

E方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

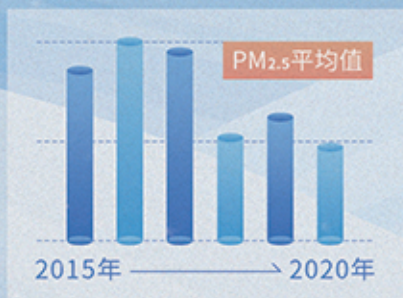
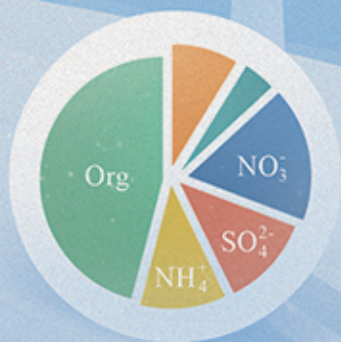
# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

## 北京冬季奥运会历史同期大气PM<sub>2.5</sub>污染特征分析

刘玥晨, 满睿琪, 裘彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意,  
曾立民, 吴志军, 胡敏



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心  
■ 出版 科学出版社



2022年8月

第43卷 第8期  
Vol.43 No.8

目次

北京冬季奥运会历史同期大气 PM<sub>2.5</sub> 污染特征分析..... 刘玥晨, 满睿琪, 袁彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意, 曾立民, 吴志军, 胡敏(3895)

天津城区 2019 年 2~3 月气溶胶粒径分布特征观测分析..... 郝困, 蔡子颖, 刘敬乐, 王晓佳, 姚青(3903)

长江中游地区 PM<sub>2.5</sub> 重污染过程的典型天气环流分型及区域传输影响..... 王莹, 智协飞, 白永清, 董甫, 张玲(3913)

滇中典型工矿城市大气干湿沉降重金属等元素特征及健康风险评价..... 范晨子, 刘永兵, 袁继海, 郭威, 孙冬阳, 刘成海(3923)

典型工业城市夏季 VOCs 污染特征及反应活性..... 秦涛, 李丽明, 王信梧, 杨文, 王晓雨, 徐勃, 耿春梅(3934)

大连市夏季 VOCs 化学反应活性及来源..... 朱轲欣, 刘立忠, 刘焕武, 罗静期, 高冉冉(3944)

河南省 18 个城市大气污染物分布特征、区域来源和传输路径..... 刘光瑾, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 王克(3953)

京津冀臭氧污染特征、气象影响及基于神经网络的预报效果评估..... 朱媛媛, 刘冰, 桂海林, 李健军, 汪巍(3966)

2006~2020 年中国大气本底站 BC 气溶胶的时空分布特征..... 王红磊, 颜雪, 沈利娟, 柳竞先, 赵天良, 管小彬, 赵德龙(3977)

钢铁生产行业二氧化硫污染特征变化及其排放因子..... 杨艳艳, 谢丹平, 付建平, 陈晓燕, 尹文华, 韩静磊, 张素坤, 张璐, 肖滔(3990)

长江流域着生藻类群落结构的格局及其生态评价..... 胡愈忻, 曹亮, 屈仁超, 黄杰, 胡圣, 周正, 王英才, 张静(3998)

基于蒙特卡洛模拟与 PMF 模型的黄河流域沉积物重金属污染评价及源解析..... 鹿阔, 李敏, 刘璐, 杨璐璐, 赵洪军(4008)

梯级拦河堰对典型山地城市河流重金属元素的滞留效应: 以重庆市梁滩河为例..... 王超, 贾伯阳, 潘成勇, 何文战, 叶秋, 罗杉山, 张夏武(4018)

基于土壤流失的农业面源 TN 和 TP 排海系数估算..... 王有霄, 黄翀, 刘高焕, 赵忠贺, 李贺, 刘庆生(4032)

河湟谷地不同时空尺度下土地利用及空间格局对水质的影响..... 李好好, 黄懿梅, 郭威, 侯宏洋, 范梦苑, 齐照平, 贾鹏辉, 郭庆波(4042)

联合 PMF 模型与稳定同位素的地下水污染溯源..... 张涵, 杜昕宇, 高菲, 曾卓, 程思茜, 许懿(4054)

江西锦江流域抗生素污染特征与生态风险评价..... 李佳乐, 王萌, 胡发旺, 董一慧, 孙占学, 王瑶, 卫承芳, 燕雯(4064)

天津市地表水中新型优先污染物筛选与管控对策..... 吴颜岐, 宋帅, 史雅娟, 刘莹, 杨胜杰(4074)

宁夏第三排水沟中药物和个人护理品(PPCPs)的污染特征与生态风险评估..... 李富娟, 高礼, 李凌云, 郑兰香, 马兰, 杨桂钦(4087)

再生水河道浮游微生物多样性季节变化分析: 以北运河为例..... 袁训超, 王敏, 郭道宇, 吴东丽(4097)

太湖草、藻湖区沉积物 WSOM 组成和分子结构分析..... 杜瑛琦, 戴家如, 张巧颖, 刘静静, 黄秀琳, 安世林, 文帅龙(4108)

太湖氧化亚氮(N<sub>2</sub>O)排放特征及潜在驱动因素..... 刘朝荣, 朱俊羽, 李宇阳, 俞晓琴, 陈慧敏, 杨艳, 周永强(4118)

海绵城市生物滞留带重金属污染特征及风险评价..... 雷晓玲, 邱丽娜, 魏泽军, 杨程, 何博(4127)

玉米芯和稻草秸秆强化潜流人工湿地对低 C/N 污水的处理效果..... 胡曼利, 郝庆菊, 马容真, 陈柯沁, 罗师旭, 江长胜(4136)

环境 pH 条件下 Fe<sup>2+</sup> 活化过二硫酸盐降解有机污染物的效能与影响因素..... 刘颖, 郭依玮, 乔俊莲, 孙远奎(4146)

新疆沙雅县不同植物类型农田环境中典型农药残留及其风险评价..... 谢宣宣, 艾力江·努尔拉, 买合木提·巴拉提, 仲乃福, 李南鑫(4154)

宁夏养鸡场粪污和周边土壤中抗生素及抗生素抗性基因分布特征..... 沈聪, 张俊华, 刘吉利, 韩新宁, 尚天浩, 代金霞(4166)

宁夏石嘴山市农用地土壤硒的富集因素..... 王莹, 刘海燕, 王泽晶, 张晓东, 王登红(4179)

地块尺度重金属污染风险耕地安全利用区划方法..... 王锐, 余京, 李瑜, 周蛟, 贾中民, 余飞, 张云逸, 蒋玉莲(4190)

姜湖贡米产地土壤重金属空间分布、源解析及生态风险评估..... 于林松, 万方, 范海印, 康桂玲, 刘辉, 王东平, 徐佳(4199)

基于特定源风险评估模型的小麦籽粒铅超标风险预测..... 杨阳, 李艳玲, 牛硕, 陈卫平, 王天齐, 王美娥(4212)

柳州地源性镉异常区稻米重金属累积效应与健康风险..... 朱亮亮, 王佛鹏, 唐乐斌, 肖乃川, 董心月, 韦美溜, 宋波(4219)

不同玉米品种 Cd、Pb、Zn 和 As 积累与转运特性..... 任超, 肖建辉, 李竞天, 杜倩倩, 朱利文, 王浩, 朱瑞瑛, 赵海洋(4232)

橡胶草(TKS)对铅镉污染农田土壤的修复潜力..... 张恒, 熊明彪, 王乾鑫, 孙博文, 饶逸驰, 程章, 徐小逊, 杨占彪, 鲜骏仁, 朱雪梅, 杨绍平, 杨远祥(4253)

3 种地被竹对重金属复合污染农田土壤的修复潜力..... 张颖, 赵欣, 张圣虎, 漆丹, 王博, 陈引, 陆建刚(4262)

连续施肥对双季稻镉硅累积效应的影响..... 彭华, 邓凯, 石宇, 魏维, 柳赛花, 纪雄辉(4271)

改性壳聚糖负载氧化硅调控水稻对砷吸收与转运的影响..... 杨嘉仪, 孙梦强, 肖羽堂, 韦行, 张建强, 陈志良(4282)

不同螯合剂和有机酸对苍耳修复镉复合污染土壤的影响..... 张雅睿, 黄益宗, 保琼莉, 魏祥东, 铁柏清, 张盛楠, 韩甘, 黄永春(4292)

水分管理对稻田土壤铁氧化物形态转化的影响及其与酶活性变化的耦合关系..... 李明远, 张小婷, 刘汉斌, 魏世强(4301)

外源 Fe 调控根系微生物群落结构和功能对水稻 Cd 积累的影响..... 郑沈, 黄道友, 李波, 马天池, 许超, 朱奇宏, 朱捍华, 张泉(4313)

不同降水下覆盖与缓释肥减量对油菜土壤微生物群落结构的影响..... 冯军, 石超, Hafiz Athar Hussain, 刘永波, 刘天朋, 李永洪, 刘俊峰, 王龙昌(4322)

基于高通量测序和代谢组学解析重金属污染对农田微生物群落组成和功能的影响..... 鹿发虎, 李晓琦, 段荆阳, 陈彦, 姬明飞, 张浩, 韩辉, 陈兆进(4333)

汞矿区周边农田土壤微生物群落结构特征及其环境驱动因子..... 陈芬, 余高, 孙约兵, 张红丽, 田霞, 夏蓓(4342)

岩溶湿地与稻田土壤团聚体细菌群落结构的比较..... 冷蒙, 靳振江, 肖筱怡, 熊丽媛, 李雪松(4353)

戴云山土壤微生物碳源利用效率的海拔变异规律及影响因素..... 吕坤, 王晶晶, 吴国朋, 林思诺, 苏延桂, 黄刚(4364)

长期秸秆还田对水稻根系碳矿化与激发效应的影响..... 刘峰, 王云秋, 张昀, 祝贞科, 吴金水, 葛体达, 李宇虹(4372)

秸秆还田配施生物炭对关中平原夏玉米产量和土壤 N<sub>2</sub>O 排放的影响..... 白金泽, 刘镇远, 宋佳杰, 李娜, 于琦, 郝嘉琪, 许宏伟, 程博豪, 王兴, 冯永忠(4379)

聚苯乙烯纳米塑料对大蒜生长生理的影响..... 邱陈陈, 李国新, 李青松, 颜昌宙(4387)

微塑料对土壤水分入渗和蒸发的影响..... 王志超, 张博文, 倪嘉轩, 杨文焕, 李卫平(4394)

氢燃料电池汽车动力系统生命周期评价及关键参数对比..... 陈轶嵩, 兰利波, 郝卓, 付佩(4402)

《环境科学》征订启事(4211) 《环境科学》征稿简则(4312) 信息(3922, 4031, 4107)

# 京津冀臭氧污染特征、气象影响及基于神经网络的预报效果评估

朱媛媛<sup>1,2</sup>, 刘冰<sup>1</sup>, 桂海林<sup>3</sup>, 李健军<sup>1</sup>, 汪巍<sup>1\*</sup>

(1. 中国环境监测总站, 北京 100012; 2. 北京科技大学能源与环境工程学院, 北京 100083; 3. 国家气象中心, 北京 100081)

