



移动扫码阅读

刘祎,周德荣,蔡哲,等.江苏省臭氧污染天气分型及其与气象因子的关系研究[J].能源环境保护,2022,36(5):101-107.

LIU Yi, ZHOU Derong, CAI Zhe, et al. Typical weather classifications of O₃ pollution in Jiangsu Province and its relationship with meteorological factors[J]. Energy Environmental Protection, 2022, 36(5):101-107.

江苏省臭氧污染天气分型及其与气象因子的关系研究

刘 祎¹,周德荣^{1,2,*},蔡 哲¹,唐志伟¹

(1.南京创蓝科技有限公司,江苏 南京 211135;

2.南京大学 大气环境与绿色发展产业技术研究院,江苏 南京 210093)

摘要:基于2018~2020年江苏省臭氧浓度与气象要素数据,分析了夏季臭氧污染天气气象要素分布特征及其与臭氧浓度之间的相关性,并对臭氧污染较为严重的2019年进行天气分型,建立了臭氧浓度与气象因子预测回归方程。结果表明:影响2019年高浓度臭氧污染的天气类型主要为暖平流型、高压脊型、暖湿气流型、副高控制型和台风影响型;夏季污染天臭氧浓度与气温、太阳辐射呈较强正相关,与风速呈较弱正相关,与相对湿度呈较强负相关,与海平面气压相关性较弱;夏季江苏省臭氧污染天的太阳辐射高频值、海平面气压、气温、相对湿度、风速的集中范围分别是340~360 W·m⁻²、1 001~1 007 hPa、26~28℃、65%~75%、2.5~3 m·s⁻¹;为了快速预测臭氧浓度,可利用臭氧污染天小时浓度值与气象因子建立回归方程。

关键词:臭氧污染;天气分型;气象因子;回归分析

中图分类号:X51

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2022)05-0101-07

Typical weather classifications of O₃ pollution in Jiangsu Province and its relationship with meteorological factors

LIU Yi¹,ZHOU Derong^{1,2,*},CAI Zhe¹,TANG Zhiwei¹

(1.Nanjing CLIMBLUE Technology Co., Ltd., Nanjing 211135, China;2.Atmospheric

Environment and Green Development Research Institute, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract:Based on the data of ozone concentrations and meteorological elements in Jiangsu Province from 2018 to 2020, the distribution characteristics of meteorological elements in ozone pollution days in summer and the relationship between meteorological elements and ozone concentration were analyzed. The weather situation during 2019, which was seriously polluted by ozone, was classified. The prediction regression equation between ozone concentration and meteorological elements was established. The results showed that the weather types causing serious ozone pollution in 2019 were mainly warm advection type, high pressure ridge type, warm humid airflow type, subtropical high pressure controlled type and typhoon impact type. During the pollution days in summer, ozone concentration had a strong positive correlation with temperature and sun radiation, a weak positive correlation with wind speed, a strong negative correlation with relative humidity and a weak correlation with sea level pressure. The ranges of solar radiation high frequency, sea level pressure, air temperature, relative humidity and wind speed on ozone polluted days in summer in Jiangsu Province were 340~360 W·m⁻², 1 001~1 007 hPa, 26~28℃, 65%~75%, 2.5~3.0 m·s⁻¹, respectively. In order to quickly predict the ozone concentration, a regression equation of the hourly average ozone concentration and the meteorological factors was established.

收稿日期:2022-05-07;责任编辑:金丽丽

基金项目:江苏省重点研发计划(社会发展)重大科技示范基金资助项目(SBE 2019710077)

第一作者简介:刘祎(1993—),女,辽宁朝阳人,硕士,主要研究方向为空气污染传输、大气污染溯源。E-mail:liuyi1@climblue.com

通讯作者简介:周德荣(1988—),男,江苏泰州人,博士,主要研究方向为空气污染气象学、大气物理和大气化学。E-mail:zhouderong@climblue.com

logical elements was established.

Key Words: Ozone pollution; Typical weather classification; Meteorological elements; Regression analysis

0 引言

近年来,社会经济快速发展,人口增加以及能源结构的变化和转型带来的城市空气质量问题正受到越来越多的关注。空气污染会对人体健康、生产生活、交通运输等各方面带来不利影响^[1-4],而在排放源相对稳定的情况下,气象条件是影响空气质量的重要因素^[5-7]。因此,分析空气质量和气象因子间内在关系是研究城市大气环境的重要内容。

