

环知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

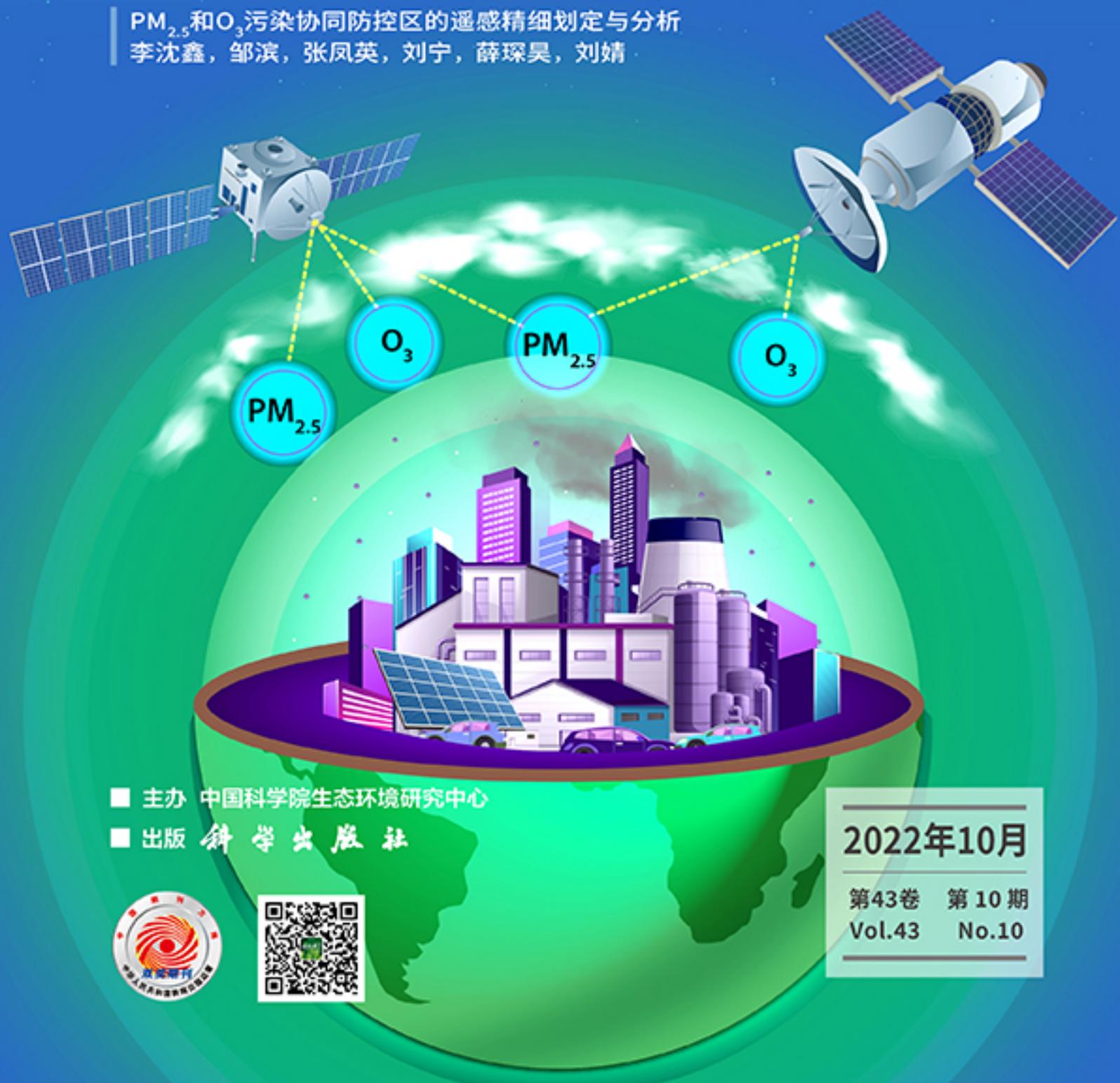
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

PM_{2.5}和O₃污染协同防控区的遥感精细划定与分析
李沈鑫, 邹滨, 张凤英, 刘宁, 薛琛昊, 刘婧



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年10月

第43卷 第10期
Vol.43 No.10

目次

PM_{2.5}和O₃污染协同防控区的遥感精细划定与分析 李沈鑫, 邹滨, 张凤英, 刘宁, 薛琛昊, 刘婧(4293)

广州市冬季一次典型臭氧污染过程分析 裴成磊, 谢雨彤, 陈希, 张涛, 邱晓暖, 王瑜, 王在华, 李梅(4305)

佛山臭氧浓度预报方程的建立与应用 陈辰, 洪莹莹, 谭浩波, 司徒淑婷, 程银琳, 步巧利, 吴蒙, 潘巧英(4316)

乌海市高分辨率大气污染源排放清单构建及其在臭氧污染成因探究中的应用 张瑞欣, 楚波, 尚春林, 曹喜萍, 李光耀, 朱玉凡, 刘晓, 夏佳琦, 陈强(4327)

结合在线监测和自动识别系统分析东海沿岸船舶排放特征 邱浩, 刘丹彤, 吴杨周, 李思远, 丁朔, 胡康, 张家乐, 陈梅汀(4338)

机动车制动磨损颗粒物及挥发性有机物的组分特征 门正宇, 刘笃优, 郭全有, 张静, 彭剑飞, 吴琳, 毛洪钧(4348)

笼养鸡舍冬季挥发性有机物排放特征 曹甜甜, 郑云昊, 张羽, 王悦, 丛群欣, 王源昊, 董红敏(4357)

上海市生活垃圾房气溶胶中可培养细菌污染状况及种群特征 卢冰洁, 张翔, 王川, 邱俊, 李丹(4367)

浙江省2008~2018年人为源氨排放清单及分布特征 方利江, 杨一群, 叶观琼(4380)

“双碳”目标下钢铁行业控煤降碳路线图 薛英岚, 张静, 刘宇, 陈瑜, 孙健, 蒋洪强, 张伟, 曹东(4392)

空间关联网络结构特征的减排效应:基于城市群视角 郑航, 叶阿忠(4401)

中国对外直接投资的减污降碳效应及其实现机制 白梓函, 吕连宏, 赵明轩, 张楠, 罗宏(4408)

近年全国地表水水质变化特征 嵇晓燕, 侯欢欢, 王姗姗, 杨凯(4419)

湟水河流域地表水体微塑料分布、风险及影响因素 范梦苑, 黄懿梅, 张海鑫, 李好好, 黄倩(4430)

汾河流域地表水水化学同位素特征及其影响因素 赵春红, 申豪勇, 王志恒, 梁永平, 赵一, 谢浩, 唐春雷(4440)

城镇化进程中珠江三角洲高锰地下水赋存特征及成因 吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 朱亮, 李海军(4449)

喀什噶尔河下游平原区地下水咸化特征及成因分析 鲁涵, 曾妍妍, 周金龙, 孙英(4459)

重庆市老龙洞地下河流域硝酸盐来源和生物地球化学过程的识别 王雨吻, 杨平恒, 张洁茹(4470)

蓝藻水华过程中优势种群演替模式、效应及驱动因子分析 欧阳添, 赵璐, 纪璐璐, 杨宋琪, 郑保海, 杜雨欣, 李佳欣, 李玉鑫, 施军琼, 吴忠兴(4480)

珠海市磨刀门水道输水水源水库群浮游植物群落特征及其环境驱动因子 张茉莉, 王思瑞, 昌盛, 王山军, 金德才, 樊月婷, 张坤锋, 谢琼, 付青(4489)

营养物质对铜绿微囊藻生长和藻际细菌的影响 吕萍, 李慧莉, 徐勇, 郑效旭, 黄振华, 王聪, 徐圣君, 庄绪亮(4502)

老化作用对微塑料吸附四环素的影响及其机制 王林, 王姝歆, 曾祥英, 何杨, 黄雯, 郑世界, 张建强(4511)

沉积物和土壤中胶体对氯霉素吸附行为的影响 晏彩霞, 罗燕清, 聂明华, 周旋, 丁明军(4522)

历史抗生素胁迫改变磺胺甲噁唑和甲氧苄啶对活性污泥的影响:ARGs及其潜在宿主 张忠兴, 樊晓燕, 李星, 高玉玺, 赵君如(4536)

阳朔典型铅锌矿区流域土壤重金属空间分布特征及来源解析 陈盟, 潘泳兴, 黄奕翔, 王樞檀, 张睿东(4545)

白洋淀及周边土壤重金属的分布特征及生态风险评估 郑飞, 郭欣, 汤名扬, 朱冬, 董四君, 康乐, 陈兵(4556)

基于地理探测器的镇域尺度土壤重金属含量空间分异及其影响因素分析 龚仓, 王亮, 王顺祥, 张志翔, 董航, 刘玖芬, 王德伟, 严步青, 陈映(4566)

燃煤电厂重金属排放与周边土壤中重金属污染特征及健康风险 车凯, 陈崇明, 郑庆宇, 范辉, 魏明磊, 罗蓬, 郁金星(4578)

海南岛半干旱区农用地土壤重金属富集因素、健康风险及来源识别 杨剑洲, 龚晶晶, 王振亮, 高健翁, 杨建坤, 胡树起, 唐世新(4590)

九龙江口红树林表层沉积物重金属赋存形态及污染评价 张华兰, 于瑞莲, 万瑞安, 胡恭任, 黄华斌, 吴雅清(4601)

我国茶叶主产区有机肥重金属含量现状 伊晓云, 方丽, 杨向德, 马立锋, 刘美雅, 张群峰, 倪康, 石元值(4613)

甘肃省农业土壤邻苯二甲酸酯累积特征及来源分析 陈王玉, 张光全, 张杨, 李明凯, 郝佳欣, 熊有才, 李崇霄, 曹靖(4622)

三峡库区澎溪河不同高程消落带土壤磷形态及磷酸酶活性分布特征 高艺伦, 方芳, 唐子超, 张蕊, 蒋艳雪, 郭劲松(4630)

塔里木盆地北缘绿洲不同连作年限棉田土壤有机碳组分特征及其与理化因子的相关性 李昕竹, 贡璐, 唐军虎, 罗艳, 丁肇龙, 朱海强, 张涵, 李蕊希(4639)

黄土丘陵区柠条人工林不同深度土壤呼吸速率对土壤湿度的响应 孙亚荣, 王亚娟, 赵敏, 薛文艳, 梁思琦, 刘乐, 刘超, 陈云明(4648)

基于Meta-analysis的生物炭对土壤硝态氮淋失和磷酸盐固持影响 姜志翔, 崔爽, 张鑫, 郝敏, 孙德茂(4658)

低分子有机酸强化植物修复重金属污染土壤的作用与机制 方治国, 谢俊婷, 杨青, 卢焯桢, 黄海, 朱芸烟, 尹思敏, 吴鑫涛, 都韶婷(4669)

无机钝化剂对镉污染酸性水稻土的修复效果及其机制 张剑, 孔繁艺, 卢升高(4679)

改良铅锌矿渣对栎树幼苗铅锌富集与耐性机制 谢天志, 陈永华, 苏荣葵, 刘慧, 姚海松(4687)