**摘要:** 基于生态环境监测和气象观测数据, 分析了 2016~2020 年京津冀 13 个城市臭氧(O<sub>3</sub>)浓度特征, 讨论了 O<sub>3</sub> 污染高发月份日最高温度( $T_{\max}$ )、日均地面气压( $p$ )、日均地面相对湿度(RH)和日均地面风速( $v$ )等气象要素对 O<sub>3</sub>-8h 浓度和 O<sub>3</sub>-8h 超标情况的影响规律, 并采用 AQI 级别预报准确率、O<sub>3</sub> 浓度范围预报准确率和 O<sub>3</sub> 级别预报准确率等方法, 评估了基于神经网络的 O<sub>3</sub> 统计预报效果. 结果表明, 2016~2020 年期间京津冀 13 城市  $\rho(\text{O}_3\text{-8h-90per})$  分别为 157.4、177.2、177.3、190.6 和 175.6  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 区域臭氧浓度 5a 上升了 11.6%, 2016~2019 年期间总体呈波动上升趋势, 2020 年环比下降; 2020 年与 2016 年相比, 除北京、张家口和承德略有下降外, 其他 10 个城市  $\rho(\text{O}_3\text{-8h-90per})$  上升了 6~45.5  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . O<sub>3</sub>-8h 月均值呈现“两头低, 中间高”现象,  $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$  在 4~9 月的月均值超过了 100  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 在 6 月最高, 为 158.10  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 城市 O<sub>3</sub>-8h 超标率范围为 8.6%~19.2%, 97.8% 的 O<sub>3</sub>-8h 超标情况发生在 4~9 月. 区域尺度上 O<sub>3</sub>-8h 浓度与日最高温度相关性最强, 当  $T_{\max}$  在 25~28℃ 区间时, 所有城市开始出现 O<sub>3</sub>-8h 超标. O<sub>3</sub>-8h 浓度与日均地面气压呈负相关关系; 当 RH 在 60% 以下时, 大部分城市 O<sub>3</sub>-8h 浓度随相对湿度上升缓慢增长; 当 RH 在 61%~70% 以上时, 大部分城市 O<sub>3</sub>-8h 浓度随日均相对湿度上升而下降. O<sub>3</sub>-8h 超标时的地面主导风向主要为偏南风, 大部城市 O<sub>3</sub>-8h 浓度高值易集中出现在 2~3  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  及以下低风速区间. OPAQ 统计模式提前 1~9 d 预报相关系数范围为 0.72~0.86, AQI 级别预报平均准确率为 67%~86%, O<sub>3</sub>-8h 浓度范围预报平均准确率为 63%~84%. 在 O<sub>3</sub>-8h 超标情况多发的 4~9 月, 模式对 O<sub>3</sub> 轻度污染和 O<sub>3</sub>-8h 超标情况提前 3 d 预报准确率分别为 69% 和 66%, 可为 O<sub>3</sub>-8h 超标管控提供参考依据.

**关键词:** 京津冀; 臭氧(O<sub>3</sub>); 污染特征; 预报评估; 气象影响; 神经网络

中图分类号: X831; X515 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)08-3966-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202111145

## Characteristics of Ozone Pollution, Meteorological Impact, and Evaluation of Forecasting Results Based on a Neural Network Model in Beijing-Tianjin-Hebei Region

ZHU Yuan-yuan<sup>1,2</sup>, LIU Bing<sup>1</sup>, GUI Hai-lin<sup>3</sup>, LI Jian-jun<sup>1</sup>, WANG Wei<sup>1\*</sup>

(1. China National Environmental Monitoring Centre, Beijing 100012, China; 2. School of Energy and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 3. National Meteorological Center, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The ozone concentration characteristics of 13 cities in Beijing-Tianjin-Hebei regions from 2016 to 2020 were analyzed based on ecological environment monitoring and meteorological observation data. The influence of meteorological elements such as daily maximum temperature ( $T_{\max}$ ), daily average ground pressure ( $p$ ), daily average ground relative humidity (RH), and daily average ground wind speed ( $v$ ) on ozone concentration [ $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$ ] and the exceeding standard rate of O<sub>3</sub>-8h were discussed. The AQI, ozone concentration range, and ozone pollution level forecast accuracy rates were evaluated using the neural network statistical model. The results showed that the concentrations of O<sub>3</sub>-8h-90per [ $\rho(\text{O}_3\text{-8h-90per})$ ] of 13 cities in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 2016 to 2020 were 157.4, 177.2, 177.3, 190.6, and 175.6  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , respectively. The regional ozone concentration increased by 11.6% over the five years from 2016 to 2019. From 2016 to 2019, there was an overall upward trend in volatility, followed by a decline in 2020. Compared with that in 2016, the concentration of O<sub>3</sub>-8h-90per in the other 10 cities increased by 6-45.5  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , except for in Beijing, Zhangjiakou, and Chengde, where it decreased slightly. The average value of  $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$  from April to September was higher than 100  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , and the highest monthly average concentration of O<sub>3</sub>-8h was 158.10  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  in June. The range of the over standard rate of O<sub>3</sub>-8h was 8.6%-19.2% in the 13 cities, and 97.8% of ozone concentrations exceeded the standard in the period from April to September. At the regional scale, the concentration of O<sub>3</sub>-8h had the strongest correlation with the daily maximum temperature. Furthermore, when  $T_{\max}$  was in the range of 25-28℃, the concentration of O<sub>3</sub>-8h in the 13 cities began to exceed the standard concentration of 160  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . Additionally, the concentration of O<sub>3</sub>-8h negatively correlated with  $p$ . When RH was below 60%, ozone concentration increased slowly with relative humidity in most cities. When RH was above 61%-70%, ozone concentration decreased with the increase in daily relative humidity in most cities. When ozone exceeded the standard concentration of 160  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , the dominant wind was mainly southerly wind, and the high ozone concentration in most cities tended to be concentrated in the low wind speed range of 2-3  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  and below. Moreover, the correlation coefficient range of the statistical model of OPAQ 1-9 days in advance was 0.72-0.86, the average accuracy of AQI level forecasts was 67%-86%, and the average accuracy of O<sub>3</sub>-8h concentration forecasts was 63%-84%. In April to September, when ozone exceeded the standard of 160  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , the accuracy rates of the model forecast of light ozone pollution and ozone exceeding the standard concentration of 160  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  three days in advance were 69% and

收稿日期: 2021-11-15; 修订日期: 2021-12-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(41875164); PM<sub>2.5</sub>和 O<sub>3</sub> 复合污染协同防控科技攻关项目(DQGG2021301)

作者简介: 朱媛媛(1981~),女,博士研究生,正高级工程师,主要研究方向为环境空气质量预报, E-mail: zhuyy@cemec.cn

\* 通信作者, E-mail: wangwei@cemec.cn

66%, which can provide a reference for the management and control of ozone pollution.

**Key words:** Beijing-Tianjin-Hebei region; ozone ( $O_3$ ); pollution characteristics; assessment of forecast results; meteorological impacts; neural network

近年来,随着我国产业结构的调整和大气污染防治工作的持续推进,颗粒物污染治理取得了积极成效,但臭氧( $O_3$ )污染问题日益严重<sup>[1-6]</sup>,尤其在京津冀、长三角和珠三角等区域, $O_3$ 污染问题更加突出<sup>[7-14]</sup>.高浓度的 $O_3$ 已被证明对人体健康和植物生长有害<sup>[15-18]</sup>,对生态系统和气候变化也有一定的负面影响<sup>[19,20]</sup>,仅2016年 $O_3$ 暴露就造成了我国经济损失约505亿元<sup>[21]</sup>.因此,对 $O_3$ 污染特征和气象影响因素的研究,以及对 $O_3$ 预报效果多方位的评估,有助于提高 $O_3$ 预报准确率,为京津冀地区大气污染治理和生态环境管理提供科学决策参考,对促进生态环境质量改善和保护人体健康具有重要的意义.

近地面的 $O_3$ 是一种典型的二次污染物<sup>[22]</sup>,主要由自然源和人类活动排放的氮氧化物、挥发性有机物等光化学前体物,在一定的气象条件下发生复杂的光化学反应生成<sup>[11,23,24]</sup>.光化学反应是近地面 $O_3$ 的主要来源,其贡献是平流层 $O_3$ 输送通量的7~15倍<sup>[25]</sup>. $O_3$ 浓度与气象要素有密切的关系,日最高气温、太阳辐射强度、日照时数、相对湿度和风速等因素可明显影响空气中 $O_3$ 的浓度,通常,在强辐射、高温和低风速等条件下, $O_3$ 污染更容易发生<sup>[26-28]</sup>.

京津冀区域性污染较为严重,是我国大气污染防治的重点区域,相关研究在 $O_3$ 污染特征、影响因素、来源解析和预报分析等方面取得了一定的进展<sup>[11,13,29-38]</sup>,如王帅等<sup>[32]</sup>利用小波分析研究石家庄市 $O_3$ 时序特征,崔梦瑞等<sup>[33]</sup>的研究利用卫星遥感反演数据、地面小时监测数据和气象观测资料,分析探讨了近地面 $O_3$ 浓度时空分布及与温度、压强、蒸发量、风速和风向等气象要素的耦合关联关系;李梓铭等<sup>[34]</sup>的研究利用相似集合预报技术,对2018年6月1日~9月30日期间京津冀13个城市70个国家控站点小时模式 $O_3$ 预报浓度进行了订正研究.但已有研究多数主要侧重于关注污染特征及影响因素,对于 $O_3$ -8h超标情况的气象影响条件和 $O_3$ 预报效果鲜见评估.因此,本文基于生态环境监测和气象观测数据,分析了京津冀地区13个城市 $O_3$ 浓度特征,探索日最高温度、日均地面气压、日均地面相对湿度和日均地面风速等气象要素对 $O_3$ -8h浓度和 $O_3$ -8h超标情况的影响规律,采用级别预报准确率、 $O_3$ 浓度范围预报准确率和 $O_3$ 级别预报准确率等不同方法,系统评估了基于神经网络的 $O_3$ 统计预报效

果,通过进一步认识京津冀区域 $O_3$ 污染特征和气象影响,提高 $O_3$ 预报准确率,以期为区域颗粒物与 $O_3$ 污染的协同防控提供科学参考.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究范围

本研究范围为京津冀地区13个城市,包括北京、天津、河北省石家庄、张家口、承德、秦皇岛、唐山、廊坊、保定、沧州、衡水、邢台和邯郸市.京津冀地区西侧是太行山脉,北侧是燕山山脉,东临渤海湾,南接中原,西北部地势较高,东南部较为平坦.区域地处中纬度欧亚大陆东岸,属于温带湿润半干旱大陆性季风气候,夏季受海洋水汽影响,高温多雨;冬季受内陆寒冷空气影响,寒冷干燥.

