

目次

疫情期间人为源减排对城市大气氧化性的影响	朱剑蓝, 秦墨梅, 朱嫣红, 胡建林 (617)
不同天气形势对南京地区双高污染的输送及潜在源区分析	秦阳, 胡建林, 孔海江 (626)
不同方法判定南京臭氧生成敏感区的差异	陈柑羽, 李勋, 李琳, 秦墨梅, 谢鸣捷, 王鸣, 李婧祺, 胡建林 (635)
2006~2021 年夏半年上海臭氧浓度特征及其大气环流背景分析	郑庆峰, 梁萍, 段玉森, 林燕芬, 张宋嘉, 徐卫忠 (645)
基于大气成分观测网的山西省近地面 O ₃ 体积分数分布特征	李莹, 王淑敏, 裴坤宁, 闫世明, 孙鸿博, 张逢生, 高兴艾 (655)
伊宁市夏季大气臭氧生成机制及减排策略	王文婷, 谷超, 李丽明, 李新琪, 郑镇森, 耿春梅, 王晓丽, 杨文 (668)
运城市四季 VOCs 特征、来源及臭氧形成敏感物种	阴世杰, 刘新翌, 刘亚非, 李晨露, 张晨, 张欢, 王正, 程强 (678)
郑州市秋冬季污染过程中大气 VOCs 污染特征、来源解析及活性分析	赖梦洁, 张栋, 于世杰, 宋鑫帅, 李晓, 张瑞芹 (689)
郑州市 PM _{2.5} 中有机关的污染特征、来源解析及二次生成	李子涵, 董喆, 尚瑞琪, 孔梓涵, 李晓, 张瑞芹 (700)
中国三大城市群 PM _{2.5} 浓度非线性变化分析	吴舒祺, 顾杨旸, 张天岳, 赵文吉 (709)
基于 LEAP 模型的临港新片区中长期碳排放预测及减排潜力分析	吴琼, 马昊, 任洪波, 郭明星, 陈鹏, 李琦芬 (721)
碳交易背景下中国华北地区碳代谢格局变化	郑宏媚, 沈方, 许光耀, 关欣 (732)
考虑区域特点和车型差异的氢燃料电池汽车全生命周期减碳预测分析	马菁, 蔡旭, 张春梅, 兰利波, 陈轶嵩, 付佩 (744)
我国主要河流水系硝态氮污染特征及定量源解析	韦英怀, 胡敏鹏, 陈丁江 (755)
不同时空尺度下土地利用结构与空间格局对苏州水质的影响	谭娟, 熊丽君, 王卿, 任志文, 朱丹丹, 王敏 (768)
深圳市 2015~2021 年雨源型河流水质时空变化及其对降雨的响应	韦必颖, 成建梅, 苏晓煜, 程天舜 (780)
河南黄河改道区浅层地下水化学特征与主控污染源解析	王帅, 任宇, 郭红, 曹文庚, 李祥志, 肖舜禹 (792)
北京西山岩溶地下水化学特征及成因分析	郭高轩, 代垠东, 许亮, 朱琳, 欧志亮, 戚琦, 辛宝东 (802)
店埠河流域地表水-地下水水化学特征及其成因分析	郑涛, 秦先燕, 吴剑雄 (813)
张家口地区枯水期地下水水化学特征及其成因机制分析	金爱芳, 殷秀兰, 李长青, 李文娟, 庞菊梅, 金晓媚 (826)
黄河中下游典型抗性细菌及抗性基因污染分布	闵威, 高明昌, 孙绍芳, 宋茜茜, 邱立平 (837)
制药废水中抗生素抗性的污染特征、检测手段和控制方法	彭安萍, 高虎, 张新波 (844)
水体组分对聚苯乙烯纳米颗粒聚沉行为的影响	汤端阳, 郑文丽, 陈关潼一, 陈思莉, 陈尧, 赵晓丽, 汪浩 (854)
富磷废弃钙基生物炭对水体中铅的去除	刘天, 吕思璐, 杜兴国, 程敏, 谢燕华 (862)
壳聚糖改性生物炭的制备及其对水溶液中 Cd ²⁺ 的吸附机制	姜凌, 安靖玥, 岳小琼, 李亚雄, 夏秋乐, 祝婷文佳, 柴丽红 (873)
硼掺杂介孔炭吸附四环素的效能与机制	邹震, 许路, 乔伟, 唐茂森, 金鹏康 (885)
磁性含磷油茶壳生物炭对水中磺胺甲噁唑的吸附特性	韩帅鹏, 唐李文, 刘勤, 林家亮, 李晓慢, 程建华, 胡勇有 (898)
广东省高分辨率温室气体排放清单及特征	卢清, 唐明双, 廖彤, 黄志炯, 钟庄敏, 宋佩珊, 沈劲, 张智胜, 梁小明, 孙家仁, 陈来国 (909)
辽河口“退塘还湿”修复区生态系统 CO ₂ 交换及其环境调控	刘思琪, 陈虹, 邢庆会, 程浩, 韩建波, 徐雪梅 (920)
生物炭施用两年后对热带地区稻菜轮作土壤 N ₂ O 和 CH ₄ 排放的影响	胡煜杰, 唐瑞杰, 胡天怡, 陈琦琦, 汤水荣, 阮延正, 孟磊 (929)
生物炭改良盐碱地研究与应用进展	魏盈, 焦乐, 张鹏, 刘福德, 肖辉, 董昱辰, 代红文 (940)
免耕对农田土壤团聚体的影响研究: Meta 分析	徐艺萍, 饶越悦, 孟艳, 温媛, 孟维伟, 王旭清, 李宗新, 刘开昌, 代红翠 (952)
黔中喀斯特地区典型县域碳储量时空演变及多情景模拟预测: 以普定县为例	李月, 罗红芬 (961)
不同改良剂对酸性紫色土团聚体和有机碳的影响	李越, 徐曼, 谢永红, 王颖, 黄容, 谢军, 王子芳, 高明 (974)
Ca 改性生物炭对土壤磷赋存形态影响及稳定化机制	张超, 翟付杰, 单保庆 (983)
秦岭中段不同恢复阶段弃耕农田植物多样性变化及其驱动因素	闫成龙, 薛悦, 王艺菲, 康海斌, 王得祥 (992)
我国典型制药厂污染场地中抗生素的污染特征及生态风险	杨炳彬, 黄争, 赵建亮, 何良英, 刘有胜, 胡立新, 石义静, 应光国 (1004)
广州市土壤多环芳烃污染特征及风险评估	邹子航, 陈莲, 张培珍, 王雨茜, 王振江, 林森, 唐翠明, 罗国庆, 钟建武, 李智毅, 王圆 (1015)
基于源导向的土壤重金属风险评价及管控因子分析	潘泳兴, 陈盟, 王樯樯 (1026)
基于 Monte-Carlo 模拟的湖南省典型工厂周边农田土壤重金属区域潜在生态风险特征及来源解析	罗豪杰, 潘俊, 陈小霞, 张敏, 沈良辰, 李歆, 丁平, 蔡丹, 蔡立梅, 胡国成 (1038)
基于参数优化和蒙特卡罗模拟的砷污染地块健康风险评估	袁贝, 刘虎鹏, 杜平, 陈娟, 张云慧, 张昊 (1049)
基于 APCS-MLR 和 PMF 模型的赤泥堆场周边耕地土壤重金属污染源解析	沈智杰, 李杰芹, 李彩霞, 廖泽源, 梅楠, 罗程钟, 王定勇, 张成 (1058)
PE-Cd 复合污染土壤中 Cd 释放迁移特征及机制	王迪, 徐绍辉, 耶明艳, 林青 (1069)
氯代乙烯的厌氧微生物还原脱氯特性	李伟, 刘贵平, 刘峻, 吕良华, 乔文静, 余欣, 张晓旻, 蒋建东 (1080)
昭通市农田土壤和蔬菜重金属污染评价及相关性分析	张好, 董春雨, 杨海婵, 孙思静, 韩宇, 黄祖志, 张乃明, 包立 (1090)
钝化剂对轻中度镉污染农田的安全利用效果	王晓晶, 张东明, 曹阳, 吕家琰, 代允超 (1098)
氧化石墨烯负载铁锰复合材料对镉污染土壤的钝化修复	袁婧, 吴骥子, 连斌, 袁峰, 孙洪, 田欣, 赵科理 (1107)
关键生育期施加外源灌溉水对水稻镉吸收转运的影响	周霞, 胡雨丹, 周航, 陈琼, 谭文韬, 曾鹏, 辜娇峰, 廖柏寒 (1118)
外源锌对镉胁迫下玉米幼苗生长及根系构型分级的影响	张辉红, 魏畅, 柳海涛, 张静静, 刘芳, 赵颖, 张雪海, 李鸽子, 姜瑛 (1128)
稀土元素铈对镉胁迫下小麦幼苗生长的缓解效应	张静静, 徐正阳, 焦秋娟, 范丽娜, 刘芳, 赵颖, 宋佳, 化党领, 李鸽子, 柳海涛 (1141)
根施伯克氏菌对小麦镉吸收转运的两段式阻控作用	郭佳佳, 王常荣, 刘仲齐, 黄青青, 张长波, 黄永春, 薛卫杰, 孙约兵 (1150)
高密度聚乙烯微塑料与氯噻磺隆对大豆生长和根际细菌群落的复合胁迫效应	胡晓玥, 滑紫微, 姚伦广, 杜丽, 牛秋红, 李玉英, 闫路, 陈兆进, 张浩 (1161)
微塑料的人体富集及毒性机制研究进展	包亚博, 王成尘, 彭吾光, 依代倩, 向萍 (1173)
机器学习在微塑料识别与环境风险评估中的应用研究进展	白润昊, 范瑞琪, 刘琪, 刘勤, 严昌荣, 崔吉晓, 何文清 (1185)
微塑料与农田土壤中典型污染物的复合污染研究进展	侯宇晴, 李冰, 王金花, 宋文慧, 王兰君, 王军, 朱鲁生 (1196)
水中微/纳塑料电化学检测及去除的研究进展	郑伟康, 刘振中, 项晓方 (1210)
基于分布式认知理论的农户面源污染治理支付意愿影响因素	郭晨浩, 李林霏, 夏显力 (1222)

