

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

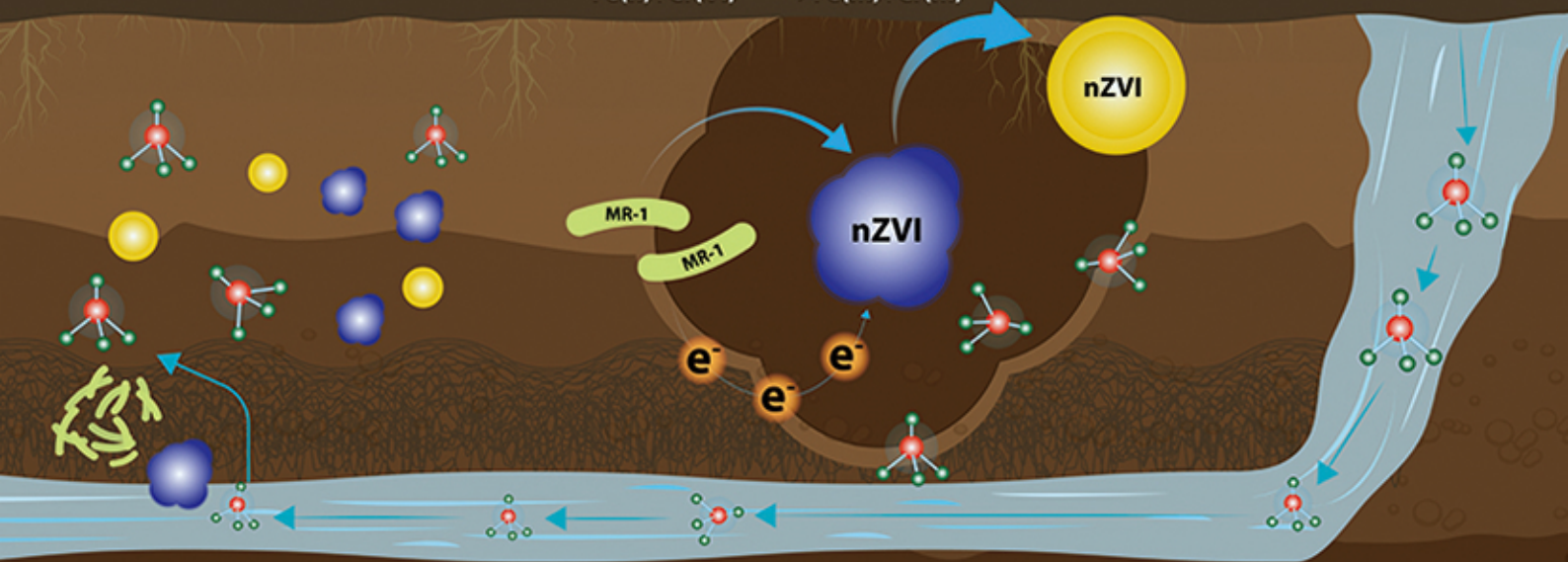
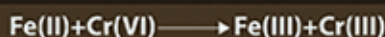
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

电活性微生物激活生物质炭/零价铁协同钝化Cr(VI)及机制

廖聪坚, 赵晓蕾, 刘凯, 钟松雄, 李芳柏, 方利平, 叶挺进, 石虎砚



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年9月

第42卷 第9期
Vol.42 No.9

目次

北京市2014~2020年PM _{2.5} 和O ₃ 时空分布与健康效应评估	陈菁, 彭金龙, 徐彦森 (4071)
京津冀地区高分辨率PM _{2.5} 浓度时空变化模拟与分析	杨晓辉, 宋春杰, 范丽行, 张凌云, 魏强, 李夫星, 王丽艳, 王卫 (4083)
京津冀典型城市冬季人为源减排与气象条件对PM _{2.5} 污染影响	邵玄逸, 王晓琦, 钟巍盛, 王瑞鹏 (4095)
太行山两侧污染物传输对横谷城市气溶胶的影响分析	王雁, 郭伟, 闫世明, 裴坤宁, 李明明, 陈二萍 (4104)
嘉善冬季碳质气溶胶变化特征及其来源解析	张颖龙, 李莉, 吴伟超, 吕升, 秦阳, 祝新明, 高晋徽, 唐倩, 夏峰 (4116)
基于机器学习算法的新冠疫情管控对河南省空气质量影响的模拟分析	魏煜, 徐起翔, 赵金帅, 张瑞芹 (4126)
新乡市大气PM _{2.5} 载带金属元素季节分布、来源特征与健康风险	刘恒嘉, 贾梦珂, 刘永丽, 赵艺洁, 郑爱华, 刘恒志, 徐肃阳, 肖晴晴, 苏晓燕, 任言 (4140)
黄渤海气溶胶中砷的分布特征和季节变化	袁帅, 王艳, 刘汝海, 种习习, 刘晓雨, 邵龙 (4151)
天津市2020年冬季重污染过程气溶胶消光特性及其来源	李立伟, 肖致美, 杨宁, 蔡子颖, 闫斌峰, 元洁, 白宇, 郑乃源, 唐邈 (4158)
中国暖季近地面臭氧浓度空间格局演变及主要气象驱动因素	何超, 慕航, 杨璐, 王丹璐, 邱彦峰, 叶志祥, 易嘉慧, 柯碧钦, 田雅, 洪松 (4168)
乌海市夏季臭氧污染特征及基于过程分析的成因探究	张瑞欣, 陈强, 夏佳琦, 刘晓, 郭文凯, 李光耀, 陈梅 (4180)
珠江三角洲海岸背景区大气VOCs污染特征与来源	云龙, 李成柳, 张明棣, 何龙, 郭键锋 (4191)
永定河上游地表水-地下水水化学特征及其成因分析	孔晓乐, 杨永辉, 曹博, 王艺璇, 裴宏伟, 沈彦军 (4202)
汉江中下游水质时空变异与驱动因素识别	程兵芬, 张远, 夏瑞, 张楠, 张新飞 (4211)
环境持久性药物在江苏省地表水中的污染水平、分布特征及生态风险评估	赵美美, 范德玲, 古文, 汪贞, 梁梦园, 刘济宁, 张志 (4222)
柳江流域河流溶解态重金属时空分布及污染评价	张婉军, 辛存林, 于爽, 刘齐, 曾鹏 (4234)
雷州半岛地下水重金属来源解析及健康风险评价	师环环, 潘羽杰, 曾敏, 黄长生, 侯清芹, 皮鹏程, 彭红霞 (4246)
龙子祠泉域地下水金属元素分布特征及健康风险评价	谢浩, 梁永平, 李军, 邹胜章, 申豪勇, 赵春红, 王志恒 (4257)
硫氧同位素解析典型岩溶地下河流域硫酸盐季节变化特征和来源	任坤, 潘晓东, 兰干江, 彭聪, 梁嘉鹏, 曾洁 (4267)
包头南海湿地磷形态及污染源定量识别	拜亚红, 钱晨歌, 袁思静, 谢子嫣, 来凌子, 张敏, 刘颖, 苗春林 (4275)
城市新城区公园沟塘沉积物磷释放风险及影响因素分析	李如忠, 宋敏, 杨继伟 (4287)
水力停留时间对潜流湿地净化效果影响及脱氮途径解析	齐冉, 张灵, 杨帆, 颜昌宙 (4296)
锰砂人工湿地对污染物的强化去除	马权, 王东麟, 林慧, 柏耀辉 (4304)
4种典型沉水植物对去除磷污染底泥的应用效果	陶理, 王沛芳, 袁秋生, 王洵, 胡斌 (4311)
输水情景下白洋淀好氧反硝化菌群落对溶解性有机物的响应	周石磊, 张甜娜, 陈召莹, 张紫薇, 于明会, 姚波, 崔建升, 罗晓 (4319)
木屑生物炭在雨水径流中的氮磷淋出和吸附特性	孟依柯, 王媛, 汪传跃 (4332)
海州湾潮间带沙蚕对沉积物微塑料的指示作用	王嘉旋, 宋可心, 孙一鑫, 方涛, 李瑾祯, 张涛, 冯志华 (4341)
纳米二氧化钛与镉对斜生栅藻(<i>Scenedesmus obliquus</i>)生长的拮抗效应及其作用机制	王璞, 赵丽红, 朱小山 (4350)
螺旋霉素废水处理过程中菌群结构、水质特征及抗性基因之间关系分析	武彩云, 李慧莉, 覃彩霞, 佟娟, 魏源送 (4358)
整合铁对厌氧铁氨氧化脱氮效能及微生物群落的影响	廖宏燕, 宋诚, 万柳杨, 时绍鹏, 王兴祖 (4366)
溶解氧对低碳源城市污水处理系统脱氮性能与微生物群落的影响	池玉蕾, 石烜, 任童, 王晓昌, 金鹏康 (4374)
间歇梯度曝气下短SRT强化短程SNEDPR系统脱氮除磷	张玉君, 李冬, 王歆鑫, 张杰 (4383)
生物膜系统中部分反硝化实现特性	于莉芳, 张兴秀, 张琼, 王晓玉, 彭党聪, 张日霞 (4390)
厌氧推流进水对反硝化除磷好氧颗粒污泥系统的影响	李冬, 曹思雨, 王琪, 张杰 (4399)
不同好氧/缺氧时长联合分区排泥优化生活污水短程硝化反硝化除磷颗粒系统运行	王文琪, 李冬, 高鑫, 张杰 (4406)
中国西南地区金属矿开采对矿区土壤重金属影响的Meta分析	张健琳, 瞿明凯, 陈剑, 杨兰芳, 赵永存, 黄标 (4414)
青藏高原典型流域土壤重金属分布特征及其生态风险评价	杜昊霖, 王莺, 王劲松, 姚玉璧, 周悦, 刘晓云, 芦亚玲 (4422)
电子垃圾拆解区土壤-农作物系统中镉元素的空间分布特征及其风险评价	张璐瑶, 赵科理, 傅伟军 (4432)
改性生物炭特性表征及对冶炼厂周边农田土壤铜镉形态的影响	王鑫宇, 孟海波, 沈玉君, 王佳锐, 张曦, 丁京涛, 周海宾, 李春燕, 程琼仪 (4441)
组配改良剂联合锌肥对土壤-水稻系统镉迁移转运的影响	周坤华, 周航, 王子钰, 刘雅, 刘佳伟, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (4452)
不同结构改良剂对铜镉污染土壤水稻生长和重金属吸收的影响	魏玮, 李平, 郎漫 (4462)
1株草螺属植物内生菌R-13的分离鉴定及对龙葵吸收土壤镉的影响	鹿杰, 刘月敏, 黄永春, 王常荣, 刘斌, 刘仲齐, 黄益宗, 黄雁飞, 张长波 (4471)
不同地区土壤古菌群落对重金属污染的响应	李雨桐, 杨杉, 张艺, 范例, 刘坤, 张晟 (4481)
高通量测序分析黄土高原退耕还林区土壤细菌群落特征	刘晓华, 魏天兴 (4489)
餐厨垃圾生物发酵液对黄土丘陵区土壤质量的影响试验	邵立明, 任俊达, 吕凡, 章骅, 何晶晶 (4500)
秦岭不同海拔土壤团聚体稳定性及其与土壤酶活性的耦合关系	马震菲, 胡汗, 李益, 郭鑫鑫, 任成杰, 赵发珠 (4510)
电活性微生物激活生物炭/零价铁协同钝化Cr(VI)及机制	廖聪坚, 赵晓蕾, 刘凯, 钟松雄, 李芳柏, 方利平, 叶挺进, 石虎砚 (4520)
降水变化对荒漠草原土壤呼吸的影响	蒿康伊, 张丽华, 谢忠奎, 赵锐锋, 王军锋, 郭亚飞, 高江平 (4527)
氮肥分施次数及硝化抑制剂对盆栽玉米N ₂ O排放的影响	符佩娇, 吉恒宽, 何秋香, 汤水荣, 王鸿浩, 伍延正, 孟磊 (4538)
负载NH ₄ ⁺ -N生物炭对土壤N ₂ O-N排放和NH ₃ -N挥发的影响	马晓刚, 何建桥, 陈玉蓝, 李德天, 刘川, 董建新, 郑学博 (4548)
微塑料添加对橘园土壤有机碳矿化的影响	张秀玲, 鄢紫薇, 王峰, 王玺, 徐晗, 胡荣桂, 严昶, 林杉 (4558)
1985~2019年中国全氟辛酸酯基化合物的动态物质流分析	王佳钰, 陈景文, 唐伟豪, 崔蕴晗, 王中钰, 宋国宝, 陈伟强 (4566)
《环境科学》征订启事(4201)	
《环境科学》征稿简则(4340)	
信息(4382, 4537, 4565)	

