



移动扫码阅读

赵晓亮,田思,姜瑰国,等. 阜新市城区臭氧污染特征及气象成因分析[J].能源环境保护,2022,36(3):90-96.
ZHAO Xiaoliang, TIAN Si, JIANG Guiguo, et al. Characteristics of ozone pollution and analysis of meteorological causes in the urban area of Fuxin city[J]. Energy Environmental Protection, 2022, 36(3): 90-96.

阜新市城区臭氧污染特征及气象成因分析

赵晓亮¹, 田 思¹, 姜瑰国¹, 许端平¹, 李 莉²

(1. 辽宁工程技术大学 环境科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 阜新市环境监测中心站, 辽宁 阜新 123000)

摘要:为了解阜新市城区 O_3 (臭氧) 污染特征及其影响因素, 基于2020年1月1日~10月27日空气质量监测数据气象参数, 分析了阜新城区 O_3 月浓度、日浓度变化特征, 探讨了温度、湿度、风速及风向等气象要素对 O_3 污染的总体影响。结果表明: 在气温大于 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度为 $40\%\sim 45\%$ 、风速为 $3\sim 4$ 级、盛行东北风向和西南风向的条件下, O_3 浓度超标天数占监测时段总超标天数的 66.6% ; 温度、相对湿度、风速、风向显著影响 O_3 污染水平, 超标日的气象条件可作为阜新市城区 O_3 污染预测指标。

关键词: O_3 (臭氧); 污染特征; 气象成因; 阜新市城区

中图分类号: X823

文献标识码: A

文章编号: 1006-8759(2022)03-0090-07

Characteristics of ozone pollution and analysis of meteorological causes in the urban area of Fuxin city

ZHAO Xiaoliang¹, TIAN Si¹, JIANG Guiguo¹, XU Duanping¹, LI Li²

(1. Environmental Science and Engineering Department, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;
2. Fuxin Environmental Monitoring Center Station, Fuxin 123000, China)

Abstract: In order to understand the characteristics and influencing factors of O_3 (ozone) pollution in the urban area of Fuxin city, the continuous monitoring data of air quality and meteorological parameters in the urban area of Fuxin city from January 1, 2020 to October 27, 2020 were collected. The characteristics of monthly and daily O_3 concentrations in the urban area of Fuxin city during the monitoring period were analyzed. The influence of temperature, humidity, wind speed and wind direction on O_3 pollution were explored. The results show that when the air temperature $>30\text{ }^{\circ}\text{C}$, relative humidity was $40\%\sim 45\%$, wind speed was level $3\sim 4$, and the prevailing winds were northeasterly and southwesterly winds, the number of the exceedance days caused by O_3 accounts for 66.6% of the total number of the exceedance days during the monitoring period. The temperature, relative humidity, wind speed and direction significantly affect the O_3 pollution levels. Meteorological conditions of the exceedance days can be used as a predictor of O_3 pollution in Fuxin city.

Key Words: O_3 (ozone); Pollution characteristics; Meteorological causes; Urban area of Fuxin city

0 引言

臭氧(O_3)是氧(O_2)的同素异形体,在常温下

是一种有特殊臭味的淡蓝色气体,存在于平流层,主要分布在距地面 $10\sim 50\text{ km}$ 处,浓度峰值在 $20\sim 25\text{ km}$ 处,是影响大气环境质量的重要因素。 O_3

收稿日期: 2021-09-29; 责任编辑: 金丽丽

基金项目: 辽宁省教育厅科技项目 (LJ2020JCL031); 辽宁省大学生创新训练项目 (S202010147001)

第一作者简介: 赵晓亮 (1981-), 男, 安徽淮北人, 博士, 副教授, 主要研究方向为矿山环境污染防治与控制技术、环境系统模拟与评价。

E-mail: zhaoxiaoliang2008@126.com

作为一种强氧化剂、温室气体和二次污染物,其形成过程受 NO_x 和 VOCs 主要前体物排放、光化学转化、气象驱动等的共同作用影响^[1],臭氧浓度超标会对人体和植物产生不良影响。随着我国大气污染治理的持续推进,氮氧化物、硫氧化物等大气污染物的治理已经初见成效,但臭氧(O_3)污染情况却越来越严重。现已有学者对京津唐地区、石家庄市、华北地区、珠三角地区等工业基地、经济发达地区的臭氧污染问题进行了相关的研究与探讨^[2-4]。研究表明,珠三角中部地区城市超标天数较多,沿海城市超标天数较少,大部分城市每年臭氧(O_3)超标天数逐渐增多;京津唐地区夏季浓度最高,且唐山、天津与北京的峰值略有不同;石家庄臭氧浓度季节性差异明显。