臭氧是现在人们非常关注的影响空气质量主要污染物之一。近年来,随着对 PM_{2.5} 污染的大力治理,以高浓度臭氧为典型特征的光化学污染问题正逐步显现,近地面臭氧主要是由 NO_x 和 VOCs 在光照条件下生成的二次污染物^[8-10]。周亚瑞^[11]等对新冠肺炎疫情期间空气质量影响情况进行了研究,发现臭氧浓度有所升高,其中人为源减排对其平均浓度的升高贡献为 52.5%。与此同时,较多监测和研究数据表明,臭氧浓度具有明显的日变化和季节性变化特征,其浓度变化与气象条件关系密切,晴热少云的低湿天气、强紫外线辐射以及较小的风速,均有利于臭氧的本地生成^[12-14]。此外,不同地区的臭氧污染特征和相关气象条件变化也不尽相同。梁碧玲等^[15]发现深圳地区夏季臭氧污染较轻,而秋冬季臭氧污染较为严重,高温、充足的日照及弱风条件下更有利于臭氧生成。余钟奇等^[5]通过分析上海市臭氧变化特征及气象条件影响,对臭氧污染天进行了主观分型。刘松等^[16]发现当西安市区为偏南风主导时,来自秦岭的植物 VOCs 有利于市区的臭氧生成。王磊等^[17]探究了南京地区不同季节中近地面臭氧浓度与高空、地面风场的关系,并归纳了伴随南京地区高浓度臭氧时间出现的 8 种主要天气形势。

随着江苏省臭氧污染天气的频发,学者们也展开了相关研究工作^[6,9,18],但多限于研究污染时段臭氧与气象因子分布特征,或单个气象因子对臭氧污染的影响。对于综合分析天气形势并结合多气象因子建立预测方程的研究较少。本文利用 2018~2020 年江苏省臭氧污染与气象要素数据,分析夏季

臭氧污染发生时气象要素分布特征及其与臭氧浓度之间的相关性,并对臭氧污染较为严重的 2019 年进行天气分型,探讨不同天气类型导致臭氧污染的气象机理,同时建立了夏季臭氧浓度与气象因子预测回归方程,以期为江苏省大气污染管控、空气质量预报预警及改善提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 数据介绍

2018~2020 年江苏省空气质量监测数据来源于中国环境监测总站官网 (<http://www.cnemc.cn/>),包含臭氧、PM_{2.5}、PM₁₀、NO₂、SO₂ 和 CO 的小时浓度数据。本文中, O₃-8h 代表臭氧的日最大八小时滑动平均值,是臭氧污染的重要评价指标。

江苏省气象观测数据来源于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>),主要包括气温、气压、相对湿度、10 m 风向风速、降水等要素小时观测值。由于该气象数据中不包括太阳辐射数据,而太阳辐射量又是影响臭氧污染的重要指标之一,因此本文所需的太阳辐射数据来自于 WRF 模式模拟数据,水平空间分辨率为 3 km,时间分辨率为 1 h。

1.2 研究方法

(1) 主观污染天气分型方法

污染天气分型方法主要包括主观和客观天气分型方法^[5]。本文采用主观天气分型方法,即通过对历史天气图的理解和分析,结合气象、大气污染等理论,总结分类出不同污染情况下的环流背景和天气形势特征,并具体阐明不同污染天气类型下的气象和污染物要素特征。本文利用该方法,归纳总结出影响江苏省臭氧污染的不同天气系统,为臭氧污染控制和提高臭氧预报预警能力有较好的辅助作用。

(2) 相关性分析

采用基于数学统计的方法,对江苏省近地面臭氧污染浓度与气象因素进行相关性分析,最常用的相关系数为 Pearson 相关系数,取值-1~1,绝对值越大,说明相关性越强。

(3) 多元线性回归分析

多元线性回归方法是基于因变量和自变量之间满足线性关系的假设,建立的回归方程。回归

方程可表示为:

$$y = C_0 + C_1 X_1 + C_2 X_2 + \cdots + C_p X_p \quad (1)$$

其中 y 为因变量。 $C_0, C_1, C_2, \cdots, C_p$ 为回归系数,可利用最小二乘法得到。 $X_1, X_2, \cdots, X_p$ 为自变量。本文利用多元线性回归分析建立臭氧浓度与各气象要素的回归方程。

2 结果与分析

2.1 2018~2020 年臭氧污染概况

经统计,2018~2020 年全省臭氧超标天数分别为 36、53、37 d,2018~2020 年江苏各城市臭氧

月均浓度变化如图 1 所示。从图中可以看出,2019 年臭氧污染较为严重,除 1 月、4 月和 10 月外,其他月份全省臭氧平均浓度均有所升高,5 月和 7 月浓度增幅较大,全省月平均浓度升高幅度超过 $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$,而 2020 年臭氧污染有所减轻,月均浓度均未超过 $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$,除 1 月、2 月、4 月和 9 月外,其他月份全省平均浓度较上年呈下降趋势,其中 6~7 月降幅较大,分别下降了 $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。从各城市来看,南京、无锡、徐州、苏州、南通、宿迁及连云港在 2019 年 7 月浓度升高幅度超过 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$,污染程度加重。