### 1.2 数据来源

环境空气质量实况数据为中国环境监测总站国家环境空气质量监测网城市空气质量自动监测数据,预报数据采用中国环境监测总站 OPAQ (operational prediction of air quality) 空气质量统计模式预报数据,气象数据采用国家气象信息中心共享数据.模型训练时,环境空气质量数据采用历史实况监测数据,气象数据采用美国国家环境预报中心 (National Centers for Environmental Prediction, NCEP) 的气象再分析数据 FNL (final analysis, <http://rda.ucar.edu/data/ds083.3/>).预报时,气象数据采用美国国家环境预报中心的全球气象预报系统数据 (global forecast system, GFS, [https://nomads.ncep.noaa.gov/cgi-bin/filter\\_gfs\\_0p25.pl](https://nomads.ncep.noaa.gov/cgi-bin/filter_gfs_0p25.pl)).

### 1.3 模式设置

基于数据挖掘和人工智能算法的空气质量统计预报具有计算成本低,运算速度快,模式预报准确高等特点,特别适用于中小尺度区域和城市预报.因此,本研究采用基于神经网络算法的 OPAQ 空气质量统计预报系统<sup>[39]</sup>,该系统主要由基于多层感知方法预测污染物浓度的 OVL 模型和图形化插值 RIO 模型组成. OVL 模型以环境空气质量监测站点为最小预报单元,利用污染物浓度历史监测数据和相关气象因子数据对站点进行模型训练.输入数据主要包括预报当日 0~6 h 的主要污染物监测数据、行星边界层高度、不同高度场温度、湿度、逆温强度、云量、风速和风向等气象参数.针对不同监测站点进行模型训练时,依据监测数据与气象参数之间的相关性,配置多套模型算法和参数设置,并根据预报

值与监测值间的相关性系数( $r$ )、均方根误差(RMSE)和预测成功指数等统计指标,自动筛选最优模型算法及参数设置,从而整体提高对城市及区域预报的准确率.系统可预测未来9d的6项主要污染物浓度和AQI指数,并结合城市土地利用和道路交通信息,通过RIO插值模型绘制整个城市或区域的污染物浓度分布.

#### 1.4 评价方法

环境空气质量浓度数据依据《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)、《环境空气质量指数(AQI)技术规范(试行)》(HJ 633-2012)和《环境空气质量评价技术规范(试行)》(HJ/T 663-2013)进行评价.当 $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$ 值超过 $160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时,空气质量分指数为100以上,此种情况判定为 $\text{O}_3\text{-8h}$ 浓度超标;区域内3个及以上城市 $\text{O}_3\text{-8h}$ 浓度达到中度及以上污染级别时,判定为区域性污染过程.空气质量模式预报效果统计检验采用相关系数( $r$ )、平均偏差(MB)和均方根误差(RMSE)进行评估.由于目前我国还没有出台空气质量统计预报技术规范,因此,参照《环境空气质量数值预报技术规范》(HJ 1130-2020)中准确率的评价方法,对统计模式预报结果进行评估.级别预报准确率为预报值正负浮动25%与监测值所在级别进行比较,范围预报准确率为预报值正负浮动25%与监测值进行比较.

## 2 结果与分析

### 2.1 $\text{O}_3$ 污染变化特征

2016~2020年期间,京津冀区域13城市 $\rho(\text{O}_3\text{-8h-90per})$ 分别为157.4、177.2、177.3、190.6和

175.6  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,2020年与2016年相比,区域 $\text{O}_3\text{-8h-90per}$ 浓度平均值上升了11.6%.2016~2020年京津冀13城市 $\text{O}_3\text{-8h-90per}$ 浓度和 $\text{O}_3\text{-8h}$ 超标率见图1.从中可知,2016~2019年期间,天津、石家庄、邯郸和沧州的 $\text{O}_3\text{-8h-90per}$ 浓度值呈直线上升趋势,其他城市总体呈波动上升趋势,但2020年所有城市环比下降,下降幅度为6.6%(沧州)~26.2%(石家庄).2020年与2016年相比,除北京、张家口和承德外,其他10个城市 $\rho(\text{O}_3\text{-8h-90per})$ 均有所上升,上升幅度范围为6~45.5  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,其中天津和邢台 $\rho(\text{O}_3\text{-8h-90per})$ 上升较大,分别升高了45.5  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和44.5  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ .

从城市地理位置上可以看出,臭氧浓度水平5年间变化趋势体现了一定的地域特点,区域北部城市北京、张家口和承德2020年 $\rho(\text{O}_3\text{-8h-90per})$ 均低于2016年,北京从2016年的 $182.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 下降至2020年的 $173.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,降幅4.8%,张家口从2016年的 $152.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 下降至2020年的 $148.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,降幅2.3%,承德从2016年的 $162.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 下降至2020年的 $153.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,降幅5.2%.区域中南部城市石家庄、保定、邯郸和邢台,2019年 $\rho(\text{O}_3\text{-8h-90per})$ 浓度值已超过 $200 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,分别为206.2、203.0、201.0和209.2  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,但2020年分别降至180.0、178.5、182.0和186.0  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ .

随着近年来 $\text{O}_3$ 浓度的上升, $\text{O}_3\text{-8h}$ 达标率越来越多地决定了一个城市空气质量达标情况.2016~2020年期间,京津冀13城市 $\text{O}_3\text{-8h}$ 超标率范围为8.6%~19.2%.秦皇岛5a平均 $\text{O}_3\text{-8h}$ 超标率较低

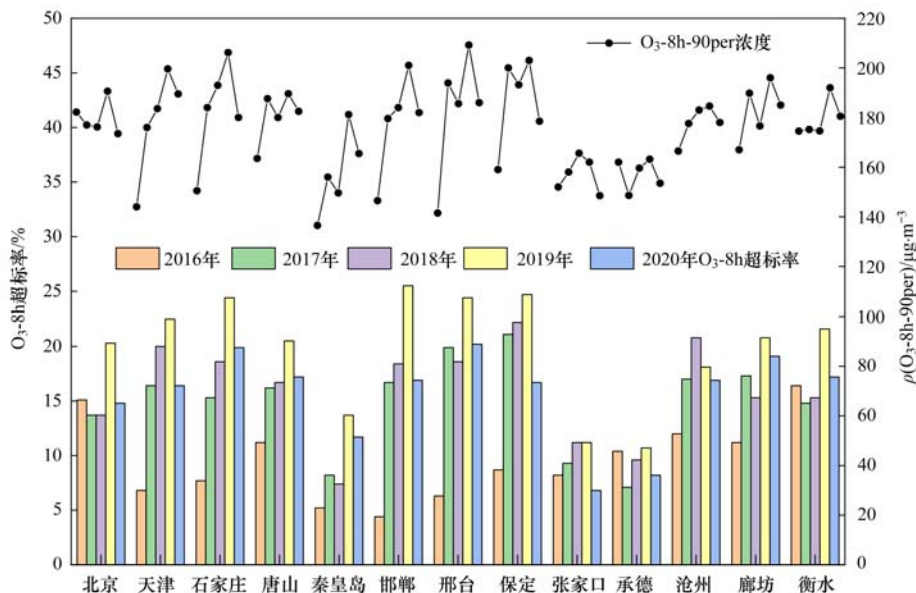


图1 2016~2020年京津冀13城市 $\rho(\text{O}_3\text{-8h-90per})$ 和 $\text{O}_3\text{-8h}$ 超标率

(8.6%), 但  $O_3$ -8h 超标率从 2016 年的 5.2% 上升至 2020 年的 11.7%, 上升了 6.5 个百分点. 保定五年平均  $O_3$ -8h 超标率相对较高 (19.2%),  $O_3$ -8h 超标率从 2016 年的 8.7% 上升至 2020 年的 16.7%, 上升了 8 个百分点. 2020 年与 2016 年相比,  $O_3$ -8h 超标率增幅最大的城市为邢台, 上升了 13.9 个百分点, 超标率下降最大的是承德, 下降了 2.2 个百分点. 2020 年, 13 个城市中  $O_3$ -8h 超标率超 20% 的城市为邢台 (20.2%), 超标率超过 15% 的城市为天津 (16.4%)、石家庄 (19.9%)、唐山 (17.2%)、邯郸 (16.9%)、保定 (16.7%)、沧州 (16.9%)、廊坊 (19.1%) 和衡水 (17.2%), 区域  $O_3$ -8h 超标情况较为普遍.

2016~2020 年区域  $\rho(O_3-8h)$  月均值为  $97.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 4~9 月均超过了  $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 97.8% 的  $O_3$ -8h 超标情况发生在 4~9 月. 从 2016~2020 年京津冀区域  $\rho(O_3-8h)$  月均值可以看出 (图 2),  $\rho(O_3-8h)$  月均值呈现“两头低, 中间高”现象, 1、11 和 12 月的  $\rho(O_3-8h)$  月均值相对较低, 分别为 44.1、44.3 和  $37.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ; 6 月浓度最高, 为  $158.10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 区域  $O_3$ -8h 浓度在 7 月和 8 月较 6 月有所下降, 主要原因是该时段为京津冀汛期, 相对湿度较高, 降水较多, 降水时易出现云量增多, 风速增强等天气现象, 不利于  $O_3$  的生成和积累<sup>[40,41]</sup>.

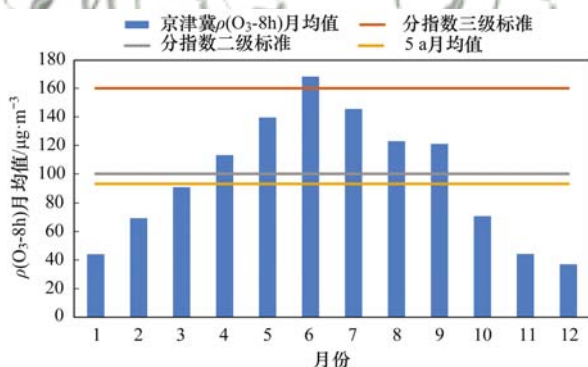


图 2 2016~2020 年京津冀  $\rho(O_3-8h)$  月均值

Fig. 2 Monthly average distribution of  $\rho(O_3-8h)$  in Beijing-Tianjin-Hebei region from 2016 to 2020

## 2.2 $O_3$ -8h 超标气象影响条件分析

本研究表明, 不同城市  $O_3$ -8h 浓度水平与当地的温度、辐射、气压、湿度、风速和风向等因素均有不同程度的相关性, 由于各地地理条件、气候状况和污染排放强度及结构等有差异, 因此影响  $O_3$ -8h 污染水平的关键气象因子、尤其是引起  $O_3$ -8h 超标的关键气象因子的阈值也有所不同. 将 2017~2019 年的 4~9 月京津冀 13 城市  $O_3$ -8h 浓度值与日最高温度 ( $T_{\max}$ )、日均地面气压 ( $p$ )、日均地面湿度 (RH) 和日均地面风速 ( $v$ ) 进行相关分析, 结果

见表 1.

