

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

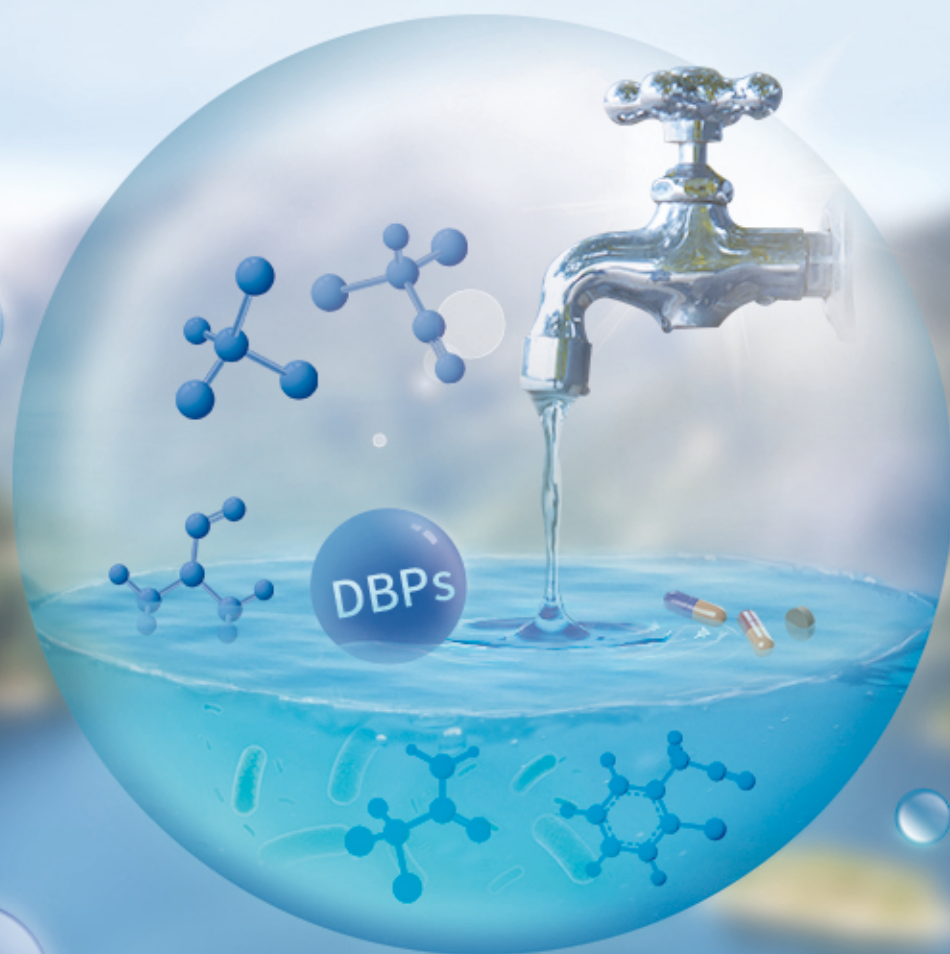
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

饮用水中的消毒副产物及其控制策略

楚文海, 肖融, 丁顺克, 张瑞华



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年11月

第42卷 第11期
Vol.42 No.11

目次

综述与专论

- 饮用水中的消毒副产物及其控制策略 楚文海, 肖融, 丁顺克, 张瑞华 (5059)
生物炭吸附硫化氢机制与影响因素研究进展 徐期勇, 梁铭坤, 许文君, 黄丹丹 (5086)

研究报告

- 1998~2016 中国八大经济区植被覆盖对 $PM_{2.5}$ 浓度时空分布的影响 杨玉莲, 杨昆, 罗毅, 喻臻钰, 孟超, 李岑 (5100)
COVID-19 疫情期间北京市两次重霾污染过程大气污染物演变特征及潜在源区分析 赵德龙, 田平, 周崑, 肖伟, 盛久江, 王飞, 杜远谋, 黄梦宇, 何晖, 丁德平 (5109)
汾渭平原临汾市 2019 年春节期间大气污染特征与来源解析 刘威杰, 胡天鹏, 毛瑶, 许安, 苏业旺, 李星谕, 程铖, 石明明, 梁莉莉, 邢新丽, 张家泉, 祁士华 (5122)
石家庄市大气污染物的季节性时空特征及潜在源区 聂赛赛, 王帅, 崔建升, 刘大喜, 陈静, 田亮, 贺博文, 沈梦宇 (5131)
天津市冬季空气湿度对 $PM_{2.5}$ 和能见度的影响 丁净, 唐颖潇, 郝天依, 姚青, 蔡子颖, 张裕芬, 韩素芹 (5143)
承德市 $PM_{2.5}$ 中碳质组分的季节分布特征及来源解析 贺博文, 聂赛赛, 王帅, 冯亚平, 姚波, 崔建升 (5152)
中国生活源挥发性有机物排放清单 梁小明, 陈来国, 沈国锋, 卢清, 刘明, 陆海涛, 任璐, 孙西勃, 林奎, 梁明易, 叶代启, 陶澍 (5162)
2011~2019 年中国工业源挥发性有机物排放特征 刘锐源, 钟美芳, 赵晓雅, 卢诗文, 田俊泰, 李银松, 侯墨, 梁小明, 黄皓旻, 范丽雅, 叶代启 (5169)
基于 LHS-MC 青岛市工业源 VOCs 排放清单及不确定性 徐琬莹, 付飞, 吕建华, 李瑞凡, 邵蕊, 和慧, 李淑芬, 左华 (5180)
典型橡胶制品业 VOCs 排放特征及对周边环境的影响 王海林, 辛国兴, 朱立敏, 薛松, 聂磊, 郝润 (5193)
沈阳市不同功能区挥发性有机物分布特征及臭氧生成潜势 库盈盈, 任万辉, 苏枫帆, 于兴娜 (5201)
天津城区夏冬季典型污染过程中 BTEX 变化特征及其健康风险评估 韩婷婷, 李颖若, 蒲维维, 姚青, 刘敬乐, 吴进, 张楠楠, 李梓铭, 马志强 (5210)
郑州市大气氨排放清单及驱动力分析 计尧, 王琛, 卢轩, 张欢, 尹沙沙 (5220)
基于 GAMs 模型分析成都市气象因子交互作用对 O_3 浓度变化的影响 张莹, 倪长健, 冯鑫媛, 王式功, 张小玲, 张家熙, 李运超 (5228)
长江干流表层水体悬浮物的空间变化特征及遥感反演 李建鸿, 黄昌春, 查勇, 王川, 尚娜娜, 郝维月 (5239)
河北省夏季降雨溶解性有机物光谱特征的空间分布、来源解析及氮素响应 张紫薇, 周石磊, 陈召莹, 张甜娜, 董宛佳, 甄瑞吟, 张馨童, 姚波, 崔建升 (5250)
城镇与城郊污染河道中 DOM 成分分布与影响因素 朱奔, 陈浩, 丁国平, 孙晓楠, 刘辉, 叶建锋 (5264)
北京城市河流水和沉积物中微塑料的组成与分布 胡嘉敏, 左剑恶, 李颀, 谢珍雯, 陈磊 (5275)
太湖西岸地表水中极性有机污染物非靶向筛查与生态风险评估 卢昕妍, 王菲, 张丽敏, 任晓鸣, 于南洋, 韦斯 (5284)
河水-地下水交互带沉积物中抗生素和代谢产物提取方法优化及其分布特征 李玉琼, 童蕾, 严涵, 尤悦, 卢钰茜, 刘慧 (5294)
白洋淀清淤示范区沉积物中抗生素和多环芳烃的分布特征与风险评估 王同飞, 张伟军, 李立青, 张美一, 廖桂英, 王东升 (5303)
雄安新区唐河污水库残留污染物对地下水水化学动态的作用机制 张志雄, 王仕琴, 张依章, 冯文钊 (5312)
基于时间序列模型的饮用水源地重金属健康风险分析与预测 姬超, 侯大伟, 谢丽, 孙华, 李发志, 周宇, 邓爱萍, 沈红军, 包广静, 王逸南 (5322)
千河下游水体-沉积物重金属空间分布、风险及影响因素 高煜, 王国兰, 金梓函, 张军, 耿雅妮 (5333)
巢湖流域丰水期可溶态重金属空间分布及污染评价 何苗, 刘桂建, 吴蕾, 齐翠翠 (5346)
洪泽湖围栏养殖对表层沉积物重金属含量影响与生态风险评估 瞿鑫源, 张鸣, 谷孝鸿, 阚可聪, 毛志刚, 陈辉辉, 曾庆飞 (5355)
成都市地表水天然水化学变化特征及影响因素 许秋瑾, 赖承钺, 丁瑶, 王照丽, 程中华, 于涛 (5364)
雷州半岛地下水化学特征及控制因素分析 彭红霞, 侯清芹, 曾敏, 黄长生, 师环环, 皮鹏程, 潘羽杰 (5375)
粤港澳大湾区陆源氮污染来源结构与空间分布 董斯齐, 黄翀 (5384)
红壤丘陵区小流域典型土地利用的面源氮磷输出特征 房志达, 苏静君, 赵洪涛, 胡炼, 李叙勇 (5394)
减氮条件下不同施肥模式对稻田氮素淋溶流失的影响 姜海斌, 张克强, 邹洪涛, 马璇骏, 渠清博, 谷艳茹, 沈仕洲 (5405)
互花米草入侵对胶州湾湿地土壤磷赋存形态的影响 沙梦乔, 柴娜, 赵洪涛, 刘春井, 丁文超, 谢文霞 (5414)
基于 16S rRNA 高通量测序的北运河水体及沉积物微生物群落组成对比分析 彭柯, 董志, 邱琰茗, 郭道宇 (5424)
硅改性花生壳生物炭对水中磷的吸附特性 赵敏, 张小平, 王梁嵘 (5433)
高锰酸钾改性松木生物炭对 Pb(II) 的吸附特性 莫贞林, 曾鸿鹄, 林华, Asfandiyar Shahab, 石清亮, 张华 (5440)
混合金属氧化物/碳复合材料的制备及其对 Pb(II) 的吸附性能 卢予沈, 宗莉, 于惠, 牟斌, 王爱勤 (5450)
负载型钛凝胶的制备及其吸附去除三价砷的性能 孙晔洋, 周畅, 甘永海, 吴兵党, 张淑娟 (5460)
一体式短程硝化-厌氧氨氧化工艺启动过程的亚硝酸盐调控 左富民, 郑蕊, 隋倩雯, 钟慧, 陈彦霖, 魏源送 (5472)
生物炭和秸秆还田对紫色土旱坡地土壤团聚体与有机碳的影响 邓华, 高明, 龙翼, 赖佳鑫, 王莹燕, 王子芳 (5481)
紫色土旱坡地不同坡位土壤有机碳组分含量对施肥管理的响应 徐曼, 余添, 王富华, 王丹, 王莹燕, 杨文娜, 高明, 王子芳 (5491)
南阳盆地东部山区土壤重金属分布特征及生态风险评估 赖书雅, 董秋瑶, 宋超, 杨振京 (5500)
城郊农田土壤多环芳烃污染特征及风险评估 张秀秀, 卢晓丽, 魏宇宸, 朱昌达, 潘剑君 (5510)
我国东部沿海地区蔬菜中重金属累积分布特征及居民膳食暴露评估 孙帅, 耿柠波, 郭崔崔, 张保琴, 卢宪波, 张海军, 陈吉平 (5519)
典型矿区周边农业用地农产品安全风险及影响因素 霍彦慧, 王美娥, 谢天, 姜蓉, 陈卫平 (5526)
稻田土壤 Cd 污染与安全种植分区: 以重庆市某区为例 曹淑珍, 母悦, 崔敬鑫, 刘安迪, 程先, 符远航, 魏世强, 张进忠 (5535)
镉污染大田条件下不同品种水稻镉积累的特征及影响因素 王宇豪, 杨力, 康愉晨, 陈小红, 彭杰, 李佳欣, 陈文清 (5545)
纳米膜覆盖对畜禽粪便好氧堆肥进程及恶臭气体排放的影响 李永双, 孙波, 陈菊红, 彭霞薇, 白志辉, 庄绪亮 (5554)
《环境科学》征订启事 (5108) 《环境科学》征稿简则 (5151) 信息 (5249, 5263, 5283)