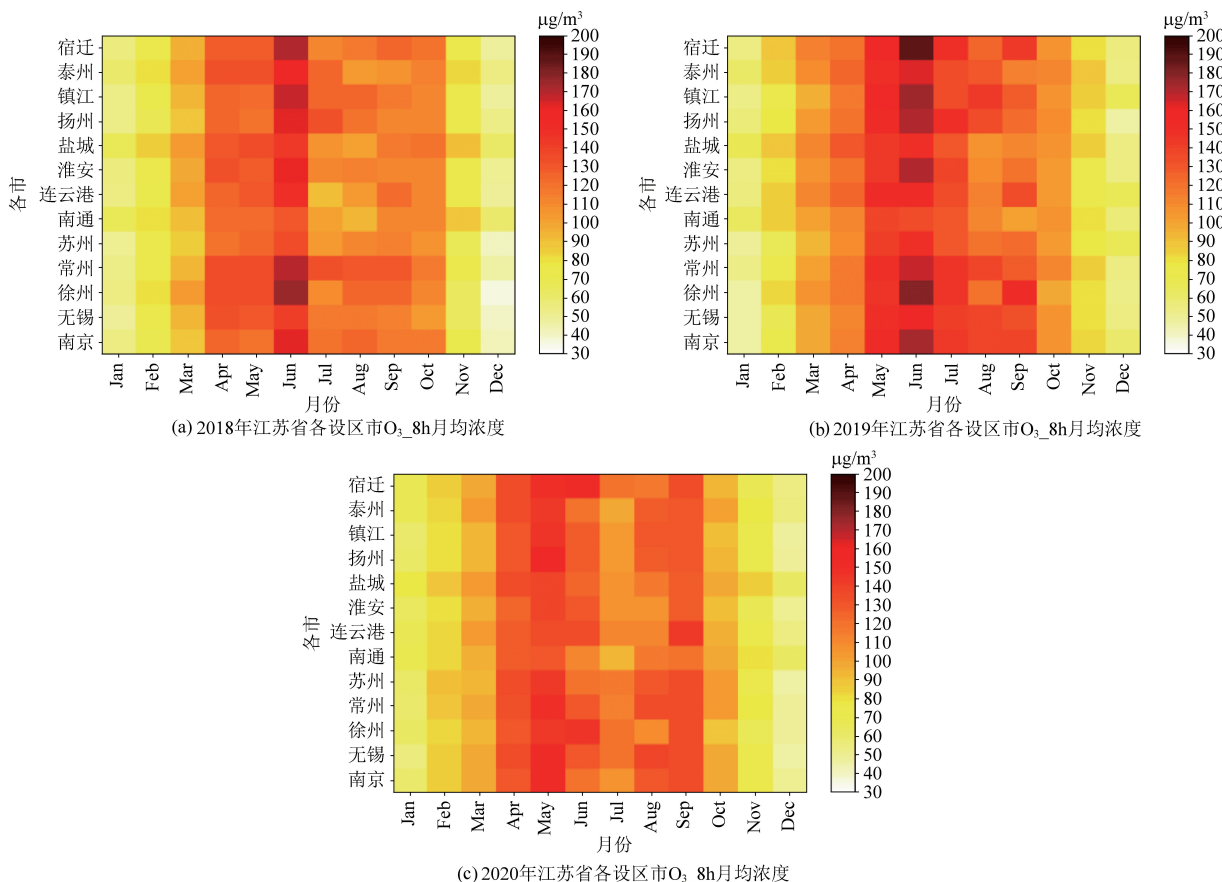


图 1 2018~2020 年江苏省各设区市 O_3 _8h 月均浓度

Fig.1 The monthly average concentrations of O_3 _8h in various districts of Jiangsu Province from 2018 to 2020

2.2 2019 年臭氧天气分型

由上文分析可知,2019 年臭氧污染较为严重,因此选择 2019 年进行臭氧天气分型。由 2019 年江苏省臭氧浓度监测数据可知,发生臭氧污染共 53 d。从污染发生的日期来看,臭氧污染与副热带高压的季节移动有很大的关系,按照不同的天气类型,将其划分为 5 类,每种类型的天数分别为 7、22、5、18、1 d。5 种天气类型的不同高度的江苏地区气象形势配置、气象要素以及对应的臭氧浓

