

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性

张丽娟, 徐杉, 赵峥, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年2月

第42卷 第2期
Vol.42 No.2

目次

2013~2017年中国PM _{2.5} 污染防治的健康效益评估	张梦娇, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 魏煜, 谢刘震 (513)
区域气象条件和减排对空气质量改善的贡献评估	武文琪, 张凯山 (523)
2016年1月京津冀地区大气污染特征与多尺度传输量化评估	姚森, 张哈宇, 王晓琦, 杨书申 (534)
广州市2020年春节期间烟花爆竹燃放对空气质量的影响	裴成磊, 王宇骏, 毕燕茹, 廉秀峰, 周倩妮, 王在华, 马理, 李梅 (546)
长三角地区一次区域污染过程中细颗粒物的来源解析及其光学特性	夏丽, 朱彬, 王红磊, 康汉青 (556)
南京市不同天气过程下颗粒物中水溶性离子分布特征及其来源解析	张杨, 王红磊, 刘安康, 陈魁, 张艺馨, 刘思晗 (564)
天津市冬季气溶胶吸湿因子的粒径分布特征	丁净, 张裕芬, 郑乃源, 张会涛, 余卓君, 李立伟, 元洁, 唐森, 冯银厂 (574)
输送、滞留叠加海上回流的长时间沙尘天气影响判断及贡献分析	张哲, 乔利平, 周敏, 黄丹丹, 安静宇, 郭会琴, 王红丽, 黄成, 董赵鑫, 王书肖 (584)
洛阳市秋冬季PM _{2.5} 中多环芳烃的污染特征、来源解析及健康风险评价	齐静文, 张瑞芹, 姜楠, 李利萍, 苗青青 (595)
郑州市臭氧污染变化特征、气象影响及输送源分析	王旭东, 尹沙沙, 杨健, 袁明浩, 张瑞芹, 李亚松, 卢轩 (604)
基于正交试验的臭氧及其前体物的非线性响应及控制方案	李光耀, 陈强, 郭文凯, 张瑞欣, 夏佳琦 (616)
汽车工业区大气挥发性有机物(VOCs)变化特征及来源解析	叶露, 邵菁菁, 俞华明 (624)
兰州市高分辨率人为源排放清单建立及在WRF-Chem中应用评估	郭文凯, 李光耀, 陈冰, 夏佳琦, 张瑞欣, 刘晓, 朱玉凡, 陈强 (634)
2010~2017年四川省机动车污染物排放趋势分析	李媛, 石嘉诚, 陈军辉, 潘玉瑾, 周虹辉, 范武波, 叶宏, 钱骏, 刘政 (643)
珠江三角洲海陆交互沉积物中镉生物有效性及生态风险评价	王芳婷, 包科, 陈植华, 黄长生, 张彩香, 赵信文, 刘学浩 (653)
乌梁素海流域地表水中全氟化合物分布、来源及其生态风险	史锐, 毛若愚, 张梦, 吕永龙, 宋帅, 赵纪新 (663)
乌梁素海冰盖中微塑料的分布特征及其与盐度、叶绿素a的响应关系	王志超, 杨建林, 杨帆, 杨文焕, 李卫平, 李兴 (673)
张家口清水河拦沙坝对磷输移、滞留的影响	王维, 李叙勇 (681)
三峡水库典型支流磷素赋存形态特征及其成因	杨凡, 王丽婧, 纪道斌, 李虹, 李莹杰, 李鑫, 许杨, 田盼, 吴雅婷 (688)
巢湖沉积物氮磷分布及污染评价	王艳平, 徐伟伟, 韩超, 胡维平 (699)
巢湖南淝河河口底泥污染特征及疏浚决策	杨盼, 杨春晖, 马鑫雨, 尹洪斌 (712)
氧化强化对氢氧化钙原位固磷效果的影响	徐楚天, 李大鹏, 岳薇, 吴宇涵, 孙培荣, 汤尧禹, 黄勇 (723)
降雨径流事件对三峡水库香溪河库湾甲烷释放的影响	陈敏, 许浩震, 王雪竹, 肖尚斌 (732)
典型喀斯特河流-水-气界面二氧化碳交换特性及其营养调控因素	刘睿, 张静, 陈祖胜, 倪茂茂, 刘文胜 (740)
江苏省代表性水源地抗生素及抗性基因赋存现状	王龙飞, 程逸群, 胡晓东, 朱金鑫, 李轶 (749)
尾矿库水体环境抗生素抗性基因的分布特征	黄福义, 朱永官, 苏建强 (761)
涡河流域中部地区地下水化学特征及其成因分析	郑涛, 焦团理, 胡波, 龚建师, 侯香梦, 王赫生 (766)
天津七里海湿地水化学组成及主要离子来源分析	何明霞, 张兵, 夏文雪, 崔旭, 王中良 (776)