基于 GAMs 模型分析成都市气象因子交互作用对 O₃ 浓度变化的影响

张莹^{1,2}, 倪长健^{1*}, 冯鑫媛¹, 王式功¹, 张小玲^{1,3}, 张家熙¹, 李运超¹

(1. 成都信息工程大学大气科学学院, 高原大气与环境四川省重点实验室, 成都 610225; 2. 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029; 3. 北京城市气象研究院, 京津冀环境气象预报预警中心, 北京 100089)

摘要: 为探究成都市大气环境中气象因子交互作用对臭氧(8h 浓度平均最大值, 统一用 O₃ 表示)浓度变化的影响特征, 利用成都市 2014~2019 年逐日大气污染物资料以及同期的气象资料, 采用广义相加模型(generalized additive models, GAMs)分析气象因子对 O₃ 浓度变化的影响效应。结果表明, 单影响因素的 GAMs 模型中, O₃ 浓度与最高气温、日照时数、相对湿度、风速、降水量、最大混合层厚度(maximum mixed depth, MMD)和通风系数(ventilation coefficient, VC)间均呈非线性关系, 无论全年还是夏季, 最高气温、日照时数、MMD 和相对湿度对 O₃ 浓度影响均较大, 值得注意的是, 夏季相对湿度和降水量对 O₃ 浓度变化的影响较全年更加显著。在构建 O₃ 浓度变化的多气象因子 GAMs 模型中, 除平均风速以外的其他气象因子共同作用对 O₃ 浓度变化有显著影响, 就全年而言, 构建的 GAMs 模型判定系数(R²)为 0.849, 方差解释率为 85.1%, 最高气温是全年 O₃ 浓度变化的主导影响因素; 夏季 GAMs 模型的 R² 为 0.811, 方差解释率为 81.3%, 而夏季最高气温和 MMD 同为重要影响因素。GAMs 交互效应模型中, 就全年而言, 最高气温与日照时数、相对湿度、降水量间交互作用, 以及日照时数和 MMD 间交互作用对 O₃ 浓度变化影响显著, 结合三维可视化图形直观分析气象因子交互作用对 O₃ 浓度变化的影响特征, 发现强高温+强日照+MMD(2 000 m 左右)+无降水条件协同作用下有利于 O₃ 的生成; 就夏季而言, 仅最高气温分别与日照时数和 VC 交互作用对 O₃ 浓度的影响显著, 夏季强高温+强日照+水平方向小风速有利于近地层 O₃ 浓度的生成。运用 GAMs 模型能够对 O₃ 污染的主导气象因子进行识别, 并量化分析气象因子单效应及其交互作用对 O₃ 浓度变化的影响特征, 对 O₃ 浓度污染防控研究具有重要指示意义。

关键词: 广义相加模型(GAMs); O₃ 浓度变化; 影响因素; 交互作用; 成都市

中图分类号: X515 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)11-5228-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202102056

Interactive Effects of the Influencing Factors on the Changes of O₃ Concentrations Based on GAMs Model in Chengdu

ZHANG Ying^{1,2}, NI Chang-jian^{1*}, FENG Xin-yuan¹, WANG Shi-gong¹, ZHANG Xiao-ling^{1,3}, ZHANG Jia-xi¹, LI Yun-chao¹

(1. Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3. Environmental Meteorology Forecast Center of Beijing-Tianjin-Hebei, Beijing 100089, China)

Abstract: To explore the influence characteristics of the interaction effects between meteorological factors on ozone(O₃) concentration in Chengdu, daily air pollutants and meteorological data from 2014 to 2019 were collected. Generalized additive models(GAMs) were adopted to explore the effects of different factors on O₃ concentration. The results showed that the relationship between O₃ and maximum temperature, sunshine hours, relative humidity, wind speed, precipitation, maximum mixed depth(MMD), and ventilation coefficient(VC) was non-linear. Specifically, the maximum temperature, sunshine hours, MMD, and relative humidity had a significant influence on O₃ concentration throughout the year. It is worth noting that the influence of relative humidity and precipitation on O₃ concentration during summer was more significant than that for the whole year. In the multi-meteorological factors GAMs of O₃ concentration, the meteorological factors mentioned above, except average wind, had significant impacts on O₃ concentration change. For the whole year, the judgment coefficient(R²) was 0.849 and the variance explanation rate was 85.1%. The maximum temperature was the most important influencing factor on O₃ concentration throughout the year. During summer, corresponding R² was 0.811 and the explanation rate of variance was 81.3%; however, maximum temperature and MMD were the dominant meteorological factors. In the interaction GAMs, for the whole year, the interaction between maximum temperature and sunshine hours, relative humidity, and precipitation, and the interaction between sunshine hours and MMD had a significant impact on O₃ concentrations. The interaction between maximum temperature and sunshine hours played a leading role in changes of O₃ concentration. The high temperature + strong radiation + MMD(about 2 000 m) + no precipitation were conducive to the formation of O₃ concentration, but in summer, only the maximum temperature, sunshine hours, and VC had the most significant effect on the O₃ concentration, and strong high temperatures + strong radiation + the little horizontal wind in summer were conducive to the formation of O₃ concentration near the surface. In summary, GAMs model can not only be used to identify the dominant influencing factors of O₃ pollution, but also quantitatively analyze the influence of single

收稿日期: 2021-02-06; 修订日期: 2021-04-19

基金项目: 四川省重大科技项目(2018SZDX0023); 四川省科技厅应用基础研究项目(2020YJ0425); 成都市科技厅技术创新研发项目(2018-YF05-00219-SN); 国家自然科学基金项目(42005136); 中国博士后科学基金项目(2020M670419); 四川省教育厅项目(2018ZJ14); 成都信息工程大学科研项目(KYTZ201723)

作者简介: 张莹(1988~), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为环境气象与健康, E-mail: zhangy881208@126.com

* 通信作者, E-mail: ncj1970@163.com

effects and interaction of influencing factors on O_3 concentration, which has great significance for the prevention and control of O_3 pollution.

Key words: generalized additive models (GAMs); change of O_3 concentration; influencing factors; interactive effects; Chengdu City

近地层臭氧和细颗粒物被认为是影响环境空气质量最主要的两种大气污染物^[1], 近年来, 国家采取了一系列的大气污染防治措施, 使得我国大部分城市的细颗粒物污染逐年减轻, 冬半年空气质量得到了显著改善, 但臭氧污染仍呈现逐年加重的态势 (尤其是夏半年)^[2]. 2018 年我国空气质量分析报告指出: 中国 169 个地级及以上城市中, 以臭氧每日最大 8 h 平均浓度 (统一用 O_3 表示) 为首要污染物的天数占总超标天数的 43.5%, 年均值为 $169 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 超标天数为 13.7%, 其年均浓度超过了世界卫生组织 (WHO) 颁布的空气质量准则 (air quality guidelines)^[3] 中 O_3 的标准 ($100 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), 尤其是夏半年, O_3 已取代细粒子成为我国部分大气污染防治区域首要污染物. 与此同时, O_3 是一种具有强氧化性的气体, 会对人体造成损害^[4], 目前已有大量生物医学研究表明, O_3 与人群急诊就诊、住院及死亡等多种健康结局存在显著关联^[5,6], O_3 对人群健康的不利影响已经引起我国政府部门和广大民众及研究学者的广泛关注, 当前我国的区域空气质量管控已经进入了细粒子和 O_3 协同防治的深水区, 大气环境持续改善任重道远^[7].

众所周知, O_3 的产生通常受前体物排放和大气化学反应的影响, 但区域 O_3 浓度变化与气象背景场密切相关, 受多种环境因素影响, 不同区域诱发 O_3 污染的气象成因存在明显的地域差异^[8,9], 从而导致不同区域地表 O_3 浓度气象因子研究一直是比较热门的话题. 前人学者已从 O_3 扩散及传输和污染气象成因等方面, 应用地理信息系统软件、空间自相关分析和天气客观分型等多种方法, 开展了一系列相关研究^[10~14]. 已有研究发现就影响 O_3 的气象因子而言, 前人主要研究了太阳辐射、温度 (尤其是最高气温)、相对湿度、风速和降水等气象因子对 O_3 浓度的影响^[15~17], 且气象因子的影响因区域不同而各异. 但现有研究大多只考虑 O_3 浓度与气象因子之间的线性关系而忽略了不同变量间复杂的非线性关系. 近期有研究指出 O_3 的组分和来源较为复杂, 气象因子的影响包括复杂的物理化学过程, 因此需要考虑 O_3 浓度和不同气象因子之间复杂的非线性关系^[18]. 目前越来越多研究尝试运用非线性模型和方法探讨影响大气污染物浓度变化的因素, 而广义可加模型 (generalized additive models, GAMs) 就是其中之一^[19], GAMs 是由广义线性模型和可加模型发展而来的, 其优点是可以同时拟合响应变量与解释

变量之间复杂的线性和非线性关系, 该模型十分灵活, 且并非事先建立好的, 而是由所研究的数据驱动的^[20]. 贺祥等^[21] 的研究率先尝试基于 GAMs 模型开展南京市 2013 ~ 2015 年影响因素交互作用对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化的影响, 并取得了较好地效果. 但现阶段关于运用非线性模型方法探讨影响因素对 O_3 浓度变化的影响研究还很有限, 从影响因素交互作用对 O_3 浓度变化影响的研究成果更是鲜见报道.

