

目次

“大气十条”实施期间南京市 PM _{2.5} 化学组成与来源的演变特征	陈培林, 郭蓉, 王勤耕 (1)
河南省北部区域霾污染过程中城市和农村点位 PM _{2.5} 组分差异	王申博, 王玲玲, 范相阁, 王楠, 马双良, 张瑞芹 (11)
廊坊市秋冬季大气细颗粒物污染特征及来源解析	朱淑贞, 佟洁, 鲍丰, 孙浩 (20)
天津市采暖季不同气团来向 PM _{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评价	李立伟, 邓小文, 肖致美, 元洁, 杨宁, 郭小龙, 白宇 (30)
基于多属性决策方法的太原市冬季街道尘土中潜在有害元素关键来源解析	邓文博, 刘文娟 (38)
北京市 PM _{2.5} -O ₃ 复合污染数值响应解析	刘添强 (48)
长三角区域人为源活性挥发性有机物高分辨率排放清单	田俊杰, 丁祥, 安静宇, 李曼, 王鑫, 黄成 (58)
南京北郊工业乡村混合区秋季边界层 VOCs 垂直分布特征	王泰, 朱彬, 施双双, 安俊琳, 唐贵谦, 徐家平 (66)
广西柳城县 VOCs 组分特征、来源及其对臭氧生成的敏感性	吴影, 莫招育, 吴琴琴, 陆嘉晖, 毛敬英, 陈雪梅, 栗少丽, 覃纹, 刘慧琳, 韦敏 (75)
城市臭氧污染特征与高影响气象因子:以苏州为例	何琰, 林惠娟, 曹舒娅, 宋璟璐, 孙伟, 熊宇 (85)
华北平原周县人为源氨排放清单及分布特征	康嘉慧, 孟凡磊, 刘学军, 许稳 (94)
WRF 模式最优参数化方案在不同空气质量模式中的应用	杨景朝, 蒋兴文, 伯鑫, 王刚, 冯勇 (104)
西安市春季生物气溶胶的分布特征和健康影响	魏军强, 杨柳, 沈振兴, 王秀茹 (118)
青岛近海不同天气下生物气溶胶中细菌浓度及存活率分布特征	魏文淑, 祁建华, 常成 (127)
中国沉积物多环芳烃的时空分布及驱动因子	黄柱良, 蔡家伟, 王儒威 (138)
长江口近岸地区抗生素抗性基因与微生物群落分布特征	徐秋鸿, 刘曙光, 姜厦, Larisa Dorzhieva Radnaeva, Elena Nikitina, Makhinov Aleksei Nikolavich, Araruna José Tavares, 金字辰, 李鑫 (158)
人类活动影响下的高原湿地四环素类抗生素抗性基因赋存与微生物群落共现性	秦荣, 喻庆国, 刘振亚, 王行 (169)
我国东南地区饮用水源地多种农药的赋存特征及健康风险评估	何姝, 董慧岭, 任南琪 (180)
珠海市中部主要供水水库沉积物重金属时空分布与风险评价	王思瑞, 张坤峰, 昌盛, 张茉莉, 付青 (189)
苏州水网地区河道底泥的重金属分布特征与污染风险	郑敏慧, 白冬锐, 张涛, 陈坦, 王洪涛, 杨婷, 张冰, 金军 (198)
长三角典型城郊流域生物可降解性有机质的分布及影响因素	吴文雨, 马菁晨, 杨磊, 李敏, 唐剑锋 (210)
过水性湖泊水质长期演变趋势及驱动因素:以骆马湖为例	黄雪滢, 高鸣远, 王金东, 王明明, 陈思恩, 龚志军, 王腊春, 蔡永久 (219)
渭河微塑料污染现状与风险评价	山泽萱, 张妍, 张成前, 时鹏, 张鑫 (231)
不同颜色聚碳酸酯塑料对附着藻类生长和群落结构的影响	王梦雪, 尹思成, 王振方, 陈锦贤, 张玮, 王丽卿 (243)
苦草叶表附和和水体浮游细菌群落多样性格局及其影响因素	张梅婷, 刘晋仙, 苏嘉贺, 柴宝峰 (252)
基于 16S rRNA 测序技术的青藏高原河流细菌群落多样性	璩伟卿, 张博美, 黄雪, 任泽, 高红凯 (262)
基于 eDNA 的硅藻群落时空异质性及生态健康评价	姜山, 张颜, 李飞龙, 张效伟 (272)
三峡库区澎溪河河段间水华程度差异及其机制	罗晓佼, 张钊, 黄伟, 胡鹏飞, 谭炳圆, 张磊 (282)
自然降雨下蔬菜地土壤侵蚀及氮素流失特征	宁嘉丽, 黄艳芬, 李桂芳, 陈钊柱, 王坚桦 (293)
绿色、蓝色和蓝-绿屋顶径流水质特征	章孙逊, 张守红, 闫婧, 王恺, 杨航, 王任重远, 张文龙, 李华林 (303)
基于地理探测器的山西省 2000 ~ 2020 年 NPP 时空变化特征及驱动力分析	邵嘉豪, 李晶, 闫星光, 马天跃, 张瑞 (312)
2000 ~ 2020 年西南地区植被 NDVI 时空变化及驱动机制探究	徐勇, 戴强玉, 黄雯婷, 盘钰春, 郑志威, 郭振东 (323)
青海湖周边地区表层土壤重金属含量和抗性基因丰度及相关性	胡石磊, 瞿剑里, 章丽, 赵美蓉 (336)
四川盆地典型农耕地土壤重金属含量、污染及其影响因素	刘属灵, 吴梅, 刘志远, 刘双燕, 刘永林, 赵家宇, 刘怡 (347)
宁夏引黄灌区农田土壤重金属生态风险评价及来源解析	陈林, 马琨, 马建军, 王金保, 李虹, 贾彪, 倪锦炉, 马进鹏, 梁翔宇 (356)
铜冶炼场地周边土壤重金属污染特征与风险评价	彭驰, 刘旭, 周子若, 姜智超, 郭朝晖, 肖细元 (367)
西南地区典型土壤酸化特征及其与重金属形态活性的耦合关系	凌云, 刘汉燧, 张小婷, 魏世强 (376)
外源 Cd 在不同类型土壤中的稳定化特征	王港, 余海英, 黄化刚, 张路, 左洪菊 (387)
基于有效硒的富硒土壤阈值及有效硒的影响因素	王莹, 马彦斌, 王泽晶 (395)
基于成土母质分区的土壤-作物系统重金属累积特征与健康风险评价	陈子万, 许晶, 侯召雷, 彭敏, 杨帆, 陈杰, 徐永强, 杨树云, 李家云, 于林松 (405)
贵州省旱地土壤和玉米 As 含量特征及其种植安全性评估	黄凤艳, 周浪, 宋波, 虎瑞, 吴勇, 王佛鹏, 张云霞 (415)
象草与苦楝/构树间作修复矿区重金属污染土壤潜力	王小慧, 肖细元, 郭朝晖, 彭驰, 王小燕 (426)
1 株高耐性肠杆菌的筛选及对铜、砷同步钝化	尹雪斐, 刘玉玲, 伍德, 黄薪铭, 张朴心, 铁柏清 (436)
黄土丘陵区人工刺槐林土壤有机碳矿化特征及其与有机碳组分的关系	朱玉帆, 刘伟超, 李佳欣, 苏玉博, 简俊楠, 杨改河, 任成杰, 冯永忠, 任广鑫, 王晓妍, 韩新辉 (444)
设施农业土壤磷素累积迁移转化及影响因素	方兵, 陈林, 王阳, 祝亚飞, 王瑞, 宋桂芳, 刘俊, 杨斌, 张世文 (452)
优化秸秆管理提高玉米农田碳氮效率与经济效益	王良, 钱欣, 高英波, 张慧, 刘开昌, 陈国庆, 李宗新 (463)
缓控释肥深施对黏性土壤麦田氮素去向的影响	侯朋福, 薛利祥, 袁文胜, 曹帅, 刘颖多, 薛利红, 杨林章 (473)
黄河下游冲积平原轮作休耕农田土壤真菌群落结构与功能	南镇武, 刘柱, 孟维伟, 代红翠, 徐杰, 王娜, 刘灵艳, 王旭清, 刘开昌 (482)
红壤区退化林地表土真菌群落结构对土壤改良措施的响应	管鸿智, 黄荣珍, 王金平, 朱丽琴, 邹显花, 姬绍晖, 林丽靖, 房焕英, 杨梦佳, 廖迎春 (494)
半干旱-亚湿润干旱沙区樟子松根内真菌群落结构和功能时空动态特征	赵珮杉, 郭米山, 高广磊, 丁国栋, 张英, 任悦 (502)
基于 QMEC 分析的青藏高原不同类型冰川前缘地土壤微生物功能潜力	张洁洁, Anders Priemé, 陈显轲, 周汉昌, 张沁唯, 庄绪亮, 秦翔, 庄国强, 马安周 (512)
中国主粮作物生物炭产量效应的 Meta 分析	于滨杭, 姬建梅, 王丽学, 刘静, 高欢, 刘丹 (520)
生物炭影响抗生素在土壤中环境行为的 Meta 分析	李经涵, 张建强, 夏丽琼, 郑世界, 杨红薇, 何杨 (531)
不同农作物秸秆原料制备生物炭特性及重金属浸出行为	李家康, 邱春生, 赵佳奇, 王晨晨, 刘楠楠, 王栋, 王少坡, 孙力平 (540)
中国县城碳排放时空演变与异质性	宋苑震, 曾坚, 王森, 梁晨 (549)
近 20 年重庆市主城区碳排放的时空动态演进及其重心迁移	向书江, 杨春梅, 谢雨琦, 王丹, 王子芳, 高明 (560)
中国 1991 ~ 2018 年突发环境事件时空特征及影响因素	余光辉, 王非凡, 刘贤赵, 李文慧, 向云波 (572)
季铵盐抗菌剂在环境中的迁移转化行为及其毒性效应	张利兰, 覃存立, 钱瑶, 易美玲 (583)

北京市 $\text{PM}_{2.5}$ - O_3 复合污染数值响应解析

刘添强

(成都理工大学地球物理学院, 地球勘探与信息技术教育部重点实验室, 成都 610059)

摘要: 为分析 $\text{PM}_{2.5}$ - O_3 复合污染数值响应关系, 基于 2015 ~ 2020 年北京市空气质量数据、气象资料和新冠疫情数据, 分析 $\text{PM}_{2.5}$ - O_3 复合污染事件在多尺度下的变化趋势. 同时提出一种复合污染指数, 在广义相加模型下分析数值响应趋势, 并进一步引入分布滞后非线性模型, 分别解析复合污染指数、复合污染事件和影响因素间的滞后响应关系. 结果表明, 北京市 $\text{PM}_{2.5}$ - O_3 复合污染事件逐年减少, 具有明显的季节效应、星期效应和节假日效应. 复合污染指数与降雨量无明显相关性, 与 O_3 和空气温度呈线性正相关, 与其余解释变量均为非线性相关. 同时大气污染物和气象条件对复合污染指数有明显滞后效应, 滞后影响主要集中在 1 ~ 3 d. 高值的 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 O_3 、 SO_2 和空气温度明显增加复合污染风险, 中值段的 CO ($1 \sim 6 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$)、 NO_2 ($38 \sim 118 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)、相对湿度 ($54\% \sim 87\%$) 和低风速都会增加复合污染风险. 复合污染事件在数值响应中表现出多天连续污染的趋势, 相较于 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} , 复合污染事件更依赖于 O_3 , 高值区复合污染率在 $30.7\% \sim 47.5\%$. CO 和相对湿度对复合污染事件影响较小, 空气温度影响最大, 复合污染事件中 84.7% 发生在 $20 \sim 30^\circ\text{C}$.

