 临汾市大气臭氧污染特征及治理分析 [J]. 中国资源综合利用, 2024, 42(1): 131-134.
- [23] Brönnimann, S. and Neu, U. (1997) Weekend-weekday Differences of Near-Surface Ozone Concentrations in Switzerland for Different Meteorological Conditions. *Atmospheric Environment*, **31**, 1127-1135. [https://doi.org/10.1016/s1352-2310\(96\)00311-1](https://doi.org/10.1016/s1352-2310(96)00311-1)
- [24] 宁一. 2019-2021 年临汾市臭氧污染特征及来源分析[D]: [硕士学位论文]. 太原: 中北大学, 2022.
- [25] Li, L., Chen, C.H., Huang, C., Huang, H.Y., Zhang, G.F., Wang, Y.J., *et al.* (2012) Process Analysis of Regional Ozone Formation over the Yangtze River Delta, China Using the Community Multi-Scale Air Quality Modeling System. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **12**, 10971-10987. <https://doi.org/10.5194/acp-12-10971-2012>
- [26] 宁一, 孙洁亚, 薛志钢, 等. 受焦化影响的下风向城区臭氧污染特征及潜在源区分析[J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(3): 710-717.