阜新市位于辽宁省西部,是沈阳经济区重要的城市之一,东西总长为 170 km,南北宽 84 km,总面积 10 445 km²。阜新市北部为科尔沁沙地,东接辽河平原,西连努鲁儿虎山,是内蒙古草原与华北石质山地貌的过渡带,地形西北高,东南低,中间有细河盆地和柳河平原。受地形地貌影响,阜新市常年以大风天气为主,平均风速高,空气干燥,风沙较大,主导风向多为来自渤海湾的西南风向。由于地形特征,大气污染物多聚集在阜新市上空无法向外扩散,导致大气环境质量日益恶化,

以 O_3 为主要特征的光化学污染问题正日益凸显。辽宁省 O_3 浓度高峰区主要集中在南部环海和环沈阳城市群,这与各个城市经济发展密切相关,也与全省人口分布基本一致。南部大连地区和沈阳城市群是全省经济较发达、人口密度较大的地区,活跃的经济活动与人口社会活动造成了 O_3 污染,同时明显高于其他地区^[5-7]。目前,有关阜新市臭氧污染特征的研究相较于其他城市较少。以前人研究为基础,本次研究时段为阜新市 2020 年 1 月 1 日至 2020 年 10 月 27 日,以 O_3 逐时监测数据和同期气象数据资料为基础,分析城区 O_3 污染现状和气象条件之间的关系,得出污染主要原因。

1 数据和方法

本次研究以阜新市城区为研究对象,研究时段为2020年1月1日至2020年10月27日,研究资料包括实时空气质量监测数据和监测时段内监测点气象数据,实时空气质量监测数据来自阜新市环保局监测站点研究区内共五个监测点,基本覆盖了阜新市城区(如图1),实时空气质量监测数据包括 O_3 、 NO_2 、 CO 。气象数据来自真气网发布的逐时气象数据(<https://www.aqistudy.cn/>),包括温度、相对湿度、风速及风向。



图 1 阜新市城区监测站点

Fig.1 Monitoring stations in the urban area of Fuxin city

由于监测数据因外力因素缺失,为提高数据有效使用率,对已有数据进行处理:①在分析气象条件对 $\rho(\text{O}_3)$ 的影响时,每日有效监测时长至少为 20 h,经数据整理,观测期内共 7 944 h,失效数据 450 h,数据有效率 94.34%。②根据 GB 3095—2012《环境空气质量标准》中 $\rho(\text{O}_3)$ 各分指数对应浓度限值的规定, $\rho(\text{O}_{3-8\text{h}})$ (日最大 8 h 平均浓度) $>160\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 或 $\rho(\text{O}_{3-1\text{h}})$ (日最大 1 h 平均浓度) $>200\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 视为该监测时段内 $\rho(\text{O}_3)$ 超标。数据分析过程中,若观测日 $\rho(\text{O}_3)$ 只要超过 $\rho(\text{O}_{3-8\text{h}})>160\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 或 $\rho(\text{O}_{3-1\text{h}})>200\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 任意浓度限值,便认为该日 $\rho(\text{O}_3)$ 超标。③若在监测时间段中,监测站点 24 h 内监测到的有效数据小于 20 h,则以 $\rho(\text{O}_{3-1\text{h}})$ (日最大 1 h 平均浓度)为判定依据,判断该监测站点当日是否超标。

表 1 2020 年 1~10 月各监测站点臭氧浓度
Table 1 Ozone concentrations at each monitoring station from January to October 2020

序号	工业区	人民公园	农业区	环保局	玉龙新城子站
1	53.40	40.39	56.92	44.32	45.03
2	58.00	61.01	63.30	58.60	59.33
3	67.68	68.96	70.93	68.51	66.21
4	80.83	84.24	93.09	82.99	83.15
5	97.74	94.95	98.32	94.33	96.60
6	107.40	104.24	115.53	108.23	108.75
7	104.13	101.96	118.31	110.44	110.51
8	83.05	31.00	88.43	82.42	79.46
9	53.36	50.36	62.02	50.23	47.98
10	47.91	50.38	67.44	29.63	49.60