关键词: $\text{PM}_{2.5}$; 臭氧 (O_3); 复合污染; 数值响应; 滞后效应

中图分类号: X513; X515 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2023)01-0048-10 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.202203185

Numerical Response Analysis of $\text{PM}_{2.5}$ - O_3 Compound Pollution in Beijing

LIU Tian-qiang

(Key Laboratory of Earth Exploration and Information Technology, Ministry of Education, College of Geophysics, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The multi-scale variation trend of $\text{PM}_{2.5}$ - O_3 compound pollution events was analyzed based on air quality data, meteorological data, and COVID-19 data in Beijing from 2015 to 2020. For the threshold of compound pollution, a compound pollution index was proposed, and the numerical response trend was evaluated based on the generalized additive model. A distributed lag nonlinear model was introduced to analyze the risk response relationship between compound pollution and influencing factors. The results showed that the events of $\text{PM}_{2.5}$ - O_3 compound pollution in Beijing decreased annually. At the same time, due to the influence of pollutant emissions and meteorological conditions, there were obvious seasonal effects, week effects, holiday effects, and epidemic effects. The composite pollution index had no correlation with rainfall but had a linear positive correlation with O_3 and air temperature and a nonlinear correlation with other explanatory variables. Air pollutants and meteorological conditions had obvious lag effects on the composite pollution index, and the lag effects were mainly concentrated in 1-3 d. $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} , O_3 , SO_2 , and air temperature in high-value areas significantly increased the risk of compound pollution. The CO ($1 \sim 6 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$), NO_2 ($38 \sim 118 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), and relative humidity ($54\% \sim 87\%$) in the median section would also increase the risk of compound pollution, as would low wind speed. The compound pollution events showed a trend of multi-day continuous pollution in the numerical response. Compared with $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} , compound pollution events were more dependent on O_3 , and the compound pollution rate in high-value areas was $30.7\% \sim 47.5\%$. CO and relative humidity had little effect on compound pollution events. The air temperature had the greatest impact, and 84.7% of the composite pollution incidents occurred at $20 \sim 30^\circ\text{C}$.

Key words: $\text{PM}_{2.5}$; ozone (O_3); compound pollution; numerical response; delayed response

随着我国工业飞速发展和城市化推进, 细颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 已成为城市主要的大气污染物, 其所附加的生命健康和经济发展成本受到公众的迫切关注^[1~3]. 中国政府在 2013 年以后推出一系列大气污染防治措施, 经过多年的深度落实, 中国空气质量得到显著改善, 细颗粒物浓度逐年稳步下降^[4]. 但在 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度持续改善的背景下, O_3 污染事件逐渐突出, 甚至以首要污染物出现在城市重度污染事件中^[5]. 2021 年的“十四五”规划中, 更是将 O_3 列为重要污染物, $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 的协同治理成为大气污染防治的重点^[6].

$\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 之间存在很强的关联性, 二者不但受到相同的前体物 (挥发性有机物 VOCs) 的控制, 还由于气象条件和传输途径等因素的影响, 表现出

相反的季节特性^[7,8]. 目前国内对于大气环境, 给予 VOCs 较多关注, 涉及排放特征、来源解析、防控措施、 O_3 和气溶胶二次生成等方面^[9~14]. 而对于 $\text{PM}_{2.5}$ - O_3 复合污染, 国内外研究主要集中在分布特征、成因分析、健康效益、协同管控和政策响应等方面^[15~27]. 城市区域 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 的浓度除了自身扩散机制的作用外, 还有来自同源污染物以及气象条件的影响^[28,29]. 同时, 自 2019 年底新冠疫情暴发, 随着常态化疫情防控工作的推行, 人们生产生活方式的转变带动大气环境的改善, $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 的浓度变化明显^[30,31].

收稿日期: 2022-03-21; 修订日期: 2022-05-07

作者简介: 刘添强 (1996 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为城市大气环境分析, E-mail: liutianqiang@stu.cdut.edu.cn

在分析 PM_{2.5}-O₃ 复合污染和影响因素之间的关系时,之前的研究往往聚焦在同期数据的统计分析上,鲜有考虑到各因素对 PM_{2.5}-O₃ 复合污染事件的风险评估和滞后效应. 本文基于北京市 2015 ~ 2020 年大气污染物监测数据、气象监测数据和新冠疫情数据,从年度、月均、小时和假期这 4 个尺度分析 PM_{2.5}-O₃ 复合污染事件分布特征,同时构建 PM_{2.5}-O₃ 复合污染指数,基于广义相加模型(GAM)分析复合污染事件和各影响因素之间的数值响应关系,并进一步引入分布滞后非线性模型(DLNM)进行复合污染风险评估,以期在城市大气污染精准防治提供参考依据.

1 材料与方法

1.1 数据资料

北京市 PM_{2.5} 和 O₃ 浓度数据收集自北京市 34 个空气质量监测站点,由生态环境监测中心数据发布平台获得(<http://zx.bjmemc.com.cn/>),数据集还包含 PM₁₀、CO、NO₂ 和 SO₂ 的小时浓度数据. 气象资料来自中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),主要选取气温(TEM)、降水(PRE)、相对湿度(RHU)、风速(WIN)和日照时数(SSD)这 5 个指标数据. 新冠数据源于北京市卫生健康委员会(<http://wjw.beijing.gov.cn/>)的公布数据,并整合为逐日数据. 本研究分析区间为 2015 ~ 2020 年,监测站点的缺测率在 24% ~ 41% 之间,取所有站点监测数据的算术平均值代表日值水平,站点数据处理遵循《环境空气质量标准》(GB 3095-2012),确保数据科学有效.

1.2 PM_{2.5}-O₃ 复合污染指数

根据《环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)》(HJ 633-2012)规定,将 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 超标阈值设定为 75 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,达到超标阈值则标记为一次 PM_{2.5} 污染事件;将 O₃ 日最大 8h 滑动平均浓度超标阈值设定为 160 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,达到超标阈值则标记为一次 O₃ 污染事件;同时达到 PM_{2.5} 浓度超标阈值和 O₃ 日最大 8 h 滑动平均浓度超标阈值,则标记为一次 PM_{2.5}-O₃ 复合污染事件. 将每日复合污染事件暴发情况记作 $E_{\text{p.o}}$,发生取 1,不发生取 0.

为进一步描述 PM_{2.5}-O₃ 复合污染事件,定量复合污染进程,本研究提出一种复合污染指数,同时为切合 PM_{2.5} 和 O₃ 的取值范围,进行一定程度的缩放. 具体形式如下:

$$I_{\text{p.o}} = [\rho(\text{PM}_{2.5})/75] \times [\rho(\text{O}_3)/160] \times 100 \quad (1)$$

式中, $I_{\text{p.o}}$ 为 PM_{2.5}-O₃ 复合污染指数; $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 为

PM_{2.5} 浓度值, $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; $\rho(\text{O}_3)$ 为 O₃ 浓度值, $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

1.3 数值响应分析方法

本研究分两个阶段来分析 PM_{2.5}-O₃ 复合污染事件与影响因素之间的数值响应关系. 线性模型虽然简单、直观且具有良好的解释性,但仍难以表达出大气环境的复杂性,因此非线性模型的引入就显得十分必要^[32,33]. GAM 正是广义线性模型的扩展,通过平滑化处理,能有效拟合各变量的非线性影响^[34,35]. GAM 既能处理响应变量与多个解释变量之间的复杂数值关系,也能有效解释单变量与响应变量之间的非线性响应关系^[36~38].

已有研究表明,复杂的大气环境不仅带来复杂的非线性关系,还有明显的滞后效应. PM_{2.5} 和 O₃ 浓度同时受到同源排放和区域气候变化的影响,除了当前时刻各气体污染物和气象因素的综合影响外,还受到过去一段时间内各变量的累积滞后影响. 为了描述这种滞后影响,本研究在第二阶段引入 DLNM 模型,通过交叉基矩阵同时表达非线性影响和滞后影响^[39~43]. 同时考虑到变量自身的非线性趋势,如季节变化和长期趋势等方面,需要加入自然立方样条函数进行更合理的表达. 除此之外,疫情效应、星期效应和节假日效应等短期趋势影响,也将作为哑变量考虑在模型里. 最终模型如下:

$$\lg(Y_t) = \alpha + \text{cb}(V, \beta) + \text{ns}(\text{time}, k) + \text{ns}(\text{doy}, k) + \text{case} + \text{dow} + \text{holiday} \quad (2)$$

式中, $\lg(Y_t)$ 为 t 时刻响应变量的对数转换; α 为模型的截距项; $\text{cb}(V, \beta)$ 为解释变量的交叉基变换,其中 V 为解释变量, β 为回归系数; ns 为自然立方样条函数, time 为时间序列变量, doy 为每年的第几天, k 为自由度; case 为疫情效应; dow 为星期几效应; holiday 为节假日效应. 模型中作为响应变量的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 、 $\rho(\text{O}_3)$ 和 $I_{\text{p.o}}$ 服从正态分布假设^[44], $E_{\text{p.o}}$ 服从二项分布假设,而模型的选择将由赤池信息量准则(AIC)确定.

