

目次

持久性、迁移性和潜在毒性化学品环境健康风险与控制研究现状及趋势分析 张少轩, 陈安娜, 陈成康, 景侨楠, 刘建国 (3017)

我国厨余垃圾资源化技术的多维绩效评价 杨光, 史波芬, 周传斌 (3024)

基于 MSPA 和电路理论的京津冀城市群热环境空间网络 乔治, 陈嘉悦, 王楠, 卢应爽, 贺瞳, 孙宗耀, 徐新良, 杨浩, 李莹, 王方 (3034)

城市空间格局与热环境响应关系:以合肥市为例 陈媛媛, 姚侠妹, 偶春, 张清怡, 姚晓洁 (3043)

天津市“十三五”期间 PM_{2.5} 减排效果评估 肖致美, 徐虹, 蔡子颖, 张裕芬, 刘茂辉, 孙猛, 李鹏, 杨宁, 戴运峰 (3054)

清洁取暖对保定市采暖期 PM_{2.5} 中碳质气溶胶的影响 罗宇睿, 张凯, 赵好希, 任家豪, 段菁春, 李欢欢, 关健, 郭志强, 李博文 (3063)

南京地区细颗粒物污染输送影响及潜在源区 谢放尖, 郑新梅, 窦焱焱, 杨峰, 刘春蕾, 李洁, 谢轶嵩, 王艳, 胡建林, 陈长虹 (3071)

大气环流型对珠三角 2015~2020 年臭氧变化的影响 汪瑶, 刘润, 辛繁 (3080)

热带气旋对海南岛臭氧污染的影响分析 符传博, 丹利, 佟金鹤, 徐文帅 (3089)

基于 CMAQ 和 HYSPLIT 模式的日照市夏季臭氧污染成因和来源分析 林鑫, 全纪龙, 王伊凡, 陈羽翔, 刘永乐, 张鑫, 敖丛杰, 刘浩天 (3098)

2016~2020 年成都市控制 PM_{2.5} 和 O₃ 污染的健康效益评价 张莹, 田琪琪, 魏晓钰, 张少波, 胡文东, 李明刚 (3108)

深圳市 2022 年春季新冠疫情管控期间空气质量分析 刘婵芳, 张傲星, 房庆, 叶毓婧, 杨红龙, 陈炯恺, 吴雯潞, 侯岳, 莫佳佳, 傅宗攻 (3117)

贵州省生物质燃烧源大气污染物排放清单 王艳妮, 杨敬婷, 黄贤峰, 程燕, 陆标, 顾兆林 (3130)

西安市大气降水的主要化学组分及其来源 周东, 黄智浦, 李思敏, 王森, 牛振川, 熊晓虎, 冯雪 (3142)

宜昌市大气微塑料的分布、呼吸暴露及溯源 刘立明, 王超, 巩文雯, 陆安祥, 任东, 涂清, 贾漫珂 (3152)

雅鲁藏布江水化学演变规律 江平, 张全发, 李思悦 (3165)

无定河流域地表水硝酸盐浓度的时空分布特征及来源解析 徐奇峰, 夏云, 李书鉴, 王万洲, 李志 (3174)

太浦河水体与沉积物中重金属的季节变化特征与污染评价 罗鹏程, 涂耀仁, 孙婷婷, 刘生辉, 高佳欣, 寇佳怡, 顾心彤, 段艳平 (3184)

北京市北运河水体中抗生素污染特征及风险评估 蒋宝, 隋珊珊, 孙成一, 王亚玲, 荆降龙, 凌文翠, 李珊珊, 李国傲 (3198)

氮和氧同位素示踪伊洛河河水硝酸盐来源及转化过程 郭文静, 张东, 蒋浩, 吴洋洋, 张郭妙, 段慧真, 许梦军, 麻冰涓, 陈昊, 黄兴宇 (3206)

淮河下游湖泊表层水和沉积物中 PPCPs 分布特征及风险评估 武宇圣, 黄天寅, 张家根, 田永静, 庞燕, 许秋瑾 (3217)

西宁市浅层地下水化学特征及形成机制 刘春燕, 于开宁, 张英, 荆继红, 刘景涛 (3228)

叶尔羌河流域平原区地下水污染风险评价 闫志云, 曾妍妍, 周金龙, 孙英, 马常莲 (3237)

密云水库细菌群落组成结构及影响因素 陈颖, 王佳文, 梁恩航, 陈倩 (3247)

可见光激发下模拟海水中四环素光降解的机制和路径 许恒韬, 付小航, 丰卫华, 王挺 (3260)

纳米零价铁改性生物炭对水中氨氮的吸附特性及机制 陈文静, 石峻岭, 李雪婷, 张李金, 刘富强, 陈正祝, 庞维海, 杨殿海 (3270)

高锰酸钾改性椰壳生物炭对水中 Cd(II) 和 Ni(II) 的去除性能及机制 张凤智, 王敦球, 曹星洋, 刘桥京, 岳甜甜, 刘立恒 (3278)

镧改性净水污泥水热炭对水体中磷的吸附特性及底泥内源磷的固定 何李文泽, 陈钰, 孙飞, 李艳君, 杨顺生, 张志鹏 (3288)

城镇生活污水处理厂出水硝酸盐浓度及同位素组成的影响因素 张东, 葛文彪, 赵爱萍, 高振朋, 陈昊, 张琮, 蒋浩, 吴文阳, 廖琪, 李成杰, 黄兴宇, 麻冰涓 (3301)

基于 Meta 分析的污水处理工艺对微塑料去除效果影响 符立松, 侯磊, 王艳霞, 李晓琳, 王万宾, 梁启斌 (3309)

我国自然生态系统氮沉降临界负荷评估 黄静文, 刘磊, 顾晓元, 凌超普 (3321)

气候变化和人类活动对东部沿海地区 NDVI 变化的影响分析 金岩松, 金凯, 王飞, 刘春霞, 秦鹏, 宗全利, 刘佩茹, 陈明利 (3329)

基于 InVEST 模型和 PLUS 模型的环杭州湾生态系统碳储量 丁岳, 王柳柱, 桂峰, 赵晨, 朱望远 (3343)

河西走廊中段荒漠绿洲土壤生态学计量特征 孙雪, 龙永丽, 刘乐, 刘继亮, 金丽琼, 杜海峰, 陈凌云 (3353)

乌梁素海东部流域非生长季草地土壤细菌群落结构的垂向差异 李文宝, 张博尧, 史玉娇, 郭鑫, 李兴月 (3364)

芦芽山华北落叶松林土壤剖面细菌群落分布格局 毛晓雅, 刘晋仙, 贾彤, 吴铁航, 柴宝峰 (3376)

植被类型对黄土高原露天采区复垦土壤碳循环功能基因的影响 赵蛟, 马静, 朱燕峰, 于昊辰, 张琦, 陈浮 (3386)

施用生物炭对麦田土壤细菌群落多样性和冬小麦生长的影响 姚丽茹, 李伟, 朱良正, 曹布仓, 韩娟 (3396)

甜龙竹不同种植年限对土壤真菌群落的影响 朱书红, 辉朝茂, 赵秀婷, 刘蔚漪, 张仲富, 刘会会, 张文君, 朱礼月, 涂丹丹 (3408)

生物炭对热带地区辣椒种植土壤 N₂O 排放及其功能基因的影响 陈琦琦, 王紫君, 陈云忠, 王誉琴, 朱启林, 胡天怡, 胡煜杰, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (3418)

覆膜和有机无机配施对夏玉米农田温室气体排放及水氮利用的影响 蒋洪雨, 雷琪, 张彪, 吴淑芳 (3426)

不同类型地膜覆盖对土壤质量、根系生长和产量的影响 穆晓国, 高虎, 李梅花, 赵欣茹, 郭宁, 靳磊, 李建设, 叶林 (3439)

基于 PMF 模型的某铅锌冶炼城市降尘重金属污染评价及来源解析 陈明, 王琳玲, 曹柳, 李名闯, 申哲民 (3450)

云南 5 城市道路扬尘 PM_{2.5} 中重金属含量表征及健康风险 韩新宇, 郭晋源, 史建武, 李定霜, 王怡明, 宁平 (3463)

兰州市黄河风情线地表积尘及周边绿地土壤重金属污染特征及风险评价 李军, 李开明, 王晓槐, 焦亮, 臧飞, 毛潇萱, 杨云钦, 台喜生 (3475)

PMF 和 RF 模型联用的土壤重金属污染来源解析与污染评价:以西北某典型工业园区为例 高越, 吕童, 张鑫凯, 张博哈, 毕思琪, 周旭, 张炜, 曹红斌, 韩增玉 (3488)

基于 APCS-MLR 受体模型和地统计法的矿区周边农用地土壤重金属来源解析 张传华, 王钟书, 刘力, 刘燕 (3500)

PCA-APCS-MLR 和地统计学的典型农田土壤重金属来源解析 王美华 (3509)

三峡库区稻田土壤重金属污染特征及风险评价 刘娅君, 李彩霞, 梅楠, 张美平, 张成, 王定勇 (3520)

