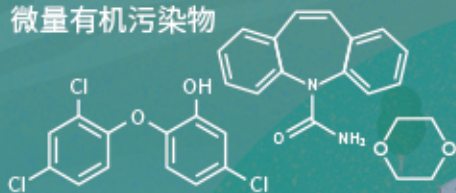


城市污水再生处理中微量有机污染物控制的关键难题与解决思路

王文龙, 吴乾元, 杜烨, 黄南, 陆韻, 魏东斌, 胡洪营

微量有机污染物



深度处理

- 污染物非靶向筛查
- 新型处理技术开发
- 处理效率替代性指标
- 工艺运行指南与排放标准

污水处理厂

深度处理

污水再生利用

湖泊湿地等

景观娱乐用水

下游城市河湖

污水达标排放

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年6月

第42卷 第6期
Vol.42 No.6

目次

综述与专论

- 城市环境生物安全研究的进展与挑战 苏建强, 安新丽, 胡安谊, 朱永官 (2565)
城市污水再生处理中微量有机污染物控制的关键难题与解决思路 王文龙, 吴乾元, 杜焯, 黄南, 陆韻, 魏东斌, 胡洪莹 (2573)
污泥 EPS 作为阻燃剂的机制归纳与潜力分析 郝晓地, 赵梓丞, 李季, 时琛, 吴远远 (2583)

研究报告

- 北京大气 PM_{2.5} 载带金属浓度、来源及健康风险的城郊差异 周安琪, 刘建伟, 周旭, 毕思琪, 张博哈, 高越, 曹红斌 (2595)
京津冀及周边 MAIAC AOD 和 PM_{2.5} 质量浓度特征及相关性分析 金国因, 杨兴川, 晏星, 赵文吉 (2604)
天津市 PM_{2.5} 中二次硝酸盐形成及防控 肖致美, 武婷, 卫昱婷, 徐虹, 李立伟, 李鹏, 陈魁, 邓小文 (2616)
南京市大气细颗粒物(PM_{2.5})中硝基多环芳烃污染特征与风险评估 傅银银, 文浩哲, 王向华, 于南洋, 李冰, 韦斯 (2626)
汾渭平原吸收性气溶胶时空演化及潜在源区分析 刘旻霞, 李亮, 于瑞新, 宋佳颖, 张国娟, 穆若兰, 徐璐 (2634)
西南典型区域夏季大气含氧挥发性有机化合物来源解析
... 陈木兰, 王赛男, 陈天舒, 朱波, 彭超, 周佳维, 车汉雄, 黄汝辉, 杨复沐, 刘合凡, 谭钦文, 韩丽, 陈军辉, 陆克定, 陈阳 (2648)
气溶胶中溶解性有机质(DOM)液相氧化 陶冶, 陈彦彤, 李楠旺, 张敬宇, 叶招莲, 盖鑫磊 (2659)
基于 MERRA-2 再分析资料的上海市近 40 年大气黑碳浓度变化及潜在来源解析
... 曹闪闪, 段玉森, 高婵婵, 苏玲, 杨怡萱, 张洋, 蔡超琳, 刘敏 (2668)
石家庄市臭氧和二氧化氮的时空演替特征及来源解析 王帅, 聂赛赛, 冯亚平, 崔建升, 陈静, 刘大喜, 石文雅 (2679)
基于光化学指标法的邯郸市臭氧生成敏感性 牛元, 程水源, 欧盛菊, 姚诗音, 沈泽亚, 关攀博 (2691)
基于 Landsat 数据的关中盆地腹地 AOD 时空格局及城市化对其影响 郑玉蓉, 王旭红, 张秀, 胡贵贵, 梁秀娟, 牛林芝, 韩海青 (2699)
基于卫星遥感和地面观测的人为源 VOCs 区域清单多维校验 王玥, 魏巍, 任云婷, 王晓琦, 陈赛赛, 程水源 (2713)
中原城市群国家干线公路 SOA 生成潜势估算 王娜萍, 李海萍, 张帆 (2721)
北京市“大气十条”实施的空气质量改善效益 卢亚灵, 范朝阳, 蒋洪强, 牛传真, 李勃 (2730)
工业大气污染源排放绩效定量评价及应用 李廷昆, 冯银厂, 吴建会, 毕晓辉, 张裕芬 (2740)
基于生态风险的我国水环境高风险抗生素筛选排序 周力, 刘珊, 郭家骅, 李琦 (2748)
基于 RDA-REM 模型的我国再生水开发利用潜力 郑锦涛, 马涛, 刘九夫, 彭安帮, 邓晰元, 郑皓 (2758)
基于模型研究质量评价的 SWAT 模型参数取值特征分析 荣易, 秦成新, 杜鹏飞, 孙博 (2769)
大型浅水湖泊水质模型边界负荷敏感性分析 王亚宁, 李一平, 程月, 唐春燕, 陈刚 (2778)
不同流域水陆过渡带氮磷有效态的特征对比及环境意义 朱海, 袁旭音, 叶宏萌, 成瑾, 毛志强, 韩年, 周慧华 (2787)
基于不同赋权方法的北运河上游潜在非点源污染风险时空变化特征分析
... 李华林, 张建军, 张耀方, 常国梁, 时迪迪, 徐文静, 宋卓远, 于佩丹, 张守红 (2796)
长期施肥和耕作下紫色土坡耕地径流 TN 和 TP 流失特征 吴小雨, 李天阳, 何丙辉 (2810)
渭河和泾河流域浅层地下水水化学特征和控制因素 刘鑫, 向伟, 司炳成 (2817)
太湖流域上游南苕溪水系夏秋季水体溶存二氧化碳和甲烷浓度特征及影响因素
... 梁佳辉, 田琳琳, 周钟昱, 张海阔, 张方方, 何圣嘉, 蔡延江 (2826)
低温期浅水湖泊氮的分布及无机氮扩散通量:以白洋淀为例 文艳, 单保庆, 张文强 (2839)
覆盖条件下底泥微环境对内源磷释放的影响 陈姝彤, 李大鹏, 徐楚天, 张帅, 丁玉琴, 孙培荣, 黄勇 (2848)
圩区河道底泥腐殖酸对重金属和抗生素的共吸附 薛向东, 杨宸豪, 于荐麟, 庄海峰, 方程冉 (2856)
两种 PPCPs 对雅鲁藏布江沉积物硝化作用的影响 凌欣, 徐慧平, 陆光华 (2868)
铁碳微电解及沸石组合人工湿地的废水处理效果 赵仲婧, 郝庆菊, 张尧钰, 熊维霞, 曾唯, 陈俊江, 江长胜 (2875)
CDs-BOC 复合催化剂可见光下活化过硫酸盐降解典型 PPCPs 雷倩, 许路, 艾伟, 李志敏, 杨磊 (2885)
pg-C₃N₄/BiOBr/Ag 复合材料的制备及其光催化降解磺胺甲噁唑 杨利伟, 刘丽君, 夏训峰, 朱建超, 高生旺, 王洪良, 王书平 (2896)
海藻酸钠负载硫化零价铁对水体中 Cr(VI)的还原去除 王旭, 杨欣楠, 黄币娟, 刘壮, 李诗萌, 程敏, 谢燕华 (2908)
超顺磁性纳米 Fe₃O₄@SiO₂ 功能化材料对镉的吸附机制 张立志, 易平, 方丹丹, 王强 (2917)
典型药物在医院废水和城市污水处理厂中的污染特征及去除情况 叶璞, 游文丹, 杨滨, 陈阳, 汪立高, 赵建亮, 应光国 (2928)
印染废水循环利用抗生素抗性基因丰度变化特性 徐瑶瑶, 王锐, 金鑫, 石炬, 王岩, 金鹏康 (2937)
短程硝化反硝化除磷颗粒污泥的同步驯化 王文琪, 李冬, 高鑫, 刘博, 张杰 (2946)
厌氧氨氧化颗粒污泥的长期保藏及快速活性恢复 李冬, 刘名扬, 张杰, 曾辉平 (2957)
市政污泥热解过程中重金属迁移特性及环境效应评估 姜媛媛, 王彦, 段文焱, 左宁, 陈芳媛 (2966)
不同作物农田土壤抗生素抗性基因多样性 黄福义, 周曙仡, 王佳妮, 苏建强, 李虎 (2975)
宁夏养牛场粪污和周边土壤中抗生素及抗生素抗性基因分布特征 张俊华, 陈睿华, 刘吉利, 尚天浩, 沈聪 (2981)
温度和搅拌对牛粪厌氧消化系统抗生素抗性基因变化和微生物群落的影响
... 许继飞, 张秋萍, 朱天骄, 秦帅, 朱文博, 庞小可, 赵吉 (2992)
小麦秸秆生物质炭施用对不同耕作措施土壤碳含量变化的影响 刘振杰, 李鹏飞, 黄世威, 金相乐, 张阿凤 (3000)
农牧交错带典型区土壤氮磷空间分布特征及其影响因素 张燕江, 王俊鹏, 王瑜, 张兴昌, 甄庆, 李鹏飞 (3010)
汞矿区周边土壤重金属空间分布特征、污染与生态风险评价 王锐, 邓海, 贾中民, 王佳彬, 余飞, 曾琴琴 (3018)
调理剂对磷富集土壤中两种元素交互作用的影响 黄洋, 胡学玉, 曹坤坤, 张敏, 胡晓晓, 王子劲 (3028)
S-烯丙基-L-半胱氨酸缓解水稻种子幼根和幼芽镉胁迫机制 程六龙, 黄永春, 王常荣, 刘仲齐, 黄益宗, 张长波, 王晓丽 (3037)
连续 4 个生长季大气 CO₂ 升高与土壤铅(Pb)污染耦合下刺槐幼苗根际土壤微生物特征
... 贾夏, Lkhagvajargal Khadkhurel, 赵永华, 张春燕, 张宁静, 高云峰, 王子威 (3046)
嗜热脂肪地芽孢杆菌对聚苯乙烯的降解性能 邢睿智, 赵子强, 赵文琪, 陈志, 陈金凤, 周顺桂 (3056)
冬青和女贞叶表面颗粒物微形态及叶际细菌群落结构 李慧娟, 徐爱玲, 乔凤禄, 蒋敏, 宋琪 (3063)
罗红霉素对大型溞生殖生长及抗氧化系统的影响 张凌玉, 刘建超, 冷阳, 陆光华 (3074)
中国粮食作物产量和木本植物生物量与地表臭氧污染的响应关系 冯兆忠, 彭金龙 (3084)
《环境科学》征订启事(2698) 《环境科学》征稿简则(2712) 信息(3027, 3055, 3073)