北京市 2014 ~ 2020 年 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 时空分布与健康效应评估

陈菁¹, 彭金龙², 徐彦森^{1*}

(1. 南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044; 2. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085)

摘要: 细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)和臭氧(O_3)是我国的主要大气污染物,严重危害人群健康. 北京市自 2013 年以来大力开展大气污染治理工作,现已取得显著成效. 通过分析 2014 ~ 2020 年北京市 34 个大气环境监测站的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 浓度变化特征并评估大气污染防治的健康效应,对推进大气污染防治具有重要意义. 结果表明,2014 年北京市 $\text{PM}_{2.5}$ 年均值和 4 ~ 9 月平均 O_3 日最大小时($\text{O}_{3\text{max}}$)值分别为 $92.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $81.9 \text{ nmol}\cdot\text{mol}^{-1}$. 2014 ~ 2020 年 $\text{PM}_{2.5}$ 平均每年降低 $7.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,但是 $\text{O}_{3\text{max}}$ 持续偏高. 在季节尺度,冬季的 12 月和 1 月 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度最高,夏季的 8 月浓度最低. 相反地, $\text{O}_{3\text{max}}$ 在每年 6 月浓度最高. $\text{PM}_{2.5}$ 浓度日变化规律为,夜间 22:00 至次日 00:00 最高, 14:00 ~ 16:00 最低. 而 O_3 浓度在 07:00 最低,随后逐步升高并在午后达到最高. 在空间分布上, $\text{PM}_{2.5}$ 在 2014 和 2019 年都呈现南高北低的趋势, $\text{O}_{3\text{max}}$ 在全市范围内均较高,仅在道路区域偏低. 大气污染对人群健康影响的评估结果表明,2014 年北京市与 $\text{PM}_{2.5}$ 相关的心血管和呼吸道疾病超额死亡人数分别为 1 580 人和 821 人,与 O_3 相关的呼吸道疾病超额死亡人数为 2 180 人. 2019 年与 $\text{PM}_{2.5}$ 相关的超额死亡人数仅为 2014 年的 50%,而与 O_3 相关的超额死亡人数与 2014 年持平. 北京市细颗粒物治理成效显著,但是 O_3 污染问题凸显, O_3 已经成为危害北京市居民健康的首要大气污染物. 未来需要加强 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 协同治理.

关键词: 北京; 细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$); 臭氧(O_3); 大气污染防治; 健康风险

中图分类号: X51; X823 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)09-4071-12 DOI: 10.13227/j.hjkk.202101033

Spatiotemporal Distribution and Health Impacts of $\text{PM}_{2.5}$ and O_3 in Beijing, from 2014 to 2020

CHEN Jing¹, PENG Jin-long², XU Yan-sen^{1*}

(1. School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Centre for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: In China, fine particulate matter ($\text{PM}_{2.5}$) and tropospheric ozone (O_3) have become major air pollutants that threaten human health. Since 2013, the government has strengthened air pollution controls in Beijing and achieved significant effects. A spatial-temporal analysis was conducted of the distribution and health impacts of $\text{PM}_{2.5}$ and O_3 in Beijing, using data collected from 34 air quality monitoring sites between 2014 and 2020. In 2014, the annual average $\text{PM}_{2.5}$ and seasonal (April to September) average of daily one-hourly maximum O_3 concentrations ($\text{O}_{3\text{max}}$) were $92.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ and $81.9 \text{ nmol}\cdot\text{mol}^{-1}$, respectively. From 2014 to 2020, annual average $\text{PM}_{2.5}$ decreased at a rate of $7.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. However, there was no significant difference in $\text{O}_{3\text{max}}$ over the years. The concentrations of $\text{PM}_{2.5}$ were highest in December and January (in winter) and lowest in August (in summer). On the contrary, $\text{O}_{3\text{max}}$ was highest in June. The diurnal variations of $\text{PM}_{2.5}$ were affected by meteorological conditions and emission sources, and maximum concentrations occurred between 22:00 to 00:00, while minimum concentrations occurred between 14:00 to 16:00. The concentration of $\text{O}_{3\text{max}}$ showed an opposite pattern, with minimum values occurring at 07:00 and maximum values occurring in the afternoon. The spatial distribution of $\text{PM}_{2.5}$ showed similar patterns in 2014 and 2019, with the south of Beijing exhibiting the highest concentrations, and the north the lowest. The concentration of $\text{O}_{3\text{max}}$ was higher in suburban areas than in traffic areas. In terms of health impacts, 1 580 cases of cardiovascular disease and 821 of respiratory disease were attributed to $\text{PM}_{2.5}$ in 2014, while 2 180 cases of respiratory disease were attributable to O_3 in 2014. In 2019, mortalities attributable to $\text{PM}_{2.5}$ had decreased by 50% compared to 2014. While the number of disease cases attributable to O_3 were similar in 2014 and 2019, the results indicate that $\text{PM}_{2.5}$ pollution in Beijing has been successfully controlled, while O_3 pollution has become more severe, and was the primary air pollutant threatening human health in 2019. Therefore, the synchronous control of $\text{PM}_{2.5}$ and O_3 should be implemented in the future.

Key words: Beijing; fine particulate matter ($\text{PM}_{2.5}$); ozone (O_3); air pollution control; health impacts

随着我国工业化和城市化进程的加快,细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)和近地层臭氧(O_3)已经成为我国主要的大气污染物^[1,2]. 长期暴露于污染空气中将会危害居民健康^[3~5]. $\text{PM}_{2.5}$ 是指空气动力学直径小于 2.5

收稿日期: 2021-01-05; 修订日期: 2021-02-24

基金项目: 南京信息工程大学科研启动经费项目

作者简介: 陈菁(1997~),女,硕士研究生,主要研究方向为气象科技与社会发展, E-mail: 395791733@qq.com

* 通信作者, E-mail: shuibao_xys@163.com

μm 的颗粒物^[6], 不仅本身是污染物, 还是其他有毒害作用的污染物的载体, 如持久性有机污染物等^[7]. $\text{PM}_{2.5}$ 能够通过人体上呼吸道组织直接进入肺部, 并留存数周至数年. 而近地层 O_3 除少量来自平流层传输外(约占 10%), 主要由挥发性有机化合物(VOCs)和氮氧化物(NO_x)等前体物在太阳光作用下发生光化学反应生成^[8,9]. O_3 具有较强的氧化性, 会强烈刺激呼吸道并引起呼吸道发炎^[10]. 当臭氧摩尔分数 $x(\text{O}_3)$ 高于 $250 \text{ nmol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 时会引起胸闷、头晕和呼吸困难等急性症状, 甚至危害生命^[11]. 已有流行病学研究表明, 细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)和近地层臭氧(O_3)暴露浓度与呼吸道和心血管急性和慢性疾病发病人数、人群死亡人数存在显著相关性^[3,12,13]. 国内外现有研究已经建立了短期和长期 $\text{PM}_{2.5}$ 及 O_3 暴露浓度与人群健康终点的响应系数, 为评估大气污染对居民健康的影响提供了科学支撑^[5,13~16].

$\text{PM}_{2.5}$ 是我国冬季首要的大气污染物, 且浓度远高于国家标准 ($35 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) 和世界卫生组织标准 ($10 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)^[17]. 同时, O_3 也悄然成为夏季的首要大气污染物^[1,2,17]. 2017 年, 我国日最大 8 h 平均 $x(\text{O}_3)$ 第 90 分位上升至 $76.0 \text{ nmol} \cdot \text{mol}^{-1}$, 局部地区最高 $x(\text{O}_3)$ 可达 $164 \sim 336 \text{ nmol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ^[18], 远高于欧洲、美国和日本等地区^[19]. 如此高的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 浓度不可避免地会威胁我国居民健康. 2015 年评估全球 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 污染对人群健康影响结果表明, 中国和印度是单位面积土地上与大气污染相关的超额死亡人数最多的两个国家^[20]. 利用全国 2013 年大气环境监测站的实测 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度数据评估发现, 与 $\text{PM}_{2.5}$ 污染相关的呼吸道疾病和心血管疾病超额死亡人数分别为 446 035 人和 149 764 人. 我国华北地区 $\text{PM}_{2.5}$ 暴露的人群健康风险最高^[21]. 而后又利用全国 1 516 个监测站点和空气质量模型评估发现, 2015 年中国地区与 O_3 浓度暴露相关的慢性阻塞性肺炎超额死亡人数约为 55 341 ~ 80 280 人^[22]. 利用支付意愿法和疾病成本法估算发现, 2015 年 O_3 污染对我国居民健康风险的经济损失高达 6 983.6 亿美元, 约占当时国内生产总值(GDP)的 6.3%^[23]. 2013 年国务院发布了大气污染防治行动计划^[24], 随着一系列环境保护政策的实施 $\text{PM}_{2.5}$ 污染已有明显改善. Kuerban 等^[25] 分析 2015 ~ 2018 年大气污染对人群健康的影响发现, 相比 2015 年, 2018 年与 $\text{PM}_{2.5}$ 污染相关的超额死亡人数、呼吸道及心血管疾病死亡人数和慢性支气管炎死亡人数下降了 23.4% ~ 26.9%, 但是与 O_3 污染相关的超额死亡人数却增加了 18.9%, 表明我国大气污染对人群的健康影响正

由以 $\text{PM}_{2.5}$ 主导的污染物转变为 O_3 .

2014 年以来北京市先后实施了北京市大气污染防治条例^[26] 和北京市打赢蓝天保卫战三年行动计划^[27]. 已有的研究表明北京市 $\text{PM}_{2.5}$ 污染治理成效显著, 导致的健康负担开始减轻^[28,29]. 但是缺乏对北京市 O_3 污染时空分布和健康效应评估的研究. 此外北京市不同地区大气污染和人口分布差异显著, 需要在空间尺度准确耦合污染物浓度和人口暴露数据, 细化评估北京市大气污染物对人群健康的影响. 因此, 本文以区县为空间单元, 研究了北京市 2014 ~ 2020 年 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 污染的时空分别特征, 并评估了其对居民健康的影响, 以期相关部门制定 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 协同治理的策略提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 北京市 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 数据源

本研究从北京市环境保护局北京空气质量发布平台 (<http://zx.bjmemc.com.cn/>) 上收集了 2014 年 1 月 1 日 ~ 2020 年 12 月 31 日北京市 34 个自动空气质量监测子站的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 小时浓度数据. 根据监测点位的位置不同, 北京市生态环境局将其划分为 4 类: 城市环境监测站(11 个)、郊区环境监测站(11 个)、环境本底监测站(7 个)和交通污染监测站(5 个). 北京市大气污染物在南北分布存在差异, 因此将郊区环境监测站在划分为郊区环境监测站北(6 个)、郊区环境监测站南(5 个)、环境本底监测站北(4 个)和环境本底监测站南(3 个), 共划分为 6 类站点(图 1).