成都平原作为四川盆地经济和文化中心, 尤其是近几年夏季由光化学反应造成的以 O_3 为代表的大气污染日趋凸显, 现阶段关于成都市当地 O_3 污染气象成因方面的研究也已很多^[22,23], 一方面, 现有研究更多侧重于线性相关关系而忽略了 O_3 与气象因子之间复杂的非线性关系, 另一方面, 现有的研究没有考虑不同气象因子交互作用对 O_3 浓度变化的影响效应. 基于此, 本研究在借鉴前人研究成果的基础上, 选取人口密度大且夏季 O_3 污染重的成都市作为研究对象, 尝试运用 GAMs 模型构建成都市 O_3 浓度变化与其主要气象因子 (主要包括常规气象要素和污染气象参数) 之间复杂的非线性关系, 在此基础上, 进一步深入探讨不同气象因子交互作用对 O_3 浓度变化的影响特征, 以期在当地开展 O_3 污染防治提供一定的科学依据.

1 材料与方法

1.1 资料来源

1.1.1 大气环境监测资料

2014 年 1 月 1 日至 2019 年 12 月 31 日成都市大气污染物数据来源于中华人民共和国生态环境部 (<http://www.mee.gov.cn/>), 包括 6 个国控监测站点每日臭氧 8h 浓度平均最大值 (后面统一采用 O_3 表示, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), 6 个国控监测站点中包括 3 个城市环境评价站点 (金泉两河、三瓦窑、沙河铺)、2 个交通污染监控站点 (十里店、梁家巷) 和 1 个郊区环境评价站点 (灵岩寺). 这些站点从中心市区到边远郊区分散在成都市, 覆盖了成都市大部分空间地区和典型地形. 通过 6 个国控监测站点平均来获取成都市 O_3 浓度均值, 计算严格参照环境空气质量标准 (GB 3095-2012) 进行质量控制, 同时剔除部分时段由于停电、仪器校准等原因出现的缺测, 经核查, 数据有效性为 97.45%.

1.1.2 气象资料来源

2014 年 1 月 1 日至 2019 年 12 月 31 日的地

面气象资料来源于中国气象科学数据共享服务网 (<http://data.cma.gov.cn/>) 成都市地面常规气象观测资料, 包括成都市下属的 14 个气象观测站点(崇州、温江、都江堰、彭州、郫县、新津、浦江、邛崃、大邑、龙泉驿、双流、新都、简阳和金堂), 通过站点平均来获取成都市逐日地面气象资料, 主要包括最高气温(℃)、降水量(mm)、相对湿度(%)、日照时数(h)和平均风速($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)等指标, 经核查, 地面气象资料无缺测. 同时还收集到温江站同期的 Micaps 探空资料用于下文污染气象参数的计算, 经核查, 探空资料有效性为 96.46%.

1.1.3 污染气象参数

边界层的变化与污染物浓度的扩散稀释密切相关, 本研究主要采用最大混合层厚度(maximum mixing depth, MMD)和通风系数(ventilation coefficient, VC)两个污染气象参数分别从热力和动力两方面反映边界层的结构特征.

最大混合层厚度: MMD 是湍流特征不连续界面以下的大气, 表征污染物在垂直方向被热力湍流、动力湍流、对流输送所能达到的高度^[24]. MMD 是影响大气污染物垂直扩散的重要参数.

通风系数: 混合层高度与混合层内平均风速的乘积称为通风系数, 可反映混合层内通风情况(用 VC 表示, 单位 $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)^[25]. VC 越小越不利于大气污染物扩散, 从热力角度有效表征底层大气的静稳特征, VC 是影响大气污染物扩散的重要污染气象参数. 其计算公式如下:

$$\text{VC} = \text{MMD} \times V_{\text{mean}} \quad (1)$$

式中, MMD 为混合层厚度(m), V_{mean} 为混合层内水平风速的平均值($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$).

通过参考已有的研究成果^[21], 本文初步筛选出最高气温、日照时数、相对湿度、平均风速、降水量、MMD 和 VC 共 7 个要素作为 O_3 浓度变化的气象影响因素.

1.2 研究方法

本研究利用 R 软件(4.0.3 版本)中的“mgcv”程序包进行 GAMs 建模. GAMs 具有解决响应变量与解释变量之间复杂非线性关系的能力, 可以对部分解释变量进行线性拟合, 对其他解释变量进行平滑函数拟合^[17]. 本研究采用 GAMs 中的独立效应模型和交互效应模型. 首先, 采用独立效应模型分析不同影响因素单一作用以及多种影响因素同时作用对 O_3 浓度的影响效应. 在此基础上, 筛选出对 O_3 浓度变化产生显著影响的因素, 进一步采用交互效应模型, 探究影响因素两两交互作用对 O_3 浓度变化的影

响特征, 其具体步骤如下.

第一步, 采用 GAMs 独立效应模型估算影响因素对 O_3 浓度变化的影响效应, 该模型如下:

$$g(\mu) = s_1(x_1) + s_2(x_2) + \cdots + s_i(x_i) + x_j\theta + \alpha \quad (2)$$

式中, μ 为 O_3 浓度的期望值; $g(\mu)$ 为连接函数; $x_1, x_2, \cdots, x_i$ 为解释变量, 本研究中解释变量主要包括气象因子[最高气温、日照时数、相对湿度、降水量、平均风速、MMD 和 VC]; $s_1(), s_2(), \cdots, s_i()$ 为表示响应变量和解释变量之间复杂非线性关系的各种平滑函数, 主要包括自然立方样条函数(natural cubic spline function)、局部回归平滑函数(local regression function)和样条平滑函数(smoothing spline function)等^[26], 本研究采用自然立方样条函数, 可避免过度拟合现象. 其中, 在研究单一解释变量对响应变量的单因素效应时, 模型中只纳入一个解释变量, 即模型的右边只有一个 $s_i()$ 函数; 在研究多因素共同作用对响应变量的效应时, 模型中同时纳入多个解释变量, 即模型的右边有多个 $s_i()$ 函数相加; $x_j\theta$ 代表全参数模型成分; α 表示残差.

第二步, 在上述污染物独立效应研究的基础上, 筛选出对 O_3 浓度变化有显著效应的主要影响因素, 进一步建立 O_3 浓度变化的 GAMs 交互效应模型, 并直观给出对 O_3 浓度变化有显著影响的主要影响因素交互效应三维空间图, 定量分析其对 O_3 浓度变化的影响特征, 具体模型如下:

$$g(\mu) = \text{ts}(x_i, x_j) + \cdots + \text{ts}(x_k, x_l) + \alpha \quad (3)$$

式中, $g(\mu)$ 是连接函数; $\text{ts}()$ 为薄板样条函数(thin-plate spline), x_i, x_j, x_k 和 x_l 为对 O_3 浓度变化有显著影响的不同解释变量; $\text{ts}(x_i, x_j)$ 为解释变量 x_i 和 x_j 交互作用对 O_3 浓度变化影响的交叉项; α 表示残差. 在上述研究基础上, 利用 gam.check 检验模型拟合效果, 防止过拟合现象.

利用 GAMs 模型给出的 F 统计值、 P 值、 R^2 和方差解释率来判断不同解释变量对 O_3 浓度变化的影响显著性及模型拟合优度^[27], 其中影响因素对应的 F 统计值越大, 表明其相对重要性越大; P 值是用于判断假设检验结果的另一参数, P 值越小, 表明结果越显著; 调整判定系数(R^2)为回归平方和与总离差平方和的比值, R^2 的取值范围 0~1, R^2 越接近 1 表明模型越精确, 回归拟合效果越显著; 方差解释率越高, 表明拟合效果越优; 此外, 当解释变量的自由度 = 1 时表明解释变量与响应变量为线性关系, 当自由度 > 1 时为非线性关系.

2 结果与讨论

2.1 O₃ 浓度变化的单影响因素 GAMs 模型分析

在进行单因素分析中将 O₃ 作为响应变量,将最高气温、日照时数、相对湿度、降水量、平均风速、最大混合层厚度和通风系数稳定能量共 7 个气象因子作为解释变量,每次仅选取一个气象因子作为解释变量,采用自然立方样条平滑函数构建 O₃ 浓度变化的单影响因素 GAMs 模型. 通过 GAMs 模型给出的 *F* 统计值、*P* 值、*R*² 和方差解释率来判断不同解释变量对 O₃ 浓度变化的影响显著性及模型的拟合优度. 由表 1 可知,所有解释变量的自由度均大于 1,即所有

解释变量与 O₃ 之间均呈非线性关系,且所有气象因子均在 *P* < 0.001 水平下对 O₃ 浓度变化影响显著,表明所有气象因子单独作为 O₃ 浓度变化的解释变量均有统计学意义. 综合 *F* 统计值、*P* 值、*R*² 和方差解释率可知,单一解释变量对 O₃ 浓度变化的影响程度由高到低依次为: 最高气温 > 日照时数 > MMD > 相对湿度 > VC > 平均风速 > 降水量,尤其是最高气温、日照时数、MMD 和相对湿度对 O₃ 浓度变化影响的调整判定系数(*R*²)均较大(0.224 ~ 0.705),方差解释率均较高(22.6% ~ 70.60%),模型拟合度较优,即最高气温、日照时数、MMD 和相对湿度单独作为解释变量时对 O₃ 浓度变化的影响较显著.

