

### 目 次

|                                                        |                                                    |        |
|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|--------|
| 基于时间序列分解的京津冀区域PM <sub>2.5</sub> 和O <sub>3</sub> 空间分布特征 | 姚青, 丁净, 杨旭, 蔡子颖, 韩素芹                               | (2487) |
| 基于随机森林的北京城区臭氧敏感性分析                                     | 周红, 王鸣, 柴文轩, 赵昕                                    | (2497) |
| 基于随机森林模型的四川盆地臭氧污染预测                                    | 杨晓彤, 康平, 王安怡, 臧增亮, 刘浪                              | (2507) |
| 海口市臭氧浓度统计预报模型的构建与效果评估                                  | 符传博, 林建兴, 唐家翔, 丹利                                  | (2516) |
| 京津冀地区2015~2020年臭氧浓度时空分布特征及其健康效益评估                      | 高冉, 李琴, 车飞, 张艳平, 祖永刚, 刘芬                           | (2525) |
| 2022年北京市城区PM <sub>2.5</sub> 水溶性离子含量及其变化特征              | 陈圆圆, 崔迪, 赵泽熙, 常森, 景宽, 沈秀娥, 刘保献                     | (2537) |
| 郑州市冬春季PM <sub>2.5</sub> 中金属元素污染特征、来源及健康风险评估            | 陶杰, 闫慧姣, 徐艺斐, 荆海涛                                  | (2548) |
| 淄博市供暖前后PM <sub>2.5</sub> 中多环芳烃及其衍生物污染特征、来源及健康风险        | 孙港立, 吴丽萍, 徐勃, 高玉宗, 赵雪艳, 姬亚芹, 杨文                    | (2558) |
| 西安市采暖季过渡期高时间分辨率细颗粒物组分特征及来源解析                           | 李萌津, 张勇, 张倩, 田杰, 李丽, 刘卉昆, 冉伟康, 王启元                 | (2571) |
| 天津冬季两个典型污染过程高浓度无机气溶胶成因及来源分析                            | 卢苗苗, 韩素芹, 刘可欣, 唐晓, 孔磊, 丁净, 樊文雁, 王自发                | (2581) |
| 基于空间尺度效应的山东省PM <sub>2.5</sub> 浓度时空变化及空间分异地理探测          | 徐勇, 韦梦新, 邹滨, 郭振东, 李沈鑫                              | (2596) |
| 我国典型化工行业VOCs排放特征及其对臭氧生成潜势                              | 武婷, 崔焱文, 肖威德, 翟增秀, 韩萌                              | (2613) |
| 廊坊秋季大气污染过程中VOCs二次气溶胶生成潜势及来源分析                          | 张敬巧, 刘铮, 丁文文, 朱瑶, 曹婷, 凌德印, 王淑兰, 王宏亮                | (2622) |
| 景观格局对河流水质影响的尺度效应 Meta 分析                               | 王玉仓, 杜晶晶, 张禹, 吴昊, 胡敏敏, 陈丁江                         | (2631) |
| 白洋淀夏季汛期入淀河流水体溶解性有机物的光谱特征及来源                            | 孟佳靖, 宴红, 陈哲, 周石磊, 底怡玲, 武辰彬, 王晨光, 张家丰, 崔建升          | (2640) |
| 北京市丰台区永定河以东浅层地下水水化学演变规律及成因分析                           | 胡昱欣, 周瑞静, 宋炜, 杨全合, 王鑫茹                             | (2651) |
| 庐庐断裂带(安徽段)浅层地下水水化学特征、控制因素及水质评价                         | 刘海, 魏伟, 宋阳, 徐洁, 管政亭, 黄健敏, 赵国红                      | (2665) |
| 农药施用对兴凯湖水中农药残留的影响及其风险评价                                | 王蔚青, 徐雄, 刘权震, 林利华, 吕婧, 王东红                         | (2678) |
| 黄河兰州段河岸带土壤中微生物与耐药基因的赋存特征                               | 韦程宸, 魏枫沂, 夏慧, 黄魁                                   | (2686) |
| 基于多源数据的巢湖蓝藻水华时空分布及驱动因素分析                               | 金晓龙, 邓学良, 戴睿, 徐倩倩, 吴月, 范裕祥                         | (2694) |
| 再生水构建水环境中沉水植物附着细菌群落特征                                  | 贺赞, 李雪梅, 李宏权, 魏琳琳, 姜春晖, 姜大伟, 李魁晚                   | (2707) |
| 水位波动和植被恢复对三峡水库消落带土壤原核微生物群落结构的交互影响                      | 梅渝, 黄平, 王鹏, 朱凯                                     | (2715) |
| 银川市典型湖泊沉积物细菌群落结构及其对重金属的响应关系                            | 蒙俊杰, 刘双羽, 邱小琼, 周瑞娟                                 | (2727) |
| 热水解时间对污泥厌氧消化系统微生物群落结构影响分析                              | 张含, 张涵, 王佳伟, 高金华, 文洋, 李相昆, 任征然                     | (2741) |
| 市政污水中吗啡来源辨析                                            | 邵雪婷, 赵悦彤, 蒋冰, 裴伟, 李彦莹, 谭冬芹, 王德高                    | (2748) |
| 滦河流域生态环境动态遥感评价                                         | 李艳翠, 袁金国, 刘博涵, 郭豪                                  | (2757) |
| 黄河流域生态系统服务价值时空演化及影响因素                                  | 王奕洪, 孙学堂                                           | (2767) |
| 基于贝叶斯网络的生态系统服务权衡协同关系强度及其空间格局优化:以汾河流域为例                 | 蔡进, 危小建, 江平, 梁玉琦                                   | (2780) |
| 贵州高原典型喀斯特县域生境质量时空演变及定量归因                               | 李月, 冯霞, 吴路华, 罗光杰, 罗红芬                              | (2793) |
| 2000~2021年黄土高原生态分区NEP时空变化及其驱动因子                        | 周怡婷, 严俊霞, 刘菊, 王瑛                                   | (2806) |
| 基于SSP-RCP情景的黄土高原土地变化模拟及草原碳储量                           | 崔伟, 董燕, 张露尹, 王荣臻                                   | (2817) |
| 京津冀城市群建设用地扩张多情景模拟及其对生态系统碳储量的影响                         | 武爱彬, 陈辅国, 赵艳霞, 秦彦杰, 刘欣, 郭小平                        | (2828) |
| 西南岩溶区土地利用变化对团聚体稳定性及其有机碳的影响                             | 江可, 贾亚男, 杨琰, 陈坚淇, 禹朴家                              | (2840) |
| 不同土地利用方式下土壤有机质分子组成变化的整合分析                              | 黄世威, 赵一锴, 朱馨雨, 刘贺雷, 刘姣姣, 陈稍, 陈佳永, 张阿凤              | (2848) |
| 基于改进麻雀搜索算法优化BP神经网络的土壤有机质空间分布预测                         | 胡志瑞, 赵万伏, 宋根先, 王芳, 林妍敏                             | (2859) |
| 不同有机物料施用对菜地磷累积和转化的影响                                   | 孙凯, 崔玉涛, 李顺晋, 魏冰丽, 王媛, 杨宏博, 王孝忠, 张伟                | (2871) |
| 集约化柑橘种植抑制土壤磷循环微生物活性                                    | 周连吴, 曾全超, 梅唐英泽, 汪明霞, 谭文峰                           | (2881) |
| 控释掺混肥对麦玉米轮作体系作物产量和温室气体排放的影响                            | 高玮, 王学霞, 谢建治, 陈延华, 倪小会, 王甲辰, 董艳芳, 李子双, 曹兵          | (2891) |
| 生物炭对黄绵土中NO <sub>3</sub> -N运移过程影响及模拟                    | 白一茹, 刘旭, 张钰涵, 张睿媛, 马艳, 王幼奇                         | (2905) |
| 中国农田土壤重金属污染分析与评价                                       | 杨雳, 白宗旭, 薄文浩, 林静, 杨俱佳, 陈涛                          | (2913) |
| 城市土壤和地表灰尘重金属污染研究进展与展望                                  | 王晓雨, 刘恩峰, 杨祥梦, 王碧莲, 林锦阔, 颜梦霞, 毕世杰                  | (2926) |
| 场地重金属污染土壤固化及MICP技术研究进展                                 | 陈玥如, 高文艳, 陈虹任, 薛生国, 吴川                             | (2939) |
| 黄河流域山东段近河道煤矿区土壤重金属污染特征及源解析                             | 戴文婷, 张晖, 吴霞, 钟鸣, 段桂兰, 董霁红, 张培培, 樊洪明                | (2952) |
| 拒马河流域河流沉积物与土壤重金属含量及风险评价                                | 韩双宝, 袁磊, 张秋霞, 郑焰, 李甫成                              | (2962) |
| 银川市黄河滩区土壤重金属污染特征、生态风险评估及来源解析                           | 于路加, 马海军, 王翠平                                      | (2971) |
| 基于源导向和蒙特卡罗模型的广东省某城市土壤重金属健康风险评估                         | 陈莲, 邹子航, 张培珍, 王雨茜, 王振江, 林森, 唐翠明, 罗国庆, 钟建武, 李智毅, 王圆 | (2983) |
| 西南典型碳酸盐岩高地背景区农田重金属化学形态、影响因素及回归模型                       | 唐瑞玲, 徐进力, 刘彬, 杜雪苗, 顾雪, 于林松, 毕婧                     | (2995) |
| 贵州省水田土壤-水稻Hg含量特征与安全种植区划                                | 韦美溜, 周浪, 黄燕玲, 庞瑞, 王佛鹏, 宋波                          | (3005) |
| 柠檬酸辅助甜高粱对南方典型母质土壤的镉修复效应                                | 刘梦宇, 罗绪锋, 辜娇峰, 易轩韬, 周航, 曾鹏, 廖柏寒                    | (3016) |
| 改性酒糟生物炭对紫色土壤镉形态及水稻吸收镉的影响                               | 肖乃川, 王子芳, 杨文娜, 谢永红, 代文才, 高明                        | (3027) |
| 生物炭对四环素和铜复合污染土壤生菜生长及污染物累积的影响                           | 郑晨格, 裴欢欢, 张亚珊, 李嘉欣, 刘奋武, 乔星星, 秦俊梅                  | (3037) |
| 基于Meta分析的蚯蚓堆肥对堆肥质量和重金属的影响效应                            | 姜继韶, 侯睿, 崔慧林, 闫广轩, 刘栋                              | (3047) |
| 微塑料对土壤N <sub>2</sub> O排放及氮素转化的影响研究进展                   | 刘一戈, 杨安琪, 陈舒欣, 牛英奕, 卢瑛, 李博                         | (3059) |
| 土地利用对洱海罗时江小流域土壤微塑料污染的影响                                | 戴柳云, 侯磊, 王化, 符立松, 王艳霞, 李晓琳, 王万宾, 梁启斌               | (3069) |
| 养殖海湾淤泥质海岸沉积物微塑料污染特征                                    | 宋可心, 贺金成, 李昌文, 解思琦, 刘宝堃, 黄伟, 冯志华                   | (3078) |
| 聚乙烷微塑料对盐渍化土壤微生物群落的影响                                   | 李志超, 李哲, 李嘉晨, 屈忠义, 杨文煊, 李卫平                        | (3088) |
| 鄱阳湖候鸟栖息地微塑料表面细菌群落结构特征与生态风险预测                           | 俞锦丽, 赵俊凯, 罗思琦, 朱颖婷, 张文慧, 胡启武, 刘淑丽                  | (3098) |
| 粤闽浙沿海重点城市道路交通节能减排路径                                    | 徐艺诺, 翁大维, 王硕, 胡喜生, 王占永, 张园园, 张兰怡                   | (3107) |
| 电动重卡替代柴油重卡的全生命周期碳减排效益分析                                | 徐圆圆, 龚德鸿, 黄正光, 杨浪                                  | (3119) |

# 京津冀地区 2015 ~ 2020 年臭氧浓度时空分布特征及其健康效益评估

高冉<sup>1</sup>, 李琴<sup>2\*</sup>, 车飞<sup>2</sup>, 张艳平<sup>2</sup>, 祖永刚<sup>3</sup>, 刘芬<sup>1\*</sup>

(1. 首都医科大学公共卫生学院流行病与卫生统计学系, 北京市临床流行病学重点实验室, 北京 100069; 2. 中国环境科学研究院, 北京 100012; 3. 廊坊经济技术开发区卫生监督所, 廊坊 065001)