CaO₂/FA复合材料富集磷效能及其回收物对土壤改良作用 岳薇, 李大鹏, 吴玲予, 王璐, 汤尧禹, 朱企, 黄勇(4697)

早稻秸秆还田和减钾对晚稻产量和土壤肥力的影响 黄巧义, 黄建凤, 黄旭, 吴永沛, 李苹, 付弘婷, 唐拴虎, 刘一峰, 徐培智(4706)

秸秆连续还田配施化肥对稻-油轮作土壤碳库及作物产量的影响 蔡影, 付思伟, 张博睿, 胡宏祥, 刘文雯, 俞金涛, 贾临东, 刘运峰(4716)

化肥减量配施秸秆对双季稻田固氮微生物群落的影响 陈凯鹏, 韦菊烟, 陈丹, 王聪, 沈健林, 李勇, 吴金水(4725)

化肥减量与有机物料添加对华北潮土微生物氮循环功能基因丰度和氮转化遗传潜力的影响 李胜君, 胡荷, 李刚, 王蕊, 赵建宁, 张贵龙, 修伟明(4735)

长期覆膜条件下农田土壤微生物群落的响应特征 胡志娥, 肖谋良, 丁济娜, 季剑虹, 陈剑平, 葛体达, 鲁顺保(4745)

长期秸秆还田对潮土真菌群落、酶活性和小麦产量的影响 马垒, 李燕, 魏建林, 李子双, 周晓琳, 郑福丽, 吴小宾, 王利, 刘兆辉, 谭德水(4755)

土壤改良剂对再生水滴灌根际土壤菌群多样性及病原菌和抗生素抗性基因丰度的影响 崔丙健, 崔二革, 刘春成, 胡超, 樊向阳, 李中阳, 高峰(4765)

氮素对苜蓿植物修复垃圾堆场镉-多环芳烃复合污染土壤及土壤细菌群落结构的影响 李怡佳, 马俊伟, 李玉倩, 肖琛, 沈心怡, 牛云, 陈家军(4779)

抗生素降解剂对猪粪堆肥腐熟和细菌群落演替的影响 李玮琳, 张昕, 马军伟, 孙万春, 成琪璐, 林辉(4789)

《环境科学》征订启事(4337) 《环境科学》征稿简则(4407) 信息(4521, 4705, 4800)

佛山臭氧浓度预报方程的建立与应用

陈辰^{1,2}, 洪莹莹^{3*}, 谭浩波^{1*}, 司徒淑婷⁴, 程银琳¹, 步巧利¹, 吴蒙^{1,2}, 潘巧英¹

(1. 佛山市气象局, 佛山 528000; 2. 广东省珠江口气候环境与空气质量变化野外科学观测研究站, 广州 510275; 3. 珠三角环境气象预报预警中心, 广东省生态气象中心, 广州 510640; 4. 广东省佛山生态环境监测站, 佛山 528000)

摘要: 臭氧作为大气中的二次污染物, 其形成和变化复杂, 臭氧预报更是当下空气污染治理的难题之一. 通过分析 2014 ~ 2017 年佛山地区近地面 O₃ 浓度与高低层气象要素的关系, 建立了佛山 O₃ 浓度预报方程, 并进行了检验和应用. 结果表明, 佛山近地面 O₃ 的变化与高低层气象要素关系密切, 气温和日照时数等气象要素与 O₃ 浓度呈显著正相关, 相对湿度、总(低)云量和风速等与其呈负相关; 高浓度 O₃ 污染发生的气象条件为小风速、晴天少云、低相对湿度、较长的日照时间和较高的温度, 高浓度 O₃ 潜势指数(HOPI)和风向指数(WDI)的定义可以较好地衡量 O₃ 污染气象条件的好坏; 综合考虑 HOPI 和不同高度 WDI 等 13 种气象要素, 采用多指标叠套和多元逐步回归建立了佛山地区臭氧浓度预报方程; 利用 2018 年资料检验发现, 模拟值与实测值二者的相关系数 R 可达 0.82, 预报方程具有良好的拟合效果和可预报性.

关键词: 臭氧(O₃); 臭氧预报; 气象因子; 风向指数; 多元回归

中图分类号: X515 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)10-4316-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202112017

Establishment and Application of Foshan Ozone Concentration Forecast Equation

CHEN Chen^{1,2}, HONG Ying-ying^{3*}, TAN Hao-bo^{1*}, SITU Shu-ping⁴, CHENG Yin-lin¹, BU Qiao-li¹, WU Meng^{1,2}, PAN Qiao-ying¹

(1. Foshan Meteorological Bureau, Foshan 528000, China; 2. Guangdong Provincial Observation and Research Station for Climate Environment and Air Quality Change in the Pearl River Estuary, Guangzhou 510275, China; 3. Pearl River Delta Center for Environmental Meteorology Prediction and Warning, Guangdong Ecological Meteorology Center, Guangzhou 510640, China; 4. Foshan Ecology and Environmental Monitoring Station of Guangdong Province, Foshan 528000, China)

Abstract: The formation and changes of ozone (O₃), a secondary pollutant in the atmosphere, are complex, and ozone forecasting has become one of the current problems in air pollution prevention and control. In this study, the relationships between the near-surface O₃ concentration and meteorological elements (high- and low-level) in Foshan from 2014 to 2017 were analyzed, and the concentration forecasting equation was established, tested, and applied. The results showed that the near-surface O₃ changed closely related to high- and low-level meteorological elements. Meteorological elements such as temperature and sunshine hours were significantly positively correlated with O₃ concentration, whereas relative humidity, total (low) cloud cover, and wind speed were negatively correlated with O₃. Heavy O₃ pollution often occurred with meteorological conditions of low wind speed, sunny days and few clouds, low relative humidity, longer sunshine time, and higher temperature. The definitions of high-concentration O₃ potential index (HOPI) and wind direction index (WDI) in the Foshan area could better characterize the meteorological conditions of O₃ pollution. Considering 13 meteorological elements, such as HOPI and WDI at different heights, the O₃ concentration forecasting equation in the Foshan area was established using multi-indicator stacking and multiple stepwise regression methods. Using the 2018 data, it was found that the correlation coefficient R between the simulated values and the measured values reached 0.82, and the forecast equation had a good fitting effect and predictability.

Key words: ozone (O₃); ozone forecast; meteorological factors; wind direction index; multiple regression

近年来,经过一系列大气污染治理工作的开展与落实,PM_{2.5}和PM₁₀等一次污染物已经得到有效控制,但臭氧(O₃)等二次污染物并未得到有效控制^[1],O₃污染问题日益凸显^[2-4].2015年广东省环境状况公报显示,珠三角的首要污染物为臭氧日最大8h浓度(O₃-8h),占首要污染物比例达40.7%,O₃首次反超PM_{2.5}成为了广东省的首要空气污染物,2018~2020年O₃作为首要污染物的比重更是从59.6%逐年上升至68.7%^[5].粤港澳珠江三角洲区域空气监测网络数据分析也显示,2016年之后,臭氧平均增长速率为2.08 μg·(m³·a)⁻¹,臭氧浓度增速加快^[6].佛山作为广东大气污染防治重点区域之一,近年轻度及其以上污染天气主要由O₃超标导致,O₃污染防治是今后大气污染防治工作的重点.对流层O₃是大气中光化学烟雾的重要指标,也

是辨别环境空气质量好坏的主要参考依据^[7],除少量平流层的输入外,近地层O₃主要是由光化学反应生成的,其前体物包括人类活动产生的挥发性有机物(VOCs)、NO_x和CO等污染物^[8].高浓度的O₃不仅会对人体、农作物和生态健康造成直接影响^[9,10],还会使大气的氧化性增加,从而氧化SO₂和NO_x等气态氧化物,使得颗粒物浓度增加^[11].

除了与光化学反应有关,O₃浓度的高低也与气象条件密切相关,诸如辐射、天况、气温、风速风向

收稿日期: 2021-12-02; 修订日期: 2022-02-18

基金项目: 广东省科技计划项目(科技创新平台类)(2019B121201002); 广东省气象局科研项目(GRMC2019M30, GRMC2018M07); 广东省气象局科技创新团队项目(GRMC202003); 佛山市气象局环境气象技术研究团队项目(202003); 佛山市气象局科研项目(202102)

作者简介: 陈辰(1991~),女,硕士,工程师,主要研究方向为大气物理与大气环境, E-mail: chenchen1991nuist@163.com

* 通信作者, E-mail: honggy3@mail2.sysu.edu.cn; hbttan@gd121.cn

和相对湿度等均会对其造成影响^[12,13]. 鉴于臭氧形成和变化的复杂性, 臭氧污染治理和预报仍是国际难题之一. 目前, 全球已有 300 多个城市发布臭氧预报, 模拟和预测手段包括统计回归^[14,15]、人工神经网络^[16]和数值模式^[17,18]等, 并取得了一定的效果. 数值模式预报方法能够模拟污染物的转化、迁移和扩散, 反映污染物的变化规律, 但是其建立在获取大量的气象数据、污染物排放源数据和空气监测数据的基础上, 需要掌握污染变化的机制, 计算耗时长. 统计预报方法如回归模型具有计算简单、资料要求较低和准确度高的优势^[13,19], 可以在业务预报特别是地市空气质量预报业务中得到更广泛的应用. 安俊琳等^[20]采用主成分和回归分析方法构造了北京夏季大气 O₃ 浓度的统计方程, 综合考虑了大气前体物和地面气象要素对近地面 O₃ 的影响. 支持向量机回归^[21]表明, NO_x 在 07:00 浓度和紫外线 (UVB) 预报是南京地区 O₃ 日最大值预报的主要因子, 气温对 O₃ 日最大 8 h 浓度预报中起重要作用. 谈建国等^[19]和王磊等^[13]通过综合分析地面气象要素与 O₃ 日最大浓度 (O₃-1h) 的关系, 找出了影响 O₃ 浓度的关键气象因子, 分别建立了上海和南京地区的高浓度 O₃ 潜势指数 (HOPI), 并结合中低层 (500、700、850 和 925 hPa) 的气象观测数据, 采用多指标叠套的多云回归方法建立的高浓度 O₃ 预报方程, 预报检验表明均具有较好的适用性和可预报性.

目前珠三角地区有关 O₃ 预报的统计模型研究, 主要集中在地面气象要素的分析, 其他层次考虑较少, 为更好地实现佛山地区乃至地市级气象部门臭氧预报工作的开展和臭氧预报质量的提高, 建立属于佛山地区以及地市本地的高浓度臭氧潜势指数,

将各层 (500、700、850 和 925 hPa) 气象条件纳入考虑有很大的必要. 本文利用 2014 ~ 2017 年佛山地区近地面 O₃ 浓度和高低层气象要素数据, 采用多指标叠套和多元逐步回归方法建立了佛山地区 O₃ 浓度预报方程, 并对其进行了检验, 以期为现阶段佛山乃至珠三角地区日益严重的 O₃ 污染防治提供依据和参考.