1.2 北京市乡镇人口与疾病概况

通过查阅北京市 2014 年和 2019 年统计年鉴, 获取了北京市各地区常住人口数量. 2014 和 2019 年北京市常住人口总数分别为 2 151.6 万人和 2 153.6 万人, 分别居住在北京的 16 个区. 表 1 展示了各地区两年的常住人口数量.

本研究主要关注心血管疾病和呼吸道疾病. 根据国际疾病分类编码(ICD-10), 两种疾病代码范围分布为 I00 ~ I99 和 J00 ~ J99. 查阅北京市卫生与人群健康状况报告, 2014 年北京市心血管疾病和呼吸道疾病导致的死亡率为 1.44‰ 和 0.63‰, 2019 年两种疾病死亡率分别为 1.56‰ 和 0.66‰. 这两种疾病在北京市人口疾病死因构成的占比超过了 45%.

1.3 人群健康影响评价

本研究采用大气污染影响人群健康函数来估算与 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 相关的超额死亡人数^[30]. 当大气污染物浓度超过对人体无健康损伤最高浓度值 X_0 时, 基于流行病学调查的结果和当前大气中污染物浓度,



图 1 北京市 34 个环境监测站点位置

Fig. 1 Distribution of 34 air pollution monitoring stations in Beijing

表 1 北京市各地区常住人口数

Table 1 Population of 16 districts in Beijing

地区	2014 年/万人	2019 年/万人
东城区	91.1	79.4
西城区	130.2	113.7
朝阳区	392.2	347.3
丰台区	230.0	202.5
石景山区	65.0	57.0
海淀区	367.8	323.7
门头沟区	30.6	34.4
房山区	103.6	125.5
通州区	135.6	167.5
顺义区	100.4	122.8
昌平区	190.8	216.6
大兴区	154.5	188.8
怀柔区	38.1	42.2
平谷区	42.3	46.2
密云区	47.8	50.3
延庆区	31.6	35.7

计算某种疾病的相对风险指数(RR). 与大气污染相关的某种疾病超额死亡人数表示为 ΔMort, 计算如下:

$$\Delta\text{Mort} = y_0 \times [(\text{RR} - 1)/\text{RR}] \times \text{Pop} \quad (1)$$

式中, y_0 表示为北京市某种疾病死亡率, Pop 表示为北京市地区常住人口总数. 本研究中与 PM_{2.5} 相关的超额死亡疾病类型为心血管疾病和呼吸道疾病, 与 O₃ 相关的超额死亡疾病类型为呼吸道疾病. 基于对各类流行病学调查文献的整合, 计算不同疾病的相对风险指数(RR)为:

$$\text{RR} = \exp[\beta(X - X_0)] \quad (2)$$

式中, X_0 表示为无健康损伤最高污染物浓度值, X 表示为当前污染物浓度. PM_{2.5} 污染物浓度为年均值. 在 O₃ 暴露浓度指标选取上, 世界卫生组织、美国环保署和中国环保部在 1997 ~ 2012 年间先后修订 O₃ 浓度的标准为每日 8 h 最大 O₃ 浓度, 已有的研究也表明 8 h 最大 O₃ 浓度可以有效代表 O₃ 对人群急性健康影响^[10]. 但是迄今为止唯一的大气 O₃ 长期暴露与人群超额死亡响应关系所采用的 O₃ 暴露评价指标为 4 月 1 日 ~ 9 月 30 日 O₃ 日最大小时 O₃ 浓度均值 ($O_{3\text{max}}$)^[13]. 为了与 O₃ 长期暴露-响应关系相一致, 本研究也采用 $O_{3\text{max}}$ 作为 O₃ 暴露指标. β 是基于不同污染物和相关疾病超额死亡人数进行大量流行病学调查获得的经验系数.

过去的研究中主要是通过设定一个最高无健康损伤浓度值, 用于估算浓度升高的危害^[31]. 本研究中利用 Lim 等^[32]提出的 PM_{2.5} 和 O₃ 的无健康损伤时污染物最高浓度值. 无健康损伤时污染物最高浓度值 X_0 参照 Lim 等^[32]的研究结果, PM_{2.5} 无损伤最高浓度值为 5.8 ~ 8.8 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $x(\text{O}_3)$ 为 33.3 ~ 41.9 $\text{nmol}\cdot\text{mol}^{-1}$. 取其平均值, 设定 PM_{2.5} 的 X_0 值为 7.3 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, O₃ 的 X_0 值为 37.6 $\text{nmol}\cdot\text{mol}^{-1}$.

本研究中 β 参考国内外已有的研究结果, 选取了广泛使用且适用北京地区的大气污染流行病学调查结果. PM_{2.5} 的健康效应评估参数选用 Lu 等^[5]对在中国大陆 127 个主要城市开展的 59 项研究进行整合分析的结果. PM_{2.5} 年均浓度值每上升 10 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 心血管疾病和呼吸道疾病死亡率分别上升 0.63% (95% CI: 0.35% ~ 0.91%) 和 0.75% (95% CI: 0.39% ~ 1.11%), β 值分别为 0.000 628 0 (95% CI: 0.000 349 3 ~ 0.000 905 9) 和 0.000 747 2 (95% CI: 0.000 389 2 ~ 0.001 103). 本研究中 O₃ 的健康效应评估采用美国癌症协会队列研究的结果^[13]. 4 月 1 日 ~ 9 月 30 日每日最大小时 $x(\text{O}_3)$ 均值每升高 10 $\text{nmol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 呼吸道疾病发病率增高 4.0% (95% CI: 1.3% ~ 6.7%), β 值为 0.003 922 (95% CI: 0.001 292 ~ 0.006 485).

1.4 统计分析

北京空气质量发布平台的数据已经进行过初步数据质量控制但仍然存在部分异常值, 本研究中剔除 PM_{2.5} 小时浓度超过 1 000 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的值和小时 $x(\text{O}_3)$ 超过 250 $\text{nmol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 的值. 在 PM_{2.5} 和 O₃ 年际变化和空间分布特征研究中 PM_{2.5} 为年均值, O₃ 采用每年 4 月 1 日 ~ 9 月 30 日的日最大小时平均值. 月变化分析中 PM_{2.5} 为 2014 ~ 2020 年的月均值, O₃

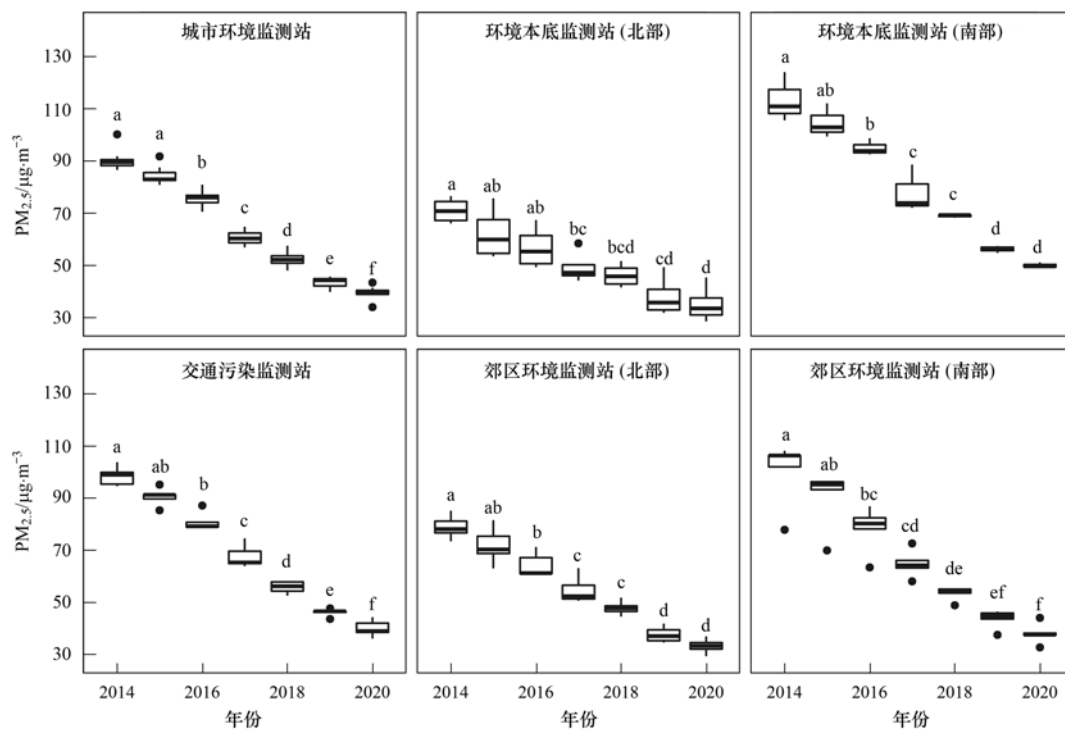
为当月的日最大小时平均值. 日变化分析中 $\text{PM}_{2.5}$ 为 2014 ~ 2020 年的 00:00 ~ 23:59 的小时均值, O_3 为 4 月 1 日 ~ 9 月 30 日的 00:00 ~ 23:59 的小时均值. 利用 R 软件 (版本 3.3.3, <http://www.r-project.org/>) 中 tidyverse 包进行数据处理, 采用重复测量的单因素方差分析分别测试了 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 在不同年份和月份间的差异, 并用 Tukey HSD 进行多重比较. 所有显著性分析均使用 R 软件中 “lme4” 包的线性混合模型进行分析. 当 $P < 0.05$ 时认为统计显著. $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 在 16 个区的平均浓度, 采用 Arcgis 中的普通克里格进行空间插值并计算平均值.

2 结果与讨论

2.1 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 年变化特征

图 2 和 3 分别为 2014 ~ 2020 年北京市 6 类监测站 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_{3_max} 浓度年际变化. 在 7 a 内北京市

$\text{PM}_{2.5}$ 浓度逐年显著降低, 从 2014 年年均 $92.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 下降至 2020 年的 $39.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 年均浓度降低 $7.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 按站点类分析, 2014 年 $\text{PM}_{2.5}$ 污染最严重的地区为北京南部的环境本底监测站, 而北部的环境本底监测站年均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度最低, 为 $71.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 到 2020 年北部的郊区环境监测站已经成为北京市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度最低的区域, 而南部的环境本底监测站颗粒物污染缓解最为显著. 京津冀和天津市大气污染物年际变化分析也表明区域 $\text{PM}_{2.5}$ 污染治理成效显著^[23~25]. 2014 年开始先后实施了北京市大气污染防治条例^[26]、北京市打赢蓝天保卫战三年行动计划^[27] 和京津冀及周边地区 2018 ~ 2019 年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案^[33], 以 $\text{PM}_{2.5}$ 治理为重点, 聚焦“一微克”行动. 同时开展了大气重污染成因与治理攻关项目为颗粒物污染治理提供了重要支撑.