秸秆覆盖与氮减施对土壤氮分布及地下水氮污染影响	张万锋, 杨树青, 孙多强, 靳亚红, 姜帅, 刘鹏 (786)
环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性	张丽娟, 徐杉, 赵峰, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟 (796)
浮游植物群落及粒径结构对光吸收特性的影响	黄新, 施坤, 张运林, 朱广伟, 周永强 (808)
松花江干流2014~2019年夏季着生藻类群落结构特征及其对环境因子的响应	于宗灵, 陈威, 赵然, 李中宇, 董英莉, 张蕊, 王业耀, 金小伟 (819)
汛期前后老鹳河干流人类干扰下浮游细菌多样性及功能预测	韩雪梅, 龚子乐, 杨晓明, 李玉英, 陈兆进, 朱会会, 王凡梅 (831)
两种典型PPCPs在潜流人工湿地中的季节性去除效果及降解产物	李超予, 杨怡潇, 张宁, 谢慧君, 胡振, 张建 (842)
人工生态系统对城市河流中抗生素和ARGs的去除	周海东, 黄丽萍, 陈晓萌, 李丹妍, 李昕, 崔锦裕 (850)
紫外氯胺组消毒供水系统中病毒微生物的分布特征	韩雪, 孙坚伟, 张力, 王哲明, 白晓慧 (860)
高炉水渣负载硫化纳米零价铁对水中土霉素的去除	孙秋楠, 张荣斌, 邓曼君, 李远, 王学江 (867)
胺硫改性生物炭对水溶液中不同重金属离子的吸附特性及吸附稳定性	汪存石, 何敏霞, 周峰, 陈靛, 祝建中 (874)
电凝聚氧化耦合工艺的有机物处理特性及去除机制解析	谢新月, 许建军, 张少华, 刘雨果, 金鑫, 金鹏康 (883)
微米零价铁对剩余活性污泥和餐厨垃圾厌氧联合消化的加强效果及机制	陈圣杰, 姚福兵, 皮洲洁, 侯坤杰, 何丽, 李小明, 王东波, 杨麒 (891)
河南省典型工业区周边农田土壤重金属分布特征及风险评价	孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 郑国砥, 乔鹏炜, 卞建林, 陈同斌 (900)
南京市绿地土壤重金属分布特征及其污染评价	陈佳林, 李仁英, 谢晓金, 王红, 徐静, 邵京, 简静, 阿克居里·乌尔曼, 沈嘉, 央宗 (909)
复合改良剂FZB对砷污染土壤的修复效果	丁萍, 贺玉龙, 何欢, 余江 (917)
石灰配施有机物料修复酸性Cd污染稻田	李光辉, 成晴, 陈宏 (925)
叶面喷施纳米MnO ₂ 对水稻富集镉的影响机制	周一敏, 黄雅媛, 刘晓月, 李冰玉, 刘羽翼, 李卓晴, 王薪琪, 雷鸣 (932)
典型喀斯特地区土壤-作物系统镉的富集特征与污染评价	王锐, 邓海, 贾中民, 严明书, 周蛟, 董金秀, 王佳彬, 余飞 (941)
辣椒果实高中低镉累积型对镉的富集、转运特性及在亚细胞分布特点比较	邵晓庆, 贺章味, 徐卫红 (952)
4种草本植物对镉的富集特征	陈迪, 李伯群, 杨永平, 和兆荣, 李雄 (960)
不同施肥条件下紫色土旱坡地可溶性有机碳流失特征	熊子怡, 郑杰炳, 王丹, 王富华, 王鑫燕, 王子芳, 高明 (967)
降雨变化对荒漠草原植物群落多样性与土壤C:N:P生态化学计量特征的影响	高江平, 赵锐锋, 张丽华, 王军锋, 谢忠奎 (977)
水分管理对水稻生长与根际激发效应的影响特征	林森, 肖谋良, 江家彬, 魏亮, 李科林, 刘守龙, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (988)
铜胁迫对小麦根系微域微生物群落的影响	葛艺, 徐民氏, 徐绍辉, 徐艳 (996)
臭氧污染、氮沉降和干旱胁迫交互作用对杨树叶和细根非结构性碳水化合物的影响	李品, 周慧敏, 冯兆忠 (1004)
颗粒物有机源示踪物的筛选与应用综述	李源遽, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鸷 (1013)
《环境科学》征订启事 (522) 《环境科学》征稿简则 (722) 信息 (748, 899, 924)	