1 材料与方法

1.1 资料来源

本文采用的空气质量监测数据主要为 O₃ 浓度, 数据来源于 2015 ~ 2018 年佛山市环境监测中心站, 监测站点包括云东海 (三水)、三水监测站 (三水)、南海气象局 (南海)、华材职中 (禅城)、湾梁 (禅城)、苏岗 (顺德) 和容桂街道办 (顺德) 这 8 个环保国控站 (图 1), 数据分辨率为 1 h, 数据有效率 99.9%.

本文采用的气象要素包括三类: 一是地面气象要素实况, 辐射数据来源于广州市气象局广州观测站, 其余数据来源于佛山气象局, 监测站点包括三水、南海和顺德这 3 个国家气象观测站, 数据内容包括逐时气温、气压、相对湿度、风向、风速、日最高气温和日照时数等, 数据分辨率为 1 h; 二是高空气象要素实况, 数据来源于清远国家高空气象观测站, 该站距离佛山城区 75 km, 数据内容包括 700、850 及 925 hPa 高度场、温度、风向、风速和露点温度, 数据时次为每日 08:00; 三是天况观测数据, 云量数据来源于欧洲中心 (ECMWF) ERA5 0.25° × 0.25° 云量资料, 数据内容包括总云量和低云量, 数据时次为每日 14:00.

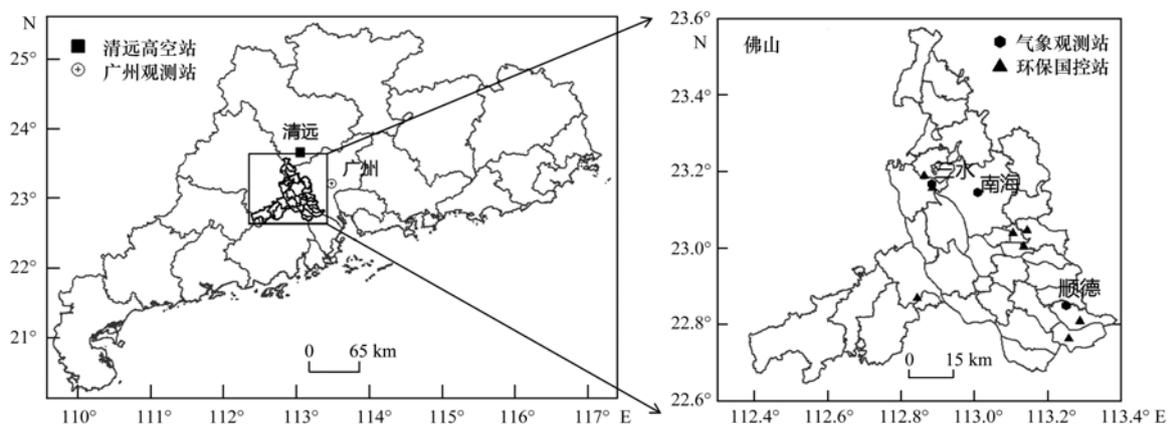


图 1 环保与气象观测站点示意

Fig. 1 Environmental and meteorological sites

1.2 数据处理

本文 O₃ 浓度超标值参照标准《环境空气质量指数 (AQI) 技术规定》(HJ 633-2012) 和《环境空气

质量标准》(GB 3095-2012) 执行, 即 O₃ 日最大 8 h 滑动平均浓度 (O₃-8h) 等级标准为: 优, 0 ~ 100 μg·m⁻³; 良, 101 ~ 160 μg·m⁻³; 轻度污染, 161 ~

215 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 中度污染, 216 ~ 265 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 重度污染, 266 ~ 800 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 其中大于 160 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时, 为臭氧超标日.

本文所有的观测资料时段为 2015 年 1 月 1 日至 2018 年 12 月 31 日. 其中, 2018 年 1 月 1 日至 2018 年 12 月 31 日的资料没有参与臭氧浓度方程的建模而是用于模型的检验.

2 结果与讨论

2.1 O_3 浓度与气象因子的关系

2.1.1 O_3 浓度指标与关键气象因子的确立

为了确定各气象因子对 O_3 浓度的影响, 并进一步确定影响佛山地区 O_3 浓度的关键性气象因子及其阈值, 建立用于佛山地区的 O_3 浓度预报方程, 首先需要了解和明晰不同气象要素对 O_3 浓度的影响大小. 表 1 ~ 3 给出了佛山 O_3 浓度与地面气象要素(气压、气温、风速、云量和日照时数等)和高空气象要素(位势高度、温度和露点温度等)的相关系数. 为了挑选最优的 O_3 浓度表征参量, 表 1 ~ 3 中给出了 O_3 日最大小时浓度平均值(O_3 -1h)、 O_3 日均值(O_3 -avg)和 O_3 日最大 8 h 浓度平均值(O_3 -8h).

由表 1 可知, 14:00 气温和相对湿度与各 O_3 -8h 浓度相关性最大 ($N = 1\ 068$, $P < 0.01$), 分别为 0.550 和 -0.560, 风速、总云量和低云量均与各 O_3 浓度均呈负相关, O_3 -1h 浓度相关性最为明显 ($N = 1\ 041$, $P < 0.01$), 分别为 -0.255、-0.131 和 -0.131. 08:00 气象要素与各 O_3 浓度的相关性表明, 气温、总云量和低云量与 O_3 -8h 浓度的相关最明显(相关系数分别为 0.355、-0.171 和 -0.184,

$P < 0.01$), 风速与 O_3 -1h 浓度负相关最明显 ($R = -0.296$, $P < 0.01$); 相对湿度与 O_3 -avg 浓度的相关性表现最好, 相关系数达 -0.368 ($N = 1\ 068$, $P < 0.01$).

从地面日均值或日极值与各 O_3 浓度的相关性来看(表 2), 日照时数、最高气温、平均气温和平均气压与 O_3 -8h 浓度的相关性表现最好, 相关系数分别为 0.594、0.534、0.444 和 -0.235 ($N = 1\ 068$, $P < 0.01$); O_3 -1h 浓度与平均风速的负相关表现最好, 相关系数为 -0.349 ($N = 1\ 041$, $P < 0.01$); 日均相对湿度与 O_3 -avg 浓度负相关表现最好, 相关系数为 -0.518 ($N = 1\ 068$, $P < 0.01$).

从高层气象要素与各 O_3 浓度的相关性来看(表 3), 700 hPa 温度和温度露点差与 O_3 -8h 浓度相关性最好 ($N = 1\ 022$, $R = 0.376$ 和 0.263 , $P < 0.01$), 700 hPa 位势高度和水平风速与 O_3 -1h 浓度相关性表现最明显 ($N = 955$, $R = 0.209$ 和 -0.514, $P < 0.01$), 露点温度 O_3 -avg 浓度与相关性最高, 相关系数为 -0.368 ($N = 1\ 022$, $P < 0.01$). 850 hPa 温度和温度露点差与 O_3 -8h 浓度的相关性也表现最好, 相关系数分别为 0.268 和 0.156 ($N = 1\ 022$, $P < 0.01$), 其余要素与 O_3 浓度相关性不明显, 均未通过显著性检验. 925 hPa 位势高度、温度和露点温度与 O_3 -8h 浓度相关性表现最为良好 ($N = 1\ 022$, $R = -0.126$ 、 0.350 和 0.135 , $P < 0.01$), 925 hPa 水平风速与 O_3 -1h 浓度的负相关关系表现最好, 相关系数为 -0.309; 温度露点差与 O_3 -avg 浓度的相关性最好 ($N = 1\ 022$, $R = 0.291$, $P < 0.01$).

表 1 2015 ~ 2017 年佛山地区 O_3 浓度与地面气象要素(14:00 和 08:00)的相关性¹⁾

Table 1 Correlation coefficients between O_3 concentration and surface meteorological elements (14:00 and 08:00) in Foshan area from 2015 to 2017

时刻	气象要素	气压	气温	相对湿度	风速	总云量	低云量
14:00	O_3 -1h ($N = 1041$)	0.000	0.537 **	-0.546 **	-0.255 **	-0.131 **	-0.131 **
	O_3 -avg ($N = 1068$)	0.015	0.405 **	-0.555 **	-0.122 **	-0.117 **	-0.117 **
	O_3 -8h ($N = 1068$)	-0.042	0.550 **	-0.560 **	-0.218 **	-0.116 **	-0.116 **
	气象要素	气压	气温	相对湿度	风速	总云量	低云量
08:00	O_3 -1h ($N = 1041$)	-0.053	0.336 **	-0.234 **	-0.296 **	-0.168 **	-0.169 **
	O_3 -avg ($N = 1068$)	-0.050	0.233 **	-0.368 **	-0.116 **	-0.141 **	-0.135 **
	O_3 -8h ($N = 1068$)	-0.053	0.355 **	-0.274 **	-0.239 **	-0.171 **	-0.184 **

1) ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关, " O_3 -1h" 表示 O_3 日最大小时浓度平均值, " O_3 -avg" 表示 O_3 日均值, " O_3 -8h" 表示 O_3 日最大 8 h 浓度平均值, 每类臭氧浓度括号内的 N 的数值表示有效样本数

综合考虑不同高度各气象要素与各 O_3 浓度的相关性来看, O_3 -8h 浓度的表现最为稳定, 与各气象要素的综合相关关系要明显好于其他两项, 气象要素对该浓度值的影响更为显著. 《环境空气质量指数(AQI)技术规定》(HJ 633-2012)和《环境空气质

量标准》(GB 3095-2012)标准中采用的逐日考核 O_3 浓度也为 O_3 -8h 浓度, 因此, 本文以 O_3 -8h 作为后续佛山地区 O_3 浓度预报方程和 O_3 浓度关键性气象阈值研究的指标, 以期为后期空气质量预报和大气污染精准防治提供参考和依据.