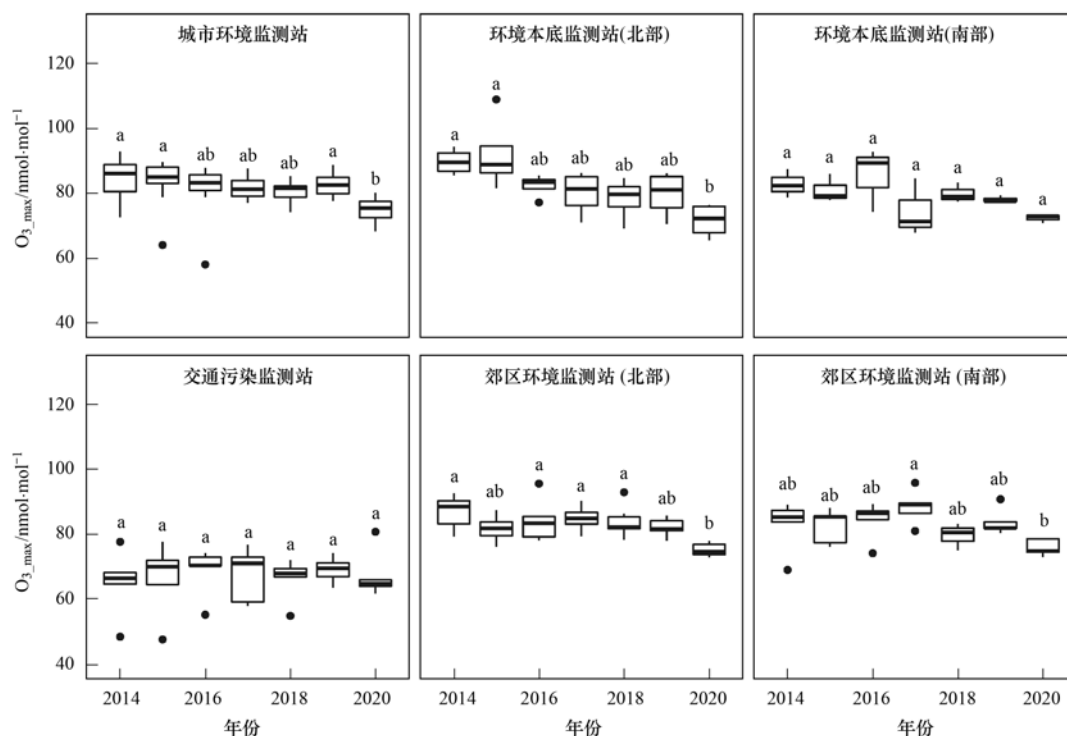
不同小写字母表示不同年份间 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的显著性差异 ($P < 0.05$)

图 2 2014 ~ 2020 年北京市 6 类监测站 $\text{PM}_{2.5}$ 年际变化

Fig. 2 Annual average concentration of $\text{PM}_{2.5}$ at six types of monitoring stations in Beijing, from 2014 to 2020

O_3 已经成为我国夏季首要污染物, 分析 2014 ~ 2020 年北京市 4 ~ 9 月日最大小时 O_3 浓度发现, 近 7 年的时间内 O_{3_max} 年际变异较小, O_3 污染持续严重, 仅在 2020 年部分区域 O_{3_max} 小幅度降低, 其中 2014 年 O_{3_max} 年均值为 $81.9 \text{ nmol}\cdot\text{mol}^{-1}$. 分析不同区域站点 O_3 浓度, 北部环境本底监测区域多年平均 O_{3_max} 为 $91.9 \text{ nmol}\cdot\text{mol}^{-1}$. 低值区主要位于交通污染监测区域, 为 $65.1 \text{ nmol}\cdot\text{mol}^{-1}$. 当前全国各地臭

氧污染逐渐凸显, 利用多年观测数据分析了京津冀、上海和江西等地区 O_3 污染状况, 发现 O_3 浓度均持续升高, 且超标天数也在不断增加^[34~37], 因此国家也将在“十四五”期间重点开展 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 协同治理科研攻关. 2020 年初北京市已经明确了 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 协同减排技术路径^[38]. 本研究的结果也表明 2020 年北京市 O_{3_max} 年均值已经开始降低, 但仍然远高于人体健康阈值.



不同小写字母表示不同年份间 O₃ 浓度的显著性差异 ($P < 0.05$)

图 3 2014~2020 年北京市 6 类监测站 4~9 月 O₃ 日最大均值年际变化

Fig. 3 Average of daily maximum O₃ concentration between April and September at six types of monitoring stations in Beijing, from 2014 to 2020

2.2 PM_{2.5} 和 O₃ 月变化特征

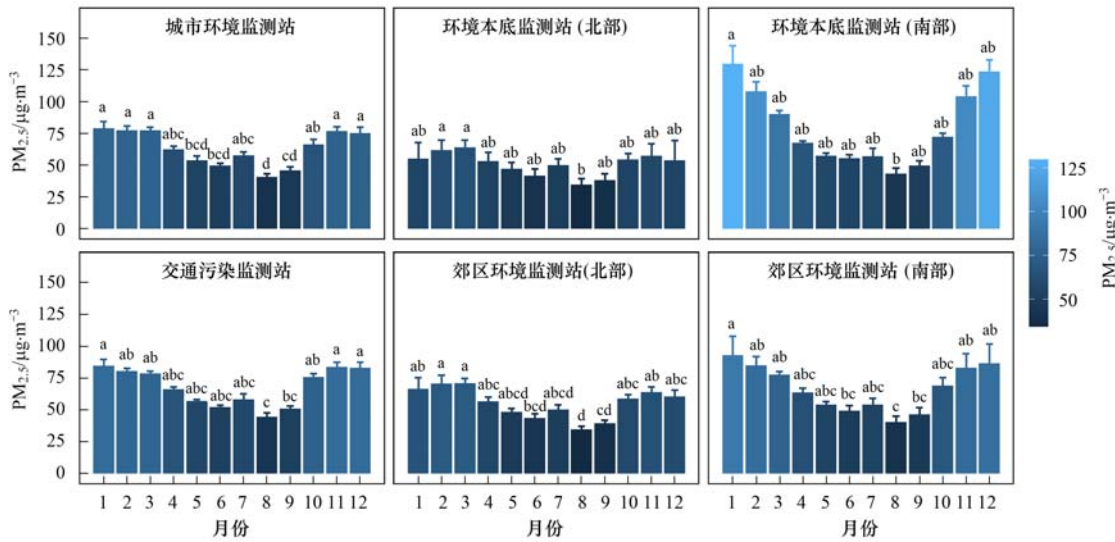
2014~2020 年北京市 PM_{2.5} 和 O_{3_max} 月均浓度变化特征显著. PM_{2.5} 浓度随月份呈先下降后上升的趋势(图 4). 每年的 8 月 PM_{2.5} 浓度最低仅 39.7 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 最大月均值一般出现在每年的 1 月或 12 月. Yao^[39] 对京津冀地区大气 PM_{2.5} 浓度季节性分布研究也发现, 冬季 PM_{2.5} 浓度最高而夏季浓度最低. Zhang^[40] 对中国城市 PM_{2.5} 浓度分布特征研究表明, 我国冬季是全年大气环境质量最差的季节. 北京地区 PM_{2.5} 浓度的月变化主要与本地排放、外源输入和气象条件关系密切^[34]. 冬季供暖增加了本地排放源和外来传输源^[41], 10 月我国华北地区农作物收获后大量秸秆燃烧也成为北京重要的外来输入源, 此外春季沙尘天气严重也导致 2 月 PM_{2.5} 浓度较高. 此外冬季大气层结稳定, 易形成大气逆温层不利于污染物扩散. 在夏季, 北京市煤炭燃烧等污染源排放量降低, 同时受东南风以及海洋性气候影响, 大量降雨和季风气候有助于大气中污染物的扩散. 当前华北地区已经有序推进农村煤改电、煤改气和新能源利用, 并禁止露天秸秆燃烧, 有效减少了本地和周边区域的排放源. 不同类型站点 PM_{2.5} 浓度月变化规律一致, 但不同站点的月浓度变化差异显著. 北京市南部的环境本底站 1 月和 8 月 PM_{2.5} 浓度差值最大为 86.5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 而北部的环境本底站 1 月和 8 月 PM_{2.5} 浓度

差值仅为 20.4 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 从不同站点位置分析结果表明, 北京市南部地区冬季 PM_{2.5} 污染凸显, 可能和河北省唐山、廊坊和保定等城市重工业发展较快, PM_{2.5} 排放较高相关. 利用对 PM_{2.5} 水溶性无机离子分析也表明北京市周边地区传输贡献超过 70%^[42].

O₃ 作为一种二次污染物, 夏季高温和强辐射下有助于其生成. 图 5 为 2014~2019 年北京市 6 类监测站点 4~9 月 O_{3_max} 月均值. 不同区域 O_{3_max} 月变化规律基本一致, 呈“单峰型”变化, 从 4 月开始升高, 到 6 月浓度最高, 然后开始降低. 6 月平均 $\bar{x}(\text{O}_3)$ 为 96.7 $\text{nmol}\cdot\text{mol}^{-1}$. 本研究中只分析了 4~9 月每日最大臭氧浓度值, 主要是冬季辐射和温度较低不利于 O₃ 的产生^[37]. 同时冬季颗粒物污染严重降低大气能见度削弱了辐射强度, 因此机动车和工业排放的尾气在没有强辐射作用下只能产生硝酸盐等二次气溶胶, 进一步减少大气能见度不利于大气中二氧化氮和挥发性有机物反应生成臭氧. 通过对京津唐地区臭氧浓度月变化的研究也发现, 冬季臭氧浓度远低于危害人体健康的阈值^[37]. 对不同区域站点 O_{3_max} 月变化分析发现, 交通污染监测站 O_{3_max} 月变化较为平缓, 而北部郊区环境监测地区的月变化差异较大.

2.3 PM_{2.5} 和 O₃ 日变化特征

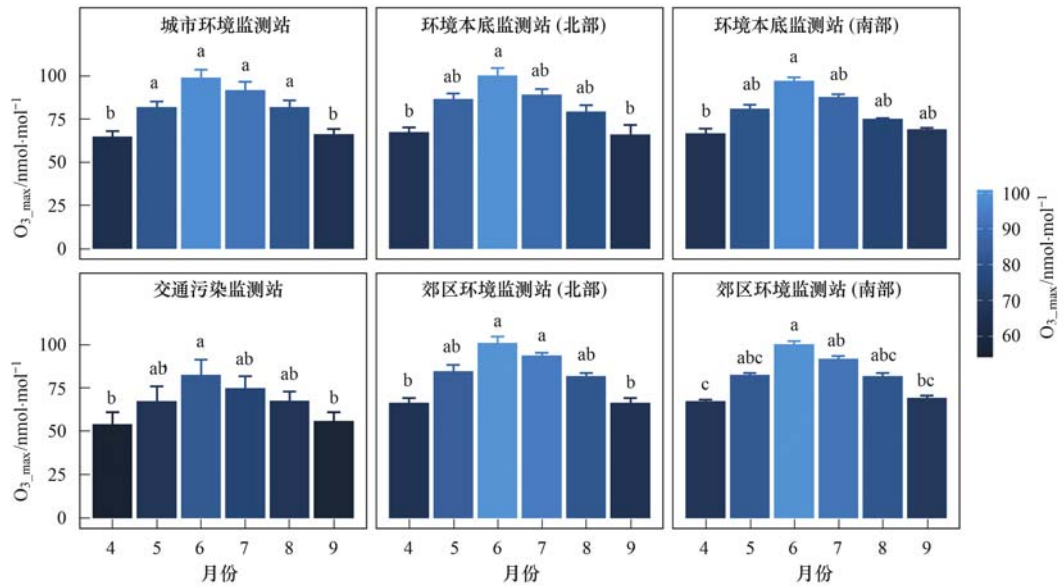
图 6 展示了 PM_{2.5} 浓度日变化特征, 不同类型站



不同小写字母表示不同月份间 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的显著性差异 ($P < 0.05$), 不同颜色表示 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度, 误差线表示为标准偏差

图4 北京市6类监测站 $\text{PM}_{2.5}$ 月变化

Fig. 4 Monthly variation of $\text{PM}_{2.5}$ at six types of monitoring stations in Beijing



不同小写字母表示不同月份间 O_3 浓度的显著性差异 ($P < 0.05$), 不同颜色表示 O_3 浓度, 误差线表示为标准偏差

图5 年北京市6类监测站每日最大 O_3 月均值变化

Fig. 5 Monthly variation of daily maximum O_3 concentration at six types of monitoring stations in Beijing