2006~2021年夏半年上海臭氧浓度特征及其大气环流背景分析

郑庆锋¹, 梁萍¹, 段玉森², 林燕芬², 张宋嘉³, 徐卫忠¹

(1. 上海市气候中心上海城市气候变化应对重点开放实验室, 上海 200030; 2. 上海市环境监测中心, 上海 200233; 3. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要: 基于上海地区2006~2021年逐日臭氧浓度数据以及同期气象要素和美国环境预报中心/国家大气研究中心(NCEP/NCER)再分析数据, 分析了2006~2021年上海地区臭氧浓度变化特征和气候背景, 进一步对比分析臭氧浓度异常年份的高空大气环流形势差异, 并加入关键气象影响因子建立臭氧浓度月预报模型。结果表明, 上海地区全年和夏半年臭氧浓度的平均值均呈现波动式上升趋势, 且夏半年臭氧浓度和风速呈显著负相关(相关系数达-0.826), 与静风出现频率以及低云量<20%出现日数呈显著正相关(相关系数分别为0.836和0.724)。当夏半年西太平洋副热带高压强度偏强且位置偏西偏南时, 上海易受偏西风异常环流影响, 不利于海上洁净空气向上海输送, 易引起高浓度臭氧污染。当夏半年地面射出长波辐射偏低时, 有利于地面升温, 易引起高浓度臭氧污染。加入太阳直接辐射、最高气温和风速作为外生变量的臭氧月预报模型对月预报效果提升明显, 均方根误差减少47.7%, 相关系数提升11.2%。

关键词: 臭氧(O₃); 气候背景; 大气环流; 预测; 上海

中图分类号: X515 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)02-0645-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202302043

Characteristics of Ozone Concentration in Shanghai and Its Associated Atmospheric Circulation Background During Summer Half-years from 2006 to 2021

ZHENG Qing-feng¹, LIANG Ping¹, DUAN Yu-sen², LIN Yan-fen², ZHANG Song-jia³, XU Wei-zhong¹

(1. Key Laboratory of Cities Mitigation and Adaptation to Climate Change in Shanghai, Shanghai Climate Center, Shanghai 200030, China; 2. Shanghai Environmental Monitoring Center, Shanghai 200233, China; 3. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: It is of great importance to scientifically evaluate the impact of weather and climate conditions on the occurrence of O₃ pollution in order to improve the accuracy of O₃ pollution forecasts, as well as to reasonably control and reduce the adverse effects of O₃ pollution. The characteristics of O₃ concentration and climate background were analyzed based on daily O₃ concentration data, meteorological factors, and NCEP/NCER reanalysis data from 2006 to 2021 in Shanghai. In addition, the differences in atmospheric circulation situations during years with anomalous O₃ concentrations were compared and diagnosed from the perspective of climatology. Additionally, the monthly O₃ concentration prediction model (seasonal autoregressive integrated moving average with exogenous regressors, SARIMAX) was further established by adding the key meteorological factors. The results indicated that both the whole-year average and summer half-year average O₃ concentrations in Shanghai were increasing with fluctuation, and the summer half-year average was much higher than the annual average, up to 36.2%. Furthermore, there was a significant negative correlation between O₃ concentration and wind speed (correlation coefficient of -0.826) and a significant positive correlation with the frequency of static wind and the number of days in which the low cloud cover was less than 20% (correlation coefficients of 0.836 and 0.724, respectively). The monthly mean O₃ concentration had a clear periodicity, showing a pattern with a high concentration in the middle period (April to September) and a low concentration at the beginning and end of the periods. High O₃ concentration years (2013-2021) were accompanied by more polluted days, lower average wind speed, more small wind ($\leq 1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) days, more days of low cloud cover of less than 20%, more days of high temperature, higher direct solar radiation, and more sunshine hours. When the location of the stronger West Pacific subtropical high was westward and southward in the summer half-year, Shanghai was influenced by an anomalous westerly wind, which was not conducive to the transportation of clean air from the sea to Shanghai and thus led to the high concentration of O₃ pollution. When the long wave radiation emitted from the ground was low in the summer half-year, it was favorable for the increase in ground temperature and caused a high concentration of O₃ pollution. Adding direct solar radiation, maximum temperature, and wind speed as exogenous variables to the monthly O₃ forecast model could significantly improve the effectiveness of the monthly forecast, with the root mean square error decreasing by 47.7% (from 22 to 11.5) and the correlation coefficient increasing by 11.2% (from 0.819 to 0.911), which could be applied to the practical prediction of monthly O₃ concentration.

Key words: ozone(O₃); climatic background; atmospheric circulation; forecast; Shanghai

伴随着城市化快速发展,我国城市环境污染问题日益严重,特别是大气环境污染,与极端高温、城市热岛效应叠加对城市居民生产、生活以及人体健康造成很大的影响^[1~4]。大气污染呈现出从以往单一煤烟型污染向复合型污染转变、局地性向区域性拓展的态势。以细粒子(PM_{2.5})和臭氧(O₃)污染为主要特征的区域性和复合型大气污染问题日趋凸显,特别是京津冀^[5]、长三角^[6]、珠三角^[7]和四川盆地^[8]等

城市群已成为我国区域性大气复合污染最严重的四大区域。近年来全国各地的地表臭氧浓度持续增长^[9],多个城市(北京、上海、广州和成都)的近地面

收稿日期: 2023-02-07; 修订日期: 2023-04-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(42175056);上海市自然科学基金项目(21ZR1457600);中国气象局上海城市气候变化应对重点开放实验室开放基金项目

作者简介: 郑庆锋(1978-),男,硕士研究生,高级工程师,主要研究方向为大气环境污染与气象关系,E-mail: zqf_23@126.com

O₃浓度的总体或季节变化呈现显著的上升趋势^[10].

随着人们对臭氧重视程度的不断提高,围绕臭氧污染特征^[11~15]、成因分析^[16~20]以及和气象要素的关系研究^[21~25]和相关成果也日益增多. 也有研究从天气角度(针对臭氧日污染情况)分析了上海、武汉、四川和银川等地的臭氧相联系的环流分型及定量影响^[26~29],均表明大气环流形势对臭氧污染具有重要的贡献. 另有研究者对臭氧预报方法和预报模型进行了研究,主要包括数值模式和统计方法. 其中,数值模式包括 WRF/CAMx^[30]和 WRF-Chem^[31]模式等. 统计方法以 ARIMA 时间序列分析模型^[32]为代表,对 3~15 d 的臭氧浓度预报效果较为理想. 数值模式对基础数据、硬件平台和专业门槛等要求苛刻,模拟速度缓慢. 而 ARIMA 模型简单,可以根据有限的数据集建立精确的模型对其进行快速预测,已广泛用于环境^[33]、医学^[34]、交通^[35]和能源^[36]等领域的预测,均取得较好的效果. 近年来,支持向量机回归和 XGBoost 等机器学习方法也逐渐被应用于臭氧天气预报^[37]和浓度估算^[38]. 上述方法均取得一定效果,在预报应用中发挥了作用.

然而,现有研究大多是针对 O₃ 的一次污染过程^[17,18]或较短时间序列污染过程^[39],建立的预报模型也多集中于月预报和 15 d 以内的中短期预报. 虽有长时间序列 O₃ 污染趋势研究^[7]和变化特征研究^[40],但利用较长时间序列的 O₃ 浓度和气象数据,从气候形势角度对 O₃ 污染的气候背景进行研究鲜见报道.

鉴于此,本文利用 2006~2021 年上海 O₃ 浓度日数据(选取日最大 8h 滑动平均值),以及同期地面观测的气象资料和高空大气环流数据,着眼于气候角度分析夏半年上海 O₃ 浓度异常情况相联系的大气环流背景,并加入气象因子作为外生变量,利用网格搜索法寻找最优模型,研究对 ARIMA 模型应用于 O₃ 浓度月预报的提升效果,以期科学评价天气气候条件变化对 O₃ 污染发生的影响、提高污染性天气预报的准确率和合理控制、减少大气污染的危害提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 数据资料

本文 O₃ 浓度数据来自上海市环境监测中心提供的普陀监测站(121°24'E, 31°14'N)资料,时间序列为 2006~2021 年逐日数据. 气象资料来自于上海市气象信息与技术支撑中心的宝山国家基本气象站(站号 58362, 121°27'E, 31°24'N)逐日观测资料,统计时间段为 2006~2021 年,统计要素有:地面层风速、风向、气温、太阳辐射、日照时数、云量、降水量和相对湿

度等. 此外,文中的 NCEP/NCAR 再分析资料^[41]来自美国国家海洋和大气管理局(NOAA, <https://www.esrl.noaa.gov/>),时间段为 2006~2021 年,其中常年值时间段为 1991~2020 年,水平分辨率为 0.25°×0.25°. 普陀监测站是上海市环境空气质量监测国控站点之一,位于上海市普陀区杏山路 317 号,周边主要是住宅、学校和公园等, O₃ 浓度测定采用美国 Thermo Fisher(赛默飞世尔)公司的 Model 49i 臭氧分析仪. 宝山气象站是国家基本气象站,位于上海市宝山区友谊路 1888 号,周边主要是住宅、公园和企业等. 宝山气象站和普陀监测站位置见图 1,两地相距约 18.5 km. O₃ 缺测数据为 44 个,有效数据占比为 99.2%,气象要素缺测数据共 4 个,有效数据占比接近 100%,质控优良,数据完整性好. 缺测数据采用前一日和后一日的平均值补齐.