皖江经济带耕地重金属健康风险评价及环境基准 刘海, 魏伟, 潘海, 宋阳, 潘杨, 黄健敏 (3531)

张家口市万全区某种植区土壤重金属污染评价与来源分析 安永龙, 殷秀兰, 李文娟, 金爱芳, 鲁青原 (3544)

滁州市表层土壤重金属含量特征、源解析及污染评价 汤金来, 赵宽, 胡睿鑫, 徐涛, 王宜萱, 杨扬, 周葆华 (3562)

矿业废弃地重金属形态分布特征与迁移转化影响机制分析 魏洪斌, 罗明, 向奎, 查理思, 杨慧丽 (3573)

基于成土母质的矿产资源基地土壤重金属生态风险评价与来源解析 卫晓峰, 孙紫坚, 陈自然, 魏浩, 孙厚云, 刘卫, 傅大庆 (3585)

不同种类蔬菜重金属富集特征及健康风险 祁浩, 庄坚, 庄重, 王琪, 万亚男, 李花粉 (3600)

山东省典型灌溉区土壤-小麦重金属健康风险评估 王菲, 费敏, 韩冬锐, 李春芳, 曹文涛, 姚磊, 曹见飞, 吴泉源 (3609)

基于机器学习方法的小麦镉富集因子预测 牛硕, 李艳玲, 杨阳, 商艳萍, 王天齐, 陈卫平 (3619)

《环境科学》征订启事(3062) 《环境科学》征稿简则(3116) 信息(3164, 3259, 3572)

2016 ~ 2020 年成都市控制 PM_{2.5} 和 O_{3-8h} 污染的健康效益评价

张莹^{1,2}, 田琪琪¹, 魏晓钰¹, 张少波¹, 胡文东¹, 李明刚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)

摘要: 细颗粒物 (PM_{2.5}) 和臭氧是我国主要的大气污染物, 严重危害人群健康。为评估成都市大气污染防治行动实施期间 PM_{2.5} 和臭氧对人群健康的影响, 首先, 利用流行病学中的广义相加模型和非线性分布滞后模型估算了 2014 ~ 2016 年成都市 PM_{2.5} 和臭氧最大 8 h 滑动平均 (O_{3-8h}) 浓度变化对居民疾病死亡影响的暴露-反应关系系数 (β), 在此基础上, 采用环境风险和环境影响评价法估算 2016 ~ 2020 年成都市 PM_{2.5} 和 O_{3-8h} 浓度暴露水平变化的健康收益。结果表明: ① 2016 ~ 2020 年成都市的 ρ (PM_{2.5}) 年均值呈逐年下降趋势, 从 63 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 降至 40.92 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 年均下降率约为 10.14%; 与之相反, ρ (O_{3-8h}) 年均值从 155 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 升至 169 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 年均增长率约为 2.23%。② 成都市 PM_{2.5} 对全因、心脑血管和呼吸系统疾病早逝人数影响的暴露-反应关系系数 β 分别为 0.000 360 0、0.000 500 1 和 0.000 923 7; O_{3-8h} 对应的 β 分别为 0.000 310 3、0.000 672 6 和 0.000 700 2。③ 假设 ρ (PM_{2.5}) 年均值削减至国家二级标准限值后 (35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 带来的健康受益人数和经济效益呈逐年下降趋势, 可避免的全因、心脑血管和呼吸系统疾病早逝人数分别从 2016 年的 1 128、416、328 例降至 2020 年的 229、96 和 54 例。近 5 年可避免的全因早逝人数共计 3 314 例, 对应的健康经济效益为 76.60 亿元。④ 假设 ρ (O_{3-8h}) 年均值削减至世界卫生组织规定的浓度限值 (70 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 带来的健康受益人数和经济效益呈上升态势, 可避免的全因、心脑血管和呼吸系统疾病早逝人数分别从 2016 年的 1 919、779 和 606 例升至 2020 年的 2 429、1 157 和 635 例, 可避免的全因和心脑血管疾病早逝年均增长率分别为 6.85% 和 10.72%, 高于 O_{3-8h} 浓度年均上升率。近 5 年可避免的全因早逝人数为 10 790 例, 对应的健康经济效益为 266.20 亿元。成都市细颗粒物治理成效显著, 但臭氧污染凸显, 臭氧已经成为危害成都市居民健康不可忽视的大气污染物, 加强 PM_{2.5} 和 O₃ 协同治理刻不容缓。

关键词: 细颗粒物 (PM_{2.5}); 臭氧最大 8 h 滑动平均 (O_{3-8h}); 成都; 健康效益; 经济损失

中图分类号: X196 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)06-3108-09 DOI: 10.13227/j.hjkk.202207058

Health Benefit Evaluation for PM_{2.5} as Well as O_{3-8h} Pollution Control in Chengdu, China from 2016 to 2020

ZHANG Ying^{1,2}, TIAN Qi-qi¹, WEI Xiao-yu¹, ZHANG Shao-bo¹, HU Wen-dong¹, LI Ming-gang¹

(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)

Abstract: Both particulate matter with aerodynamics of less than 2.5 (PM_{2.5}) and ozone are the two main air pollutants in China, which seriously endanger human health. To estimate the adverse impacts of PM_{2.5} and ozone on human health during the implementation of air pollution prevention and control actions in Chengdu, both the generalized additive model and the nonlinear distribution lag model of epidemiology were adopted to explore the exposure-response relationship coefficients β of daily ozone 8h maximum concentration average (O_{3-8h}), as well as that of PM_{2.5} on disease deaths in Chengdu from 2014 to 2016. On this basis, the environmental risk model and environmental value assessment model were both adopted to evaluate the health effects and health benefits in Chengdu from 2016 to 2020, respectively, with the assumption that PM_{2.5} and O_{3-8h} concentration were reduced to specified air pollution control limits (35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ and 70 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, respectively). The results showed ① the annual concentration of PM_{2.5} presented gradually decreasing trends in Chengdu from 2016 to 2020. Specifically, ρ (PM_{2.5}) from 63 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ in 2016 decreased to 40.92 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ in 2020. The average annual decline rate was approximately 9.8%. In contrast, the annual concentration of O_{3-8h} from 155 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ in 2016 increased to 169 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ in 2020, and the increasing rate was approximately 2.4%. ② Both PM_{2.5} and O_{3-8h} had lag effects on three types of disease deaths. Under the maximum lag effect, the corresponding exposure-response relationship coefficients β of PM_{2.5} were 0.000 360 0, 0.000 500 1, and 0.000 923 7 for all-cause, cardiovascular, and respiratory premature deaths, respectively, whereas the corresponding β of O_{3-8h} were 0.000 310 3, 0.000 672 6, and 0.000 700 2, respectively. ③ If ρ (PM_{2.5}) was reduced to the national secondary standard limit (35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), the corresponding number of health beneficiaries and economic benefits declined yearly. Specifically, the health beneficiary number of all-cause, cardiovascular, and respiratory disease deaths were reduced from 1 128, 416, and 328 in 2016 to 229, 96, and 54 in 2020, respectively. There were a total number of 3 314 avoidable premature deaths for all-cause diseases during the five years, resulting in a total health economic benefit of 7.66 billion yuan. ④ If we assume that ρ (O_{3-8h}) was reduced to the concentration limit specified by the World Health Organization (70 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), the corresponding number of health beneficiaries and economic

收稿日期: 2022-07-05; 修订日期: 2022-08-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42005136); 中国气象局西南区域气象中心创新团队基金项目 (XNQYCXTD-202203); 中国博士后科学基金项目 (2020M670419); 国家重点研发计划项目 (2016YFA0602004)

作者简介: 张莹 (1988 ~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为环境气象与健康, E-mail: zhangying@cuit.edu.cn

benefits were increasing yearly. Specifically, the health beneficiaries' numbers of all-cause, cardiovascular, and respiratory disease deaths rose from 1 919, 779, and 606 in 2016 to 2 429, 1 157, and 635 in 2020, respectively. The annual average growth rates of avoidable all-cause and cardiovascular mortality were 6.85% and 10.72%, respectively, which was higher than the annual average rise rate of $\rho(O_{3-8h})$. There were 10 790 total avoidable deaths from all-cause diseases during the five years, resulting in a total health economic benefit of 26.62 billion yuan. These findings indicate that PM_{2.5} pollution in Chengdu had been well controlled, whereas O₃ pollution had become more severe and had become another key air pollutant threatening human health. Therefore, the synchronous control of PM_{2.5} and ozone should be implemented in the future.