点的日变化规律存在差异. 总体上北京市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度最低值出现在每日的 14:00 ~ 16:00. 夜间 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较高, 最高值出现在 22:00 至次日 00:00. 在 08:00 ~ 10:00 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度发生波动形成较小的峰值. 北京地区晴朗天气多, 白天太阳辐射较强. 夜间发生辐射冷却时近地面的气层冷却较为强烈, 而上层空气冷却较慢导致大气层结稳定度增加, 大气中的污染物不易扩散. 因此北京地区的夜间 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较高^[43]. 同时受到限行政策影响, 柴油货车多在夜间进出北京, 这些也增加了北京地区夜间 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度. 08:00 ~ 10:00 时段内 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度发生峰值波动, 主

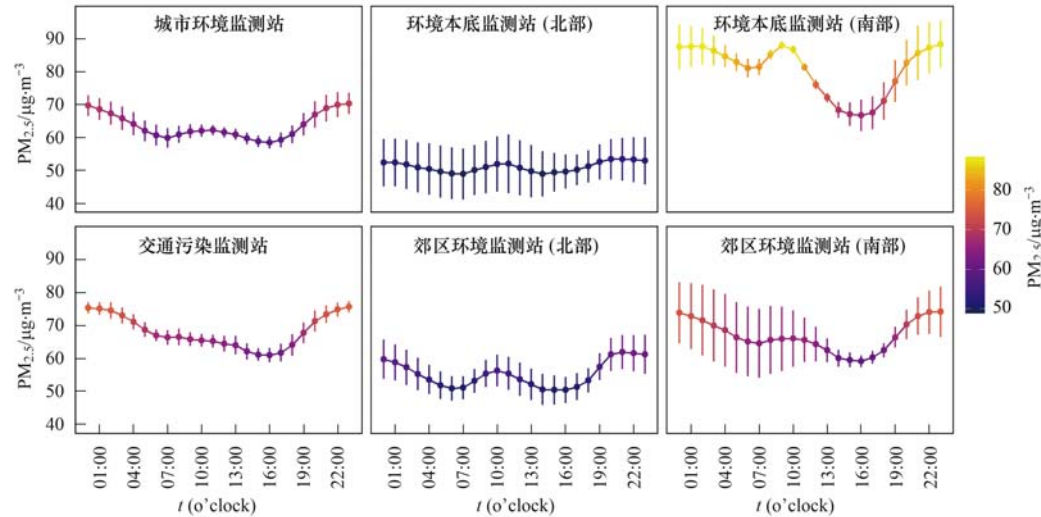
要受北京早高峰影响, 机动车数量大且城市交通拥堵严重, 导致机动车尾气排放量较大.

北部的环境本底和郊区环境监测站 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度日变化波动最小. 但是南部的环境本底监测站 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度日变化最大, 在 23:00 浓度最高, 为 $88.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 在 16:00 浓度最低, 为 $66.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 日变化过大可能受人为活动影响. 京西南、京南和京东南这 3 个本底监测点靠近北京市南部进出京通道、国道京港线、大广高速和首都环线高速. 受本地和外来传输源叠加影响, 成为北京 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度最高的区域.

不同类型站点 O_3 浓度日变化如图 7 所示, 所有

站点在 07:00 的 $x(\text{O}_3)$ 最低,而后逐步升高,在 16:00 达到最高,随后开始下降. $x(\text{O}_3)$ 日变化特征主要取决于太阳辐射和温度,在 16:00 后太阳辐射逐渐减弱, O_3 生成速率也随之降低. 同时夜间 NO 和 O_3 滴定反应转为 NO_2 ,消耗了大气中 O_3 也导致

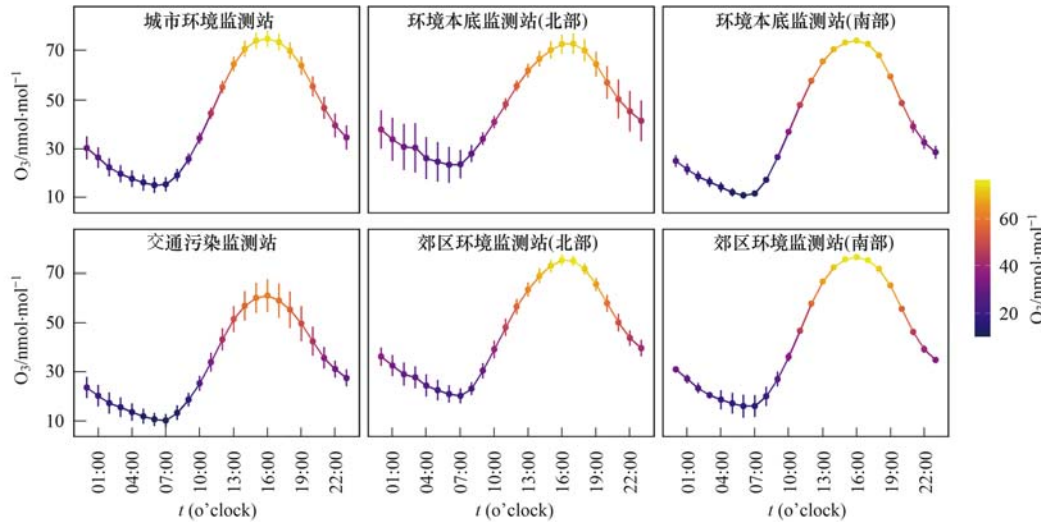
了夜间浓度的加速降低^[9]. 日出后太阳辐射增强导致空气温度逐渐升高,大气中 O_3 生成速率加快. 分析 $x(\text{O}_3)$ 日变化规律表明, $x(\text{O}_3)$ 在白天持续保持高位与居民户外活动时间相吻合,对人体健康具有极大风险.



不同颜色表示不同时刻 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均值,误差线表示为标准偏差

图 6 北京市 6 类监测站 $\text{PM}_{2.5}$ 小时变化

Fig. 6 Hourly variation of $\text{PM}_{2.5}$ at six types of monitoring stations in Beijing



不同颜色表示 4 ~ 9 月不同时刻 O_3 小时均值,误差线表示为标准偏差

图 7 北京市 6 类监测站 4 ~ 9 月 O_3 小时均值变化

Fig. 7 Hourly variation of O_3 between April and September at six types of monitoring stations in Beijing

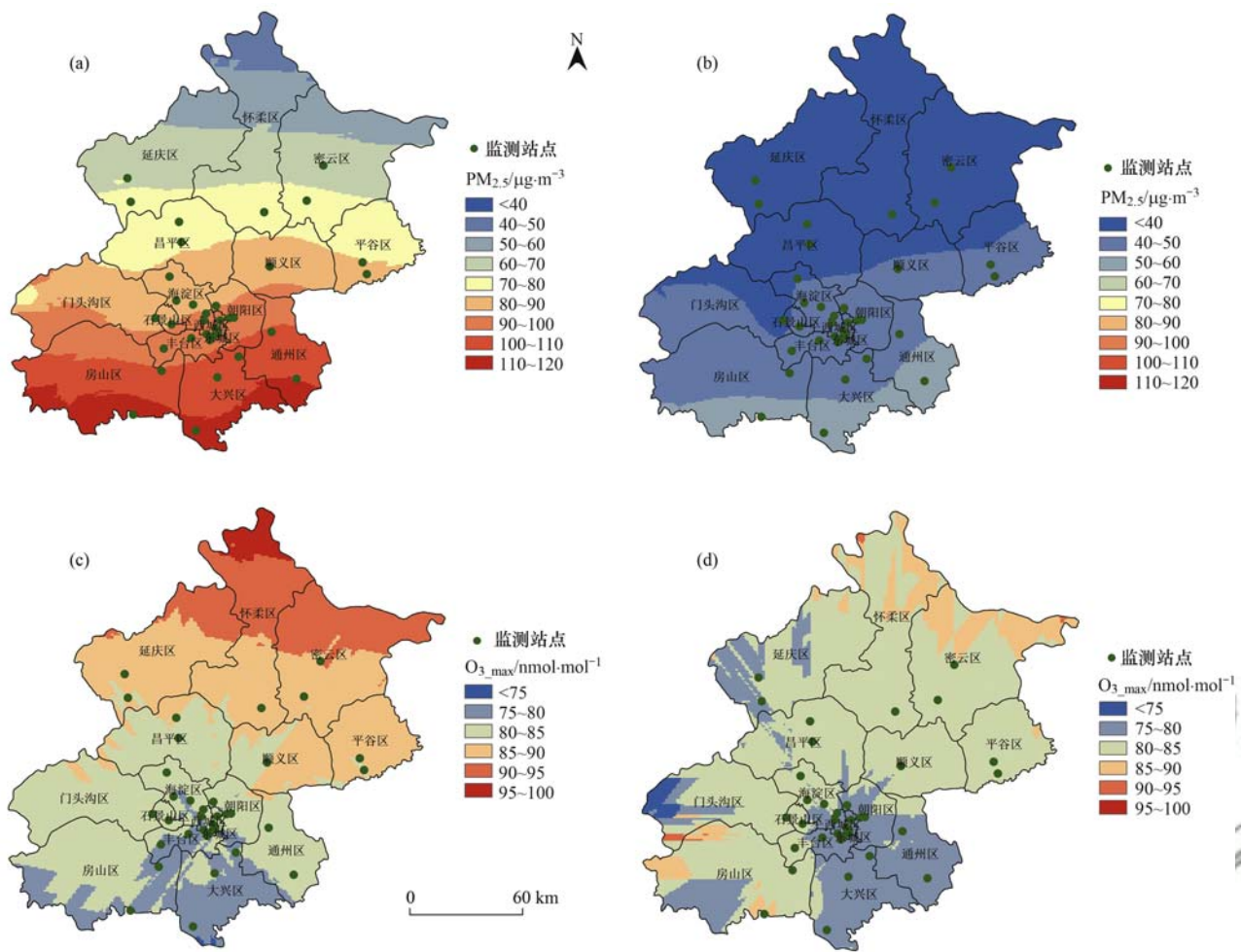
2.4 北京市 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 空间分布特征

图 8 展示了 2014 年和 2019 年 $\text{PM}_{2.5}$ 年均值和 4 ~ 9 月 O_{3_max} 均值在北京市的空间分布特征. 相比于 2014 年, $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_{3_max} 浓度在 2019 年均降低, $\text{PM}_{2.5}$ 下降最为显著. 两种大气污染物在 2014 年和 2019 年的空间分布较为一致, $\text{PM}_{2.5}$ 呈现南高北低, O_{3_max} 分布趋势与之相反. 北京南部靠近河北重工业区,外来源输入导致了严重的 $\text{PM}_{2.5}$ 污染^[44]. 北京北

部为生态涵养区植被覆盖率较高,植物生长过程中释放的挥发性有机化合物 (BVOC) 也是 O_3 重要的前体物质^[45],导致了北京北部的 O_3 浓度偏高.