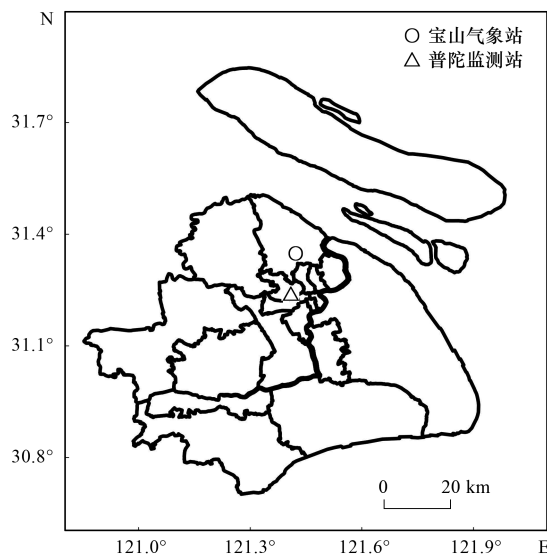


图 1 环境监测站和气象站位置示意

Fig. 1 Location of the environmental monitoring and meteorological observation stations

1.2 分析方法

1.2.1 ARIMA 模型

时间序列分析方法采用经典的统计学 ARIMA (p, d, q) 模型^[32],其全称为差分整合移动平均自回归模型 (autoregressive integrated moving average model, ARIMA),其中 p 为自回归项数, d 为使之成为平稳序列所做的差分次数(阶数), q 为移动平均项数. 计算公式如下:

$$y_t = \mu + \sum_{i=1}^p \varphi_i y_{t-i} + \varepsilon_t + \sum_{i=1}^q \theta_i \varepsilon_{t-i} \quad (1)$$

式中, y_t 表示当前值, μ 表示常数项, p 表示自回归阶数, q 表示移动平均阶数, φ_i 和 θ_i 分别表示 AR 和 MA 的系数, ε_t 表示误差.

季节性 ARIMA 模型是在 ARIMA 模型中引入季

节性项 (seasonal autoregressive integrated moving-average), 记为 SARIMA (p, d, q)(P, D, Q) s , 如再引入外生变量, 则是具有外生回归量的季节性整合移动平均自回归模型 (seasonal autoregressive integrated moving-average with exogenous regressors), 记为 SARIMAX (p, d, q)(P, D, Q) s , 其中 p 、 d 和 q 表示非季节部分模型参数, P 、 D 和 Q 表示季节部分模型参数, s 表示季节性周期。

数据的平稳性单位根检验用增广迪基-福勒检验 (augmented dickey-fuller test, ADF)。

本文中时间序列分析利用 Python 语言的 statsmodels 包完成。

1.2.2 均方根误差

模型验证用均方根误差 (root mean squared error, RMSE) 进行模型拟合值和观测值之间对比, RMSE 值越小, 表明拟合精度越高, 模型越好^[42]。RMSE 计算

式为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (OBS_i - SIM_i)^2}{n}} \quad (2)$$

式中, OBS 表示观测值, SIM 表示拟合值, n 表示样本数。

2 结果与分析

2.1 O₃ 浓度变化特征

2.1.1 月变化特征

利用时间序列分析方法对 O₃ 浓度月变化趋势进行分析, 结果见图 2, 其中滑动平均值和滑动标准差的滑动窗口值为 12。2006~2021 年间, 上海 O₃ 浓度月平均值具有明显的周期性, 一年之中呈现中间月份高 (4~9 月), 两头低形态, 滑动平均值呈波动式增大趋势, 滑动标准差基本趋于常数。

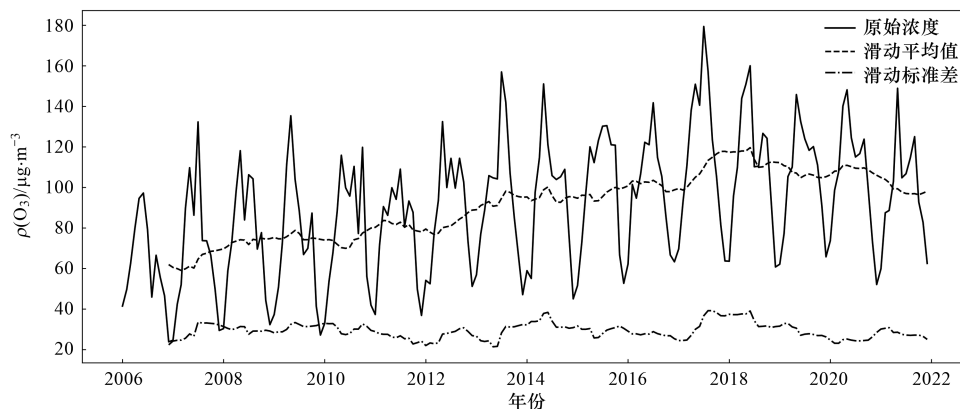


图 2 2006~2021 年上海地区 O₃ 浓度月平均值变化趋势

Fig. 2 Trends of monthly average O₃ concentration in Shanghai from 2006 to 2021

2.1.2 年变化特征

2006~2021 年间, 上海 O₃ 浓度年平均值呈现波动式增加趋势, 2017 年最高 (117.7 μg·m⁻³), 2006 年最低 (62.0 μg·m⁻³); 夏半年 (4~9 月) O₃ 浓度平均值也是呈现波动式增加趋势, 其中 2017 年最高 (147.5 μg·m⁻³), 2006 年最低 (77.3 μg·m⁻³), 具体见图 3(a)。夏半年和全年的 O₃ 浓度平均值相关系数 (R) 为 0.985, 夏半年 O₃ 浓度平均值都远高于全年浓度平均值, 最多高出达 36.2%, 进一步表明全年 O₃ 分布集中在夏半年。图 3(b) 进一步从 O₃ 浓度距平百分率 [(实测值-同期历史均值)/同期历史均值×100%, 下同] 分析, 表明 2006~2012 年和 2013~2021 年分别为 O₃ 浓度偏低和偏高年份。

2.2 夏半年 O₃ 污染的总体气候背景

对夏半年 O₃ 浓度偏高年份 (2013~2021 年)、偏低年份 (2006~2012 年)、最高年份 (2017 年) 和最低年份 (2006 年) 的气象条件分析结果见表 1, 总体上, O₃ 浓

度偏高年份伴随着污染日数偏多, 平均风速偏小, 小风 ($\leq 1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 日数偏多, 低云量 <20% 日数偏多, 高温日数偏多, 太阳直接辐射量偏高, 日照时数偏多。

风是影响大气污染物扩散、稀释的很重要的一个因子, 风速影响污染物在大气中的扩散和区域性迁移^[43]。图 4(a) 显示, 2006~2021 年夏半年平均风速呈现减少趋势, 尤其是 2014 年以后减少比较明显, 各年夏半年 O₃ 浓度和风速呈现负相关 ($R=-0.826$), 通过 0.01 显著性水平检验。静稳天气往往导致污染加重, 而 O₃ 浓度偏高年份的静风 (C) 出现频率为 2.9%, 是偏低年份 (1.0%) 的近 3 倍。各年夏半年静风出现频率和 O₃ 浓度呈现正相关 ($R=0.836$), 通过 0.01 显著性水平检验。2006~2021 年间, 低云量 <20% 日数呈增加趋势 [图 4(b)], 和 O₃ 浓度正相关 ($R=0.724$), 通过 0.01 显著性水平检验; 日最高气温 $\geq 35^\circ\text{C}$ 的高温日数变化趋势不明显 [图 4(b)], 和 O₃ 浓度正相关 ($R=0.264$); 太阳直接辐射和日照时数都呈波动式增长趋

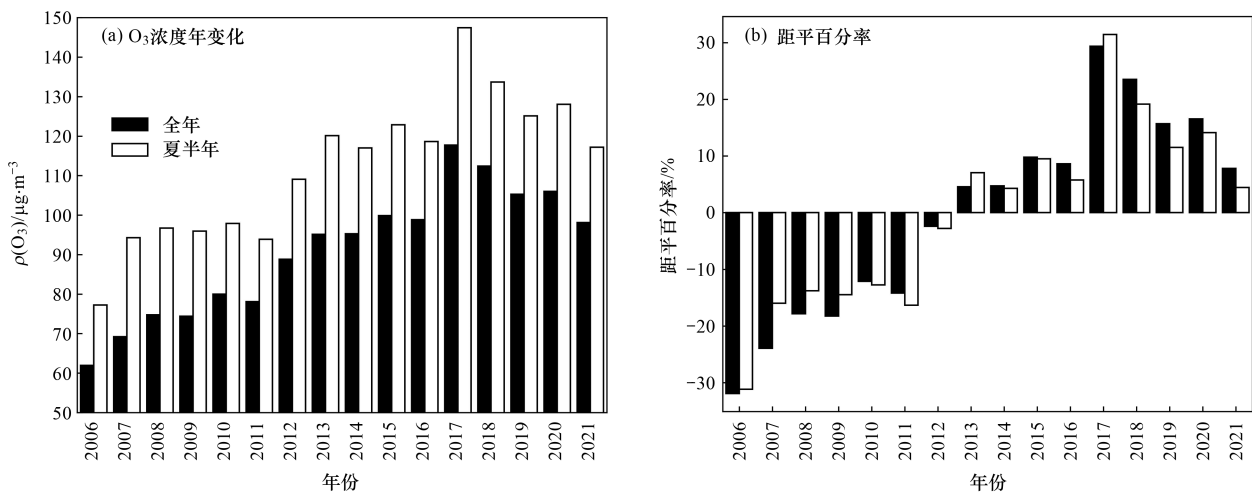


图3 2006~2021年上海地区全年和夏半年O₃浓度年变化及距平百分率

Fig. 3 Annual changes and anomaly percentages of O₃ concentration in the year and summer half-year of Shanghai from 2006 to 2021