2.1.2 阜新市城区 $\rho(\text{O}_3)$ 月变化特征

阜新位于北温带大陆季风气候区,四季分明,雨热同季,光照充足,依靠气候统计法对监测时段内的月份进行划分。在气候统计法中,温带地区一般 1 月份为最冷月,7 月份为最热月,因此将 3 月、4 月、5 月份划分为春季,6 月、7 月、8 月份划分为为夏季,9 月、10 月、11 月份划分为秋季,12 月、1 月、2 月份划分为为冬季。本次研究时段为 2020 年 1 月 1 日至 2020 年 10 月 27 日,因此将 1 月 1 日至 3 月 1 日划分为冬季,3 月 1 日至 6 月 1 日为春季,6 月 1 日至 9 月 1 日为夏季,9 月 1 日至 10 月 27 日为秋季。由图 2 可以发现,阜新市城区 $\rho(\text{O}_3)$ 超标表现为明显的季节性变化,浓度以夏季、春季、秋季、冬季的规律依次递减。超标峰值

2 结果与讨论

2.1 阜新市城区 $\rho(\text{O}_3)$ 特征

2.1.1 阜新市城区 $\rho(\text{O}_3)$ 总体特征

由 2020 年 1 月 1 日至 2020 年 10 月 27 日监测数据可知,2020 年阜新市各监测点 6 月和 7 月 $\rho(\text{O}_3)$ 均高于其他月份,其中农业区的 $\rho(\text{O}_3)$ 最高,6 月份为 $115.83\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$,7 月份为 $118.31\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。工业区、人民公园、环保局、玉龙新城子站监测月份夏季节 $\rho(\text{O}_3)$ 高于其他季节,而农业区 $\rho(\text{O}_3)$ 则四季都比较高。人民公园和玉龙新城子站监测月份 $\rho(\text{O}_3)$ 相对而言比其他监测点要低,但是 6、7 月份也达到了 $\rho(\text{O}_3)100\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上。同时对比同期数据可见,随着温度的上升,各监测站点 $\rho(\text{O}_3)$ 也开始上升,夏季明显高于其他季节,春季高于秋季,冬季浓度最低,具有明显的季节性特征,与前人研究结果一致^[8-9]。

主要集中在 6、7 月份,超标天数占总超标天数的 71.1%;冬季因供暖等外界条件导致大气环境质量污染严重,抑制了光化学反应的进行,导致 $\rho(\text{O}_3)$ 呈现出全年最低的现象,与我国其他学者研究结果基本一致^[10]。

2.1.3 阜新市城区 $\rho(\text{O}_3)$ 日变化特征

由图 3 可见,阜新市城区 $\rho(\text{O}_3)$ 一天中的最低点出现在清晨 5 时至 7 时,之后开始逐渐增加,在下午 3 时至 7 时达到最高点,夜间 $\rho(\text{O}_3)$ 低于白天。在监测期间,每小时 $\rho(\text{O}_3)$ 数值共有 163 h 超标,且超标日 $\rho(\text{O}_3)$ 在相同监测时段内均高于其他季节,11 时至 7 时平均每小时 $\rho(\text{O}_3)$ 均超过 $200\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。夏天阜新市日出时刻在清晨 4:30 前后,随着太阳光照作用越来越强烈,光化学反应不

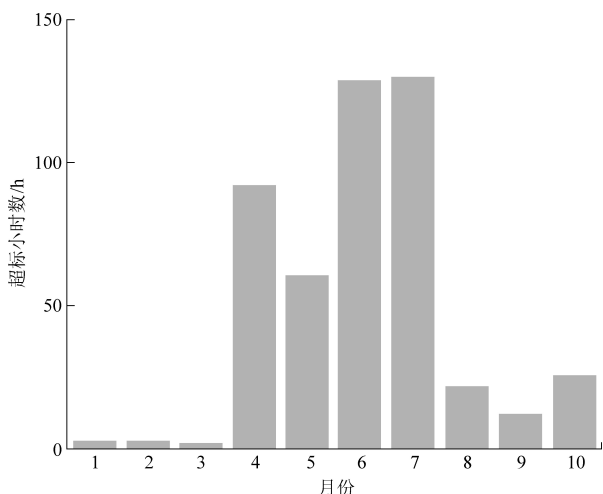
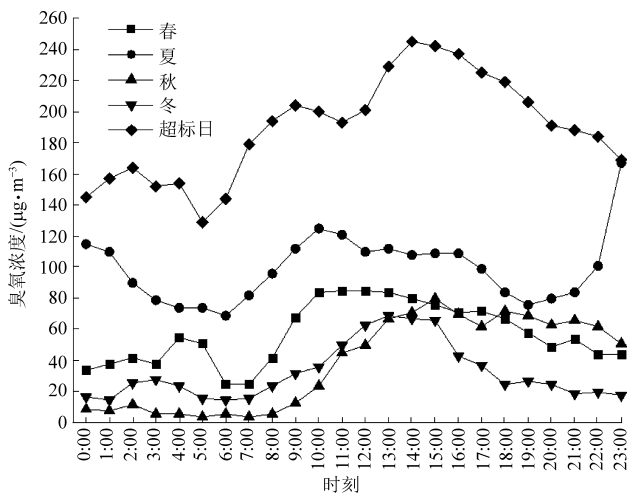