2.5 人群健康影响评价

人群健康影响评估的 2019 年北京市与 $\text{PM}_{2.5}$ 相关的心血管和呼吸道疾病超额死亡人数显著低于 2014 年的超额死亡人数. 从表 3 中可以看出, 2014 年北京市全市可归因于 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的心血管和呼吸道



(a) 2014 年 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度, (b) 2019 年 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度, (c) 2014 年 4~9 月每日最大 O_3 浓度, (d) 2019 年 4~9 月每日最大 O_3 浓度

图 8 北京市 2014 和 2019 年 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度和 4~9 月每日最大 O_3 浓度的空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of the annual average $\text{PM}_{2.5}$ concentration and daily maximum O_3 concentration in Beijing, from April to September in 2014 and 2019

疾病超额死亡人数分别为1 580人和 821 人,其中朝阳与 $\text{PM}_{2.5}$ 相关的超额死亡人数最多为 453 人,北京西北的延庆区超额死亡人数最少为 24 人. 延庆、怀柔、门头沟、平谷和密云是超额死亡人数最低的区县. 海淀和朝阳等区域人口密度大且 $\text{PM}_{2.5}$ 污染也较为严重,导致大量人口暴露于高浓度 $\text{PM}_{2.5}$ 下. 心血管疾病是北京市 2014 年居民死因排名第一的疾病,占疾病死亡的 46%,其中可归因于 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的心血管疾病超额死亡约占总心血管疾病死亡人数的 2.5%. 呼吸道疾病引发的死亡约占全市死亡人数 6%,在全市居民死亡疾病中排名第三. 其中与 $\text{PM}_{2.5}$ 污染相关的呼吸道疾病超额死亡约占总呼吸道疾病死亡人数的 8.2%. 2019 年 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度持续降低,对人体健康风险也显著降低. 全年仅有 744 人心血管疾病死亡和 372 人呼吸道疾病死亡可归因于 $\text{PM}_{2.5}$ 污染,相比于 2014 年减少了一半. 但是朝阳区仍然是与 $\text{PM}_{2.5}$ 污染相关疾病超额死亡人数最多的区县,因此未来需要对高人口密度区域加强大气污染的治

理力度,减少实际暴露于污染物的人群数量. 2010 年全球尺度的研究表明,中国每年约有 125 万人的超额死亡与 $\text{PM}_{2.5}$ 污染相关,排名第二的印度每年超额死亡人数比中国少 71.2 万人. 中国当时已经成为全世界 $\text{PM}_{2.5}$ 污染最为严重的国家^[46]. 然而通过中国政府大力地污染防治,以北京为首的大城市 $\text{PM}_{2.5}$ 污染已经显著降低. 本研究的评估结果表明,与颗粒物污染相关的超额死亡人数在 2019 年已经下降了一半,因此亟待在全国尺度重新评估 $\text{PM}_{2.5}$ 的健康风险. 本研究中仅仅对呼吸道疾病和心脑血管疾病的死亡人数进行了评估,主要关注了长期暴露的影响但 $\text{PM}_{2.5}$ 污染引发的急性健康效应也不容忽视. 黄德生等^[47]研究京津冀地区 2009 年 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的健康效益就表明,京津冀地区与 $\text{PM}_{2.5}$ 污染相关的超额死亡人数为 75 331 人,其中北京地区可归因于 $\text{PM}_{2.5}$ 的慢性疾病超额死亡 13 962 人,急性疾病超额死亡 1 193 人. 尽管已有大量的研究评估了颗粒物污染的人群健康效应,但是目前在中国地区缺乏 $\text{PM}_{2.5}$ 与相关疾病死亡率的暴

露响应系数^[15],大量的研究均采用的是国外的暴露响应系数.如 Song 等^[21]对中国地区大气污染的健康影响评估表明,北京市 2013 年可归因于 PM_{2.5}的心血管疾病和呼吸道疾病超额死亡人数为3 260人,高于本研究中的2 401人.不同研究间的差异主要是与暴露响应系数的选取存在较大的关联.

人群暴露评估的结果表明 2019 年和 2014 年与 O₃ 相关的呼吸道疾病超额死亡的人数相持平.表 3 中数据表明 2014 年北京市可归因于 O₃ 污染的呼吸道疾病超额死亡的人数为2 180人,约占呼吸道疾病死亡人数的 16%.与 O₃ 污染相关的呼吸道基本超额死亡人数最多的区县为朝阳区,总计 400 人.与 O₃ 污染相关的呼吸道基本超额死亡人数最少的为延庆区,总计 36 人.而 2019 年与 O₃ 污染相关的呼吸道疾病超额死亡人数为2 176人,与 2014 年持平.2019 年 16 个区县可归因于 O₃ 污染相关的呼吸道疾病超额死亡人数和 2014 年呈一致趋势.Fann 等^[48]利用模型模拟和流行病学评估的方法,估算了 2005 年美国约有4 700人的超额死亡与 O₃ 污染相关.Lelieveld 等^[49]对全球尺度 O₃ 污染的人群健康

效应评估发现,2010 年全世界有 14.2 万人的超额死亡与 O₃ 污染密切相关,且预计到 2050 年将会有 35.8 万人超额死亡与 O₃ 污染相关.Lelieveld 等^[20]于 2013 年估计北京约有2 395人的超额死亡与 O₃ 污染相关,与本研究的结果相一致.本研究中 O₃ 的暴露响应关系采用 Jerrett 等^[13]的分析结果,即 O_{3_max} 每升高 10 nmol·mol⁻¹,与 O₃ 相关的呼吸道疾病超额死亡率将增加 4%,远高于 PM_{2.5}对呼吸道疾病的危害.因此可归因于 O₃ 污染的健康风险比 PM_{2.5}更高.此外 O₃ 通过呼吸道进入肺部后还会引起慢性阻塞性肺炎等疾病,但是国内缺乏相关疾病的死亡率的公开数据和 O₃ 污染与人群健康效应暴露响应关系,因此本研究中主要评估与 O₃ 污染相关的呼吸道疾病的超额死亡情况.2014 年北京市居民健康风险主要受 PM_{2.5}的威胁,通过长期治理目前已经得到较好地缓解.但是当前 O₃ 污染非常严峻,已经成为危害人体健康的首要污染物.且在日常生活中因为臭氧看不见摸不着,人们往往忽视对其的防护.未来需要加强对 PM_{2.5}和 O₃ 污染的协同治理,保证居民生命健康.

表 3 PM_{2.5}和 O₃ 暴露下北京市常住居民健康风险
Table 3 Health risks of PM_{2.5} and O₃ for residents in Beijing

地区	2014 年			2019 年		
	PM _{2.5}		O ₃	PM _{2.5}		O ₃
	心血管疾病超额 死亡人数/人	呼吸道疾病超额 死亡人数/人	呼吸道疾病超额 死亡人数/人	心血管疾病超额 死亡人数/人	呼吸道疾病超额 死亡人数/人	呼吸道疾病超 额死亡人数/人
东城区	69(39,99)	36(19,52)	89(31,140)	29(16,41)	14(8,21)	78(27,123)
西城区	98(55,140)	51(27,74)	126(44,198)	41(23,59)	21(11,30)	113(39,178)
朝阳区	298(168,425)	155(82,225)	400(140,626)	122(68,175)	61(32,89)	345(120,541)
丰台区	179(101,255)	92(49,135)	222(77,349)	72(40,103)	36(19,52)	205(71,321)
石景山区	47(26,67)	24(13,35)	65(23,102)	19(11,27)	9(5,14)	58(20,91)
海淀区	254(143,362)	132(70,192)	370(129,579)	106(59,152)	53(28,78)	328(114,514)
门头沟区	22(12,31)	11(6,16)	31(11,49)	11(6,16)	6(3,8)	35(12,55)
房山区	88(50,126)	46(24,67)	101(35,159)	49(27,70)	24(13,36)	132(46,206)
通州区	116(65,165)	60(32,88)	138(48,216)	70(39,100)	35(18,51)	166(58,260)
顺义区	68(38,97)	35(19,52)	108(38,169)	40(22,57)	20(10,29)	126(44,198)
昌平区	119(67,170)	62(33,91)	201(70,314)	63(35,90)	31(16,46)	220(77,345)
大兴区	136(77,193)	70(37,102)	144(50,227)	79(44,113)	39(21,58)	186(64,292)
怀柔区	18(10,26)	9(5,14)	45(16,70)	9(5,13)	4(2,7)	46(16,71)
平谷区	26(15,37)	14(7,20)	47(16,73)	15(9,22)	8(4,11)	49(17,76)
密云区	24(13,34)	13(7,18)	56(20,87)	12(7,17)	6(3,9)	55(19,86)
延庆区	16(9,23)	8(4,12)	36(13,56)	8(5,12)	4(2,6)	37(13,57)

1) 括号外为均值,括号内为 95% CI

2.6 不确定性分析

本研究主要评估了北京市 2014 和 2019 年与 PM_{2.5}相关的呼吸道和心血管疾病超额死亡人数,与 O₃ 污染相关的呼吸道超额死亡人数.本研究的相关结果和同类研究具有较好的可比性.但是受制于临床人群健康终点的复杂性,难以通过实际死亡人口数据进行验证.因此对本研究评估过程的不确定性

因素进行分析讨论.

大气污染物的暴露响应关系是评估人群健康效应的关键参数,也是不确定因素的重要来源.已有的全球研究针对不同区域均采用一致的暴露响应系数^[20],且在已有的全国尺度评估上也是采用了国外的大气污染物与疾病终点的暴露响应系数^[21,22,25].但阚海东等^[16]对我国大气颗粒物暴露于人群健康

效应的 Meta 分析表明,我国大气颗粒对居民的健康影响远远低于欧美国家.为此本研究选用了 Lu 等^[5]对中国大陆 127 个主要城市开展的 59 项研究进行整合分析的结果来评估 PM_{2.5} 对居民健康的影响.但目前缺乏中国长期 O₃ 暴露与人群死亡率的研究,因此评估 O₃ 对人群健康影响采用了 Jerrett 等^[13]的分析结果.受制于流行病学调查结果中包含的与大气污染物相关的疾病类型,本研究主要分析的是呼吸道疾病和心血管疾病的超额死亡人数.因此未来还需加强不同疾病和暴露响应关系的研究,明确中国的 PM_{2.5} 和 O₃ 与人群死亡率的暴露响应关系,为健康风险评估提供依据.

暴露人口和大气污染物的空间分布差异巨大,人口和污染物浓度分布数据精度也是评估数据重要的不确定因素.本研究中利用大气污染物国控站和北京市大气污染物监测站数据,利用空间插值的方法估算大气污染物的空间分布.人口数据来自于北京市 16 个区县的常住人口数据.相比于已有的研究中利用北京市区的监测站点数据和总常住人口数据评估健康效益^[21],过去的研究可能高估了大气污染物对居民健康的影响.此外本研究的 O₃ 数据来源于大气环境监测站点,缺乏农村地区的监测数据可能低估了实际 O₃ 浓度.因此未来需要采用监测数据和大气化学模式相结合的方法准确预测大气污染物浓度^[22].提高污染物浓度和人口数据分辨率,更准确评估大气污染的健康效益.

3 结论

(1)北京市 2014 和 2020 年 PM_{2.5} 年均浓度分别为 92.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 39.2 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.当前 PM_{2.5} 年均值已接近国家二级标准 35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,但是距离世界卫生组织的 10 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 还存在加大差距. O₃ 在 4~9 月每日最大小时平均值在 2014~2020 年保持在 81.9~72.8 $\text{nmol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 区间内,远远超过人群健康阈值.

(2)在月时间尺度上分析,北京市在冬季的 12 月和 1 月 PM_{2.5} 污染严重,夏季的 6 月 O₃ 污染问题突出,导致全年居民健康在全年均受到大气污染的影响.大气污染物季节变化与本地排放、外源输入和气象条件等因素关系密切.在日时间尺度上 PM_{2.5} 浓度夜间浓度值高于白天,其中 14:00~16:00 为日 PM_{2.5} 浓度最低点,22:00 至次日 00:00 点浓度最高. O₃ 浓度与之相反,最高浓度值出现在 18:00 点,最低值在每天 07:00.在空间分布上 PM_{2.5} 浓度自南向北呈降低趋势,浓度最高的为南部环境本底监测区域,最低浓度值出现在北部环境监测本底区域.臭

氧污染物浓度分布与 PM_{2.5} 污染空间分布相反.北部环境监测本底区域臭氧浓度最高,交通污染监测区域浓度最低.