**摘要:** 为评估京津冀地区臭氧(O<sub>3</sub>)时空分布特征及其产生的健康效益, 采用土地利用回归模型和随机森林模型, 模拟 2015 ~ 2020 年京津冀地区 O<sub>3</sub> 浓度并在此基础上估算归因于 O<sub>3</sub> 暴露导致的全因死亡、心血管系统疾病死亡和呼吸系统疾病死亡的人数及相应的健康损失经济价值。结果表明, 京津冀地区 O<sub>3</sub> 浓度、归因于 O<sub>3</sub> 暴露的死亡人数和健康损失经济价值在 2015 ~ 2020 年间的变化趋势相似, 整体呈现波动性上升趋势; O<sub>3</sub> 浓度较高的地区以及变化较大的地区集中于中部和西南部, 北部地区浓度较低且变化程度较小; 2015 ~ 2020 年归因于 O<sub>3</sub> 暴露的死亡人数空间分布与 O<sub>3</sub> 浓度的分布相似; 2015 ~ 2020 年, 13 个市的全因死亡和心血管系统疾病死亡健康损失经济价值均增加, 4 个市的呼吸系统疾病死亡健康损失经济价值下降。研究结果提示京津冀地区 O<sub>3</sub> 污染防治重点关注地区不尽相同, 综合考虑建议以北京市、天津市、衡水市和邢台市作为京津冀地区 O<sub>3</sub> 污染防治重点地区, 根据重点地区类型和特点采取差异化防治措施改善 O<sub>3</sub> 浓度、减少归因于 O<sub>3</sub> 暴露的死亡人数和健康损失经济价值。

**关键词:** 京津冀地区; 臭氧(O<sub>3</sub>); 时空分布; 死亡人数; 健康损失经济价值

中图分类号: X196; X515 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)05-2525-12 DOI: 10.13227/j.hjks.202305280

## Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Ozone Concentration and Health Benefit Assessment in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 2015 to 2020

GAO Ran<sup>1</sup>, LI Qin<sup>2\*</sup>, CHE Fei<sup>2</sup>, ZHANG Yan-ping<sup>2</sup>, ZU Yong-gang<sup>3</sup>, LIU Fen<sup>1\*</sup>

(1. Beijing Municipal Key Laboratory of Clinical Epidemiology, Department of Epidemiology and Health Statistics, School of Public Health, Capital Medical University, Beijing 100069, China; 2. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. Langfang Economic and Technological Development Zone Health Supervision Institute, Langfang 065001, China)

**Abstract:** To evaluate the spatial and temporal distribution characteristics of ambient ozone (O<sub>3</sub>) in the Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) Region, the land use regression (LUR) model and random forest (RF) model were used to simulate the ambient O<sub>3</sub> concentration from 2015 to 2020. Meanwhile, all-cause, cardiovascular, and respiratory mortalities as well as economic losses attributed to O<sub>3</sub> were also estimated. The results showed that upward trends with fluctuation were observed for ambient O<sub>3</sub> concentration, mortalities, and economic losses attributable to O<sub>3</sub> exposure in the BTH Region from 2015 to 2020. The areas with high O<sub>3</sub> concentration and great changes were concentrated in the central and southwestern regions, whereas the concentration in the northern region was low, and the change degree was small. The spatial distribution of the mortalities was also consistent with the spatial distribution of O<sub>3</sub> concentration. From 2015 to 2020, the economic losses regarding all-cause mortality and cardiovascular mortality increased in 13 cities of the BTH Region, whereas the economic losses of respiratory mortality decreased in 4 cities in the BTH Region. The results indicated that the priority areas for O<sub>3</sub> control were not uniform. Specifically, Beijing, Tianjin, Hengshui, and Xingtai were vital areas for O<sub>3</sub> pollution control in the BTH Region. Differentiated control measures should be adopted based on the characteristics of these target areas to decline O<sub>3</sub> concentration and reduce health impacts and economic losses associated with O<sub>3</sub> exposure.

**Key words:** Beijing-Tianjin-Hebei Region; ozone (O<sub>3</sub>); spatial and temporal distribution; mortality; health economic losses

空气污染会对人体健康造成影响, 其健康风险排名逐渐上升, 至 2019 年已排第 7 位, 成为主要的公共卫生挑战之一<sup>[1-3]</sup>. 随着我国改革开放以来工业化和城市化的快速发展, 空气污染已成为首要的环境问题, 2017 年我国约有 124 万人死于空气污染<sup>[4,5]</sup>. 为应对严重的空气污染, 我国出台了一系列大气污染防治措施, 将京津冀(Beijing-Tianjin-Hebei Region, BTH)地区列为大气污染防治重点区域. 随着治理措施的推进, 京津冀地区 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>、SO<sub>2</sub>、CO 和 NO<sub>2</sub> 浓度逐渐下降, 但 O<sub>3</sub> 浓度呈现上升趋势, 污染严重<sup>[6,7]</sup>. 2022 年京津冀地区 O<sub>3</sub> 浓度仍高于《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)中所规定的二级

浓度限值(160 μg·m<sup>-3</sup>)<sup>[8-10]</sup>. 由此可见, 京津冀地区 O<sub>3</sub> 污染形势较为严峻.

O<sub>3</sub> 浓度数据的获取方式主要包括监测站点实际测量数据、卫星反演 O<sub>3</sub> 浓度数据以及长期的 O<sub>3</sub> 浓度再分析数据集等. 但目前通过这 3 种方式获取的 O<sub>3</sub> 浓度数据还存在不足, 例如, 由于监测站点数量不足且分布不均, 数据代表性受影响; 受卫星平台、传感器和反演算法等因素的限制, 容易出现反演产

收稿日期: 2023-05-31; 修订日期: 2023-07-19

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFC1806301)

作者简介: 高冉(1998 ~ ), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境污染防治和人群健康效益, E-mail: gaoran9712@163.com

\* 通信作者, E-mail: liqin529luck@163.com; liufen05@ccmu.edu.cn

品大面积数据的缺失;再分析数据集和现有数据集的分辨率较低,区域性分析受到限制<sup>[11,12]</sup>.这些因素均导致获取的 $O_3$ 浓度分辨率较低,不易于捕捉空间异质性.与此同时,流行病学研究表明 $O_3$ 与心血管系统疾病和呼吸系统疾病死亡存在相关性<sup>[13~15]</sup>.国内外学者对 $O_3$ 浓度变化导致的健康效应和健康经济效益的评估显示, $O_3$ 对人体健康以及相应健康损失经济价值的影响较大<sup>[16,17]</sup>.因此,有必要获取高分辨率的 $O_3$ 浓度,对京津冀地区 $O_3$ 浓度的时空分布以及导致的健康风险和经济损失开展评估,提升评估的精确性,以期为制定京津冀地区协同控制 $O_3$ 污染、降低疾病负担和健康损失经济价值的相关政策和措施提供科学依据.

土地利用回归模型(land-use regression, LUR)通过分析监测点地表特征和污染物间的关系,利用地表特征变量预测监测点未覆盖区域的污染物浓度,该方法被广泛应用于国内外 $O_3$ 浓度模拟的研究之中,是评价 $O_3$ 空间变化的一种很有前景的方法<sup>[18,19]</sup>.其优势在于引入地表特征变量,以便捕捉空气污染的小尺度变化,在属性域上有较好的代表性.近些年,机器学习算法也被应用于构建污染物浓度预测模型,并且在大规模、长时间、高时空分辨率的研究中表现出更高的模型性能<sup>[20]</sup>.随机森林(random forest, RF)是机器学习算法之一,2001年由Breiman首次提出,由多个分类和回归树组成,在构建污染物浓度模型时,最小化误差方面表现出优势<sup>[20,21]</sup>.有研究表明,结合LUR模型和RF模型可以提升污染物浓度变化预测的准确性<sup>[22,23]</sup>,获得高分辨率的污染物空间分布.

本研究基于监测站点分布数据,结合LUR模型与RF模型获得京津冀地区2015~2020年1 km×1 km分辨率的 $O_3$ 浓度水平,评估京津冀地区城市尺度 $O_3$ 浓度的时空分布特征.在此基础上,采用对数线性暴露-反应函数和支付意愿法,细化评估京津冀地区2015~2020年 $O_3$ 暴露浓度变化对人群的健康影响以及相应的健康损失经济价值,以期为京津冀地区制定 $O_3$ 污染防治措施和相关政策提供科学依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 数据来源及处理

#### 1.1.1 $O_3$ 浓度时空分布特征

$O_3$ -8 h滑动平均浓度的监测数据(数据来源:中国环境监测总站的全国城市空气质量实时发布平台, <https://air.cnemc.cn:18007/>)分布在京津冀地区(北京市、天津市、保定市、沧州市、承德市、邯郸市、衡水市、廊坊市、秦皇岛市、石家庄市、唐

山市、邢台市和张家口市),根据《环境空气质量评价技术规范(试行)》(HJ 663-2013)中的规定对数据进行清洗,剔除2015年1月1日至2020年12月31日间数据无效的站点,提取一个自然日内08:00~24:00的所有 $O_3$  8 h滑动平均浓度中的最大值,计算 $O_3$ 日最大8 h平均值第90百分位数作为 $O_3$ 年评价项目<sup>[24]</sup>.

道路网数据(数据来源:OpenStreetMap, <https://www.openhistoricalmap.org/>)和土地利用数据(数据来源:中国科学院资源环境科学与数据中心, <https://www.resdc.cn/>)分别根据道路类型和土地资源及其利用属性重分类,构建不同缓冲半径的缓冲区并获取缓冲区内的各种道路总长度和土地利用类型面积.气溶胶光学厚度(aerosol optical depth, AOD)数据(数据来源:美国航天航空局, <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/#atmosphere>)和气象数据,包括风速、降水、气压、温度(数据来源:美国国家海洋和大气管理局, <https://www.ncei.noaa.gov/maps/daily/>),剔除异常值后计算年均值.同时纳入了高程数据(数据来源:地理空间数据云, <https://www.gscloud.cn/>).

#### 1.1.2 人群健康效应评估

2015~2020年京津冀地区13个市的全因死亡率、心血管系统疾病以及呼吸系统疾病死亡率均从各省市的统计年鉴中获得.河北地区心血管系统疾病和呼吸系统疾病的死亡率缺失,由中国死因监测数据集中的东部地区的死亡率转换获得.其中心血管系统疾病死亡率以心脏病死亡率估计.同时纳入了2015~2020年京津冀地区13个市1 km×1 km分辨率的人口数据(数据来源:Worldpop, <https://hub.worldpop.org/>).

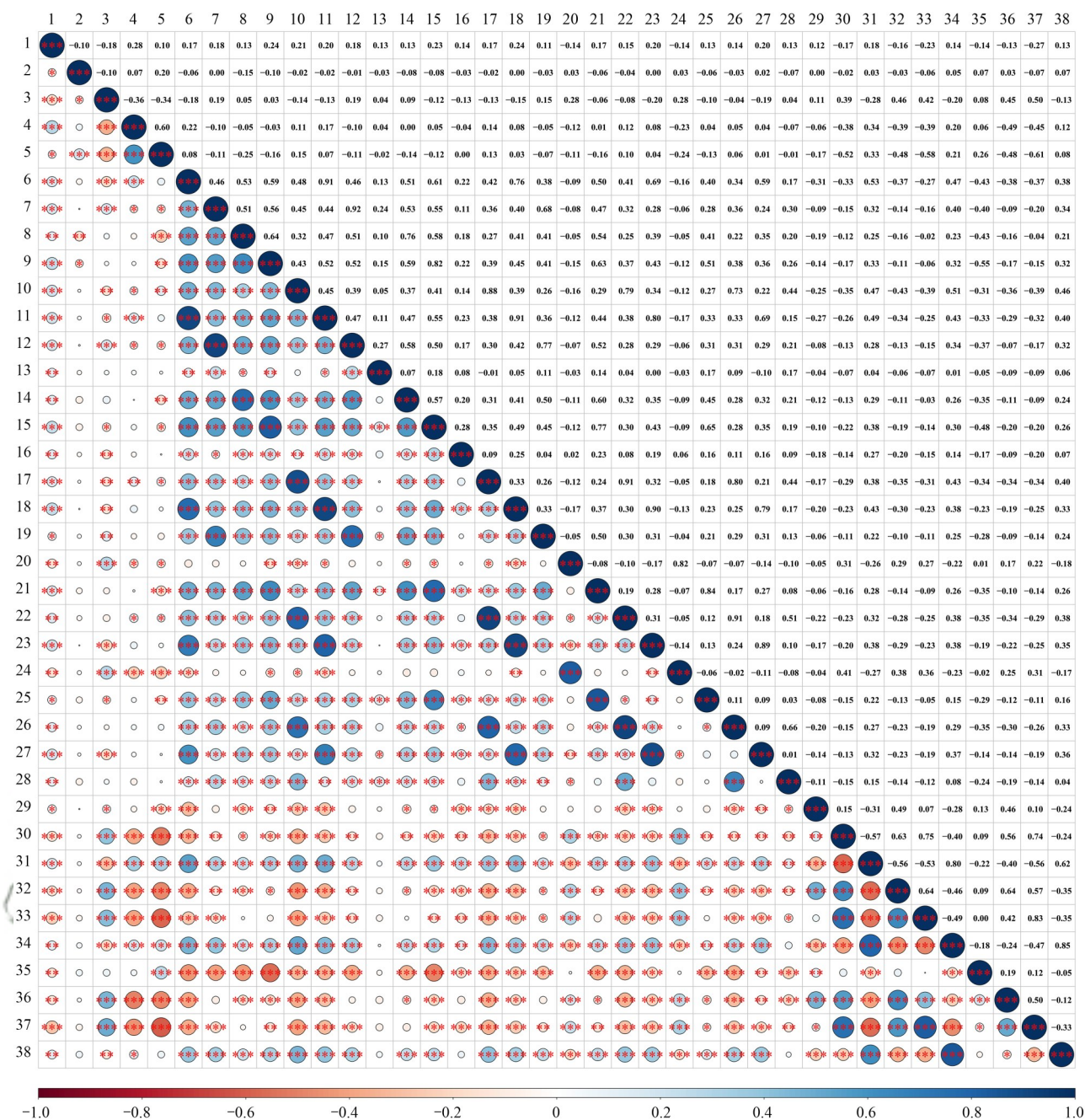
#### 1.1.3 健康损失经济价值评估

2015~2020年京津冀地区13个市的人均地区生产总值(gross domestic product, GDP)以及消费者价格指数(consumer price index, CPI)数据均来自统计年鉴.统计年鉴中未直接提供人均GDP数据的城市,通过当地GDP数据除以人口数据计算获得.