2 结果与讨论

2.1 PM_{2.5}-O₃ 复合污染态势

如图 1(a)所示,北京市 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 整体呈下降趋势,浓度超标率由 2015 年的 40.54% 降至 2020 年的 9.86%,改善幅度达 30.68%. $\rho(\text{O}_3)$ 在 2015 ~ 2020 年间有略微浮动,整体变化不明显,年均 $\rho(\text{O}_3)$ 在 90.96 ~ 95.82 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间,浓度超标率在 12.32% ~ 17.53% 之间浮动. PM_{2.5}-O₃ 复合污染则受 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 影响,事件数逐年减少,降幅达 94%. 如图

1(b)所示,PM_{2.5}污染事件分布全年,8月出现频率最低,而11月至次年3月的PM_{2.5}污染事件较多。O₃污染事件主要分布在4~10月,PM_{2.5}-O₃复合污染

事件分布也表现出相同的趋势,二者的峰值都出现在6月,最低值都在10月,由此可见PM_{2.5}-O₃复合污染事件对O₃的依赖性^[45]。

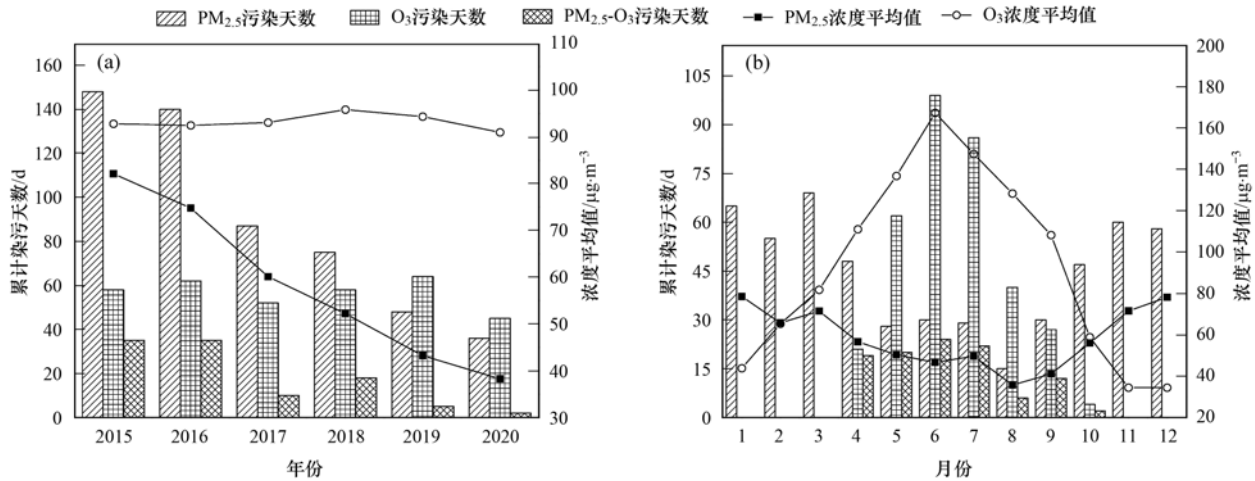


图1 PM_{2.5}-O₃复合污染年变化趋势和月变化趋势

Fig. 1 Annual and monthly variation trends of PM_{2.5}-O₃ compound pollution

图2(a)展示了PM_{2.5}-O₃复合污染小时变化趋势,PM_{2.5}污染事件数在1d内会有两次起伏,分别在11:00和23:00达到两次峰值,在07:00和16:00会两次达到谷值。O₃污染事件主要分布在10:00~23:00,其中15:00~17:00为频发时段。PM_{2.5}-O₃复合污染事件的小时分布与O₃污染事件一致,其中最频发的16:00共累计发生127次复合污染。2015~2020年,16:00的PM_{2.5}污染率达21.85%,O₃污染率达19.47%,PM_{2.5}-O₃复合污染率达5.82%。图2(b)为PM_{2.5}-O₃复合污染在星期效应和假期效应下的变化趋势。PM_{2.5}污染事件、O₃污染事件和PM_{2.5}-O₃复合污染事件在工作日都较为平均,但在周末期间都有大幅度减少,减幅分别达94.7%、94.3%和

96.2%,在节假日期间三者又都有大幅上涨,涨幅分别达293%、255%和287%。

2.2 PM_{2.5}-O₃复合污染数值响应

为了具体分析PM_{2.5}-O₃复合污染的响应程度,通过公式(1)计算得复合污染指数 $I_{P.O}$,并通过缩放使其取值贴合PM_{2.5}和O₃的数值范围,三项数值的统计信息如表1所示。从数据分布来看, $I_{P.O}$ 的25%、50%和75%分位数显示,其数据分布偏向低值,平均值和标准差都略低于PM_{2.5}和O₃。 $I_{P.O}$ 的最小值十分贴近O₃的最小值($0.17 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), $I_{P.O}$ 的最大值十分贴近PM_{2.5}的最大值($-26.18 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),数据整体表现基本符合预期。