表 2 2015~2017 年佛山地区 O₃ 浓度与地面气象要素(日均和日极值)的相关性¹⁾Table 2 Correlation coefficients between O₃ concentration and surface meteorological elements (daily average values, daily extreme values) in Foshan area from 2015 to 2017

气象要素	日照时数	最高气温	日均相对湿度	平均气温	平均风速	平均气压
O ₃ -1h(N=1 041)	0.554 **	0.520 **	-0.414 **	0.424 **	-0.349 **	-0.215 **
O ₃ -avg(N=1 068)	0.533 **	0.385 **	-0.518 **	0.312 **	-0.145 **	-0.129 **
O ₃ -8h(N=1 068)	0.594 **	0.534 **	-0.454 **	0.444 **	-0.286 **	-0.235 **

1) ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关,“O₃-1h”表示 O₃ 日最大小时浓度平均值,“O₃-avg”表示 O₃ 日均值,“O₃-8h”表示 O₃ 日最大 8 h 浓度平均值,每类臭氧浓度括号内的 N 的数值表示有效样本数

表 3 2015~2017 年佛山地区 O₃ 浓度与高空气象要素(700、850 和 925 hPa, 08:00)的相关性¹⁾Table 3 Correlation coefficients between O₃ concentration and high-altitude weather elements (700 hPa, 850 hPa, 925 hPa, 08:00) in Foshan from 2015 to 2017

气压/hPa	气象要素	位势高度	温度	露点温度	水平风速	温度露点差
700	O ₃ -1h(N=995)	0.209 **	0.347 **	-0.107 **	-0.514 **	0.244 **
	O ₃ -avg(N=1 022)	0.134 **	0.245 **	-0.148 **	-0.440 **	0.250 **
	O ₃ -8h(N=1 022)	0.196 **	0.376 **	-0.115 **	-0.501 **	0.263 **
850	O ₃ -1h(N=995)	-0.019	0.253 **	0.010	-0.021	0.150 **
	O ₃ -avg(N=1 022)	0.001	0.132 **	-0.091 **	-0.014	0.210 **
	O ₃ -8h(N=1 022)	-0.043	0.268 **	0.014	-0.007	0.156 **
925	O ₃ -1h(N=995)	-0.105 **	0.343 **	0.131 **	-0.309 **	0.237 **
	O ₃ -avg(N=1 022)	-0.045	0.201 **	0.002	-0.123 **	0.291 **
	O ₃ -8h(N=1 022)	-0.126 **	0.350 **	0.135 **	-0.267 **	0.242 **

1) ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关, O₃-1h 表示 O₃ 日最大小时浓度平均值, O₃-avg 表示 O₃ 日均值, O₃-8h 表示 O₃ 日最大 8 h 浓度平均值,每类臭氧浓度括号内的 N 的数值表示有效样本数

通过上述相关性分析,综合考虑水平扩散条件(风速)和近地面 O₃ 生成或光化学反应条件(日照、气温和相对湿度等),挑选出相关系数较大的表征因子如下:14:00 的气温、相对湿度、平均气温、低云量和总云量;日照时数、平均风速、日均相对湿度和最高气温;700 hPa 和 928 hPa 的气温和风速(08:00)。这些因子即为佛山地区 O₃ 污染的关键气象因子。

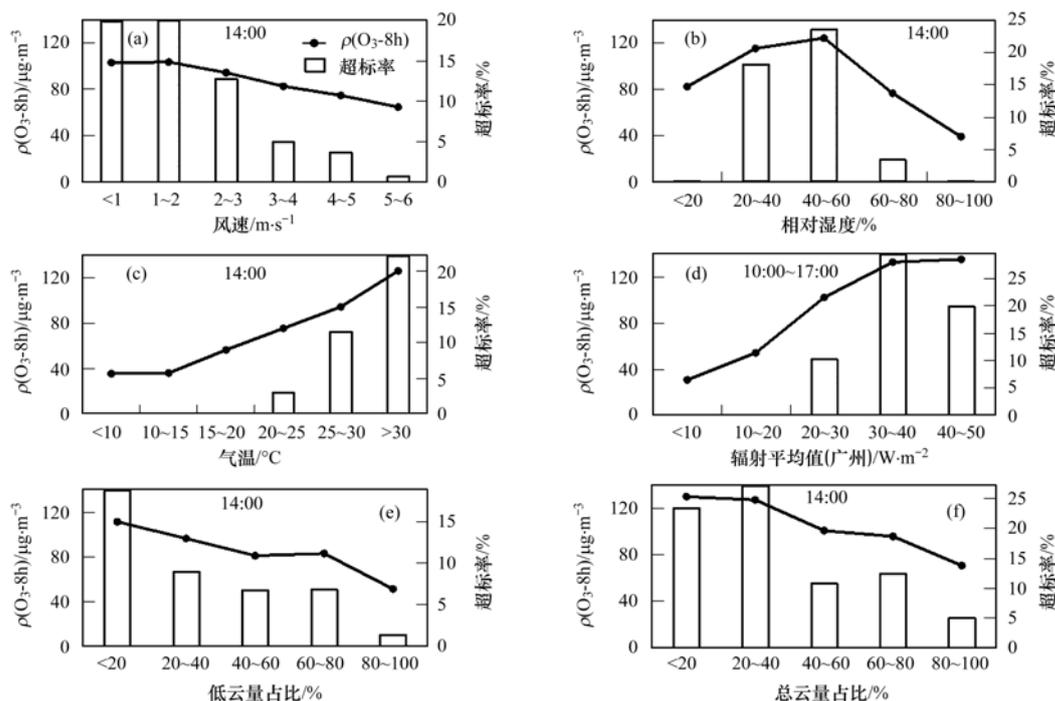
2.1.2 关键气象因子阈值的确定

为更好地指导后续空气质量预报,确定关键气象因子后,还应进一步确定佛山地区 O₃ 浓度超标时 [$\rho(\text{O}_3\text{-8h}) \geq 160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] 各个因子的阈值,图 2~4 给出了 O₃-8h 浓度地面和高层不同气象要素的变化特征。

O₃ 作为大气中的污染物,局地浓度的高低受大气边界层湍流和扩散影响显著,风速在一定程度上表征了大气湍流的强度^[13]。风速越大,水平扩散条件越好,近地面大气湍流越明显;风速越小,水平扩散条件越差,大气湍流越不明显^[22]。图 2(a)、图 3(b)、图 4(b)和图 4(d)分别给出了 O₃-8h 浓度随地面风速(14:00)、日平均风速、700 hPa 风速(08:00)和 925 hPa 风速(08:00)的变化情况。可以看出除 925 hPa 风速(08:00)外,随着各风速增大,O₃-8h 浓度和超标率均表现为逐渐降低。当 14:00 地面风

速由 2~3 m·s⁻¹ 增大至 3~4 m·s⁻¹ 时, $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$ 由 94.6 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 下降为 82.8 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, O₃-8h 超标率也由 12.9% 快速下降至 5.1%; 当日均风速由 2~3 m·s⁻¹ 增大至 3~4 m·s⁻¹ 时, $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$ 由 86.2 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 下降为 73.9 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, O₃-8h 超标率也由 10.0% 快速下降至 2.1%; 当 700 hPa 风速(08:00)由 5~10 m·s⁻¹ 增大至 10~15 m·s⁻¹ 时, $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$ 由 104.8 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 下降为 64.9 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, O₃-8h 超标率也由 17.6% 快速下降至 2.4%。O₃-8h 浓度随 925 hPa 风速(08:00)的变化在 < 12 m·s⁻¹ 时随着风速的增大,浓度平均值和超标率也表现为逐渐下降,但随着风速的持续增大,O₃-8h 浓度变化不大,但超标率在风速 > 16 m·s⁻¹ 时由 12~16 m·s⁻¹ 的 1.9% 增大至 9.1%。分析样本发现,925 hPa 风速(08:00) > 16 m·s⁻¹ 个例较少,仅有样本数 10 个,且基本均发生在台风外围东北下沉气流影响下,不具有普适性,因此后续研究超标率和臭氧预报方程时未将该阈值纳入考量。通过以上分析,各风速的阈值为:14:00 风速 < 3 m·s⁻¹, 日平均风速 < 3 m·s⁻¹, 700 hPa 风速(08:00) < 10 m·s⁻¹ 和 925 hPa 风速(08:00) < 8 m·s⁻¹。

近地面 O₃ 是在太阳辐射下前体物通过光化学反应产生的,而气温也是受太阳辐射影响而逐渐升高的,因此气温与 O₃ 浓度的日变化规律大致相似,



因佛山没有辐射和云量观测, (d) 为广州辐射观测结果, (e) 和 (f) 为佛山地区 ERA5 再分析资料结果
图 2 O_3-8h 浓度随 14:00 地面气象要素 (风速、气温、相对湿度、辐射、低云量和总云量) 的变化特征

Fig. 2 Variation characteristics of O_3-8h concentration with surface meteorological elements at 14:00

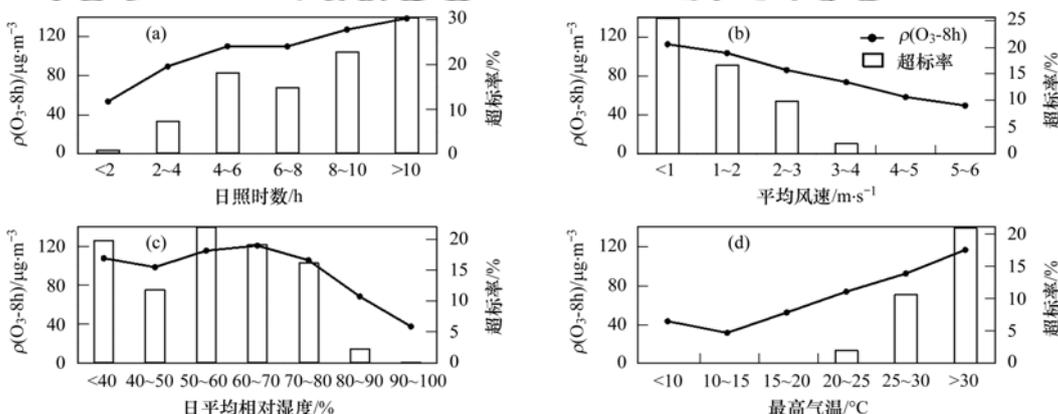


图 3 O_3-8h 浓度随日照时数、日均风速、日均相对湿度和最高气温的变化特征

Fig. 3 Variation characteristics of O_3-8h concentration with sunshine hours, daily average wind speed, daily average relative humidity, and maximum temperature

二者同样是在午后达到峰值,有明显的正相关关系^[23].由图 2(c)、图 3(d)、图 4(a)和图 4(c)可知,随着各气温指标的升高, O_3-8h 浓度和超标率均大致表现为升高趋势.当 14:00 气温由 20~25 $^{\circ}\text{C}$ 上升至 25~30 $^{\circ}\text{C}$ 时, $\rho(\text{O}_3-8\text{h})$ 由 75.6 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 上升至 94.8 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, O_3-8h 超标率也由 3.0%快速上升至 11.7%;当日最高气温由 20~25 $^{\circ}\text{C}$ 上升至 25~30 $^{\circ}\text{C}$ 时, $\rho(\text{O}_3-8\text{h})$ 由 73.9 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 上升至 92.4 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,超标率由 2.1%快速上升至 10.7%;当 700 hPa 气温(08:00)由 3~6 $^{\circ}\text{C}$ 上升至 6~9 $^{\circ}\text{C}$ 时, $\rho(\text{O}_3-8\text{h})$ 由 63.5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 上升至 92.3 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,超标率也由 3.3%快速上升至 13.1%;当 925 hPa 气

温(08:00)由 10~15 $^{\circ}\text{C}$ 上升至 15~20 $^{\circ}\text{C}$ 时, $\rho(\text{O}_3-8\text{h})$ 由 75.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 上升至 98.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,超标率也由 5.1%快速上升至 15.0%.通过以上分析,各温度的阈值为:14:00 气温 $\geq 25^{\circ}\text{C}$,最高气温 $\geq 25^{\circ}\text{C}$,700 hPa(08:00)气温 $\geq 6^{\circ}\text{C}$,925 hPa(08:00)气温 $\geq 15^{\circ}\text{C}$.