图2 2020 年月超标小时数

Fig.2 Monthly exceeding-standard hours in 2020

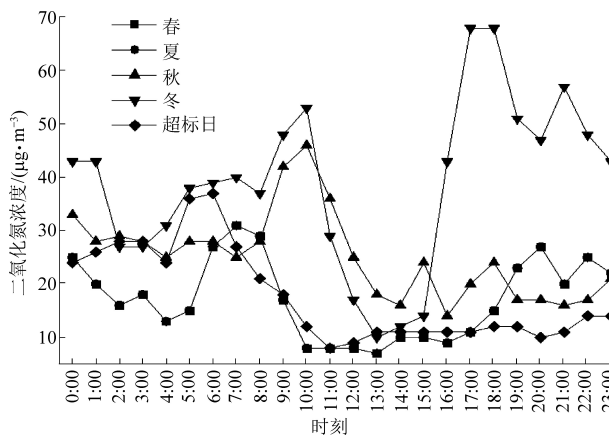
断进行,臭氧的前体物逐渐转变为臭氧,使 $\rho(\text{O}_3)$ 浓度呈现出不断上升的趋势。而在冬季,由于太阳的光照强度有所下降,光化学反应发生缓慢,臭氧的前体物转化为臭氧的数量较少, $\rho(\text{O}_3)$ 也明显低于夏季同时刻浓度^[11]。

图3 $\rho(\text{O}_3)$ 日变化曲线Fig.3 Daily curve of $\rho(\text{O}_3)$

《中国大气臭氧污染防治蓝皮书(2020年)》中,详细介绍了 O_3 污染的形成机制,用17个化学反应构成的简化机制描述了光化学烟雾的主要形成过程,主要是4个部分,即 O_3 与 NO 和 NO_2 的光化学循环、自由基引发反应、自由基传递反应和自由基终止反应。本次研究中主要考虑 NO_2 和 CO 参与的 O_3 与 NO 和 NO_2 的光化学循环和自由基传递反应。在光化学循环中, NO_2 是三重态氧原子的唯一重要来源,与氧气结合即可反应生成 O_3 , CO 与 OH 自由基反应生成过氧自由基(HO_2 或 RO_2),

过氧自由基进一步氧化 NO 为 NO_2 ,再次参与光化学反应,使得 O_3 出现净增加^[12]。

由图4可见在监测时段内阜新市 NO_2 浓度冬季明显高于其他季节,夏季 NO_2 浓度最低,在超标日内 $\rho(\text{NO}_2)$ 明显低于冬季同时刻监测值。冬季 $\rho(\text{NO}_2)$ 出现了两次峰值,一次出现在早上10时至11时之间,一次出现在下午5时至7时之间,谷值出现在下午2时至4时之间,夏季同时也出现了两次峰值,一次出现在清晨4时至5时之间,一次出现在晚上10时至11时之间,谷值出现在中午12时至1时之间,夏季第一次峰值早于冬季,谷值也早于冬季,第二次峰值的出现则晚于冬季,这可能与太阳的日出日落时刻有关。夏季太阳出现后,地面温度随日照而上升,进地面空气的温度也随之上升,近地面逆温层被破坏。对比图3来看, $\rho(\text{NO}_2)$ 与 $\rho(\text{O}_3)$ 呈现出明显的负相关现象, NO_2 是生成 O_3 重要的前体物之一^[13], NO_2 的消耗带来 O_3 的生成,导致在 O_3 的浓度增加的同时 NO_2 浓度下降。在所有监测小时数内随机抽取100 h监测数据,将 NO_2 与 O_3 进行拟合(见图5),可以得到一条趋势线,相关性可以用方程 $y = -0.175\,24x + 43.283\,31$ 来表示,拟合系数 R^2 为0.87,拟合度较好,相关性较强。

图4 $\rho(\text{NO}_2)$ 日变化曲线Fig.4 Daily curve of $\rho(\text{NO}_2)$

作为 O_3 重要的前体物之一, CO 的主要来源是化石燃料的不完全燃烧,冬季由于燃煤的大量使用增加了 CO 的浓度。由图6可见,研究区一天中 CO 浓度的谷值出现在下午2时至4时,有两次峰值,分别出现在早上10时至12时、下午5时至7时。同时发现 CO 浓度出现峰值时刻与道路交通车流量高峰期时刻相近,因此不排除 CO 浓度上升受车流量影响的原因。冬季 $\rho(\text{CO})$ 监测浓度均