Key words: particulate matter with aerodynamics less than 2.5 (PM_{2.5}); daily ozone 8 h maximum concentration (O_{3-8h}); Chengdu; health benefits; economic loss

城市化和工业化的深入推进,对我国的大气环境造成了巨大的破坏,严重影响人们的生活水平,威胁人们生命健康,制约经济可持续发展.环境流行病学研究已经证实,短期或长期暴露于污染空气,尤其是重污染空气中,极易诱发呼吸、心血管、生殖及免疫系统等疾病,甚至导致死亡^[1,2].毒理学研究进一步揭示了大气污染物对人群健康的毒性效应及其致病机制^[3].2020 全球空气状况报告^[4]指出,2019 年空气污染从全球第 5 大死亡风险因素上升到第 4 大死亡风险因素,世界上 90% 以上的人口生活在空气污染较严重的地区,2019 年全球至少有 670 万人死于长期暴露在空气污染中.空气污染对人群健康的不利影响已经引起了各国政府及研究学者的广泛关注^[2,5].我国 2013 年出台的《大气污染防治行动计划》(“国十条”),把空气污染治理提高到前所未有的重要程度;2016 年底出台的《“健康中国 2030”规划纲要》要求把公众健康摆在优先发展的战略地位.随着一系列环保法规及政策的颁布实施,近年来我国空气质量改善显著,尤其是城市细颗粒物(particulate matter with aerodynamic less than 2.5, PM_{2.5})平均浓度下降明显,以 PM_{2.5} 为首要污染物的超标天数和重污染天数也明显减少^[6].即使如此,我国 PM_{2.5} 平均浓度依然高出发达国家一个量级^[7],PM_{2.5} 污染尚未得到根本性控制.在 PM_{2.5} 浓度改善的同时,近地层臭氧(O₃)浓度却逐年上升,2013 ~ 2019 年我国地表 O₃ 的增长率为 2 ~ 4 $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}$,而夏季增长率高达 4 ~ 9 $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}$ ^[8],O₃ 污染显著加剧.由此可见,我国空气污染进入了 PM_{2.5} 和 O₃ 协同防治的深水区,为此《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》提出“PM_{2.5} 与 O₃ 协同控制”战略.

近年来,诸多学者开展了我国不同地区的 PM_{2.5} 和 O₃ 健康风险的流行病学研究^[9,10],指出两种污染对人群健康的影响均较显著,即使同一种污染物也存在区域差异.与此同时,有学者率先对 PM_{2.5} 和 O₃ 引起的居民健康损失进行了货币化度量^[11~15],均表明两种污染物对我国不同区域带来巨大的经济损失.如杜沛等^[13]研究指出,2016 ~ 2019 年北京市控制 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 达到二级标准限值(35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)后,带

来的健康经济效益分别为 809.97、545.46、421.41 和 195.24 亿元,分别占北京市当年 GDP 的 3.16%、1.95%、1.39% 和 0.55%.曾贤刚等^[14]以世界卫生组织给出的全球自然背景臭氧最大 8 h 滑动平均(ozone 8 h maximum concentration average, O_{3-8h})浓度 70 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 为基准,估算了 2017 年我国 O_{3-8h} 污染造成的早逝人数为 98 473 例,健康经济损失在 197 ~ 978 亿元之间,约占全国当年 GDP 的 0.05% ~ 0.26%.需要指出的是,在环境健康经济效益研究中,由流行病学研究得到的暴露-反应关系系数(β)是估算环境健康效应和健康经济效益的关键参数.由于不同区域污染物组分、人群结构、生活习惯以及受教育程度等差异,从而导致 β 存在较大的区域差异^[2,5].鉴于我国医疗数据资料获取难度大,关于污染健康效应的流行病学研究还不够充分,尤其是 O₃ 污染的流行病学研究尚处于起步阶段,缺乏不同区域的研究结果,导致 β 存在很大的不确定性.而现阶段国内研究学者在开展污染健康效应研究中直接借鉴我国其他地区 and 国外环境流行病学研究结果估算的 β ,甚至在全国不同区域的环境健康经济效益研究中也只采用一个 β ,势必导致研究结果存在较大的误差.

成都市作为践行新发展理念的公园城市示范区,在成渝地区双城经济圈建设中扮演经济中心、科技中心、世界文化名城和国际门户枢纽等重要角色,当地空气污染问题备受各界关注.近年来随着政府部门出台的《成都市大气污染防治行动方案(2014-2017 年)》和《成都市大气污染防治行动方案 2016 年度实施计划》等多项削减大气污染物排放的措施,使得成都市 PM_{2.5} 浓度显著降低,但 O₃ 浓度有所增加,O₃ 污染严重.关于成都市 PM_{2.5} 和 O₃ 改善带来健康经济效益的相关研究还鲜有报道,亟需开展.基于此,本研究在开展成都市 PM_{2.5} 和 O_{3-8h} 健康风险的流行病学研究基础上,从经济学的角度对自《成都市大气污染防治行动方案 2016 年度实施计划》实施以来,近 5 年成都市 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 和 $\rho(\text{O}_{3-8h})$ 年均值达到规定浓度限值后所带来的健康效益进行定量评估,旨在为成都市实施空气质量标准的健康效益提供科学依据,并为成都空气质量的管理和健康预警、防治等提供参考.

1 材料与amp;方法

1.1 数据来源

1.1.1 所用疾病资料数据

2014年1月1日至2016年12月31日成都市逐日疾病死亡人数资料来源于中国疾病预防控制中心(CDC)全国疾病监测系统死因监测数据集. 根据国际疾病分类标准第10版(ICD-10)分别提取全因死亡(ICD-10 编码: A00-R99), 心脑血管疾病(ICD-10 编码: I00-I99)和呼吸系统疾病(ICD-10 编码: J00-J99)早逝人数资料^[16], 研究时段内全因早逝、心脑血管和呼吸系统疾病早逝人数分别为243 135、76 721和59 676例, 心脑血管和呼吸系统疾病早逝人数在成都市人口疾病死因构成的占比为56. 10%, 因此, 本研究选取的健康终端包括全因、心脑血管和呼吸系统疾病早逝3类.

1.1.2 大气环境监测资料

2014年1月1日至2020年12月31日的污染物数据来源于中华人民共和国生态环境部网站(<http://www.mee.gov.cn/>), 包括PM_{2.5}日均浓度($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)和每日臭氧最大8 h平均浓度(O_{3-8h}) ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$).

1.1.3 气象资料来源

2014年1月1日至2016年12月31日的气象资料来源于中国气象科学数据共享服务网成都市地面常规气象观察资料, 主要包括日均气温($^{\circ}\text{C}$)、相对湿度(%)和平均风速($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)等.

1.1.4 社会经济数据

以成都市统计年鉴公布的年末常住人口作为暴露人群^[17-21]. 健康终端死亡率、地区生产总值(地区GDP)和人均可支配收等从中国卫生年鉴和成都市卫生健康事业发展统计公报直接获取^[22-27], 如表1所示.

表1 成都市相关的社会经济数据

Table 1 Relevant social-economic data of Chengdu

年份	总人口数/万人	地区GDP/亿元	人均可支配收入/元	疾病死亡率(基线发生率)(1/10万)		
				全因	心脑血管疾病	呼吸系统疾病
2016	1 858. 20	12 170. 23	35 902. 00	604. 71	265. 11	69. 03
2017	1 918. 80	13 889. 39	38 918. 00	615. 28	275. 97	67. 20
2018	1 981. 30	15 342. 77	42 127. 85	617. 74	275. 22	68. 02
2019	2 040. 90	17 013. 00	45 878. 14	617. 43	277. 92	65. 02
2020	2 094. 70	17 717. 00	48 593. 00	598. 81	300. 37	55. 36

1.2 研究方法

1.2.1 暴露-反应关系系数估算

本研究利用4. 0. 2版本R软件中的“DLNM”和“MGCV”程序包进行建模, 实现分布滞后非线性模型(DLNM)与广义相加模型(GAM)的结合建模. DLNM优势在于能够同时评价暴露因素(如气温)的非线性效应和滞后效应, 即在模型中通过建立二维交叉基函数(cross-basis)描述因变量(如早逝人数)在暴露程度和滞后维度的分布^[28], 本研究主要采用DLNM控制气温的滞后效应和非线性效应. GAM具有量化因变量与多个解释变量之间复杂非线性关系的能力, 一般对空气污染物变量进行线性拟合, 对关联复杂的气象因子进行平滑函数拟合, 还可纳入分类变量以控制其他混杂因素^[29]. 本研究以GAM为模型框架, 首先控制除气温以外的多种混杂因素, 将时间序列、相对湿度和平均风速的非线性作用均采用样条函数拟合, 而星期几效应和节假日效应均以哑元变量纳入. 在此基础上, 利用DLNM构建气温的交叉基函数Temp. basis, 基于前期相关研究和敏感性试验^[30], 气温的最大滞后时间为14 d, 交叉基采用自由度为4的自然样条函数和多项式函数, 将构建好的Temp. basis纳入GAM模型. 最

后, 以线性形式纳入单一污染物(PM_{2.5}或O_{3-8h}), 从而量化不同滞后时间下污染物对疾病早逝影响的健康风险. 综上所述, 模型具体如下:

$$\ln[E(Y_t | X)] = \text{NS}(\text{Time}, \text{df}) + \text{NS}(\text{RH}, \text{df}) + \text{NS}(\text{Wind}, \text{df}) + \text{as.factor}(\text{DOW}) + \text{as.factor}(\text{Holiday}) + \text{Temp. basis} + \beta \text{PM}_{2.5} + \alpha \quad (1)$$