相对湿度是空气中绝对湿度与同气温和气压下饱和绝对湿度的比值,表征空气中水汽的饱和程度.与气温日变化相反,随着太阳辐射的增强,相对湿度会逐渐降低,因此其日变化与 O_3 浓度的日变化规律相反,午间出现最低值.研究表明,相对湿度与 O_3 浓度的负相关关系是由多种原因造成的^[12,24,25].首先,

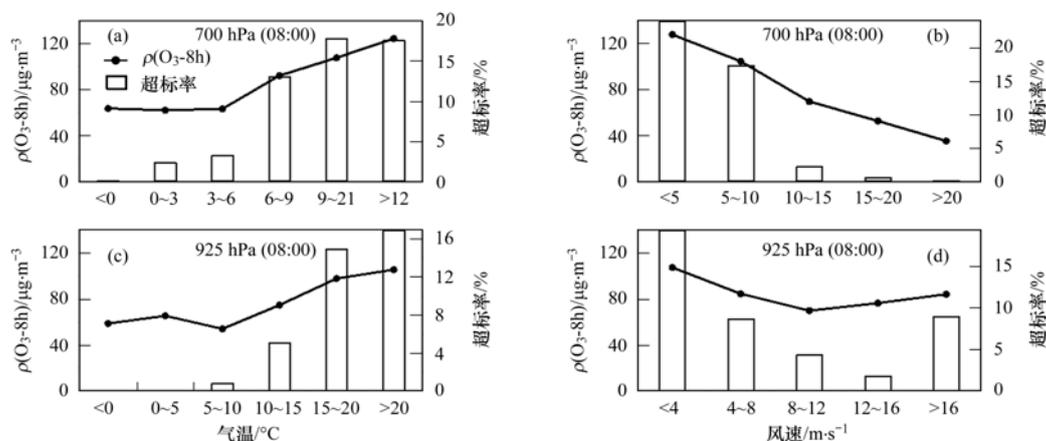


图4 O_3 -8h 浓度随高层(700 hPa 和 925 hPa)08:00 气象要素(气温和风速)的变化特征

Fig. 4 Variation characteristics of O_3 -8h concentration with high-level (700 hPa and 925 hPa) meteorological elements (temperature and wind speed) at 08:00

大气中的水汽会通过消光机制阻碍太阳辐射到达地面;其次,湿度较高时,空气中水汽所含的自由基会迅速将 O_3 分解为氧分子,从而消耗 O_3 ;另外,当相对湿度较高时,水汽充足,常伴有云雨,会阻挡紫外辐射,降雨也会使得大气中的污染物得以湿清除, O_3 浓度也较低.不过,值得一提的是,相对湿度很低时,常伴随冷空气影响,北风强劲,水平扩散条件好, O_3 浓度较低.由 14:00 相对湿度和日均相对湿度与 O_3 -8h 浓度的变化特征来看[图 2(b)和 3(c)],当 14:00 相对湿度由 40%~60% 增加至 60%~80% 时, $\rho(O_3-8h)$ 由 $124.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 快速下降至 $76.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, O_3 -8h 超标率也由 23.7% 快速下降至 3.6%;当日均相对湿度由 70%~80% 下降至 80%~90% 时, $\rho(O_3-8h)$ 由 $105.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 快速下降至 $68.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 超标率也由 16.3% 快速下降至 2.5%.通过以上分析,14:00 相对湿度和日均相对湿度的阈值分别为:14:00 相对湿度 < 60%,日均相对湿度 < 80%.

由于近地面 O_3 形成与太阳紫外辐射所引起的光化学反应关系密切,云天状况、日照时数和辐射对 O_3 浓度均有影响^[26].图 2(d)给出了 O_3 -8h 浓度随 10:00~17:00 平均辐射的变化,当平均辐射低于 $20 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 时,基本无臭氧污染情况发生,随着辐射增大,超标率和平均浓度均开始增大,辐射处于 $30\sim 40 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 范围时,超标率最高(29.5%), $\rho(O_3-8h)$ 达 $132.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.但因为佛山暂没有辐射观测和预报业务,后续并未确定阈值.图 2(e)、2(f)和 3(a)给出了 O_3 -8h 浓度与 14:00 低云量、总云量和日照时数的变化特征.可以看出, O_3 浓度和超标率与云量呈负相关,云量增多, O_3 浓度降低.分析再分析资料发现[图 2(e)和 2(f)],随着云量的逐渐

增多, O_3 -8h 浓度和超标率均大致表现为下降趋势.当 14:00 总云量占比由 60%~80% 增加至 80%~100% 时, $\rho(O_3-8h)$ 由 $96.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 下降至 $70.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 超标率也由 12.5% 下降至 5.2%;当 14:00 低云量占比由 20%~40% 增加至 40%~60% 时, $\rho(O_3-8h)$ 由 $96.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 下降至 $81.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 超标率也由 9.1% 下降至 6.9%.日照时数是太阳直接辐照度达到或超过 $120 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 的各段时间的总和,日常均有观测,可以在一定程度上表征太阳辐射的强度,日照时间长,常对应晴好天气,日照时间短则对应多云或阴天天气.图 3(a)给出了 O_3 浓度随日照时数的变化特征,可以看出, O_3 浓度与日照时数呈正相关关系,随着日照时数的增加, O_3 -8h 平均浓度稳步上升.当日照时数由 2~4 h 增加至 4~6 h 时, $\rho(O_3-8h)$ 由 $89.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 快速上升至 $110.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 超标率也由 7.5% 快速上升至 18.3%, O_3 -8h 浓度超标事件多发生日照时数大于 4 h 以上日,当日照时数超过 10 h 时,超标率可以高达 30.6%.长时间日照,有利于大气光化学反应的持续发生,从而造成近地面 O_3 浓度的不断增加^[27,28].通过以上分析,云量和日照时数的阈值可总结为:14:00 低云量 < 4 成,14:00 总云量 < 8 成,日照时数 ≥ 4 h.

2.2 佛山地区高浓度臭氧潜势指数(HOPI)的确立

高浓度 O_3 污染事件的发生与气象条件密切相关, O_3 污染出现的气象条件主要表为晴间少云、小风、低相对湿度、较长的日照时间和较高的温度,本研究参考南京与上海地区研究结果^[13,19],依据佛山本地观测实况研究结果,定义佛山地区高浓度臭氧潜势指数(high concentration ozone potential index, HOPI)如表 4.

表 4 佛山地区高浓度臭氧潜势指数 (HOPI) 判定指标

Table 4 High concentration ozone potential index (HOPI) judgment index in Foshan

判定指标	满足条件 ¹⁾	
①晴间少云;14:00 低云量占比 <40% 或 14:00 总云量占比 <80%	1	0
②小风速;14:00 风速 <3 m·s ⁻¹ 或 日平均风速 <3 m·s ⁻¹ 或 700 hPa(08:00) 风速 <10 m·s ⁻¹ 或 925 hPa(08:00) 风速 <8 m·s ⁻¹	1	0
③低相对湿度;14:00 相对湿度 <60% 或 日均相对湿度 <80%	1	0
④较长的日照时间;日照时数 ≥4 h	1	0
⑤较高的温度;14:00 气温 ≥25℃ 或 最高气温 ≥25℃ 或 700 hPa(08:00) 气温 ≥6℃ 或 925 hPa(08:00) 气温 ≥15℃	1	0
累积指标值 (HOPI)	0 ~ 5	

1) “1”表示满足条件,“0”表示不满足条件

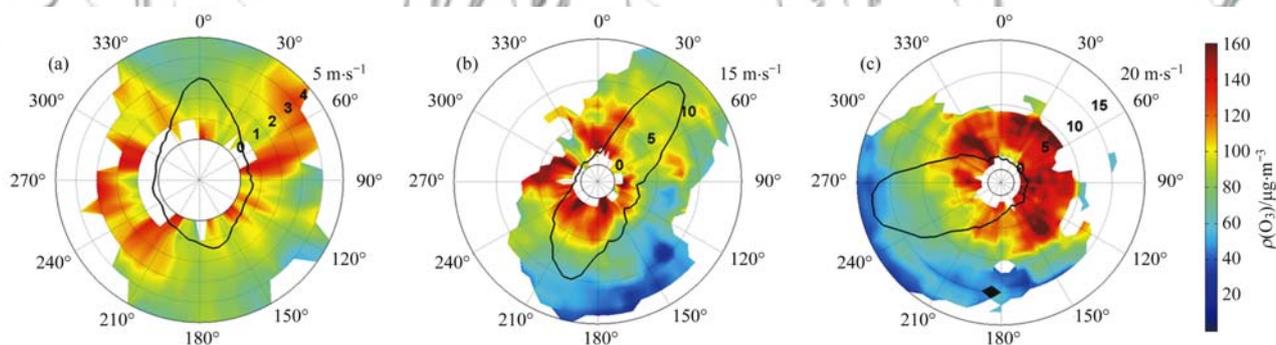
HOPI 综合考虑了水平扩散条件(小风速)和局地光化学反应和 O₃ 生成条件(晴间少云、低相对湿度、较长的日照时间和较高的温度),取值范围为 0 ~ 5. HOPI 值越大,表明出现高浓度 O₃ 污染事件的可能性也越大;值越小,表明出现高浓度 O₃ 污染事件的可能性也越小.

2.3 风向指数(WDI)

2.3.1 O₃ 浓度与风向风速的关系

风作为大气中最有效的扩散机制,2.1.2 节中已给出了不同高度和层次风速对近地面 O₃ 浓度的影响,但研究发现,除了风速的扩散对污染物的影响外,风向对 O₃ 浓度也有重要影响.图 5 给出了地面 14:00、925 hPa(08:00)和 700 hPa(08:00) O₃-8h 浓

度风玫瑰图.图 5(a)可知,佛山 14:00 地面主导风向以偏南风为主,其次为偏北风,偏东和偏西风频率较低.当近地面风速处于低风速时(<2 m·s⁻¹),水平扩散条件差,O₃ 浓度较高,特别是在偏东和西北、西南风向时.当风向为东北风向时,即使风速达 4 ~ 5 m·s⁻¹,O₃ 浓度仍处于高值,说明除了局地生成外,区域间的污染物输送也对 O₃ 浓度的增加有重要作用.对 925 hPa 而言[图 5(b)],以东北和西南风为主导,除东北方向外,其余方向在 5 m·s⁻¹ 风速范围内,O₃ 浓度均较高;对 700 hPa 而言[图 5(c)],以西南偏西风为主导,O₃ 浓度在风速低于 10 m·s⁻¹ 范围内,除西南方向外,其余方向均为高值范围.