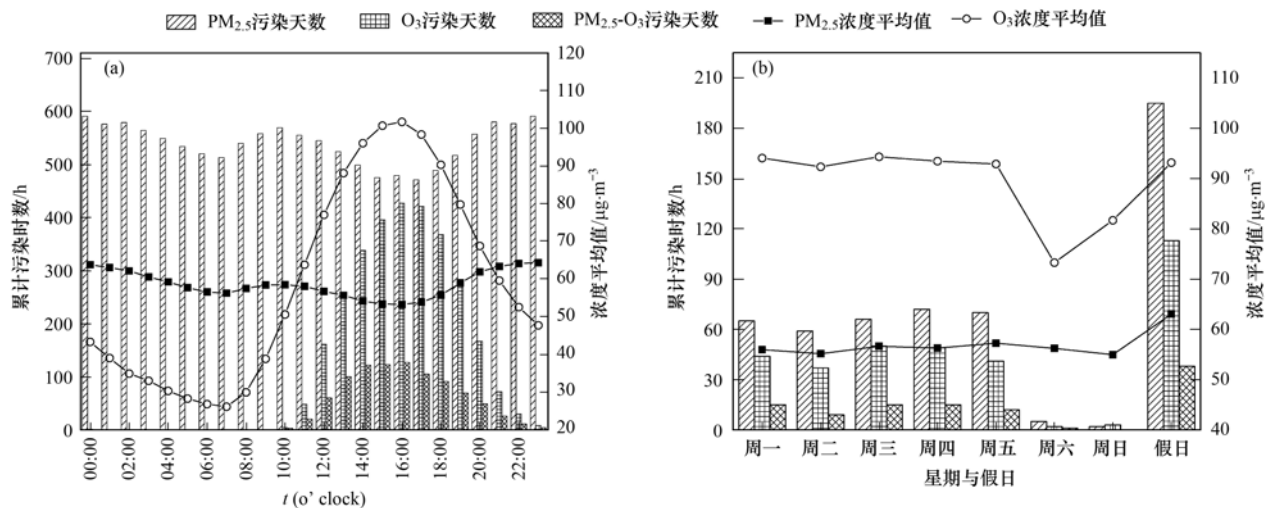


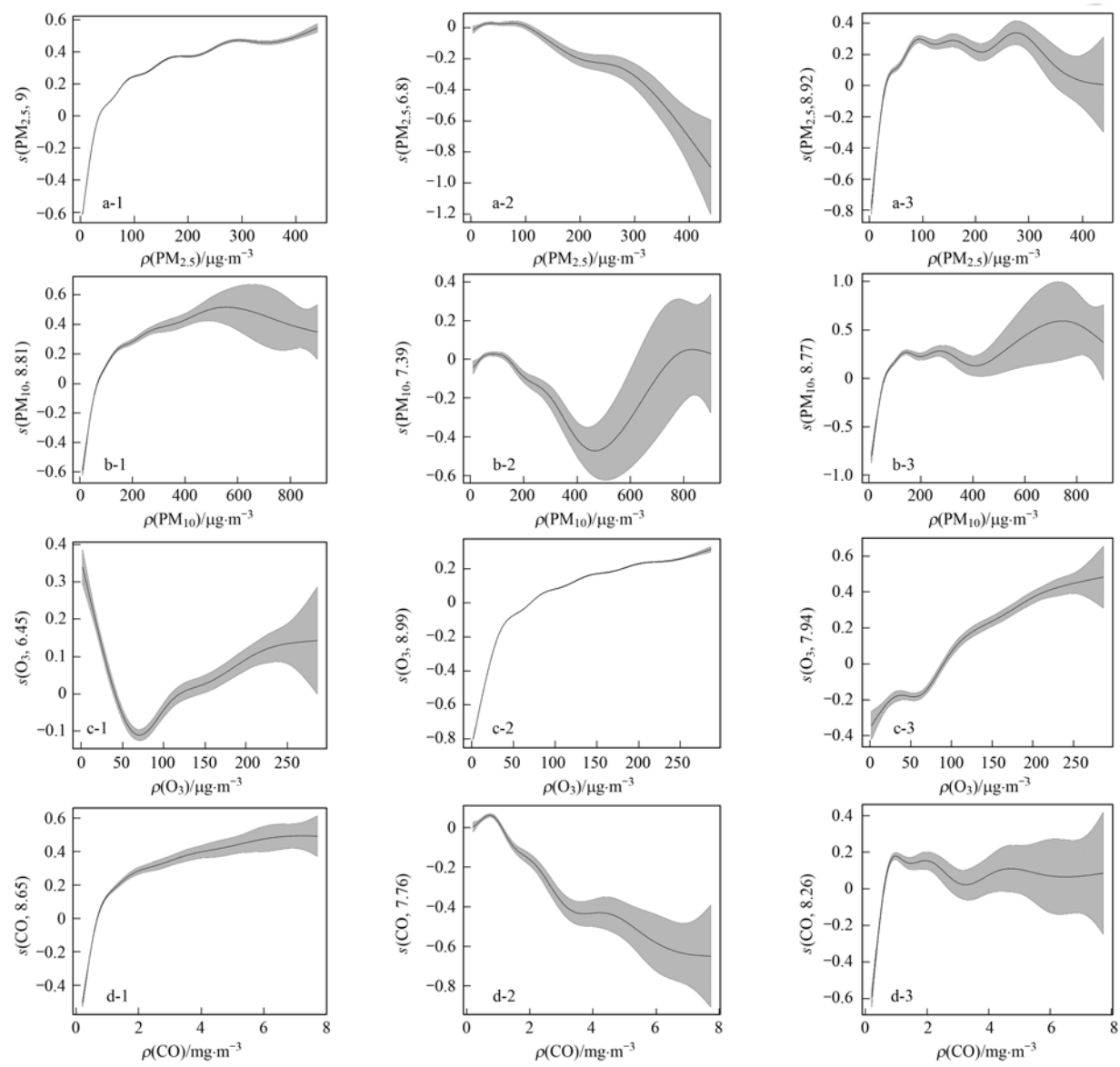
图2 PM_{2.5}-O₃复合污染的日变化趋势和假期效应

Fig. 2 Diurnal trend and holiday effect of PM_{2.5}-O₃ compound pollution

表 1 响应变量的一般描述性统计
Table 1 General descriptive statistics for response variables

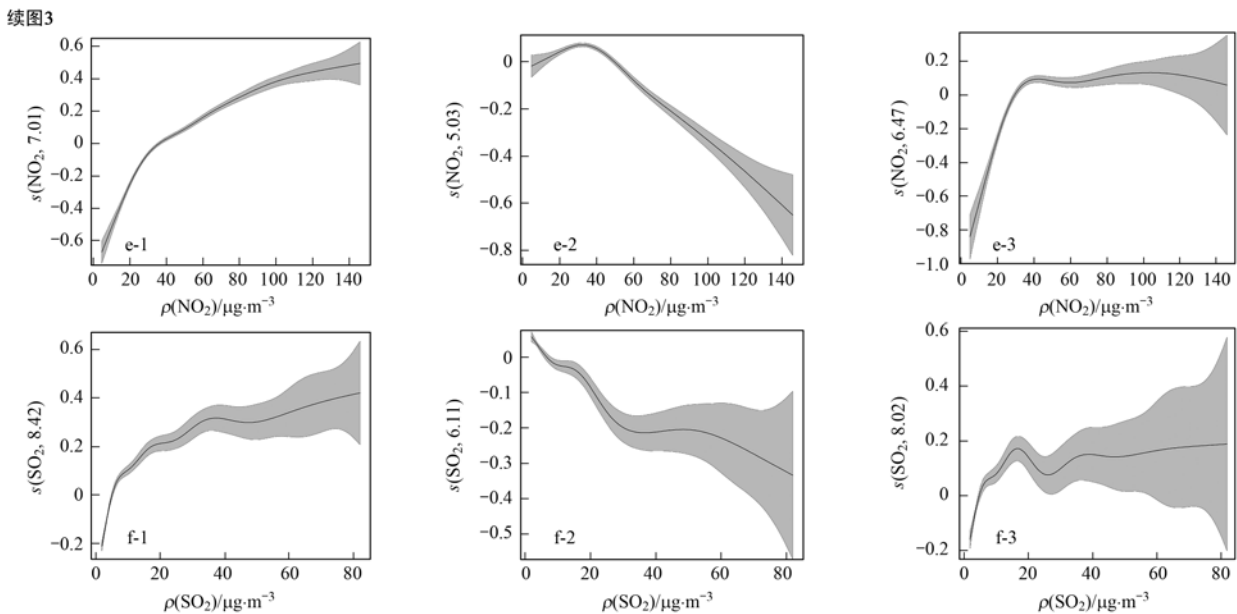
变量	单位	描述性统计						
		平均值	标准差	最小值	25%	50%	75%	最大值
$\text{PM}_{2.5}$	$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	58.46	54.07	3.78	22.64	43.09	73.35	439.5
O_3	$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	93.24	57.5	1.52	52.03	80.05	129.16	286.46
$I_{\text{P.O}}$	—	42.81	47.45	1.69	11.61	25.1	57.26	413.37

对复合污染指数 $I_{\text{P.O}}$ 进行对数转换后,同大气污染指标和气象资料一起代入 GAM 模型作数值响应分析,图 3 和图 4 展示了三类污染指标对 11 个解释变量的数值响应曲线. 由结果可知, PM_{10} 、 CO 、 NO_2 、 SO_2 和相对湿度与 $\text{PM}_{2.5}$ 呈正相关,降雨量和风速与 $\text{PM}_{2.5}$ 呈负相关, O_3 、空气温度和日照时数与 $\text{PM}_{2.5}$ 呈非线性相关. O_3 除了与降雨量无明显相关性外,与其他解释变量均有相关性. O_3 与日照时间近似正相关,与 $\text{PM}_{2.5}$ 和 SO_2 呈负相关,其余均为非线性相关. $I_{\text{P.O}}$ 与降雨量无明显相关性,与 O_3 和空气温度呈正相关,与其余解释变量则为非线性相关. 整体来看, $I_{\text{P.O}}$ 综合表达了 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 的数值响应趋势,具有进一步分析的潜力.



1 ~ 3 分别表示 $\text{PM}_{2.5}$ 、 O_3 和 $I_{\text{P.O}}$, a ~ f 分别表示 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 O_3 、 CO 、 NO_2 和 SO_2 ;
纵坐标为平滑贡献度,括号内为参考自由度;横坐标为变量数值;阴影区域为 95% 置信区间

图 3 大气污染物的数值响应曲线
Fig. 3 Numerical response curves of air pollutants



2.3 PM_{2.5}-O₃ 复合污染风险解析

分别将 PM_{2.5}、O₃、I_{P-0}和 E_{P-0}与 11 个解释变量作相关性分析(表 2),结果表明 O₃ 与风速和降雨量无显著相关性, I_{P-0}与日照时间无显著相关性, E_{P-0}与 SO₂、NO₂、风速、日照时间和降雨量无显著相关性. 基于公式(2)所构建的 DLNM 模型对 I_{P-0}和 E_{P-0}作复合污染风险分析,描述解释变量对复合污染事件的滞后响应关系.

表 2 PM_{2.5}-O₃ 复合污染的相关性分析¹⁾
Table 2 Correlation analysis of PM_{2.5}-O₃ compound pollution

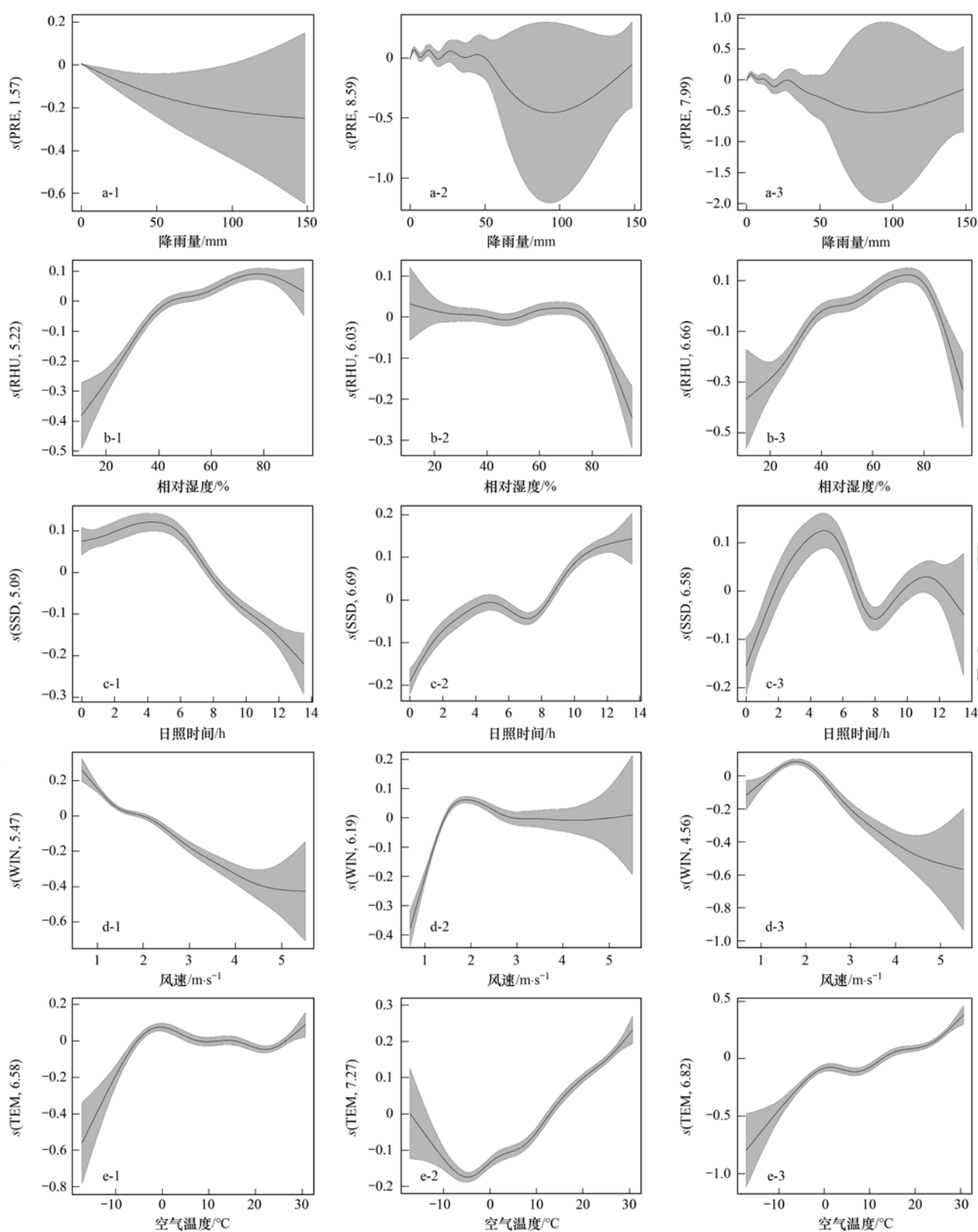
变量	皮尔逊相关系数										
	PM _{2.5}	PM ₁₀	CO	SO ₂	NO ₂	O ₃	WIN	SSD	TEM	RHU	PRE
PM _{2.5}	1.00	0.86	0.86	0.59	0.78	-0.10	-0.32	-0.33	-0.15	0.28	-0.09
O ₃	-0.10	-0.04	-0.28	-0.23	-0.29	1.00	0.02*	0.37	0.75	0.06	0.00*
I _{P-0}	0.50	0.46	0.19	0.16	0.22	0.66	-0.14	0.02*	0.40	0.18	-0.06
E _{P-0}	0.19	0.16	0.05	0.03*	0.04*	0.42	-0.03*	0.02*	0.24	0.09	-0.02*