式中, $E(Y_t | X)$ 表示第 t 日早逝人数的期望值; α 表示残差; NS()为自然立方样条函数, 通过NS()函数依次将时间序列(Time)、相对湿度(RH)和风速(Wind)拟合进模型, 根据AIC(akaike information criterion)最小准则确定各参数的自由度(df). DOW和Holiday分别为控制“周末效应”和“节假日”效应, 均以哑元变量形式拟合进模型. Temp. basis为气温的交叉基函数. 污染物(此处以PM_{2.5}为例)以线性形式拟合进模型, 考虑到不同污染物之间存在较强的共线性, 因此, 模型中仅纳入一种污染物, 将构建好的模型输入R软件, 可直接获得PM_{2.5}对疾病影响的 β 及相应的标准差std, 并计算 β 对应的95%置信区间(95% confidence interval). 此外, 污染物对疾病的影响可能存在短期滞后效应, 分别拟合PM_{2.5}

单滞后天数(当天的 PM_{2.5} 浓度以及 1~5 d 前的浓度,依次记为 lag 0d 和 lag 1d~lag 5d)和累积滞后天数(当天的 PM_{2.5} 浓度与前 1~5 d 浓度的滑动平均值,依次记为 lag 01d~lag 05d)与早逝人数的关系,探究 β 的变化规律。

1.2.2 健康效益及经济效应评估

根据环境健康价值评估理论,控制污染物(PM_{2.5}或 O_{3-8h})所带来的健康效益评估思路通常分为两个步骤。第一:分别估算污染物削减到设定的情景阈值所带来的健康终端(全因、心脑血管和呼吸系统疾病早逝)的健康效应变化;第二:对不同的健康效应进行相应的货币化评估,从而估算出控制 PM_{2.5}或 O_{3-8h} 削减后所带来的居民健康效益,货币转化公式具体如下:

$$L = \sum_{i=1}^M L_i = \sum_{i=1}^M (\Delta E_i \times \Delta L_i) \quad (2)$$

式中, L 为污染物(PM_{2.5}或 O_{3-8h})浓度降低带来的所有健康终端的效益总和; L_i 为健康终端 i 相应的健康效益; ΔE_i 为第 i 个健康终端的健康风险变化量,通过环境健康风险评估方法计算得到; ΔL_i 为第 i 个健康终端的单位经济价值,通过环境健康价值评估方法计算获得。

(1)环境健康效应评估 本研究采用主流的环境健康效应评估模型——泊松回归相对危险度模型,估算控制 PM_{2.5}(或 O_{3-8h})污染后对应的人群健康效益变化量^[2]。基本模型中设定某选定健康终端在 PM_{2.5}(或 O_{3-8h})实际浓度下的人群健康风险(死亡率为):

$$E = E_0 \times \exp[\beta \times (c - c_0)] \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \Delta E &= P \times (E - E_0) \\ &= P \times E \times \left[1 - \frac{1}{\exp[\beta \times (c - c_0)]} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

式中, P 为暴露人口数量,本文选取成都市年末常住人口作为研究对象; β 为模型(1)中得到的暴露-反应关系系数; c 和 c_0 分别为污染物 PM_{2.5}(或

O_{3-8h})的实际年均浓度和参考基准浓度(又称阈值浓度); PM_{2.5}的参考基准浓度选取国家二级浓度限值,为 35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 关于 O_{3-8h} 阈值浓度,我国尚未有统一标准,世界卫生组织指出全球 O_{3-8h} 自然背景浓度约为 70 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。目前表明 O_{3-8h} 的健康效应存在阈值浓度鲜见报道,因此,本文选择 70 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 作为 O_{3-8h} 的阈值浓度。 E 和 E_0 分别为在 c 和 c_0 浓度条件下的健康效应; ΔE 为健康效应变化量。

(2)环境健康价值评估 对于早逝的经济成本评估,通常采用统计生命价值(value of statistical life, VOSL)进行评估,即人们为降低死亡风险而愿意付出的代价并用货币化进行衡量的方法。目前成都地区并未开展 VOSL 的相关研究。本文参考谢旭轩^[31]对北京市 VOSL 的研究结果(168 万元),考虑到两地收入水平差距,以人均可支配收入为指标,估算成都不同年份的 VOSL 值,公式如下:

$$\text{VOSL}_{\text{CD}} = \text{VOSL}_{\text{BJ}} \times \left(\frac{\text{Income}_{\text{CD}}}{\text{Income}_{\text{BJ}}} \right)^b \quad (5)$$

式中, VOSL_{BJ} 和 VOSL_{CD} 分别表示北京和成都市的 VOSL, $\text{Income}_{\text{BJ}}$ 和 $\text{Income}_{\text{CD}}$ 分别为北京和成都市的人均可支配收入; b 为收入弹性系数(一般取 $b = 1$)。

2 结果与讨论

2.1 疾病与气象环境因子的基本特征统计

2014~2016 年成都市日均全因、心脑血管疾病和呼吸系统疾病早逝人数分别为(221.8 ± 37.1)、(70.0 ± 15.4)和(54.5 ± 15.5)例;日均气温为(16.6 ± 7.2)°C,相对湿度为(81.7 ± 8.2)%,日均风速为(1.3 ± 0.5) m·s⁻¹; $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 年均值为(65.4 ± 44.2) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,变幅为 10.7~426.4 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\rho(\text{O}_{3-8h})$ 年均值用其第 90 百分位数表示,为(156.9 ± 60.6) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,变幅为 13.2~331.1 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,两种污染物变幅范围均较大(表 2)。经统计,2014~2016 年 PM_{2.5} 和 O_{3-8h} 超标 [$\rho(\text{PM}_{2.5}) > 75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; $\rho(\text{O}_{3-8h}) > 160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] 天数分别为 322 d 和 280 d。

表 2 2014~2016 年成都市疾病早逝人数、气象要素和污染物的描述性分析

Table 2 Descriptive statistics on daily mortality, meteorological variables, and air pollutant levels in Chengdu from 2014 to 2016

指标	参数	均值 ± 标准差	最小值	平均温度百分位数			最大值
				P25	P50	P75	
疾病	全因(例)	221.8 ± 37.1	144	195	217	244	430
	心脑血管疾病(例)	70.0 ± 15.4	35	58	68	80	136
	呼吸系统疾病(例)	54.5 ± 15.5	23	43	51	64	121
气象要素	平均气温/°C	16.6 ± 7.2	-1.9	10.1	17.7	22.8	29.8
	相对湿度/%	81.7 ± 8.2	42.0	77.0	83.0	88.0	98.0
	平均风速/m·s ⁻¹	1.3 ± 0.5	0.3	1.0	1.2	1.5	3.4
污染物	$\rho(\text{PM}_{2.5})/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	65.4 ± 44.2	10.7	35.2	55.2	82.0	426.4
	$\rho(\text{O}_{3-8h})/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	156.9 ± 60.6	13.2	72.9	109.2	161.0	331.1

2016 ~ 2020 年成都市的 $PM_{2.5}$ 整体呈下降趋势(图 1), $\rho(PM_{2.5})$ 年均值分别为 63、56、51、43 和 $40.92 \mu g \cdot m^{-3}$, 年均下降率为 10.14%, 表明成都市 $PM_{2.5}$ 污染治理成效显著. 与之相反, O_{3-8h} 浓度年际变异较小, O_{3-8h} 污染持续严重, 近 5 年 $\rho(O_{3-8h})$ 年均值分别为 155、156.8、153、160 和 $169 \mu g \cdot m^{-3}$, 年均上升率为 2.23%. 表明当地 O_{3-8h} 污染严重, 其浓度远高于人体健康阈值. 当

前全国各地臭氧污染逐渐凸显, 已有研究发现京津冀、四川盆地等地区的臭氧污染持续升高^[32,33], 且超标天数也在不断增加, 因此, 国家也将在“十四五”期间重点开展 $PM_{2.5}$ 和臭氧协同治理科研攻关. 受大气氧化性等因素影响, 成都市 $PM_{2.5}$ 和臭氧复合型污染态势显著, 这使得成都市进一步降低 $PM_{2.5}$ 浓度的难度加大, 且实现臭氧浓度管控面临较大挑战.