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 $O_3$ 浓度时空分布特征

本研究将LUR模型和RF模型结合构建预测模型,估计2015~2020年京津冀地区1 km×1 km的 $O_3$ 浓度.首先通过Pearson相关分析探索各变量间的相关性,选取与 $O_3$ 浓度相关( $P < 0.05$ )的变量(图1).为避免共线性影响,在每一类自变量中选取相关系数最大、方差膨胀因子小于3的变量<sup>[25]</sup>.将变量纳入多元线性回归方程,采用逐步回归法筛选变量,构建LUR模型,最终选取的4个变量,包括:AOD、

图1 O<sub>3</sub>浓度与自变量的相关性Fig. 1 Correlation between the O<sub>3</sub> concentrations and independent variables

气温、三级道路(缓冲区 = 1 000 m)和林地(缓冲区 = 3 000 m). RF模型用IncMSE(%)作为评价变量重要性的指标,选取前10位重要变量<sup>[23]</sup>,包括:AOD、降水、气压、气温、风速、高程、三级道路(缓冲区 = 1 000 m)、人行道路(缓冲区 = 1 000 m)、

城市支路(缓冲区 = 300 m)和草地(缓冲区 = 5 000 m).

结合LUR模型和RF模型挑选出11个重要的变量,利用RF方法构建O<sub>3</sub>浓度模拟模型.采用10倍交叉验证评估模型性能,将2015~2020年的数据集随

机拆分成 10 个互斥子集, 其中 9 个为训练集, 1 个为验证集. 该过程重复 10 次, 将获得的 10 次模拟值取平均, 即为  $O_3$  浓度. 将 10 倍交叉验证获得的预测值和观察值构建简单线性回归模型, 获得决定系数  $R^2$ , 并结合均方根差 (root mean square error, RMSE) 对模型进行评价<sup>[26]</sup>.

### 1.2.2 人群健康效应评估

选取全因死亡、心血管系统疾病死亡、呼吸系统疾病死亡作为健康终点, 利用对数线性暴露-反应关系函数评估污染物造成的健康影响, 该方法是目前国内广泛应用的暴露-反应模型之一, 使用该方法有利于和国内相关研究结果进行比较<sup>[27,28]</sup>.

$$HI_i = E_{0i} [1 - \exp(-\beta \Delta c)] Pop \quad (1)$$

式中,  $HI_i$  为健康终点  $i$  的健康效应变化量;  $E_{0i}$  为特定时期和地点健康终点  $i$  的基线死亡率;  $\beta$  为暴露-反应关系系数, 具体取值见表 1<sup>[29]</sup>;  $\Delta c$  为  $O_3$  暴露浓度与标准值之差, 本文选取《环境空气质量标准》(GB 3095-2012) 中规定  $O_3$  日最大 8 h 平均值的一级浓度限值  $100 \mu g \cdot m^{-3}$  作为标准值;  $Pop$  为暴露人口数.

表 1 健康终点的暴露-反应关系系数 ( $\beta$ )<sup>1)</sup>  
Table 1 Exposure response relationship coefficient of different health endpoints

| 健康终点      | $\beta/\%(95\%CI)$ |
|-----------|--------------------|
| 全因死亡      | 0.41 (0.35, 0.48)  |
| 心血管系统疾病死亡 | 0.60 (0.51, 0.68)  |
| 呼吸系统疾病死亡  | 0.45 (0.28, 0.62)  |

1)  $\beta$  为暴露反应关系系数, 表示  $O_3$  浓度每增加  $10 \mu g \cdot m^{-3}$ , 人群不同健康效应死亡风险增加百分数

### 1.2.3 健康损失经济价值评估

采用支付意愿法对死亡终点产生的健康损失经济价值评估. 统计意义上的生命价值 (value of a statistical life, VSL) 是衡量个人死亡风险降低的总货币价值, 被广泛用于环境健康的经济评估中<sup>[30,31]</sup>. 参考已有研究结果, 以 2010 年北京市的 VSL 值 (168 万元) 为基础, 利用效益转换法估算其它年份和地区的 VSL 值<sup>[32]</sup>.

$$VSL_{iy} = VSL_{b, 2010} \times \left( \frac{Y_{i, 2010}}{Y_{b, 2010}} \right)^\delta \times (1 + \% \Delta P_{iy} + \% \Delta Y_{iy})^\delta \quad (2)$$

式中,  $VSL_{iy}$  为  $i$  地区  $y$  年份的 VSL 估算值;  $VSL_{b, 2010}$  为北京 2010 年的 VSL 值;  $Y_{i, 2010}$  为  $i$  地区 2010 年的人均 GDP;  $Y_{b, 2010}$  为北京市地区 2010 年的人均 GDP;  $\delta$  为弹性系数, 取 0.8<sup>[33]</sup>;  $\% \Delta P_{iy}$  和  $\% \Delta Y_{iy}$  分别为  $i$  地区 2010 年至  $y$  年份期间 CPI 和人均 GDP 的增长率.

## 2 结果与讨论

### 2.1 $O_3$ 浓度时空分布特征

基于 AOD、道路网、高程、气象数据及土地利用数据构建的 LUR-RF 模型, 共纳入 11 个变量包括: 温度、气压、AOD、风速、高程、草地面积 (缓冲区 = 5 000 m)、降水、三级公路 (缓冲区 = 1 000 m)、人行道路 (缓冲区 = 1 000 m)、城市支路 (缓冲区 = 300 m) 和林地面积 (缓冲区 = 3 000 m). 模型的拟合效果评价良好, 其中  $R^2$  为 0.92, RMSE 为  $7.05 \mu g \cdot m^{-3}$ , 预测值与观测值之间的误差较小 (图 2).

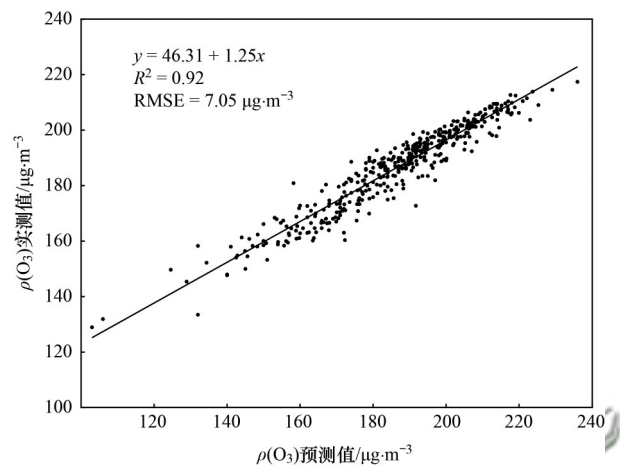


图 2 模型性能评价散点图  
Fig. 2 Scatter plots of the model estimation performance

基于该模型模拟 2015 ~ 2020 年京津冀地区  $O_3$  浓度, 结果显示 2015 ~ 2020 年京津冀地区  $p(O_3)$  年均值分别为: 177.82、177.94、186.51、184.05、188.74 和  $184.47 \mu g \cdot m^{-3}$ , 整体呈现波动性上升趋势 (图 3), 这与文献<sup>[34]</sup>报道的结果一致. 2020 年  $O_3$  浓度相较于 2019 年有所下降, 可能与新冠疫情和气象效应的双重影响有关. 新冠疫情导致社会经济活动放缓, 进一步引发  $O_3$  前体物质, 即挥发性有机化合物 (volatile organic compounds, VOCs) 和氮氧化物 (nitrogen oxide,  $NO_x$ ) 排放减少, 同时形成有益于污染物扩散和沉积的有利气象条件<sup>[34, 35]</sup>. 然而在短期疫情封控时  $O_3$  浓度明显增加<sup>[36, 37]</sup>, 本研究中 2020 年  $O_3$  浓度的有所下降, 提示疫情期间京津冀地区  $O_3$  浓度的变化趋势可能受多种因素影响, 值得引起更多的关注和进一步的探索.

2015 ~ 2020 年京津冀地区的中部地区 (北京市) 和西南地区 (保定市、石家庄市、邢台市、邯郸市) 的  $O_3$  浓度较高而且变化较大; 北部地区 (张家口市、承德市、秦皇岛市)  $O_3$  浓度较低且变化程度较小. 城市水平  $O_3$  浓度的空间分布显示, 2015 ~ 2020 年期间

北京市、保定市的中南部,天津市、石家庄市、邢台市和邯郸市的西部以及沧州市西南部污染严重,其中北京市、石家庄市和邢台市的  $\text{O}_3$  浓度最高. 2015~2020 年  $\text{O}_3$  浓度最低的地区分别集中在承德市、秦皇岛市、张家口市和唐山市. 本研究期间,北京市、唐山市和张家口市的  $\text{O}_3$  浓度呈现波动式下降,以北京市下降幅度最大( $3.10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ),其余城市  $\text{O}_3$  浓度表现为不同程度的波动式上升,其中以邢台市上升程度最大( $18.48 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ).

从近年  $\text{O}_3$  浓度的时空分布来看,北京市、沧州市、衡水市、邢台市、石家庄市和张家口市应作为京津冀地区  $\text{O}_3$  污染防治的重点地区. 近地面  $\text{O}_3$  主要由  $\text{NO}_x$ 、VOCs、CO、 $\text{CH}_4$  和其他前体物质之间的复杂光化学反应产生<sup>[38]</sup>. 已有研究表明城市的  $\text{O}_3$  光化学反应生成通常处于 VOCs 的控制或处于向  $\text{NO}_x$  控制的过渡状态,而农村地区则对  $\text{NO}_x$  较为敏感<sup>[39]</sup>. 在我国,  $\text{NO}_x$  排放源的排放量由高至低依次为工业源、

交通源、电力源和住宅源,而 VOCs 排放源的排放量由高至低依次为工业源、交通源、住宅源和电力源<sup>[40,41]</sup>. 因此,重点地区中城区面积比较大的城市,如衡水市、石家庄市和张家口市,应更多关注于 VOCs 的控制;而重点地区中城区面积比较小的城市如沧州市和邢台市,可能需要重点关注  $\text{NO}_x$  的排放. 研究显示积极控制 VOCs 是实现北京市  $\text{O}_3$  快速下降的有效途径<sup>[42]</sup>. 另外,  $\text{O}_3$  前体物质排放源的减排重点应集中在工业源和交通源.  $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{O}_3$  有共同的前体物质 VOCs 和  $\text{NO}_x$ ,但有研究报道  $\text{PM}_{2.5}$  降低会抑制耗  $\text{O}_3$  自由基的终止反应,从而增加光化学反应发生<sup>[43]</sup>. 我国“十三五期间”  $\text{O}_3$  污染呈现上升态势也可能与这期间的  $\text{PM}_{2.5}$  浓度持续下降相关.《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议》也明确提出“加强细颗粒物和臭氧协同控制”. 本研究结果为降低京津冀地区  $\text{O}_3$  浓度提供重要的参考依据.