4 个主要气象因子中,  $O_3$ -8h 浓度与  $T_{\max}$  相关性最强, 相关系数平均值为 0.64, 标准偏差为 0.08, 说明京津冀城市  $O_3$ -8h 浓度与  $T_{\max}$  关系较强. 通常情况下  $T_{\max}$  越高越有利于  $O_3$ -8h 浓度上升, 高温加强了光化学反应速率, 导致二次生成的  $O_3$  浓度增加, 而且随着气温的升高, 生物排放加大,  $O_3$  生成前体物浓度增加, 促进了  $O_3$  浓度的快速增加<sup>[42,43]</sup>. 京津冀城市  $O_3$ -8h 浓度与  $p$  相关系数平均值为  $-0.37$ , 相对标准偏差为  $-0.09$ , 说明区域尺度上  $O_3$ -8h 浓度与  $p$  具有一定负相关关系, 但不同城市  $O_3$ -8h 浓度与  $p$  的相关性存在一定差异, 张家口、承德和秦皇岛等区域北部城市  $O_3$ -8h 浓度与  $p$  相关系数相对较低. 总体上  $p$  越低越有利于  $O_3$ -8h 浓度上升, 这主要是由于当近地面气压较低时, 近地面  $O_3$  由四周区域向低压中心的水平传输使地区  $O_3$  浓度聚积升高, 反之, 地面压强高时,  $O_3$  向周围区域扩散, 使本地区  $O_3$  浓度降低<sup>[33]</sup>. 京津冀城市  $O_3$ -8h 浓度与 RH 相关系数平均值为  $-0.14$ , 相对标准偏差为 0.14, 说明区域尺度上  $O_3$ -8h 浓度与 RH 存在一定关系, 总体上低湿度有利于  $O_3$ -8h 浓度上升, 但不同城市的相关系数存在较大差异, 北京、天津、唐山和秦皇岛等城市  $O_3$ -8h 浓度与 RH 相关系数相对较低. 与其他因素相比, 京津冀城市  $O_3$ -8h 浓度与日均风速  $v$  相关性整体偏弱, 这与其他研究的结果一致<sup>[33,40]</sup>, 但在一定条件下, 风对  $O_3$ -8h 的影响也比较显著<sup>[44]</sup>.

以  $4^\circ\text{C}$  为区间段, 分析 2017~2020 年京津冀 13 城市 4~9 月不同温度区间  $O_3$ -8h 超标频率, 结果见

表 1 2017~2020 年的 4~9 月京津冀城市  $O_3$ -8h 浓度与气象要素的相关系数<sup>1)</sup>

Table 1 Correlation coefficients of ozone concentration and meteorological elements in Beijing-Tianjin-Hebei cities from April to September from 2017 to 2020

城市	最高温度 ( $T_{\max}$ )	日均气压 ( $p$ )	日均湿度 (RH)	日均风速 ( $v$ )
北京	0.64	-0.44	0.002	-0.09
天津	0.70	-0.44	-0.07	-0.15
石家庄	0.72	-0.48	-0.18	-0.09
唐山	0.63	-0.37	-0.09	-0.01
秦皇岛	0.40	-0.27	0.03	0.06
邯郸	0.67	-0.41	-0.41	0.00
邢台	0.73	-0.30	-0.28	-0.14
保定	0.69	-0.47	-0.17	-0.10
承德	0.59	-0.20	-0.14	0.11
沧州	0.64	-0.39	-0.25	0.05
廊坊	0.66	-0.43	-0.09	-0.03
衡水	0.65	-0.42	-0.32	0.07
张家口	0.60	-0.21	0.10	-0.12

1) 双尾检验,  $P < 0.01$

图3. 总体上,各城市  $O_3$ -8h 超标频率的增长与  $T_{max}$  的上升有明显的同步性,这与相关性分析结果一致.  $T_{max}$  在 25 ~ 28℃ 区间时,所有城市开始出现  $O_3$ -8h 超标现象,平均超标频率为 18.4%. 当  $T_{max}$  在 29 ~ 32℃ 区间时,大部分城市  $O_3$ -8h 超标频率抬升,平均值提升至 45.1%,其中邢台超标频率最高 (59.7%),承德最低 (24.6%),北京为 41.4%. 当  $T_{max}$  在 33 ~ 36℃ 区间时,区域各城市超标频率平均值达到 78.6%,其中邢台超标率最高 (89.5%),承德最低 (60.2%),北京为 76.4%. 当  $T_{max}$  在 37 ~ 40℃ 区间时,区域各城市超标频率平均值达到 89.6%,其中秦皇岛、邢台和保定 3 个城市在此温度区间  $O_3$ -8h 超标频率为 100%,北京为 72.7%. 温度对不同城市  $O_3$  影响不同,可能与不同城市局地气候差异有关.

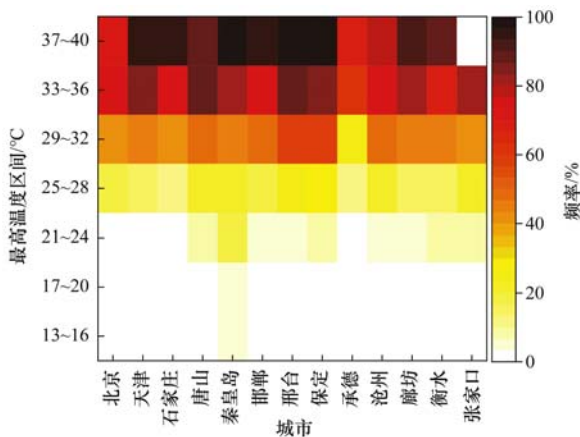


图3 2017~2020年的4~9月京津冀13城市不同温度区间  $O_3$ -8h 超标频率

Fig. 3 Probability of ozone exceeding standard in different temperature zones in 13 cities of Beijing-Tianjin-Hebei from April to September from 2017 to 2020

以 5 hPa 气压为间隔,对京津冀 13 城市 4 ~ 9 月不同日均气压区间的  $O_3$ -8h 浓度进行平均,结果见图 4. 区域内城市地面气压普遍集中在 996 ~ 1 030 hPa 区间. 总体上,4 ~ 9 月京津冀城市  $O_3$ -8h 浓度和地面气压呈负相关关系,气压值越低,  $O_3$ -8h 浓度水平越高,反之则越低. 主要原因是地面低压系统有利于近地面一次和二次污染物辐合堆积,同时华北地区的低压系统前部在天气现象上经常与高温、低湿和偏南风相对应,因而共同推高了夏季  $O_3$  污染水平. 但唐山在 996 ~ 1 000 hPa 区间内出现  $\rho(O_3-8h)$  平均值的最高值 (172.4  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 后,在 991 ~ 995 hPa 区间  $\rho(O_3-8h)$  平均值又下降至 157.0  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,可能的原因是尽管夏季华北地面低压系统常对应高温和低湿,但强低压系统又对应着明显的上升气流,唐山南邻渤海,北依燕山,在水汽充足的

条件下容易成云致雨,造成臭氧浓度水平的不升反降. 北京  $\rho(O_3-8h)$  最高值 (179.3  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 发生在 991 ~ 995 hPa 区间,次高值 (167.8  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 位于 996 ~ 1 000 hPa 区间. 此外,张家口和承德在不同气压区间  $O_3$ -8h 浓度分布特征与区域中南部城市明显不同,可能与其所处地理位置局地气候气象条件不同有关.

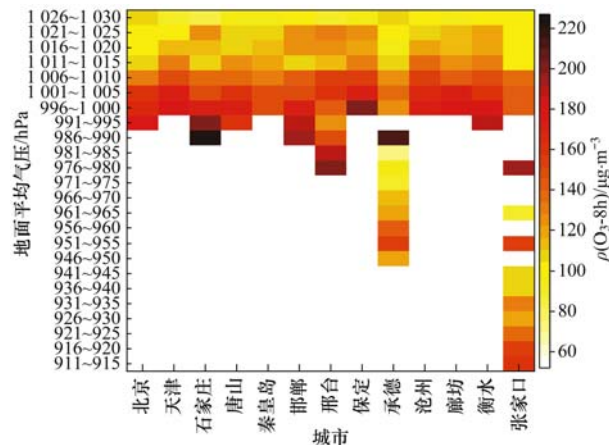


图4 2017~2020年的4~9月京津冀13城市  $\rho(O_3-8h)$  平均值与地面平均气压关系

Fig. 4 Relationship between average concentrations of  $O_3$ -8h and ground average air pressure in 13 cities in Beijing-Tianjin-Hebei from April to September from 2017 to 2020

13 城市不同相对湿度条件下  $O_3$ -8h 浓度水平见图 5. 总体上,大部分城市呈现“两头低、中间高”的规律,且低湿度区间臭氧浓度变化幅度大多小于高湿度区间. RH 在 60% 以下时,大部分城市  $O_3$ -8h 浓度随着相对湿度的上升缓慢增长,说明在 RH 低于 60% 时,湿度越高  $O_3$ -8h 浓度越高. RH 在 41% ~ 50% 区间时,区域中北部城市北京、天津、张家口、承德和秦皇岛  $O_3$ -8h 浓度普遍低于 160  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,但石家庄、唐山、保定、衡水、沧州、邢台和邯郸等河北中南部城市平均  $O_3$ -8h 浓度已达到轻度污染水平. 当日均相对湿度在 51% ~ 60% 时,除张家口、秦皇岛、唐山和承德外,其他中南部城市  $O_3$ -8h 均已超标. 当 RH 小于 60% 时,湿度越大,水分子越多,大气中的紫外辐射和反射等就会被水分子大量吸收,促进空气中  $O_3$  的生成<sup>[45]</sup>. 当 RH 在 61% ~ 70% 以上时,大部分城市  $O_3$ -8h 浓度随日均相对湿度上升而下降,浓度最低值均出现在 91% ~ 100% 湿度范围内,主要原因是高相对湿度会减缓光化学反应过程,导致太阳辐射和气温降低,从而减缓  $O_3$  生成<sup>[42]</sup>.