北京市“大气十条”实施的空气质量改善效益

卢亚灵^{1,2}, 范朝阳³, 蒋洪强¹, 牛传真⁴, 李勃^{1*}

(1. 生态环境部环境规划院京津冀区域环境联合研究中心, 北京 100012; 2. 天津大学环境科学与工程学院, 天津 300072; 3. 南开大学环境科学与工程学院, 天津 300350; 4. 浙江工业大学环境学院, 杭州 310014)

摘要: 大气污染防治行动计划(“大气十条”)等政策措施实施以来,北京市空气质量改善显著。为科学评估“大气十条”的效果,以北京市为例,采用疾病成本法、人力资本法和市场价值法核算空气质量改善带来的人体健康、农业、建筑材料和清洁损失减少的效果,并通过货币化北京市“大气十条”的政策收益,从而肯定地方开展大气污染防治工作的积极成效。结果表明: ① 政策实施以来,北京市空气质量明显改善,改善效益稳定增长,2013~2017年分别达到-19.82、-18.93、157.07、152.64和223.30亿元,在当年GDP占比分别为-0.85‰、-0.81‰、6.68‰、6.16‰和8.77‰。5 a实施的总效益为494.26亿元,占GDP总值的4.11‰。② 改善效益以健康损失改善效益和清洁损失改善效益为主,体现了颗粒物浓度降低带来的明显效果。③ 北京16个行政区大多在政策后期达到较高效益,其中延庆区、密云区、平谷区、昌平区、通州区、石景山区和朝阳区这7个区连续5 a改善指数为正,朝阳区和海淀区等由于人口密集,大气污染暴露人口多,获得效益稍差。本研究结果证实了北京市“大气十条”实施的有效性和必要性。

关键词: 空气质量; 改善效益; 人体健康; 大气污染防治行动计划; 北京市

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)06-2730-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202008298

Economic Benefit of Air Quality Improvement During Implementation of the Air Pollution Prevention and Control Action Plan in Beijing

LU Ya-ling^{1,2}, FAN Zhao-yang³, JIANG Hong-qiang¹, NIU Chuan-zhen⁴, LI Bo^{1*}

(1. Environmental Research Center of Beijing-Tianjin-Hebei Region, Chinese Academy of Environmental Planning, Beijing 100012, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China; 4. College of Environment, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Air quality in Beijing has been improved significantly since the implementation of the Air Pollution Prevention and Control Action Plan (‘Action Plan’). To evaluate the effect of the Action Plan, the cost-of-illness, human capital, and market value approaches were used to estimate air quality improvement benefits including human health, agriculture, building materials, and cleanliness. The policy benefit through monetization was also evaluated, which can affirm the positive effect of air pollution prevention and control by local government. The results illustrated that: ① Since the policy implementation, air quality in Beijing has improved significantly and the improvement efficiency had been growing steadily. From 2013 to 2017, air quality had reached -1.982, -1.893, 15.707, 15.264, and 22.330 billion yuan respectively, accounting for -0.85‰, -0.81‰, 6.68‰, 6.16‰, and 8.77‰ of GDP in the fiscal year. The total profit during the five years was 49.426 billion yuan, accounting for 4.11‰ of the 5-year total GDP; ② The total improvement benefit was mainly linked to reductions in health and cleaning costs, primarily associated with a reduction in particulate matter concentrations; and ③ The majority of 16 administrative regions in Beijing reached an ideal level of benefit during the late stages of policy implementation, including Yanqing, Miyun, Pinggu, Changping, Tongzhou, Shijingshan, and Chaoyang Districts, which have retained a positive improvement index for five years. In contrast, Chaoyang and Haidian Districts have benefited relatively little as a result of the exposure of high-density populations to atmospheric pollution. These research results demonstrate the effectiveness and necessity of the Air Pollution Prevention and Control Action Plan in Beijing.

Key words: air quality; benefit improvement; human health; Air Pollution Prevention and Control Action Plan; Beijing

为落实国务院《大气污染防治行动计划》(“大气十条”),北京市于2013年出台了《北京市2013-2017年清洁空气行动计划》(“清洁空气行动计划”),要求到2017年,全市空气中的PM_{2.5}(细颗粒物)年均浓度比2012年下降25%以上,控制在60 μg·m⁻³左右。根据相关考核办法,生态环境部会同发展改革委等部门,对全国贯彻实施“大气十条”情况进行考核,北京市2017年PM_{2.5}年均浓度降至58 μg·m⁻³,全面完成既定的空气质量改善目标。

较早的研究对空气污染严重程度及其造成的污染损害关注较多。有研究认为,空气污染(PM_{2.5}等污染物)除了可以诱发支气管哮喘^[1]、慢性阻塞性肺病和肺癌^[2,3]等多种呼吸系统疾病,还能诱发心

收稿日期: 2020-08-30; 修订日期: 2020-11-22

基金项目: 环境规划院青年基金项目(40050701); 国家自然科学基金项目(91846301, 41571522, 71433007)

作者简介: 卢亚灵(1984~),女,硕士,副研究员,主要研究方向为环境规划与大气污染防治, E-mail: luyi@caep.org.cn

* 通信作者, E-mail: libo@caep.org.cn

脏病和中风等心脑血管疾病^[4],从而导致暴露人群早死^[5,6].2013年1月我国华北及其周边地区的大范围雾-霾,严重影响了140万km²范围内超过800万的人口^[7].世界银行估计,2013年中国空气污染导致160万人早死^[8].国内有关研究表明,如果我国主要城市PM₁₀年均浓度达到40 μg·m⁻³,平均每年会减少20万人早死,因此世界银行对我国早死人数的估计偏大^[9].“大气十条”实施5 a,还有学者从统计学角度研究了大气污染与疾病关系^[10,11].

由于“大气十条”空气治理取得显著成效,北京市大气污染治理问题成为研究的热门.清华大学的研究团队结合统计方法和化学传输模型评估北京市“清洁空气行动计划”的有效性,结果表明气象条件对空气质量逐年变化具有重要影响,但是主要还是排放控制的效果^[12],该团队还进一步研究了北京市“大气十条”实施期间,有机物和硫酸盐对颗粒物贡献率下降,而硝酸盐的贡献率上升,从而认为北京冬季雾-霾污染由硫酸盐驱动转变为硝酸盐驱动^[13].中国环境规划院对“大气十条”的实施开展了评价^[14],并针对环境健康效应开展了深入评估,有研究发现该政策的实施大约避免60 213人过早死亡^[15].随着研究的深入,对空气污染损害和空气质量改善效益的关注逐渐增多^[16,17].

随着大气污染治理的推进,相关学者在关注空气质量改善和由此导致的健康效益的同时,越来越多的研究关注其货币化,从而与GDP等经济指标对比.世界银行估计,2013年中国空气污染经济损失达1590亿美元,相当于GDP的9.9%^[8].中国环境规划院构建了绿色GDP(GGDP)综合核算体系,将污染损失和生态破坏等纳入到经济系统核算中,并对我国历年的GGDP进行核算^[18].但是这些研究均从污染损失的角度进行核算,不利于提升地方政府污染治理的积极性和肯定其工作成效.本研究拟以北京市为例,从空气质量改善角度,以北京市为例,采用疾病成本法、人力资本法和市场价值法核算空气质量改善带来的人体健康、农业、建筑材料和清洁损失减少的效果,并通过货币化北京市“大气十条”的政策收益,以期为其他相关研究者和有关部门提供参考,肯定地方开展大气污染防治工作的积极成效.

1 材料与方法

1.1 整体思路

大气污染危害的损失,按终端来分,包括人体健康经济损失、农业(种植业)经济损失、建筑材料经济损失和清洁成本经济损失(含家庭清洁和社会清洁)^[19].通过损失叠加,可以得到大气污染的综合经

济损失.空气质量改善可减少大气污染的综合经济损失,减少的部分即视为环境质量改善效益.空气质量改善效益核算的关键是确定本地化参数和核算大气环境污染损失的减少量.本研究的本地化参数采用问卷调查方式获得;大气环境污染损失的减少量采用上1 a大气污染损失的价值量减去当年损失的价值量进行核算,以2017年改善效益为例,采用2016年大气污染损失减去2017年的损失.核算框架如图1所示.