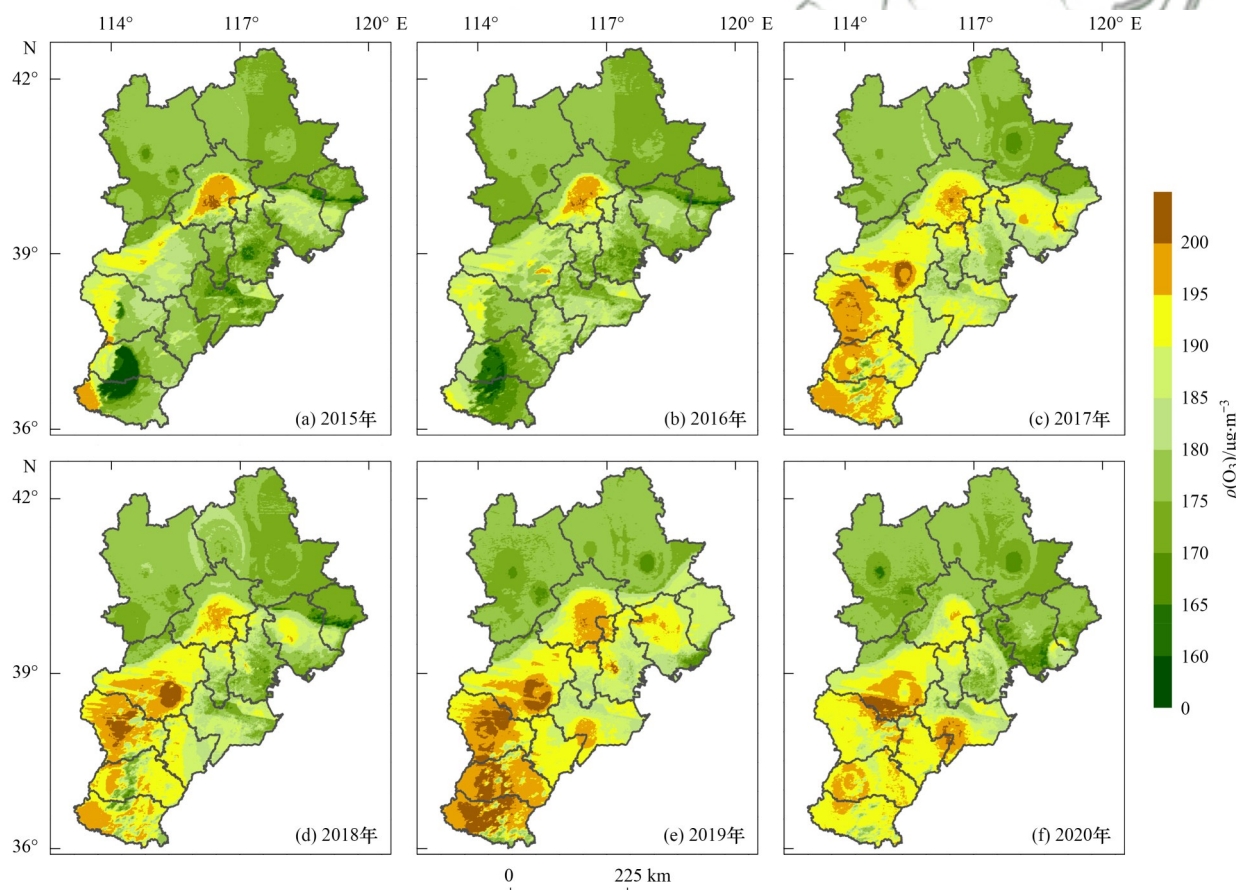


图3 2015~2020年京津冀地区  $\text{O}_3$  浓度的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of  $\text{O}_3$  concentration in the BTH Region from 2015 to 2020

## 2.2 人群健康效应评估

利用京津冀地区  $\text{O}_3$  浓度模拟数据、人口数据以及各个健康终点的基线死亡率结合对数线性暴露-反应关系函数,估算 2015~2020 年归因于  $\text{O}_3$  暴露导致的全因死亡、心血管系统疾病死亡以及呼吸系统疾

病死亡的人数(图4). 2015~2020 年京津冀地区归因  $\text{O}_3$  暴露的全因死亡、心血管系统疾病死亡以及呼吸系统疾病死亡的人数均呈现先增加后减少的趋势,与  $\text{O}_3$  浓度变化趋势相似. 从年变化程度来看,3 种健康终点的死亡人数均以 2020 年下降程度最大. 2020

年全因死亡和心血管系统疾病死亡人数仍高于2015年死亡人数,而呼吸系统疾病死亡人数下降至6年间最低点.另外,2015~2020年间,心血管系统疾病和呼吸系统疾病死亡人数分别占全因死亡人数的40.87%~44.28%和5.93%~8.08%;心血管系统疾病死亡人数是呼吸系统死亡人数的5.06~7.46倍.

尽管研究显示,2015~2020年期间京津冀地区心血管系统疾病的死亡率呈现逐年下降趋势<sup>[44]</sup>,但本研究发现归因于O<sub>3</sub>的死亡人数呈现先增加后减少的趋势,与O<sub>3</sub>浓度变化趋势相似,提示心血管系统疾病死亡人数的变化可能与O<sub>3</sub>暴露浓度有关.此外,影响健康终点基线发生率的因素较多,如降水、湿度、气压、温度、GDP、夜间照明和卫生保健机构等因素<sup>[45,46]</sup>,均会导致估算的死亡人数与实际情况存在时间和空间上的差异.以往对O<sub>3</sub>人群健康效应评估时,多直接利用O<sub>3</sub>监测站点的数据开展研究,弱化健康效应的空间异质性,并且选取的O<sub>3</sub>浓度数据、人口数据以及健康终点死亡率等存在差异,导致相同地区、年份的O<sub>3</sub>人群健康效应评估的结果差异可能较大<sup>[16,47]</sup>.本研究利用高分辨率的O<sub>3</sub>浓度数据、人口数据以及市级死亡率,获得的评估结果更易捕捉空间异质性.

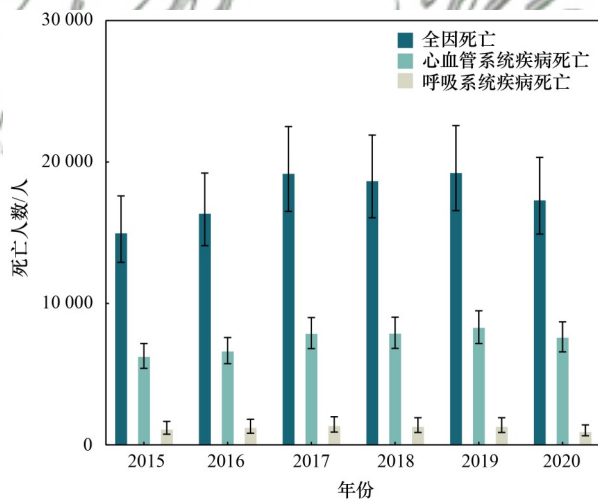


图4 2015~2020年归因于O<sub>3</sub>死亡人数

Fig. 4 Mortality attributed to O<sub>3</sub> from 2015 to 2020

各个健康终点的死亡人数空间分布如图5~7所示.2015~2020年京津冀地区全因死亡、心血管系统疾病死亡和呼吸系统疾病死亡人数空间分布相似,人数较多地区集中于中部地区(北京市)和西南地区(保定市、石家庄市、邢台市、邯郸市),死亡人数最少的地区为北部地区(张家口市、承德市、秦皇岛市).从城市尺度来看,多数城市的死亡人数呈现散在分布,但部分城市的死亡人数在城市内部一些地区也呈现出聚集趋势,例如,全因死亡、心

血管系统疾病死亡和呼吸系统疾病死亡人数较多地区分布在北京中南部、唐山市的西南和石家庄市、邢台市、邯郸市的中东部.另外,全因死亡人数较多的地区还集中在天津市西部和保定市南部,心血管系统疾病和呼吸系统疾病死亡人数则集中在天津南部.2015~2020年期间累计全因死亡、心血管系统疾病死亡人数和呼吸系统疾病死亡人数最多的市均为北京市,累计死亡人数分别达到26 645人(95%置信区间:22 810人,31 093人)、9 610人(95%置信区间:8 203人,10 851人)和2 717人(95%置信区间:1 704人,3 714人);累计人数最少的市均为秦皇岛市,分别为2 449人(95%置信区间:2 095人,2 859人)、1 079人(95%置信区间:920人,1 219人)和152人(95%置信区间:95人,1 704人).死亡人数的空间分布和污染物浓度的空间分布相似,提示:为降低归因于O<sub>3</sub>暴露的死亡人数,获得更多的健康收益,有必要在O<sub>3</sub>污染防治过程中优先针对O<sub>3</sub>浓度高的地区开展防治工作.

人口数量会影响不同区域间各个健康终点的死亡人数估计情况.2015年和2020年人口数量最多的地区是北京市,最少的地区是秦皇岛市,人口数量差异悬殊,成为影响两个城市死亡人数的重要原因之一.因此,计算13个市归因于O<sub>3</sub>死亡人数占各市总人口的百分比更能体现归因于O<sub>3</sub>暴露死亡结局的地区差异性.本研究结果显示,在归因于O<sub>3</sub>暴露的各市全因死亡人数、心血管系统疾病死亡人数和呼吸系统疾病死亡人数占各市总人口的百分比中,北京市和天津市占比在这6a内较高,河北省各市占比相对较低且波动范围相对较小(图8).

在归因于O<sub>3</sub>暴露的各市全因死亡人数占各市总人口的百分比数据中,2015~2020年仅廊坊市占比呈现波动式下降,其余12市均为波动性上升,上升最多的地区为天津市.另外2020年全因死亡人数占比最大和最小的城市分别为北京市和廊坊市;在归因于O<sub>3</sub>暴露各市心血管系统疾病死亡人数占各市总人口的百分比中,2015~2020年仅北京市占比呈现波动式下降,其余12市均为波动性上升,上升最多的地区为邢台市.另外2020年心血管系统疾病死亡人数占比最大和最小的城市分别为衡水市和北京市;在归因于O<sub>3</sub>暴露的各市呼吸系统疾病死亡人数占各市总人口的百分比数据中,2015~2020年仅沧州市、邯郸市、衡水市和邢台市占比呈现波动式上升,其余9市均为波动性下降,下降最多的地区为天津市.另外2020年呼吸系统疾病死亡人数占比最大和最小的城市分别为北京市和秦皇岛市.

综上所述,北京市、天津市、衡水市和邢台市

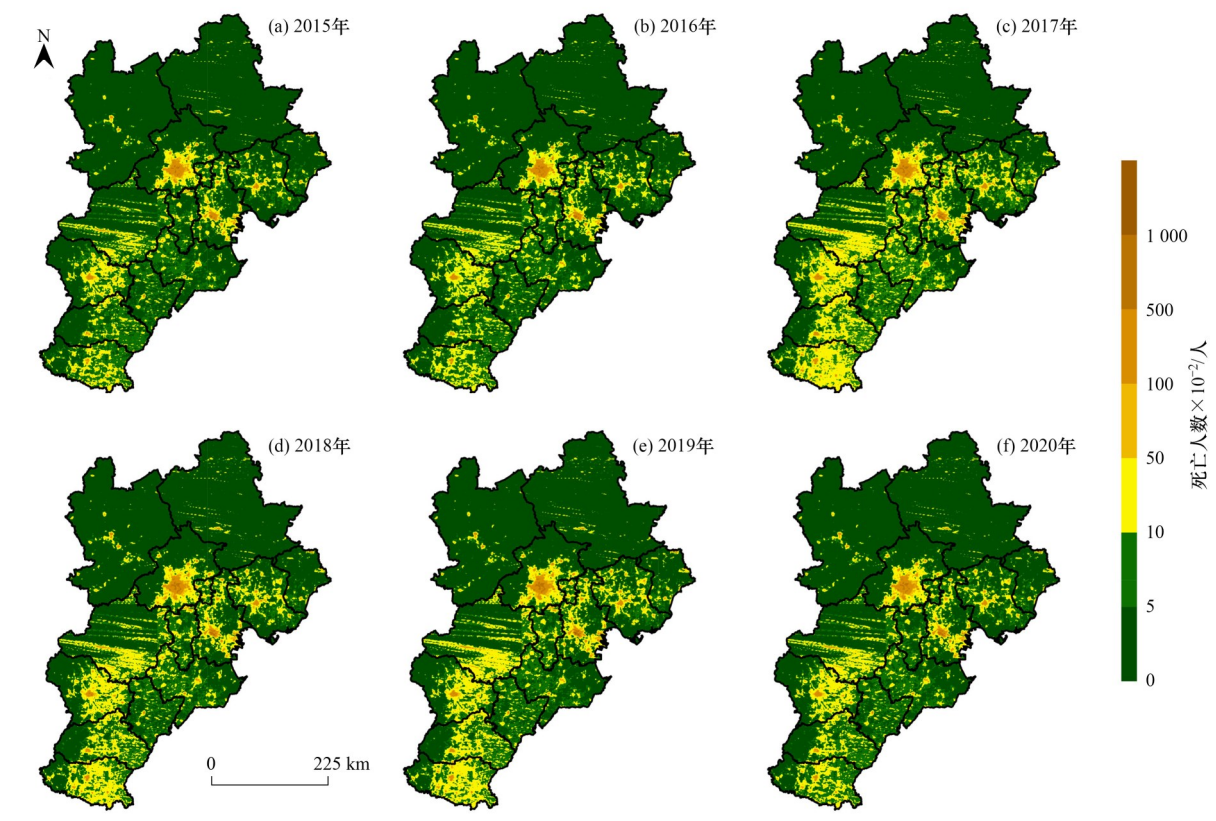


图5 归因于 $O_3$ 全因死亡的空间分布  
Fig. 5 Spatial distribution of all-cause mortality attributed to  $O_3$