13 城市不同日均风速条件下臭氧浓度水平见图 6. 随着风速增加,大部分城市  $O_3$ -8h 浓度呈现“两头低、中间高”的规律,但各城市变化幅度差异较大,地域特征明显,石家庄和邢台  $O_3$ -8h 浓度高值

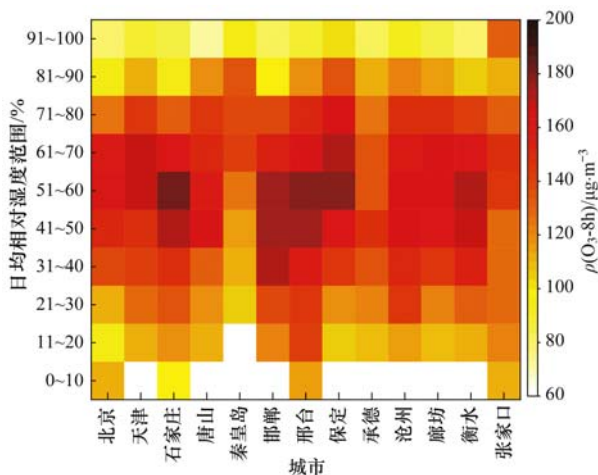


图5 2017~2020年的4~9月京津冀13城市 $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$ 平均值与相对湿度的关系

Fig. 5 Relationship between average concentrations of  $\text{O}_3\text{-8h}$  and relative humidity in 13 cities in Beijing-Tianjin-Hebei from April to September from 2017 to 2020

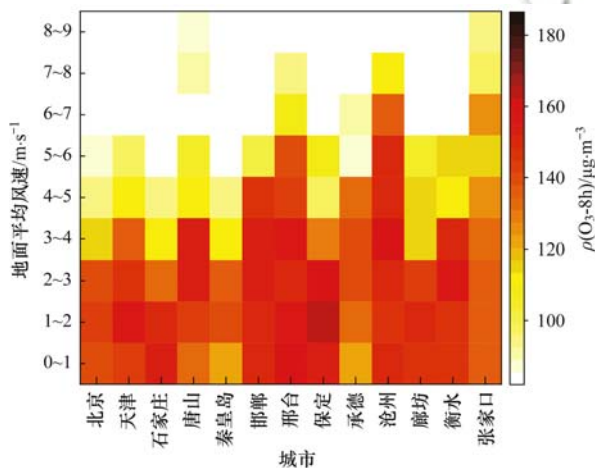


图6 2017~2020年的4~9月京津冀13城市 $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$ 平均值与地面风速的关系

Fig. 6 Relationship between average concentrations of  $\text{O}_3\text{-8h}$  concentration and ground wind speed in 13 cities in Beijing-Tianjin-Hebei from April to September from 2017 to 2020

易集中出现在  $0 \sim 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  低风速区间;北京、天津、保定、廊坊和秦皇岛  $\text{O}_3\text{-8h}$  浓度高值易集中出现在  $1 \sim 2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  低风速区间;邯郸、承德、衡水和张家口  $\text{O}_3\text{-8h}$  浓度高值易集中出现在  $2 \sim 3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  风速区间;唐山  $\text{O}_3\text{-8h}$  浓度高值易集中出现在  $3 \sim 4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  风速区间,沧州  $\text{O}_3\text{-8h}$  浓度高值易集中出现在  $4 \sim 5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  风速区间.以北京为例,风速平均值在  $0 \sim 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  区间时  $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$  平均值为  $140.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ;在  $1 \sim 2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  和  $2 \sim 3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$  平均值分别为  $144.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $138.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,随后浓度随风速增加逐渐降低,在  $5 \sim 6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  风速区间时降至  $86.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ .

分析京津冀13城市  $\text{O}_3\text{-8h}$  浓度与风速和风向

关系,部分城市  $\text{O}_3\text{-8h}$  浓度叠加风场玫瑰图结果见图7,从中可知,京津冀城市发生  $\text{O}_3\text{-8h}$  超标时的地面主导风向主要为偏南风,可能的原因主要有两个:一是受东亚夏季风影响,我国中东部4~9月主导风向为东南风,偏北风出现频率相对较低;二是偏北风主要带来相对洁净的北方冷空气,对  $\text{O}_3\text{-8h}$  污染起到清除作用.以  $22.5^\circ$  间隔对偏南风进一步细分结果表明,受地理、气候、污染源分布等因素影响,不同城市高浓度风向分布有较大差异.其中,北京  $\text{O}_3\text{-8h}$  平均浓度最高值对应的日均风向为西南风,上风向城市为保定等地;次高值所在风向为东风,上风向城市为唐山等地.石家庄  $\text{O}_3\text{-8h}$  浓度最高风向为西风,上风向城市为山西阳泉等地,次高值所在风向为西北西风,上风向城市为山西忻州等地.

### 2.3 模式 $\text{O}_3\text{-8h}$ 预报结果检验评估

2019年6月1日~2020年5月31日期间,OPAQ统计模式提前1d(24h)  $\text{O}_3\text{-8h}$  预报值与监测值相关系数  $r$  为0.86,提前3d(72h)  $r$  为0.83,提前7d(168h)  $r$  为0.78,提前9d(216h)  $r$  为0.72.京津冀13城市提前1d平均偏差(MB)范围为  $-20 \sim 15 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,提前3d为  $-27 \sim 20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,提前7d为  $-14 \sim 29 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,提前9d为  $-12 \sim 16 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ .京津冀13城市提前1d平均偏差(RMSE)范围为  $26 \sim 39 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,提前3d为  $29 \sim 39 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,提前7d为  $34 \sim 45 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,提前9d为  $35 \sim 46 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ .模式对不同城市  $\text{O}_3\text{-8h}$  预报效果略有不同,MB值反映出模式对北京、天津、石家庄、沧州和衡水预报略有偏高,对其他城市整体略有偏低.但提前9d预报时,模式对天津、石家庄和保定等城市  $\text{O}_3\text{-8h}$  浓度预报的平均偏差仍小于  $10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,与监测值较为接近,可提供较为准确的预报参考.总体上,模型可以较为准确地预测出  $\text{O}_3\text{-8h}$  浓度的变化趋势.

### 2.4 模式 $\text{O}_3$ 预报效果评估

#### 2.4.1 AQI 级别预报准确率

对OPAQ模式2019年6月1日~2020年5月31日期间AQI预报效果进行评估,模式对京津冀区域13城市预报准确率整体较高,提前1dAQI级别预报准确率范围为81%~92%,预报准确率平均值为86%;提前3d准确率范围为67%~83%,准确率平均值为75%;提前7d准确率范围为61%~81%,准确率平均值为70%;提前9d准确率范围为56%~82%,准确率平均值为67%.

#### 2.4.2 臭氧浓度范围预报准确率

2019年6月1日~2020年5月31日期间,模式对京津冀13城市提前1d的  $\text{O}_3\text{-8h}$  浓度范围预



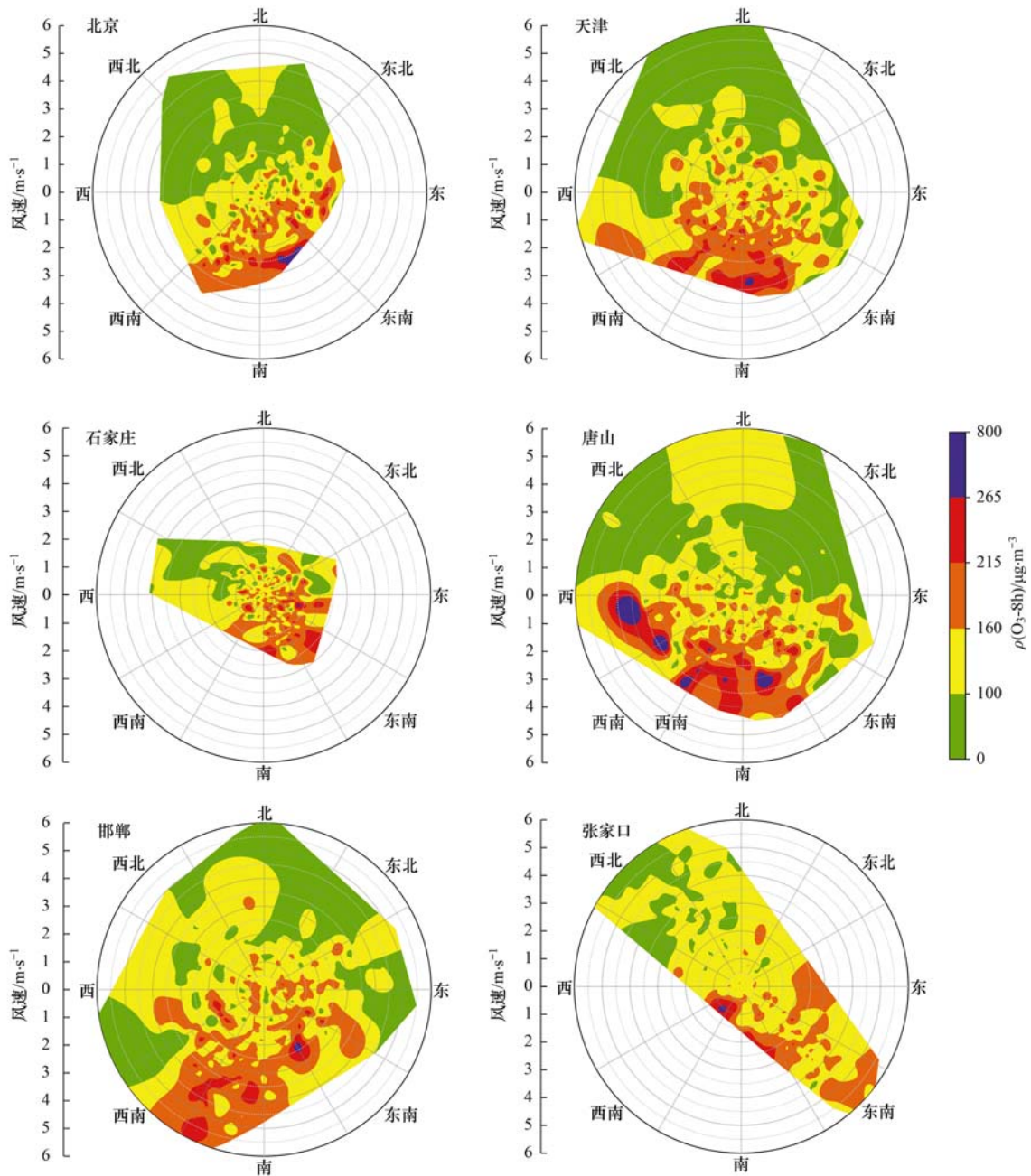


图7 2017~2020年的4~9月京津冀部分城市不同风向风速 $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$ 分布

Fig. 7 Distribution of  $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$  in different wind directions and wind speed in some cities in Beijing-Tianjin-Hebei from April to September from 2017 to 2020

报准确率为72%~89%,准确率平均值为84%;提前3d的准确率为71%~81%,准确率平均值为76%;提前7d的准确率为43%~77%,准确率平均值69%;提前9d的准确率为42%~70%,准确率平均值63%.

#### 2.4.3 重点时段 $\text{O}_3\text{-8h}$ 浓度范围预报准确率

对2019~2020年的4~9月模式 $\text{O}_3\text{-8h}$ 浓度范围预报准确率进行评估,主要结果见图8.从中可知,对于 $\text{O}_3\text{-8h}$ 优良级别,京津冀13城市提前1d预报准确率平均值为61%,提前3d准确率平均值为54%,提前7d准确率平均值为48%,提前9d

准确率平均值为46%.对于 $\text{O}_3$ 轻度污染级别,提前1d预报准确率平均值为69%,提前3d准确率平均值为69%,提前7d准确率平均值为59%,提前9d准确率平均值为53%.对于 $\text{O}_3\text{-8h}$ 中度及以上污染级别,提前1d预报准确率平均值为56%,提前3d准确率平均值为52%,提前7d准确率平均值为44%,提前9d准确率平均值为25%.总体上,模式对于 $\text{O}_3\text{-8h}$ 浓度超标情况的预报效果较好.