表 1 2014 ~ 2019 年成都市 O₃ 与单影响因素的 GAMs 模型假设检验结果¹⁾

Table 1 GAMs hypothesis test results between O ₃ concentration and single-influencing factor in Chengdu from 2014 to 2019						
参数	估计自由度	参考自由度	<i>F</i>	<i>P</i>	调整判定系数 (<i>R</i> ²)	方差解释率 /%
最高气温	4.485	5.546	840.40	< 2E - 16 ***	0.705	70.60
日照时数	7.402	8.367	262.00	< 2E - 16 ***	0.529	53.10
相对湿度	3.930	4.938	114.50	< 2E - 16 ***	0.224	22.60
平均风速	3.884	4.852	29.77	< 2E - 16 ***	0.069 9	7.17
降水量	2.925	3.646	9.09	2.16E - 06 ***	0.016 8	1.83
MMD	6.110	7.301	163.00	< 2E - 16 ***	0.379	38.10
VC	4.716	5.806	81.80	< 2E - 16 ***	0.197	19.90

1) *** 表示在 0.001 水平下变量是显著的

成都市 O₃ 整体呈现出冬高夏低的分布特征(图 1),O₃ 超标主要出现在夏季,因此本文进一步分析成都市夏季单一气象因子对 O₃ 浓度变化的影响(表 2),值得注意的是,平均风速仅通过 0.05 水平下的显著性检验,而其他影响因素均在 *P* < 0.001 水平下对 O₃ 浓度变化影响显著,尤其是夏季

相对湿度和降水量对 O₃ 浓度变化的影响较全年更加显著. 夏季单一解释变量对 O₃ 浓度变化的影响程度由高到低依次为: 最高气温 > 日照时数 > MMD > 相对湿度 > VC > 降水量 > 平均风速,与全年类似,夏季也是最高气温、日照时数、MMD 和相对湿度单独作为解释变量时对 O₃ 浓度变化的影响较显著.

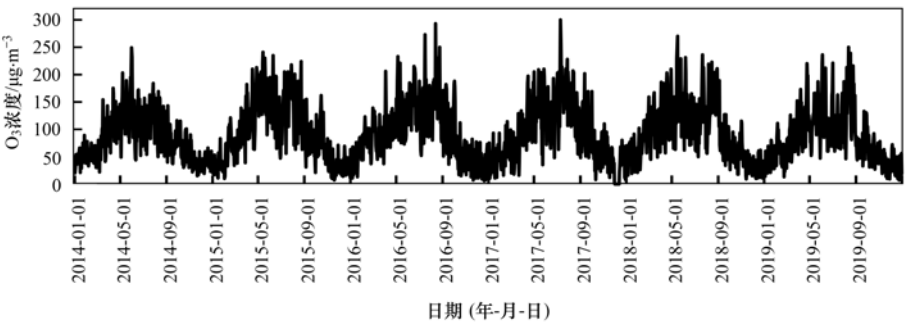


图 1 研究时段 O₃ 浓度时间序列

Fig. 1 Time series of O₃ concentration in study period

2.2 O₃ 浓度变化的多影响因素 GAMs 模型建模

在进行全年 O₃ 浓度变化多影响因素 GAMs 模型建模时,初步将单影响因素分析中有统计学意义和经过显著性检验的 7 个气象因子(最高气温、相对湿度、风速、降水量和日照时数、最大混合层厚度和通风系数)同时作为解释变量,将 O₃ 浓度作为响应变量,构建 O₃ 浓度变化的多气象因子 GAMs 模

型. 模型拟合结果如表 3 所示,在多影响因素模型中,除平均风速对应的 *P* > 0.1,未通过在 0.1 水平下的显著性检验外,其他 6 个解释变量均在 *P* < 0.001 (或 *P* < 0.01) 水平下对 O₃ 浓度变化影响显著. 模型的 *R*² = 0.843,方差解释率 84.5%,模型拟合度整体较高,因此,可以确定最高气温、相对湿度、日照时数、降水量、MMD 和 VC 共同作用对 O₃

表 2 2014~2019 年夏季成都市 O₃ 与单影响因素的 GAMs 模型假设检验结果¹⁾

Table 2 GAMs hypothesis test results between O₃ concentration and single-influencing factor in summer of Chengdu from 2014 to 2019

参数	估计自由度	参考自由度	<i>F</i>	<i>P</i>	调整判定系数 <i>R</i> ²	方差解释率 /%
最高气温	3.346	4.227	184.40	<2E-16***	0.629	63.20
日照时数	5.800	6.956	103.40	<2E-16***	0.610	61.50
相对湿度	2.771	3.513	92.15	<2E-16***	0.414	41.70
平均风速	2.658	3.350	2.693	0.0342*	0.0178	2.35
降水量	7.983	8.721	7.254	<2E-16***	0.115	13.00
MMD	1.659	2.076	178.20	<2E-16***	0.446	44.80
VC	4.416	5.443	13.46	<2E-16***	0.139	14.70

1) *** 表示在 0.001 水平下变量是显著的, * 表示在 0.05 水平下变量是显著的

表 3 2014~2019 年 O₃ 浓度与 7 个气象因子的 GAM 模型拟合结果¹⁾

Table 3 GAMs model hypothesis test results between O₃ concentration and seven meteorological factors in Chengdu from 2014 to 2019

指标	最高气温	相对湿度	日照时数	平均风速	降水量	MMD	VC
估计自由度	5.395	4.767	1.436	2.330	5.524	6.050	1
参考自由度	6.549	5.880	1.747	2.965	6.649	7.127	1
<i>F</i>	563.215	48.827	8.828	1.659	2.897	32.304	36.610
<i>P</i>	<2E-16***	<2E-16***	0.00268**	0.15256	0.00635**	<2E-16***	<2E-16***

1) *** 表示在 0.001 水平下变量是显著的, ** 表示在 0.01 水平下变量是显著的

浓度变化有显著影响.在此基础上,进一步删除平均风速后,重新构建多影响因素的 GAMs 模型.

重新构建全年的 O₃ 浓度变化的多影响因素 GAMs 模型结果如表 4 所示,所筛选的最高气温、相对湿度、日照时数、降水量、MMD 和 VC 这 6 个解释变量的 *P* 值均 <0.01,具有统计学意义,表明上述 6 个解释变量与 O₃ 浓度之间存在较强的关联;值得注意的是 VC、日照时数均和 O₃ 浓度变化呈线性关系,而其他 4 个解释变量均与 O₃ 浓度呈复杂的非线性关系(估计自由度均 >1).最终构建的全年

O₃ 浓度变化 GAMs 模型为 $g(O_3) = s(\text{最高气温}) + s(\text{相对湿度}) + s(\text{降水量}) + s(\text{MMD}) + \text{日照时数} + \text{VC} + \alpha$, 调整后的 $R^2 = 0.849$, 方差解释率为 85.1%,由此说明多气象因子的 GAMs 模型拟合度整体较高,高于单一气象因子对 O₃ 浓度变化的拟合效应,这也从侧面印证了 O₃ 浓度的变化受多种气象因子共同作用.多气象因子 GAMs 模型中对 O₃ 浓度变化的影响程度由高到低依次为:最高气温 > 相对湿度 > MMD > VC > 日照时数 > 降水量,就全年而言,最高气温仍是 O₃ 浓度变化的主导影响因素.

表 4 2014~2019 年 O₃ 浓度与 6 个气象因子的 GAMs 模型拟合结果¹⁾

Table 4 GAMs model hypothesis test results between O₃ concentration and six meteorological factors in Chengdu from 2014 to 2019

指标	最高气温	相对湿度	日照时数	降水量	MMD	VC
估计自由度	4.820	4.260	1	4.770	5.14	1
参考自由度	5.340	5.911	1	5.540	6.181	1
<i>F</i>	568.857	50.969	8.828	3.024	39.789	33.909
<i>P</i>	<2E-16***	<2E-16***	0.00268**	0.00456**	<2E-16***	<2E-16***

1) *** 表示在 0.001 水平下变量是显著的, ** 表示在 0.01 水平下变量是显著的

以同样的方式构建夏季 O₃ 浓度变化的多影响因素 GAMs 模型如表 5 所示,最高气温、相对湿度、日照时数、降水量、MMD 和 VC 这 6 个解释变量的 *P* 值均 <0.01,具有统计学意义,与全年不同的是,夏季日照时数、MMD 均和 O₃ 浓度变化呈线性关系,而其他 4 个解释变量均与 O₃ 浓度呈非线性关系.最终构建的夏季 O₃ 浓度变化 GAMs 模型为 $g(O_3) = s(\text{最高气温}) + s(\text{相对湿度}) + s(\text{降水量}) + s(\text{VC}) + \text{日照时数} + \text{MMD} + \alpha$, 调整后的 $R^2 = 0.811$, 方差解释率为 81.3%,夏季多气象因子的

GAMs 模型中对 O₃ 浓度变化的影响程度由高到低依次为:最高气温 > MMD > 相对湿度 > 日照时数 > VC > 降水量,夏季最高气温和 MMD 共为 O₃ 浓度变化的主要影响因素.