表1 O₃浓度偏高、偏低、最高和最低年份气象条件对比

Table1 Comparison of meteorological conditions in high, low, highest, and lowest years of O₃ concentration

项目	偏高年份 (2013~2021年)	偏低年份 (2006~2012年)	最高年份 (2017年)	最低年份 (2006年)	16 a 平均
浓度/μg·m ⁻³	125.6	95.0	147.5	77.3	112.2
污染日数/d	35.4	16.6	66	6	27.2
平均风速/m·s ⁻¹	2.6	3.1	2.5	3.4	2.8
小风日数/d	19.4	4.4	23	4	12.9
静风出现频率/%	2.9	1.0	4.1	0.7	2.1
低云量<20%日数/d	85.6	74.6	94	66	80.8
高温日数/d	20.7	17.3	31	19	19.2
太阳直接辐射/MJ·m ⁻²	1 643.7	1 428.3	1 720.8	1 465.1	1 486.2
日照时数/h	969.8	929.8	1 009.3	985.7	952.3
08:00~20:00降水量/mm	523.8	481.4	529.3	357.3	505.2
相对湿度/%	74.8	70.6	71.1	69.2	73.0

势[图4(c)],和O₃浓度正相关(*R*分别为0.602和0.265);08:00~20:00降水和相对湿度都呈波动式增长趋势[图4(d)],和O₃浓度正相关(*R*分别为0.186和0.413)。

综上所述,夏半年O₃浓度与平均风速负相关,与静风出现频率、低云量<20%日数、太阳直接辐射、

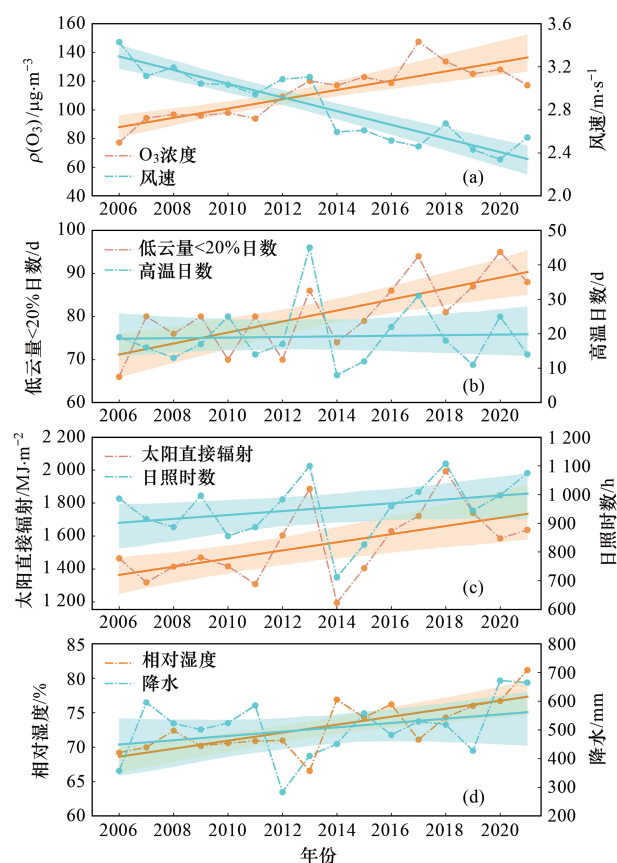
高温日数、日照时数、08:00~20:00降水量和相对湿度成正比,相关系数汇总见表2。相较而言,平均风速、静风出现频率、低云量<20%的天数以及太阳直接辐射和O₃浓度的相关关系更为显著,前3个通过0.01显著性水平检验,后1个通过0.05显著性水平检验。

表2 夏半年O₃浓度及气象要素相关系数¹⁾

Table2 Correlation coefficient of O₃ concentration and the meteorological factors in the summer half-years

	O ₃ 浓度	平均 风速	低云量<20% 日数	高温 日数	太阳直接 辐射	日照 时数	平均相对 湿度	08:00~20:00 降水	静风出现 频率
O ₃ 浓度	1	—	—	—	—	—	—	—	—
平均风速	-0.826**	1	—	—	—	—	—	—	—
低云量<20%日数	0.724**	-0.737	1	—	—	—	—	—	—
高温日数	0.265	0.099	0.342	1	—	—	—	—	—
太阳直接辐射	0.602*	-0.271	0.468	0.534	1	—	—	—	—
日照时数	0.265	-0.002	0.420	0.544	0.841	1	—	—	—
平均相对湿度	0.413	-0.754	0.369	-0.506	0.019	-0.098	1	—	—
08:00~20:00降水	0.186	-0.438	0.552	-0.102	-0.153	-0.002	0.445	1	—
静风出现频率	0.836**	-0.821	0.576	0.051	0.216	-0.055	0.524	0.213	1

1)*为*P*<0.05,**为*P*<0.01



阴影表示各要素拟合曲线的置信区间

图4 2006~2021年上海地区夏半年 O_3 浓度和气象因子变化

Fig. 4 Changes in O_3 concentration and meteorological factors in the summer half-year of Shanghai from 2006 to 2021

2.3 夏半年大气环流形势

本文着眼于气候角度分析夏半年上海 O_3 浓度异常情况相联系的环流背景. 针对夏半年(4~9月) O_3 浓度偏高和偏低年份的不同层次(200、500、700和850 hPa)的位势高度、风场以及射出长波辐射(OLR)进行分析. 根据分析结果,随着高度的增加(气压减少),位势高度和风场异常逐渐增大,但不同层次下的 O_3 浓度偏高年份减去偏低年份的差异场分布大致类似,因此以500 hPa位势高度和低层850 hPa风场为代表进行详细说明.

2006~2021年夏半年 O_3 浓度偏高年份、偏低年份的异常环流形势(包括500 hPa位势高度、850 hPa风场)和OLR见图5和图6,其中异常是指相对于1991~2020年平均值而言. 在夏半年 O_3 浓度偏高年[图5(a)],东亚-西太平洋整体呈现位势高度正异常形势,这与全球变暖导致副热带高压带扩张有关^[44]. 具体对比不同区域的情况可见,在中国南方大陆上的位势高度正异常幅度更明显,在气压梯度力的作用下使得长江中下游一带呈现偏西风异常,不利于海上洁净空气向上海地区输送,由此导致 O_3 浓度偏高. 在夏半年 O_3 浓度偏低年[图5(b)],副热带高压偏

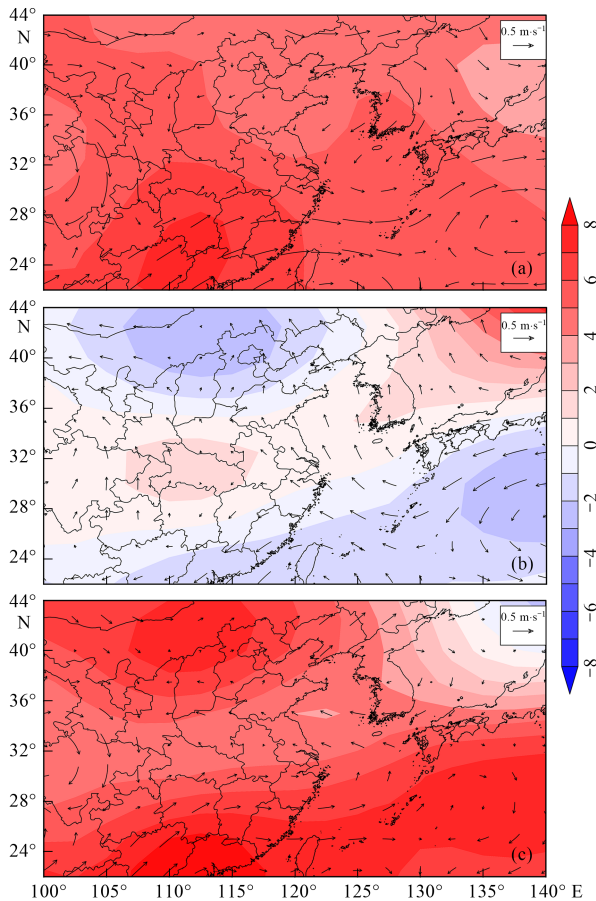
北偏东,上海地区东北侧海上及西北太平洋上空500 hPa位势高度则为正异常,而其东南侧海上及西太平洋上空500 hPa位势高度为负异常,对应低层850 hPa风场也呈现出西北太平洋(热带西太平洋)反气旋性(气旋性)异常的环流特征,由此导致上海地区低层东南风异常,有利于从海上吹来更多的东南风,即更多的海上洁净空气输送有利于污染物稀释. 为了进一步消除全球变暖等因素对副热带环流变化趋势的影响,用 O_3 浓度偏高年份减去偏低年份考察其差异场[图5(c)],结果和 O_3 浓度偏高年的形势类似,在中国南方大陆-西太平洋上的位势高度正异常幅度更明显,长江中下游一带呈现偏西风异常,不利于海上洁净空气向上海地区输送,而上海东北侧海上至西北太平洋呈现反气旋性差异场分布,使得上海北侧为偏东风差异场,并与上海南侧的偏西风差异场形成气旋性差异环流,不利于低层大气的辐散,进而导致污染物不易稀释. 以上为多年的对比情况, O_3 浓度极端年份的情况和上述分析结果一致. 可见,上海地区夏半年 O_3 浓度异常与西太平洋副热带高压的强度和位置异常相联系的大气动力条件有关.