在 $\text{O}_3\text{-8h}$ 超标情况高发的4~9月,统计模式对 $\text{O}_3$ 高浓度区间的预报准确率要高于低浓度区间.总

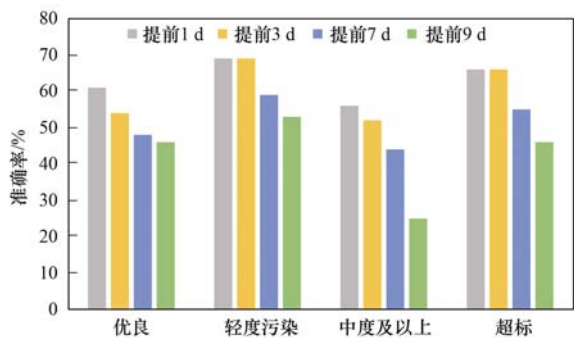


图 8 2017 ~ 2020 年的 4 ~ 9 月京津冀区域 O<sub>3</sub>-8h 浓度范围预报准确率

Fig. 8 Forecast accuracy of O<sub>3</sub>-8h concentration range in Beijing-Tianjin-Hebei region from April to September from 2017 to 2020

体上,模式对 O<sub>3</sub> 轻度污染和超标情况的预报效果较好,提前 3 d O<sub>3</sub>-8h 浓度范围预报准确率分别为 69% 和 66%,可为臭氧超标管控提供科学参考.但

提前 1 ~ 7 d 预报时,模式对优良级别 O<sub>3</sub>-8h 浓度范围预报的准确率低于超标情况.优良级别 O<sub>3</sub>-8h 浓度预报的偏差中,有 55% 的概率预报偏高,可能与该期间臭氧浓度相对较高、气象预报偏差和统计模式的平滑作用等因素有关.

### 2.4.4 典型城市臭氧预报准确率

选取 2019 年 6 月 1 日至 2020 年 5 月 31 日期间,区域北部城市张家口、中部城市石家庄和南部城市邯郸这 3 个城市进行 O<sub>3</sub>-8h 模式预报值与监测值对比,相关结果如图 9 所示.模式能较好地预测出区域典型城市 O<sub>3</sub>-8h 浓度的变化趋势,对业务预报具有较强的参考价值,但也反映出模式对个别城市 O<sub>3</sub>-8h 高值的预报略有偏低,可能与统计模式算法对历史数据的平滑、气象预报偏差、以及模式目前针对站点多套模型和参数方案所采用的趋势最优筛选方法有关.

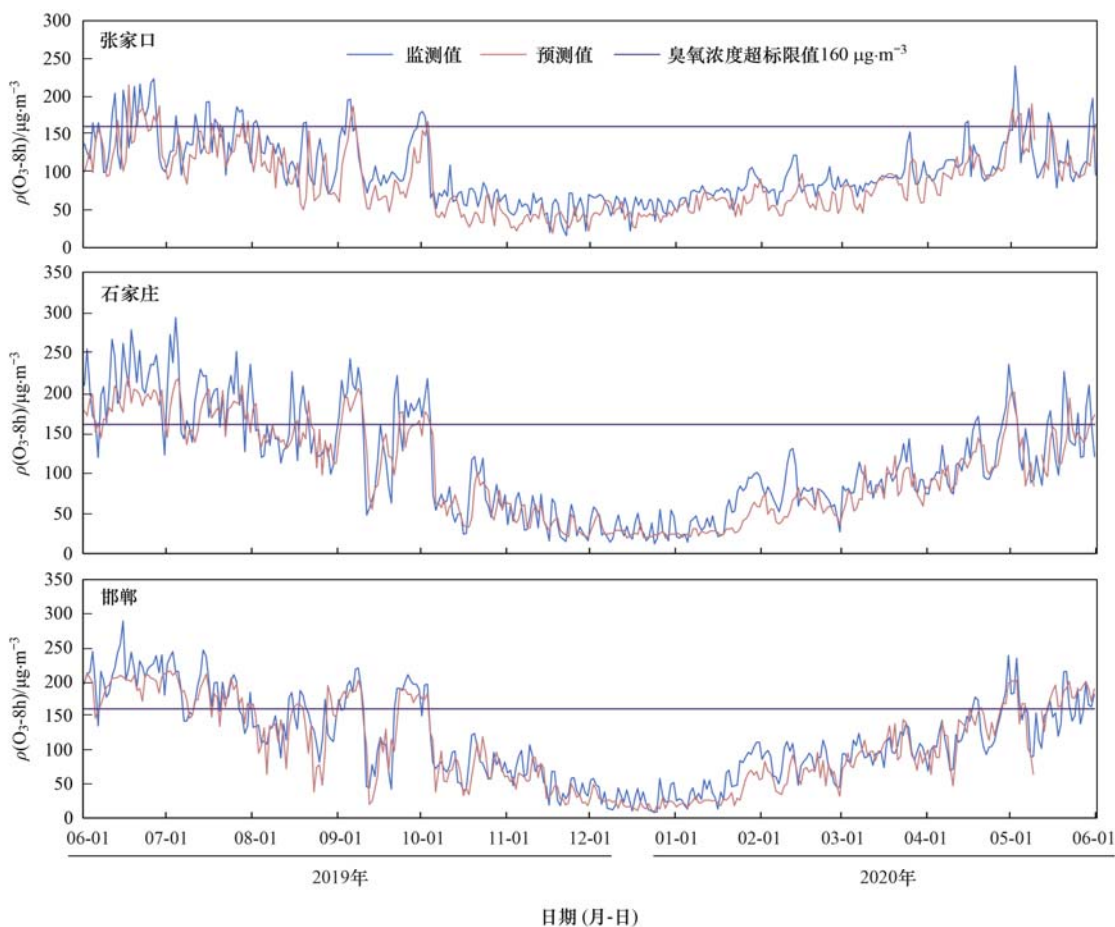


图 9 典型城市 O<sub>3</sub>-8h 预报值与监测值对比

Fig. 9 Comparison of O<sub>3</sub>-8h forecast and monitoring values in typical cities

### 3 讨论

基于神经网络算法的空气质量统计预报无需输入污染源排放清单和土地利用等数据,只需输入气

象和监测站点的污染物监测数据,因此输入数据量相对较少,确定性较高,有利于提高预报准确率.统计模型机制不涉及复杂的化学反应,不采用三维网格结构计算,仅计算监测站点空气质量数据,故对计

算能力要求较数值模式低,计算速度较快。

但基于神经网络算法的空气质量统计模型只能针对各个监测站点进行计算,不能对站点外的地点进行预测,不能开展精确的空间预报.不能准确反映污染的机制,对突发或非正常现象的预测有待提高。

目前神经网络算法对空气质量变化趋势的预报准确性较高,但对于污染物峰值预报略显不足,后期可针对峰值预报效果进一步调优.此外,采用更高精度的气象预报数据,可进一步提高预报准确率。

#### 4 结论

(1)2016~2020年期间,京津冀区域13城市 $\rho(\text{O}_3\text{-8h-90per})$ 分别为157.4、177.2、177.3、190.6和175.6 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,区域臭氧浓度5a上升了11.6%,2016~2019年期间总体呈波动上升趋势,但2020年环比下降.2020年与2016年相比,除北京、张家口和承德略有下降外,其他10个城市 $\rho(\text{O}_3\text{-8h-90per})$ 上升了6~45.5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

(2) $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$ 月均值呈现“两头低,中间高”现象,1月、11月和12月 $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$ 月均值相对较低,4~9月 $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$ 月均值均超过了100 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,6月浓度最高,为158.10 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ .城市 $\text{O}_3\text{-8h}$ 平均超标率为8.6%~19.2%,97.8%的臭氧超标情况发生在4~9月。

(3)区域尺度上 $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$ 与日最高温度 $T_{\text{max}}$ 相关性最强,当 $T_{\text{max}}$ 在25~28℃区间时,所有城市开始出现 $\text{O}_3\text{-8h}$ 超标现象, $T_{\text{max}}$ 在33~36℃区间时,区域各城市超标频率平均值达78.6%. $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$ 与 $p$ 呈负相关关系,当RH在60%以下时,大部分城市 $\text{O}_3\text{-8h}$ 浓度随着相对湿度的上升缓慢增长;当RH在61%~70%以上时,大部分城市 $\text{O}_3\text{-8h}$ 浓度随日均相对湿度上升而下降;RH在51%~60%时,区域中南部城市 $\text{O}_3\text{-8h}$ 均已超标.京津冀城市发生 $\text{O}_3\text{-8h}$ 超标时的地面主导风向主要为偏南风,石家庄和邢台 $\text{O}_3\text{-8h}$ 浓度高值易集中出现在0~1 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 低风速区间;北京、天津、保定、廊坊和秦皇岛 $\text{O}_3\text{-8h}$ 浓度高值易集中出现在1~2 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 低风速区间;邯郸、承德、衡水和张家口 $\text{O}_3\text{-8h}$ 浓度高值易集中出现在2~3 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速区间;唐山 $\text{O}_3\text{-8h}$ 浓度高值易集中出现在3~4 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速区间,沧州 $\text{O}_3\text{-8h}$ 浓度高值易集中出现在4~5 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速区间。

(4)OPAQ统计模式对京津冀13城市 $\text{O}_3\text{-8h}$ 浓度预报的整体效果较好,提前1~9d预报相关系数范围为0.72~0.86.模式提前1~9dAQI级别预报准确率范围为67%~86%, $\text{O}_3\text{-8h}$ 浓度范围预报准确

率范围为63%~84%.在臭氧超标情况多发的4~9月,模式对 $\text{O}_3$ 预报效果较好,提前3d $\text{O}_3$ 轻度污染和 $\text{O}_3\text{-8h}$ 超标情况预报准确率分别69%和66%,可为臭氧超标管控提供参考依据。

致谢:感谢中科三清科技有限公司郑辉辉和北京立博威拓环境技术有限公司王淑莹对本研究的支持。

#### 参考文献:

- [1] Wang T, Xue L K, Brimblecombe P, *et al.* Ozone pollution in China: a review of concentrations, meteorological influences, chemical precursors, and effects [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **575**: 1582-1596.
- [2] Yin Z C, Ma X Q. Meteorological conditions contributed to changes in dominant patterns of summer ozone pollution in Eastern China [J]. *Environmental Research Letters*, 2020, **15** (12), doi: 10.1088/1748-9326/abc915.
- [3] Zeng Y Y, Cao Y F, Qiao X, *et al.* Air pollution reduction in China: recent success but great challenge for the future [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **663**: 329-337.
- [4] Wu W L, Xue W B, Zheng Y X, *et al.* Diurnal regulation of VOCs may not be effective in controlling ozone pollution in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2021, **256**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2021.118442.
- [5] Mousavinezhad S, Choi Y, Pouyaei A, *et al.* A comprehensive investigation of surface ozone pollution in China, 2015-2019: separating the contributions from meteorology and precursor emissions [J]. *Atmospheric Research*, 2021, **257**, doi: 10.1016/j.atmosres.2021.105599.
- [6] Liu R Y, Ma Z E, Liu Y, *et al.* Spatiotemporal distributions of surface ozone levels in China from 2005 to 2017: a machine learning approach [J]. *Environment International*, 2020, **142**, doi: 10.1016/j.envint.2020.105823.
- [7] 于瑞新, 刘旻霞, 李亮, 等. 长三角地区近15年大气臭氧柱浓度时空变化及影响因素 [J]. *环境科学学报*, 2021, **41** (3): 770-784.
- [8] Yu R X, Liu M X, Li L, *et al.* Spatial and temporal variation of atmospheric ozone column concentration and influencing factors in the Yangtze River Delta region in recent 15 years [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41** (3): 770-784.
- [9] Tang G Q, Liu Y S, Zhang J Q, *et al.* Bypassing the NOx titration trap in ozone pollution control in Beijing [J]. *Atmospheric Research*, 2021, **249**, doi: 10.1016/j.atmosres.2020.105333.
- [10] Liu Y M, Wang T. Worsening urban ozone pollution in China from 2013 to 2017 - Part 2: the effects of emission changes and implications for multi-pollutant control [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, **20** (11): 6323-6337.
- [11] 秦毅, 刘旻霞, 宋佳颖, 等. 粤港澳大湾区近地层 $\text{O}_3$ 浓度的时空变化特征 [J]. *环境科学学报*, 2021, **41** (8): 2987-3000.
- [12] Qin Y, Liu M X, Song J Y, *et al.* Temporal and spatial variation characteristics of  $\text{O}_3$  concentration in the surface layer over Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41** (8): 2987-3000.
- [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] Jiang H, Chang H M. Analysis of China's ozone pollution situation, preliminary investigation of causes and prevention and