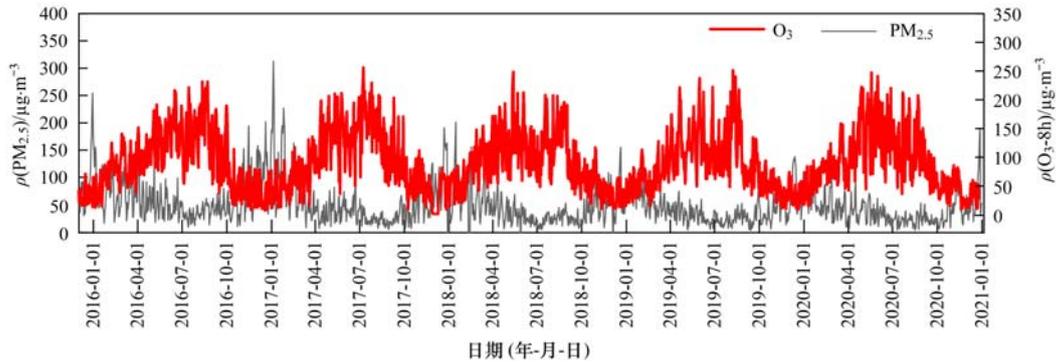


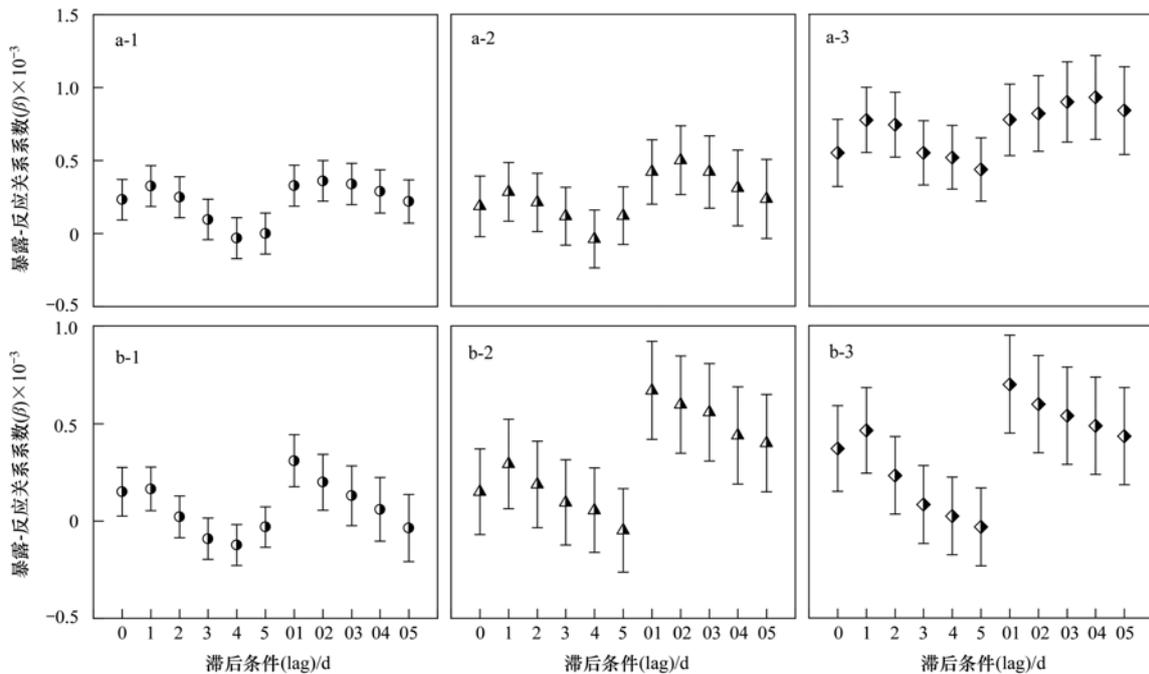
图 1 2016 ~ 2020 年成都市 $PM_{2.5}$ 和 O_{3-8h} 浓度变化时间序列

Fig. 1 Changes in daily average concentration of $PM_{2.5}$ and O_{3-8h} in Chengdu from 2016 to 2020

2.2 $PM_{2.5}$ 和 O_{3-8h} 分别与疾病关联的暴露-反应关系系数(β)

图 2 为不同滞后天数下, $PM_{2.5}$ 对不同疾病早逝关联的暴露-反应关系系数(β). β 越大, 表明污染

物对人群健康影响的风险越显著. 可知, $PM_{2.5}$ 对疾病早逝人数影响的累积滞后效应强于单天数滞后效应. 具体而言, $PM_{2.5}$ 对全因、心脑血管疾病和呼吸系统疾病早逝人数分别在累积滞后 2 d (lag 02d)、2



a 表示 $PM_{2.5}$, b 表示 O_{3-8h} ; 1 ~ 3 分别表示全因、心脑血管疾病和呼吸系统疾病; 横坐标 0 ~ 5 表示单滞后天数, 01 ~ 05 表示累积滞后天数

图 2 不同时间滞后条件下(单滞后 lag 0 ~ lag 5d 和累积滞后 lag 01 ~ lag 05d) $PM_{2.5}$ 和 O_{3-8h} 与全因、心脑血管和呼吸系统疾病早逝关联的暴露-反应关系系数(β)

Fig. 2 Exposure-response relationship coefficient of $PM_{2.5}$ as well as O_{3-8h} associated with total, cardiovascular, and respiratory mortality at different lag (including single lag 0-lag 5 and cumulative lag 01-lag 05) days

d(lag 02d)和4 d(lag 04d)的情况下最显著,对应的 β 分别为0.000 360(95% CI:0.000 227,0.000 494)、0.000 500 1(95% CI:0.000 265 5,0.000 734 7)和0.000 923 7(95% CI:0.000 665 4,0.001 182)。O_{3-8h}对全因、心脑血管疾病和呼吸系统疾病早逝人数分别在累积滞后1 d(lag 01d)、1 d(lag 01d)和2 d(lag 02d)的情况下最显著,此时,对应的 β 分别为0.000 310 3(95% CI:0.000 172 375,0.000 448 225)、0.000 672 6(95% CI:0.000 406 236,0.000 938 964)和0.000 700 2(95% CI:0.000 347 792,0.001 052 608)。在后续的人群健康效益及经济效应评估研究中,均采用两种污染物对人群健康影响风险最大时对应的 β 。前人在评估全国PM_{2.5}污染健康风险及经济损失研究中,直接借鉴其他区域PM_{2.5}对全因早逝影响的 β ,为0.002 96(95% CI:0.000 76,0.005 04)^[12],高于本研究估算的 β ,进而高估了成都市PM_{2.5}污染造成的健康效应及经济损失。而在估算全国O_{3-8h}造成的全因和心脑血管疾病早逝健康效应研究中^[14,35],直接借鉴的 β 分别为0.000 24(95% CI:0.000 13,0.000 35)和0.000 27(95% CI:0.000 10,0.000 44),均低于本研究估算的 β ,从而低估了成都市O_{3-8h}污染造成的健康效应。

2.3 人群健康效应变化

就PM_{2.5}而言,若成都市PM_{2.5}浓度削减至国家二级标准限值(35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)后,2016~2020年成都市疾病早逝受益人数呈逐年下降趋势(图3),可避免的全因、心脑血管和呼吸系统疾病早逝人数分别

从2016年的1 128、416和328例降至2020年的229、96和54例。近5年可避免的全因、心脑血管和呼吸系统疾病早逝人数合计3 314、1 249和925例,其中可避免的心脑血管和呼吸系统疾病早逝人数占可避免的全因早逝人数的37.69%和27.91%。本研究估算的健康受益人数低于陈菁等^[34]对北京市2019年PM_{2.5}健康效应的评估结果,主要原因在于北京市PM_{2.5}浓度和常住人口均高于成都市。

就O_{3-8h}而言,若成都市O_{3-8h}浓度削减至标准限值(70 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)后,2016~2020年受益人数整体呈增加趋势,可避免的全因、心脑血管和呼吸系统疾病早逝人数分别从2016年的1 919、779和606例升至2020年的2 492、1 157和635例,值得注意的是,可避免的全因和心脑血管疾病早逝人数上升率分别为6.85%和10.72%,高于O_{3-8h}浓度年均上升率,这一结果与文献^[35]中O_{3-8h}导致的平均早逝人数增加率高于臭氧浓度增加率相吻合。经统计,近5年成都市可避免的全因、心脑血管和呼吸系统疾病早逝人数分别为10 790、4 582和3 147例,其中可避免的心脑血管和呼吸系统疾病早逝人数约占可避免的全因早逝人数的42.47%和29.16%,表明成都市O_{3-8h}污染加剧对人群健康的早逝风险影响主要反映在心脑血管和呼吸系统疾病早逝风险上,与文献^[14]的研究结果一致,其还指出2017年成都市O_{3-8h}污染削减至70 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,可避免的全因早逝人数为1 055例,而本研究2017年估算结果为2 059例,主要差异归因于 β 取值不同,进一步反映既往研究低估了成都市O_{3-8h}导致的健康效应。