射出长波辐射(OLR)是由卫星观测的地气系统辐射收支中的重要分量,其大小主要取决于云顶和下垫面的温度,可以反映出云量、雨量、凝结潜热、大尺度垂直环流以及海气相互作用等众多海洋和大气相关信息,在大气环流和海气相互作用等相关研究中得到了广泛应用,在对流发展地区,OLR主要取决于云顶温度,而云顶温度又取决于对流活动的强度. OLR值越小,云顶温度越低,对流发展则越强;反之对流较弱^[45]. 在热带和低纬度地区,OLR常作为反映对流活动强弱及降水情况的重要指标^[46]. 受气候增暖背景的影响, O_3 浓度偏高年[图6(a)]和偏低年[图6(b)]的OLR异常分布类似. 进一步从二者的差异场[图6(c)]来看,夏半年 O_3 浓度偏高年份相较于偏低年份,在长江中下游及其以南地区OLR异常为负值,表明 O_3 浓度偏高年份的地面射出长波辐射较少,更有利于地面吸收太阳辐射而升温,进而有利于形成高浓度 O_3 污染. 由此可见,上海地区夏半年 O_3 浓度异常与向外长波辐射相联系的热力条件有关.

2.4 与气象条件的拟合关系

前文时间序列分析结果表明, O_3 浓度月平均值的ADF平稳性检验结果为: P 值(0.334)大于0.05,检测值(-1.896)大于5%时置信度下的临界值(-2.878)没有通过ADF平稳性检验.

鉴于平稳性是ARIMA模型预测的前提条件,对原始浓度进行分解,拆分成趋势、季节和残值这3个部份(图7),图7显示, O_3 浓度月平均值趋势部分呈现



(a) O_3 浓度偏高年, 500hPa 位势高度异常场和 850 hPa 异常风场 (2013~2021 年 4~9 月), (b) O_3 浓度偏低年, 500 hPa 位势高度异常场和 850hPa 异常风场 (2006~2012 年 4~9 月), (c) 偏高年减去偏低年; 色柱表示位势高度, 单位为位势米 (gpm)

图 5 上海地区夏半年 O_3 浓度偏高、偏低年份合成的 500 hPa 位势高度场、850 hPa 风场异常及其差异场

Fig. 5 Composite anomalous geopotential height at 500 hPa and wind vector at 850 hPa in the summer half years with high or low O_3 concentration in Shanghai and their differences

波动式增加趋势, 季节部分周期性明显. 对残值进行 ADF 平稳性检验, 结果显示: P 值 (2.456×10^{-11}) 远小

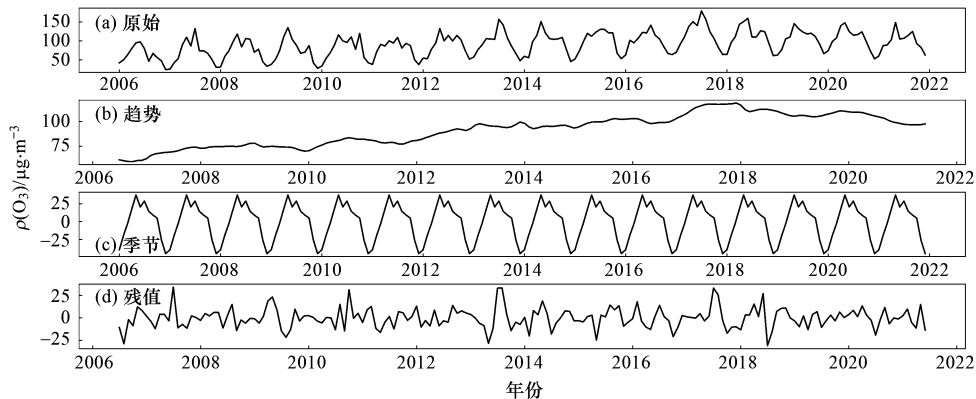
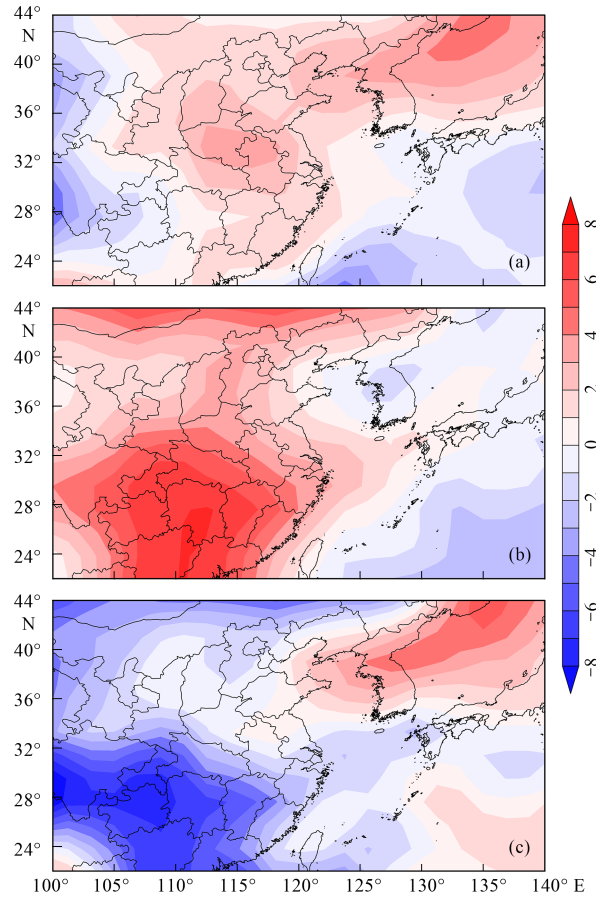


图 7 2006~2021 年上海地区 O_3 浓度月平均值分解后变化趋势

Fig. 7 Trends of monthly average O_3 concentration after decomposition in Shanghai from 2006 to 2021

以往实现 ARIMA 方法是先通过 ADF 平稳性检验, 再使用自相关图 (ACF 图) 和偏自相关图 (PACF



(a) O_3 浓度偏高年, OLR 异常场 (2013~2021 年 4~9 月), (b) O_3 浓度偏低年, OLR 异常场 (2006~2012 年 4~9 月), (c) 偏高年减去偏低年; 色柱表示 OLR, 单位为 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$

图 6 上海地区夏半年 O_3 浓度偏高、偏低年份合成的 OLR 异常场及其差异场

Fig. 6 Composite anomalous OLR in the summer half-years with high or low O_3 concentration in Shanghai and their differences

于 0.01, 检测值 (-7.596) 小于 1% 置信度下的临界值 (-3.469) 通过 ADF 平稳性检验. 在 99% 的置信度下, 残值数据是稳定的, 其均值和方差均趋于常数 (图略), 可以用于预测.

图) 截尾和拖尾来确定模型参数 p 、 d 、 q 值^[32], 这样既耗时又效率较低. 与文献[32]不同的是, 本文利用网

格搜索法寻找最优模型使其修正的赤池信息量准则(AICc)值最小来确定 p 、 d 、 q 值。

将2006~2017年 O_3 浓度月平均值数据作为训练集进行模型拟合,将2018~2021年 O_3 浓度月平均值数据作为测试集进行独立样本检验,预测值和观测值结果对比见图8(a),RMSE=22.0。再加入低云量、最高气温、风速和太阳直接辐射这4个气象因子作为外生变量,观察对模型的提升效果(表3)。结果表明:只加入1个气象因子作为外生变量时,低云量对模型提升效果最好,RMSE由原来的22.0减少到18.9,减少了3.1;当加入2个气象因子作为外生变量时,太阳直接辐射和最高气温组合对模型效果最好,RMSE由原来的22.0减少到14.6,减少了7.4;当加入3个气象因子作为外生变量时,太阳直接辐射、最高气温和风速组合对模型效果最好,RMSE由原来的22.0减少

到11.5,减少了10.5。当4个因子全部作为外生变量, RMSE没有再进一步减少,反而比太阳辐射、最高气温和风速3个气象因子组合增加了1.9。以上分析可以得出,太阳直接辐射、最高气温和风速作为外生变量的模型最优, RMSE由不加气象因子作为外生变量的模型22.0[图8(a)]减少到11.5[图8(b)],减少了10.5,减少率为47.7%。图9(a)显示,预测值和观测值较好地呈现在1:1线附近,加入外生变量后预测值和观测值更好地呈现在1:1线附近[图9(b)],相关系数 R 也由0.819提升到0.911(均通过0.01显著性水平检验),提升率为11.2%。由此表明:①太阳直接辐射、最高气温和风速这3个变量对 O_3 浓度月预报模型的提升效果贡献大;②在 O_3 浓度月预测中,同时引入太阳直接辐射、最高气温和风速这3个变量时效果最优,可在实际的 O_3 浓度月预测中进行应用。

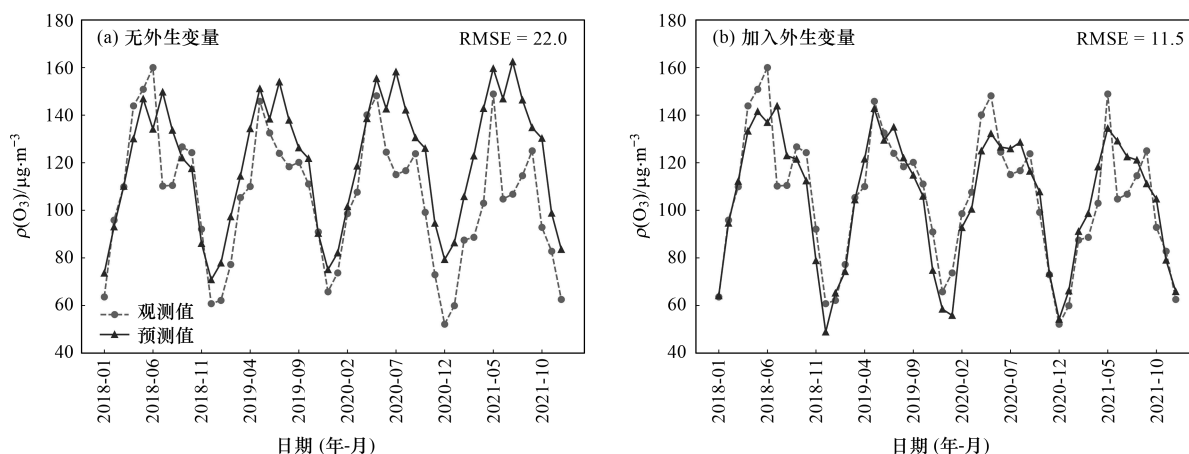


图8 有无外生变量模型预测结果对比

Fig. 8 Comparison of the model prediction results with or without exogenous variables