度如表 1 所示。

从表中可以看出,江苏省 2019 年臭氧污染发生时,日均气温在 $20.9 \sim 29.3 \text{ }^\circ\text{C}$,不同类型间差别较为明显,而风速和相对湿度则区别不大,地面风速在 $2.4 \sim 2.8 \text{ m/s}$,相对湿度在 $57\% \sim 77\%$ 之间。下面将分别讨论 5 种天气类型的 500 hPa、850 hPa 及地面的天气形势特点。

经统计总结各类型天气形势特征发现,暖平流型污染天气主要出现在春季,气温逐渐升高,

500 hPa 副热带高压位置偏南,580 线位于福建中北部地区,江苏地区受偏西风气流影响,850 hPa

有明显的暖平流,地面受高压控制,天气一般为晴朗或多云,增温增湿有利于光化学反应生成臭氧。

表 1 5 种天气类型下不同位势高度气象形势配置、气象要素及臭氧浓度

Table 1 Weather situations in different potential height, meteorological elements and ozone concentrations for 5 typical weather types

指标	暖平流型	高压脊型	暖湿平流型	副高控制型	台风影响型
500 hPa	偏西气流	高空脊	偏西气流	副高边缘/内部	台风过境前后
850 hPa	暖平流	高空脊	西南气流	副高边缘/内部	副高影响
地面	高压	均压/高压	均压/高压	均压/高压	均压/高压
气温/℃	20.9	23.6	29.3	25.7	25.5
风速/(m·s ⁻¹)	2.8	2.8	2.7	2.4	2.8
相对湿度/%	64.6	57.0	76.2	71.1	76.9
O ₃ _8h 平均浓度/(μg·m ⁻³)	198	203	195	201	183

高压脊型主要集中在春末夏初,天气逐渐变得炎热,但此时江南地区尚未进入梅雨季节,500 hPa 处于高空脊前,580 线位于江苏南部地区,850 hPa 上江苏上空有反气旋式环流,整层大气以下沉运动为主,地面以均压场或者高压控制为主,天气一般较为晴朗,有利于臭氧生成,同时下沉运动也有利于高空的臭氧向近地面传输。

暖湿气流型主要在 6、7 月发生,580 线北抬至江苏中部地区,850 hPa 为西南气流,江南地区进入梅雨季节,气候湿润多雨,天气较为闷热,此时段光照条件较弱,但其垂直与水平扩散条件较差,易造成本地臭氧堆积,形成大范围臭氧污染。

副高控制型主要集中在江苏受到副高控制的盛夏及夏末秋初期间,高低空均受到副热带高压的影响,晴朗高温,有利于光化学反应生成臭氧,下沉运动强烈,高空的臭氧下传及本地积累容易造成大范围、长时间的臭氧污染,全年臭氧峰值也出现在该类型中。

台风影响型仅出现在 9 月 7 日,该类型与副高控制型较为相似,但是在西太平洋台风影响下,海洋上空的高浓度臭氧对东南沿海地区臭氧浓度有明显的输送作用,因此单独列为一种类型。从高低空配置来看,500 hPa 以高空槽影响为主,850 hPa 及地面为偏东气流,风速较大,海洋臭氧对江苏地区有明显的传输影响。

2.3 臭氧污染与气象因子相关性分析

气象因素在臭氧的形成、沉降、传输和稀释过程中起着重要作用,特别是在局地气象条件下,因此,开展气象要素与臭氧质量浓度之间的相关分析,将有助于理解臭氧高污染产生的原因,这对臭氧污染天气的预报和治理有着重要意义。

臭氧污染大多发生在夏季,因此选择 2018~

2020 年夏季(6~9 月)开展臭氧污染与气象因子相关性研究。经统计计算得到 2018~2020 年夏季江苏省臭氧超标天 O₃_8h 与气象因子日均值相关性(其中气温为日最大值),发现污染天臭氧浓度与气温、太阳辐射呈较强正相关,相关系数均为 0.5,与风速呈较弱正相关,相关系数为 0.4,与相对湿度呈较强负相关,相关系数达-0.6,而与海平面气压负相关性较弱,相关系数为-0.2。

2.4 臭氧污染与气象因子分布概况

2018~2020 年夏季全省臭氧污染与气象因子分布概况如下表所示。从表中可以看出 2019 年臭氧污染天数最高为 53 d,且臭氧平均浓度最高,为 196 μg/m³,各气象要素中,海平面气压平均值在 1 005~1 009 hPa,气温在 24~29 ℃ 以内,相对湿度在 65%左右,风速在 2.2~2.7 m/s 范围内,太阳辐射在 300~335 W/m²。