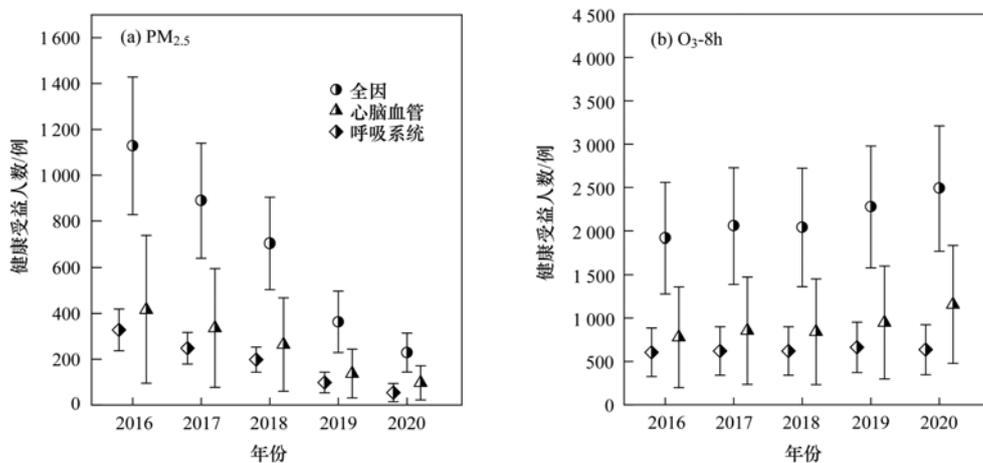


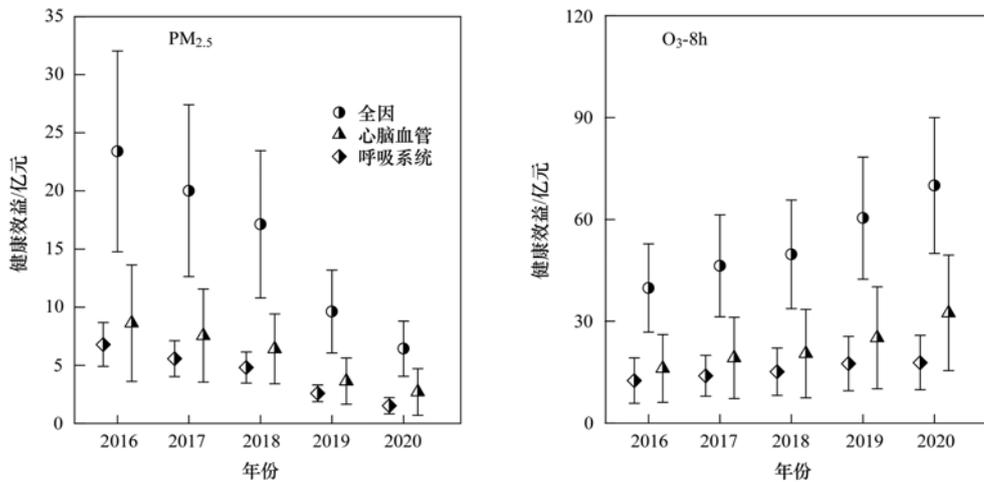
图3 PM_{2.5}和 O_{3-8h}达到空气质量标准所带来的健康效应

Fig. 3 Health effects of achieving the PM_{2.5} and O_{3-8h} air quality standard

2.4 健康经济效益

2016~2020年削减PM_{2.5}浓度至国家规定的二级浓度限值后,带来的经济效益依次为23.41、20.02、17.13、9.62和6.43亿元(图4),分别占成

都市当年GDP的4.31%、2.99%、2.34%、1.23%和0.83%。成都市控制PM_{2.5}达标后带来的健康经济效益及其占GDP的比值均呈逐年下降的趋势,表明PM_{2.5}污染呈好转的发展态势,这意味着成都市空

图 4 PM_{2.5}达到空气质量二级标准所带来的健康效益Fig. 4 Health benefits of achieving the PM_{2.5} air quality standard

气污染管理与控制措施已经对细粒子浓度起到了明显的控制作用. 由于受益人数的不同及 GDP 的逐年变化, 各健康终端对总的健康效益贡献也存在差距, 近 5 年全因、心脑血管和呼吸系统疾病早逝的健康经济效益分别为 76.60、28.94 和 21.29 亿元, 其中心脑血管疾病和呼吸系统疾病早逝的健康经济效益分别占全因早逝健康经济效益的 37.78% 和 27.79%.

2016~2020 年削减 O_{3-8h} 浓度至世界卫生组织规定的 O_{3-8h} 浓度限值后, 带来的健康经济效益依次为 39.82、46.31、49.71、60.39 和 69.98 亿元, 分别占成都市当年 GDP 的 0.32%、0.33%、0.32%、0.35% 和 0.39%, 成都市削减 O_{3-8h} 达标后带来的健康经济效益及其占 GDP 的比值呈现增加的趋势, 说明成都市 O_{3-8h} 污染呈现出加剧的发展态势. 有研究表明, 2017 年 O_{3-8h} 污染造成的健康经济损失占全国 GDP 的 0.05%~0.26%^[14], 本研究结果高于全国平均水平, 可见成都市 O_{3-8h} 污染形势严峻. 经统计, 近 5 年成都市全因、心脑血管和呼吸系统疾病早逝的健康经济效益分别为 266.20、113.54 和 77.08 亿元, 心脑血管疾病和呼吸系统疾病早逝的健康经济损失占全因早逝健康经济损失的 42.65% 和 28.96%, 心脑血管疾病占比最大, 与文献[14]的研究结果接近. 上述研究表明, 成都市 O_{3-8h} 污染已经成为当地人群健康风险产生的重大隐患之一, 对地区经济构成了极大的威胁.

需要指出的是, 本文仅估算了 PM_{2.5} 和 O_{3-8h} 浓度削减带来的全因、心脑血管和呼吸系统疾病早逝的健康风险和经济效益, 并未对其他(如呼吸和心血管住院、儿科和内科、急性支气管炎、慢性支气管炎和哮喘等)可能受 PM_{2.5} 和 O_{3-8h} 污染影响的健康终端进行健康经济效益研究, 有研究发现慢

性支气管炎的健康经济效益甚至高于早逝^[12,13], 因此, 本研究结果低估了成都市 PM_{2.5} 和 O_{3-8h} 削减带来的健康风险和经济效益. 尽管如此, 本研究在一定程度上反映了成都市 PM_{2.5} 和 O_{3-8h} 浓度污染危害的严重性. 从定量评价结果看, PM_{2.5} 和 O_{3-8h} 污染对该地区居民健康危害造成的经济损失不容忽视, 采取有效措施进行大气细粒子和光化学污染物控制和应急健康防护势在必行, 争取最大程度的降低大气细粒子和光化学产物污染造成的居民健康危害和经济损失, 以期达到更好的健康和经济效益. 然而, 由于成都市暴露人口基数大, 人口分布相对密集, 给 PM_{2.5} 和 O_{3-8h} 污染浓度的控制和居民健康安全防护带来了巨大的挑战, 未来当地居民因 PM_{2.5} 和 O_{3-8h} 污染所造成的健康风险仍然巨大.

3 结论

(1) 成都市 PM_{2.5} 浓度呈下降趋势, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 年均值从 2016 年的 $63 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 降至 2020 年的 $40.92 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 年均下降率为 10.14%; 与之相反, $\rho(\text{O}_{3-8h})$ 年均值年际变异较小, 整体呈上升趋势, 从 2016 年的 $155 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 升至 2020 年的 $169 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 年均上升率为 2.23%.

(2) PM_{2.5} 和 O_{3-8h} 对疾病早逝人数的影响存在滞后效应, 且不同疾病存在差异, 最大累积滞后效应下, PM_{2.5} 与全因、心脑血管疾病和呼吸系统疾病早逝关联的 β 分别为 0.000360、0.0005001 和 0.0009237. O_{3-8h} 关联的 β 分别为 0.0003103、0.0006726 和 0.0007002.

(3) 削减 PM_{2.5} (O_{3-8h}) 浓度达标后, 可避免的全因、心脑血管和呼吸系统疾病早逝人数均呈下降(上升)趋势; 2016~2020 年削减 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 至 35

$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,近5年可避免的全因、心脑血管和呼吸系统疾病早逝人数分别为3 314例、1 249例和925例。削减 $\rho(\text{O}_{3-8\text{h}})$ 至 $70\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,近5年带来可避免的全因、心脑血管和呼吸系统疾病早逝人数分别为10 790、4 582和3 147例。值得注意的是,可避免的全因和心脑血管疾病早逝年均增长率分别为6.85%和10.72%,高于 $\text{O}_{3-8\text{h}}$ 浓度年均上升率。

(4)2016~2020年控制PM_{2.5}所带来的全因早逝健康经济效益分别为23.41、20.02、17.13、9.62和6.43亿元,分别占成都市当年GDP的4.31%、2.99%、2.34%、1.23%和0.83%,GDP占比呈逐年下降趋势,表明成都市PM_{2.5}污染呈好转态势。2016~2020年控制 $\text{O}_{3-8\text{h}}$ 所带来的全因早逝健康经济效益分别为39.82、46.31、49.71、60.39和69.98亿元,分别占成都市当年GDP的0.32%、0.33%、0.32%、0.35%和0.39%,GDP占比呈逐年上升的趋势,表明成都市 $\text{O}_{3-8\text{h}}$ 污染呈恶化态势。

参考文献:

- [1] Li B X, Yang J, Dong H, *et al.* PM_{2.5} constituents and mortality from a spectrum of causes in Guangzhou, China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, **222**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2021.112498.
- [2] Zhang Y, Wang S G, Fan X G, *et al.* Temperature modulation of the health effects of particulate matter in Beijing, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, **25**(11): 10857-10866.
- [3] Yao Y, Liu L X, Guo G, *et al.* Interaction of Sirtuin 1 (SIRT1) candidate longevity gene and particulate matter (PM_{2.5}) on all-cause mortality: a longitudinal cohort study in China [J]. *Environmental Health*, 2021, **20**(1), doi: 10.1186/s12940-021-00718-x.
- [4] The 2020 world air quality report [EB/OL]. <https://www.iqair.cn/world-most-polluted-cities/world-air-quality-report-2020-en.pdf>,2021-05-11.
- [5] Hu J L, Huang L, Chen M D, *et al.* Premature mortality attributable to particulate matter in China; source contributions and responses to reductions [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(17): 9950-9959.
- [6] 曾贤刚, 阮芳芳. 中国PM_{2.5}污染健康效应的国民经济影响分析[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(7): 3228-3238.
Zeng X G, Ruan F F. Analysis on the national economic impact of PM_{2.5}-induced health effects in China [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(7): 3228-3238.
- [7] Gong T Y, Sun Z B, Zhang X L, *et al.* Associations of black carbon and PM_{2.5} with daily cardiovascular mortality in Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **214**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.116876.
- [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 Science of the United States of America*, 2019, **116**(2): 422-427.
- [9] Wang J D, Wang S X, Voorhees A S, *et al.* Assessment of short-term PM_{2.5}-related mortality due to different emission sources in the Yangtze River Delta, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **123**: 440-448.
- [10] Fang D, Wang Q G, Li H M, *et al.* Mortality effects assessment of ambient PM_{2.5} pollution in the 74 leading cities of China [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **569**: 1545-1552.
- [11] Chen L, Shi M S, Li S H, *et al.* Combined use of land use regression and BenMAP for estimating public health benefits of reducing PM_{2.5} in Tianjin, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **152**: 16-23.
- [12] 李惠娟, 周德群, 魏永杰. 我国城市PM_{2.5}污染的健康风险及经济损失评价[J]. *环境科学*, 2018, **39**(8): 3467-3475.
Li H J, Zhou D Q, Wei Y J. An assessment of PM_{2.5}-related health risks and associated economic losses in Chinese cities [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(8): 3467-3475.
- [13] 杜沛, 王建州. 北京市控制PM_{2.5}污染的健康效益评估[J]. *环境科学*, 2021, **42**(3): 1255-1267.
Du P, Wang J Z. Health benefit assessment of PM_{2.5} pollution control in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(3): 1255-1267.
- [14] 曾贤刚, 阮芳芳, 姜艺婧. 中国臭氧污染的空间分布和健康效应[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(9): 4025-4032.
Zeng X G, Ruan F F, Jiang Y J. Spatial distribution and health effects of ozone pollution in China [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(9): 4025-4032.
- [15] Feng Z Z, De Marco A, Anav A, *et al.* Economic losses due to ozone impacts on human health, forest productivity and crop yield across China [J]. *Environment International*, 2019, **131**, doi: 10.1016/j.envint.2019.104966.
- [16] 卫生部卫生统计信息中心, 北京协和医院世界卫生组织疾病分类合作中心. 国际疾病分类(ICD-10)应用指导手册[M]. 北京: 中国协和医科大学出版社, 2001.
- [17] 成都市统计局, 成都市统计学会, 国家统计局成都调查队. 成都统计年鉴2016[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016.
- [18] 成都市统计局, 成都市统计学会, 国家统计局成都调查队. 成都统计年鉴2017[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
- [19] 成都市统计局, 国家统计局成都调查队. 成都统计年鉴2018[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [20] 成都市统计局, 国家统计局成都调查队. 成都统计年鉴2019[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- [21] 成都市统计局, 国家统计局成都调查队. 成都统计年鉴2020[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [22] 国家卫生和计划生育委员会. 2016中国卫生和计划生育统计年鉴[M]. 北京: 中国协和医科大学出版社, 2016.
- [23] 国家卫生和计划生育委员会. 2017中国卫生和计划生育统计年鉴[M]. 北京: 中国协和医科大学出版社, 2017.
- [24] 国家卫生健康委员会. 中国卫生健康统计年鉴2018[M]. 北京: 中国协和医科大学出版社, 2018.
- [25] 国家卫生健康委员会. 中国卫生健康统计年鉴2019[M]. 北京: 中国协和医科大学出版社, 2019.
- [26] 国家卫生健康委员会. 中国卫生健康统计年鉴2020[M]. 北京: 中国协和医科大学出版社, 2020.
- [27] 四川省卫生健康委员会. 四川卫生健康统计年鉴(2020)[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2021.
- [28] Gasparrini A. Distributed lag linear and non-linear models in R: the package dlmm [J]. *Journal of Statistical Software*, 2011, **43**(8): 1-20.
- [29] Zhang Y, Wang S G, Zhang X L, *et al.* Association between moderately cold temperature and mortality in China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, **27**(21): 26211-26220.
- [30] Zhang Y, Zhang X L, Fan X G, *et al.* Modifying effects of temperature on human mortality related to black carbon particulates in Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*,

- 2020, **243**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117845.
- [31] 谢旭轩. 健康的价值: 环境效益评估方法与城市空气污染控制策略[D]. 北京: 北京大学, 2011.
- [32] 赵辉, 郑有飞, 张誉馨, 等. 京津冀大气污染的时空分布与人口暴露[J]. 环境科学学报, 2020, **40**(1): 1-12.
Zhao H, Zheng Y F, Zhang Y X, *et al.* Spatiotemporal distribution and population exposure of air pollution in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(1): 1-12.
- [33] Wu K, Wang Y R, Qiao Y H, *et al.* Drivers of 2013-2020 ozone trends in the Sichuan Basin, China: impacts of meteorology and precursor emission changes[J]. *Environmental Pollution*, 2022, **300**, doi: 10.1016/j.envpol.2022.118914.
- [34] 陈菁, 彭金龙, 徐彦森. 北京市2014~2020年PM_{2.5}和O₃时空分布与健康效应评估[J]. 环境科学, 2021, **42**(9): 4071-4082.
Chen J, Peng J L, Xu Y S. Spatiotemporal distribution and health impacts of PM_{2.5} and O₃ in Beijing, from 2014 to 2020 [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(9): 4071-4082.
- [35] 王纯璐, 王毅一, 史之浩, 等. 基于多源融合数据评估2014-2018年中国地表大气臭氧污染变化及其健康影响[J]. 大气科学学报, 2021, **44**(5): 737-745.
Wang C L, Wang Y Y, Shi Z H, *et al.* Assessment of surface ozone pollution change and its health effect in China from 2014 to 2018 based on multi-source fusion data [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2021, **44**(5): 737-745.

《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.hjks.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: hjks@rcees.ac.cn; 网址: www.hjks.ac.cn