1) * 表示 P=0.05 时无显著相关性

图 5 展示了 I_{P-0}基于 DLNM 模型分析结果,横坐标为数值变化,纵坐标为滞后时间,相对风险值以 1 为分界值,数值越大,风险越高. 当 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 小于 $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\rho(\text{PM}_{10})$ 小于 $80 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\rho(\text{O}_3)$ 小于 $80 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时,复合污染风险随着浓度降低而降低; 当 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 大于 $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\rho(\text{PM}_{10})$ 大于 $80 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\rho(\text{O}_3)$ 大于 $80 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时,复合污染风险随着浓度升高而升高. 其中 O₃ 在低浓度时表现出浮动性,而 $\rho(\text{PM}_{10})$ 大于 $600 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时,在滞后 1d 时会有轻微下降. 当 $\rho(\text{CO})$ 小于 $1 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 或大于 $6 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, $\rho(\text{NO}_2)$ 小于 $38 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 或大于 $118 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,相对湿度小于 54% 或大于 87% 时,三者都会降低复合污染风险. 当 $\rho(\text{CO})$ 在 $1 \sim 6 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间、 $\rho(\text{NO}_2)$ 在 $38 \sim 118 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间或相对湿度在 54%~87% 之间时,三者都会增加复合污染风险,并持续影响 1~2 d,其中 NO₂ 和相对湿度的低值将在滞后 3~5 d 后有复合污染风险上升现象. 当 $\rho(\text{SO}_2)$ 小于 $6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时,复合污染风险降低,大于 6

$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时,复合污染风险随着浓度升高而升高,且在浓度高值区,滞后 2 d 后风险逐渐降低. 降水量越高,复合污染的风险越小,并持续影响 1~2 d,且在滞后 2 d 后风险逐渐升高. 风速小于 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,污染风险随风速下降而升高,当风速大于 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,污染风险随风速升高而逐渐降低,且持续影响 2 d. 当空气温度小于 13°C 时,复合污染风险随温度降低而降低,当空气温度大于 13°C 时,风险随温度升高而升高,并在滞后 2~3 d 时变换了相反的响应.

图 6 展示了 E_{P-0}基于 DLNM 模型分析结果,从中可知 PM_{2.5}-O₃ 复合污染事件高发于 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的 $45 \sim 175 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间,以及 $\rho(\text{PM}_{10})$ 的 $70 \sim 230 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间. 相较于颗粒物, O₃ 拥有更高的风险,且集中于高值区. 从复合污染事件分布来看, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 大于 $75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的占 19.8%, 大于 $90 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的占 16%, 大于 $120 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的占 7.7%. 而 $\rho(\text{O}_3)$ 大于 $160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的占 30.7%, 大于 $200 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的占 39.8%, 大于 $230 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的占 47.5%.



1~3 分别表示 $\text{PM}_{2.5}$ 、 O_3 和 I_{p0} , a~e 分别表示 PRE、RHU、SSD、WIN 和 TEM;
纵坐标为平滑贡献度, 括号内为参考自由度; 横坐标为变量数值; 阴影区域为 95% 置信区间

图4 气象因子的数值响应曲线

Fig. 4 Numerical response curves of meteorological factors

并且从图6中的 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 O_3 的滞后响应可以看出, $\text{PM}_{2.5}$ - O_3 复合污染事件有多天连续污染的趋势, 其中单日污染天数占 29.5%, 连续 2 d 污染占

32.5%, 连续 3 d 污染占 20%, 持续 4 d 及以上的污染占 18%。 $\rho(\text{CO})$ 和相对湿度对复合污染事件影响较小, 主要集中在 $1 \sim 2.4 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 54% ~ 74% 之

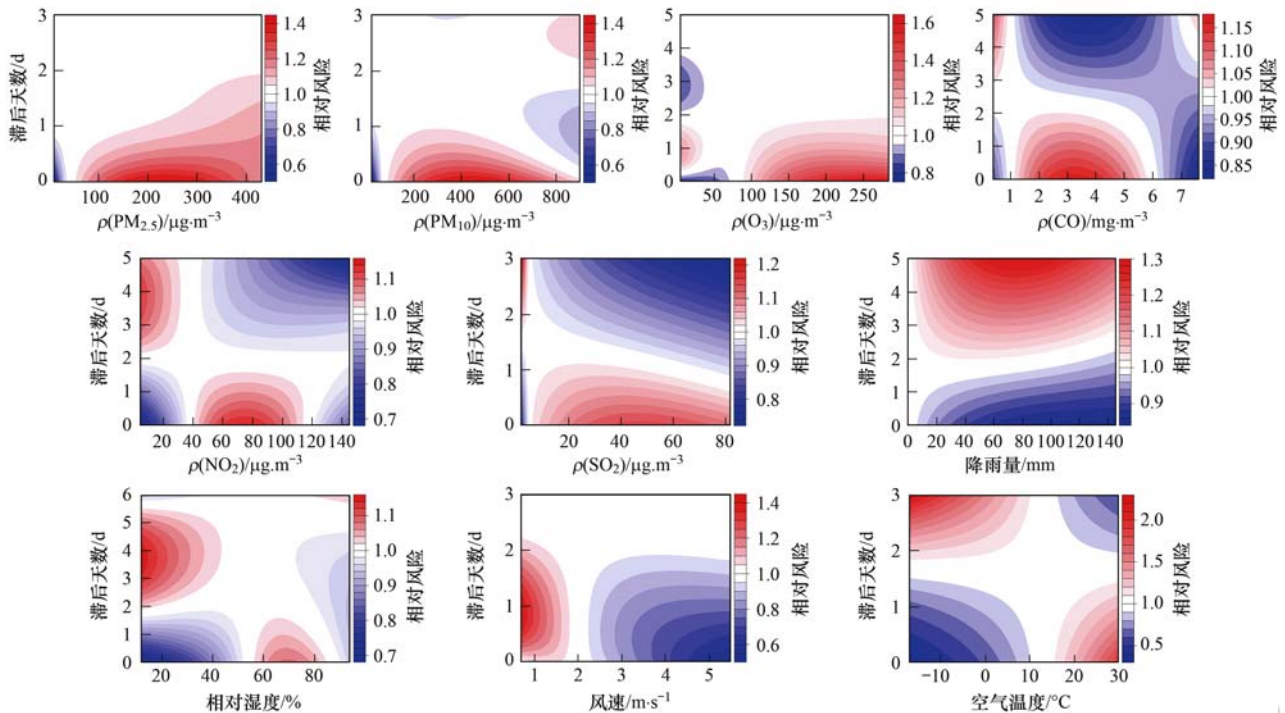


图5 复合污染指数与变量间的滞后响应等值线图

Fig. 5 Contour plot of lag response between compound pollution index and variables

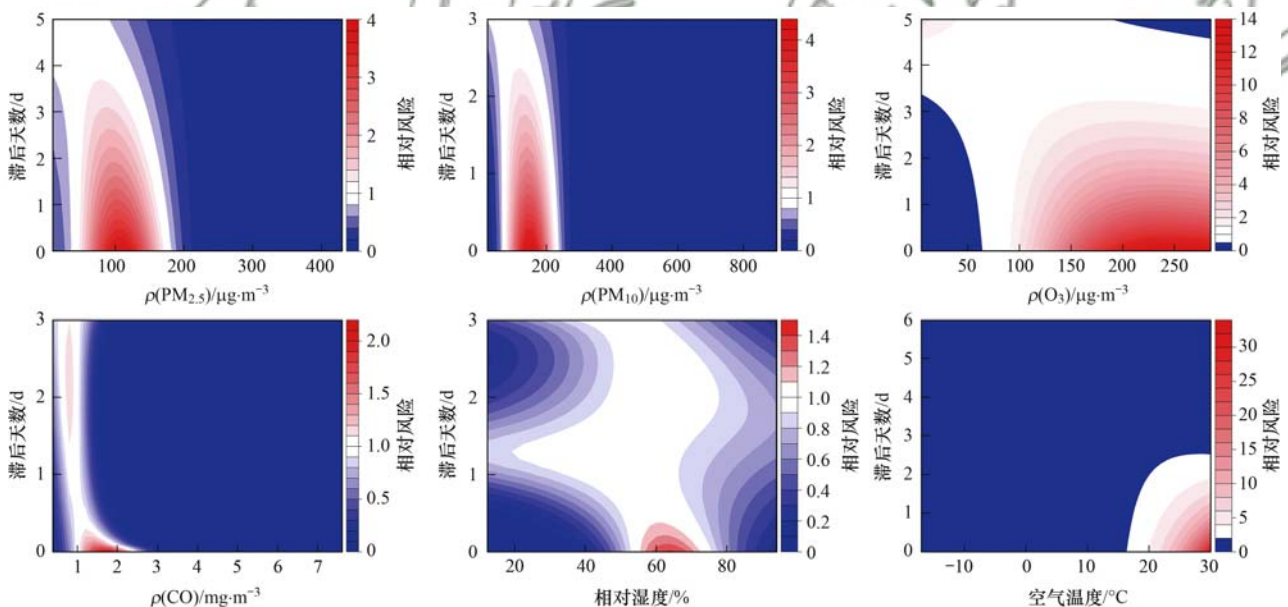


图6 复合污染事件与变量间的滞后响应等值线图

Fig. 6 Contour plot of lag response between compound pollution events and variables

间,且无明显滞后影响.空气温度是6个解释变量中相对风险最高的,当空气温度大于13℃时,复合污染事件随温度升高而增多.其中大部分复合污染事件发生在20℃以上,占有复合污染事件的84.7%,并持续影响1~2 d.

3 结论

(1)2015~2020年,PM_{2.5}-O₃复合污染事件受PM_{2.5}浓度影响,发生率逐渐下降,且主要发生在4~

10月.从小时监测数据来看,PM_{2.5}-O₃复合污染事件集中在10:00~23:00,其中16:00发生率最高.同时,复合污染事件表现出明显的星期效应和节假日效应.

(2)在复合污染综合指数 $I_{P.0}$ 的数值响应分析中,降雨量和 $I_{P.0}$ 无明显相关性,O₃和空气温度呈线性正相关,其余解释变量则和 $I_{P.0}$ 呈非线性关系. $I_{P.0}$ 的数值响应曲线合理地描述了PM_{2.5}和O₃的综合响应趋势,具有进一步分析的潜力.