进一步地,统计 2018~2020 年夏季江苏省臭氧污染天中各气象因子日均值,得到其频率分布如图 3 所示,可见太阳辐射高频值出现在 340~360 W/m² 范围,高于夏季平均值(298 W/m²)较多;海平面气压集中在 1 001~1 007 hPa 之间,处于夏季平均水平(1 006 hPa);气温主要分布在 26~28 ℃,略高于夏季平均值(26 ℃);相对湿度在 65%~75% 范围偏多,其低于全省平均值(79%);风速集中在 2.5~3.0 m/s 之间,接近全省平均水平(3 m/s)。

除以上高频值分布范围外,在太阳辐射较低时、气压较高时、相对湿度较高时或风速较高时也有臭氧污染发生。结合上文分析的臭氧天气分型可以发现,在梅雨季节相对湿度较高,水平垂直扩散条件不利,也会造成部分时段的臭氧累积。风速较高时容易受传输作用影响,导致臭氧浓度的升高^[11]。

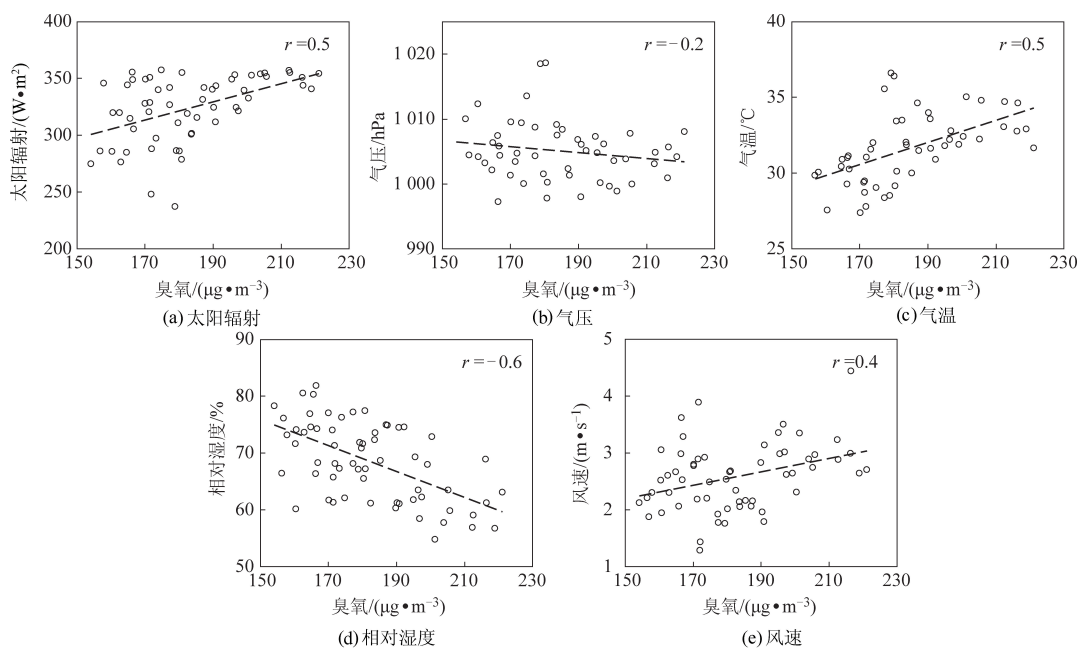
图2 臭氧与各气象因子相关性(均通过显著性检验, $P<0.05$)Fig.2 Correlations between ozone concentrations and various meteorological elements (all passed the significance test, $P<0.05$)

表2 2018~2020年夏季江苏省臭氧污染与气象要素概况

Table 2 Overview of ozone pollution and meteorological elements in Jiangsu Province in the summer from 2018 to 2020

年份	臭氧污染天数	臭氧平均浓度 /($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	海平面气压 /hPa	气温 /°C	相对湿度 /%	风速 /($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	太阳辐射 /($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)
2018年	36	175	1 008.1	24.0	65.7	2.5	335.0
2019年	53	196	1 006.7	25.2	64.1	2.7	324.2
2020年	37	172	1 005.9	28.5	69.3	2.2	301.3
平均	42	181	1 006.9	25.9	66.4	3.5	320.2