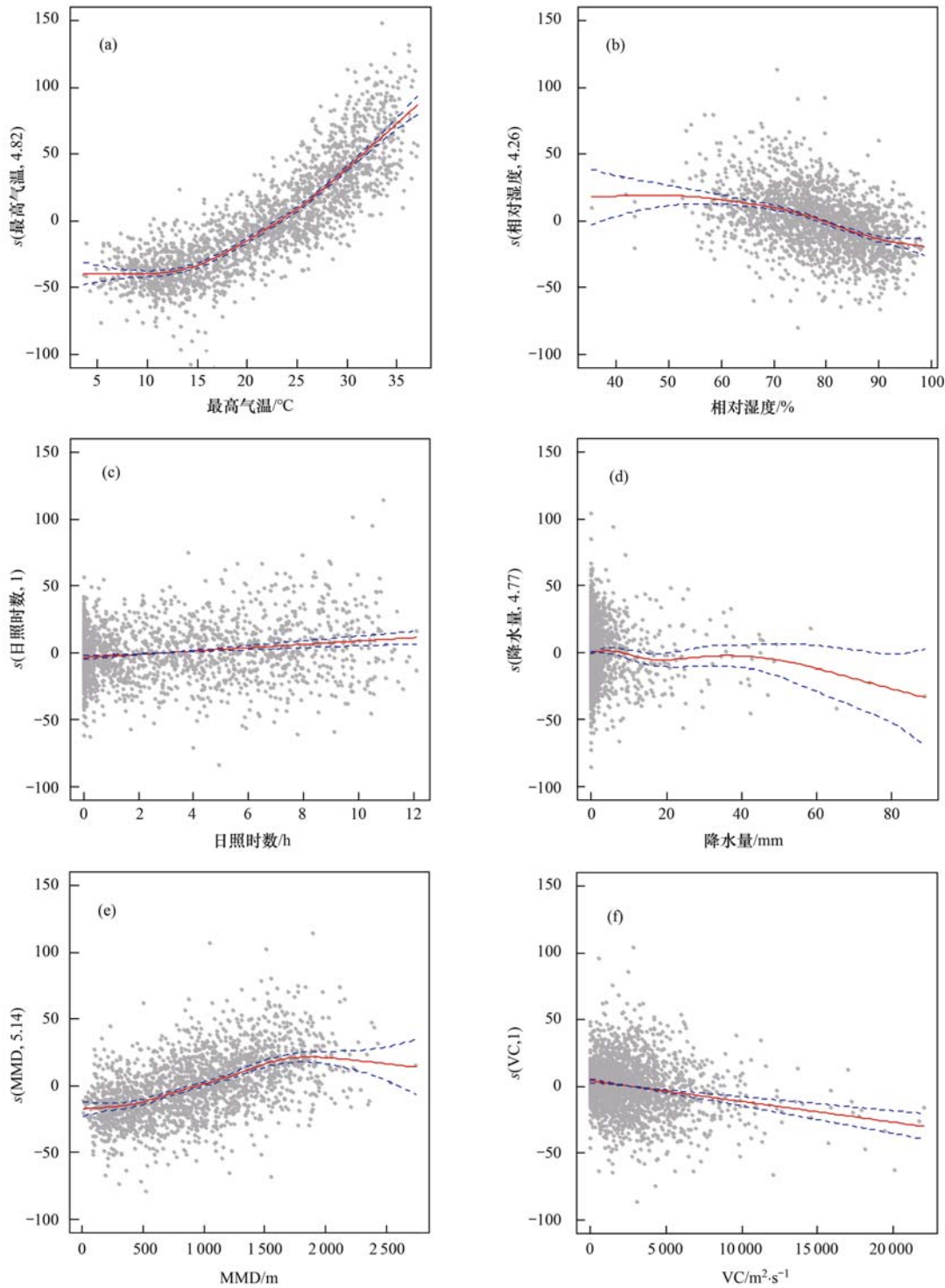
2.3 O₃ 浓度变化的多因素影响效应诊断分析

图 2 为全年与 O₃ 浓度变化密切相关的 6 个解释变量(最高气温、相对湿度、日照时数、降水量、MMD 和 VC)对应的 O₃ 浓度变化影响效应.从中可直观地看出,O₃ 与日照时数和 VC 呈线性关系,而与最高气温、相对湿度、降水量和 MMD 均呈非线

表 5 2014~2019 年夏季 O₃ 浓度与 6 个影响因素的 GAMs 模型拟合结果¹⁾

指标	最高气温	相对湿度	日照时数	降水量	MMD	VC
估计自由度	2.612	1.834	1	3.360	1	1.241
参考自由度	3.566	2.220	1	4.217	1	1.591
<i>F</i>	28.702	13.177	9.813	2.343	27.814	4.847
<i>P</i>	<2E-16***	1.73E-06***	0.00185**	0.04663*	<2E-16***	0.01141*

1) *** 表示在 0.001 水平下变量是显著的, ** 表示在 0.01 水平下变量是显著的, * 表示在 0.05 水平下变量是显著的,下同



横坐标为解释变量的观测值,纵坐标为解释变量对 O₃ 浓度的平滑拟合值,纵坐标括号中表示气象因子及其对应的估计自由度,红色实线为解释变量对 O₃ 浓度的平滑拟合曲线,蓝色虚线为 95% 的置信区间,灰色点为实测样本点

图 2 2014~2019 年成都市多影响因素对 O₃ 浓度变化的影响效应

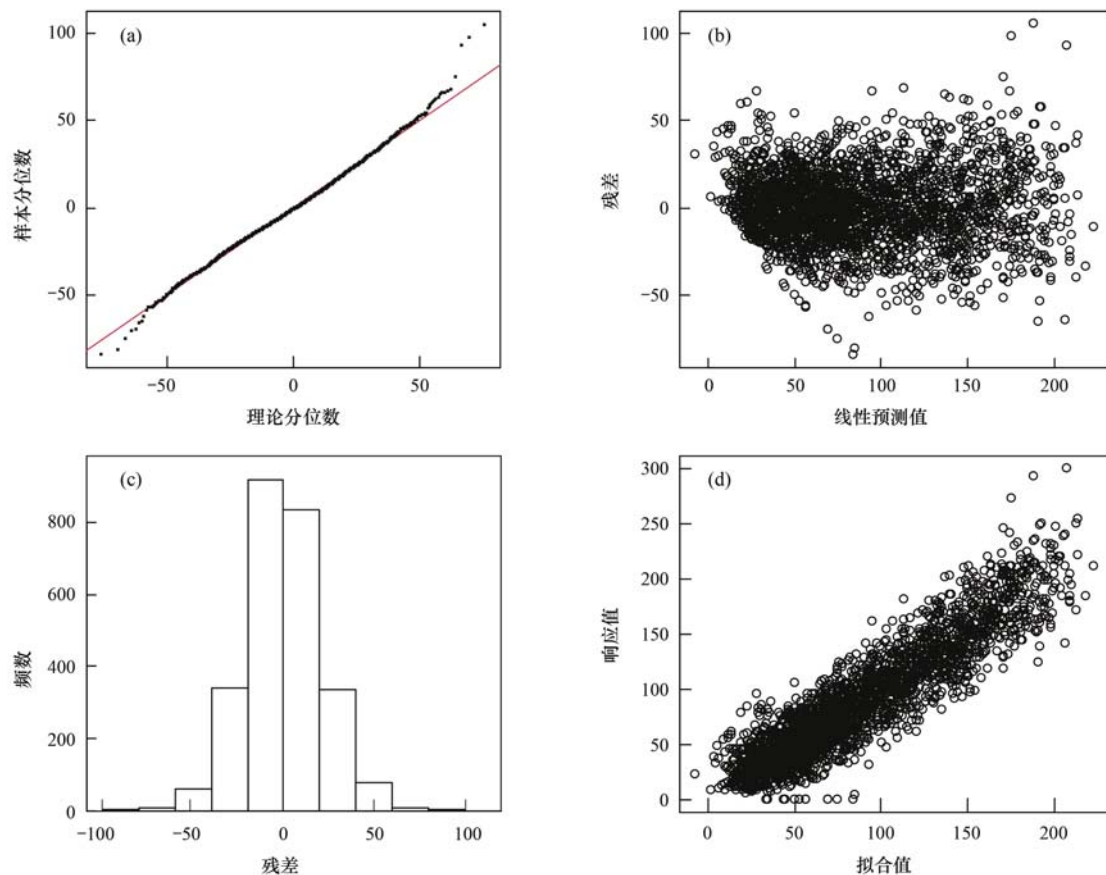
Fig. 2 Effect of influencing factors on the variation of O₃ concentration in Chengdu from 2014 to 2019

性关系. 具体而言, O_3 浓度随最高气温的升高近似于指数增长, 而随日照时数的增长呈线性上升趋势; O_3 浓度随相对湿度和降水量的增加均呈非线性波动减弱趋势, 以 70% 相对湿度作为临界值, 当相对湿度小于 70% 时, O_3 浓度随相对湿度的增加缓慢降低, 当相对湿度大于 70% 后, O_3 浓度随相对湿度的增大而迅速降低; O_3 浓度随降水量的增加呈现先迅速减小后缓慢减小的趋势, 尤其当降水量介于 10 ~ 20 mm 时 O_3 浓度减小趋势明显, 即中雨对 O_3 的清除作用最明显; O_3 浓度随 MMD 的增加整体呈先迅速增大后趋于平稳的趋势, 具体为当 MMD 小于 2 000 m 时 O_3 浓度随 MMD 的增大而迅速增加, 之所以出现这样分布趋势的可能原因是 MMD 反映了热力对流的强弱, 在白天, 太阳辐射强, 地表增温快, 这为 O_3 的生成提供了有利条件, 虽然逐渐增强的上升运动能将一部分 O_3 带离地表, 但其对 O_3 的带离速度明显小于 O_3 的生成速度; O_3 浓度随 VC 的增加呈线性减小趋势, VC 在一定程度上反映了大气对 O_3 的水平输送能力, 即 VC 越小越不利于 O_3 的扩散.

进一步利用 `gam.check()` 函数对全年 O_3 浓度

变化的多气象因子 GAMs 模型拟合结果进行验证, 结果如图 3 所示, 由 `gam.check()` 函数获取的 QQ 图 (样本分位数与理论分位数)、散点图 (针对线性预测值的残差)、残差直方图和散点图 (针对拟合值的响应), 可知 QQ 图中的点大致在直线上, 可以认为样本数据来自正态分布总体; 残差值分布在 0 附近的频率较高, 模型的拟合度较好; 模型拟合后的响应变量和拟合值的匹配程度也很高.

图 4 为夏季与 O_3 浓度变化密切相关的 6 个解释变量对应的 O_3 浓度变化影响效应图. 从中可知, 夏季 O_3 与日照时数和 MMD 呈线性关系, 而与最高气温、相对湿度、降水量和 VC 均呈非线性关系. 具体而言, O_3 浓度与最高气温呈非线性正相关, 当平均气温小于 25℃ 时, O_3 浓度随最高气温的升高增长速度较慢, 随着最高气温的进一步升高 O_3 浓度增长速度加快; O_3 浓度随日照时数的增长而呈线性上升趋势; O_3 浓度随相对湿度的增加整体呈减小趋势, 尤其是当相对湿度高于 80% 后, O_3 浓度随相对湿度的增大而迅速减小; O_3 浓度随降水量的增加整体呈波动减小趋势, 与全年相比, 减小趋势更加明显, 尤其当降水量小于 20 mm 时减小趋势尤为明