(3)大气污染物和气象条件对 $\text{PM}_{2.5}$ - O_3 复合污染有明显滞后效应,滞后影响集中在 1 ~ 3 d. $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 和 O_3 都在低值区降低复合污染风险,在高值区增加复合污染风险.当 $\rho(\text{CO})$ 在 1 ~ 6 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $\rho(\text{NO}_2)$ 在 38 ~ 118 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和相对湿度在 54% ~ 87% 之间时,三者都会增加复合污染风险,并持续影响 1 ~ 2 d.当风速小于 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和空气温度大于 13°C 时,也会增加复合污染风险,而降雨量则始终降低复合污染风险.

(4) $\text{PM}_{2.5}$ - O_3 复合污染事件高发于 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的 45 ~ 175 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间,还有 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的 70 ~ 230 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间.相较于颗粒物,复合污染事件更依赖于 $\rho(\text{O}_3)$,主要集中于高值区,并展现出多天连续污染的趋势.复合污染事件中的 $\rho(\text{CO})$ 和相对湿度分布较集中,并且无滞后响应.空气温度具有较高的相对风险,84.7% 的复合污染事件分布在 20 ~ 30°C 之间,并持续影响 1 ~ 2 d.

参考文献:

- [1] 吴文静,杨晓翠,姚明宏,等.京津冀地区长期 $\text{PM}_{2.5}$ 暴露的死亡负担与经济损失评价[J]. 中华流行病学杂志, 2020, 41(9): 1471-1476.
Wu W J, Yang X C, Yao M H, et al. Assessment of mortality burden and economic loss attributed to long-term $\text{PM}_{2.5}$ exposure in the Beijing-Tianjin-Hebei area [J]. Chinese Journal of Epidemiology, 2020, 41(9): 1471-1476.
- [2] Liao Q, Jin W Q, Tao Y, et al. Health and economic loss assessment of $\text{PM}_{2.5}$ pollution during 2015-2017 in Gansu Province, China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17(9), doi: 10.3390/ijerph17093253.
- [3] Tao Y, Zhang Z, Ou W X, et al. How does urban form influence $\text{PM}_{2.5}$ concentrations: Insights from 350 different-sized cities in the rapidly urbanizing Yangtze River Delta region of China, 1998-2015 [J]. Cities, 2020, 98, doi: 10.1016/j.cities.2019.102581.
- [4] 中国环境监测总站. 2013-2016 中国环境状况公报, 2017-2020 年中国生态环境状况公报 [EB/OL]. <http://www.cnemc.cn/jcbg/zghjzkgb/>, 2021-10-12.
- [5] 《中国大气臭氧污染防治蓝皮书(2020年)》编写组. 中国大气臭氧污染防治蓝皮书(2020) [EB/OL]. <https://img74.hbzhan.com/4/20201016/637384586133551705645.pdf>, 2020-10-16.
- [6] 新华网. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要 [EB/OL]. http://www.zlb.gov.cn/2021-03/15/c_1211067504.htm, 2021-03-15.
- [7] 冯凝,唐梦雪,李孟林,等. 深圳市城区 VOCs 对 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 耦合生成影响研究[J]. 中国环境科学, 2021, 41(1): 11-17.
Feng N, Tang M X, Li M L, et al. Research on the influence of VOCs on the coupling generation of $\text{PM}_{2.5}$ and O_3 in Shenzhen [J]. China Environmental Science, 2021, 41(1): 11-17.
- [8] Jia M W, Zhao T L, Cheng X H, et al. Inverse relations of $\text{PM}_{2.5}$ and O_3 in air compound pollution between cold and hot seasons over an urban area of East China [J]. Atmosphere, 2017, 8(12), doi: 10.3390/atmos8030059.
- [9] 张钢锋,卜梦雅,李杰. 我国挥发性有机物(VOCs)研究进展与态势分析[J]. 安全与环境学报, 2022, doi: 10.13637/j.issn.1009-6094.2021.1944.
Zhang G F, Bu M Y, Li J. Research progress and trend analysis of volatile organic compounds in China [J]. Journal of Safety and Environment, 2022, doi: 10.13637/j.issn.1009-6094.2021.1944.
- [10] Zhang X M, Xue Z G, Li H, et al. Ambient volatile organic compounds pollution in China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2017, 55: 69-75, doi: 10.1016/j.jes.2016.05.036.
- [11] 王倩,陈长虹,王红丽,等. 上海市秋季大气 VOCs 对二次有机气溶胶的生成贡献及来源研究[J]. 环境科学, 2013, 34(2): 424-433.
Wang Q, Chen C H, Wang H L, et al. Forming potential of secondary organic aerosols and sources apportionment of VOCs in autumn of Shanghai, China [J]. Environmental Science, 2013, 34(2): 424-433.
- [12] Zhang C, Liu X G, Zhang Y Y, et al. Characteristics, source apportionment and chemical conversions of VOCs based on a comprehensive summer observation experiment in Beijing [J]. Atmospheric Pollution Research, 2021, 12(3): 230-241.
- [13] 李陵,李振亮,张丹,等. 重庆市主城区 O_3 污染时期大气 VOCs 污染特征及来源解析[J]. 环境科学, 2021, 42(8): 3595-3603.
Li L, Li Z L, Zhang D, et al. Pollution characteristics and source apportionment of atmospheric VOCs during ozone pollution period in the main urban area of Chongqing [J]. Environmental Science, 2021, 42(8): 3595-3603.
- [14] 李莉娜,尤洋,赵银慧,等. 我国大气中挥发性有机物监测与控制现状分析[J]. 环境保护, 2017, 45(13): 26-29.
Li L N, You Y, Zhao Y H, et al. Analysis of the condition of monitoring and control of volatile organic compounds in the atmosphere in China [J]. Environmental Protection, 2017, 45(13): 26-29.
- [15] Wang F Y, Qiu X H, Cao J Y, et al. Policy-driven changes in the health risk of $\text{PM}_{2.5}$ and O_3 exposure in China during 2013-2018 [J]. Science of the Total Environment, 2020, 757, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143775.
- [16] Zhao H, Zheng Y F, Li C. Spatiotemporal distribution of $\text{PM}_{2.5}$ and O_3 and their interaction during the summer and winter seasons in Beijing, China [J]. Sustainability, 2018, 10(12), doi: 10.3390/su10124519.
- [17] Lei R Q, Zhu F R, Cheng H, et al. Short-term effect of $\text{PM}_{2.5}/\text{O}_3$ on non-accidental and respiratory deaths in highly polluted area of China [J]. Atmospheric Pollution Research, 2019, 10(5): 1412-1419.
- [18] Liu Z Y, Qi Z L, Ni X F, et al. How to apply O_3 and $\text{PM}_{2.5}$ collaborative control to practical management in China: a study based on meta-analysis and machine learning [J]. Science of the Total Environment, 2021, 772, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145392.
- [19] Wu J S, Wang Y, Liang J T, et al. Exploring common factors influencing $\text{PM}_{2.5}$ and O_3 concentrations in the Pearl River Delta: Tradeoffs and synergies [J]. Environmental Pollution, 2021, 285, doi: 10.1016/j.envpol.2021.117138.
- [20] Zhao S P, Yin D Y, Yu Y, et al. $\text{PM}_{2.5}$ and O_3 pollution during 2015-2019 over 367 Chinese cities: spatiotemporal variations, meteorological and topographical impacts [J]. Environmental Pollution, 2020, 264, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114694.
- [21] 肖致美,徐虹,高璟贇,等. 天津市 $\text{PM}_{2.5}$ - O_3 复合污染特征