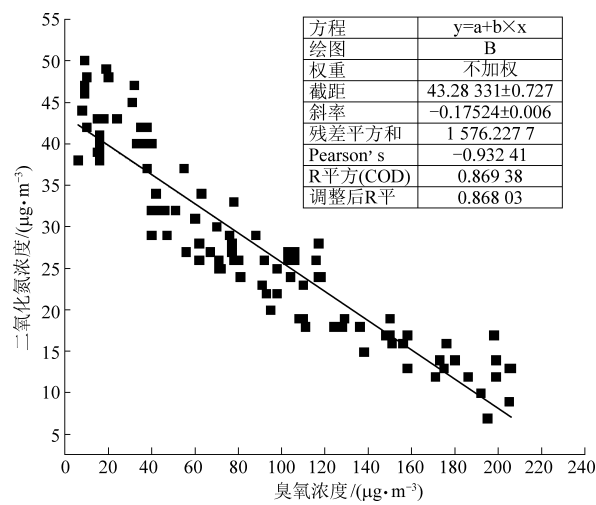


图 5 臭氧浓度与二氧化氮浓度变化曲线

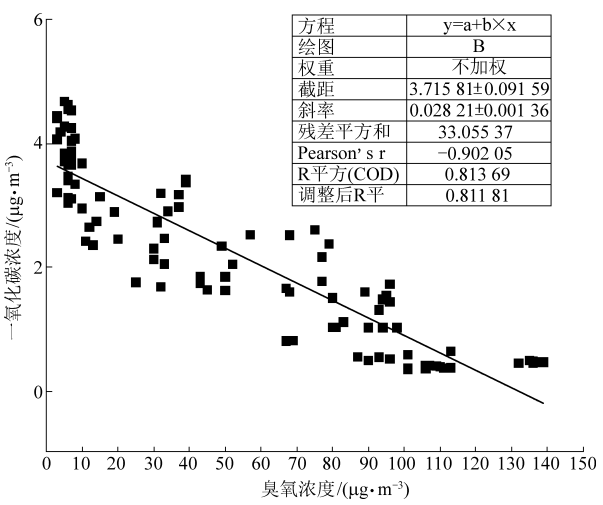


图 7 臭氧浓度与一氧化碳浓度变化曲线

Fig.5 Curve of ozone concentration and nitrogen dioxide concentration

Fig.7 Curve of ozone concentration and carbon monoxide concentration

高于其他季节,而与 $\rho(\text{O}_3)$ 超标日呈现出相反的变化曲线^[14]。CO是生成 O_3 重要的前体物之一,CO的消耗带来 O_3 的生成,导致在 O_3 的浓度增加的同时CO浓度下降^[15]。在所有监测小时数内随机抽取100 h监测数据,将CO与 O_3 进行拟合(见图7),可以得到一条趋势线,相关性可以用方程 $y = -0.028\,21x + 33.055\,37$ 来表示,拟合系数 R^2 为0.81,拟合度较好,相关性较强。

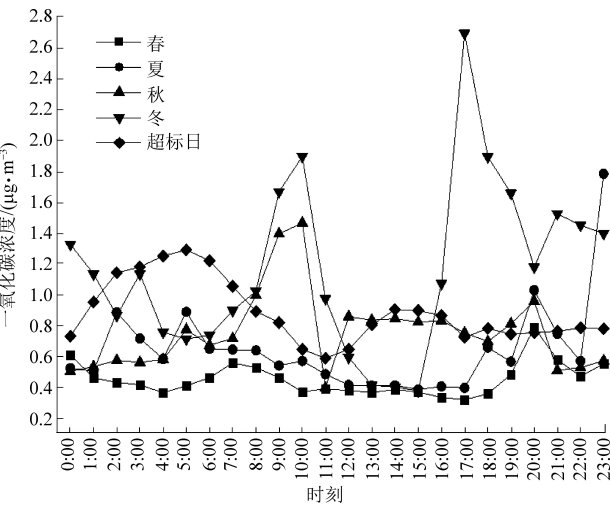


图 6 $\rho(\text{CO})$ 日变化曲线

Fig.6 Daily curve of $\rho(\text{CO})$

2.2 气象条件对阜新市城区 $\rho(\text{O}_3)$ 影响

阜新市气候属于北温带半干旱大陆性季风气候,冬季漫长而寒冷,温度较低,春季干燥,雨水较少,多以大风天气为主,夏季气温较高且雨水比较集中,秋季较短,气温变化跨度大,根据监测数据显示 $\rho(\text{O}_3)$ 超标多发生在夏季。