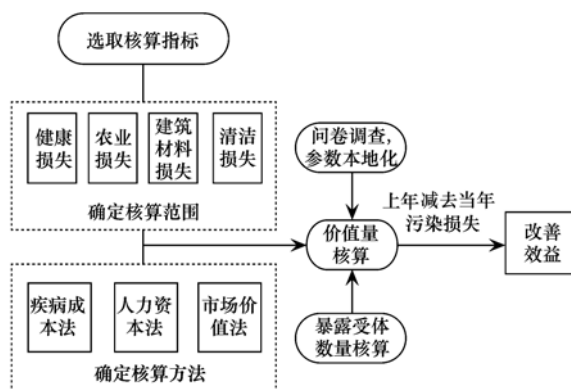


图1 空气质量改善效益核算框架

Fig. 1 Accounting framework of air pollution improvement benefit in Beijing

本研究的4项改善效益涉及的污染因子、核算对象和核算方法如表1所示.流行病学研究表明,颗粒物特别是PM_{2.5}与人体不利健康影响(呼吸系统和心脑血管疾病)关系最为显著^[20,21],因此本研究的人体健康改善效益主要核算PM_{2.5}浓度改变对区域内暴露人口(这里指常住人口)的生命和健康的损害减少量,采用疾病成本法、患病失能法和人力资本法分别对不同终端进行核算;由于大气污染对农业和建筑材料的影响主要是SO₂干沉降及酸性降水(即酸雨)作用于农作物和建筑物而造成的危害^[22~24],因此农业损失改善效益主要核算SO₂浓度改变对区域内谷物和蔬菜等农作物减产的损失减少量,建筑材料损失改善效益也是核算SO₂浓度改变对区域内水泥等13种建筑材料腐蚀的损失减少量,两者都采用市场价值法;清洁成本主要是由大气中的颗粒物特别是粒径较大的PM₁₀等颗粒物沉降,对居民生活和各种设备(如车辆)、道路以及建筑物等产生脏污而额外增加的清洁费用^[19],因此主要核算PM₁₀浓度改变对家庭(居室、衣物和机动车等)以及社会公共交通、道路和公共建筑清洁费用的减少量,也采用市场价值法.

1.2 核算方法

1.2.1 人体健康经济损失

大气污染对人群健康的影响可表现为急性效应

表 1 北京市空气质量改善效益各项指标及核算方法

Table 1 Indicators and accounting methods of air pollution improvement benefit in Beijing

项目	人体健康	农业	建筑材料	清洁
污染因子	PM _{2.5}	SO ₂	SO ₂	PM ₁₀
核算对象	暴露人口	谷物和蔬菜等农作物	水泥、砖、花岗岩、水磨石、镀锌钢和防护栏等 13 种建筑用材料	家庭(居室、衣物和机动车等)以及社会公共交通、道路和公共建筑清洁
价值量核算方法	疾病成本法,患病失能法,人力资本法	市场价值法	市场价值法	市场价值法

和慢性效应. 大气中的有毒物质通过破坏人体呼吸、免疫和血液循环系统等诱发致病或致死症状,进而造成健康或经济损失^[25]. 由于大气污染物的浓度一般比较低,其健康效应以长期慢性效应为主,目前公认的致病效应表现在呼吸系统和心血管疾病方面^[26],具体表现为由于污染物与呼吸道接触引起的咳嗽、哮喘、慢性支气管炎、肺气肿、肺癌及因生理机能障碍而加重心、脑血管等疾病. 近年来 PM_{2.5} 研究取代 PM₁₀ 成为健康影响关注重点,因此,本研究选取 PM_{2.5} 作为空气污染评价因子,健康效应阈值为国家空气质量的一级标准 15 μg·m⁻³.

健康损失价值评估通常分为过早死亡和疾病终端,通过对健康效应的货币化进行评估^[26]. 本文将 PM_{2.5} 对人体健康造成的损失分为 3 项:①大气污染造成的全死因过早死亡经济损失(EC_{a1}),采用修正的人力资本法评价;②大气污染造成的相关疾病住院经济损失(EC_{a2}),利用疾病成本法评价;③大气污染造成的慢性支气管炎发病失能经济损失(EC_{a3}),以患病失能法评价.

1.2.1.1 全死因过早死亡损失(EC_{a1})

$$EC_{a1} = P_{ed} \times \sum_{i=1}^t \frac{GDP_{pci}}{(1+r)^i} \quad (1)$$

$$P_{ed} = 10^{-5} \times [(RR-1)/RR] f_p P_e \quad (2)$$

$$RR = \exp[\beta(C-C_0)] \quad (3)$$

式中, P_{ed} 为现状大气污染水平下造成的全死因过早死亡人数,单位为万人; GDP_{pci} 为第*i*年人均 GDP,单位为万元; t 为人均损失寿命年,根据人口普查中的年龄别平均期望寿命和中国卫生统计中各年龄疾病别死亡率计算中国呼吸系统和心脑血管疾病死亡的总平均损失寿命年为 18 a^[27]; r 为社会贴现率,根据当前我国投资收益水平、资金机会成本、资金供求状况等因素,取 8%^[28]; RR 为大气污染引起的全死因死亡相对危险归因; f_p 为现状大气污染水平下全死因死亡率,取自中国卫生统计年鉴,单位为 1/10 万; P_e 为暴露人口,取自北京市地区统计年鉴的常住人口,单位为万人; C 为某种大气污染物的当前浓度水平,单位为 μg·m⁻³; C_0 为污染物清洁浓

度水平阈值,根据我国 2012 年发布的空气质量标准,以 PM_{2.5} 一级年均浓度限制的 15 μg·m⁻³ 作为该阈值; β 为单位污染物浓度(1 μg·m⁻³)变化引起健康危害变化的百分数,单位为%,本研究采用 Aunan 等^[29]对中国的研究结果.

1.2.1.2 门诊和住院经济损失(EC_{a2})

$$EC_{a2} = P_{eh} \times (C_{hi} + WD \times C_{wd}) \quad (4)$$

$$P_{eh} = \sum_{i=1}^n f_{pi} \times \frac{\Delta c_i \times \beta_i / 100}{1 + \Delta c_i \times \beta_i / 100} \quad (5)$$

式中, P_{eh} 为现状大气污染水平下的门诊或住院人次,北京市各区门诊和住院人次在 P_{eh} 的基础上通过“每百门急诊入院人数^[30]”计算得到; C_{hi} 为疾病*i*(咽炎、急性支气管炎、肺炎、哮喘、脑血管疾病和心血管疾病等)门诊或住院成本, C_{hi} 包括病人直接成本(如果是门诊,则为单次门诊费用;如果是住院,则为住院平均每天费用 C_e 与住院天数 D_e 的乘积)和家人、护工陪护费用等成本(陪护人员平均每天费用 C_m 与陪护天数 D_m 的乘积;如果是门诊, D_m 按 1 d 计,单位为元·(人次)⁻¹; WD 为病人住院休工天数(本研究休工天数等于住院天数),单位为 d·(人次)⁻¹; C_{wd} 为病人每天的休工成本,单位为元·d⁻¹,休工成本=人均 GDP/365 d; n 为大气污染相关疾病,呼吸系统疾病和心血管疾病; f_{pi} 为现状大气污染水平下的门诊或住院人次(万人); β_i 为回归系数,即单位污染物浓度变化引起健康危害*i*变化的百分数; Δc_i 为实际污染物浓度与健康危害污染物浓度阈值(15 μg·m⁻³)之差,单位为 μg·m⁻³. C_{hi} 、 C_e 、 D_e 、 D_m 和 WD 根据 2017 年针对北京市居民的问卷调查获得.

1.2.1.3 慢性支气管炎发病失能损失(EC_{a3})

$$EC_{a3} = \gamma \times P_{eb} \times \sum_{i=1}^t \frac{GDP_{pci}}{(1+r)^i} \quad (6)$$

式中, t 为大气污染引起的慢性支气管炎早死的平均损失寿命年数, γ 为慢性支气管炎失能损失系数. 根据人口普查中的年龄别平均期望寿命和中国卫生统计中分年龄组的慢性阻塞性肺疾病(慢性支气管炎是该类疾病中最常见的一种)死亡率,计算得到 t 为 23 a, γ 为 0.32^[19].

1.2.2 农业经济损失

根据相关研究,大气污染物中对农作物影响较大的是二氧化硫、氟化物、臭氧和乙烯,氮氧化物也会伤害植物但毒性较小. 气体污染物会通过气孔进入农作物,逐渐扩散破坏组织,干扰酶的作用,扰乱代谢机能,抑制植物生长;颗粒物则会擦伤叶片,阻挡阳光影响光合作用,附着的重金属等有害元素还可进入细胞内部,产生进一步危害^[31]. 本研究期间,北京市已不存在酸雨问题,因此仅将 SO_2 作为农作物减产研究的标志污染物. 此外,考虑到酸沉降的间接作用机制还不清楚,本研究没有包括酸沉降引起的土壤间接伤害损失.

$$C_{ac} = \sum_{i=1}^n a_i \times P_i \times S_i \times Q_{0i} / 100 \quad (7)$$

式中, C_{ac} 为大气污染引起农作物减产的经济损失,单位为万元; P_i 为当年农作物 i 的市场价格,单位为元· kg^{-1} ; S_i 为农作物 i 的种植面积,单位为万 hm^2 (1 亩 = $1/15 \text{ hm}^2$); Q_{0i} 为对照清洁区农作物 i 的单位面积产量,单位为 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; a_i 为大气污染引起农作物 i 减产的百分数(剂量反应关系); n 为农作物种类,这里取 $n = 6$,分别代表水稻、小麦、大豆、棉花、油菜和蔬菜.