(3)2014 年和 2019 年北京市 PM_{2.5} 和 O₃ 健康风险评价结果研究表明:北京市 2014 年总计 4 581 人的心血管和呼吸道疾病超额死亡与 PM_{2.5} 和 O₃ 相关,而 2019 年仅为 3 292 人.北京市大气污染防治条例和北京市打赢蓝天保卫战三年行动计划的实施显著降低了北京市 PM_{2.5} 浓度,而 O₃ 污染持续恶化.到 2019 年与 O₃ 污染相关的疾病超额死亡已经超过 PM_{2.5},成为危害居民健康的首要大气污染物.“十四五”规划中已将 PM_{2.5} 和 O₃ 协同治理列入,未来可以切实减少居民暴露于大气污染的风险.

参考文献:

- [1] Li K, Jacob D J, Liao H, *et al.* A two-pollutant strategy for improving ozone and particulate air quality in China[J]. *Nature Geoscience*, 2019, **12**(11): 906-910.
- [2] Silver B, Reddington C L, Arnold S R, *et al.* Substantial changes in air pollution across China during 2015-2017[J]. *Environmental Research Letters*, 2018, **13**, doi: 10.1088/1748-9326/aae718.
- [3] Katanoda K, Sobue T, Satoh H, *et al.* An association between long-term exposure to ambient air pollution and mortality from lung cancer and respiratory diseases in Japan[J]. *Journal of Epidemiology*, 2011, **21**(2): 132-143.
- [4] 戴海夏,宋伟民. 大气颗粒物健康效应生物学机制研究进展[J]. *环境与职业医学*, 2003, **20**(4): 308-311.
Dai H X, Song W M. Advances in biologic mechanism studies on health effects of ambient particulate matter[J]. *Journal of Environmental & Occupational Medicine*, 2003, **20**(4): 308-311.
- [5] Lu F, Xu D Q, Cheng Y B, *et al.* Systematic review and meta-analysis of the adverse health effects of ambient PM_{2.5} and PM₁₀ pollution in the Chinese population[J]. *Environmental Research*, 2015, **136**: 196-204.
- [6] 严向宏. 上海宝山区大气细颗粒物气溶胶 PM_{2.5} 特征研究与源解析[D]. 上海: 华东理工大学, 2011.
- [7] Maher B A, Ahmed I A M, Davison B, *et al.* Impact of roadside tree lines on indoor concentrations of traffic-derived particulate matter[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(23): 13737-13744.
- [8] Stevenson D S, Dentener F J, Schultz M G, *et al.* Multimodel ensemble simulations of present-day and near-future tropospheric ozone[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2006, **111**, doi: 10.1029/2005JD006338.
- [9] Fowler D. Ground-level ozone in the 21st century: future trends, impacts and policy implications [EB/OL]. https://royalsociety.org/-/media/Royal_Society_Content/policy/publications/2008/7925.pdf, 2021-02-22.
- [10] 闫美霖,李湉湉,刘晓途,等. 我国臭氧短期暴露的人群健康效应研究进展[J]. *环境与健康杂志*, 2012, **29**(8): 752-761.
Yan M L, Li T T, Liu X T, *et al.* Human health effects of short-term ozone exposure: a review of Chinese epidemiological evidence[J]. *Journal of Environment and Health*, 2012, **29**(8): 752-761.

- [11] Schlink U, Herbarth O, Richter M, *et al.* Statistical models to assess the health effects and to forecast ground-level ozone[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2006, **21**(4): 547-558.
- [12] Aunan K, Pan X C. Exposure-response functions for health effects of ambient air pollution applicable for China-a meta-analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2004, **329**(1-3): 3-16.
- [13] Jerrett M, Burnett R T, Pope III C A, *et al.* Long-term ozone exposure and mortality[J]. *New England Journal of Medicine*, 2009, **360**(11): 1085-1095.
- [14] Pope III C A, Burnett R T, Thun M J, *et al.* Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution[J]. *Journal of the American Medical Association*, 2002, **287**(9): 1132-1141.
- [15] 秦耀辰, 谢志祥, 李阳. 大气污染对居民健康影响研究进展[J]. *环境科学*, 2019, **40**(3): 1512-1520.
- Qin Y C, Xie Z X, Li Y. Review of research on the impacts of atmospheric pollution on the health of residents [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(3): 1512-1520.
- [16] 阚海东, 陈秉衡. 我国大气颗粒物暴露与人群健康效应的关系[J]. *环境与健康杂志*, 2002, **19**(6): 422-424.
- Kan H D, Chen B H. Analysis of Exposure-response relationships of air particulate matter and adverse health outcomes in China[J]. *Journal of Environmental Health*, 2002, **19**(6): 422-424.
- [17] Zeng Y Y, Cao Y F, Qiao X, *et al.* Air pollution reduction in China: recent success but great challenge for the future[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **663**: 329-337.
- [18] Feng Z Z, Hu E Z, Wang X K, *et al.* Ground-level O₃ pollution and its impacts on food crops in China: a review [J]. *Environmental Pollution*, 2015, **199**: 42-48.
- [19] Lu X, Hong J Y, Zhang L, *et al.* Severe surface ozone pollution in China: a global perspective [J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2018, **5**(8): 487-494.
- [20] Lelieveld J, Evans J S, Fnais M, *et al.* The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale[J]. *Nature*, 2015, **525**(7569): 367-371.
- [21] Song Y S, Wang X K, Maher B A, *et al.* The spatial-temporal characteristics and health impacts of ambient fine particulate matter in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, **112**(2): 1312-1318.
- [22] Liu H, Liu S, Xue B R, *et al.* Ground-level ozone pollution and its health impacts in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **173**: 223-230.
- [23] 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.
- [24] 国务院. 国务院关于印发大气污染防治行动计划的通知 [EB/OL]. http://www.gov.cn/zwqk/2013-09/12/content_2486773.htm, 2021-02-22.
- [25] Kuerban M, Waili Y, Fan F, *et al.* Spatio-temporal patterns of air pollution in China from 2015 to 2018 and implications for health risks[J]. *Environmental Pollution*, 2020, **258**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113659.
- [26] 北京市人民代表大会常务委员会. 北京市大气污染防治条例 [EB/OL]. http://www.beijing.gov.cn/zhengce/dfxfg/202005/t20200518_1899727.html, 2021-02-22.
- [27] 北京市人民政府. 北京市人民政府关于印发《北京市打赢蓝天保卫战三年行动计划》的通知 [EB/OL]. http://www.beijing.gov.cn/zhengce/zhengcefaui/201905/t20190522_61552.html, 2021-02-22.
- [28] 张梦娇, 苏方成, 徐起翔, 等. 2013~2017 年中国 PM_{2.5} 污染防治的健康效益评估[J]. *环境科学*, 2021, **42**(2): 513-522.
- Zhang M J, Su F C, Xu Q X, *et al.* Health impact attributable to the control of PM_{2.5} pollution in China during 2013-2017 [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(2): 513-522.
- [29] 常玲利, 邵龙义, 杨书申, 等. 大气污染综合治理攻坚行动前后北京市 PM_{2.5} 质量浓度变化特征研究[J]. *矿业科学学报*, 2019, **4**(6): 539-546.
- Chang L L, Shao L Y, Yang S S, *et al.* Study on variation characteristics of PM_{2.5} mass concentrations in Beijing after the action for comprehensive control of air pollution[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2019, **4**(6): 539-546.
- [30] Giannadaki D, Pozzer A, Lelieveld J. Modeled global effects of airborne desert dust on air quality and premature mortality[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(2): 957-968.
- [31] Cohen A J, Anderson H R, Ostro B, *et al.* The global burden of disease due to outdoor air pollution[J]. *Journal of Toxicology and Environmental Health. Part A*, 2005, **68**(13-14): 1301-1307.
- [32] Lim S S, Vos T, Flaxman A D, *et al.* A comparative risk assessment of burden of disease and injury attributable to 67 risk factors and risk factor clusters in 21 regions, 1990-2010: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010 [J]. *The Lancet*, 2012, **380**(9859): 2224-2260.
- [33] 生态环境部. 关于印发《京津冀及周边地区 2018-2019 年秋冬季节大气污染防治攻坚行动方案》的通知 [EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/sthjbjw/201809/t20180927_630570.htm, 2021-02-22.
- [34] 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.
- [35] 沈楠驰, 周丙锋, 李珊珊, 等. 2015—2019 年天津市大气污染物时空变化特征及成因分析[J]. *生态环境学报*, 2020, **29**(9): 1862-1873.
- [36] 钱悦, 许彬, 夏玲君, 等. 2016~2019 年江西省臭氧污染特征与气象因子影响分析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(5): 2190-2201.
- Qian Y, Xu B, Xia L J, *et al.* Characteristics of ozone pollution and the relationship with meteorological factors in Jiangxi province [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(5): 2190-2201.
- [37] 崔梦瑞, 白林燕, 冯建中, 等. 京津唐地区臭氧时空分布特征与气象因子的关联性研究[J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(2): 373-385.
- Cui M R, Bai L Y, Feng J Z, *et al.* Analysis of temporal and spatial variations of ozone compiling with dynamics of meteorological factors in the Beijing-Tianjing-Tangshan region [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(2): 373-385.
- [38] 北京市人民政府办公厅. 北京市人民政府办公厅关于印发《北京市污染防治攻坚战 2020 年行动计划》的通知 [EB/OL]. http://www.beijing.gov.cn/zhengce/zhengcefaui/202002/t20200213_1629687.html, 2021-02-22.
- [39] Yao L, Lu N. Spatiotemporal distribution and short-term trends of particulate matter concentration over China, 2006-2010 [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, **21**(16): 9665-9675.
- [40] Zhang Y L, Cao F. Fine particulate matter (PM_{2.5}) in China at a city level[J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**, doi: 10.1038/

- srep14884.
- [41] 皮冬勤, 陈焕盛, 魏巍, 等. 京津冀一次重污染过程的成因和来源[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(5): 1899-1908.
Pi D Q, Chen H S, Wei W, *et al.* The causes and sources of a heavy-polluted event in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. China Environmental Science, 2019, **39**(5): 1899-1908.
- [42] 刘晓宇, 郎建垒, 程水源, 等. 北京市冬季 PM_{2.5} 污染特征与区域传输影响研究[J]. 安全与环境学报, 2017, **17**(3): 1200-1205.
Liu X Y, Lang J L, Cheng S Y, *et al.* Pollution characteristics and regional migration impact of PM_{2.5} in Beijing in winter season [J]. Journal of Safety and Environment, 2017, **17**(3): 1200-1205.
- [43] 陈思宇, 王晨, 谢亭亭, 等. 2014 年中国大陆地区冷、暖季大气颗粒物的分布特征[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2018, **54**(2): 167-174, 183.
Chen S Y, Wang C, Xie T T, *et al.* Spatial distribution of particulate matter in Mainland China during cold and warm seasons in 2014 [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2018, **54**(2): 167-174, 183.
- [44] 臧星华, 鲁垠涛, 姚宏, 等. 中国主要大气污染物的时空分布特征研究[J]. 生态环境学报, 2015, **24**(8): 1322-1329.
Zang X H, Lu Y T, Yao H, *et al.* The temporal and spatial distribution characteristics of main air pollutants in China [J]. Ecology and Environment Sciences, 2015, **24**(8): 1322-1329.
- [45] 张红星, 韩立建, 任玉芬, 等. 北京城市与西北远郊地表臭氧浓度梯度移动监测研究[J]. 生态学报, 2019, **39**(18): 6803-6815.
Zhang H X, Han L J, Ren Y F, *et al.* Monitoring ozone concentrations along an urban to rural gradient of Beijing with a mobile vehicle [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, **39**(18): 6803-6815.
- [46] Wang H D, Dwyer-Lindgren L, Lofgren K T, *et al.* Age-specific and sex-specific mortality in 187 countries, 1970-2010: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010 [J]. The Lancet, 2012, **380**(9859): 2071-2094.
- [47] 黄德生, 张世秋. 京津冀地区控制 PM_{2.5} 污染的健康效益评估[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(1): 166-174.
Huang D S, Zhang S Q. Health benefit evaluation for PM_{2.5} pollution control in Beijing-Tianjin-Hebei region of China [J]. China Environmental Science, 2013, **33**(1): 166-174.
- [48] Fann N, Lamson A D, Anenberg S C, *et al.* Estimating the national public health burden associated with exposure to ambient PM_{2.5} and ozone [J]. Risk Analysis: An International Journal, 2012, **32**(1): 81-95.
- [49] Lelieveld J, Barlas C, Giannadaki D, *et al.* Model calculated global, regional and megacity premature mortality due to air pollution [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, **13**(14): 7023-7037.