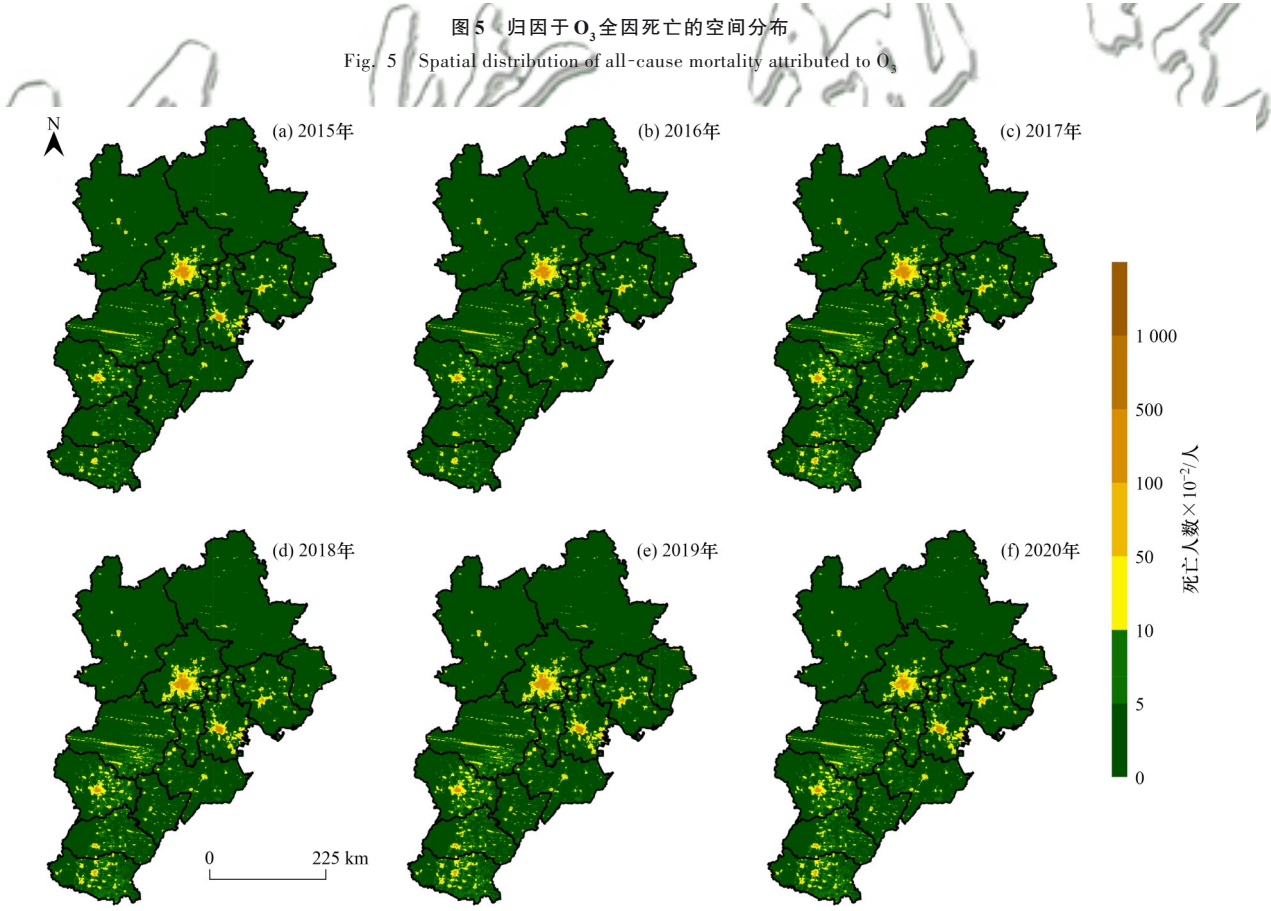


图6 归因于 $O_3$ 心血管系统疾病死亡的空间分布  
Fig. 6 Spatial distribution of cardiovascular mortality attributed to  $O_3$

应重点关注归因于 $O_3$ 暴露的全因死亡、心血管系统疾病死亡和呼吸系统疾病死亡人数。河北省内各市的全因死亡、心血管系统疾病死亡和呼吸系统疾病死亡人数占各市总人口的百分比均低于北京市和天

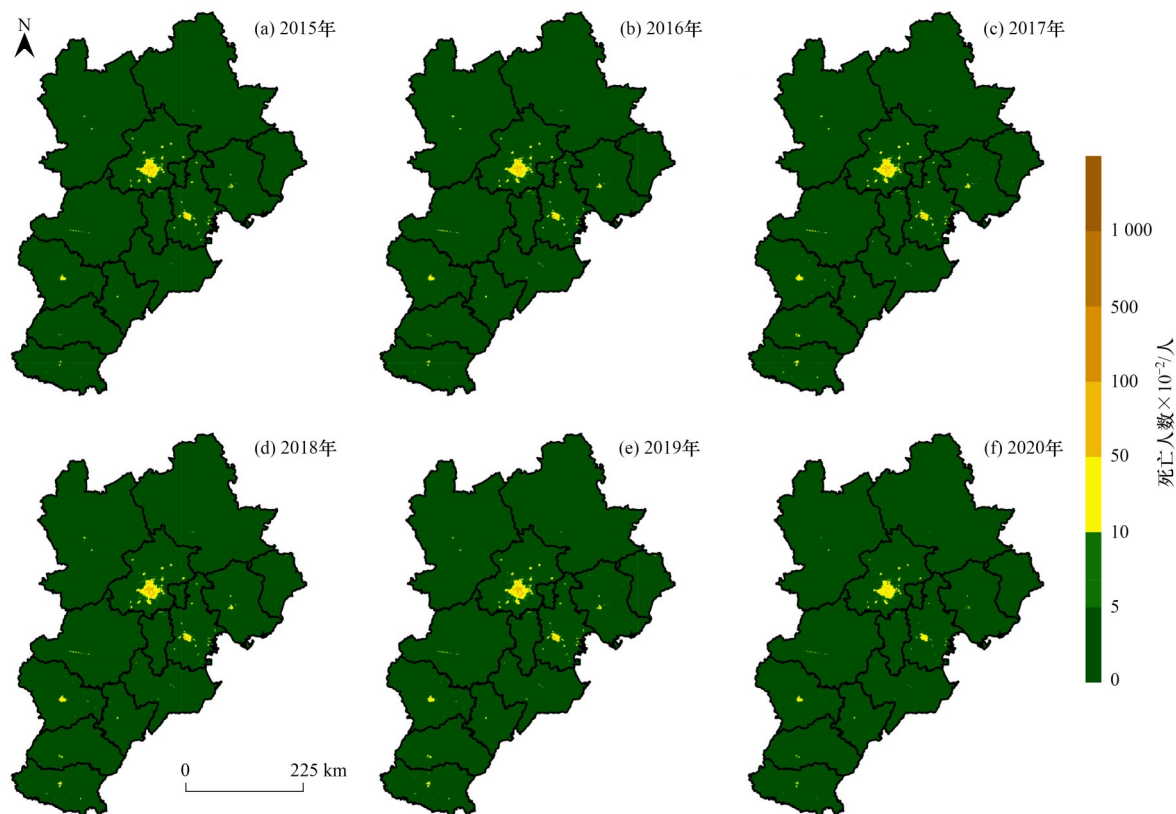


图7 归因于 $O_3$ 呼吸系统疾病死亡的空间分布  
Fig. 7 Spatial distribution of respiratory mortality attributed to  $O_3$

津市, 省内各市的全因、心血管系统疾病和呼吸系统疾病死亡人数占各市总人口的百分比最高的城市均为衡水市.《中国防治慢性病中长期规划(2017—2025年)》中提出, 到2020年降低慢性病导致的过早死亡, 心脑血管疾病和慢性呼吸系统疾病早死率降低至2015年的10%. 京津冀地区归因于 $O_3$ 的全因死亡和心血管系统疾病死亡人数占比上升, 呼吸系统疾病死亡人数占比下降程度较小(0.002‰), 与《中国防治慢性病中长期规划(2017—2025年)》的要求的差距较大. 根据全球疾病负担(global burden of disease, GBD)公布的数据显示, 中国地区归因于环境 $O_3$ 的慢性阻塞性肺疾病死亡率从2015年的6.84/10万人下降至2019年的6.56/10万人, 提示改善 $O_3$ 浓度可以降低呼吸系统疾病死亡人数. 因此, 京津冀地区未来仍需大力加强 $O_3$ 污染防治、强化慢性病早期筛查与发现、提高疾病的治疗效果、倡导健康文明的生活方式.

### 2.3 健康损失经济价值评估

利用人均GDP、CPI和VSL, 结合效益转换以及支付意愿法, 估算京津冀地区归因于 $O_3$ 暴露的全因死亡、心血管系统疾病死亡以及呼吸系统疾病死亡的健康损失经济价值, 结果如图9所示. 2015~2019年京津冀地区全因死亡、心血管系统疾病死亡以及呼吸系统疾病死亡的健康损失经济价值呈现增

加趋势, 2020年存在不同程度的下降, 这与 $O_3$ 浓度和归因于 $O_3$ 的死亡人数变化趋势相似. 2015~2020年间, 心血管系统疾病死亡的健康损失经济价值是呼吸系统疾病死亡健康损失经济价值的4.61~6.22倍, 心血管系统疾病死亡和呼吸系统疾病死亡的健康损失经济价值占全因死亡的健康损失经济价值的比例分别为39.14%~41.64%和6.30%~8.82%, 占比情况与健康效应评估时的死亡人数占比情况类似. 健康损失经济价值的影响因素较多, 与健康终点的死亡人数及其单位价值(即减少一例健康终点发生的平均估计经济价值<sup>[48]</sup>)相关.

京津冀地区各个城市的历年健康损失经济价值情况如图10(a)、10(c)和10(e)所示. 2015~2020年全因死亡和心血管系统疾病死亡产生的健康损失经济价值在13个城市均增加; 呼吸系统疾病死亡的健康损失经济价值在部分地区显示降低的趋势, 包括天津市、承德市、唐山市和张家口市, 其余9个市的健康损失经济价值呈上升趋势. 与2019年相比, 2020年全因死亡导致的健康损失经济价值增加的城市包括沧州市、承德市、衡水市、石家庄市和张家口市, 其中增加最多的地区为沧州市; 心血管系统疾病死亡健康损失经济价值增加的城市包括保定市、沧州市、承德市、邯郸市、衡水市、邢台市和张家口市, 其中增加最多的地区为保定市. 呼吸系

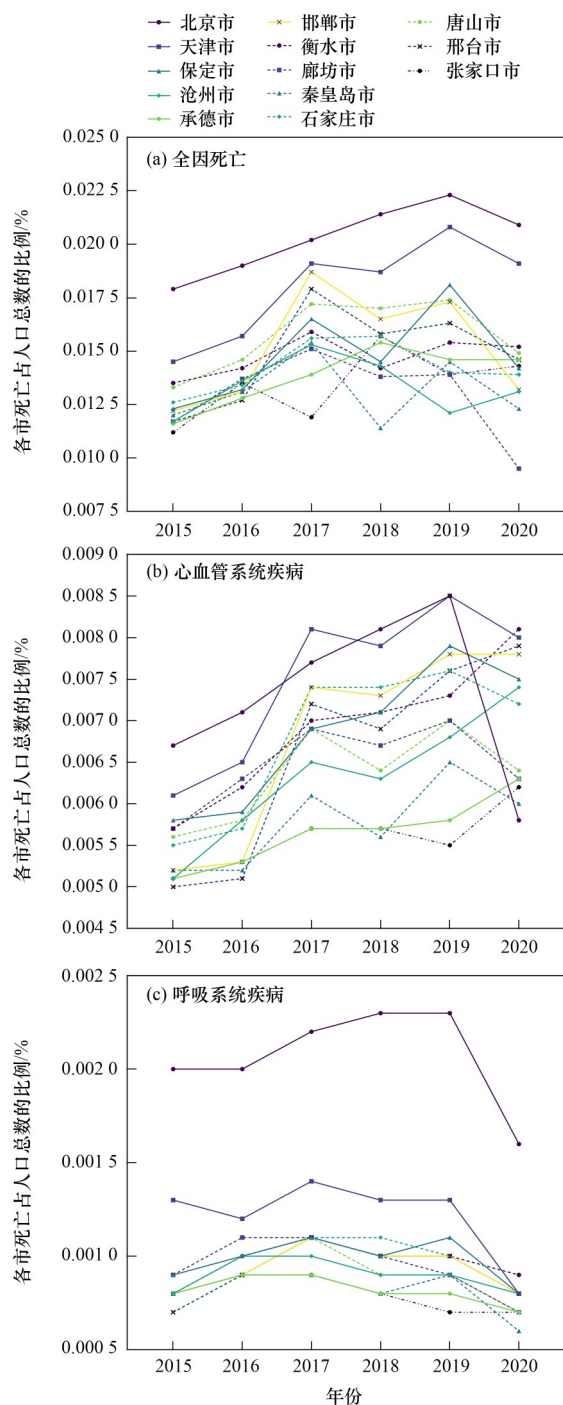
图8 各市归因于 $O_3$ 死亡人数占人口总数的比例

Fig. 8 Proportion of mortality attributed to  $O_3$  to the total population across different cities

统疾病死亡健康损失经济价值在 13 个城市均下降, 其中下降程度最大的地区为北京市. 在 2020 年全因死亡、心血管系统疾病死亡和呼吸系统疾病死亡的健康损失经济价值最大的地区均为北京市. 城市化水平与健康风险和经济损失之间存在很强的相关性, 生活在高度城市化的人可能面临更严重的健康和经济损失<sup>[49,50]</sup>, 这也可能是北京市产生的健康损失经济价值较多的原因之一.