1.2.3 建筑材料经济损失

参考相关研究,以 SO_2 和酸雨为典型特点的酸沉降型空气污染,对室外建筑材料会造成一定影响,加剧大气腐蚀情况,特别是含有碳钢、锌和铜等材料的建筑外墙及各种金属使用寿命大大缩短,进而造成经济损失^[32]. 本部分通过计量-暴露反应关系,对水泥、砖、铝、油漆木材、大理石/花岗岩、陶瓷和马赛克、水磨石/水泥、油漆灰、瓦、镀锌钢、涂漆钢、涂漆钢防护网和镀锌防护网的损失进行核算. 由于北京市现阶段不存在酸雨问题,故只对 SO_2 造成的影响进行核算. 计算酸沉降对材料的危害的关键在于酸沉降对材料损害的剂量反应关系和材料存量及其维修或更换费用和周期的调查,公式如下:

$$\text{EC}_m = \sum_i \left(\frac{Y_{pi} - Y_{0i}}{Y_{pai} \times L_{pai}} \times d_i \times K_i \times P \right) \quad (8)$$

式中, EC_m 为酸雨和 SO_2 造成所有材料的经济损失, Y_{pi} 为污染条件下的 i 种材料的腐蚀速度,单位为 $\mu\text{m} \cdot \text{a}^{-1}$; Y_{0i} 为对照清洁区 i 种材料的腐蚀速度,单位为 $\mu\text{m} \cdot \text{a}^{-1}$; Y_{pai} 为 i 种材料调查条件下的腐蚀速度,单位为 $\mu\text{m} \cdot \text{a}^{-1}$,从剂量反应关系中获得; L_{pai} 为 i 种材料调查获得的材料经验寿命,单位为年; d_i 为材料 i 一次维修或更换的单价,单位为元·(10^4 m^2) $^{-1}$; K_i 为材料 i 的人均占有量,单位为 $\text{m}^2 \cdot \text{人}^{-1}$; P 为常住人口,单位为人.

1.2.4 清洁经济损失

清洁问题相关的大气污染物主要是各种颗粒物,大气中各种颗粒物浓度的升高对人们日常生活产生的影响主要表现为个人卫生、衣物清洗、居室卫生、生产和作业设备(如各种车辆)、道路清扫以及建筑物等额外增加的清洁费用,造成个人、家庭以及社会因污染引起的清洁费用支出和劳务支出的增加.

1.2.4.1 家庭清洁费用增加

随着大气中污染物浓度的升高,人们日常生活(如个人卫生、衣物清洗、居室卫生和洗车等)的脏污速度加快,导致清洁所需的人力、物力和频率的增加,从而造成家庭清洁费用的增加. 家庭清洁费用总额为以下费用的加和.

家庭家用洗衣机电费:

$$C_1 = R_m \times (365 \text{ d}/f_m) \times N_m \times (P_m/1000) \times T_m \times P_e \times H \quad (9)$$

式中, C_1 为城市家庭家用洗衣机电费,单位为万元; R_m 为洗衣机平均使用比例,单位为%; f_m 为平均每户洗衣机洗衣频率,单位为次·(d·台) $^{-1}$; N_m 为平均每户的洗衣机台数,单位为台·户 $^{-1}$; P_m 为洗衣机平均功率,单位为 kW; T_m 为洗衣机平均洗衣时间,单位为 h·次 $^{-1}$; P_e 为电价,单位为元·(kW·h) $^{-1}$; H 为城市家庭户数,单位为万户.

家庭清洗用水水费:

$$C_2 = (E_w \times 12 \text{ 月}) \times R_c \times H \quad (10)$$

式中, C_2 为城市家庭清洗用水水费,单位为万元; E_w 为平均每户每月水费,单位为元·(月·户) $^{-1}$; R_c 为平均每户清洗用水占生活用水量的比例,单位为%; H 同上.

家庭洗涤剂费用:

$$C_3 = (E_e \times 12 \text{ 月}) \times H \quad (11)$$

式中, C_3 为城市家庭洗涤剂费用,单位为万元; E_e 为平均每户每月洗涤费用,单位为元·(月·户) $^{-1}$; H 同上.

家庭的社会服务费用:

①在外洗衣费用

$$C_{41} = R_l \times (365 \text{ d}/f_l) \times E_l \times H \quad (12)$$

式中, C_{41} 为洗衣店洗衣费用,单位为万元; R_l 为洗衣店洗衣比例,单位为%; f_l 为洗衣店洗衣频率,单位为次·d $^{-1}$; E_l 为每户平均洗衣店费用,单位为元·(次·户) $^{-1}$; H 同上.

②请人打扫费用

$$C_{4s} = R_s \times (E_s \times 12 \text{ 月}) \times H \quad (13)$$

式中, C_{4s} 为请人打扫费用,单位为万元; R_s 为城市

家庭请人打扫家庭占家庭总数的比例,单位为%;
 E_s 为平均每月请人打扫卫生费用,单位为
元·(月·户)⁻¹; H 同上.

③洗车费用

$$C_{4v} = R_v \times R_{vo} \times (E_v \times 12 \text{ 月}) \times H \quad (14)$$

式中, C_{4v} 为在外洗车费用,单位为万元; R_v 为有车
家庭比例,单位为%; R_{vo} 为在外洗车比例,单位
为%; E_v 为在外洗车费用,单位为元·(月·户)⁻¹;
 H 同上.

1.2.4.2 社会清洁费用增加

分别针对因污染增加的公交车辆、出租车辆、
道路和建筑清洁费用给出了核算模型.

(1) 车辆清洁费用

$$C_b = \sum_{i=1}^2 (C_{bi} \times \Delta Q_{bi} \times A_{bi}) \quad (15)$$

式中, C_b 为社会公共车辆增加的总清洁费用,单位
为万元; C_{bi} 为每辆车清洁和劳务费用,单位为
元·辆⁻¹; ΔQ_{bi} 为单车新增清洁次数, A_{bi} 为车辆数
量,单位为万辆; i 表示社会公共车辆种类,这里分
别表示公交车和出租车.

(2) 道路清扫费用

$$C_s = \Delta C_s \times \Delta L \times L_s \quad (16)$$

式中, C_s 为道路增加的总清洁费用,单位为万元;
 ΔC_s 为单位面积道路每年的清洁和劳务费用,单位
为元·m⁻²; ΔL 为道路增加清扫的比例系数; L_s 为
城市道路总面积,单位为万 m².

(3) 建筑清洁费用

$$C_c = \sum_{i=1}^n \Delta C_{ci} \times S_i \quad (17)$$

式中, C_c 为建筑物暴露面积增加的总清洁费用,单
位为万元; ΔC_{ci} 为污染城市的单位面积建筑物增加
的清洁费用,单位为元·m⁻²; S_i 为建筑材料的暴露
面积,单位为万 m²; n 为需清扫的建筑种类,包括建
筑外立面和地面两种.

1.3 基于问卷调查的北京市相关参数

针对北京市居民或者企事业单位与大气污染相
关的疾病人均就诊、住院和陪护等费用,以及家庭、
公共交通、道路和建筑清洁成本等费用,于 2017 年
进行了问卷调查. 其中疾病和家庭清洁等相关费用
的调查对象为北京市普通居民,共设计 28 个问题,
根据统计学中抽样调查原理,问卷样本量要达到问
题数量的 5 ~ 10 倍(即问卷样本量要在 140 ~ 280
份); 此外,北京市约有 2 000 万常住人口,要达到
95% 的置信水平,问卷样本量至少需要 385 份. 综合
以上因素此部分样本数为 500 份,针对北京市常住
居民随机调查^[33]. 对于公共交通、道路和建筑清洁
成本等费用,主要调查北京市内的相关企业单位,
由于全市公交公司和道路保洁相关单位数量较少、
涉及建筑清洁的单位数量不详,且该部分价格全市
相对统一,故调查样本量在 20 ~ 30 份之间,保证每
个区的相关调查对象至少 1 个. 由此获得的相关参
数系数见表 2 ~ 4 所示.