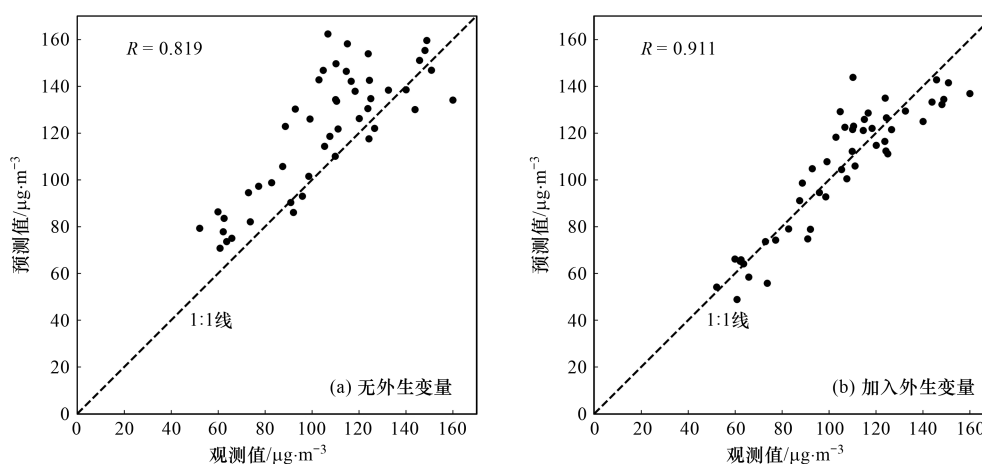


图9 有无外生变量模型独立样本检验效果对比

Fig. 9 Comparison of the model testing effect of independent sample with or without exogenous variables

3 讨论

在预报模型构建中,当只加入1个外生变量时,低云量、太阳直接辐射和风速对模型预测结果都有

所提升,低云量效果最佳,而加入最高气温后效果反而降低,这跟前文得出的 O_3 浓度与低云量、太阳直接辐射和风速相关性高,而跟高温日数相关性偏低的结论一致。当不加外生变量时,预测值总体偏大,尤

表 3 气象因子作为外生变量加入模型提升效果汇总¹⁾

Table3 Summary of model boosting performance by adding meteorological factors as exogenous variables

外生变量数量	气象要素	RMSE	RMSE 变化	RMSE 变化率/%	r
1	C	18.9	-3.1	-14.1	0.837
1	S	19.6	-2.4	-11.0	0.847
1	T	22.7	0.7	3.2	0.831
1	W	20.9	-1.1	-5.0	0.835
2	C+S	15.9	-6.1	-27.7	0.866
2	T+C	18.4	-3.6	-16.4	0.839
2	W+C	20.2	-1.8	-8.2	0.841
2	W+S	19.0	-3.0	-13.6	0.849
2	S+T	14.6	-7.4	-33.6	0.885
2	T+W	21.1	-0.9	-4.1	0.850
3	S+T+W	11.5	-10.5	-47.7	0.911
3	C+W+S	14.5	-7.5	-34.1	0.892
3	C+T+W	17.2	-4.8	-21.8	0.849
3	C+T+S	14.9	-7.1	-32.3	0.877
4	T+S+W+C	13.4	-8.6	-39.1	0.894

1)C 表示低云量,T 表示最高气温,W 表示风速,S 表示太阳直接辐射

其是 7 月和 8 月,这主要跟训练集里的 2017 年 7 月和 8 月 O₃ 浓度异常大有关,2006~2017 年 O₃ 浓度趋势是增加,而 2018~2021 年趋势则是减少的,预报模型的训练集正好是 2006~2017 年,测试集则是 2018~2021 年,这可能是造成预测值总体偏大的主要原因.而加入气象要素作为外生变量后,这种情况得到明显改善,最优模型的 RMSE 减少了 47.7%,预报效果得到了很大提升,但几个峰值预报值效果却不佳.考虑气象因子的不同组合作为外生变量,有些组合对峰值的预报效果好,但是总体上预报效果却不佳,这可能除了跟气象要素密切相关外,还有其他影响因素,今后将进一步研究预报模型找到整体预报效果好又能很好地预报峰值的方法.

4 结论

(1)2006~2021 年 O₃ 浓度年平均值和夏半年平均值都呈现波动式增加趋势,夏半年平均值都远高于全年平均值.上海 O₃ 浓度月平均值具有明显的周期性,呈现中间月份高(4~9 月),两头低形态.

(2)夏半年 O₃ 浓度和风速显著负相关,与静风出现频率、低云量<20% 日数、太阳直接辐射显著正相关.

(3)夏半年 O₃ 浓度异常与大气动力和热力异常相联系.当偏强的西太平洋副热带高压位置偏西偏南时,包括上海在内的长江中下游一带受偏西风异常环流影响,不利于海上洁净空气向上海输送,易引起高浓度 O₃ 污染.当地面向外长波辐射偏少时,更有利于地面吸收太阳辐射而升温,进而有利于形成高浓度 O₃ 污染.

(4)利用气象因子进行了 O₃ 浓度月预报建模试验,其中同时加入太阳直接辐射、最高气温和风速作为外生变量的月预报模型最优,可用于 O₃ 浓度月平均值预测.

参考文献:

[1] Tsangari H, Paschalidou A K, Kassomenos A P, *et al.* Extreme weather and air pollution effects on cardiovascular and respiratory hospital admissions in Cyprus [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **542**: 247-253.

[2] O'Lenick C R, Wilhelm O V, Michael R, *et al.* Urban heat and air pollution: a framework for integrating population vulnerability and indoor exposure in health risk analyses [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **660**: 715-723.

[3] Yin F, Ma Y, Zhao X, *et al.* Analysis of the effect of PM₁₀ on hand, foot and mouth disease in a basin terrain city [J]. *Scientific Reports*, 2019, **9**, doi: 10.1038/s41598-018-35814-5.

[4] Wu X C, Chen B, Wen T X, *et al.* Concentrations and chemical compositions of PM₁₀ during hazy and non-hazy days in Beijing [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2020, **87**: 1-9.

[5] 朱媛媛,刘冰,桂海林,等.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[J]. *环境科学*, 2022, **43** (8): 3966-3976.

Zhu Y Y, Liu B, Gui H L, *et al.* Characteristics of ozone pollution, meteorological impact, and evaluation of forecasting results based on a neural network model in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(8): 3966-3976.

[6] 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.

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.