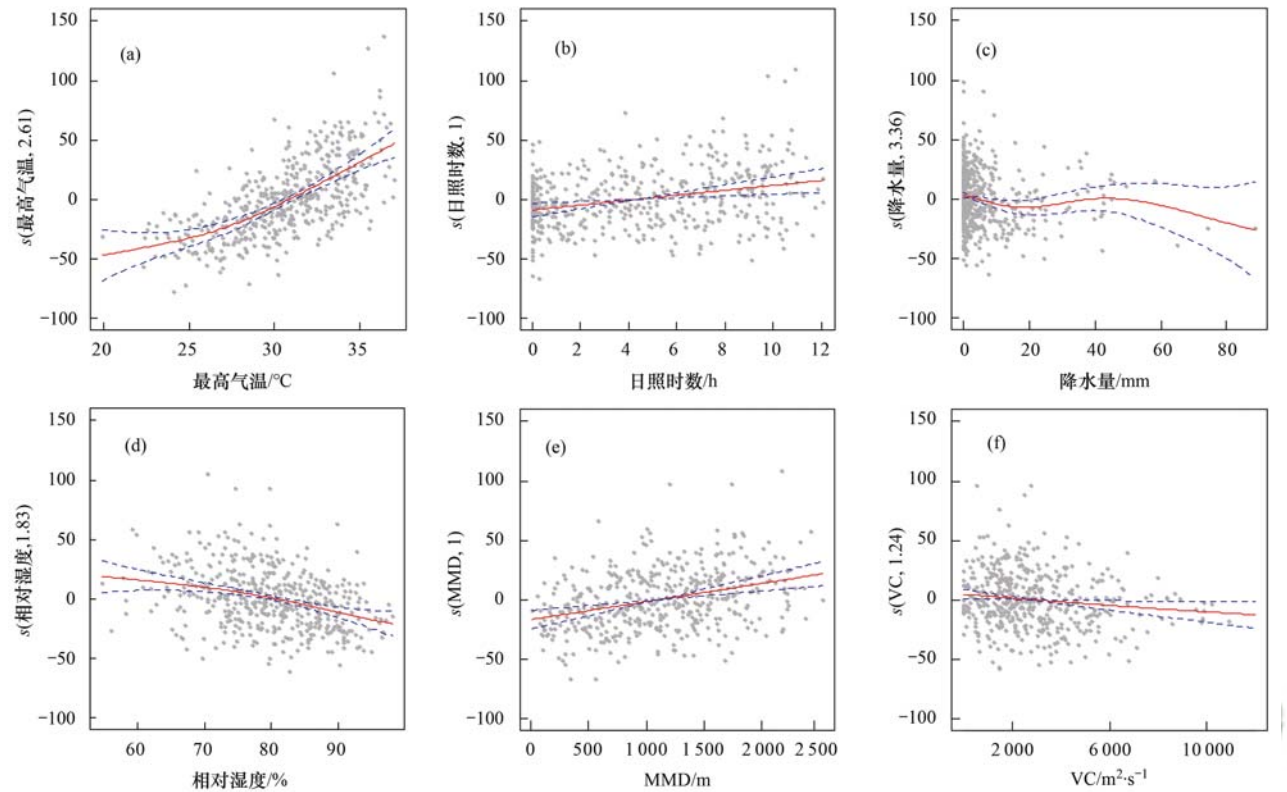
(a) QQ 图, (b) 线性预测值与残差散点图, (c) 残差直方图, (d) 响应值与拟合值散点图

图 3 GAMs 模型残差检验结果

Fig. 3 Residual test results of GAMs

显；O₃ 浓度随 MMD 的增加呈线性增加趋势，从侧面反映了强热力对流对应的高温 and 强日照时数有利

于近地层 O₃ 浓度的增加；与全年类似，O₃ 浓度随 VC 增加近似呈线性减小趋势。



横坐标为解释变量的观测值,纵坐标为解释变量对 O₃ 浓度的平滑拟合值,纵坐标括号中则代表气象因子及其对应的估计自由度,红色实线为解释变量对 O₃ 浓度的平滑拟合曲线,蓝色虚线为 95% 的置信区间,灰色点为实测样本点

图 4 2014 ~ 2019 年成都市夏季多影响因素对 O₃ 浓度变化的影响效应

Fig. 4 Effect of influencing factors on the variation of O₃ concentration in summer of Chengdu from 2014 to 2019

2.4 影响因素交互作用对 O₃ 浓度变化的影响效应
不同的气象因子对 O₃ 浓度变化的影响效应并非孤立存在,可能存在交互作用. 通过构建影响因素对 O₃ 浓度变化影响的 GAMs 交互效应模型,有利于全面、深入地认识不同气象因子交互作用对 O₃ 浓

度变化的影响特点. 影响因素两两交互作用对 O₃ 浓度变化的影响结果如表 6 所示,交叉项的估计自由度均大于 1,即所有交叉项与 O₃ 浓度变化均呈非线性关系;模型的 $R^2 = 0.862$,方差解释率 86.6%,模型拟合程度较高,交互作用影响因素对 O₃ 浓度变化

表 6 影响因素交互作用与 O₃ 浓度的 GAMs 模型假设检验结果¹⁾

Table 6 GAMs hypothesis test results between O₃ concentration and interaction of influencing factors

交叉项	最高气温-日照时数	最高气温-相对湿度	最高气温-MMD	最高气温-降水	最高气温-VC
估计自由度	9.77	11.905	1.341	14.678	1
参考自由度	10.71	12.356	1.459	15.744	1
<i>F</i>	34.280	27.355	0.170	5.556	0.062
<i>P</i>	<2E-16***	<2E-16***	0.0794	<2E-16***	0.1376
交叉项	相对湿度-日照时数	相对湿度-MMD	相对湿度-VC	相对湿度-降水	MMD-日照时数
估计自由度	10.987	13.341	1.702	4.290	11.223
参考自由度	11.533	16.000	2.515	5.346	13.594
<i>F</i>	0.146	0.0335	0.0565	0.159	4.006
<i>P</i>	0.0953	0.2016	0.1073	0.0921	<2E-16***
交叉项	MMD-VC	MMD-降水	日照时数-VC	日照时数-降水	VC-降水
估计自由度	16.256	2.222	2.19	1.345	1.271
参考自由度	17.874	3.157	3.244	1.574	1.585
<i>F</i>	0.0252	0.0264	0.0309	0.063	0.079
<i>P</i>	0.0648	0.0603	0.2131	0.1672	0.1357

1) *** 表示在 0.001 水平下变量是显著的

的解释率较高. 模型方程中最高气温-日照时数、最高气温-相对湿度、最高气温-降水和MMD-日照时数共4个交叉解释变量项均通过显著性检验, 在 $P < 0.001$ 水平下显著影响 O_3 浓度变化, 这与 O_3 浓度变化主要受到多气象因子交互作用过程影响的特征吻合.

对通过显著性检验且具有统计学意义的气象因

子交互模型进行可视化绘图(图5), 可分析响应变量 O_3 浓度在不同自变量维度的同时变化特征. 由图5(a)~5(c)可知, 最高气温与日照时数、相对湿度和降水量交互作用对 O_3 浓度的影响效应中, 最高气温占主导作用, 整体而言, O_3 浓度随着最高气温的升高而显著增加, 但 O_3 浓度在最高气温与其他影响交互作用下又存在各自的特点. 具体而言, 最高气温和日

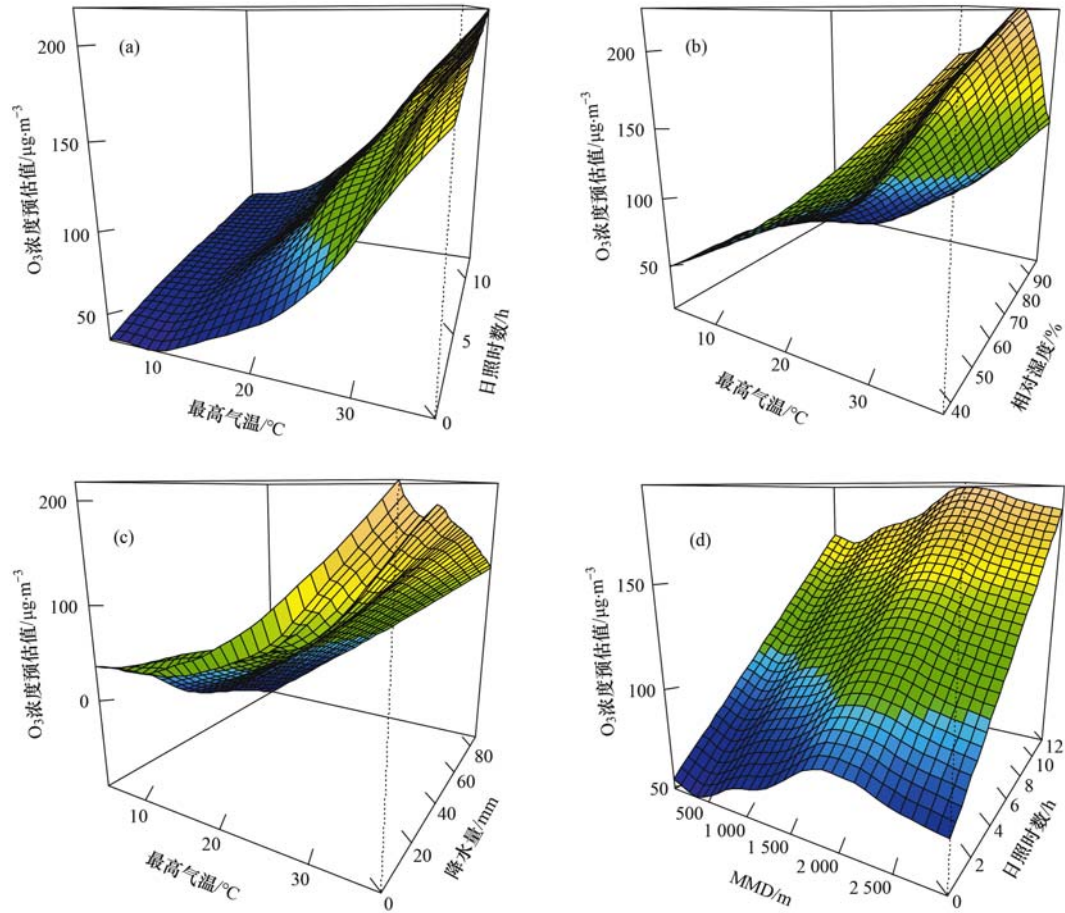


图5 全年气象因子交互作用对 O_3 浓度变化影响的三维空间效应

Fig. 5 Three-dimensional effect graph of annual meteorological factors interaction on O_3 concentration change

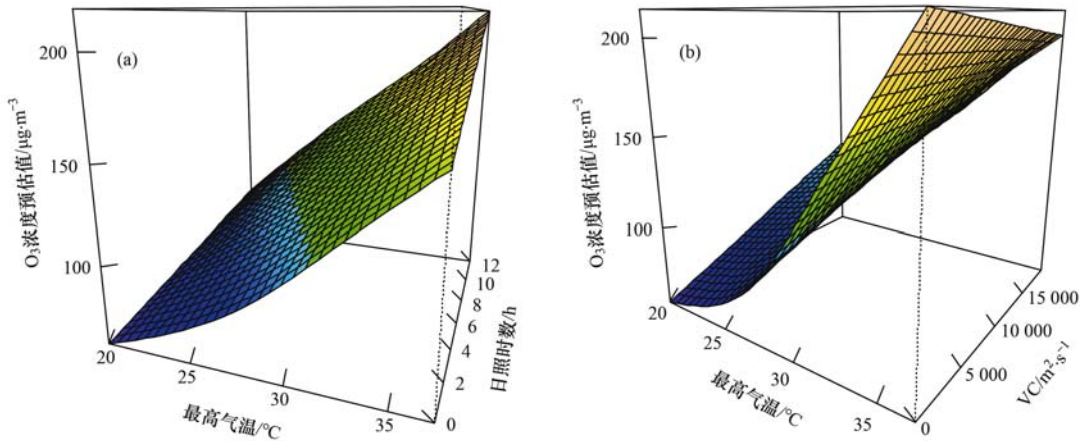


图6 夏季气象因子交互作用对 O_3 浓度变化影响的三维空间效应

Fig. 6 Three-dimensional effect graph of meteorological factors interaction on O_3 concentration change in summer

照时数对 O_3 浓度的增加存在协同放大效应,即高温与长日照时数共存情况下, O_3 浓度达到最大;高温条件下,当相对湿度接近 70% 时、降水量为 0 mm 时, O_3 浓度均出现高值.由图 5(d)可知,MMD 和日照时数的交互作用中,当 MMD 达到 2 000 m 附近时,日照时数越长 O_3 浓度越大.综上所述,高温 + 长日照时数 + MMD(2 000 m 左右) + 降水量(0 mm)条件协同作用下有利于 O_3 浓度的生成.