(a) 14:00 地面风向风速, (b) 925 hPa(08:00) 风向风速, (c) 700 hPa(08:00) 风向风速; 黑色实线表示风频, 半径表示风速, 角度表示风向

图 5 不同高度 O₃-8h 浓度风玫瑰图

Fig. 5 Wind rose plots of O₃-8h concentration at different heights

图 6 统计了从地面到中低层(700 hPa 和 925 hPa)全年出现不同风向(16 个方位)所对应的 O₃-8h 浓度. 14:00 地面风来看,当地面风向为东北东、西南和西北西方向时,ρ(O₃-8h)平均值较高,3 个风向对应的平均值分别为 121.8、114.5 和 128.7 μg·m⁻³,当地面风向为偏北风时,ρ(O₃-8h)最低,仅为 78.8 μg·m⁻³. 从整个风向变化来看,当 14:00 地面风场为偏北和东南方向时,O₃-8h 浓度较低;当风向为东北东和西北西时,浓度较高,这与风玫瑰的结论相一致[图 5(a)]. 从 925 hPa(08:00)风向来看,当风向为北北西和偏北方向时,ρ(O₃-8h)平均

值较高(139.0 μg·m⁻³和 116.4 μg·m⁻³),这可能是由于 925 hPa 为偏北风向时,时有台风外围天气形势发生,臭氧浓度较高;随着风向逐渐由偏北顺转为偏东至偏南,O₃-8h 浓度平均值逐渐降低,当风向为偏南到风时,O₃-8h 浓度稍有增大,而后随着风向继续顺转,浓度再次降低,当风向由偏西风逐渐转为偏北风时,O₃-8h 浓度平均值快速增加. 700 hPa(08:00)不同风向对应的 O₃-8h 浓度平均值变化趋势与 925 hPa 大致呈相反态势,当 925 hPa(08:00)风向为东南风和偏南风时,O₃-8h 平均浓度较低,当风向为偏西风 and 偏北风时,O₃-8h 浓度平均值较高,

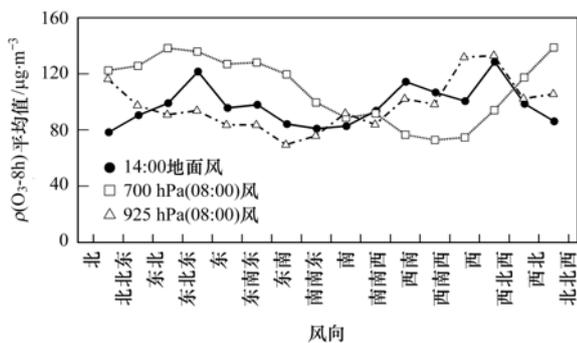


图 6 O₃-8h 浓度与 14:00 地面风向、925 hPa 和 700 hPa(08:00) 风向的关系

Fig. 6 Variations in average O₃-8h concentrations in different directions of surface wind at 14:00 and wind directions of 925 hPa and 700 hPa at 08:00

最高 $\rho(O_3-8h)$ 平均值 ($133.1 \mu g \cdot m^{-3}$) 出现在西北西风向。

2.3.2 风向指数(WDI)的建立

为进一步定量表征不同风向对于佛山 O₃-8h 浓度的影响,根据上述分析,定义风向影响指数(wind direction index, WDI),即利用分段线性拟合方法寻

找地面 O₃-8h 浓度与不同高度风向的定量关系,线性拟合结果如图 7 所示。

14:00 地面风向的风向影响指数计算公式如下:

$$WDI_{14} = 0.63488 \times WD + 76.98300 \quad (0^\circ \leq WD < 67.5^\circ)$$

$$WDI_{14} = -0.401930 \times WD + 141.44000 \quad (67.5^\circ \leq WD < 157.5^\circ)$$

$$WDI_{14} = 0.30538 \times WD + 32.59100 \quad (157.5^\circ \leq WD < 292.5^\circ)$$

$$WDI_{14} = -0.85199 \times WD + 375.09000 \quad (292.5^\circ \leq WD < 360^\circ)$$

925 hPa 风向(08:00)的风向影响指数计算公式如下:

$$WDI_{925} = -0.30593 \times WD + 112.48000 \quad (0^\circ \leq WD < 135^\circ)$$

$$WDI_{925} = 0.20341 \times WD + 50.44400 \quad (135^\circ \leq WD < 360^\circ)$$

700 hPa 风向(08:00)的风向影响指数计算公

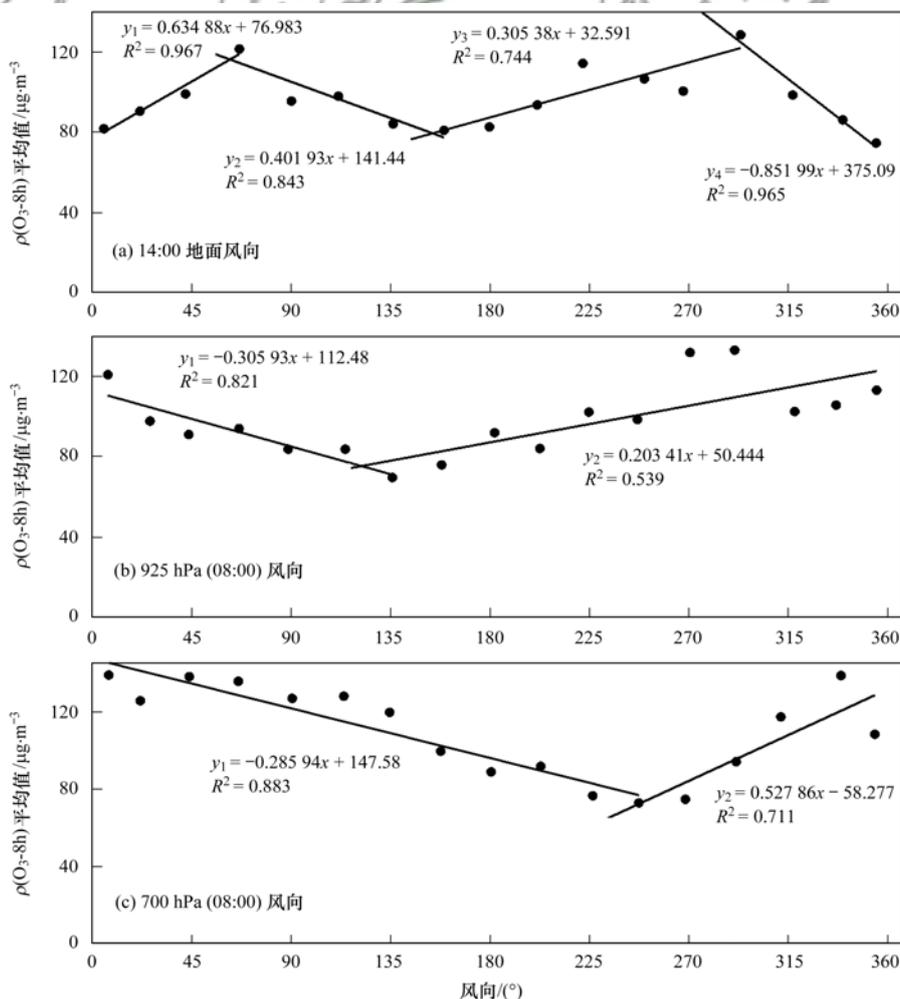


图 7 O₃-8h 浓度与 14:00 地面风向、925 hPa 和 700 hPa(08:00) 风向的分段线性拟合

Fig. 7 Sectional linear fitting of O₃-8h concentration with surface wind direction at 14:00, 925 hPa, and 700 hPa wind direction at 08:00

式如下:

$$\text{WDI}_{700} = -0.28594 \times \text{WD} + 147.58000$$

$$(0^\circ \leq \text{WD} < 247.5^\circ)$$

$$\text{WDI}_{700} = 0.52786 \times \text{WD} - 58.27700$$

$$(247.5^\circ \leq \text{WD} < 360^\circ)$$

式中,WD 表示风向度数($^\circ$),正北为 0 或 360° ,正东为 90° ,正南为 180° ,正西为 270° ,如此顺时针旋转; WDI_{14} 、 WDI_{925} 和 WDI_{700} 分别表示 14:00 地面、925 hPa 和 700 hPa(08:00)的风向影响指数。

由图 7 可知,不同高度风向对 O_3 -8h 浓度的线性拟合来看,14:00 地面风向偏北风(包括西北-偏北-东北方向)的拟合效果(R^2 为 0.967 和 0.965)要优于其他方向,偏东-东南方向拟合效果次之($R^2 = 0.843$),西南-偏西方向拟合效果最差($R^2 = 0.744$);925 hPa(08:00)风向偏东方向(包括东北-偏东-东南方向)的拟合效果($R^2 = 0.821$)优于偏南到偏西方向(包括偏南-西南-偏西-西北方向)($R^2 = 0.539$);700 hPa(08:00)风向来看,偏东和偏南方向(包括东北-偏东-东南-偏南-西南方向)的拟合效果($R^2 = 0.883$)要好于偏西到西北方向($R^2 = 0.711$)。

2.4 O_3 浓度预报方程的建立与应用

2.4.1 佛山 O_3 浓度预报方程的建立

为综合了解各项气象因子与 O_3 浓度的定量关系,采用多指标叠套的方法,运用多元逐步回归方程,以 O_3 -8h 浓度为因变量,引入的自变量包括:佛山地区高浓度臭氧潜势指数 HOPI、不同高度风向影响指数 WDI(WDI_{14} 、 WDI_{925} 、 WDI_{700})、14:00 地面气象要素(云量 LCC_{14} 、总云量 TCC_{14} 、气温 T_{14} 、相对湿度 RH_{14})、700 hPa 气象要素(08:00)(气温 T_{700} 、风速 WS_{700})、925 hPa 气象要素(08:00)(气温 T_{925} 、风速 WS_{925})、日照时数 RZSS、日最高气温 T_{\max} 、日平均相对湿度 RH_{avg} 、日雨量 Pre_d 和 14:00~20:00 累积降雨量 Pre_{6h} 等 17 种气象要素,得到

佛山地区 O_3 -8h 浓度预报方程如下:

$$(\text{O}_3\text{-8h}) = 23.175 + 5.314 \times \text{HOPI} - 0.953 \times \text{RH}_{14} -$$

$$2.640 \times \text{WS}_{925} + 0.489 \times \text{WDI}_{700} -$$

$$2.299 \times \text{TCC}_{14} + 2.238 \times \text{LCC}_{14} + 5.730 \times$$

$$T_{\max} - 3.241 \times T_{925} - 0.751 \times \text{WS}_{700}$$

$$(N=979, R^2=0.656, \alpha < 0.001)$$

式中, (O_3 -8h) 为臭氧日最大 8 h 平均浓度,HOPI 为佛山高浓度臭氧潜势指数(取值范围为 0~5), RH_{14} 为 14:00 相对湿度, WS_{925} 为 925 hPa(08:00)风速, WDI_{700} 为 700 hPa(08:00)风向影响指数, WS_{700} 为 700 hPa(08:00)风速, TCC_{14} 为 14:00 总云量, LCC_{14} 为 14:00 低云量, T_{\max} 为日最高气温, T_{925} 为 925 hPa(08:00)气温。

2.4.2 佛山 O_3 浓度预报方程的应用与检验

为检验预报方程的可用性,本研究将没有参与回归分析的 2018 年 1 月 1 日~12 月 31 日相关实况资料进行拟合检验,结果如图 8。从时间序列来看[图 8(a)], O_3 浓度预报曲线基本能反映逐日 O_3 -8h 浓度变化情况,其中冬季(1~2 月、12 月)、春季(3~5 月)和秋季(9~11 月)模拟值与实测值基本保持一致,部分时段近乎重合,说明预报方程的可预报性很好;夏季(6~8 月)模拟值与实测值差异较大,时有低估和高估出现,低估主要出现在 O_3 -8h 浓度突增时段,对峰值的预报偏低,高估主要出现夏季天气温度较高时段,方程中贡献较大的两项 HOPI 和 T_{\max} 均处于高位(3~5 和 $31.5 \sim 35.4^\circ\text{C}$),从而造成臭氧浓度的偏高。