将各个城市不同健康终点的健康损失经济价值

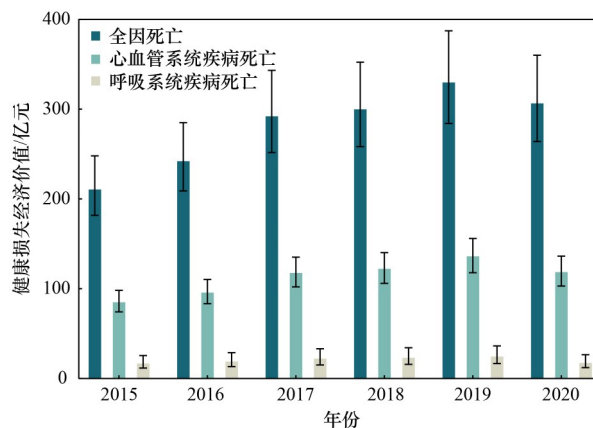
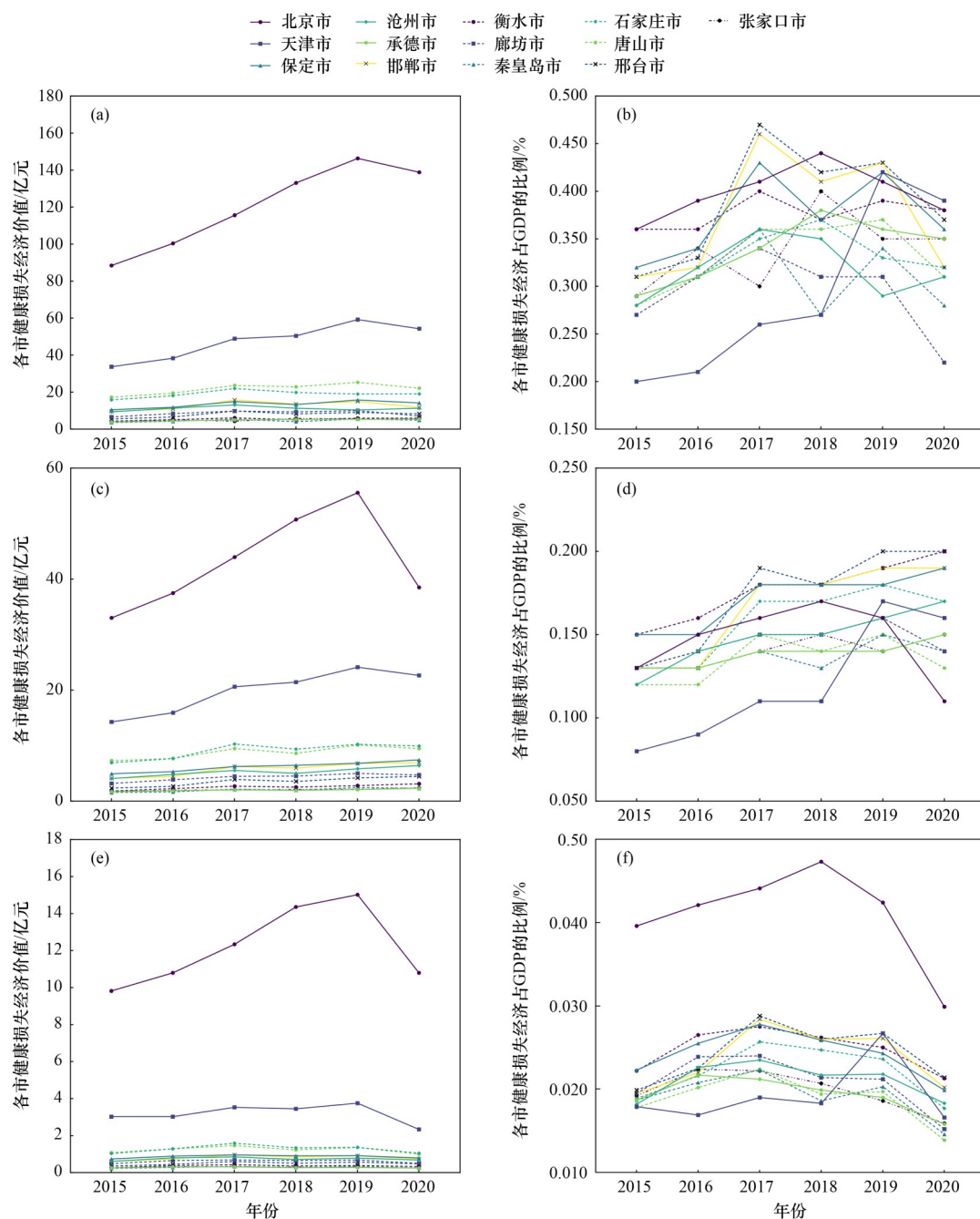
图9 2015~2020 年归因于 $O_3$ 健康损失经济价值

Fig. 9 Health economic losses attributed to  $O_3$  from 2015 to 2020

与当年 GDP 进行比较, 结果见图 10(b)、10(d)和 10(f). 本研究显示, 虽然北京市在 2015~2020 年间产生的健康损失经济价值最多, 但是占 GDP 比例最高的城市包括天津市、保定市、邯郸市、衡水市和邢台市. 与 2015 年相比, 2020 年全因死亡、心血管系统疾病和呼吸系统疾病死亡的健康损失经济价值的 GDP 占比增加的城市数量分别为 11、12 和 3 个, 其中增加最多的城市分别为天津市、天津市和邢台市. 2020 年全因死亡、心血管系统疾病死亡和呼吸系统疾病死亡的健康损失经济价值的 GDP 占比最大的城市分别为天津市、邢台市和北京市, 最小的城市为廊坊市、北京市和唐山市; 需要注意的是天津市在 2019 年后健康损失经济价值占比突然增加, 主要是由于该市健康损失经济价值上升和 GDP 的突然下降, 可能是受到经济和产业结构变化、疫情影响以及流动人口减少等因素的影响. GDP 占比一定程度上反映了医疗卫生负担, 占比越高的地区相对医疗负担越重, 2015~2020 年天津市占比增加相对较大, 2020 年天津市、邢台市和北京市的占比最大, 因此这些地区更急需采取污染防治措施, 改善  $O_3$  浓度, 降低健康损失的经济价值. 若  $O_3$  浓度在 2020 年达到标准值, 京津冀地区则可获得全因死亡健康经济效益达 308.51 亿元, 是 2020 年该地区污染防治资金的 5.01 倍.

## 2.4 不确定性分析

本文主要分析 2015~2020 年京津冀地区  $O_3$  浓度时空分布特征, 据此估算了归因于  $O_3$  暴露产生的全因死亡、心血管系统疾病死亡和呼吸系统疾病死亡人数以及相应的健康损失经济价值. 研究过程中, 存在一些不确定性因素可能对研究结果带来一些影响, 例如, 采用 LUR 和 RF 算法结合的方式, 利用监测站点的数据对京津冀地区  $1\text{ km} \times 1\text{ km}$  的  $O_3$  暴露浓度进行模拟, 但由于监测站点数量有限, 分布不



(a)和(b)全因死亡,(c)和(d)心血管系统疾病,(e)和(f)呼吸系统疾病

图 10 各市归因于  $O_3$  的健康损失经济价值及其 GDP 占比

Fig. 10 Health economic losses and the proportion of GDP attributed to  $O_3$  across different cities

均、数据缺失等因素限制,可能导致  $O_3$  暴露水平与实际情况存在差异.另外,纳入的自变量和空气污染物浓度之间可能存在复杂的非线性关系,模型不能完全捕捉到这种关系.

人群健康效应评估过程中,由于目前缺乏  $O_3$  与健康终点间长期效应的研究结果,虽然本研究采用了与其他研究一致的处理方式<sup>[24]</sup>,即:暴露反应-关系系数选取短期效应值,评估健康效应以年为单位,但  $O_3$  长期暴露和短期暴露与健康终点间的关系可能存在差异.此外,健康经济价值损失评估过程

中,采用了效益转换方法计算获取所需的 VSL,所获得的 VSL 与实际值可能存在差异,因为效益转换方法与人均 GDP、CPI 等经济指标以及所选取的参考 VSL 相关,选取不同的参数值都会导致转换所得 VSL 存在差异.

### 3 结论

(1)  $O_3$  是目前京津冀地区大气环境的重要污染物,2015~2020 年期间京津冀地区  $O_3$  浓度变化呈现波动性上升趋势,  $O_3$  浓度较高的地区以及变化较大

的地区集中于中部地区(北京市)和西南地区(保定市、石家庄市、邢台市、邯郸市),而北部地区(张家口市、承德市、秦皇岛市)O<sub>3</sub>浓度较低且变化程度较小。2020 年各地区 O<sub>3</sub> 浓度有所改善,但保定市南部和沧州市西南部的污染仍严重。北京市、沧州市、衡水市、邢台市、石家庄市和张家口市是京津冀地区 O<sub>3</sub> 污染超标的重点地区,应加强 O<sub>3</sub> 污染防治。

(2)2015~2020 年京津冀地区归因于 O<sub>3</sub> 的全因死亡、心血管系统疾病死亡以及呼吸系统疾病的死亡人数呈现先增加后减少趋势,与 O<sub>3</sub> 浓度变化趋势相似。全因死亡、心血管系统疾病死亡和呼吸系统疾病死亡人数的空间分布相似,死亡人数较多地区集中于中部地区和西南地区,北部地区数最少。河北省内各市全因死亡、心血管系统疾病死亡和呼吸系统疾病死亡人数占各市总人口的百分比低于北京市和天津市。从相关死亡人数分析来看,京津冀地区 O<sub>3</sub> 污染防治的重点地区为北京市、天津市、衡水市和邢台市。

(3)2015~2020 年京津冀地区归因于 O<sub>3</sub> 的全因死亡、心血管系统疾病死亡以及呼吸系统疾病的健康损失经济价值,显示先增加后减少的趋势,这与 O<sub>3</sub> 浓度和健康效应的变化趋势相似。2015~2020 年,13 个市的全因死亡和心血管系统疾病死亡健康损失经济价值均增加,9 个市的呼吸系统疾病死亡健康损失经济价值均上升。另外,2015~2020 期间各市健康损失经济价值占各市 GDP 百分比最高的地区集中在北京市、天津市、保定市、邯郸市、衡水市和邢台市。与 2015 年相比,2020 年全因死亡、心血管系统疾病死亡的健康损失经济价值占 GDP 的百分比增加最多的城市为天津市。综合考虑,应将北京市、天津市、保定市、沧州市和邢台市作为京津冀地区 O<sub>3</sub> 污染防治的重点关注地区。

(4)对京津冀地区 O<sub>3</sub> 浓度时空分布、归因于 O<sub>3</sub> 暴露的健康效应和健康损失经济价值的研究结果提示,京津冀地区 O<sub>3</sub> 污染防治重点关注地区不尽相同,建议在确定 O<sub>3</sub> 污染防治重点地区时要综合考虑 O<sub>3</sub> 浓度高的地区、健康效应和健康损失经济价值研究提示的重点地区;在制订 O<sub>3</sub> 污染防治措施时,应根据重点地区类型特点采取差异化措施。北京市是京津冀地区唯一同时作为 O<sub>3</sub> 浓度、健康效应和健康损失经济价值重点关注的城市,在 O<sub>3</sub> 污染防治时,不仅要采取措施降低 O<sub>3</sub> 浓度,也要考虑采取一些措施减少 O<sub>3</sub> 暴露引起的健康效应和健康经济损失。