夏季影响因素两两交互作用对 O_3 浓度变化的影响结果中,仅最高气温-日照时数和最高气温-VC 这 2 项交叉解释变量项均通过显著性检验,在 $P < 0.001$ 水平下显著影响 O_3 浓度变化(表略).夏季气象因子交互作用可视化三维图如图 6 所示,由 6(a)可知强高温与长日照时数交互作用对 O_3 浓度的生成起协同放大作用;由 6(b)可知较低 VC 与强高温共存情况下 O_3 浓度最大,VC 均反映了大气的扩散能力,一般高温条件下垂直对流较强(MMD 较大),VC 值越小表明水平方向风速较小,综上所述,夏季强高温 + 长日照时数 + 水平方向小风速有利于近地层 O_3 浓度的生成.

3 结论

(1)在构建 O_3 浓度变化的单影响因素 GAMs 模型中,筛选的 7 个气象因子(最高气温、日照时数、相对湿度、平均风速、降水量、MMD 和 VC)均在 $P < 0.001$ 水平下显著影响 O_3 浓度变化,无论是全年还是夏季,最高气温、日照时数、MMD 和相对湿度单独作为解释变量时对 O_3 浓度变化的影响均较显著,值得注意的是,夏季相对湿度和降水量对 O_3 浓度变化的影响较全年更加显著.

(2)在构建 O_3 浓度变化的多影响因素 GAMs 模型中,最高气温、相对湿度、日照时数、降水量、MMD 和 VC 这 6 个解释变量在 $P < 0.01$ 水平下显著影响 O_3 浓度变化, O_3 浓度变化的多气象因子 GAMs 模型为: $g(O_3) = s(\text{最高气温}) + s(\text{相对湿度}) + s(\text{降水量}) + s(\text{MMD}) + \text{日照时数} + \text{VC} + \alpha$,调整后的 $R^2 = 0.834$,方差解释率为 83.5%,最高气温是 O_3 浓度变化的主导影响因素.夏季 O_3 浓度变化 GAMs 模型为 $g(O_3) = s(\text{最高气温}) + s(\text{相对湿度}) + s(\text{降水量}) + s(\text{VC}) + \text{日照时数} + \text{MMD} + \alpha$,而夏季最高气温和 MMD 是 O_3 浓度变化的重要影响因素.

(3)通过 GAMs 交互效应模型分析主要气象因子交互作用对 O_3 浓度变化的影响,就全年而言,最高气温-日照时数、最高气温-相对湿度、最高气温-降水和 MMD-日照时数共 4 个交叉解释变量项均通

过显著性检验,其中最高气温-日照时数交互作用对 O_3 浓度变化起主导作用.结合气象因子交互作用对 O_3 浓度变化影响的三维空间效应图,发现高温 + 长时间日照 + MMD(2 000 m 左右) + 无降水条件协同作用下有利于 O_3 浓度的生成.就夏季而言,仅最高气温-日照时数和最高气温-VC 2 个交叉解释变量项均通过显著性检验,夏季强高温 + 长日照时数 + 水平方向小风速有利于近地层 O_3 的生成.

参考文献:

- [1] 张小曳,孙俊英,王亚强,等.我国雾-霾成因及其治理的思考[J].科学通报,2013,58(13):1178-1187.
Zhang X Y, Sun J Y, Wang Y Q, et al. Factors contributing to haze and fog in China[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(13): 1178-1187.
- [2] 中华人民共和国生态环境部.2018 年中国生态环境状况公报[EB/OL].<http://www.mee.gov.cn/hjzl/zghjzkgb/lnzghjzkgb/201905/P020190619587632630618.pdf>, 2019-05-29.
- [3] Krzyzanowski M. WHO air quality guidelines for Europe[J]. Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A: Current Issues, 2008, 71(1): 47-50.
- [4] Gao W, Tie X X, Xu J M, et al. Long-term trend of O_3 in a mega City (Shanghai), China: characteristics, causes, and interactions with precursors[J]. Science of the Total Environment, 2017, 603-604: 425-433.
- [5] O'Lenick C R, Chang H H, Kramer M R, et al. Ozone and childhood respiratory disease in three US cities: evaluation of effect measure modification by neighborhood socioeconomic status using a Bayesian hierarchical approach[J]. Environmental Health, 2017, 16: 36.
- [6] 陈仁杰,陈秉衡,阚海东.上海市近地面臭氧污染的健康影响评价[J].中国环境科学,2010,30(5):603-608.
Chen R J, Chen B H, Kan H D. Health impact assessment of surface ozone pollution in Shanghai[J]. China Environmental Science, 2010, 30(5): 603-608.
- [7] 刘长焕,邓雪娇,朱彬,等.近 10 年中国三大经济区太阳总辐射特征及其与 O_3 、 $PM_{2.5}$ 的关系[J].中国环境科学,2018,38(8):2820-2829.
Liu C H, Deng X J, Zhu B, et al. Characteristics of CSR of China's three major economic regions in the past 10 years and its relationship with O_3 and $PM_{2.5}$ [J]. China Environmental Science, 2018, 38(8): 2820-2829.
- [8] Li K, Jacob D J, Liao H, et al. Anthropogenic drivers of 2013-2017 trends in summer surface ozone in China[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2019, 116(2): 422-427.
- [9] Monks P S, Archibald A T, Colette A, et al. Tropospheric ozone and its precursors from the urban to the global scale from air quality to short-lived climate force[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, 15(15): 8889-8973.
- [10] 张敬巧,王宏亮,方小云,等.廊坊开发区 8-9 月 O_3 污染过程 VOCs 污染特征及来源分析[J].环境科学,2021,42(10):4632-4640.
Zhang J Q, Wang H L, Fang X Y, et al. Characteristics and source of VOCs during O_3 pollution between August-September, Langfang development zones[J]. Environmental Science, 2021, 42(10): 4632-4640.
- [11] 周明卫,康平,汪可可,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.
- [12] 韩丽, 陈军辉, 姜涛, 等. 成都市春季 O₃ 污染特征及关键前体物识别[J]. 环境科学, 2021, **42**(10): 4611-4620.
- Han L, Chen J H, Jiang T, *et al.* Pollution characteristics of O₃ and the key precursors in Chengdu during spring [J]. Environmental Science, 2021, **42**(10): 4611-4620.
- [13] Wolf K, Cyrus J, Harciníková T, *et al.* Land use regression modeling of ultrafine particles, ozone, nitrogen oxides and markers of particulate matter pollution in Augsburg, Germany [J]. Science of the Total Environment, 2017, **579**: 1531-1540.
- [14] 史海琪, 曾胜兰, 李浩楠. 四川盆地大气污染物时空分布特征及气象影响因素研究[J]. 环境科学学报, 2020, **40**(3): 763-778.
- Shi H Q, Zeng S L, Li H N. Temporal and spatial distribution characteristics and influencing meteorological factors of air pollutants in Sichuan Basin[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, **40**(3): 763-778.
- [15] 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.
- [16] Botlaguduru V S V, Kommalapati R R, Huque Z. Long-term meteorologically independent trend analysis of ozone air quality at an urban site in the greater Houston area[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2018, **68**(10): 1051-1064.
- [17] Sourì A H, Choi Y, Li X S, *et al.* A 15-year climatology of wind pattern impacts on surface ozone in Houston, Texas [J]. Atmospheric Research, 2016, **174-175**: 124-134.
- [18] Wang Y G, Hopke P K, Xia X Y, *et al.* Source apportionment of airborne particulate matter using inorganic and organic species as tracers[J]. Atmospheric Environment, 2012, **55**: 525-532.
- [19] Hastie T, Tibshirani R. Generalized additive models [J]. Statistical Science, **1986**, **1**(3): 297-310.
- [20] 贾彬, 王彤, 王琳娜, 等. 广义可加模型共曲线性及其在空气污染问题研究中的应用[J]. 第四军医大学学报, 2005, **26**(3): 280-283.
- Jia B, Wang T, Wang L N, *et al.* Concurvity in generalized additive models in study of air pollution [J]. Journal of the Fourth Military Medical University, 2005, **26**(3): 280-283.
- [21] 贺祥, 林振山. 基于 GAM 模型分析影响因素交互作用对 PM_{2.5} 浓度变化的影响[J]. 环境科学, 2017, **38**(1): 22-32.
- He X, Lin Z S. Interactive Effects of the influencing factors on the changes of PM_{2.5} concentration based on GAM model [J]. Environmental Science, 2017, **38**(1): 22-32.
- [22] 吴锴, 康平, 王占山, 等. 成都市臭氧污染特征及气象成因研究[J]. 环境科学学报, 2017, **37**(11): 4241-4252.
- Wu K, Kang P, Wang Z S, *et al.* Characteristics of ozone pollution and meteorological causes in Chengdu [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, **37**(11): 4241-4252.
- [23] Zeng S L, Zhang Y. The Effect of meteorological elements on continuing heavy air pollution: a case study in the Chengdu area during the 2014 Spring Festival[J]. Atmosphere, 2017, **8**(4): 71.
- [24] Zhang Y, Wang S G, Fan X G, *et al.* A temperature indicator for heavy air pollution risks (TIP) [J]. Science of the Total Environment, 2019, **678**: 712-720.
- [25] Xu X J, Jiang Z J, Li J, *et al.* Impacts of meteorology and emission control on the abnormally low particulate matter concentration observed during the winter of 2017 [J]. Atmospheric Environment, 2020, **225**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117377.
- [26] Dominici F, McDermott A, Zeger S L, *et al.* On the use of generalized additive models in time-series studies of air pollution and health[J]. American Journal of Epidemiology, 2002, **156**(3): 193-203.
- [27] Camalier L, Cox W, Dolwick P. The effects of meteorology on ozone in urban areas and their use in assessing ozone trends[J]. Atmospheric Environment, 2007, **41**(33): 7127-7137.