表 2 北京市人体健康损失(呼吸系统和心血管疾病)相关参数系数

Table 2 Parameters of human health loss (respiratory system and cardiovascular disease) in Beijing

项目	单次就诊平均费用成本/元·例 ⁻¹						住院	人均住院	陪护人均	陪护人均
	咽炎	急性支 气管炎	肺炎	哮喘	脑血管 疾病	心血管 疾病	平均费用 /元·(例·d) ⁻¹	天数/d	费用 /元·(例·d) ⁻¹	误工天数 /d
变量名称	C_{h1}	C_{h2}	C_{h3}	C_{h4}	C_{h5}	C_{h6}	C_c	D_c	C_m	D_m
参数	694.2	2 882.7	4 727.4	790.0	912.9	787.6	162.0	4.06	221.90	2.04

表 3 北京市家庭清洁费用相关参数系数

Table 3 Parameters of household cleaning cost in Beijing

项目	变量名称	参数
聘请专业保洁人员家庭占比/%	R_s	8
保洁人员每月费用/元·月 ⁻¹	E_s	735.4
使用洗衣机的家庭平均比例/%	R_m	86.67
户均新增洗衣频率/次·d ⁻¹	f_m	0.1
户均洗衣机数/台	N_m	0.9
洗衣机平均功率/W	P_m	454.81
洗衣平均时长/min·次 ⁻¹	T_m	42.3
电价/元·度 ⁻¹	P_e	0.488
清洗用水占生活用水比例/%	R_w	67
每户每月水费/元·(月·户) ⁻¹	E_w	19.8
送洗衣店平均费用/元·(月·户) ⁻¹	E_l	177.57
送洗衣店家庭比例/%	R_l	29
有车家庭比例/%	R_v	69
在外洗车家庭比例/%	R_{vo}	78
在外洗车费用/元·次 ⁻¹	E_v	31.23

1.4 其他数据来源

北京市各区 GDP、人均 GDP、常住人口及其密
度、户籍人口及其户数、农作物播种面积和私人汽
车拥有量等数据来自 2013 ~ 2018 年相关统计年
鉴^[34]; 各区 SO₂、PM₁₀ 和 PM_{2.5} 年均浓度数据来自
2012 ~ 2017 年相关生态环境状况公报^[35]. 各区死亡
率,全市价格指数、人均住房建筑面积、公共交通
和出租小汽车运营数量、来自 2013 ~ 2018 年相关
统计年鉴^[36]; 全市清扫保洁面积、建成区面积来自
2013 ~ 2018 年相关统计年鉴^[37]. 北京市每百门急诊
入院人数来自 2013 ~ 2018 年卫生健康相关统计年
鉴^[38].

此外, 2012 年各区 PM_{2.5} 年均浓度数据通过

2012 年 PM_{10} 和 2013 年 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 浓度数据折算得到. 各区城市道路面积占全市的比例, 根据百度地图等矢量数据中各区道路长度及其等级计算得到, 进而通过历年全市清扫保洁面积确定各区的相关面积. 各区公交车辆和出租车车辆运营数量通过各区常住人口和全市公共交通和出租小汽车运营数量计算得到. 各区建筑材料暴露面积, 通过各区人口和人均建筑暴露材料存量计算得到; 建筑材料寿命通过建筑材料腐蚀速度和 SO_2 浓度计算得到. 人均建筑暴露材料存量和建筑材料腐蚀速度来自文献[19].

表 4 北京市社会(公共交通、道路和建筑)清洁费用相关参数系数

Table 4 Parameters of public transport, road, and building cleaning cost in Beijing							
项目	公交车清洁		出租车清洁		道路清扫		建筑清洁
	单车清洁费用 /元·台次 ⁻¹	单车新增洗车 频次/次·a ⁻¹	单车清洁费用 /元·台次 ⁻¹	单车新增洗车 频次/次·a ⁻¹	基准清洁费用 /元·m ⁻²	增加清扫比例 系数/%	外立面新增费用 /元(m ² ·a) ⁻¹
变量名称	C_{bl}	ΔQ_{bl}	C_{b2}	ΔQ_{b2}	C_s	ΔL	C_{cl}
参数	29.00	58.68	26.10	38.64	42.3	20%	9.12
							C_{c2}
							19.8

2 结果与讨论

2.1 北京市改善效益总体情况

将历年人体健康、农业、建筑材料和清洁成本经济损失加和, 本年度的大气污染经济损失, 用前 1 a 的损失量减去本年损失量, 为本年空气质量改善效益(即 2013 年的改善效益为 2012 年的大气污染损失量减去 2013 年量; 2017 年的改善效益为 2016

年的损失量减去 2017 年量), 见表 5. 总体来看, 2013 年与 2014 年空气质量改善效益为负值, 分别为 -19.82 亿元和 -18.93 亿元; 但是 2015~2017 年都为正值, 特别是 2017 年改善效益明显, 达到 223.30 亿元. “大气十条”实施的 5 a 期间, 北京市空气质量改善效益总值达到 494.26 亿元(历年效益值均换算成 2017 年当年价). 2013 年总体效益为负, 主要是因为人体健康改善效益为负. 相比 2012

表 5 北京市空气质量改善效益与改善指数及其组成

Table 5 Air pollution improvement benefit, improvement index, and their compositions in Beijing										
年份	改善效益/亿元					效益指数/%				
	健康	农业	材料	清洁	总值	健康	农业	材料	清洁	总计
2013	-52.35	0.31	4.89	27.33	-19.82	-2.25	0.01	0.21	1.18	-0.85
2014	-75.67	0.63	66.16	-10.06	-18.93	-3.23	0.03	2.82	-0.43	-0.81
2015	76.99	0.46	1.43	78.19	157.07	3.27	0.02	0.06	3.33	6.68
2016	77.90	0.24	0.86	73.64	152.64	3.14	0.01	0.03	2.97	6.16
2017	190.43	0.22	0.55	32.09	223.30	7.48	0.01	0.02	1.26	8.77
总计	217.31	1.86	73.89	201.20	494.26	1.81	0.02	0.61	1.67	4.11

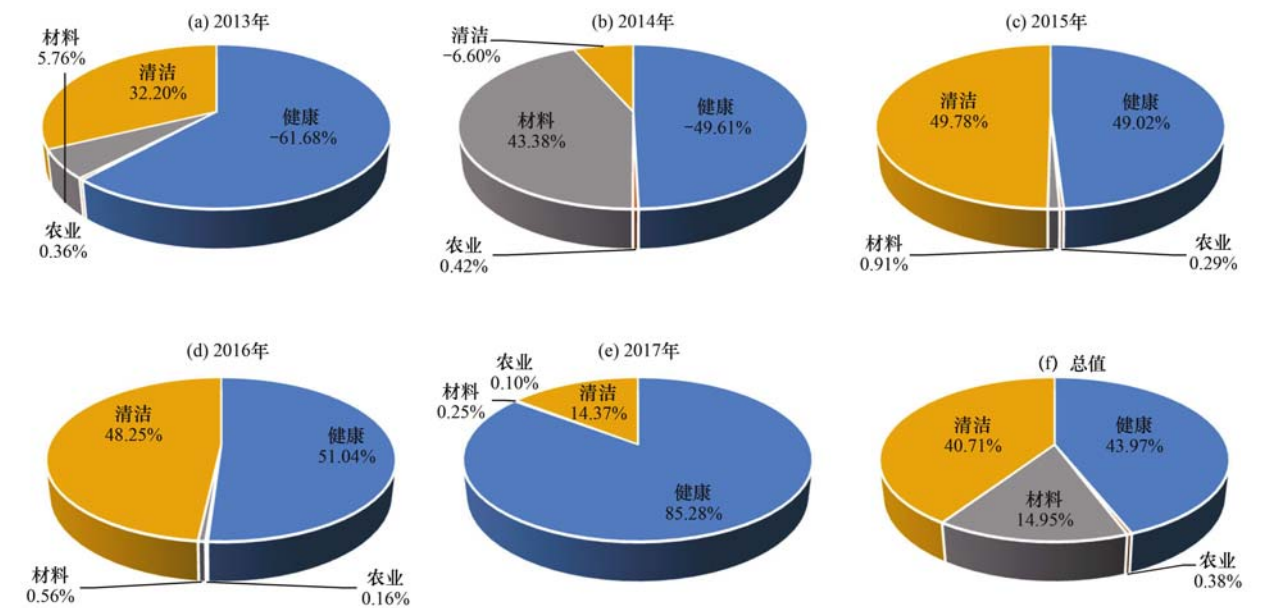


图 2 北京市空气质量改善效益占比

Fig. 2 Component ratios of air pollution improvement benefit in Beijing

年,北京市空气质量变差,导致全市暴露人群的人体健康损失增大.各区中,除通州、昌平、怀柔、密云和延庆外,PM_{2.5}年均浓度都增大,导致人体健康效益为负.2014年,通州、昌平、怀柔、密云和延庆PM_{2.5}年均浓度增大,空气质量恶化;其他区PM_{2.5}年

均浓度均小幅下降,空气质量改善,但是该年其死亡率提高幅度均较大,比如东城区常住人口死亡率由5.53‰提高到7.88‰,西城区由6.09‰提高到6.95‰,导致其在空气质量小幅改善的情况下,人体健康效益仍为负,可见大气污染导致的人体健康损