- 及来源分析[J]. 环境科学, 2022, **43**(3): 1140-1150.
- Xiao Z M, Xu H, Gao J Y, *et al.* Characteristics and sources of $\text{PM}_{2.5}$ - O_3 compound pollution in Tianjin [J]. Environmental Science, 2022, **43**(3): 1140-1150.
- [22] 段银凤, 李重民, 田春雨. 细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)和臭氧(O_3)的协同治理研究[J]. 安阳工学院学报, 2022, **21**(2): 22-25.
- Duan Y F, Li C M, Tian C Y, *et al.* Study on synergistic control of fine particulate matter ($\text{PM}_{2.5}$) and ozone(O_3) [J]. Journal of Anyang Institute of Technology, 2022, **21**(2): 22-25.
- [23] 尹春苗, 张莹, 胡文东, 等. 成都市 $\text{PM}_{2.5}$ 和臭氧交互作用对心脑血管疾病死亡人数的影响研究[J]. 四川大学学报(医学版), 2021, **52**(6): 981-986.
- Yin C M, Zhang Y, Hu W D, *et al.* Effects of interaction between $\text{PM}_{2.5}$ and O_3 8-h max on mortality of cardiovascular diseases in Chengdu [J]. Journal of Sichuan University (Medical Sciences), 2021, **52**(6): 981-986.
- [24] 刘可欣, 卢苗苗, 张裕芬, 等. 天津市夏秋季 O_3 - $\text{PM}_{2.5}$ 复合污染特征及气象成因分析[J]. 环境科学学报, 2021, **41**(9): 3650-3662.
- Liu K X, Lu M M, Zhang Y F, *et al.* Analysis of characteristics and meteorological causes of O_3 - $\text{PM}_{2.5}$ compound pollution in summer and autumn over Tianjin [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, **41**(9): 3650-3662.
- [25] 陈优良, 李亚倩. 长三角 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 变化特征及与气象要素的关系[J]. 长江流域资源与环境, 2021, **30**(2): 382-396.
- Chen Y L, Li Y Q. Characteristics of O_3 and $\text{PM}_{2.5}$ and its relationship with meteorological factors in Yangtze River delta [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, **30**(2): 382-396.
- [26] 郭云, 蒋玉丹, 黄炳昭, 等. 我国大气 $\text{PM}_{2.5}$ 及 O_3 导致健康效益现状分析及未来10年预测[J]. 环境科学研究, 2021, **34**(4): 1023-1032.
- Guo Y, Jiang Y D, Huang B Z, *et al.* Health impact of $\text{PM}_{2.5}$ and O_3 and forecasts for next 10 years in China [J]. Research of Environmental Sciences, 2021, **34**(4): 1023-1032.
- [27] 汪兵, 唐钰寒, 刘玉芝, 等. 长三角地区 O_3 与 $\text{PM}_{2.5}$ 复合污染机制研究[J]. 环境保护科学, 2021, **47**(4): 38-46.
- Wang B, Tang Y H, Liu Y Z, *et al.* Mechanism of complex pollution of O_3 and $\text{PM}_{2.5}$ in Yangtze River Delta region [J]. Environmental Protection Science, 2021, **47**(4): 38-46.
- [28] 张子睿, 胡敏, 尚冬杰, 等. 2013~2020年北京大气 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 污染演变态势与典型过程特征[J]. 科学通报, 2022, doi: 10.1360/TB-2021-0753.
- Zhang Z R, Hu M, Shang D J, *et al.* The evolution trend and typical process characteristics of atmospheric $\text{PM}_{2.5}$ and O_3 pollution in Beijing from 2013 to 2020 [J]. Chinese Science Bulletin, 2022, doi: 10.1360/TB-2021-0753.
- [29] 花丛, 江琪, 迟茜元, 等. 我国中东部地区2015—2020年夏半年 $\text{PM}_{2.5}$ 和臭氧复合污染气象特征分析[J]. 环境科学研究, 2022, **35**(3): 650-58.
- Hua C, Jiang Q, Chi X Y, *et al.* Meteorological Characteristics of $\text{PM}_{2.5}$ - O_3 air combined pollution in central and eastern China in the summer half years of 2015-2020 [J]. Research of Environmental Sciences, 2022, **35**(3): 650-58.
- [30] 余欣洋, 杨素英, 刘宁微, 等. 珠三角典型城市COVID-19疫情封闭期间臭氧污染的放大效应研究[J]. 中国环境监测, 2022, **38**(2): 21-36.
- Xu X Y, Yang S Y, Liu N W, *et al.* Amplification effects of O_3 pollution in the Pearl River Delta during the lockdown period of COVID-19 [J]. Environmental Monitoring in China, 2022, **38**(2): 21-36.
- [31] 逯世泽, 史旭荣, 薛文博, 等. 新冠肺炎疫情期间气象条件和排放变化对 $\text{PM}_{2.5}$ 的影响[J]. 环境科学, 2021, **42**(7): 3099-3106.
- Lu S Z, Shi X R, Xue W B, *et al.* Impacts of meteorology and emission variations on $\text{PM}_{2.5}$ concentration throughout the country during the 2020 epidemic period [J]. Environmental Science, 2021, **42**(7): 3099-3106.
- [32] 黄小刚, 邵天杰, 赵景波, 等. 基于GAM模型的西安市 O_3 浓度影响因素解析[J]. 环境科学, 2020, **41**(4): 1535-1543.
- Huang X G, Shao T J, Zhao J B, *et al.* Influencing factors of ozone concentration in Xi'an based on generalized additive models [J]. Environmental Science, 2020, **41**(4): 1535-1543.
- [33] Cheng B W, Ma Y X, Feng F L, *et al.* Influence of weather and air pollution on concentration change of $\text{PM}_{2.5}$ using a generalized additive model and gradient boosting machine [J]. Atmospheric Environment, 2021, **255**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2021.118437.
- [34] Hua J X, Zhang Y X, de Foy B, *et al.* Quantitative estimation of meteorological impacts and the COVID-19 lockdown reductions on NO_2 and $\text{PM}_{2.5}$ over the Beijing area using Generalized Additive Models (GAM) [J]. Journal of Environmental Management, 2021, **291**, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.112676.
- [35] 李丽霞, 郜艳晖, 周舒冬, 等. 广义加性模型及其应用[J]. 中国卫生统计, 2007, **24**(3): 21-22.
- Li L X, Gao Y H, Zhou S D. Generalized additive models and its application [J]. Chinese Journal of Health Statistics, 2007, **24**(3): 243-244.
- [36] Zhao M Y, Liu Y X, Gylbag A. Assessment of meteorological variables and air pollution affecting COVID-19 cases in urban agglomerations: evidence from China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, **19**(1), doi: 10.3390/ijerph19010531.
- [37] Hu C Y, Kang P, Jaffe D A, *et al.* Understanding the impact of meteorology on ozone in 334 cities of China [J]. Atmospheric Environment, 2021, **248**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2021.118221.
- [38] Ma Y X, Ma B J, Jiao H R, *et al.* An analysis of the effects of weather and air pollution on tropospheric ozone using a generalized additive model in Western China: Lanzhou, Gansu [J]. Atmospheric Environment, 2020, **224**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117342.
- [39] Gasparrini A. Distributed lag linear and non-linear models in R: the package dlnm [J]. Journal of Statistical Software, 2011, **43**(8): 1-20.
- [40] Duan W J, Wang X Q, Cheng S Y, *et al.* Influencing factors of $\text{PM}_{2.5}$ and O_3 from 2016 to 2020 based on DLNM and WRF-CMAQ [J]. Environmental Pollution, 2021, **285**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.117512.
- [41] Liang S, Sun C, Liu C F, *et al.* The influence of air pollutants and meteorological conditions on the hospitalization for respiratory diseases in Shenzhen City, China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, **18**(10), doi: 10.3390/ijerph18105120.
- [42] Hao J Y, Yang Z Y, Yang W W, *et al.* Impact of ambient temperature and relative humidity on the incidence of hand-foot-mouth disease in Wuhan, China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, **17**(2), doi: 10.3390/ijerph17020428.
- [43] Lu W G, Li J X, Li J S, *et al.* Short-term impacts of

- meteorology, air pollution, and internet search data on viral diarrhea infection among children in Jilin Province, China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, **18**(21), doi: 10.3390/ijerph182111615.
- [44] 薛海, 张帆. 降水量与城市大气环境关系——以 113 个环保重点城市为例[J]. 自然资源学报, 2020, **35**(4): 937-949.
Xue H, Zhang F. Study on the relationship between precipitation and urban atmospheric environment: cases of 113 key environmental protection cities [J]. Journal of Natural Resources, 2020, **35**(4): 937-949.
- [45] 赵淑婷, 王丽涛, 齐孟姚, 等. 邯郸市 $\text{PM}_{2.5}$ - O_3 复合污染特征及相互影响研究[J]. 环境科学学报, 2021, **41**(6): 2250-2261.
Zhao S T, Wang L T, Qi M Y, et al. Study on the characteristics and mutual influence of $\text{PM}_{2.5}$ - O_3 complex pollution in Handan [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, **41**(6): 2250-2261.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性,论点明确,文字精炼,数据可靠.全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献).国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示).作者投稿时请先登陆我刊网站(www.hjkx.ac.cn)进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面给出的提示信息投稿即可.
2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写.论文各部分的排列顺序为:题目;作者姓名;作者工作单位、地址、邮政编码;中文摘要;关键词;中图分类号;英文题目;作者姓名及单位的英译名;英文摘要;关键词;正文;致谢;参考文献.
3. 论文题目应简练并准确反映论文内容,一般不超过 20 字,少用副标题.
4. 中文摘要不少于 300 字,以第三人称写.摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论,重点是结果和结论.英文摘要与中文对应,注意人称、时态和语言习惯,以便准确表达内容.
5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等.科普知识不必赘述.
6. 文中图表应力求精简,同一内容不得用图表重复表达,要有中英文对照题目.图应大小一致,曲线粗于图框,图中所有字母、文字字号大小要统一.表用三线表.图表中术语、符号、单位等应与正文一致.
7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI).论文中物理计量单位用字母符号表示,如 mg(毫克),m(米),h(小时)等.科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文.
8. 文中各级标题采用 1, 1.1, 1.1.1 的形式,左起顶格书写,3 级以下标题可用(1), (2)……表示,后缩 2 格书写.
9. 文中外文字母、符号应标明其大小写,正斜体.生物的拉丁学名为斜体.缩略语首次出现时应给出中文全称,括号内给出英文全称和缩略语.
10. 未公开发表资料不列入参考文献,可在出现页以脚注表示.文献按文中出现的先后次序编排.常见文献书写格式为:
期刊:作者(外文也要姓列名前).论文名[J].期刊名,年,卷(期):起页-止页.
图书:作者.书名[M].出版地:出版社,年.起页-止页.
会议文集:作者.论文名[A].见(In):编者.文集名[C].出版地:出版社(单位),年.起页-止页.
学位论文:作者.论文名[D].保存地:保存单位,年份.
报告:作者.论文名[R].出版地:出版单位,出版年.
专利:专利所有者.专利题名[P].专利国别:专利号,出版日期.
11. 来稿文责自负,切勿一稿多投.编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节.在 3 个月内未收到本刊选用通知,可来电询问.
12. 投稿请附作者单位详细地址,邮编,电话号码,电子邮箱等.编辑部邮政地址:北京市 2871 信箱;邮编:100085;电话:010-62941102;E-mail:hjkx@rcees.ac.cn;网址:www.hjkx.ac.cn