CONTENTS

Disinfection By-products in Drinking Water and Their Control Strategies: A Review	CHU Wen-hai, XIAO Rong, DING Shun-ke, <i>et al.</i> (5059)
Advances in Mechanism and Influencing Factors Affecting Hydrogen Sulfide Adsorption by Biochar	XU Qi-yong, LIANG Ming-shen, XU Wen-jun, <i>et al.</i> (5086)
Effect of Vegetation Coverage on the Temporal and Spatial Distribution of PM _{2.5} Concentration in China's Eight Major Economic Regions from 1998 to 2016	YANG Yu-lian, YANG Kun, LUO Yi, <i>et al.</i> (5100)
Evolution and Potential Source Apportionment of Atmospheric Pollutants of Two Heavy Haze Episodes During the COVID-19 Lockdown in Beijing, China	ZHAO De-long, TIAN Ping, ZHOW Wei, <i>et al.</i> (5109)
Characteristics and Origin Analysis of Air Pollution During the Spring Festival in Linfen, Fenwei Plain	LIU Wei-jie, HU Tian-peng, MAO Yao, <i>et al.</i> (5122)
Spatio-Temporal Characteristics and Potential Source Areas of Seasonal Atmospheric Pollution in Shijiazhuang	NIE Sai-sai, WANG Shuai, CUI Jian-sheng, <i>et al.</i> (5131)
Impact of Air Humidity on PM _{2.5} Mass Concentration and Visibility During Winter in Tianjin	DING Jing, TANG Ying-xiao, HAO Tian-yi, <i>et al.</i> (5143)
Seasonal Variation and Source Apportionment of Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Chengde	HE Bo-wen, NIE Sai-sai, WANG Shuai, <i>et al.</i> (5152)
Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission Inventory from Domestic Sources in China	LIANG Xiao-ming, CHEN Lai-guo, SHEN Guo-feng, <i>et al.</i> (5162)
Characteristics of Industrial Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission in China from 2011 to 2019	LIU Rui-yuan, ZHONG Mei-fang, ZHAO Xiao-ya, <i>et al.</i> (5169)
VOCs Emission Inventory and Uncertainty Analysis of Industry in Qingdao Based on Latin Hypercube Sampling and Monte Carlo Method	XU Wan-ying, FU Fei, LÜ Jian-hua, <i>et al.</i> (5180)
Emission Characteristics and Environment Impacts of VOCs from Typical Rubber Manufacture	WANG Hai-lin, XIN Guo-xing, ZHU Li-min, <i>et al.</i> (5193)
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Different Functional Zones of Shenyang, China	KU Ying-ying, REN Wan-hui, SU Cong-cong, <i>et al.</i> (5201)
Characteristics of BTEX and Health Risk Assessment During Typical Pollution Episodes in Summer and Winter in Tianjin Urban Area	HAN Ting-ting, LI Ying-ruo, PU Wei-wei, <i>et al.</i> (5210)
Atmospheric NH ₃ Emission Inventory and Analysis of the Driving Force in Zhengzhou City	JI Yao, WANG Chen, LU Xuan, <i>et al.</i> (5220)
Interactive Effects of the Influencing Factors on the Changes of O ₃ Concentrations Based on GAMs Model in Chengdu	ZHANG Ying, NI Chang-jian, FENG Xin-yuan, <i>et al.</i> (5228)
Spatial Variation Characteristics and Remote Sensing Retrieval of Total Suspended Matter in Surface Water of the Yangtze River	LI Jian-hong, HUANG Chang-chun, ZHA Yong, <i>et al.</i> (5239)
Spatial Distribution Characteristics of the Spectrum, Source Analysis, and Nitrogen Response of Dissolved Organic Matter in Summer Rainfall in the Hebei Province	ZHANG Zi-wei, ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i> (5250)
Distribution and Influencing Factors of DOM Components in Urban and Suburban Polluted Rivers	ZHU Yi, CHEN Hao, DING Guo-ping, <i>et al.</i> (5264)
Composition and Distribution of Microplastics in the Water and Sediments of Urban Rivers in Beijing	HU Jia-min, ZUO Jian-e, LI Di, <i>et al.</i> (5275)
Nontarget Screening and Ecological Risk Assessment of Polar Organic Pollutants in Surface Water on the West Bank of Taihu Lake	LU Xin-yan, WANG Fei, ZHANG Li-min, <i>et al.</i> (5284)
Optimization of Extraction Methods and Distribution Characteristics of Antibiotics and Metabolites in Sediments of a River Water-Groundwater Interaction Zone	LI Yu-qiong, TONG Lei, YAN Han, <i>et al.</i> (5294)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments of Desilting Demonstration Area in Baiyangdian Lake	WANG Tong-fei, ZHANG Wei-jun, LI Li-qing, <i>et al.</i> (5303)
Dynamic Mechanisms of Groundwater Quality by Residual Contaminants of the Tanghe Wastewater Reservoir in Xiong'an New Area	ZHANG Zhi-xiong, WANG Shi-qin, ZHANG Yi-zhang, <i>et al.</i> (5312)
Analysis and Prediction of Health Risk from Heavy Metals in Drinking Water Sources Based on Time Series Model	JI Chao, HOU Da-wei, XIE Li, <i>et al.</i> (5322)
Spatial Distribution, Risk, and Influencing Factors of River Water-Sediment Heavy Metals in the Lower Reaches of the Qianhe River	GAO Yu, WANG Guo-lan, JIN Zi-han, <i>et al.</i> (5333)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Dissolved Heavy Metals in Chaohu Lake Basin During the Wet Season	HE Miao, LIU Gui-jian, WU Lei, <i>et al.</i> (5346)
Impact of Enclosure Culture on Heavy Metal Content in Surface Sediments of Hongze Lake and Ecological Risk Assessment	ZI Xin-yuan, ZHANG Ming, GU Xiao-hong, <i>et al.</i> (5355)
Natural Water Chemistry Change in the Surface Water of Chengdu and Impact Factors	XU Qiu-jin, LAI Cheng-yue, DING Yao, <i>et al.</i> (5364)
Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Groundwater in the Leizhou Peninsula	PENG Hong-xia, HOU Qing-qin, ZENG Min, <i>et al.</i> (5375)
Land-based Nitrogen Pollution Source Structure and Spatial Distribution in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DONG Si-qi, HUANG Chong, <i>et al.</i> (5384)
Output Characteristics of Nitrogen and Phosphorus from Non-Point Source Pollution of Typical Land Use in a Micro-Watershed in Hilly Red Soil Region	FANG Zhi-da, SU Jing-jun, ZHAO Hong-tao, <i>et al.</i> (5394)
Effects of Different Fertilization Patterns on Nitrogen Leaching Loss from Paddy Fields Under Reduced Nitrogen	JIANG Hai-bin, ZHANG Ke-qiang, ZOU Hong-tao, <i>et al.</i> (5405)
Effects of <i>Spartina alterniflora</i> Invasion on Soil Phosphorus Forms in the Jiaozhou Bay Wetland	SHA Meng-qiao, CHAI Na, ZHAO Hong-tao, <i>et al.</i> (5414)
Contrasting Analysis of Microbial Community Composition in the Water and Sediments of the North Canal Based on 16S rRNA High-Throughput Sequencing	PENG Ke, DONG Zhi, DI Yan-ming, <i>et al.</i> (5424)
Characteristics of Phosphorus Adsorption in Aqueous Solution by Si-modified Peanut Shell Biochar	ZHAO Min, ZHANG Xiao-ping, WANG Liang-rong, <i>et al.</i> (5433)
Adsorption Characteristics of Pb(II) on Eucalyptus Biochar Modified by Potassium Permanganate	MO Zhen-lin, ZENG Hong-hu, LIN Hua, <i>et al.</i> (5440)
Preparation of Mixed Metal Oxide/Carbon Composites and Its Adsorption Performance for Pb(II)	LU Yu-shen, ZONG Li, YU Hui, <i>et al.</i> (5450)
Fabrication of Supported Titanium Xerogel Adsorbent and Performance Evaluation for Arsenite Removal	SUN Ye-yang, ZHOU Chang, GAN Yong-hai, <i>et al.</i> (5460)
Nitrite Regulation During Start-up of Combined Partial Nitrification and ANAMMOX Process	ZUO Fu-min, ZHENG Rui, SUI Qian-wen, <i>et al.</i> (5472)
Effects of Biochar and Straw Return on Soil Aggregate and Organic Carbon on Purple Soil Dry Slope Land	DENG Hua, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i> (5481)
Response of Soil Organic Carbon Content in Different Slope Positions to Fertilization Management in Purple Soil Sloping Fields	XU Man, YU Luo, WANG Fu-hua, <i>et al.</i> (5491)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in the Eastern Mountainous Area of the Nanyang Basin	LAI Shu-ya, DONG Qiu-yao, SONG Chao, <i>et al.</i> (5500)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Suburban Farmland Soil	ZHANG Xiu-xiu, LU Xiao-li, WEI Yu-chen, <i>et al.</i> (5510)
Accumulation Characteristics and Dietary Exposure Estimation of Heavy Metals in Vegetables from the Eastern Coastal Region of China	SUN Shuai, GENG Ning-bo, GUO Cui-cui, <i>et al.</i> (5519)
Security Risk and Influencing Factors of Agro-Products in Farmland Soil Around a Typical Mining Smelter	HUO Yan-hui, WANG Mei-e, XIE Tian, <i>et al.</i> (5526)
Cd Pollution and Safe Planting Zoning in Paddy Soils: A Case Study in a District of Chongqing	CAO Shu-zhen, MU Yue, CUI Jing-xin, <i>et al.</i> (5535)
Characteristics and Influencing Factors of Cadmium Accumulation in Different Rice Varieties Under Cadmium Contaminated Field Conditions	WANG Yu-hao, YANG Li, KANG Yu-chen, <i>et al.</i> (5545)
Effects of Nano-membrane on Aerobic Composting Process and Odor Emission of Livestock Manure	LI Yong-shuang, SUN Bo, CHEN Ju-hong, <i>et al.</i> (5554)