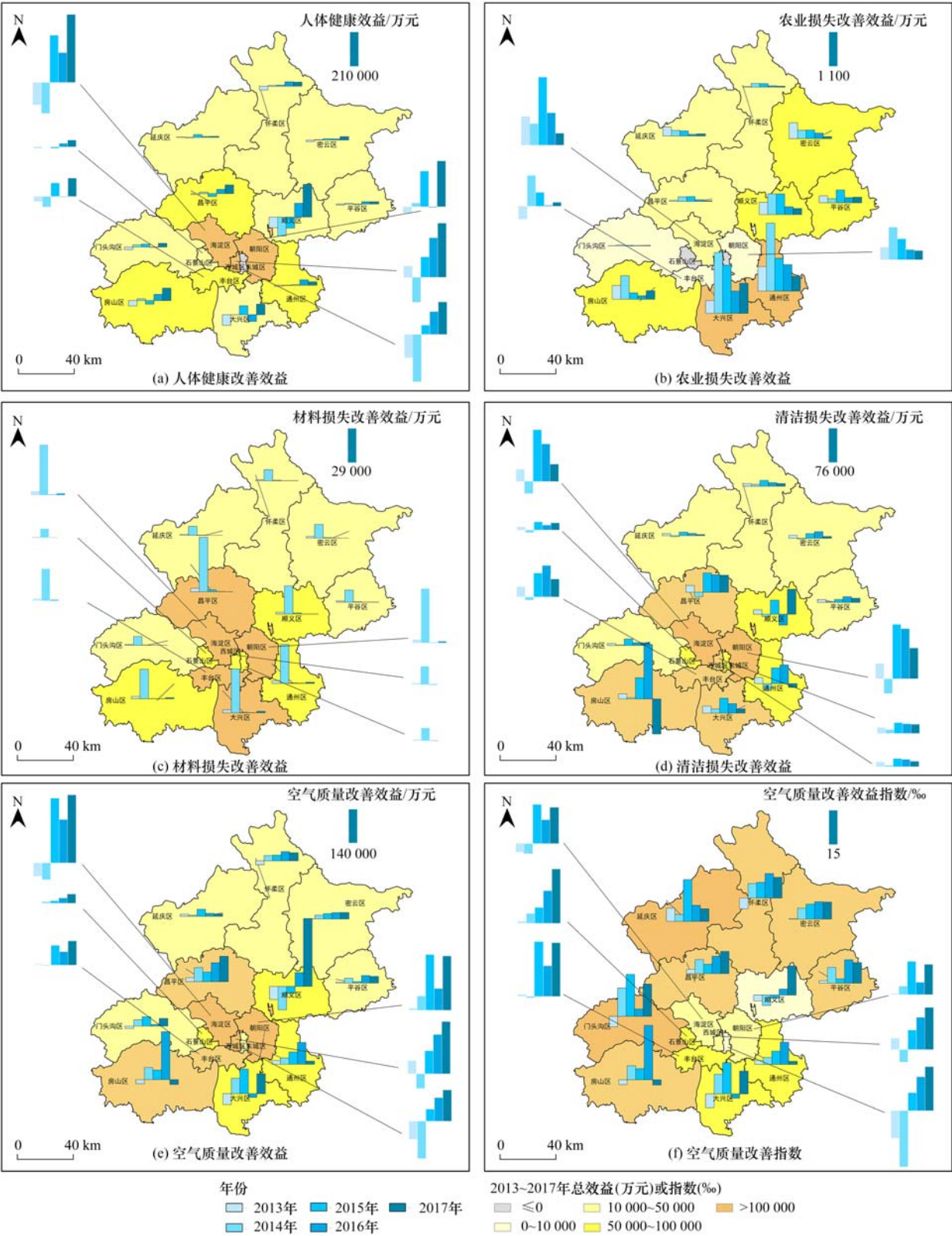


图3 北京市各行政区空气质量改善效益及其指数

Fig. 3 Air pollution improvement benefit and improvement index in Beijing's administrative districts

害具有滞后性. 2015 ~ 2017 年,北京市空气质量改善明显、 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度下降较快,空气质量改善效益显著.

计算北京市空气质量改善效益占当年 GDP 的比重,得到改善效益指数,见表 5 所示. 该指数在 2013 年和 2014 年为负值;随后 3 a 均为正值,分别为 6.68‰、6.16‰和 8.77‰. “大气十条”实施的 5 a 期间,北京市空气质量改善效益综合指数为 4.11‰,即空气质量改善的经济收益占 GDP 的 4.11‰. “大气十条”实施的效益明显.

4 类效益构成比例如图 2 所示(如果某项为负值,用其绝对值作百分比,体现其影响大小). 人体健康效益一般占比最大、影响最为明显;清洁损失改善效益占比也较高. 其次建筑材料损失改善效益,农业损失改善效益占比一般最小. 建筑材料和农业损失改善效益虽不明显,但始终保持正效益. 综合看,“大气十条”实施期间,北京市人体健康、清洁损失、建筑材料损失和农业损失改善效益分别占 43.97%、40.71%、14.95%和 0.38%.

具体来看,人体健康效益受到 $\text{PM}_{2.5}$ 影响较大,2013 年北京市 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度较高,所以人体健康效益影响程度也最大;2017 年,北京市 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度降幅较大,实现了 $60 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的目标,人体健康效益影响程度也很大. 建筑材料和农业损失均受 SO_2 影响较大. 由于农业产业规模在北京市较小,农业损失改善效益不明显,虽然 SO_2 浓度逐年减小,但种植面积也逐年减少,导致 2014 年后改善指数逐渐降低. 关于材料损失改善效益,2014 年起北京市不再使用油漆木材、大理石/花岗岩、涂料/油漆灰、涂漆钢和涂漆钢防护网这 5 类建筑材料,因此以后几年北京市材料损失改善效益明显降低. 清洁损失改善效益受 PM_{10} 浓度影响较大,随着空气质量提高得到显著改善,但 2014 年 PM_{10} 浓度有所升高,导致指数出现负值.

2.2 北京市各区情况

北京市各区改善效益如图 3 所示. 从中可以看出,对于不同类型的改善效益,北京市中心城区与其他区的差异显著. 对于人体健康效益,东城、西城、朝阳、丰台、石景山和海淀等 6 个区(城六区)明显高于其他区,特别是高于生态涵养区所包含的几个区. 2017 年,东城、西城、朝阳、丰台、石景山和海淀的人体健康效益分别达到 20.14、33.53、28.34、11.37、4.21 和 42.06 亿元;但是门头沟、怀柔、平谷、密云和延庆仅分别为 2.33、2.50、1.44、2.07 和 0.61 亿元,与城六区差距明显,主要是由于中心城区人口密度高、暴露人口数量较多. 农业损失改

善效益方面,大兴区、通州区和延庆区改善显著;中心城区各区农业用地面积较小,农业损失改善效果并不明显,东城、西城和石景山由于没有农业,改善效益为 0. 材料损失改善效益,海淀、朝阳、大兴、昌平和通州等区改善显著;东城、西城和北部各区建筑材料暴露面积小,改善效益不明显. 清洁损失改善效益方面,海淀、朝阳等常住人口多的区改善效益明显大于其他区;东城和西城因为常驻人口较少且 GDP 较高,导致损失改善指数较低;2014 年多数区 PM_{10} 浓度增大,导致改善指数均出现负值或低值. 综合看,城六区和城市发展新区的空气质量改善效益更显著,生态涵养区包含的门头沟、怀柔、平谷、密云和延庆这 5 个区的效益总值相对较低,主要受暴露水平(暴露人口、农业规模和建筑材料面积等)影响.

从时间变化看,大多数区在 2013 年和 2014 年改善效益为负或者不显著;2015 ~ 2017 年改善效益为正,且效益总值逐年上升. 其中延庆、密云、平谷、昌平、通州、石景山和朝阳这 7 个区连续 5 a 改善指数为正,空气质量改善效益明显. 总体看,各区空气质量改善效益主要受该年空气质量改善幅度影响,同时也受其他因素影响,如人口、死亡率、种植面积和建筑面积的变化等.

3 结论

(1)经核算,北京市 2013 年和 2014 年空气质量改善效益为负值(-19.82 亿元和 -18.93 亿元),2015 ~ 2017 年均为正值,分别达到 157.07、152.64 和 223.30 亿元,占当年 GDP 比例分别为 -0.85‰、-0.81‰、6.68‰、6.16‰和 8.77‰. “大气十条”实施 5 a 的总效益合计为 494.26 亿元,占 GDP 总值的 4.11‰. 各年效益主要受该年空气质量改善幅度和其他因素叠加影响,总体来说“大气十条”政策实施期间,北京市空气质量改善效益显著,且历年效益值总体呈上升趋势. 2015 ~ 2017 年北京市空气质量改善明显,改善效益显著.

(2)从改善效益构成看,“大气十条”实施期间北京市人体健康、清洁损失、建筑材料损失和农业损失改善效益分别为 217.31、201.20、73.89 和 1.86 亿元. “大气十条”的实施使得北京市各大气污染物的浓度显著降低,空气质量显著改善,其中人体健康和清洁损失改善效益较大,分别占总值的 43.97%和 40.71%,农业损失改善效益最小,占总值的 0.38%,人体健康、清洁损失、建筑材料损失三者改善效益相加占总值的 99.63%,经济效益明显.