#### 参考文献:

- [1] Li D W, Ji A L, Lin Z J, *et al.* Short-term ambient air pollution exposure and adult primary insomnia outpatient visits in Chongqing, China: a time-series analysis [J]. *Environmental Research*, 2022, **212**, doi: 10.1016/j.envres.2022.113188.
- [2] Brumberg H L, Karr C J. Ambient air pollution: health hazards to children[J]. *Pediatrics*, 2021, **147**(6), doi: 10.1542/peds.2021-051484.
- [3] Murray C J L, Aravkin A Y, Zheng P, *et al.* Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories, 1990-2019: a systematic analysis for the global burden of disease study 2019[J]. *The Lancet*, 2020, **396**(10258): 1223-1249.
- [4] Yin P, Brauer M, Cohen A J, *et al.* The effect of air pollution on deaths, disease burden, and life expectancy across China and its provinces, 1990-2017: an analysis for the global burden of disease study 2017[J]. *The Lancet Planetary Health*, 2020, **4**(9): e386-e398.
- [5] Liu H M, Cui W J, Zhang M. Exploring the causal relationship between urbanization and air pollution: evidence from China[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022, **80**, doi: 10.1016/j.scs.2022.103783.
- [6] Shen F Z, Zhang L, Jiang L, *et al.* Temporal variations of six ambient criteria air pollutants from 2015 to 2018, their spatial distributions, health risks and relationships with socioeconomic factors during 2018 in China[J]. *Environment International*, 2020, **137**, doi: 10.1016/j.envint.2020.105556.
- [7] Zhou W, Chen C, Lei L, *et al.* Temporal variations and spatial distributions of gaseous and particulate air pollutants and their health risks during 2015-2019 in China [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **272**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.116031.
- [8] 北京市环境保护局. 2022 年北京市生态环境状况公报[EB/OL]. <http://sthjj.beijing.gov.cn/bjhrb/index/cxgk69/sthjlyzwg/1718880/1718881/1718882/326119689/index.html>, 2023-05-29.
- [9] 天津市环境保护局. 2022 年天津市生态环境状况公报[EB/OL]. [https://sthj.tj.gov.cn/YWGZ7406/HJZL9827/HJZKGB866/TJSLNHJZKGB6653/202306/t20230605\\_6267586.html](https://sthj.tj.gov.cn/YWGZ7406/HJZL9827/HJZKGB866/TJSLNHJZKGB6653/202306/t20230605_6267586.html), 2023-06-05.
- [10] 河北省环境保护厅. 2022 年河北省生态环境状况公报[EB/OL]. <http://hbepb.hebei.gov.cn/res/hbhjt/upload/file/20230602/bd9d635a2555484786a9891052dbfa49.pdf>, 2023-06-02.
- [11] Guo B, Wu H J, Pei L, *et al.* Study on the spatiotemporal dynamic of ground-level ozone concentrations on multiple scales across China during the blue sky protection campaign [J]. *Environment International*, 2022, **170**, doi: 10.1016/j.envint.2022.107606.
- [12] 韦小丽. 基于多源数据协同融合的高分辨率 AOD 反演与 PM<sub>2.5</sub> 浓度估算研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2021.
- [13] Wei X L. Leveraging multi-sensor data fusion to generate high resolution AOD and PM<sub>2.5</sub> concentration maps[D]. Shanghai: East China Normal University, 2021.
- [14] Chen Y Q, Jiao Z G, Chen P, *et al.* Short-term effect of fine particulate matter and ozone on non-accidental mortality and respiratory mortality in Lishui district, China [J]. *BMC Public Health*, 2021, **21**(1), doi: 10.1186/s12889-021-11713-9.
- [15] Li Z W, Liu M Y, Wu Z Y, *et al.* Association between ambient air pollution and hospital admissions, length of hospital stay and hospital cost for patients with cardiovascular diseases and comorbid diabetes mellitus: Base on 1, 969, 755 cases in Beijing, China, 2014-2019 [J]. *Environment International*, 2022, **165**, doi: 10.1016/j.envint.2022.107301.
- [16] Sui X M, Zhang J Q, Zhang Q, *et al.* The short-term effect of PM<sub>2.5</sub>/O<sub>3</sub> on daily mortality from 2013 to 2018 in Hefei, China [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2021, **43**(1): 153-169.
- [17] Zhang X X, Cheng C X, Zhao H. A health impact and economic loss assessment of O<sub>3</sub> and PM<sub>2.5</sub> exposure in China from 2015 to 2020[J]. *GeoHealth*, 2022, **6**(3), doi: 10.1029/2021GH000531.
- [18] Texcalac-Sangrador J L, Hurtado-Díaz M, Félix-Arellano E E, *et al.* Health and economic impacts assessment of O<sub>3</sub> exposure in Mexico [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, **18**(21), doi: 10.3390/ijerph182111646.
- [19] Wu J S, Wang Y, Liang J T, *et al.* Exploring common factors influencing PM<sub>2.5</sub> and O<sub>3</sub> concentrations in the Pearl River Delta: tradeoffs and synergies [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **285**,