CONTENTS

Spatiotemporal Distribution and Health Impacts of PM _{2.5} and O ₃ in Beijing, from 2014 to 2020	CHEN Jing, PENG Jin-long, XU Yan-sen (4071)
High-resolution Estimation of Spatio-temporal Variation in PM _{2.5} Concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	YANG Xiao-hui, SONG Chun-jie, FAN Li-hang, <i>et al.</i> (4083)
Impacts of Anthropogenic Emission Reduction and Meteorological Conditions on PM _{2.5} Pollution in Typical Cities of Beijing-Tianjin-Hebei in Winter	SHAO Xuan-yi, WANG Xiao-qi, ZHONG Yi-sheng, <i>et al.</i> (4095)
Influence of Pollutant Transport from Both Sides of the Taihang Mountains on Cross-Valley Urban Aerosols	WANG Yan, GUO Wei, YAN Shi-ming, <i>et al.</i> (4104)
Variation Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Aerosols in Winter in Jiashan	ZHANG Ying-long, LI Li, WU Wei-chao, <i>et al.</i> (4116)
Simulation Analysis of the Impact of COVID-19 Pandemic Control on Air Quality in Henan Province based on Machine Learning Algorithm	WEI Yu, XU Qi-xiang, ZHAO Jin-shuai, <i>et al.</i> (4126)
Seasonal Variation, Source Identification, and Health Risk of PM _{2.5} -bound Metals in Xinxiang	LIU Huan-jia, JIA Meng-ke, LIU Yong-li, <i>et al.</i> (4140)
Distribution Characteristics and Seasonal Variations of Arsenic in Atmospheric Aerosols over the Yellow Sea and Bohai Sea	YUAN Shuai, WANG Yan, LIU Ru-hai, <i>et al.</i> (4151)
Extinction Characteristics of Aerosols and the Contribution of Pollution Sources to Light Extinction During Three Heavy Pollution Episodes in the Winter of 2020 in Tianjin	LI Li-wei, XIAO Zhi-mei, YANG Ning, <i>et al.</i> (4158)
Spatial Variation of Surface Ozone Concentration During the Warm Season and Its Meteorological Driving Factors in China	HE Chao, MU Hang, YANG Lu, <i>et al.</i> (4168)
Exploring Characteristics and Causes of Summer Ozone Pollution Based on Process Analysis in Wuhai	ZHANG Rui-xin, CHEN Qiang, XIA Jia-qi, <i>et al.</i> (4180)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric VOCs in the Coastal Background of the Pearl River Delta	YUN Long, LI Cheng-liu, ZHANG Ming-di, <i>et al.</i> (4191)
Hydrochemical Characteristics and Factors of Surface Water and Groundwater in the Upper Yongding River Basin	KONG Xiao-le, YANG Yong-hui, CAO Bo, <i>et al.</i> (4202)
Temporal and Spatial Variations in Water Quality of Hanjiang River and Its Influencing Factors in Recent Years	CHENG Bing-fen, ZHANG Yuan, XIA Rui, <i>et al.</i> (4211)
Pollution Level, Distribution Characteristic, and Ecological Risk Assessment of Environmentally Persistent Pharmaceutical Pollutants in Surface Water of Jiangsu Province	ZHAO Mei-mei, FAN De-ling, GU Wen, <i>et al.</i> (4222)
Spatial and Temporal Distribution and Pollution Evaluation of Soluble Heavy Metals in Liujiang River Basin	ZHANG Wan-jun, XIN Cun-lin, YU Shi, <i>et al.</i> (4234)
Source Analysis and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Groundwater of Leizhou Peninsula	SHI Huan-huan, PAN Yu-jie, ZENG Min, <i>et al.</i> (4246)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metal Elements in Groundwater of Longzici Spring Area	XIE Hao, LIANG Yong-ping, LI Jun, <i>et al.</i> (4257)
Seasonal Variation and Sources Identification of Dissolved Sulfate in a Typical Karst Subterranean Stream Basin Using Sulfur and Oxygen Isotopes	REN Kun, PAN Xiao-dong, LAN Gan-jiang, <i>et al.</i> (4267)
Phosphorus Fractions and Quantitative Identification of Pollution Sources in Nanhai Wetland, Baotou	BAI Ya-hong, QIAN Chen-ge, YUAN Si-jing, <i>et al.</i> (4275)
Release Risk of Phosphorus by Sediments and Its Influencing Factors in Ponds and Ditches of a New Urban District Park	LI Ru-zhong, SONG Min, YANG Ji-wei (4287)
Effect of Hydraulic Residence Time on Removal Efficiency of Pollutants in Subsurface Flow Constructed Wetlands and Analysis of Denitrification Mechanism	QI Ran, ZHANG Ling, YANG Fan, <i>et al.</i> (4296)
Enhanced Removal of Pollutants in Constructed Wetlands with Manganese Sands	MA Quan, WANG Dong-lin, LIN Hui, <i>et al.</i> (4304)
Application Effect of Four Typical Submerged Macrophytes on Removing Cadmium from Polluted Sediment	TAO Li, WANG Pei-fang, YUAN Qiu-sheng, <i>et al.</i> (4311)
Structure of Aerobic Denitrification Bacterial Community in Response to Dissolved Organic Matter in Baiyangdian Lake During the Water Delivery Period	ZHOU Shi-lei, ZHANG Tian-na, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i> (4319)
Nitrogen and Phosphorus Leaching Characteristics and Adsorption Properties of Hardwood Biochar in Stormwater Runoff	MENG Yi-ke, WANG Yuan, WANG Chuan-yue (4332)
Indicator Function of Ragworm (<i>Nereididae</i>) on Sediment Microplastic in Haizhou Bay Intertidal Zone	WANG Jia-xuan, SONG Ke-xin, SUN Yi-xin, <i>et al.</i> (4341)
Antagonistic Effect and Mechanism of Nano Titanium Dioxide and Cadmium on the Growth of <i>Scenedesmus obliquus</i>	WANG Pu, ZHAO Li-hong, ZHU Xiao-shan (4350)
Mutual Influence Between Microbial Community, Wastewater Characteristics, and Antibiotic Resistance Genes During Spiramycin Production Wastewater Treatment	WU Cai-yun, LI Hui-li, QIN Cai-xia, <i>et al.</i> (4358)
Effect of Chelated Iron on Nitrogen Removal Efficiency and Microbial Community Structure in the Anaerobic Ferric Ammonium Oxidation	LIAO Hong-yan, SONG Cheng, WAN Liu-yang, <i>et al.</i> (4366)
Effects of Dissolved Oxygen on Nutrient Removal Performance and Microbial Community in Low Carbon/Nitrogen Municipal Wastewater Treatment Process	CHI Yu-lei, SHI Xuan, REN Tong, <i>et al.</i> (4374)
Shortening SRT of Intermittent Gradient Aeration to Realize Nitrogen and Phosphorus Removal in Short-range SNEDPR System	ZHANG Yu-jun, LI Dong, WANG Xin-xin, <i>et al.</i> (4383)
Characteristics of Partial Denitrification in Biofilm System	YU Li-fang, ZHANG Xing-xiu, ZHANG Qiong, <i>et al.</i> (4390)
Effect of Anaerobic Plug-flow on Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Aerobic Granular Sludge with Intermittent Aeration	LI Dong, CAO Si-yu, WANG Qi, <i>et al.</i> (4399)
Combining Different Aerobic/Anoxic Durations with Zoned Sludge Discharge to Optimize Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules in Domestic Sewage	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (4406)
Meta-analysis of the Effects of Metal Mining on Soil Heavy Metal Concentrations in Southwest China	ZHANG Jian-lin, QU Ming-kai, CHEN Jian, <i>et al.</i> (4414)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Watersheds of the Qinghai-Tibet Plateau	DU Hao-lin, WANG Ying, WANG Jin-song, <i>et al.</i> (4422)
Spatial Distribution Characteristics and Risk Assessment of Cadmium Pollution in Soil-crops system of an E-waste Dismantling Area	ZHANG Lu-yao, ZHAO Ke-li, FU Wei-jun (4432)
Characteristics of Modified Biochars and Their Immobilization Effect on Cu and Cd in Polluted Farmland Soil Around Smelter	WANG Xin-yu, MENG Hai-bo, SHEN Yu-jun, <i>et al.</i> (4441)
Combined Effects of Soil Amendment and Zinc Fertilizer on Accumulation and Transportation of Cadmium in Soil-Rice System	ZHOU Kun-hua, ZHOU Hang, WANG Zi-yu, <i>et al.</i> (4452)
Effects of Different Soil Conditioners on Rice Growth and Heavy Metal Uptake in Soil Contaminated with Copper and Cadmium	WEI Wei, LI Ping, LANG Man (4462)
Isolation and Identification of the Plant Endophyte R-13 and Its Effect on Cadmium Accumulation in <i>Solanum nigrum</i> L.	PANG Jie, LIU Yue-min, HUANG Yong-chun, <i>et al.</i> (4471)
Response of Soil Archaeal Community to Heavy Metal Pollution in Different Typical Regions	LI Yu-tong, YANG Shan, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (4481)
High-throughput Sequencing Analysis of Soil Bacterial Community in the Grain for Green Project Areas of the Loess Plateau	LIU Xiao-hua, WEI Tian-xing (4489)
Experimental Influence of Food Waste Fermentation Broth on the Soil Quality in a Loess Hilly Area	SHAO Li-ming, REN Jun-da, LÜ Fan, <i>et al.</i> (4500)
Stability of Soil Aggregates at Different Altitudes in Qinling Mountains and Its Coupling Relationship with Soil Enzyme Activities	MA Huan-fei, HU Han, LI Yi, <i>et al.</i> (4510)
Reactivation of Passivated Biochar/Nanoscale Zero-Valent Iron by an Electroactive Microorganism for Cooperative Hexavalent Chromium Removal and Mechanisms	LIAO Cong-jian, ZHAO Xiao-lei, LIU Kai, <i>et al.</i> (4520)
Influence of Precipitation Change on Soil Respiration in Desert Grassland	HAO Lian-yi, ZHANG Li-hua, XIE Zhong-kui, <i>et al.</i> (4527)
Effects of Nitrogen Fertilizer Application Times and Nitrification Inhibitor on N ₂ O Emission from Potted Maize	FU Pei-jiao, JI Heng-kuan, HE Qiu-xiang, <i>et al.</i> (4538)
Gaseous Nitrogen Emission from Soil After Application of NH ₄ ⁺ -N Loaded Biochar	MA Xiao-gang, HE Jian-qiao, CHEN Yu-lan, <i>et al.</i> (4548)
Effects of Microplastics Addition on Soil Organic Carbon Mineralization in Citrus Orchard	ZHANG Xiu-ling, YAN Zi-wei, WANG Feng, <i>et al.</i> (4558)
Dynamic Material Flow Analysis of Perfluorooctane Sulfonate in China; 1985-2019	WANG Jia-yu, CHEN Jing-wen, TANG Wei-hao, <i>et al.</i> (4566)