[7] 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.
- [8] 康平, 侯静雯, 冯浩鹏, 等. 成都市PM_{2.5}和O₃复合污染特征及相互作用研究[J]. 环境科学学报, 2022, **42**(10): 80-90.
Kang P, Hou J W, Feng H P, *et al.* Study on the characteristics and interaction of PM_{2.5} and O₃ combined pollution in Chengdu [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, **42**(10): 80-90.
- [9] Li K, Jacob D J, Shen L, *et al.* Increases in surface ozone pollution in China from 2013 to 2019: anthropogenic and meteorological influences [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2020, **20**(19): 11423-11433.
- [10] 张倩倩, 张兴赢. 基于卫星和地面观测的2013年以来我国臭氧时空分布及变化特征[J]. 环境科学, 2019, **40**(3): 1132-1142.
Zhang Q Q, Zhang X Y. Ozone spatial-temporal distribution and trend over China since 2013: insight from satellite and surface observation [J]. Environmental Science, 2019, **40**(3): 1132-1142.
- [11] 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.
- [12] 王雨燕, 杨文, 王秀艳, 等. 淄博市城郊臭氧污染特征及影响因素分析[J]. 环境科学, 2022, **43**(1): 170-179.
Wang Y Y, Yang W, Wang X Y, *et al.* Characteristics of ozone pollution and influencing factors in urban and suburban areas in Zibo [J]. Environmental Science, 2022, **43**(1): 170-179.
- [13] 钱悦, 许彬, 夏玲君, 等. 2016~2019年江西省臭氧污染特征与气象因子影响分析[J]. 环境科学, 2021, **42**(5): 2190-2201.
Qian Y, Xu B, Xia L J, *et al.* Characteristics of ozone pollution and relationships with meteorological factors in Jiangxi province [J]. Environmental Science, 2021, **42**(5): 2190-2201.
- [14] 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.
- [15] 李凯, 刘敏, 梅如波. 泰安市大气臭氧污染特征及敏感性分析[J]. 环境科学, 2020, **41**(8): 3539-3546.
Li K, Liu M, Mei R B. Pollution characteristics and sensitivity analysis of atmospheric ozone in Taian city [J]. Environmental Science, 2020, **41**(8): 3539-3546.
- [16] 符传博, 徐文帅, 丹利, 等. 2015~2020年海南省臭氧时空变化及其成因分析[J]. 环境科学, 2022, **43**(2): 675-685.
Fu C B, Xu W S, Dan L, *et al.* Temporal and spatial variations in ozone and its causes over Hainan province from 2015 to 2020 [J]. Environmental Science, 2022, **43**(2): 675-685.
- [17] 杨帆, 王体健, 束蕾, 等. 青岛沿海地区一次臭氧重污染过程的特征及成因分析[J]. 环境科学学报, 2019, **39**(11): 3565-3580.
Yang F, Wang T J, Shu L, *et al.* Characteristics and mechanisms for a heavy O₃ pollution episode in Qingdao coastal area [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, **39**(11): 3565-3580.
- [18] 杨芳园, 潘娅婷, 康道俊, 等. 2019年昆明市一次臭氧污染过程特征及成因分析[J]. 环境科学学报, 2022, **42**(10): 71-79.
Yang F Y, Pan Y T, Kang D J, *et al.* Characteristics and reason analysis of ozone pollution process in Kunming in 2019 [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, **42**(10): 71-79.
- [19] 唐颖潇, 姚青, 蔡子颖, 等. 基于过程分析的京津冀区域典型城市臭氧成因[J]. 环境科学, 2022, **43**(6): 2917-2927.
Tang Y X, Yao Q, Cai Z Y, *et al.* Exploring formation of ozone in typical cities in Beijing-Tianjin-Hebei region using process analysis [J]. Environmental Science, 2022, **43**(6): 2917-2927.
- [20] Xu J W, Huang X, Wang N, *et al.* Understanding ozone pollution in the Yangtze River Delta of eastern China from the perspective of diurnal cycles [J]. Science of the Total Environment, 2021, **752**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141928.
- [21] Gu Y X, Li K, Xu J M, *et al.* Observed dependence of surface ozone on increasing temperature in Shanghai, China [J]. Atmospheric Environment, 2020, **221**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.117108.
- [22] Chen Z Y, Li R Y, Chen D L, *et al.* Understanding the causal influence of major meteorological factors on ground ozone concentrations across China [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, **242**, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118498.
- [23] Liu P F, Song H Q, Wang T H, *et al.* Effects of meteorological conditions and anthropogenic precursors on ground-level ozone concentrations in Chinese cities [J]. Environmental Pollution, 2020, **262**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114366.
- [24] 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.
- [25] 黎煜满, 李磊, 王浩霖, 等. 粤北山地城市近地面臭氧污染特征及气象影响因素分析——以韶关为例[J]. 环境科学学报, 2022, **42**(2): 258-270.
Li Y M, Li L, Wang H L, *et al.* Analysis of characteristics of surface ozone pollution and meteorological factors in a mountain city of northern Guangdong: a case study in Shaoguan [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, **42**(2): 258-270.
- [26] 常炉予, 许建明, 瞿元昊, 等. 上海市臭氧污染的大气环流客观音型研究[J]. 环境科学学报, 2019, **39**(1): 169-179.
Chang L Y, Xu J M, Qu Y H, *et al.* Study on objective synoptic classification on ozone pollution in Shanghai [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, **39**(1): 169-179.
- [27] 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.
- [28] 严晓瑜, 缙晓辉, 杨苑媛, 等. 银川市臭氧污染天气形势客观音型研究[J]. 环境科学学报, 2022, **42**(8): 13-25.
Yan X Y, Gou X H, Yang Y Y, *et al.* Study on objective synoptic classification on ozone pollution in Yinchuan [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, **42**(8): 13-25.
- [29] 柳草, 王晓玲, 李德俊, 等. 环流型对武汉市臭氧污染浓度的影响分析[J]. 环境科学学报, 2021, **41**(4): 1210-1218.
Liu C, Wang X L, Li D J, *et al.* Analysis on the influence of circulation patterns on the ozone concentration in Wuhan [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, **41**(4): 1210-1218.
- [30] 陈婉莹, 陈懿昂, 褚晰晰, 等. 珠三角地区臭氧来源特征的数值模拟研究[J]. 环境科学学报, 2022, **42**(3): 293-308.
Chen W Y, Chen Y A, Chu Y X, *et al.* Numerical simulation of ozone source characteristics in the Pearl River Delta region [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, **42**(3): 293-308.
- [31] 王君悦, 刘朝顺. 基于WRF-Chem的长三角地区PM_{2.5}和O₃污

- 染协同控制研究[J]. 环境科学学报, 2022, **42**(7): 32-42.
- Wang J Y, Liu C S. Study on the synergistic control of PM_{2.5} and O₃ pollution in the Yangtze River Delta region based on WRF-Chem model[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, **42**(7): 32-42.
- [32] 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.
- [33] 李娜, 李勇, 冯家成, 等. 太湖水体Chl-a预测模型ARIMA的构建及应用优化[J]. 环境科学, 2021, **42**(5): 2223-2231.
- Li N, Li Y, Feng J C, *et al.* Construction and application optimization of the Chl-a forecast model ARIMA for lake Taihu [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(5): 2223-2231.
- [34] 许蜜, 王跃会, 何玉华, 等. ARIMA模型在手术部位感染发生率预测中的应用[J]. 中华医院感染学杂志, 2020, **30**(1): 141-145.
- Xu M, Wang Y H, He Y H, *et al.* Application of ARIMA model in prediction of incidence of surgical site infection [J]. *Chinese Journal of Nosocomiology*, 2020, **30**(1): 141-145.
- [35] 张国赞, 金辉. 基于改进ARIMA模型的城市轨道交通短时客流预测研究[J]. 计算机应用与软件, 2022, **39**(1): 339-344.
- Zhang G Y, Jin H. Research on the prediction of short-term passenger flow of urban rail transit based on improved ARIMA model [J]. *Computer Applications and Software*, 2022, **39**(1): 339-344.
- [36] 钱嫣然, 何慧之, 仇海英, 等. 基于ARIMA模型的区域用电量预测方法[J]. 信息技术, 2023, **47**(1): 180-185.
- Qian Y R, He H Z, Qiu H Y, *et al.* Regional electricity consumption forecasting method based on ARIMA model [J]. *Information Technology*, 2023, **47**(1): 180-185.
- [37] 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.
- [38] 赵楠, 卢毅敏. 基于XGBoost算法的近地面臭氧浓度遥感估算[J]. 环境科学学报, 2022, **42**(5): 95-108.
- Zhao N, Lu Y M. Remote-sensing estimation of near-surface ozone concentration based on XGBoost [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, **42**(5): 95-108.
- [39] 周学思, 廖志恒, 王萌, 等. 2013-2016年珠海地区臭氧浓度特征及其与气象因素的关系[J]. 环境科学学报, 2019, **39**(1): 143-153.
- Zhou X S, Liao Z H, Wang M, *et al.* Characteristics of ozone concentration and its relationship with meteorological factors in Zhuhai during 2013-2016 [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(1): 143-153.
- [40] 张小娟, 李莉, 王红丽, 等. 2010-2016年上海城区臭氧长时间序列变化特征初探[J]. 环境科学学报, 2019, **39**(1): 86-94.
- Zhang X J, Li L, Wang H L, *et al.* Preliminary study on the long-term trends of ozone in urban Shanghai from 2010 to 2016 [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(1): 86-94.
- [41] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, *et al.* The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996, **77**(3): 437-471.
- [42] Xu C, Yang Z Q, Wang M T, *et al.* Characteristics and quantitative simulation of stomatal conductance of *Panax notoginseng* [J]. *International Journal of Agriculture & Biology*, 2019, **22**(2): 388-391.
- [43] He J J, Gong S L, Yu Y, *et al.* Air pollution characteristics and their relation to meteorological conditions during 2014-2015 in major Chinese cities [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **223**: 484-496.
- [44] Yang K, Cai W J, Huang G, *et al.* Increased variability of the western Pacific subtropical high under greenhouse warming [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2022, **119**(23), doi: 10.1073/pnas.2120335119.
- [45] 刘俏华, 姚秀萍, 陈明诚. 基于OLR资料的青藏高原地区对流活动研究[J]. 大气科学, 2021, **45**(2): 456-470.
- Liu Q H, Yao X P, Chen M C. Characteristics of the convection over the Tibetan Plateau based on OLR data [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2021, **45**(2): 456-470.
- [46] 康潔文, 巩远发. 基于高分辨率OLRs资料的青藏高原和南亚地区夏季对流日变化特征[J]. 高原气象, 2021, **40**(3): 472-485.
- Kang Y W, Gong Y F. Diurnal variation characteristics of summer convection over the Qinghai-Xizang Plateau and South Asia area based on the high-resolution OLR data [J]. *Plateau Meteorology*, 2021, **40**(3): 472-485.