- control recommendations [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, **34**(7): 1576-1582.
- [12] 李慧, 王淑兰, 张文杰, 等. 京津冀及周边地区“2+26”城市空气质量特征及其影响因素[J]. *环境科学研究*, 2021, **34**(1): 172-184.
- Li H, Wang S L, Zhang W J, *et al.* Characteristics and influencing factors of urban air quality in Beijing-Tianjin-Hebei and its surrounding areas (‘2+26’ Cities) [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, **34**(1): 172-184.
- [13] 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.
- Fu C B, Zhou H. Research progress on the formation mechanism and impact factors of urban ozone pollution in China [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2021, **37**(2): 33-43.
- [14] 周明卫, 康平, 汪可, 等. 2016~2018年中国城市臭氧浓度时空聚集变化规律[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(5): 1963-1974.
- Zhou M W, Kang P, Wang K K, *et al.* The spatio-temporal aggregation pattern of ozone concentration in China from 2016 to 2018[J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(5): 1963-1974.
- [15] Sahu S K, Liu S C, Liu S, *et al.* Ozone pollution in China: background and transboundary contributions to ozone concentration & related health effects across the country [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **761**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144131.
- [16] 曾贤刚, 阮芳芳, 姜艺婧. 中国臭氧污染的空间分布和健康效应[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(9): 4025-4032.
- Zeng X G, Ruan F F, Jiang Y J. Spatial distribution and health effects of ozone pollution in China [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(9): 4025-4032.
- [17] Zhang T Y, Yue X, Unger N, *et al.* Modeling the joint impacts of ozone and aerosols on crop yields in China: an air pollution policy scenario analysis [J]. *Atmospheric Environment*, 2021, **247**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2021.118216.
- [18] Ren X Y, Shang B, Feng Z Z, *et al.* Yield and economic losses of winter wheat and rice due to ozone in the Yangtze River Delta during 2014-2019[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **745**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140847.
- [19] Sicard P, Anav A, De Marco A, *et al.* Projected global ground-level ozone impacts on vegetation under different emission and climate scenarios [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(19): 12177-12196.
- [20] Lombardozzi D, Levis S, Bonan G, *et al.* The influence of chronic ozone exposure on global carbon and water cycles [J]. *Journal of Climate*, 2015, **28**(1): 292-305.
- [21] Maji K J, Ye W F, Arora M, *et al.* Ozone pollution in Chinese cities: assessment of seasonal variation, health effects and economic burden [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **247**: 792-801.
- [22] 梁卓然, 顾婷婷, 杨续超, 等. 基于环流分型法的地面臭氧预测模型[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(12): 4469-4479.
- Liang Z R, Gu T T, Yang X C, *et al.* Study on circulation classification based surface ozone concentration prediction model [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(12): 4469-4479.
- [23] Melkonyan A, Wagner P. Ozone and its projection in regard to climate change[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **67**: 287-295.
- [24] 杨笑笑, 汤莉莉, 张运江, 等. 南京夏季市区 VOCs 特征及 O<sub>3</sub> 生成潜势的相关性分析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(2): 443-451.
- Yang X X, Tang L L, Zhang Y J, *et al.* Correlation analysis between characteristics of VOCs and ozone formation potential in summer in Nanjing urban district [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(2): 443-451.
- [25] Young P J, Archibald A T, Bowman K W, *et al.* Pre-industrial to end 21st century projections of tropospheric ozone from the atmospheric chemistry and climate model intercomparison project (ACCMIP) [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(4): 2063-2090.
- [26] 颜丰华, 陈伟华, 常鸣, 等. 珠江三角洲大气光化学氧化剂(O<sub>x</sub>)与PM<sub>2.5</sub>复合超标污染特征及气象影响因素[J]. *环境科学*, 2021, **42**(4): 1600-1614.
- Yan F H, Chen W H, Chang M, *et al.* Characteristics and meteorological factors of complex nonattainment pollution of atmospheric photochemical oxidant (O<sub>x</sub>) and PM<sub>2.5</sub> in the Pearl River Delta Region, China [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(4): 1600-1614.
- [27] 王旭东, 尹沙沙, 杨健, 等. 郑州市臭氧污染变化特征、气象影响及输送源分析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(2): 604-615.
- Wang X D, Yin S S, Yang J, *et al.* Characteristics, meteorological influences, and transport source of ozone pollution in Zhengzhou City [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(2): 604-615.
- [28] 洪莹莹, 翁佳峰, 谭浩波, 等. 珠江三角洲秋季典型O<sub>3</sub>污染的气象条件及贡献量化[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(1): 1-10.
- Hong Y Y, Weng J F, Tan H B, *et al.* Meteorological conditions and contribution quantification of typical ozone pollution during autumn in Pearl River Delta [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(1): 1-10.
- [29] 欧盛菊, 魏巍, 王晓琦, 等. 华北地区典型重工业城市夏季近地面O<sub>3</sub>污染特征及敏感性[J]. *环境科学*, 2020, **41**(7): 3085-3094.
- Ou S J, Wei W, Wang X Q, *et al.* Pollution characteristics and sensitivity of surface Ozone in a typical heavy-industry city of the North China Plain in summer [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(7): 3085-3094.
- [30] 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.
- Zhang X, Zhang Y P, Qian W M. Characteristics of ozone pollution and its meteorological factors in Shijiazhuang urban area [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, **34**(2): 245-253.
- [31] 王帅, 聂赛赛, 冯亚平, 等. 石家庄市臭氧和二氧化氮的时空演替特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(6): 2679-2690.
- Wang S, Nie Y P, Feng Y P, *et al.* Spatio-temporal evolution characteristics and source apportionment of O<sub>3</sub> and NO<sub>2</sub> in Shijiazhuang [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(6): 2679-2690.
- [32] 王帅, 崔建升, 冯亚平, 等. 石家庄市挥发性有机物和臭氧的污染特征及源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(12): 5325-5335.
- Wang S, Cui J S, Feng Y P, *et al.* Characteristics and source apportionment of VOCs and O<sub>3</sub> in Shijiazhuang [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(12): 5325-5335.
- [33] 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.

- Cui M R, Bai L Y, Feng J Z, *et al.* Analysis of temporal and spatial variations of ozone coupling with dynamics of meteorological factors in the Beijing-Tianjin-Tangshan region[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(2): 373-385.
- [34] 李梓铭, 赵秀娟, 孙兆彬, 等. 基于相似集合预报技术的臭氧预报释用研究[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(2): 475-484.
- Li Z M, Zhao X J, Sun Z B, *et al.* Research on the interpretation and correction of numerical ozone forecast based on analog ensemble[J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(2): 475-484.
- [35] 李苹, 余晔, 赵素平, 等. 2015-2017年中国近地面O<sub>3</sub>污染状况与影响因素分析[J]. *高原气象*, 2019, **38**(6): 1344-1353.
- Li P, Yu Y, Zhao S P, *et al.* Situation and influencing factors of ground-level ozone pollution in China from 2015 to 2017[J]. *Plateau Meteorology*, 2019, **38**(6): 1344-1353.
- [36] 余益军, 孟晓艳, 王振, 等. 京津冀地区城市臭氧污染趋势及原因探讨[J]. *环境科学*, 2020, **41**(1): 106-114.
- Yu Y J, Meng X Y, Wang Z, *et al.* Driving factors of the significant increase in surface ozone in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, China, during 2013-2018[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 106-114.
- [37] 赵芸程, 李杰, 杜惠云, 等. 北京夏季近地面臭氧及其来源的数值模拟研究[J]. *环境科学学报*, 2019, **39**(7): 2315-2328.
- Zhao Y C, Li J, Du H Y, *et al.* Numerical simulation of near-surface ozone and its sources in Beijing in summer[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(7): 2315-2328.
- [38] 卢盛栋, 李军霞, 李芬, 等. 2017-2019年太原南部城区夏季O<sub>3</sub>特征及其影响因子[J]. *气象与环境学报*, 2021, **37**(3): 40-46.
- Lu S D, Li J X, Li F, *et al.* Analysis of the characteristics of O<sub>3</sub> concentration and its influencing factors in summer from 2017 to 2019 in the southern urban area of Taiyuan[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2021, **37**(3): 40-46.
- [39] 王淑莹, 许荣, 尹翠芳, 等. 基于 OPAQ 的城市空气质量预报系统研究[J]. *中国环境监测*, 2016, **32**(3): 13-20.
- Wang S Y, Xu R, Yin C F, *et al.* Study on urban air quality forecasting with OPAQ[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2016, **32**(3): 13-20.
- [40] 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 L, Liu D Y, Han G R, *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.
- [41] 齐艳杰, 于世杰, 杨健, 等. 河南省臭氧污染特征与气象因子影响分析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(2): 587-599.
- Qi Y J, Yu S J, Yang J, *et al.* Analysis of characteristics and meteorological influence factors of ozone pollution in Henan Province[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(2): 587-599.
- [42] Londhe A L, Jadhav D B, Buchunde P S, *et al.* Surface ozone variability in the urban and nearby rural locations of tropical India[J]. *Current Science*, 2008, **95**(12): 1724-1729.
- [43] Dai H B, Zhu J, Liao H, *et al.* Co-occurrence of ozone and PM<sub>2.5</sub> pollution in the Yangtze River Delta over 2013-2019: Spatiotemporal distribution and meteorological conditions[J]. *Atmospheric Research*, 2021, **249**, doi: 10.1016/j.atmosres.2020.105363.
- [44] 徐静. 秦皇岛市气温与近地面臭氧浓度的关系分析[J]. *气象与环境学报*, 2020, **36**(4): 83-88.
- Xu J. Relationship between near-surface ozone concentration and temperature in Qinhuangdao[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2020, **36**(4): 83-88.
- [45] 杨允凌, 郝巨飞, 赵玉广. 河北省中南部典型城市臭氧污染特征及气象因素影响研究[J]. *环境科学与管理*, 2021, **46**(5): 5-9.
- Yang Y L, Hao J F, Zhao Y G. Characteristics of ozone pollution and influence of meteorological factors in typical city in central and southern Hebei Province[J]. *Environmental Science and Management*, 2021, **46**(5): 5-9.