2013 ~ 2017 年中国 PM_{2.5} 污染防治的健康效益评估

张梦娇^{1,2}, 苏方成^{1,2}, 徐起翔^{2,3*}, 张瑞芹^{2,3}, 魏煜^{1,2}, 谢刘震^{1,2}

(1. 郑州大学化学学院, 郑州 450001; 2. 郑州大学环境科学研究院, 郑州 450001; 3. 郑州大学生态与环境学院, 郑州 450001)

摘要: 为了评估中国大气环境治理带来的健康效益, 确定健康风险评估的主要驱动因素, 本文使用结合人群活动因子的综合暴露响应模型, 对中国东部和中部地区 2013 ~ 2017 年可归因于 PM_{2.5} 的健康经济效益进行了估算, 并量化了人口总量、人口老龄化、基准死亡率和 PM_{2.5} 暴露浓度这 4 个因素对健康负担的影响贡献。结果表明, 2013 ~ 2017 年研究区域内 PM_{2.5} 人口加权浓度下降了 28.73%, PM_{2.5} 年均暴露浓度在 35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 及以下的人口比例从 11.23% 增加到 27.91%。PM_{2.5} 浓度下降使得 2017 年归因死亡数下降了 14.43%, 可避免经济损失为 558.41 亿元。当 PM_{2.5} 暴露浓度达到国家二级标准 (35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、一级标准 (15 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 和世界卫生组织建议标准 (10 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 时, 归因死亡人数较基准年 (2017 年) 将减少 8.22%、55.05% 和 79.36%, 避免经济损失 319.85、2137.38 和 3081.97 亿元。人口总量、人口老龄化、基准死亡率和 PM_{2.5} 暴露浓度这 4 个因素对健康负担的贡献分别为 -2.69%、-12.38%、1.66% 和 14.57%, 其中污染物浓度降低是减轻健康负担的主导因素。中国的大气污染治理取得了显著成效, 但在高 PM_{2.5} 浓度和高人口密度的地区, 大气污染导致的健康负担仍然很重, 需要实施更加严格的空气污染控制政策。

关键词: PM_{2.5}; 健康风险评估; 驱动因素; 暴露因子; 大气污染防治行动计划

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)02-0513-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202007012

Health Impact Attributable to the Control of PM_{2.5} Pollution in China During 2013-2017

ZHANG Meng-jiao^{1,2}, SU Fang-cheng^{1,2}, XU Qi-xiang^{2,3*}, ZHANG Rui-qin^{2,3}, WEI Yu^{1,2}, XIE Liu-zhen^{1,2}