2.2.1 温度对 $\rho(\text{O}_3)$ 影响

臭氧发生光化学反应受太阳辐射强弱的影响,气温则在一定程度上反映了太阳辐射的强弱,温度的变化对 O_3 生成速率有重要的影响。因此,在研究温度对 O_3 浓度的影响时,根据阜新市地理位置定义6:00~17:30为白天,研究温度的影响时使用白天的数据,同时在选取的100个随机样本中,规定以当天的最高气温作为该检测时段的温度样本^[16]。由图8可见, $\rho(\text{O}_3)$ 在温度较低时变化不大,在 $50 \sim 80\,\mu\text{g}/\text{m}^3$ 范围内变化,当温度超过 $30\,^\circ\text{C}$ 时 $\rho(\text{O}_3)$ 浓度增加。由表2可得,气温为 $15 \sim 20$ 、 $20 \sim 25$ 、 $25 \sim 30$ 、 $\geq 30\,^\circ\text{C}$ 时, $\rho(\text{O}_3)$ 监测时段内平均值分别为 69 、 75 、 80 、 100 、 $112\,\mu\text{g}/\text{m}^3$,可见由图8所得结论基本正确。图9为监测时段内温度变化与 $\rho(\text{O}_3)$ 超标率的变化曲线,该超标率由该温度下的超标小时数除以监测时段内所有超标小时数求得。 $\rho(\text{O}_3)$ 超标率同 $\rho(\text{O}_3)$ 与温度变化趋势相同。有图可得在温度 $<25\,^\circ\text{C}$ 时,监测时段内无超标现象,当气温 $\geq 30\,^\circ\text{C}$ 时, $\rho(\text{O}_3)$ 超标率迅速上升,当气温超过 $35\,^\circ\text{C}$ 时,超标率可达50%,将城区温度与 O_3 超标率进行拟合分析,可以得出近地面臭氧浓度与气温呈明显的正相关性,相关系数为0.84,在0.01水平上显著相关。据此可以得出温度越高, $\rho(\text{O}_3)$ 越高,越容易超标^[17]。

2.2.2 相对湿度对 $\rho(\text{O}_3)$ 影响

大气中的水汽对 O_3 浓度主要在三个方面产生影响:首先是水汽会影响太阳辐射强度,进而影响光化学反应的发生;其次是当大气中的水汽过高时,有利于 O_3 的沉降,进而减少大气中的 O_3 浓

表 2 2020 年 1~10 月不同温度下 $\rho(\text{O}_3)$ 变化

Table 2 The change of $\rho(\text{O}_3)$ caused by the temperature (O_3) from January to October 2020

项目	$\leq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$	$10\sim 15\text{ }^{\circ}\text{C}$	$15\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$	$20\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$	$25\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\geq 30\text{ }^{\circ}\text{C}$
$\rho(\text{O}_3)/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	61	69	75	80	100	112
超标数/d	—	—	—	1	3	6
样本数	80	30	49	59	67	52