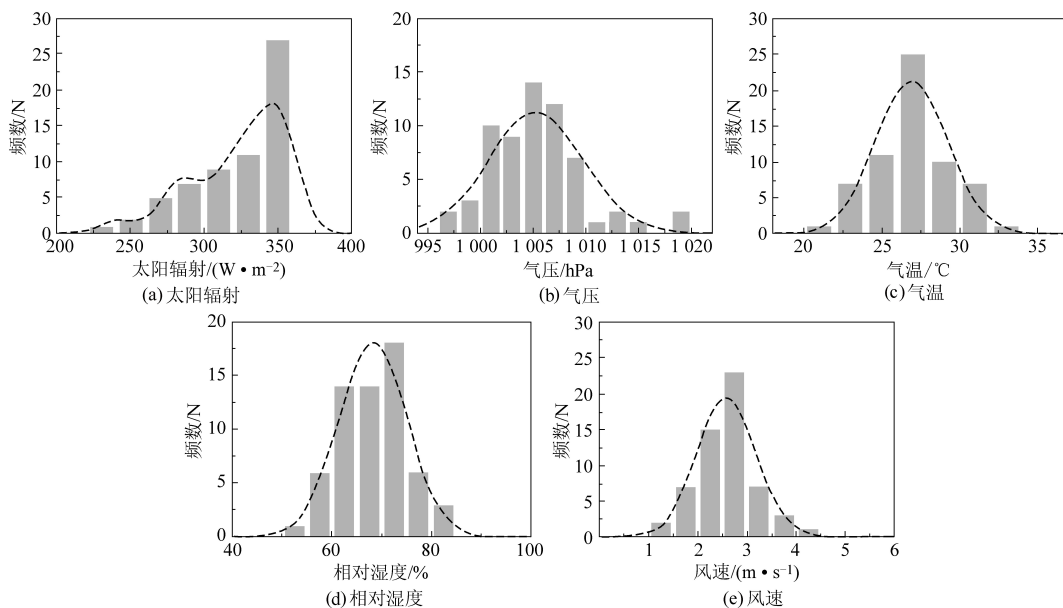


图3 2018~2020年夏季臭氧污染天气气象因子频率分布直方图

Fig.3 Histogram of frequency distribution of meteorological elements during ozone pollution days in the summer from 2018 to 2020

2.5 臭氧与气象因子回归分析与效果检验

综上可知,臭氧污染与气象因子关系密切,为了更好地预测不同气象条件下臭氧污染情况,探索臭氧污染与各气象因子的关系,且考虑到臭氧非污染天数据的加入可能会弱化臭氧高值拟合效果,因此进一步利用2018~2020年夏季全省臭氧超标天小时值与气象因子建立回归方程,得到拟合方程:

$$y=0.12X_1+4.31X_2-1.77X_3+3.73X_4-0.1X_5 \quad (2)$$

其中, y 为臭氧, X_1 为海平面气压, X_2 为气温, X_3 为相对湿度, X_4 为风速, X_5 为太阳辐射。回归方程拟合 R^2 达0.96,且通过显著性检验($P<0.05$)。随机选择南京2018年6月与徐州2019年9月臭氧浓度进行回归方程拟合效果检验,发现日变化趋势与观测值较为一致,其中臭氧观测与模拟的峰值值拟合效果均较好,拟合峰值与观测值的小部分差异可能与本地排放及臭氧化学反应过程有关。

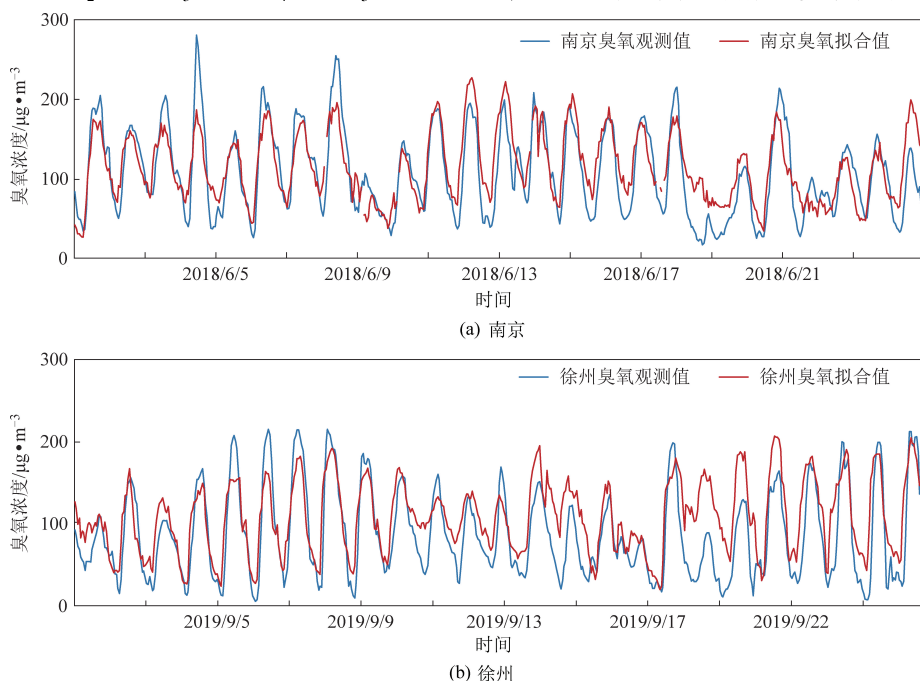


图4 臭氧与气象因子回归方程检验(以南京和徐州为例)