为进一步反映预报方程与观测实况的相关性大小,图 8(b)给出了模拟与实测 O_3 -8h 浓度的散点图。模拟值与实测值二者的相关系数 R 可达 0.82, 远超 0.01 的置信水平,且离散点主要集中在 1:1 线附近,拟合系数为 0.97,也说明了实测值与模拟值的一致性,可见,本研究基于多指标叠套方法所建立的 O_3 浓度预报方程具有一定的预报意义,对于实际

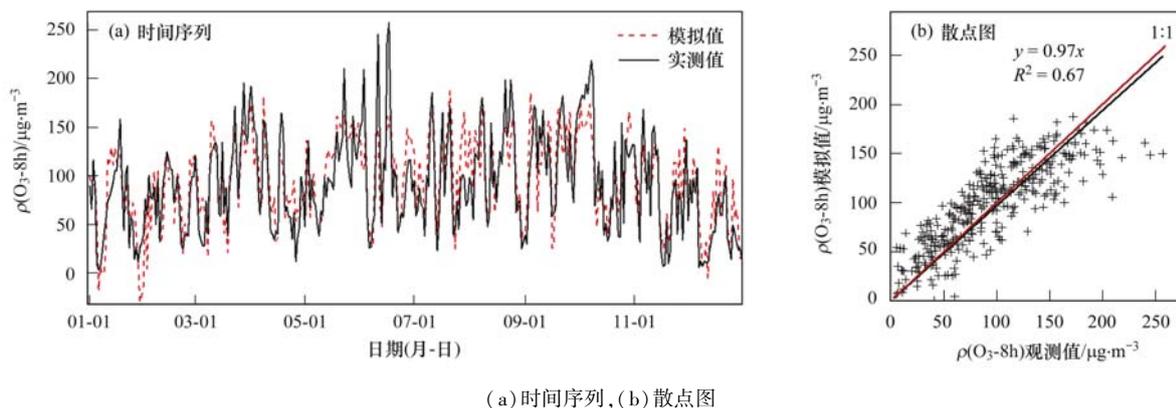


图 8 2018 年 1 月 1 日~12 月 31 日逐日 O_3 -8h 浓度实况值与模拟值时间序列和散点图

Fig. 8 Time series and scatter plot of observed O_3 -8h concentration and fitted concentration from January 1st to December 31st, 2018

业务应用不失为一种简单、快速的预报方法。但对于部分严重超标的极值预报,该预报方程明显存在低估,后续需进一步改进。另外,值得注意的是,文中方程的检验采用的气象要素的实况,后续业务应用时需使用模式气象要素的预报,可能会对预报结果产生影响。

3 结论

(1) 近地面 O_3 的变化与高低层气象要素关系密切,气温和日照时数等气象要素与 O_3 浓度呈显著正相关,相对湿度、总(低)云量和风速等与其呈负相关; 14:00 气温、相对湿度、气温、低云量和总云量,日照时数、平均风速、日均相对湿度和最高气温, 700 hPa 和 925 hPa(08:00) 气温和风速是佛山地区近地面 O_3 污染的关键气象因子。

(2) 高浓度 O_3 污染发生的气象条件为小风速、晴间少云、低相对湿度、较长的日照时间和较高的温度; 佛山地区高浓度 O_3 潜势指数(HOPI)和风向指数(WDI)的建立可以较好地衡量 O_3 污染气象条件的好坏。

(3) 综合考虑高浓度臭氧潜势指数 HOPI、不同高度风向影响指数 WDI、14:00 地面气象要素、700 hPa 和 925 hPa 气象要素(08:00)、日照时数 RZSS、日最高气温 T_{max} 和日平均相对湿度 RH_{avg} 等 17 种气象要素,采用多指标叠套和多元逐步回归方法建立了佛山地区 O_3 浓度预报方程; 利用 2018 年全年资料检验发现,模拟值与实测值二者的相关系数 R 可达 0.82,拟合系数为 0.97,说明预报方程具有良好的拟合效果和可预报性。

(4) O_3 浓度预报方程夏季(6~8月)偏差较大,且对部分严重超标的极值存在低估,后续需进一步改进。

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] 陆克定, 张远航, 苏杭, 等. 珠江三角洲夏季臭氧区域污染及其控制因素分析[J]. *中国科学: 化学*, 2010, **40**(4): 407-420.
- Lu K D, Zhang Y H, Su H, *et al.* Regional ozone pollution and key controlling factors of photochemical ozone production in Pearl River Delta during summer time[J]. *Scientia Sinica Chimica*, 2010, **40**(4): 407-420.
- [3] 张远航, 郑君瑜, 陈长虹, 等. 中国大气臭氧污染防治蓝皮书(2020年)[R]. 北京: 中国环境科学学会臭氧污染控制专业委员会, 2020.
- [4] 何超, 慕航, 杨璐, 等. 中国暖季近地面臭氧浓度空间格局演变及主要气象驱动因素[J]. *环境科学*, 2021, **42**(9): 4168-4179.
- He C, Mu H, Yang L, *et al.* Spatial variation of surface ozone concentration during the warm season and its meteorological driving factors in China [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(9): 4168-4179.
- [5] 广东省生态环境厅. 2015年广东省环境状况公报[EB/OL]. http://gdee.gd.gov.cn/hjkzgb/content/post_2335528.html, 2016-06-08.
- [6] 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.
- Zhao W, Gao B, Lu Q, *et al.* Ozone pollution trend in the Pearl River Delta region during 2006-2019 [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 97-105.
- [7] Vaidya O C, Howell G D, Leger D A. Evaluation of the distribution of mercury in lakes in nova scotia and newfoundland (Canada) [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2000, **117**(1-4): 353-369.
- [8] Zhang Y N, Xiang Y R, Chan L Y, *et al.* Procuring the regional urbanization and industrialization effect on ozone pollution in Pearl River Delta of Guangdong, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(28): 4898-4906.
- [9] Xie Y, Dai H C, Zhang Y X, *et al.* Comparison of health and economic impacts of $PM_{2.5}$ and ozone pollution in China [J]. *Environment International*, 2019, **130**, doi: 10.1016/j.envint.2019.05.075.
- [10] Carter C A, Cui X M, Ding A J, *et al.* Stage-specific, nonlinear surface ozone damage to rice production in China [J]. *Scientific Reports*, 2017, **7**(1), doi: 10.1038/srep44224.
- [11] Zhang Y H, Hu M, Zhong L J, *et al.* Regional integrated experiments on air quality over Pearl River Delta 2004 (PRIDE-PRD2004): overview [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(25): 6157-6173.
- [12] 黄俊, 廖碧婷, 吴兑, 等. 广州近地面臭氧浓度特征及气象影响分析[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(1): 23-31.
- Huang J, Liao B T, Wu D, *et al.* Guangzhou ground level ozone concentration characteristics and associated meteorological factors [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(1): 23-31.
- [13] 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.
- [14] Cobourn W G, Dolcine L, French M, *et al.* A comparison of nonlinear regression and neural network models for ground-level ozone forecasting [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2000, **50**(11): 1999-2009.
- [15] 李颖若, 韩婷婷, 汪君霞, 等. ARIMA 时间序列分析模型在臭氧浓度中长期预报中的应用[J]. *环境科学*, 2021, **42**(7): 3118-3126.
- Li Y R, Han T T, Wang J X, *et al.* Application of ARIMA model for mid-and long-term forecasting of ozone concentration [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(7): 3118-3126.
- [16] Kolehmainen M, Martikainen H, Ruuskanen J. Neural networks and periodic components used in air quality forecasting [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**(5): 815-825.
- [17] 吴剑斌, 肖林鸿, 晏平仲, 等. 最优化集成方法在城市臭氧数值预报中的应用研究[J]. *中国环境监测*, 2017, **33**(4): 213-220.
- Wu J B, Xiao L H, Yan P Z, *et al.* Application of optimal consensus forecast in urban ozone prediction [J]. *Environmental*

- Monitoring in China, 2017, **33**(4): 213-220.
- [18] 周广强, 耿福海, 许建明, 等. 上海地区臭氧数值预报[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(6): 1601-1609.
Zhou G Q, Geng F H, Xu J M, *et al.* Numerical ozone forecasting over shanghai [J]. China Environmental Science, 2015, **35**(6): 1601-1609.
- [19] 谈建国, 陆国良, 耿福海, 等. 上海夏季近地面臭氧浓度及其相关气象因子的分析和预报[J]. 热带气象学报, 2007, **23**(5): 515-520.
Tan J G, Lu G L, Geng F H, *et al.* Analysis and prediction of surface O₃ concentration and related meteorological factors in summertime in urban area of Shanghai [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2007, **23**(5): 515-520.
- [20] 安俊琳, 王跃思, 孙扬. 气象因素对北京臭氧的影响[J]. 生态环境学报, 2009, **18**(3): 944-951.
An J L, Wang Y S, Sun Y, *et al.* Assessment of ozone variations and meteorological effects in Beijing [J]. Ecology and Environment, 2009, **18**(3): 944-951.
- [21] 苏筱倩, 安俊琳, 张玉欣, 等. 支持向量机回归在臭氧预报中的应用[J]. 环境科学, 2019, **40**(4): 1697-1704.
Su X Q, An J L, Zhang Y X, *et al.* Application of support vector machine regression in ozone forecasting [J]. Environmental Science, 2019, **40**(4): 1697-1704.
- [22] 李昕, 胡非, 浦一芬, 等. 大气边界层湍流相干结构的识别(英文)[J]. 大气科学进展, 2002, **19**(4): 687-698.
Li X, Hu F, Pu Y F, *et al.* Identification of coherent structures of turbulence at the atmospheric surface layer[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2002, **19**(4): 687-698.
- [23] 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.
- [24] Li K W, Chen L H, Ying F, *et al.* Meteorological and chemical impacts on ozone formation: a case study in Hangzhou, China [J]. Atmospheric Research, 2017, **196**: 40-52.
- [25] Pu X, Wang T J, Huang X, *et al.* Enhanced surface ozone during the heat wave of 2013 in Yangtze River Delta region, China[J]. Science of the Total Environment, 2017, **603-604**: 807-816.
- [26] 杨显玉, 吕雅琼, 王禹润, 等. 天气形势对四川盆地区域性臭氧污染的影响[J]. 中国环境科学, 2021, **41**(6): 2526-2539.
Yang X Y, Lü Y Q, Wang Y R, *et al.* Impact of synoptic patterns on regional ozone pollution in Sichuan Basin[J]. China Environmental Science, 2021, **41**(6): 2526-2539.
- [27] 李明华, 甘泉, 曹静, 等. 惠州市臭氧污染特征及其与气象条件关系研究[J]. 热带气象学报, 2019, **35**(3): 324-331.
Li M H, Gan Q, Cao J, *et al.* Characteristics of ozone pollution and its relationship with meteorological conditions in Huizhou [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2019, **35**(3): 324-331.
- [28] 洪莹莹, 陈辰, 保鸿燕, 等. 珠三角西南部春季臭氧来源与敏感性分析[J]. 生态环境学报, 2021, **30**(5): 984-994.
Hong Y Y, Chen C, Bao H Y, *et al.* Sources and sensitivity analysis of ozone in spring over the southwestern part of Pearl River Delta region [J]. Ecology and Environment Sciences, 2021, **30**(5): 984-994.