(3)从各区对比看,城六区和城市发展新区的

空气质量改善效益更显著,特别是人口和面积均较大的朝阳和海淀等区;门头沟、怀柔、平谷、密云和延庆等区的效益总值相对较低。大多数区在 2015~2017 年空气质量改善效益显著,改善指数较高,其中延庆区等 7 个区连续 5a 改善指数为正。朝阳、海淀等相对其他区人口较为密集,活动水平较高,大气污染损失的暴露的受体数量也较多,因而空气质量改善带来的效益也较明显。

(4)该评估表明了北京市“大气十条”实施的有效性和必要性。通过 5a 的政策实施,北京市空气质量显著改善,各项污染物浓度显著降低,取得了较好的环境效益。同时,空气质量改善减少了人体健康损失和其他损失,取得了显著的经济效益。

参考文献:

- [1] O'Connor G T, Neas L, Vaughn B, *et al.* Acute respiratory health effects of air pollution on children with asthma in US inner cities[J]. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 2008, **121**(5): 1133-1139. E1.
- [2] 廖纪萍,王广发. 大气污染与呼吸系统疾病[J]. *中国医学前沿杂志(电子版)*, 2014, **6**(2): 22-25.
- [3] 吴筱音,李国星,王旭英,等. 北京市大气污染与呼吸系统疾病死亡的相关性—基于卫星遥感数据的时空分析[J]. *北京大学学报(医学版)*, 2017, **49**(3): 409-417.
Wu X Y, Li G X, Wang X Y, *et al.* Correlation study between respiratory death and airborne particles in Beijing: spatiotemporal analysis based on satellite remote sensing data[J]. *Journal of Peking University (Health Sciences)*, 2017, **49**(3): 409-417.
- [4] 严俊. 兰州城区大气污染与居民呼吸、循环系统疾病日住院人数关系的时间序列研究[D]. 兰州:兰州大学, 2010.
Yan J. Time-series analysis of ambient air pollution and daily hospital admissions for system respiratory and circulatory system diseases in the urban area of Lanzhou[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2010.
- [5] Yang G H, Wang Y, Zeng Y X, *et al.* Rapid health transition in China, 1990-2010: findings from the Global Burden of Disease Study 2010[J]. *The Lancet*, 2013, **381**(9882): 1987-2015.
- [6] Zhang Q, Jiang X J, Tong D, *et al.* Transboundary health impacts of transported global air pollution and international trade[J]. *Nature*, 2017, **543**(7647): 705-709.
- [7] Xu P, Chen Y F, Ye X J. Haze, air pollution, and health in China[J]. *The Lancet*, 2013, **382**(9910): 2067.
- [8] World Bank, Institute for Health Metrics and Evaluation. The cost of air pollution: strengthening the economic case for action[R]. Washington, DC, USA: World Bank, 2016.
- [9] Chen Z, Wang J N, Ma G X, *et al.* China tackles the health effects of air pollution[J]. *The Lancet*, 2013, **382**(9909): 1959-1960.
- [10] 马盼,李若麟,赵笑颜,等. 北京市空气质量指数与气象条件的关系及其对呼吸系统疾病的滞后影响[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2017, **53**(3): 388-393.
Ma P, Li R L, Zhao X Y, *et al.* The lag effect of AQI on the number of emergency room visits for respiratory diseases and its relationship with meteorological conditions in Beijing City[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2017, **53**(3): 388-393.
- [11] 田依洁. 北京市呼吸系统疾病与气象因素及空气质量关系的研究[D]. 兰州:兰州大学, 2018.
- Tian Y J. Research on the relationship between respiratory diseases and meteorological factors and air quality in Beijing[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018.
- [12] Vu T V, Shi Z B, Cheng J, *et al.* Assessing the impact of clean air action on air quality trends in Beijing using a machine learning[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(17): 11303-11314.
- [13] Li H Y, Cheng J, Zhang Q, *et al.* Rapid transition in winter aerosol composition in Beijing from 2014 to 2017: response to clean air actions[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(17): 11485-11499.
- [14] 王金南,雷宇,宁森. 改善空气质量的中国模式:“大气十条”实施与评价[J]. *环境保护*, 2018, **46**(2): 7-11.
Wang J N, Lei Y, Ning M. Chinese model for improving air quality: an assessment of action plan of air pollution prevention and control[J]. *Environmental Protection*, 2018, **46**(2): 7-11.
- [15] 武卫玲,薛文博,王燕丽,等.《大气污染防治行动计划》实施的环境健康效果评估[J]. *环境科学*, 2019, **40**(7): 2961-2966.
Wu W L, Xue W B, Wang Y L, *et al.* Health benefit evaluation for air pollution prevention and control action Plan in China[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(7): 2961-2966.
- [16] 蔡春光,郑晓瑛. 改善空气质量健康效益的非市场价值评估[J]. *环境科学研究*, 2007, **20**(4): 150-154.
Cai C G, Zheng X Y. Application of contingent valuation method in valuing health gains from air quality improvement[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2007, **20**(4): 150-154.
- [17] 张翔,戴瀚程,靳雅娜,等. 京津冀居民生活用煤“煤改电”政策的健康与经济效应评估[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2019, **55**(2): 367-376.
Zhang X, Dai H C, Jin Y N, *et al.* Evaluation of health and economic benefits from “coal to electricity” policy in the residential sector in the Jing-Jin-Ji region[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2019, **55**(2): 367-376.
- [18] 王金南,马国霞,於方,等. 2015 年中国经济—生态生产总值核算研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2018, **28**(2): 1-7.
Wang J N, Ma G C, Yu F, *et al.* Study on China's gross economic-ecological product accounting in 2015[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2018, **28**(2): 1-7.
- [19] 於方,王金南,曹东,等. 中国环境经济核算技术指南[M]. 北京:中国环境科学出版社, 2009.
Yu F, Wang J N, Cao D, *et al.* Guideline for Chinese environmental and economic accounting[M]. Beijing: China Environmental Sciences Press, 2009.
- [20] Pope III C A. Epidemiology of fine particulate air pollution and human health: biologic mechanisms and who's at risk? [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2000, **108**(S4): 713-723.
- [21] 谢元博,陈娟,李巍. 雾霾重污染期间北京居民对高浓度 PM_{2.5}持续暴露的健康风险及其损害价值评估[J]. *环境科学*, 2014, **35**(1): 1-8.
Xie Y B, Chen J, Li W. An assessment of PM_{2.5} related health risks and impaired values of Beijing residents in a consecutive high-level exposure during heavy haze days[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(1): 1-8.
- [22] Wang Z X, Wei W. Effects of modifying industrial plant configuration on reducing air pollution-induced agricultural loss[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, **277**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124046.
- [23] 冯川萍. 大气污染对建筑物的危害及破坏[J]. *建筑科学*, 2008, **24**(3): 182-184.

- [24] 李芳. 酸雨对建筑材料的影响及防治研究综述[J]. 污染防治技术, 2010, **23**(1): 67-69.
Li F. A review of the influence and its prevention of acid rain to building materials[J]. Pollution Control Technology, 2010, **23**(1): 67-69.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 赵越. 大气污染对城市居民的健康效应及经济损失研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2007.
Zhao Y. Study on health effects and economic loss on urban citizens caused by air pollution[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2007.
- [28] 王金南, 蒋洪强. 环境规划学[M]. 北京: 中国环境出版社, 2014.
Wang J N, Jiang H Q. Environmental planning[M]. Beijing: China Environment Publishing Group, 2014.
- [29] 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.
- [30] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. 2019 中国卫生健康统计年鉴[M]. 北京: 中国协和医科大学出版社, 2019.
- [31] 戴燕宁. 大气污染对农作物的影响[J]. 辽宁科技学院学报, 2011, **13**(1): 15-17.
Dai Y N. Impact of polluted air on crops[J]. Journal of Liaoning Institute of Science and Technology, 2011, **13**(1): 15-17.
- [32] 李新宇, 陈刚才, 吉方英, 等. 重庆市主城区建筑材料暴露存量及大气污染损失价值量核算[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2010, **32**(1): 94-99.
Li X Y, Chen G C, Ji F Y, et al. Estimation of exposed stock of building materials and air pollution-caused economic losses in the main urban area of Chongqing [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2010, **32**(1): 94-99.
- [33] 诺曼·布拉德伯恩, 希摩·萨德曼, 布莱恩·万辛克. 赵锋, 沈崇麟, 译. 问卷设计手册: 市场研究、民意调查、社会调查、健康调查指南[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2010.
- [34] 北京市统计局, 国家统计局北京调查总队. 北京区域统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2013-2018.
- [35] 北京市生态环境局. 北京市生态环境状况公报[R]. 北京: 北京市生态环境局, 2012-2017.
- [36] 北京市统计局, 国家统计局北京调查总队. 北京统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2013-2018.
- [37] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2013-2018.
- [38] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. 中国卫生健康统计年鉴[M]. 北京: 中国协和医科大学出版社, 2013-2018.