Fig.4 Regression equation test between ozone and meteorological elements(taking Nanjing and Xuzhou as examples)

3 结 论

(1)2018~2020年中2019年臭氧污染较为严重。从全省月均值来看,2019年5月和7月臭氧浓度增幅较大,而2020年臭氧污染有所减轻,月均浓度均未超过 $160\mu\text{g}/\text{m}^3$,大部分月份全省平均浓度均呈下降趋势。从各城市来看,南京、无锡、徐州、苏州、南通、宿迁及连云港在2019年7月浓度升高幅度超过 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$,污染程度加重。

(2)针对2019年江苏臭氧污染事件,按照不同天气形势对臭氧污染的影响,将臭氧污染事件发生的天气形势影响类型划分为5种,分别为暖平流型、高压脊型、暖湿气流型、副高控制型和台风影响型。总体来看,江苏省臭氧污染天气类型与副热带高压的季节移动(北上、南退)有明显关系,并且容易受到中低空西南暖湿气流的影响,垂直方向上高空的高浓度臭氧下传,以及海洋上高浓度臭氧输送也是造成江苏省臭氧污染的重要影响因子。

(3)江苏省夏季污染天臭氧浓度与气温、太阳辐射呈较强正相关,与风速呈较弱正相关,与相对湿度呈较强负相关,与海平面气压相关性较弱;

(4)夏季江苏省臭氧污染天各气象因子日均值分布显示,太阳辐射高频值出现在 $340\sim 360\text{W}/\text{m}^2$ 范围,海平面气压集中在 $1001\sim 1007\text{hPa}$ 之间,气温主要分布在 $26\sim 28^\circ\text{C}$,相对湿度在 $65\%\sim 75\%$ 范围偏多,风速集中在 $2.5\sim 3.0\text{m}/\text{s}$ 之间。

(5)通过臭氧浓度与气象因子建立回归方程,可快速预测臭氧浓度(仅考虑气象条件),为臭氧污染预报预警提供数据支持。

参考文献

- [1] Yang C, Yang H, Guo S, et al. Alternative ozone metrics and daily mortality in Suzhou: The China Air Pollution and Health Effects Study (CAPES) [J]. Science of the Total Environment, 2012, 426: 83-89.
- [2] 郭新彪,魏红英. 大气 $\text{PM}_{2.5}$ 对健康影响的研究进展 [J]. 科学通报, 2013 (13): 1171-1177.