CONTENTS

Regionalization and Analysis of PM _{2.5} and O ₃ Synergetic Prevention and Control Areas Based on Remote Sensing Data	LI Shen-xin, ZOU Bin, ZHANG Feng-ying, <i>et al.</i> (4293)
Analysis of a Typical Ozone Pollution Process in Guangzhou in Winter	PEI Cheng-lei, XIE Yu-tong, CHEN Xi, <i>et al.</i> (4305)
Establishment and Application of Foshan Ozone Concentration Forecast Equation	CHEN Chen, HONG Ying-ying, TAN Hao-bo, <i>et al.</i> (4316)
Establishment of High-Resolution Emissions Inventory in Wuhan and Its Application in Exploring the Causes of Ozone Pollution	ZHANG Rui-xin, CHU Bo, SHANG Chun-lin, <i>et al.</i> (4327)
Investigating the Pollutants of Marine Shipping Emissions Along the East China Sea by Combining in-situ Measurements and Automatic Identification System QIU Hao, LIU Dan-tong, WU Yang-zhou, <i>et al.</i> (4338)
Chemical Component of Particulate Matters and VOCs Characteristics During Vehicle Brake Processes	MEN Zheng-yu, LIU Du-you, GUO Quan-you, <i>et al.</i> (4348)
Characterization of VOCs Emissions from Caged Broiler House in Winter	CAO Tian-tian, ZHENG Yun-hao, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (4357)
Concentrations and Community Structures of Culturable Bacteria in Aerosols of Household Garbage Stations in Shanghai	LU Bing-jie, ZHANG Xiang, WANG Chuan, <i>et al.</i> (4367)
Inventory and Distribution Characteristics of Anthropogenic Ammonia Emissions in Zhejiang Province from 2008 to 2018	FANG Li-jiang, YANG Yi-qun, YE Guan-qiong (4380)
Roadmap of Coal Control and Carbon Reduction in the Steel Industry Under the Carbon Peak and Neutralization Target	XUE Ying-lan, ZHANG Jing, LIU Yu, <i>et al.</i> (4392)
Carbon Emission Reduction Effect of Spatial Correlation Network Structure Characteristics: From the Perspective of Urban Agglomeration	ZHENG Hang, YE A-zhong (4401)
Pollution and Carbon Reduction Effect of OFDI in China and Its Mechanism	BAI Zi-han, LÜ Lian-hong, ZHAO Ming-xuan, <i>et al.</i> (4408)
Variation Characteristics of Surface Water Quality in China in Recent Years	JI Xiao-yan, HOU Huan-huan, WANG Shan-shan, <i>et al.</i> (4419)
Distribution, Risk, and Influencing Factors of Microplastics in Surface Water of Huangshui River Basin	FAN Meng-yuan, HUANG Yi-mei, ZHANG Hai-xin, <i>et al.</i> (4430)
Hydrochemical and Isotopic Characteristics in the Surface Water of the Fenhe River Basin and Influence Factors	ZHAO Chun-hong, SHEN Hao-yong, WANG Zhi-heng, <i>et al.</i> (4440)
Characteristics and Causes of High-manganese Groundwater in Pearl River Delta During Urbanization	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i> (4449)
Characteristics and Causes of Groundwater Salinization in the Plain Area of the Lower Kashgar River	LU Han, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i> (4459)
Sources and Biogeochemical Processes of Nitrate in the Laolongdong Karst Underground River Basin, Chongqing	WANG Yu-yang, YANG Ping-heng, ZHANG Jie-ru (4470)
Succession Pattern and Consequences of the Dominant Species During Cyanobacterial Bloom and Its Influencing Factors	OUYANG Tian, ZHAO Lu, Ji Lu-lu, <i>et al.</i> (4480)
Structural Characteristics of Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in a Group of Drinking Water Reservoirs by Water Transmission from Modaomen Waterway in Zhuhai	ZHANG Mo-li, WANG En-rui, CHANG Sheng, <i>et al.</i> (4489)
Effects of Nutrients on the Growth of <i>Microcystis aeruginosa</i> and Bacteria in the Phycosphere	LÜ Ping, LI Hui-li, XU Yong, <i>et al.</i> (4502)
Effect of Aging on Adsorption of Tetracycline by Microplastics and the Mechanisms	WANG Lin, WANG Shu-xin, ZENG Xiang-ying, <i>et al.</i> (4511)
Effect of Colloids in Sediment and Soil on Their Sorption Behavior of Chloramphenicol	YAN Cai-xia, LUO Yan-qing, NIE Ming-hua, <i>et al.</i> (4522)
Historical Antibiotic Stress Changed the Effects of Sulfamethoxazole and Trimethoprim on Activated Sludge; ARGs and Potential Hosts ZHANG Zhong-xing, FAN Xiao-yan, LI Xing, <i>et al.</i> (4536)
Spatial Distribution and Sources of Heavy Metals in Soil of a Typical Lead-Zinc Mining Area, Yangshuo	CHEN Meng, PAN Yong-xing, HUANG Yi-xiang, <i>et al.</i> (4545)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Baiyangdian Lake	ZHENG Fei, GUO Xin, TANG Ming-yang, <i>et al.</i> (4556)
Spatial Differentiation and Influencing Factor Analysis of Soil Heavy Metal Content at Town Level Based on Geographic Detector	GONG Cang, WANG Liang, WANG Shun-xiang, <i>et al.</i> (4566)
Heavy Metal Emissions from Coal-fired Power Plants and Heavy Metal Pollution Characteristics and Health Risks in Surrounding Soils CHE Kai, CHEN Chong-ming, ZHENG Qing-yu, <i>et al.</i> (4578)
Enrichment Factors, Health Risk, and Source Identification of Heavy Metals in Agricultural Soils in Semi-arid Region of Hainan Island YANG Jian-zhou, GONG Jing-jing, WANG Zhen-liang, <i>et al.</i> (4590)
Speciation and Pollution Assessment of Heavy Metals in Mangrove Surface Sediments in Jiulong River Estuary	ZHANG Hua-lan, YU Rui-lian, WAN Rui-an, <i>et al.</i> (4601)
Status of Heavy Metal in Organic Fertilizers in Main Tea Growing Regions of China	YI Xiao-yun, FANG Li, YANG Xiang-de, <i>et al.</i> (4613)
Accumulation Characteristics and Sources of PAEs in Agricultural Soils in Gansu Province	CHEN Yu-yu, ZHANG Guang-quan, ZHANG Yang, <i>et al.</i> (4622)
Distribution Characteristics of Soil Phosphorus Forms and Phosphatase Activity at Different Altitudes in the Soil of Water-Level-Fluctuation Zone in Pengxi River, Three Gorges Reservoir GAO Yi-lun, FANG Fang, TANG Zi-chao, <i>et al.</i> (4630)
Characteristics of Soil Organic Carbon Components and Their Correlation with Other Soil Physical and Chemical Factors in Cotton Fields with Different Continuous Cropping Years in the Oasis on the Northern Edge of Tarim Basin	LI Xin-zhu, GONG Lu, TANG Jun-hu, <i>et al.</i> (4639)
Response of Soil Respiration Rates to Soil Temperature and Moisture at Different Soil Depths of <i>Caragana korshinskii</i> Plantation in the Loess-Hilly Region SUN Ya-rong, WANG Ya-juan, ZHAO Min, <i>et al.</i> (4648)
Influence of Biochar Application on Soil Nitrate Leaching and Phosphate Retention: A Synthetic Meta-analysis	JIANG Zhi-xiang, CUI Shuang, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (4658)
Role and Mechanism of Low Molecular-Weight-Organic Acids in Enhanced Phytoremediation of Heavy Metal Contaminated Soil	FANG Zhi-guo, XIE Jun-ting, YANG Qing, <i>et al.</i> (4669)
Remediation Effect and Mechanism of Inorganic Passivators on Cadmium Contaminated Acidic Paddy Soil	ZHANG Jian, KONG Fan-yi, LU Sheng-gao (4679)
Mechanism of Lead-zinc Enrichment and Resistance of Spent Mushroom Compost to Lead-Zinc Slag in <i>Koeleruteria paniculata</i>	XIE Tian-zhi, CHEN Yong-hua, SU Rong-kui, <i>et al.</i> (4687)
Phosphorus Enrichment Efficiency of CaO ₂ @FA Composites and the Effect of Its Recovered Material on Soil Improvement	YUE Wei, LI Da-peng, WU Ling-yu, <i>et al.</i> (4697)
Effects of Early Rice Straw Returning with Reducing Potassium Fertilizer on Late Rice Yield and Soil Fertility	HUANG Qiao-yi, HUANG Jian-feng, HUANG Xu, <i>et al.</i> (4706)
Effects of Continuous Straw Returning with Chemical Fertilizer on the Carbon Pool and Crop Yield of Rice-Rape Rotation Soils	CAI Ying, FU Si-wei, ZHANG Bo-rui, <i>et al.</i> (4716)
Effects of Chemical Fertilizer Reduction Combined with Straw Application on Diazotrophic Communities in a Double Rice Cropping System CHEN Kai-peng, WEI Ju-xian, CHEN Dan, <i>et al.</i> (4725)
Impacts of Co-application of Chemical Fertilizer Reduction and Organic Material Amendment on Fluvo-aquic Soil Microbial N-cycling Functional Gene Abundances and N-converting Genetic Potentials in Northern China	LI Sheng-jun, HU He, LI Gang, <i>et al.</i> (4735)
Response Characteristics of Soil Microbial Community Under Long-term Film Mulching	HU Zhi-e, XIAO Mou-liang, DING Ji-na, <i>et al.</i> (4745)
Effects of Long-term Straw Returning on Fungal Community, Enzyme Activity and Wheat Yield in Fluvo-aquic Soil	MA Lei, LI Yan, WEI Jian-lin, <i>et al.</i> (4755)
Effects of Soil Amendments on the Bacterial Diversity and Abundances of Pathogens and Antibiotic Resistance Genes in Rhizosphere Soil Under Drip Irrigation with Reclaimed Water CUI Bing-jian, CUI Er-ping, LIU Chun-cheng, <i>et al.</i> (4765)
Effect of Nitrogen on the Phytoremediation of Cd-PAHs Co-contaminated Dumpsite Soil by Alfalfa (<i>Medicago sativa</i> L.) and on the Soil Bacterial Community Structure LI Yi-jia, MA Jun-wei, LI Yu-qian, <i>et al.</i> (4779)
Effect of Antibiotic-Degrading Bacteria on Maturity and Bacterial Community Succession During Pig Manure Composting	LI Wei-lin, ZHANG Xin, MA Jun-wei, <i>et al.</i> (4789)