CONTENTS

Research Status and Trend Analysis of Environmental and Health Risk and Control of Persistent, Mobile, and Toxic Chemicals	ZHANG Shao-xuan, CHEN An-na, CHEN Cheng-kang, <i>et al.</i> (3017)
Assessment of the Multidimensional Performances of Food Waste Utilization Technologies in China	YANG Guang, SHI Bo-fen, ZHOU Chuan-bin (3024)
Spatial Network of Urban Heat Environment in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration Based on MSPA and Circuit Theory	QIAO Zhi, CHEN Jia-yue, WANG Nan, <i>et al.</i> (3034)
Relationship Between Urban Spatial Pattern and Thermal Environment Response in Summer: A Case Study of Hefei City	CHEN Yuan-yuan, YAO Xia-mei, OU Chun, <i>et al.</i> (3043)
Assessment of Emission Reduction Effect of Major Air Pollution Control Measures on PM _{2.5} Concentrations During 13th Five-Year Period in Tianjin	XIAO Zhi-mei, XU Hong, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (3054)
Effect of Clean Heating on Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} During the Heating Period in Baoding	LUO Yu-qian, ZHANG Kai, ZHAO Yu-xi, <i>et al.</i> (3063)
Transport Influence and Potential Sources of PM _{2.5} Pollution for Nanjing	XIE Fang-jian, ZHENG Xin-mei, DOU Tao-tao, <i>et al.</i> (3071)
Impact of Atmospheric Circulation Patterns on Ozone Changes in the Pearl River Delta from 2015 to 2020	WANG Yao, LIU Run, XIN Fan (3080)
Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in Hainan Island	FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, <i>et al.</i> (3089)
Analysis of Causes and Sources of Summer Ozone Pollution in Rizhao Based on CMAQ and HYSPLIT Models	LIN Xin, TONG Ji-long, WANG Yi-fan, <i>et al.</i> (3098)
Health Benefit Evaluation for PM _{2.5} as Well as O ₃ _{8h} Pollution Control in Chengdu, China from 2016 to 2020	ZHANG Ying, TIAN Qi-qi, WEI Xiao-yu, <i>et al.</i> (3108)
Impacts of COVID-19 Lockdown on Air Quality in Shenzhen in Spring 2022	LIU Chan-fang, ZHANG Ao-xing, FANG Qing, <i>et al.</i> (3117)
Emission Inventory of Airborne Pollutants from Biomass Combustion in Guizhou Province	WANG Yan-ni, YANG Jing-ting, HUANG Xian-feng, <i>et al.</i> (3130)
Main Chemical Components in Atmospheric Precipitation and Their Sources in Xi'an	ZHOU Dong, HUANG Zhi-pu, LI Si-min, <i>et al.</i> (3142)
Distribution, Respiratory Exposure, and Traceability of Atmospheric Microplastics in Yichang City	LIU Li-ming, WANG Chao, GONG Wen-wen, <i>et al.</i> (3152)
Hydrochemical Evolution in the Yarlung Zangbo River Basin	JIANG Ping, ZHANG Quan-fa, LI Si-yue (3165)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Nitrate in Surface Water of Wuding River Basin	XU Qi-feng, XIA Yun, LI Shu-jian, <i>et al.</i> (3174)
Seasonal Variation Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in Water and Sediment of Taipu River	LUO Peng-cheng, TU Yao-jen, SUN Ting-ting, <i>et al.</i> (3184)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Beiyun River Basin in Beijing	JIANG Bao, SUI Shan-shan, SUN Cheng-yi, <i>et al.</i> (3198)
Tracking Riverine Nitrate Sources and Transformations in the Yiluo River Basin by Nitrogen and Oxygen Isotopes	GUO Wen-jing, ZHANG Dong, JIANG Hao, <i>et al.</i> (3206)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Surface Water and Sediments of Lakes in the Lower Reaches of the Huaihe River	WU Yu-sheng, HUANG Tian-yin, ZHANG Jia-gen, <i>et al.</i> (3217)
Characteristics and Driving Mechanisms of Shallow Groundwater Chemistry in Xining City	LIU Chun-yan, YU Kai-ning, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3228)
Groundwater Pollution Risk Assessment in Plain Area of the Yarkant River Basin	YAN Zhi-yun, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i> (3237)
Composition Structure and Influence Factors of Bacterial Communities in the Miyun Reservoir	CHEN Ying, WANG Jia-wen, LIANG En-hang, <i>et al.</i> (3247)
Photo-Degradation Mechanism and Pathway for Tetracycline in Simulated Seawater Under Irradiation of Visible Light	XU Heng-tao, FU Xiao-hang, FENG Wei-hua, <i>et al.</i> (3260)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Ammonia Nitrogen in Water by Nano Zero-valent Iron-modified Biochar	CHEN Wen-jing, SHI Jun-ling, LI Xue-ting, <i>et al.</i> (3270)
Removal Performance and Mechanism of Potassium Permanganate Modified Coconut Shell Biochar for Cd(II) and Ni(II) in Aquatic Environment	ZHANG Feng-zhi, WANG Dun-qiu, CAO Xing-feng, <i>et al.</i> (3278)
Phosphorus Adsorption in Water and Immobilization in Sediments by Lanthanum-modified Water Treatment Sludge Hydrochar	HE Li-wenze, CHEN Yu, SUN Fei, <i>et al.</i> (3288)
Factors Affecting Nitrate Concentrations and Nitrogen and Oxygen Isotope Values of Effluents from Waste Water Treatment Plant	ZHANG Dong, GE Wen-biao, ZHAO Ai-ping, <i>et al.</i> (3301)
Effects of Wastewater Treatment Processes on the Removal Efficiency of Microplastics Based on Meta-analysis	FU Li-song, HOU Lei, WANG Yan-xia, <i>et al.</i> (3309)
Assessment of Critical Loads of Nitrogen Deposition in Natural Ecosystems of China	HUANG Jing-wen, LIU Lei, YAN Xiao-yuan, <i>et al.</i> (3321)
Impacts of Climate Change and Human Activities on NDVI Change in Eastern Coastal Areas of China	JIN Yan-song, JIN Kai, WANG Fei, <i>et al.</i> (3329)
Ecosystem Carbon Storage in Hangzhou Bay Area Based on InVEST and PLUS Models	DING Yue, WANG Liu-zhu, GUI Feng, <i>et al.</i> (3343)
Soil Stoichiometry Characterization in the Oasis-desert Transition Zone of Linze, Zhangye	SUN Xue, LONG Yong-li, LIU Le, <i>et al.</i> (3353)
Vertical Differences in Grassland Bacterial Community Structure During Non-Growing Season in Eastern Ulansuhai Basin	LI Wen-bao, ZHANG Bo-yao, SHI Yu-jiao, <i>et al.</i> (3364)
Distribution Pattern of Bacterial Community in Soil Profile of <i>Larix principis-rupprechtii</i> Forest in Luya Mountain	MAO Xiao-ya, LIU Jin-xian, JIA Tong, <i>et al.</i> (3376)
Effects of Vegetation Types on Carbon Cycle Functional Genes in Reclaimed Soil from Open Pit Mines in the Loess Plateau	ZHAO Jiao, MA Jing, ZHU Yan-feng, <i>et al.</i> (3386)
Effects of Biochar Application on Soil Bacterial Community Diversity and Winter Wheat Growth in Wheat Fields	YAO Li-ru, LI Wei, ZHU Yuan-zheng, <i>et al.</i> (3396)
Effects of Different Planting Years of <i>Dendrocalamus brandisii</i> on Soil Fungal Community	ZHU Shu-hong, HUI Chao-mao, ZHAO Xiu-ting, <i>et al.</i> (3408)
Effects of Biochar Amendment on N ₂ O Emission and Its Functional Genes in Pepper Growing Soil in Tropical Areas	CHEN Qi-qi, WANG Zi-jun, CHEN Yun-zhong, <i>et al.</i> (3418)
Effects of Mulching and Application of Organic and Chemical Fertilizer on Greenhouse Gas Emission and Water and Nitrogen Use in Summer Maize Farmland	JIANG Hong-li, LEI Qi, ZHANG Biao, <i>et al.</i> (3426)
Effects of Different Types of Plastic Film Mulching on Soil Quality, Root Growth, and Yield	MU Xiao-guo, GAO Hu, LI Mei-hua, <i>et al.</i> (3439)
Pollution Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Atmospheric Deposition in a Lead-zinc Smelting City Based on PMF Model	CHEN Ming, WANG Lin-ling, CAO Liu, <i>et al.</i> (3450)
Characterization and Health Risk of Heavy Metals in PM _{2.5} from Road Fugitive Dust in Five Cities of Yunnan Province	HAN Xin-yu, GUO Jin-yuan, SHI Jian-wu, <i>et al.</i> (3463)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Dusts and Surrounding Green Land Soils from Yellow River Custom Tourist Line in Lanzhou	LI Jun, LI Kai-ming, WANG Xiao-huai, <i>et al.</i> (3475)
Source Apportionment and Pollution Assessment of Soil Heavy Metal Pollution Using PMF and RF Model: A Case Study of a Typical Industrial Park in Northwest China	GAO Yue, LÜ Tong, ZHANG Yun-kai, <i>et al.</i> (3488)
Source Analysis of Soil Heavy Metals in Agricultural Land Around the Mining Area Based on APCS-MLR Receptor Model and Geostatistical Method	ZHANG Chuan-hua, WANG Zhong-shu, LIU Li, <i>et al.</i> (3500)
Source Analysis of Heavy Metals in Typical Farmland Soils Based on PCA-APCS-MLR and Geostatistics	WANG Mei-hua (3509)
Characteristics and Risk Evaluation of Heavy Metal Contamination in Paddy Soils in the Three Gorges Reservoir Area	LIU Ya-jun, LI Cai-xia, MEI Nan, <i>et al.</i> (3520)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Heavy Metals in Cultivated Land in Wanjiang Economic Zone	LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i> (3531)
Evaluation and Source Analysis of Soil Heavy Metal Pollution in a Planting Area in Wanquan District, Zhangjiakou City	AN Yong-long, YIN Xiu-lan, LI Wen-juan, <i>et al.</i> (3544)
Heavy Metal Concentration, Source, and Pollution Assessment in Topsoil of Chuzhou City	TANG Jin-lai, ZHAO Kuan, HU Rui-xin, <i>et al.</i> (3562)
Analysis on the Distribution Characteristics and Influence Mechanism of Migration and Transformation of Heavy Metals in Mining Wasteland	WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, <i>et al.</i> (3573)
Ecological Risk Assessment and Source Apportionment of Heavy Metals in Mineral Resource Base Based on Soil Parent Materials	WEI Xiao-feng, SUN Zi-jian, CHEN Zi-ran, <i>et al.</i> (3585)
Enrichment Characteristics of Heavy Metals and Health Risk in Different Vegetables	QI Hao, ZHUANG Jian, ZHUANG Zhong, <i>et al.</i> (3600)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Wheat Grain in the Typical Sewage Irrigated Area of Shandong Province	WANG Fei, FEI Min, HAN Dong-nui, <i>et al.</i> (3609)
Prediction of Cadmium Uptake Factor in Wheat Based on Machine Learning	NIU Shuo, LI Yan-ling, YANG Yang, <i>et al.</i> (3619)