(1. College of Chemistry, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Research Institute of Environmental Science, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. School of Ecology and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: To evaluate the health benefits brought about by air environmental treatment and determine the main drivers of health risk, we calculated the health and economic benefits attributed to PM_{2.5} control in Eastern and Central China from 2013 to 2017 by combining PM_{2.5} concentrations with a human activity enhanced exposure-response model. The relative contributions of changes in four factors related to the PM_{2.5} health burden were also quantified, namely total population, population aging, baseline mortality rates, and ambient exposure. The results show that the population weighted PM_{2.5} concentration decreased by 28.73% and the proportion of the population exposed to annual PM_{2.5} concentrations lower than or equal to 35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ increased from 11.23% to 27.91% across the study area during this period. Avoided deaths were decreased to 14.43%, which equates to avoided economic losses of approximately 559 billion RMB. If PM_{2.5} concentration meets the Chinese Ambient Air Quality Standard Grade II (35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) or Grade I (15 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), or the World Health Organization Air Quality Guidelines (AQG) standards (10 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), a 8.22%, 55.05%, and 79.36% reduction in the total deaths could be achieved in the base year (2017) with equivalent total economic benefits of approximately 319, 2137, and 3081 billion RMB, respectively. Total population, population aging, baseline mortality rates, and PM_{2.5} concentrations contributed -2.69%, -12.38%, 1.66%, and 14.57% to PM_{2.5}-related deaths. Overall, during the study period, the reduction in PM_{2.5} concentrations has been the main factor contributing to the reduction in the public health burden. China has implemented significant air pollution control measures; however, the health burden associated with high PM_{2.5} concentrations in densely populated areas is still extremely high, requiring an aggressive air pollution control strategy.

Key words: PM_{2.5}; health risk assessment; driving factor; exposure factor; air pollution prevention and control action plan

随着中国快速的经济增长和工业发展, 大气污染问题日益突出。PM_{2.5} 是中国主要的大气污染物之一, 也是长期暴露研究中结果最一致的、健康危害最明显的大气污染物之一^[1,2]。在我国大部分地区, PM_{2.5} 的浓度一直较高, 2014 ~ 2016 年分别有 95%、87% 和 81% 的人群暴露于超过国家二级标准 (GB 3095-2012) 规定的 35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的环境中, 几乎没有人的暴露环境能够达到世界卫生组织 (WHO) 空气质量

指导 (air quality guidelines, AQG) 建议的 10 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ^[3]。大量的流行病学研究表明, 长期暴露于高浓度的 PM_{2.5} 环境中, 可显著增加人群, 尤其是生

收稿日期: 2020-07-02; 修订日期: 2020-07-28

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC0212400); 国家自然科学基金项目 (51808510)

作者简介: 张梦娇 (1995 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气环境污染与防治, E-mail: zhangmengjiao95@foxmail.com

* 通信作者, E-mail: xuqixiang@zzu.edu.cn

活在中低收入地区人群的多种疾病发病率和死亡率^[4]。2015 年全球疾病负担 (global burden of disease, GBD) 研究报告显示, $PM_{2.5}$ 已经成为全球第五大致死因素。2015 年全球可归因于 $PM_{2.5}$ 暴露的死亡人数为 420 万人, 其中中国为 110 万人, 占比超过四分之一。中国归因于 $PM_{2.5}$ 污染的死亡率为每 10 万人 84.3 人 (95% CI: 71.5, 96.7), 是美国 (每 10 万人 18.5 人, 95% CI: 14.2, 23.7) 的 4 倍多^[5]。

2013 年, 国务院颁布了《大气污染防治行动计划》^[6] 来治理大气污染, 改善空气质量。治理的重点主要集中在东部和中部地区, 要求与基准年 (2013 年) 相比, 2017 年京津冀、长三角和珠三角地区的 $PM_{2.5}$ 浓度分别下降 25%、20% 和 15%。东部和中部地区是经济发达、人口密集的区域, 虽然面积仅占中国总面积的 20.26%, 但 GDP 和人口分别占中国总量的 72.35% 和 64.93%。因此, 评估该区域内由于空气质量变化而带来的健康及经济效益尤为必要。已有很多学者对我国由 $PM_{2.5}$ 导致的健康负担进行了研究, 武卫玲等^[7] 对全国 338 个城市实施大气十条带来的健康效益进行了评估, 戴海夏等^[8] 评价了上海市实施清洁空气行动计划后 $PM_{2.5}$ 浓度变化及健康经济效益, 曾贤刚等^[9] 估计了 2017 年中国 $PM_{2.5}$ 污染导致的疾病负担, 薛涛等^[10] 评估了 2013~2017 年中国 $PM_{2.5}$ 暴露及其健康影响的变化情况。