CONTENTS

Advances and Challenges in Biosafety Research for Urban Environments	SU Jian-qiang, AN Xin-li, HU An-yi, <i>et al.</i> (2565)
Key Problems and Novel Strategy of Controlling Emerging Trace Organic Contaminants During Municipal Wastewater Reclamation	WANG Wen-long, WU Qian-yuan, DU Ye, <i>et al.</i> (2573)
Mechanisms Summary and Potential Analysis of EPS as a Flame Retardant	HAO Xiao-di, ZHAO Zi-cheng, LI Ji, <i>et al.</i> (2583)
Concentrations, Sources, and Health Risks of PM _{2.5} Carrier Metals in the Beijing Urban Area and Suburbs	ZHOU An-qi, LIU Jian-wei, ZHOU Xu, <i>et al.</i> (2595)
MAIAC AOD and PM _{2.5} Mass Concentrations Characteristics and Correlation Analysis in Beijing-Tianjin-Hebei and Surrounding Areas	JIN Jian-nan, YANG Xing-chuan, YAN Xing, <i>et al.</i> (2604)
Formation and Prevention of Secondary Nitrate in PM _{2.5} in Tianjin	XIAO Zhi-mei, WU Ting, WEI Yu-ting, <i>et al.</i> (2616)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nitro Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} of Nanjing, China	FU Yin-yin, WEN Hao-zhe, WANG Xiang-hua, <i>et al.</i> (2626)
Spatio-temporal Patterns and Potential Sources of Absorbing Aerosols in the Fenwei Plain	LIU Min-xia, LI Liang, YU Rui-xin, <i>et al.</i> (2634)
Sources Apportionment of Oxygenated Volatile Organic Compounds (OVOCs) in a Typical Southwestern Region in China During Summer	CHEN Mu-lan, WANG Sai-nan, CHEN Tian-shu, <i>et al.</i> (2648)
Aqueous-phase Oxidation of Dissolved Organic Matter (DOM) from Extracts of Ambient Aerosols	TAO Ye, CHEN Yan-tong, LI Nan-wang, <i>et al.</i> (2659)
Changes and Potential Sources of Atmospheric Black Carbon Concentration in Shanghai over the Past 40 Years Based on MERRA-2 Reanalysis Data	CAO Shan-shan, DUAN Yu-sen, GAO Chan-chan, <i>et al.</i> (2668)
Spatio-Temporal Evolution Characteristics and Source Apportionment of O ₃ and NO ₂ in Shijiazhuang	WANG Shuai, NIE Sai-sai, FENG Ya-ping, <i>et al.</i> (2679)
Applying Photochemical Indicators to Analyze Ozone Sensitivity in Handan	NIU Yuan, CHENG Shui-yuan, OU Sheng-ju, <i>et al.</i> (2691)
Spatiotemporal Distribution of Aerosol Optical Depth Based on Landsat Data in the Hinterland of the Guanzhong Basin and Its Relationship with Urbanization	ZHENG Yu-rong, WANG Xu-hong, ZHANG Xiu, <i>et al.</i> (2699)
Multidimensional Verification of Anthropogenic VOCs Emissions Inventory Through Satellite Retrievals and Ground Observations	WANG Yue, WEI Wei, REN Yun-ting, <i>et al.</i> (2713)
Estimation of the SOA Formation Potential of the National Trunk Highway in Central Plains Urban Agglomeration	WANG Na-ping, LI Hai-ping, ZHANG Fan (2721)
Economic Benefit of Air Quality Improvement During Implementation of the Air Pollution Prevention and Control Action Plan in Beijing	LU Ya-ling, FAN Zhao-yang, JIANG Hong-qiang, <i>et al.</i> (2730)
Emission Performance Quantitative Evaluation and Application of Industrial Air Pollution Sources	LI Ting-kun, FENG Yin-chang, WU Jian-hui, <i>et al.</i> (2740)
Screening and Sequencing High-risk Antibiotics in China's Water Environment Based on Ecological Risks	ZHOU Li, LIU Shan, GUO Jia-hua, <i>et al.</i> (2748)
China's Reuse Water Development and Utilization Potential Based on the RDA-REM Model	ZHENG Jin-tao, MA Tao, LIU Jiu-fu, <i>et al.</i> (2758)
Characteristic Analysis of SWAT Model Parameter Values Based on Assessment of Model Research Quality	RONG Yi, QIN Cheng-xin, DU Peng-fei, <i>et al.</i> (2769)
Sensitivity Analysis of Boundary Load Reduction in a Large Shallow Lake Water Quality Model	WANG Ya-ning, LI Yi-ping, CHENG Yue, <i>et al.</i> (2778)
Comparison of Available Nitrogen and Phosphorus Characteristics in the Land-Water Transition Zone of Different Watersheds and Their Environmental Significance	ZHU Hai, YUAN Xu-yin, YE Hong-meng, <i>et al.</i> (2787)
Analysis of Spatial-Temporal Variation Characteristics of Potential Non-point Source Pollution Risks in the Upper Beiyun River Basin Using Different Weighting Methods	LI Hua-lin, ZHANG Jian-jun, ZHANG Yao-fang, <i>et al.</i> (2796)
Characteristics of Runoff-related Total Nitrogen and Phosphorus Losses Under Long-term Fertilization and Cultivation on Purple Soil Sloping Croplands	WU Xiao-yu, LI Tian-yang, HE Bing-hui (2810)
Hydrochemistry and Its Controlling Factors and Water Quality Assessment of Shallow Groundwater in the Weihe and Jinghe River Catchments	LIU Xin, XIANG Wei, SI Bing-cheng (2817)
Characteristics and Drivers of Dissolved Carbon Dioxide and Methane Concentrations in the Nantaoxi River System in the Upper Reaches of the Taihu Lake Basin During Summer-Autumn	LIANG Jia-hui, TIAN Lin-lin, ZHOU Zhong-yu, <i>et al.</i> (2826)
Nitrogen Distribution and Inorganic Nitrogen Diffusion Flux in a Shallow Lake During the Low Temperature Period: A Case Study of the Baiyangdian Lake	WEN Yan, SHAN Bao-qing, ZHANG Wen-qiang (2839)
Effects of Sediment Microenvironment on Sedimentary Phosphorus Release Under Capping	CHEN Shu-tong, LI Da-peng, XU Chu-tian, <i>et al.</i> (2848)
Coadsorption of Heavy Metal and Antibiotic onto Humic Acid from Polder River Sediment	XUE Xiang-dong, YANG Chen-hao, YU Jian-lin, <i>et al.</i> (2856)
Effects of Two PPCPs on Nitrification in Sediments in the Yarlung Zangbo River	LING Xin, XU Hui-ping, LU Guang-hua (2868)
Wastewater Treatment Effects of Ferric-carbon Micro-electrolysis and Zeolite in Constructed Wetlands	ZHAO Zhong-jing, HAO Qing-ju, ZHANG Yao-yu, <i>et al.</i> (2875)
CDS-BOC Nanophotocatalyst Activating Persulfate Under Visible Light for the Efficient Degradation of Typical PPCPs	LEI Qian, XU Lu, AI Wei, <i>et al.</i> (2885)
Preparation of pg-C ₃ N ₄ /BiOBr/Ag Composite and Photocatalytic Degradation of Sulfamethoxazole	YANG Li-wei, LIU Li-jun, XIA Xun-feng, <i>et al.</i> (2896)
Sodium Alginate Loading of Zero-Valent Iron Sulfide for the Reduction of Cr(VI) in Water	WANG Xu, YANG Xin-nan, HUANG Bi-juan, <i>et al.</i> (2908)
Adsorption Mechanism of Cadmium by Superparamagnetic Nano-Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ Functionalized Materials	ZHANG Li-zhi, YI Ping, FANG Dan-dan, <i>et al.</i> (2917)
Pollution Characteristics and Removal of Typical Pharmaceuticals in Hospital Wastewater and Municipal Wastewater Treatment Plants	YE Pu, YOU Wen-dan, YANG Bin, <i>et al.</i> (2928)
Abundance Change of Antibiotic Resistance Genes During PDWW Recycling and Correlations with Environmental Factors	XU Yao-yao, WANG Rui, JIN Xin, <i>et al.</i> (2937)
Simultaneous Domestication of Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (2946)
Long-term Storage and Rapid Activity Recovery of ANAMMOX Granular Sludge	LI Dong, LIU Ming-yang, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (2957)
Migration and Environmental Effects of Heavy Metals in the Pyrolysis of Municipal Sludge	JIANG Yuan-yuan, WANG Yan, DUAN Wen-yan, <i>et al.</i> (2966)
Profiling of Antibiotic Resistance Genes in Different Croplands	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, WANG Jia-ni, <i>et al.</i> (2975)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Manure and Surrounding Soil of Cattle Farms in Ningxia	ZHANG Jun-hua, CHEN Rui-hua, LIU Ji-li, <i>et al.</i> (2981)
Effects of Temperature and Stirring on the Changes of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in Anaerobic Digestion of Dairy Manure	XU Ji-fei, ZHANG Qiu-ping, ZHU Tian-jiao, <i>et al.</i> (2992)
Effects of Wheat Straw-derived Biochar Application on Soil Carbon Content Under Different Tillage Practices	LIU Zhen-jie, LI Peng-fei, HUANG Shi-wei, <i>et al.</i> (3000)
Spatial Patterns of Nitrogen and Phosphorus in Soil and Their Influencing Factors in a Typical Agro-pastoral Ecotone	ZHANG Yan-jiang, WANG Jun-peng, WANG Yu, <i>et al.</i> (3010)
Spatial Distribution Characteristics, Pollution, and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals Around Mercury Mining Areas	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> (3018)
Interaction and Mechanism Between Conditioning Agents and Two Elements in the Soil Enriched with Phosphorus and Cadmium	HUANG Yang, HU Xue-yu, CAO Kun-kun, <i>et al.</i> (3028)
Mechanism of S-allyl-L-cysteine Alleviating Cadmium Stress in Seedling Roots and Buds of Rice Seedlings	CHENG Liu-long, HUANG Yong-chun, WANG Chang-rong, <i>et al.</i> (3037)
Consecutive 4-year Elevated Atmospheric CO ₂ on Shaped Microbial Communities in the Rhizosphere Soil of <i>Robinia pseudoacacia</i> L. Seedlings Grown in Pb-contaminated Soils	JIA Xia, Lkhagvajargal Khadkhurel, ZHAO Yong-hua, <i>et al.</i> (3046)
Biodegradation of Polystyrene by <i>Geobacillus stearothermophilus</i>	XING Rui-zhi, ZHAO Zi-qiang, ZHAO Wen-qi, <i>et al.</i> (3056)
Micro-morphological Characteristics of Particles on Holly and Ligustrum Leaf Surfaces and Seasonal Changes in Bacterial Communities	LI Hui-juan, XU Ai-ling, QIAO Feng-lu, <i>et al.</i> (3063)
Effects of Roxithromycin on Reproduction, Growth, and Anti-oxidation System of <i>Daphnia magna</i>	ZHANG Ling-yu, LIU Jian-chao, LENG Yang, <i>et al.</i> (3074)
Relationship Between Relative Crop Yield/Woody Plant Biomass and Ground-level Ozone Pollution in China	FENG Zhao-zhong, PENG Jin-long (3084)