- doi: 10.1016/j.envpol.2021.117138.
- [19] Chen X Y, Zhao X, Jones M B, *et al.* The relationship between hair metabolites, air pollution exposure and gestational diabetes mellitus: a longitudinal study from pre-conception to third trimester [J]. *Frontiers in Endocrinology*, 2022, **13**, doi: 10.3389/fendo.2022.1060309.
- [20] Ma R M, Ban J, Wang Q, *et al.* Random forest model based fine scale spatiotemporal O<sub>3</sub> trends in the Beijing-Tianjin-Hebei region in China, 2010 to 2017 [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **276**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.116635.
- [21] Breiman L. Random forests [J]. *Machine Learning*, 2001, **45**(1): 5-32.
- [22] Wong P Y, Lee H Y, Chen Y C, *et al.* Using a land use regression model with machine learning to estimate ground level PM<sub>2.5</sub> [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **277**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.116846.
- [23] Li Y, Hong T, Gu Y F, *et al.* Assessing the spatiotemporal characteristics, factor importance, and health impacts of air pollution in Seoul by integrating machine learning into land-use regression modeling at high spatiotemporal resolutions [J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, **57**(3): 1225-1236.
- [24] 程育恺, 戴海夏, 张蕴晖, 等. 长三角地区 2017~2020 年臭氧浓度时空分布与人群健康效益评估 [J]. *环境科学*, 2023, **44**(2): 719-729.
- Cheng Y K, Dai H X, Zhang Y H, *et al.* Spatial and temporal distribution characteristics of ozone concentration and population health benefit assessment in the Yangtze River Delta region from 2017 to 2020 [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(2): 719-729.
- [25] Han L, Zhao J Y, Gao Y J, *et al.* Spatial distribution characteristics of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in Xi'an City predicted by land use regression models [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2020, **61**, doi: 10.1016/j.scs.2020.102329.
- [26] Liang F C, Xiao Q Y, Huang K Y, *et al.* The 17-y spatiotemporal trend of PM<sub>2.5</sub> and its mortality burden in China [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, **117**(41): 25601-25608.
- [27] Zhao N, Elshareef H, Li B W, *et al.* The efforts of China to combat air pollution during the period of 2015-2018: a case study assessing the environmental, health and economic benefits in the Beijing-Tianjin-Hebei and surrounding "2+26" regions [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **853**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.158437.
- [28] Guan Y, Xiao Y, Chu C J, *et al.* Trends and characteristics of ozone and nitrogen dioxide related health impacts in Chinese cities [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, **241**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2022.113808.
- [29] Zhang X X, Yan B, Zhou Y Y, *et al.* Short-term health impacts related to ozone in China before and after implementation of policy measures: a systematic review and meta-analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **847**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.157588.
- [30] Gao A F, Wang J Y, Poetzsch J, *et al.* Coordinated health effects attributable to particulate matter and other pollutants exposures in the North China Plain [J]. *Environmental Research*, 2022, **208**, doi: 10.1016/j.envres.2021.112671.
- [31] Nie D Y, Shen F Z, Wang J F, *et al.* Changes of air quality and its associated health and economic burden in 31 provincial capital cities in China during COVID-19 pandemic [J]. *Atmospheric Research*, 2021, **249**, doi: 10.1016/j.atmosres.2020.105328.
- [32] 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.
- Xie X X. Value of health: environmental benefit evaluation method and urban air pollution control strategy [D]. Beijing: Peking University, 2011.
- [33] Organization for Economic Co-operation and Development. The economic consequences of outdoor air pollution [EB/OL]. [https://read.oecd-ilibrary.org/environment/the-economic-consequences-of-outdoor-air-pollution\\_9789264257474-en](https://read.oecd-ilibrary.org/environment/the-economic-consequences-of-outdoor-air-pollution_9789264257474-en), 2016-06-09.
- [34] Xiao Q Y, Geng G N, Xue T, *et al.* Tracking PM<sub>2.5</sub> and O<sub>3</sub> pollution and the related health burden in China 2013-2020 [J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, **56**(11): 6922-6932.
- [35] Wei J, Li Z Q, Li K, *et al.* Full-coverage mapping and spatiotemporal variations of ground-level ozone (O<sub>3</sub>) pollution from 2013 to 2020 across China [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2022, **270**, doi: 10.1016/j.rse.2021.112775.
- [36] Le T H, Wang Y, Liu L, *et al.* Unexpected air pollution with marked emission reductions during the COVID-19 outbreak in China [J]. *Science*, 2020, **369**(6504): 702-706.
- [37] Wu M, Hu X S, Wang Z Y, *et al.* Lockdown effects of the COVID-19 on the spatio-temporal distribution of air pollution in Beijing, China [J]. *Ecological Indicators*, 2023, **146**, doi: 10.1016/j.ecolind.2023.109862.
- [38] Li J Y, Gao Y, Huang X. The impact of urban agglomeration on ozone precursor conditions: a systematic investigation across global agglomerations utilizing multi-source geospatial datasets [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **704**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135458.
- [39] Wang R N, Bei N F, Hu B, *et al.* The relationship between the intensified heat waves and deteriorated summertime ozone pollution in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China, during 2013-2017 [J]. *Environmental Pollution*, 2022, **314**, doi: 10.1016/j.envpol.2022.120256.
- [40] Conibear L, Reddington C L, Silver B J, *et al.* Sensitivity of air pollution exposure and disease burden to emission changes in China using machine learning emulation [J]. *GeoHealth*, 2022, **6**(6), doi: 10.1029/2021GH000570.
- [41] Tao T H, Shi Y S, Gilbert K M, *et al.* Spatiotemporal variations of air pollutants based on ground observation and emission sources over 19 Chinese urban agglomerations during 2015-2019 [J]. *Scientific Reports*, 2022, **12**(1), doi: 10.1038/s41598-022-08377-9.
- [42] Li C L, Li F, Cheng Q, *et al.* Divergent summertime surface O<sub>3</sub> pollution formation mechanisms in two typical Chinese cities in the Beijing-Tianjin-Hebei region and Fenwei Plain [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, **870**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.161868.
- [43] Lu X, Zhang S J, Xing J, *et al.* Progress of air pollution control in China and its challenges and opportunities in the ecological civilization era [J]. *Engineering*, 2020, **6**(12): 1423-1431.
- [44] Wang W, Liu Y N, Liu J M, *et al.* Mortality and years of life lost of cardiovascular diseases in China, 2005-2020: empirical evidence from national mortality surveillance system [J]. *International Journal of Cardiology*, 2021, **340**: 105-112.
- [45] Ma Y X, Zhang Y F, Cheng B W, *et al.* A review of the impact of outdoor and indoor environmental factors on human health in China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, **27**(34): 42335-42345.
- [46] Wang W, Li J M, Liu Y N, *et al.* Spatiotemporal trends and ecological determinants of cardiovascular mortality among 2844 counties in mainland China, 2006-2020: a Bayesian modeling study of national mortality registries [J]. *BMC Medicine*, 2022, **20**(1), doi: 10.1186/s12916-022-02613-9.
- [47] Zhao H, Wang L, Zhang Z, *et al.* Quantifying ecological and health risks of ground-level O<sub>3</sub> across China during the implementation of the "three-year action plan for cleaner air" [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **817**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.153011.
- [48] United States Environmental Protection Agency. BenMAP-CE manual and appendices [EB/OL]. <https://www.epa.gov/benmap/benmap-ce-manual-and-appendices>, 2023-05-01.
- [49] Huang Q Y, Chen G D, Xu C, *et al.* Spatial variation of the effect of multidimensional urbanization on PM<sub>2.5</sub> concentration in the Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) urban agglomeration [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, **18**(22), doi: 10.3390/ijerph182212077.
- [50] Diaio B D, Ding L, Zhang Q, *et al.* Impact of urbanization on PM<sub>2.5</sub>-related health and economic loss in China 338 Cities [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, **17**(3), doi: 10.3390/ijerph17030990.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                       |                                                                |        |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|--------|
| Spatial Distribution Characteristics of PM <sub>2.5</sub> and O <sub>3</sub> in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Time Series Decomposition                       | YAO Qing, DING Jing, YANG Xu, <i>et al.</i>                    | (2487) |
| Ozone Sensitivity Analysis in Urban Beijing Based on Random Forest                                                                                                    | ZHOU Hong, WANG Ming, CHAI Wen-xuan, <i>et al.</i>             | (2497) |
| Prediction of Ozone Pollution in Sichuan Basin Based on Random Forest Model                                                                                           | YANG Xiao-tong, KANG Ping, WANG An-yi, <i>et al.</i>           | (2507) |
| Establishment and Effective Evaluation of Haikou Ozone Concentration Statistical Prediction Model                                                                     | FU Chuan-bo, LIN Jian-xing, TANG Jia-xiang, <i>et al.</i>      | (2516) |
| Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Ozone Concentration and Health Benefit Assessment in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 2015 to 2020          | GAO Ran, LI Qin, CHE Fei, <i>et al.</i>                        | (2525) |
| Water-soluble Inorganic Ion Content of PM <sub>2.5</sub> and Its Change Characteristics in Urban Area of Beijing in 2022                                              | CHEN Yuan-yuan, CUI Di, ZHAO Ze-xi, <i>et al.</i>              | (2537) |
| Pollution Characteristics, Source, and Health Risk Assessment of Metal Elements in PM <sub>2.5</sub> Between Winter and Spring in Zhengzhou                           | TAO Jie, YAN Hui-jiao, XU Yi-fei, <i>et al.</i>                | (2548) |
| Characteristics, Sources Apportionment, and Health Risks of PM <sub>2.5</sub> -bound PAHs and Their Derivatives Before and After Heating in Zibo City                 | SUN Gang-li, WU Li-ping, XU Bo, <i>et al.</i>                  | (2558) |
| Components Characteristic and Source Apportionment of Fine Particulate Matter in Transition Period of Heating Season in Xi'an with High Time Resolution               | LI Meng-jin, ZHANG Yong, ZHANG Qian, <i>et al.</i>             | (2571) |
| Source and Cause Analysis of High Concentration of Inorganic Aerosol During Two Typical Pollution Processes in Winter over Tianjin                                    | LU Miao-miao, HAN Su-qin, LIU Ke-xin, <i>et al.</i>            | (2581) |
| Spatial-temporal Variation and Spatial Differentiation Geographic Detection of PM <sub>2.5</sub> Concentration in the Shandong Province Based on Spatial Scale Effect | XU Yong, WEI Meng-xin, ZOU Bin, <i>et al.</i>                  | (2596) |
| Characteristics of VOCs Emissions and Ozone Formation Potential for Typical Chemicals Industry Sources in China                                                       | WU Ting, CUI Huan-wen, XIAO Xian-de, <i>et al.</i>             | (2613) |
| Formation Potential of Secondary Organic Aerosols and Sources of Volatile Organic Compounds During an Air Pollution Episode in Autumn, Langfang                       | ZHANG Jing-qiao, LIU Zheng, DING Wen-wen, <i>et al.</i>        | (2622) |
| Scale Effects of Landscape Pattern on Impacts of River Water Quality: A Meta-analysis                                                                                 | WANG Yu-cang, DU Jing-jing, ZHANG Yu, <i>et al.</i>            | (2631) |
| Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter in Inflow Rivers of Baiyangdian Lake Water in Summer Flood Season                                    | MENG Jia-jing, DOU Hong, CHEN Zhe, <i>et al.</i>               | (2640) |
| Analysis on Hydrochemical Evolution of Shallow Groundwater East of Yongding River in Fengtai District, Beijing                                                        | HU Yu-xin, ZHOU Rui-jing, SONG Wei, <i>et al.</i>              | (2651) |
| Hydrochemical Characteristics, Controlling Factors and Water Quality Evaluation of Shallow Groundwater in Tan-Lu Fault Zone (Anhui Section)                           | LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i>                     | (2665) |
| Effects of Pesticides Use on Pesticides Residues and Its Environmental Risk Assessment in Xingkai Lake (China)                                                        | WANG Wei-qing, XU Xiong, LIU Quan-zhen, <i>et al.</i>          | (2678) |
| Characteristics of Microorganisms and Antibiotic Resistance Genes of the Riparian Soil in the Lanzhou Section of the Yellow River                                     | WEI Cheng-chen, WEI Feng-yi, XIA Hui, <i>et al.</i>            | (2686) |
| Analysis of the Spatiotemporal Distribution of Algal Blooms and Its Driving Factors in Chaohu Lake Based on Multi-source Datasets                                     | JIN Xiao-long, DENG Xue-liang, DAI Rui, <i>et al.</i>          | (2694) |
| Characteristics of Epiphytic Bacterial Community on Submerged Macrophytes in Water Environment Supplemented with Reclaimed Water                                      | HE Yun, LI Xue-mei, LI Hong-quan, <i>et al.</i>                | (2707) |
| Effects of Water Level Fluctuations and Vegetation Restoration on Soil Prokaryotic Microbial Community Structure in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir   | MEI Yu, HUANG Ping, WANG Peng, <i>et al.</i>                   | (2715) |
| Bacterial Community Structure of Typical Lake Sediments in Yinchuan City and Its Response to Heavy Metals                                                             | MENG Jun-jie, LIU Shuang-yu, QIU Xiao-cong, <i>et al.</i>      | (2727) |
| Effect of Thermal Hydrolysis Pretreatment Time on Microbial Community Structure in Sludge Anaerobic Digestion System                                                  | ZHANG Han, ZHANG Han, WANG Jia-wei, <i>et al.</i>              | (2741) |
| Source Apportionment of Morphine in Wastewater                                                                                                                        | SHAO Xue-ting, ZHAO Yue-tong, JIANG Bing, <i>et al.</i>        | (2748) |
| Ecological Environment Dynamical Evaluation of Hutuo River Basin Using Remote Sensing                                                                                 | LI Yan-cui, YUAN Jin-guo, LIU Bo-han, <i>et al.</i>            | (2757) |
| Spatiotemporal Evolution and Influencing Factors of Ecosystem Service Value in the Yellow River Basin                                                                 | WANG Yi-qi, SUN Xue-ying                                       | (2767) |
| Ecosystem Service Trade-off Synergy Strength and Spatial Pattern Optimization Based on Bayesian Network: A Case Study of the Fenhe River Basin                        | CAI Jin, WEI Xiao-jian, JIANG Ping, <i>et al.</i>              | (2780) |
| Spatial-temporal Evolution and Quantitative Attribution of Habitat Quality in Typical Karst Counties of Guizhou Plateau                                               | LI Yue, FENG Xia, WU Lu-hua, <i>et al.</i>                     | (2793) |
| Spatio-temporal Variation in NEP in Ecological Zoning on the Loess Plateau and Its Driving Factors from 2000 to 2021                                                  | ZHOU Yi-ting, YAN Jun-xia, LIU Ju, <i>et al.</i>               | (2806) |
| Land Change Simulation and Grassland Carbon Storage in the Loess Plateau Based on SSP-RCP Scenarios                                                                   | CUI Xie, DONG Yan, ZHANG Lu-yin, <i>et al.</i>                 | (2817) |
| Multi-scenario Simulation of Construction Land Expansion and Its Impact on Ecosystem Carbon Storage in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration                      | WU Ai-bin, CHEN Fu-guo, ZHAO Yan-xia, <i>et al.</i>            | (2828) |
| Effects of Land Use Change on Soil Aggregate Stability and Soil Aggregate Organic Carbon in Karst Area of Southwest China                                             | JIANG Ke, JIA Ya-nan, YANG Yan, <i>et al.</i>                  | (2840) |
| Integrated Analysis of Soil Organic Matter Molecular Composition Changes Under Different Land Uses                                                                    | HUANG Shi-wei, ZHAO Yi-kai, ZHU Xin-yu, <i>et al.</i>          | (2848) |
| Prediction Spatial Distribution of Soil Organic Matter Based on Improved BP Neural Network with Optimized Sparrow Search Algorithm                                    | HU Zhi-rui, ZHAO Wan-fu, SONG Yin-xian, <i>et al.</i>          | (2859) |
| Effects of Application of Different Organic Materials on Phosphorus Accumulation and Transformation in Vegetable Fields                                               | SUN Kai, CUI Yu-tao, LI Shun-jin, <i>et al.</i>                | (2871) |
| Intensive Citrus Cultivation Suppresses Soil Phosphorus Cycling Microbial Activity                                                                                    | ZHOU Lian-hao, ZENG Quan-chao, MEI Tang-ying-ze, <i>et al.</i> | (2881) |
| Effects of Controlled-release Blended Fertilizer on Crop Yield and Greenhouse Gas Emissions in Wheat-maize Rotation System                                            | GAO Wei, WANG Xue-xia, XIE Jian-zhi, <i>et al.</i>             | (2891) |
| Effect of Biochar on NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N Transport in Loessial Soil and Its Simulation                                                                    | BAI Yi-ru, LIU Xu, ZHANG Yu-han, <i>et al.</i>                 | (2905) |
| Analysis and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil in China: A Meta-analysis                                                                           | YANG Li, BAI Zong-xu, BO Wen-hao, <i>et al.</i>                | (2913) |
| Critical Review on Heavy Metal Contamination in Urban Soil and Surface Dust                                                                                           | WANG Xiao-yu, LIU En-feng, YANG Xiang-meng, <i>et al.</i>      | (2926) |
| Research Progress on Solidification and MICP Remediation of Soils in Heavy Metal Contaminated Site                                                                    | CHEN Yue-ru, GAO Wen-yan, CHEN Hong-ren, <i>et al.</i>         | (2939) |
| Pollution Characteristics and Source Analysis of Soil Heavy Metal in Coal Mine Area near the Yellow River in Shandong                                                 | DAI Wen-ting, ZHANG Hui, WU Xia, <i>et al.</i>                 | (2952) |
| Heavy Metal Content and Risk Assessment of Sediments and Soils in the Juma River Basin                                                                                | HAN Shuang-bao, YUAN Lei, ZHANG Qiu-xia, <i>et al.</i>         | (2962) |
| Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in the Yellow River Floodplain of Yinchuan City                            | YU Lu-jia, MA Hai-jun, WANG Cui-ping                           | (2971) |
| Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soils of a City in Guangdong Province Based on Source Oriented and Monte Carlo Models                                       | CHEN Lian, ZOU Zi-hang, ZHANG Pei-zhen, <i>et al.</i>          | (2983) |
| Chemical Speciation, Influencing Factors, and Regression Model of Heavy Metals in Farmland of Typical Carbonate Area with High Geological Background, Southwest China | TANG Rui-ling, XU Jin-li, LIU Bin, <i>et al.</i>               | (2995) |
| Hg Content Characteristics and Safe Planting Zoning of Paddy Soil and Rice in Guizhou Province                                                                        | WEI Mei-liu, ZHOU Lang, HUANG Yan-ling, <i>et al.</i>          | (3005) |
| Cadmium Phytoremediation Effect of Sweet Sorghum Assisted with Citric Acid on Typical Parent Soil in Southern China                                                   | LIU Meng-yu, LUO Xu-feng, GU Jiao-feng, <i>et al.</i>          | (3016) |
| Effects of Modified Distillers' Grains Biochar on Cadmium Forms in Purple Soil and Cadmium Uptake by Rice                                                             | XIAO Nai-chuan, WANG Zi-fang, YANG Wen-na, <i>et al.</i>       | (3027) |
| Effects of Biochar on Growth and Pollutant Accumulation of Lettuce in Soil Co-contaminated with Tetracycline and Copper                                               | ZHENG Chen-ge, PEI Huan-huan, ZHANG Ya-shan, <i>et al.</i>     | (3037) |
| Effects of Vermicomposting on Compost Quality and Heavy Metals: A Meta-analysis                                                                                       | JIANG Ji-shao, HOU Rui, CUI Hui-lin, <i>et al.</i>             | (3047) |
| Advances in the Effects of Microplastics on Soil N <sub>2</sub> O Emissions and Nitrogen Transformation                                                               | LIU Yi-ge, YANG An-qi, CHEN Shu-xin, <i>et al.</i>             | (3059) |
| Effects of Land Use Patterns on Soil Microplastic Pollution in the Luoshijiang Sub-watershed of Erhai Lake Basin                                                      | DAI Liu-yun, HOU Lei, WANG Hua, <i>et al.</i>                  | (3069) |
| Characteristics of Microplastic Pollution in Sediment of Silty Coast in Culture Bay                                                                                   | SONG Ke-xin, HE Jin-cheng, LI Chang-wen, <i>et al.</i>         | (3078) |
| Effect of Polyethylene Microplastics on the Microbial Community of Saline Soils                                                                                       | WANG Zhi-chao, LI Zhe, LI Jia-chen, <i>et al.</i>              | (3088) |
| Characterization of Microplastic Surface Bacterial Community Structure and Prediction of Ecological Risk in Poyang Lake, China                                        | YU Jin-li, ZHAO Jun-kai, LUO Si-qi, <i>et al.</i>              | (3098) |
| Energy-saving and Emission Reduction Path for Road Traffic in Key Coastal Cities of Guangdong, Fujian and Zhejiang                                                    | XU Yi-nuo, WENG Da-wei, WANG Shuo, <i>et al.</i>               | (3107) |
| Life Cycle Carbon Reduction Benefits of Electric Heavy-duty Truck to Replace Diesel Heavy-duty Truck                                                                  | XU Yuan-yuan, GONG De-hong, HUANG Zheng-guang, <i>et al.</i>   | (3119) |