- GUO Xinbiao, WEI Hongying. Progress on the health effects of ambient PM_{2.5} pollution [J]. Chinese Science Bulletin, 2013 (13): 1171-1177.
- [3] 浦静姣, 徐宏辉, 马千里. 长江三角洲背景地区大气污染对能见度的影响 [J]. 中国环境科学, 2017, 37 (12): 4435-4441.
- PU Jingjiao, XU Honghui, MA Qianli. Impacts of atmospheric pollution on visibility in the background area of Yangtze River Delta, China [J]. China Environmental Science, 2017, 37 (12): 4435-4441.
- [4] 林丽钦, 陈婧瑜, 吴明言, 等. 2017—2018 年闽近地面臭氧污染对人群健康的影响 [J]. 福建医药杂志, 2020, 42 (1): 141-145.
- LIN Liqin, CHEN Jingyu, WU Mingyan, et al. Human health impact of exposure of surface ozone pollution in Fujian Province during 2017—2018 [J]. Fujian Medical Journal, 2020, 42 (1): 141-145.
- [5] 余钟奇, 马井会, 毛卓成, 等. 2017 年上海臭氧污染气象条件分析及臭氧污染天气分型研究 [J]. 气象与环境学报, 2019 (6): 46-54.
- YU Zhongqi, MA Jinghui, MAO Zhuocheng, et al. Study on the meteorological conditions and synoptic classifications of O₃ pollution in Shanghai in 2017 [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2019 (6): 46-54.
- [6] 严文莲, 刘端阳, 康志明, 等. 江苏臭氧污染特征及其与气象因子的关系 [J]. 气象科学, 2019 (4): 477-487.
- YAN Wenlian, LIU Duanyang, KANG Zhiming, et al. The characteristics of ozone pollution and its relationship with meteorological factors in Jiangsu [J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2019 (4): 477-487.
- [7] 孙国金, 朱绍东, 李优楠, 等. 绍兴市臭氧污染特征及气象因素分析 [J]. 环境污染与防治, 2020, 42 (5): 608-613.
- SUN Guojin, ZHU Shaodong, LI Younan, et al. Analysis of ozone pollution characteristics and meteorological factors in Shaoxing [J]. Environmental Pollution & Control, 2020, 42 (5): 608-613.
- [8] 符传博, 徐文帅, 丹利, 等. 前体物与气象因子对海南省臭氧污染的影响 [J]. 环境科学与技术, 2020, 43 (7): 45-50.
- FU Chuanbo, XU Wenshuai, DAN Li, et al. Impacts of precursors and meteorological factors on ozone pollution in Hainan Province [J]. Environmental Science & Technology, 2020, 43 (7): 45-50.
- [9] 李琴, 刁春燕, 楚碧武, 等. 南方某海滨城市臭氧污染原因解析及控制建议 [J]. 环境科学与技术, 2020, 43 (4): 71-78.
- LI Qin, DIAO Chunyan, CHU Biwu, et al. Reason analysis and control of ozone pollution in a southern coastal city [J]. Environmental Science & Technology, 2020, 43 (4): 71-78.
- [10] P S Monks, A T Archibald, A Colette, et al. Tropospheric ozone and its precursors from the urban to the global scale from air quality to short-lived climate forcer [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, 15 (15): 8889-8973.
- [11] 周亚端, 朱宽广, 黄凡, 等. 新冠肺炎疫情期间湖北省大气污染物减排效果评估 [J]. 环境科学与技术, 2020, 43 (3): 228-236.
- ZHOU Yaduan, ZHU Kuanguang, HUANG Fan, et al. Emission reductions and air quality improvements during the COVID-19 pandemic in Hubei province [J]. Environmental Science & Technology, 2020, 43 (3): 228-236.
- [12] 杨娜, 王春迎, 刘孟雄, 等. 洛阳市臭氧污染特征及其与气象因子的关系 [J]. 气象与环境科学, 2019, 42 (4): 90-95.
- YANG Na, WANG Chunying, LIU Mengxiong, et al. Characteristics of ozone pollution in Luoyang and its correlation with meteorological elements [J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2019, 42 (4): 90-95.
- [13] 宋雪燕, 高丽枝, 罗迪, 等. 云南省臭氧污染特征及气象影响分析 [J]. 中国环境监测, 2020, 36 (4): 16-28.
- SONG Xueyan, GAO Lizhi, LUO Di, et al. Analysis of ozone pollution characteristics and meteorological impacts in Yunnan Province [J]. Environmental Monitoring in China, 2020, 36 (4): 16-28.
- [14] 李莉莉, 王隆, 刘喜平, 等. 哈尔滨市臭氧时空分布特征及气象要素的关系 [J]. 中国环境科学, 2020, 40 (5): 1991-1999.
- LI Lili, WANG Long, LIU Xiping, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of ozone and its relationship with meteorological factors in Harbin [J]. China Environment Science, 2020, 40 (5): 1991-1999.
- [15] 梁碧玲, 张丽, 赖鑫, 等. 深圳市臭氧污染特征及其与气象条件的关系 [J]. 气象与环境学报, 2017, 33 (1): 66-71.
- LIANG Biling, ZHANG Li, LAI Xin, et al. Analysis of the characteristics of ozone pollution and its relationship with meteorological conditions in Shenzhen [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2017, 33 (1): 66-71.
- [16] 刘松, 程燕, 李博伟, 等. 2013—2016 年西安市臭氧时空变化特性与影响因素 [J]. 地球环境学报, 2017, 8 (6): 541-551.
- LIU Song, CHENG Yan, LI Bowei, et al. Characteristics of temporal and spatial variations of ozone and its influencing factor over Xi'an during 2013—2016 [J]. Journal of Earth Environment, 2017, 8 (6): 541-551.
- [17] 王磊, 刘端阳, 韩桂荣, 等. 南京地区近地面臭氧浓度与气象条件关系研究 [J]. 环境科学学报, 2018, 38 (4): 1285-1296.
- WANG Lei, LIU Duanyang, HAN Guirong, et al. Study on the relationship between surface ozone concentrations and meteorological conditions in Nanjing, China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38 (4): 1285-1296.
- [18] 陆维青, 杨雪, 陈诚. 江苏省臭氧污染变化特征 [J]. 科技视界, 2016 (18): 222-223.
- LU Weiqing, YANG Xue, CHEN Cheng. Characteristics of changes in ozone pollution in Jiangsu Province [J]. Science & Technology Vision, 2016 (18): 222-223.