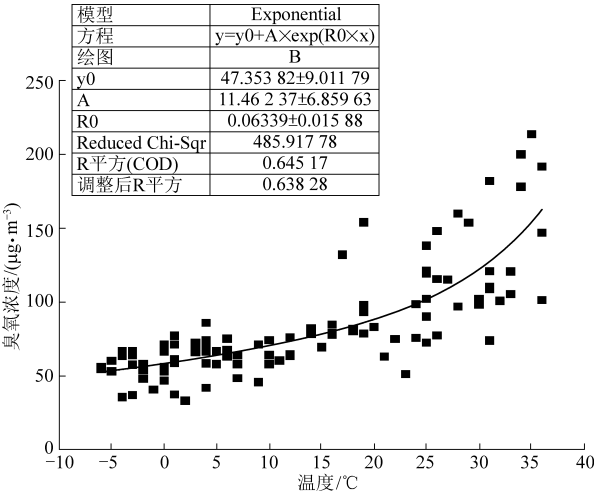


图 8 温度与 $\rho(\text{O}_3)$ 变化曲线

Fig.8 The curve of temperature and $\rho(\text{O}_3)$

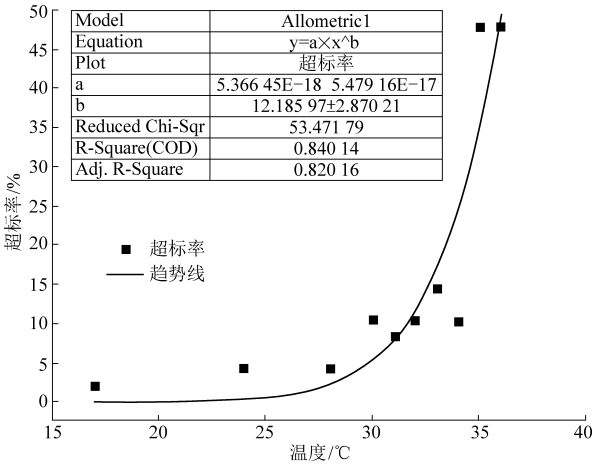


图 9 温度与 $\rho(\text{O}_3)$ 超标率变化曲线

Fig.9 Curve of temperature and $\rho(\text{O}_3)$ over-standard rate

度;最后是湿度过高时,会加快臭氧与自由基的反应,使臭氧浓度开始下降^[18]。图 10 可见,相对湿度在 20%~40%时, $\rho(\text{O}_3)$ 浓度变化主要集中在 50~100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,同时随着相对湿度的增加, $\rho(\text{O}_3)$ 增加迅速,在相对湿度达到约 45%时, $\rho(\text{O}_3)$ 达到最大值,同时相对湿度再增加时, $\rho(\text{O}_3)$ 不增反降。说明 $\rho(\text{O}_3)$ 生成的最佳相对湿度为 45%左右时,与前人研究结果一致^[19]。

2.2.3 风速和风向对 $\rho(\text{O}_3)$ 影响

风速会在一定程度影响大气污染物的传播和

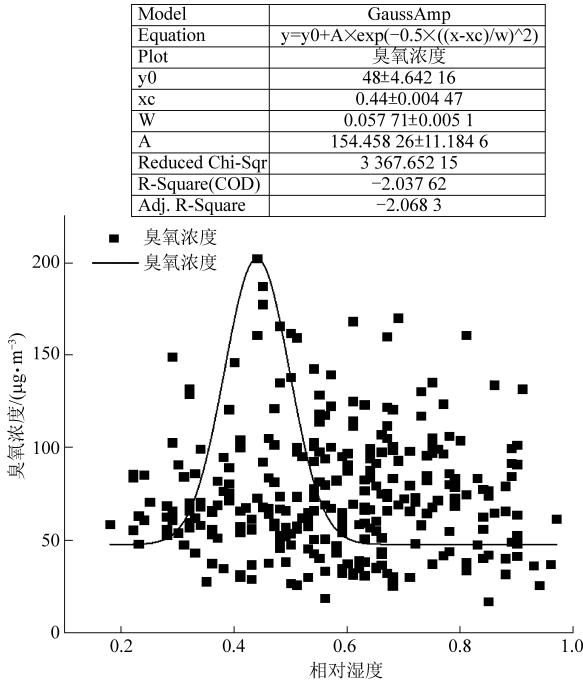


图 10 相对湿度与 $\rho(\text{O}_3)$ 浓度变化曲线

Fig.10 Curve of relative humidity and $\rho(\text{O}_3)$

扩散。由图 11 可见,阜新市风速以 3~4 级为主,且在该风速下 $\rho(\text{O}_3)$ 达到最大值,而风速越大相对应的 $\rho(\text{O}_3)$ 越低。风向则反映了大气中的污染物的扩散方向^[20]。表 3 为监测时段内阜新市城区不同风向下 $\rho(\text{O}_3)$ 的分布,由表 4 可见,阜新市城区内盛行西南风,且平均 $\rho(\text{O}_3)$ 秋季最高,春季最小。这可能是由于阜新市地势的影响,阜新市东南

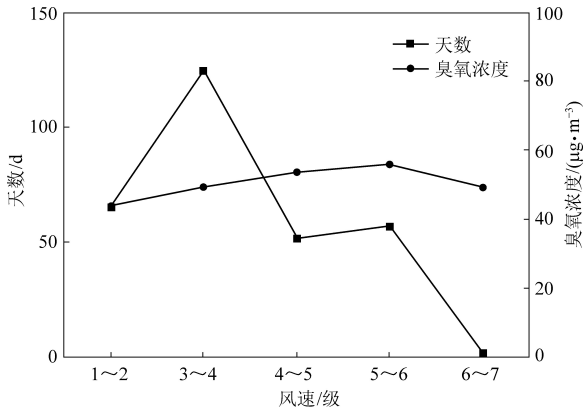


图 11 风速与 $\rho(\text{O}_3)$ 变化曲线

Fig.11 Curve of the wind speed and $\rho(\text{O}_3)$

部为平原地带,西北部地势起伏较大,产生的高 $\rho(\text{O}_3)$ 气团经风的作用后在西北地区汇聚形成污染。

表 3 不同季节不同风向下 $\rho(\text{O}_3)$ 变化

Table 3 $\rho(\text{O}_3)$ under different wind directions in different seasons

时间	$\rho(\text{O}_3)/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$							
	东风	西风	南风	北风	东北风	东南风	西北风	西南风
春季(3~5月)	—	63	100	82	91	106	74	50
夏季(6~8月)	83	105	115	84	106	106	73	94
秋季(9~10月)	—	—	67	43	58	91	54	111
冬季(1~2月)	—	—	60	62	69	74	59	78
平均值	83	84	86	68	81	95	65	83