## CONTENTS

Characteristics of PM <sub>2.5</sub> Pollution in Beijing During the Historical Period of the 2022 Olympic Winter Games .....	LIU Yue-chen, MAN Rui-qi, QIU Yan-ting, <i>et al.</i> (3895)
Observation Analyses of Aerosol Size Distribution Properties from February to March, 2019 in Tianjin Urban Area .....	HAO Jian, CAI Zi-ying, LIU Jing-le, <i>et al.</i> (3903)
Analysis of Typical Weather Circulation Patterns of Heavy PM <sub>2.5</sub> Pollution and the Transport Pattern in the Yangtze River Middle Basin .....	WANG Ying, ZHI Xie-fei, BAI Yong-qing, <i>et al.</i> (3913)
Characteristics of Heavy Metals and Other Elements in Atmospheric Dry and Wet Deposition and Health Risk Assessment of a Typical Industrial and Mining City in Central Yunnan .....	FAN Chen-zi, LIU Yong-bing, YUAN Ji-hai, <i>et al.</i> (3923)
Characteristics and Reactivity of VOCs in a Typical Industrial City in Summer .....	QIN Tao, LI Li-ming, WANG Xin-wu, <i>et al.</i> (3934)
Chemical Reaction Activity and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in Summer in Dalian .....	ZHU Ke-xin, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (3944)
One-year Simulation of Air Pollution in Central China, Characteristics, Distribution, Inner Region Cross-transmission, and Pathway Research in 18 Cities .....	LIU Guang-jin, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i> (3953)
Characteristics of Ozone Pollution, Meteorological Impact, and Evaluation of Forecasting Results Based on a Neural Network Model in Beijing-Tianjin-Hebei Region .....	ZHU Yuan-yuan, LIU Bing, GUI Hai-lin, <i>et al.</i> (3966)
Temporal and Spatial Variations in Black Carbon Aerosol in Different Atmospheric Background Stations in China from 2006 to 2020 .....	WANG Hong-lei, YAN Xue, SHEN Li-juan, <i>et al.</i> (3977)
Pollution Characteristics and Emission Factors of PCDD/Fs from Iron and Steel Industry .....	YANG Yan-yan, XIE Dan-ping, FU Jian-ping, <i>et al.</i> (3990)
Community Composition and Assessment of the Aquatic Ecosystem of Periphytic Algae in the Yangtze River Basin .....	HU Yu-xin, CAO Liang, QU Ren-chao, <i>et al.</i> (3998)
Evaluation and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Sediments of the Yellow River Basin Based on Monte Carlo Simulation and PMF Model .....	PANG Kuo, LI Min, LIU Lu, <i>et al.</i> (4008)
Retention Effect of Heavy Metals in Rivers of a Typical Mountainous City by Cascade Weirs; A Case Study of Liangtan River in Chongqing .....	WANG Chao, JIA Bo-yang, PAN Cheng-yong, <i>et al.</i> (4018)
Estimation of Agricultural Non-point Source TN and TP Export Coefficients Based on Soil Loss .....	WANG You-xiao, HUANG Chong, LIU Gao-huan, <i>et al.</i> (4032)
Influence of Land Use and Land Cover Patterns on Water Quality at Different Spatio-temporal Scales in Hehuang Valley .....	LI Hao-hao, HUANG Yi-mei, GUO Wei, <i>et al.</i> (4042)
Groundwater Pollution Source Identification by Combination of PMF Model and Stable Isotope Technology .....	ZHANG Han, DU Xin-yu, GAO Fei, <i>et al.</i> (4054)
Antibiotic Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment in Jinjiang River Basin, Jiangxi Province .....	LI Jia-le, WANG Meng, HU Fa-wang, <i>et al.</i> (4064)
Screening and Control Measures for New Priority Pollutants in Surface Water of Tianjin .....	WU Yan-qi, SONG Shuai, SHI Ya-juan, <i>et al.</i> (4074)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products (PPCPs) in the Third Drain of Ningxia .....	LI Fu-juan, GAO Li, LI Ling-yun, <i>et al.</i> (4087)
Analysis of the Seasonal Changes in Planktonic Microbial Diversity in Urban River Supplied with Reclaimed Water; A Case Study of the North Canal River .....	YUAN Xun-chao, WANG Min, GUO Xiao-yu, <i>et al.</i> (4097)
Spectroscopic and Molecular Characterization of Water Soluble Organic Matter from Sediments in the Macrophyte-dominated and Algae-dominated Zones of Taihu Lake .....	DU Ying-xun, DAI Jia-ru, ZHANG Qiao-ying, <i>et al.</i> (4108)
Emission of Nitrous Oxide (N <sub>2</sub> O) from Lake Taihu and the Corresponding Potential Driving Factors .....	LIU Chao-rong, ZHU Jun-yu, LI Yu-yang, <i>et al.</i> (4118)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Bioretention Systems of Sponge Cities .....	LEI Xiao-ling, QIU Li-na, WEI Ze-jun, <i>et al.</i> (4127)
Treatment Effect of Corncob and Rice Straw Enhanced Subsurface Flow Constructed Wetland on Low C/N Ratio Wastewater .....	HU Man-li, HAO Qing-ju, MA Rong-zhen, <i>et al.</i> (4136)
Investigation of the Performance of Organic Contaminant Degradation by Fe <sup>2+</sup> /PDS Under Environmentally Relevant pH Conditions .....	LIU Ying, GUO Yi-wei, QIAO Jun-lian, <i>et al.</i> (4146)
Typical Pesticide Residues and Their Risk Assessment in Farmland Environment of Different Plant Types in Shayu County, Xinjiang .....	XIE Xuan-xuan, NUERLA Ailijiang, BALATI Maihemuti, <i>et al.</i> (4154)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Manure and Surrounding Soil of Poultry Farm in Ningxia .....	SHEN Cong, ZHANG Jun-hua, LIU Ji-li, <i>et al.</i> (4166)
Enrichment Factors of Soil-Se in the Farmland in Shizuishan City, Ningxia .....	WANG Ying, LIU Hai-yan, WANG Ze-jing, <i>et al.</i> (4179)
Zoning and Safe Utilization Method of Heavy Metal Contaminated Cultivated Land at Block Scale .....	WANG Rui, YU Jing, LI Yu, <i>et al.</i> (4190)
Spatial Distribution, Source Apportionment, and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Jianghugongmi Producing Area, Shandong Province .....	YU Lin-song, WAN Fang, FAN Hai-yin, <i>et al.</i> (4199)
Assessing the Lead Accumulation Risks of Wheat Grain by Developing a Source-Specific Accumulation Risk Assessment Model .....	YANG Yang, LI Yan-ling, NIU Shuo, <i>et al.</i> (4212)
Accumulation Effects and Health Risks of Heavy Metals in Rice in Location-based Cadmium Anomaly Area in Liuzhou .....	ZHU Liang-liang, WANG Fu-peng, TANG Le-bin, <i>et al.</i> (4219)
Accumulation and Transport Characteristics of Cd, Pb, Zn, and As in Different Maize Varieties .....	REN Chao, XIAO Jian-hui, LI Jing-tian, <i>et al.</i> (4232)
Remediation Potential of <i>Taraxacum kok-saghyz</i> Rodin on Lead and Cadmium Contaminated Farmland Soil .....	ZHANG Heng, XIONG Ming-biao, WANG Qian-xin, <i>et al.</i> (4253)
Remediation Potential of Three Dwarf Bamboos on Farmland Soils Contaminated with Mixed Heavy Metals .....	ZHANG Ying, ZHAO Xin, ZHANG Sheng-hu, <i>et al.</i> (4262)
Impacts of Uptake and Accumulation of Cd on Double Rice-Paddy Soil by Silicon Fertilizer Continuous Application .....	PENG Hua, DENG Kai, SHI Yu, <i>et al.</i> (4271)
Effect of Modified Chitosan Loaded with Silica on Arsenic Uptake and Transport in Rice .....	YANG Jia-yi, SUN Meng-qiang, XIAO Yu-tang, <i>et al.</i> (4282)
Effect of Chelating Agents and Organic Acids on Remediation of Cadmium and Arsenic Complex Contaminated Soil Using <i>Xanthium sibiricum</i> .....	ZHANG Ya-rui, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i> (4292)
Effects of Water Management on the Transformation of Iron Oxide Forms in Paddy Soils and Its Coupling with Changes in Cadmium Activity .....	LI Ming-yuan, ZHANG Xiao-ting, LIU Han-yi, <i>et al.</i> (4301)
Effects of Iron Intensity-regulated Root Microbial Community Structure and Function on Cadmium Accumulation in Rice .....	ZHENG Shen, HUANG Dao-you, LI Bo, <i>et al.</i> (4313)
Effects of Mulching and Slow-release Fertilizer Application Reduction on Soil Microbial Community Structure in Rapeseed Field Under Two Different Rainfall Conditions .....	FENG Jun, SHI Chao, Hafiz Athar Hussain, <i>et al.</i> (4322)
High-Throughput Sequencing Combined with Metabonomics to Analyze the Effect of Heavy Metal Contamination on Farmland Soil Microbial Community and Function .....	PANG Fa-hu, LI Xiao-qi, DUAN Li-yang, <i>et al.</i> (4333)
Characteristics of Microbial Community Structure in the Surrounding Farmlands of a Mercury Mining Area and Its Environmental Driving Factors .....	CHEN Fen, YU Gao, SUN Yue-bing, <i>et al.</i> (4342)
Comparison of Bacterial Community Structure in Soil Aggregates Between Natural Karst Wetland and Paddy Field .....	LENG Meng, JIN Zhen-jiang, XIAO Xiao-yi, <i>et al.</i> (4353)
Elevational Pattern and Control Factors of Soil Microbial Carbon Use Efficiency in the Daiyun Mountain .....	LÜ Kun, WANG Jing-jing, WU Guo-peng, <i>et al.</i> (4364)
Effect of Long-term Straw Returning on the Mineralization and Priming Effect of Rice Root-carbon .....	LIU Feng, WANG Yun-qiu, ZHANG Yun, <i>et al.</i> (4372)
Effects of Straw Returning and Biochar Application on Summer Maize Yield and Soil N <sub>2</sub> O Emission in Guanzhong Plain .....	BAI Jin-ze, LIU Zhen-yuan, SONG Jia-jie, <i>et al.</i> (4379)
Effects of Polystyrene Nanoplastics (PS-NPs) on the Physiology of <i>Allium sativum</i> L. ....	QIU Chen-chen, LI Guo-xin, LI Qing-song, <i>et al.</i> (4387)
Effect of Microplastics on Soil Water Infiltration and Evaporation .....	WANG Zhi-chao, ZHANG Bo-wen, NI Jia-xuan, <i>et al.</i> (4394)
Life Cycle Assessment and Key Parameter Comparison of Hydrogen Fuel Cell Vehicles Power Systems .....	CHEN Yi-song, LAN Li-bo, HAO Zhuo, <i>et al.</i> (4402)