CONTENTS

Evolution of PM _{2.5} Chemical Composition and Sources in Nanjing During the Implementation of the APPCAP	CHEN Pei-lin, GUO Rong, WANG Qin-geng (1)
Differences in PM _{2.5} Components Between Urban and Rural Sites During Heavy Haze Event in Northern Henan Province	WANG Shen-bo, WANG Ling-ling, FAN Xiang-ge, <i>et al.</i> (11)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Fine Particles in Langfang in Autumn and Winter	ZHU Shu-zhen, TONG Jie, BAO Feng, <i>et al.</i> (20)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} of Different Air Masses During Heating Season in Tianjin	LI Li-wei, DENG Xiao-wen, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (30)
Analysis of Critical Source of Potentially Harmful Elements in Urban Road Dust During Winter in Taiyuan Based on Multiple Attribute Decision Making Method	DENG Wen-bo, LIU Wen-juan (38)
Numerical Response Analysis of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Beijing	LIU Tian-qiang (48)
High-resolution Emission Inventory of Reactive Volatile Organic Compounds from Anthropogenic Sources in the Yangtze River Delta Region	TIAN Jun-jie, DING Xiang, AN Jing-yu, <i>et al.</i> (58)
Vertical Distribution Characteristics of Boundary Layer Volatile Organic Compounds in Autumn in the Mixed Industrial and Rural Areas over the Northern Suburb of Nanjing	WANG Tai, ZHU Bin, SHI Shuang-shuang, <i>et al.</i> (66)
Characterization of Ambient Volatile Organic Compounds, Source Apportionment, and the Ozone-NO _x -VOC Sensitivities in Liucheng County, Guangxi	WU Ying, MO Zhao-yu, WU Qin-qin, <i>et al.</i> (75)
Characteristics of Ozone Pollution and High-impact Meteorological Factors in Urban Cities: A Case of Suzhou	HE Yan, LIN Hui-juan, CAO Shu-ya, <i>et al.</i> (85)
Emission Inventory and Distribution Characteristics of Anthropogenic Ammonia in Quzhou County, North China Plain	KANG Jia-hui, MENG Fan-lei, LIU Xue-jun, <i>et al.</i> (94)
Application of WRF Optimal Parameterization Scheme for Different Air Quality Models	YANG Jing-chao, JIANG Xing-wen, BO Xin, <i>et al.</i> (104)
Distribution Characteristics and Health Effects of Bioaerosols in Spring over Xi'an City	WEI Jun-qiang, YANG Liu, SHEN Zhen-xing, <i>et al.</i> (118)
Distribution of Bacterial Concentration and Viability in Atmospheric Bioaerosols Under Different Weather Conditions in the Coastal Region of Qingdao	WEI Wen-shu, QI Jian-hua, CHANG Cheng (127)
Spatiotemporal Distribution and Driving Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Inland Sediments of China	HUANG Zhu-liang, CAI Jia-wei, WANG Ru-wei (138)
Distributions of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in the Nearshore Area of the Yangtze River Estuary	XU Qiu-hong, LIU Shu-guang, LOU Sha, <i>et al.</i> (158)
Co-occurrence of Tetracycline Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in Plateau Wetlands Under the Influence of Human Activities	QIN Rong, YU Qing-guo, LIU Zhen-ya, <i>et al.</i> (169)
Occurrence and Health Risk Assessment of Multiple Pesticides in Drinking Water Sources of Southeast China	HE Shu, DONG Hui-yu, REN Nan-qi (180)
Spatiotemporal Distribution and Pollution Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Main Water Supply Reservoirs in Central Zhuhai City	WANG En-rui, ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, <i>et al.</i> (189)
Distribution Characteristics and Pollution Risk of Heavy Metals in River Sediment of Suzhou Water Network Area, China	ZHENG Min-hui, BAI Dong-rui, ZHANG Tao, <i>et al.</i> (198)
Distribution of Biodegradable Dissolved Organic Matter and Its Affecting Factors in a Typical Peri-urban Watershed in Yangtze River Delta	WU Wen-yu, MA Jing-sheng, YANG Lei, <i>et al.</i> (210)
Long-term Succession Patterns and Driving Factors of Water Quality in a Flood-pulse System Lake: A Case Study of Lake Luoma, Jiangsu Province	HUANG Xue-ying, GAO Ming-yuan, WANG Jin-dong, <i>et al.</i> (219)
Microplastic Pollution Status and Ecological Risk Evaluation in Weihe River	SHAN Ze-xuan, ZHANG Yan, ZHANG Cheng-qian, <i>et al.</i> (231)
Effects of Different Colored Polycarbonate Plastics on Growth and Community Structure of Periphytic Algae	WANG Meng-xue, YIN Si-cheng, WANG Zhen-fang, <i>et al.</i> (243)
Diversity Patterns and Influencing Factors of Epibiotic in <i>Vallisneria natans</i> and Planktonic Bacteria Communities	ZHANG Mei-ting, LIU Jin-xian, SU Jia-he, <i>et al.</i> (252)
Bacterial Community and Diversity of River Ecosystems on the Qinghai-Tibet Plateau Based on 16S rRNA Gene Sequencing	QU Wei-qing, ZHANG Bo-mei, HUANG Xue, <i>et al.</i> (262)
Spatial and Temporal Heterogeneity and Ecological Health Evaluation of Diatom Community Based on eDNA	JIANG Shan, ZHANG Yan, LI Fei-long, <i>et al.</i> (272)
Severity Differences and Mechanisms of Algal Blooms Among Sections in Pengxi River of the Three Gorges Reservoir	LUO Xiao-jiao, ZHANG Xing, HUANG Wei, <i>et al.</i> (282)
Characteristics of Soil Erosion and Nitrogen Loss in Vegetable Field Under Natural Rainfall	NING Jia-li, HUANG Yan-hui, LI Gui-fang, <i>et al.</i> (293)
Effects of Green, Blue, and Blue-green Roofs on Runoff Quality	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, YAN Jing, <i>et al.</i> (303)
Analysis of Spatiotemporal Variation Characteristics and Driving Forces of NPP in Shanxi Province from 2000 to 2020 Based on Geodetector	SHAO Jia-hao, LI Jing, YAN Xing-guang, <i>et al.</i> (312)
Spatio-temporal Variation in Vegetation Cover and Its Driving Mechanism Exploration in Southwest China from 2000 to 2020	XU Yong, DAI Qiang-yu, HUANG Wen-ting, <i>et al.</i> (323)
Heavy Metal Content and Resistance Gene Abundance and Related Properties in the Surface Soil around Qinghai Lake	HU Shi-lei, QU Jian-li, ZHANG Li, <i>et al.</i> (336)
Soil Heavy Metal Content, Pollution, and Influencing Factors in Typical Farming Area of Sichuan Basin	LIU Shu-ling, WU Mei, LIU Zhi-yuan, <i>et al.</i> (347)
Risk Assessment and Sources of Heavy Metals in Farmland Soils of Yellow River Irrigation Area of Ningxia	CHEN Lin, MA Kun, MA Jian-jun, <i>et al.</i> (356)
Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Soil Around Copper Smelting Sites	PENG Chi, LIU Xu, ZHOU Zi-ruo, <i>et al.</i> (367)
Characteristics of Typical Soil Acidification and Effects of Heavy Metal Speciation and Availability in Southwest China	LING Yun, LIU Han-yi, ZHANG Xiao-ting, <i>et al.</i> (376)
Stabilization Characteristics of Exogenous Cd in Different Types of Soil	WANG Gang, YU Hai-ying, HUANG Hua-gang, <i>et al.</i> (387)
Threshold of Se-rich Soil Based on Available-Se and Influencing Factors of Available-Se	WANG Ying, MA Yan-bin, WANG Ze-jing (395)
Accumulation Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil-Crop System Based on Soil Parent Material Zoning	CHEN Zi-wan, XU Jing, HOU Zhao-lei, <i>et al.</i> (405)
Characteristics and Planting Safety Assessment of As Content in Dryland Soil and Maize in Guizhou Province	HUANG Feng-yan, ZHOU Lang, SONG Bo, <i>et al.</i> (415)
Potential of Intercropping <i>Pennisetum purpureum</i> Schum with <i>Melia azedarach</i> L. and <i>Broussonetia papyrifera</i> for Phytoremediation of Heavy-metal Contaminated Soil around Mining Areas	WANG Xiao-hui, XIAO Xi-yuan, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (426)
Inactivation of Cd and As by an <i>Enterobacter</i> Isolated from Cd and As Contaminated Farmland Soil	YIN Xue-fei, LIU Yu-ling, WU De, <i>et al.</i> (436)
Mineralization Characteristics of Soil Organic Carbon and Its Relationship with Organic Carbon Components in Artificial <i>Robinia pseudoacacia</i> Forest in Loess Hilly Region	ZHU Yu-fan, LIU Wei-chao, LI Jia-xin, <i>et al.</i> (444)
Accumulation, Migration, and Transformation of Soil Phosphorus in Facility Agriculture and Its Influencing Factors	FANG Bing, CHEN Lin, WANG Yang, <i>et al.</i> (452)
Optimizing Straw Management to Enhance Carbon and Nitrogen Efficiency and Economic Benefit of Wheat-Maize Double Cropping System	WANG Liang, QIAN Xin, GAO Ying-bo, <i>et al.</i> (463)
Effect of Deep Fertilization with Slow/Controlled Release Fertilizer on N Fate in Clayey Soil Wheat Field	HOU Peng-fu, XUE Li-xiang, YUAN Wen-sheng, <i>et al.</i> (473)
Structure and Function of Soil Fungal Community in Rotation Fallow Farmland in Alluvial Plain of Lower Yellow River	NAN Zhen-wu, LIU Zhu, MENG Wei-wei, <i>et al.</i> (482)
Response of Topsoil Fungal Community Structure to Soil Improvement Measures in Degraded Forest of Red Soil Region	GUAN Hong-zhi, HUANG Rong-zhen, WANG Jin-ping, <i>et al.</i> (494)
Temporal and Spatial Variations in Root-associated Fungi Associated with <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> in the Semi-arid and Dry Sub-humid Desertified Regions of Northern China	ZHAO Pei-shan, GUO Mi-shan, GAO Guang-lei, <i>et al.</i> (502)
QMEC-based Analysis of the Soil Microbial Functional Potentials across Different Tibetan Plateau Glacier Forelands	ZHANG Jie-jie, Anders Priemé, CHEN Xian-ke, <i>et al.</i> (512)
Meta Analysis on Yield Effect of Biochar for Staple Crops in China	YU Bin-hang, JI Jian-mei, WANG Li-xue, <i>et al.</i> (520)
Effects of Biochar on Antibiotic Environmental Behaviors in Soil: A Meta-analysis	LI Jing-han, ZHANG Jian-qiang, XIA Li-qiong, <i>et al.</i> (531)
Properties of Biochars Prepared from Different Crop Straws and Leaching Behavior of Heavy Metals	LI Jia-kang, QIU Chun-sheng, ZHAO Jia-qi, <i>et al.</i> (540)
Spatial-temporal Evolution and Heterogeneity of Carbon Emissions at County-level in China	SONG Yuan-zhen, ZENG Jian, WANG Sen, <i>et al.</i> (549)
Spatiotemporal Dynamic Evolution and Gravity Center Migration of Carbon Emissions in the Main Urban Area of Chongqing over the Past 20 Years	XIANG Shu-jiang, YANG Chun-mei, XIE Yu-qi, <i>et al.</i> (560)
Spatiotemporal Characteristics and Influencing Factors of Environment Emergency Incident in China from 1991 to 2018	YU Guang-hui, WANG Fei-fan, LIU Xian-zhao, <i>et al.</i> (572)
Migration, Transformation, and Toxicity of Quaternary Ammonium Antimicrobial Agents in the Environment	ZHANG Li-jan, QIN Cun-li, QIAN Yao, <i>et al.</i> (583)