表 4 不同风向发生次数及超标数

Table 4 Frequency and exceedance of wind direction

	东风	西风	南风	北风	东北风	东南风	西北风	西南风
次数/次	1	3	17	41	39	17	72	111
超标数/h	—	—	1	—	2	1	—	6

3 结 论

阜新市城区大气光化学污染严重, $\rho(\text{O}_3)$ 季节性特征显著,夏季浓度最高,超标率最高,冬季表现出相反的浓度变化和超标率。当气温>30℃时, O_3 超标天数显著增加,超标天数占总超标天数的91.6%; $\rho(\text{O}_3)$ 在相对湿度为45%左右时到达最大值,相对湿度较小时有利于 O_3 的形成。风速对 $\rho(\text{O}_3)$ 的影响体现在当风速在3~4级时, $\rho(\text{O}_3)$ 达到最大值,且随着风速的增加 $\rho(\text{O}_3)$ 呈现出递减的趋势;在盛行东北风向和西南风向时,阜新市城区 $\rho(\text{O}_3)$ 显著升高, $\rho(\text{O}_3)$ 升高的主要风向是西南风向,其次为东北风向,其他方向则较少。

参考文献

[1] 符传博,周航. 中国城市臭氧的形成机理及污染影响因素研究进展[J]. 中国环境监测,2021,37(2):33-43.

[2] 刘彩霞,冯银厂,孙勃. 天津市臭氧污染现状与污染特征分析[J]. 中国环境监测,2008(3):52-56.

[3] 张晓,张艳品,铃伟妙. 石家庄市主城区臭氧污染特征及气象成因分析[J]. 环境科学研究,2021,34(2):245-253.

[4] 汪宇,彭钰雯,陈多宏,等. 珠三角城市近地面臭氧污染分布特征及变化趋势[J]. 环境污染与防治,2019,41(9):1103-1107.

[5] 包艳英,徐洁,张明明,等. 大连市臭氧污染特征及典型污染日成因[J]. 中国环境监测,2017,33(4):167-178.

[6] 刘闽,王闯,侯乐,等. 沈阳臭氧污染时空分布特征及变化趋势[J]. 中国环境监测,2017,33(4):126-131.

[7] 邹旭东,蔡福,王笑影,等. 辽宁省臭氧质量浓度变化研究[J]. 生态环境学报,2020,29(9):1830-1838.

[8] 赵伟,高博,卢清,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.

[9] 崔梦瑞,白林燕,冯建中,等. 京津唐地区臭氧时空分布特征与气象因子的关联性研究[J]. 环境科学学报,2021,41(2):373-385.

[10] 陈漾,张金谱,黄祖照. 广州市近地面臭氧时空变化及其与气象因子的关系[J]. 中国环境监测,2017,33(4):99-109.

[11] 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.

[12] 符传博,周航. 中国城市臭氧的形成机理及污染影响因素研究进展[J]. 中国环境监测,2021,37(2):33-43.

[13] 姜华,常宏咪. 我国臭氧污染形势分析及成因初探[J]. 环境科学研究,2021,34(7):1576-1582.

[14] 史政都,田晋平,李秉正. 2015~2018年太原市臭氧污染特征分析[J]. 能源环境保护,2020,34(2):99-104.

[15] 陈雪萍,巨天珍,张江峪,等. 兰州市大气臭氧与其前体物及气象因子相关性研究[J]. 环境科学研究,2019,32(12):2075-2083.

[16] 钱悦,许彬,夏玲君,等. 2016~2019年江西省臭氧污染特征与气象因子影响分析[J]. 环境科学,2021,42(5):2190-2201.

[17] 周士茹,宋金妹,陆倩,等. 气象因子和海风对秦皇岛市臭氧污染的影响[J]. 气象与环境学报,2021,37(2):64-70.

[18] 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.

[19] 杨成江,于洋,陈学伟. 吉林省臭氧污染特征及其与气象要素的关系[J]. 环境科学与技术,2019,42(S2):254-258.

[20] 赵伟,高博,刘明,等. 气象因素对香港地区臭氧污染的影响[J]. 环境科学,2019,40(1):55-66.