CONTENTS

Impacts of Anthropogenic Emission Reduction on Urban Atmospheric Oxidizing Capacity During the COVID-19 Lockdown	ZHU Jian-lan, QIN Mo-mei, ZHU Yan-hong, <i>et al.</i> (617)
Transport and Potential Sources Regions of Double High Pollution in Nanjing by Different Synoptic Situations	QIN Yang, HU Jian-lin, KONG Hai-jiang (626)
Differences of Three Methods in Determining Ozone Sensitivity in Nanjing	CHEN Gan-yu, LI Xun, LI Lin, <i>et al.</i> (635)
Characteristics of Ozone Concentration in Shanghai and Its Associated Atmospheric Circulation Background During Summer Half-years from 2006 to 2021	ZHENG Qing-feng, LIANG Ping, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i> (645)
Distribution Characteristics of Near Surface Ozone Volume Fraction in Shanxi Province Based on Atmospheric Composition Observation Network	LI Ying, WANG Shu-min, PEI Kun-ning, <i>et al.</i> (655)
Photochemical Mechanism and Control Strategy Optimization for Summertime Ozone Pollution in Yining City	WANG Wen-ting, GU Chao, LI Li-ming, <i>et al.</i> (668)
Characteristics, Sources, and Ozone-sensitive Species of VOCs in Four Seasons in Yuncheng	YIN Shi-jie, LIU Xin-gang, LIU Ya-fei, <i>et al.</i> (678)
Pollution Characteristics, Source Analysis, and Activity Analysis of Atmospheric VOCs During Winter and Summer Pollution in Zhengzhou	LAI Meng-jie, ZHANG Dong, YU Shi-jie, <i>et al.</i> (689)
Pollution Characteristics, Sources, and Secondary Generation of Organic Acids in PM _{2.5} in Zhengzhou	LI Zi-han, DONG Zhe, SHANG Lu-qi, <i>et al.</i> (700)
Nonlinear Variations in PM _{2.5} Concentration in the Three Major Urban Agglomerations in China	WU Shu-qi, GU Yang-yang, ZHANG Tian-yue, <i>et al.</i> (709)
Medium and Long-term Carbon Emission Projections and Emission Reduction Potential Analysis of the Lingang Special Area Based on the LEAP Model	WU Qiong, MA Hao, REN Hong-bo, <i>et al.</i> (721)
Dynamic Analysis on Carbon Metabolism of the Northern Region of China Under the Background of Carbon Emission Trading Policy	ZHENG Hong-mei, SHEN Fang, XU Guang-yao, <i>et al.</i> (732)
Carbon Reduction Analysis of Life Cycle Prediction Assessment of Hydrogen Fuel Cell Vehicles: Considering Regional Features and Vehicle Type Differences	MA Jing, CAI Xu, ZHANG Chun-mei, <i>et al.</i> (744)
Nitrate Pollution Characteristics and Its Quantitative Source Identification of Major River Systems in China	WEI Ying-huai, HU Min-peng, CHEN Ding-jiang (755)
Effects of Land Use Structure and Spatial Pattern at Different Temporal and Spatial Scales on Water Quality in Suzhou Creek	TAN Juan, XIONG Li-jun, WANG Qing, <i>et al.</i> (768)
Spatial-temporal Variation in Water Quality of Rain-source Rivers in Shenzhen from 2015 to 2021 and Its Response to Rainfall	WEI Bi-ying, CHENG Jian-mei, SU Xiao-yu, <i>et al.</i> (780)
Chemical Characteristics of Shallow Groundwater in the Yellow River Diversion Area of Henan Province and Identification of Main Control Pollution Sources	WANG Shuai, REN Yu, GUO Hong, <i>et al.</i> (792)
Chemical Characteristics and Genetic Analysis of Karst Groundwater in the Beijing Xishan Area	GUO Gao-xuan, DAI Yin-dong, XU Liang, <i>et al.</i> (802)
Hydrochemical Characteristics and Its Origin of Surface Water and Groundwater in Dianbu River Basin	ZHENG Tao, QIN Xian-yan, WU Jian-xiong (813)
Hydrochemical Characteristics and Genesis Mechanism of Groundwater in the Dry Period in the Zhangjiakou Area	JIN Ai-fang, YIN Xiu-lan, LI Chang-qing, <i>et al.</i> (826)
Distribution of Typical Resistant Bacteria and Resistance Genes in Source Water of the Middle and Lower Reaches of the Yellow River	MIN Wei, GAO Ming-chang, SUN Shao-fang, <i>et al.</i> (837)
Contamination Characteristics, Detection Methods, and Control Methods of Antibiotic Resistance in Pharmaceutical Wastewater	PENG An-ping, GAO Hu, ZHANG Xin-bo (844)
Effect of Water Components on Aggregation and Sedimentation of Polystyrene Nano-plastics	TANG Duan-yang, ZHENG Wen-li, CHEN Guan-tong-yi, <i>et al.</i> (854)
Lead Removal from Water by Calcium-containing Biochar with Saturated Phosphate	LIU Tian, LÜ Si-lu, DU Xing-guo, <i>et al.</i> (862)
Preparation of Chitosan-modified Biochar and Its Adsorption Mechanism for Cd ²⁺ in Aqueous Solution	JIANG Ling, AN Jing-yue, YUE Xiao-qiong, <i>et al.</i> (873)
Efficacy and Mechanism of Tetracycline Adsorption by Boron-doped Mesoporous Carbon	ZOU Zhen, XU Lu, QIAO Wei, <i>et al.</i> (885)
Adsorption Properties of Magnetic Phosphorous Camellia Oleifera Shells Biochar to Sulfamethoxazole in Water	HAN Shuai-peng, TANG Li-wen, LIU Qin, <i>et al.</i> (898)
High Resolution Emission Inventory of Greenhouse Gas and Its Characteristics in Guangdong, China	LU Qing, TANG Ming-shuang, LIAO Tong, <i>et al.</i> (909)
Ecosystem CO ₂ Exchange and Its Environmental Regulation of a Restored Wetland in the Liaohe River Estuary	LIU Si-qi, CHEN Hong, XING Qing-hui, <i>et al.</i> (920)
Effects of Biochar Application Two Years Later on N ₂ O and CH ₄ Emissions from Rice-Vegetable Rotation in a Tropical Region of China	HU Yu-jie, TANG Rui-jie, HU Tian-yi, <i>et al.</i> (929)
Research and Application Progress of Biochar in Amelioration of Saline-Alkali Soil	WEI Ying, JIAO Le, ZHANG Peng, <i>et al.</i> (940)
Effect of No-tillage on Soil Aggregates in Farmland: A Meta Analysis	XU Yi-ping, RAO Yue-yue, MENG Yan, <i>et al.</i> (952)
Spatio-temporal Evolution and Multi-scenario Simulation of Carbon Storage in Karst Regions of Central Guizhou Province: Taking Puding County as An Example	LI Yue, LUO Hong-fen (961)
Effects of Different Modifiers on Aggregates and Organic Carbon in Acidic Purple Soil	LI Yue, XU Man, XIE Yong-hong, <i>et al.</i> (974)
Effect of Ca Modified Biochar on the Chemical Speciation of Soil Phosphorus and Its Stabilization Mechanism	ZHANG Chao, ZHAI Fu-jie, SHAN Bao-qing (983)
Plant Diversity Changes and Its Driving Factors of Abandoned Land at Different Restoration Stages in the Middle of the Qinling Mountains	YAN Cheng-long, XUE Yue, WANG Yi-fei, <i>et al.</i> (992)
Contamination Characteristics and Ecological Risk of Antibiotics in Contaminated Sites of Typical Pharmaceutical Factories in China	YANG Jiong-bin, HUANG Zheng, ZHAO Jian-liang, <i>et al.</i> (1004)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils of Guangzhou	ZOU Zi-hang, CHEN Lian, ZHANG Pei-zhen, <i>et al.</i> (1015)
Quantifying the Contribution of Soil Heavy Metals to Ecological and Health Risk Sources	PAN Yong-xing, CHEN Meng, WANG Xiao-tong (1026)
Potential Ecological Risk Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils around Typical Factories in Hunan Province Based on Monte-Carlo Simulation	LUO Hao-jie, PAN Jun, CHEN Xiao-xia, <i>et al.</i> (1038)
Health Risk Assessment for an Arsenic-contaminated Site Based on Monte Carlo Simulation and Parameters Optimization	YUAN Bei, LIU Hu-peng, DU Ping, <i>et al.</i> (1049)
Pollution Source Apportionment of Heavy Metals in Cultivated Soil Around a Red Mud Yard Based on APCS-MLR and PMF Models	SHEN Zhi-jie, LI Jie-qin, LI Cai-xia, <i>et al.</i> (1058)
Characteristics and Mechanism of Cd Release and Transport in Soil Contaminated with PE-Cd	WANG Di, XU Shao-hui, SHAO Ming-yan, <i>et al.</i> (1069)
Characterization of Reductive Dechlorination of Chlorinated Ethylenes by Anaerobic Consortium	LI Wei, LIU Gui-ping, LIU Jun, <i>et al.</i> (1080)
Analysis of Heavy Metal Pollution Evaluation and Correlation of Farmland Soil and Vegetables in Zhaotong City	ZHANG Hao, DONG Chun-yu, YANG Hai-chan, <i>et al.</i> (1090)
Safe Utilization Effect of Passivator on Mild to Moderate Cadmium Contaminated Farmland	WANG Xiao-jing, ZHANG Dong-ming, CAO Yang, <i>et al.</i> (1098)
Simultaneous Immobilization of Cadmium and Arsenic in Paddy Soils with Novel Fe-Mn Combined Graphene Oxide	YUAN Jing, WU Ji-zi, LIAN Bin, <i>et al.</i> (1107)
Effects of the Application of Irrigation Water Containing Zn at the Key Growth Period on the Uptake and Transport of Cd in Rice	ZHOU Xia, HU Yu-dan, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (1118)
Effects of Exogenous Zinc on Growth and Root Architecture Classification of Maize Seedlings Under Cadmium Stress	ZHANG Hui-hong, WEI Chang, LIU Hai-tao, <i>et al.</i> (1128)
Mitigative Effect of Rare Earth Element Cerium on the Growth of Zinc-stressed Wheat (<i>Triticum aestivum</i> L.) Seedlings	ZHANG Jing-jing, XU Zheng-yang, JIAO Qiu-juan, <i>et al.</i> (1141)
Two-stage Inhibition Effects of <i>Burkholderia</i> sp. Y4 Application on Cadmium Uptake and Transport in Wheat	GUO Jia-jia, WANG Chang-rong, LIU Zhong-qi, <i>et al.</i> (1150)
Effects of Combined Stress of High Density Polyethylene Microplastics and Chlorimuron-ethyl on Soybean Growth and Rhizosphere Bacterial Community	HU Xiao-yue, HUA Zi-wei, YAO Lun-guang, <i>et al.</i> (1161)
Human Accumulation and Toxic Effects of Microplastics: A Critical Review	BAO Ya-bo, WANG Cheng-chen, PENG Wu-guang, <i>et al.</i> (1173)
Overview of the Application of Machine Learning for Identification and Environmental Risk Assessment of Microplastics	BAI Run-hao, FAN Rui-qi, LIU Qi, <i>et al.</i> (1185)
Research Process on the Combined Pollution of Microplastics and Typical Pollutants in Agricultural Soils	HOU Yu-qing, LI Bing, WANG Jin-hua, <i>et al.</i> (1196)
Research Progress in Electrochemical Detection and Removal of Micro/Nano Plastics in Water	ZHENG Wei-kang, LIU Zhen-zhong, XIANG Xiao-fang (1210)
Factors Influencing Willingness of Farmers to Pay for Agricultural Non-point Source Pollution Control Based on Distributed Cognitive Theory	GUO Chen-hao, LI Lin-fei, XIA Xian-li (1222)