以上的研究或者使用环境 $PM_{2.5}$ 浓度或者使用人口加权的 $PM_{2.5}$ 浓度进行健康负担计算, 但是这些浓度并不等同于人群真正接触的 $PM_{2.5}$ 浓度。根据全美人群行为模式调查研究的结果, 平均每日人群处于室内的时间是室外的 4 倍^[11], 而室内的 $PM_{2.5}$ 浓度通常要低于室外^[12], 因此需要引入人群活动模式来更好地反映人群暴露特征, 进行更精细化的健康暴露评估。同时, 除了 $PM_{2.5}$ 暴露浓度, 健康效应的评估还受到人口总量、老龄化程度和基线死亡率等因素的影响。目前的研究更多地集中在 $PM_{2.5}$ 浓度降低带来的健康收益上, 很少关注到这些因素的作用, 不利于精细化空气质量管理政策的制定。

为了更好地评价中国大气污染防治带来的健康效益, 本文使用结合人群活动因子的综合暴露响应模型, 对中国东部和中部地区 2013~2017 年可归因于 $PM_{2.5}$ 的健康效应进行评估。并且量化了人口总量、老龄化程度、基线死亡率和 $PM_{2.5}$ 浓度这 4 个因素对健康负担评估的相对影响, 旨在为大气污染的差异化管控及污染治理的成本效益分析提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域

本文选取的研究区域为中国东部和中部地区, 东部地区包括河北、北京、天津、山东、江苏、浙江、上海、广东和福建, 中部地区包括山西、河南、安徽、湖北、湖南和江西 (图 1)。由于台湾、香港和澳门地区资料暂缺, 文中不做讨论。

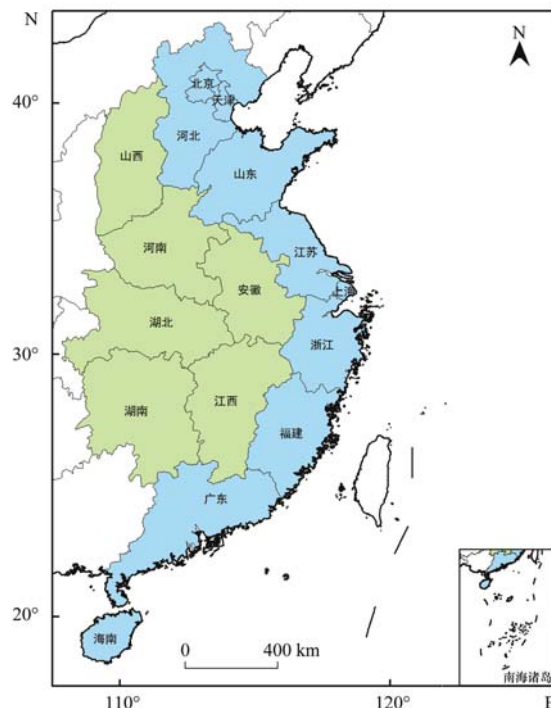


图 1 研究区域示意

Fig. 1 Location of the study area

1.2 $PM_{2.5}$ 浓度

本研究使用的 $PM_{2.5}$ 浓度数据来自 Lin 等^[13] 开发的 $0.3^\circ \times 0.3^\circ$ 分辨率的卫星数据集, 卫星反演结果采用地面监测数据进行校正, 已被应用于多项研究中^[14,15], 具体技术方法详见文献^[13,16]。

1.3 人口、基线死亡率和暴露因子

本文使用的网格化人口数据来自中国科学院资源与环境科学数据中心 2010 年 1 km 网格人口数据集, 将其分辨率调整为 $0.3^\circ \times 0.3^\circ$, 与空气质量数据的网格大小一致。然后根据文献^[17] 的人口统计数据, 通过增长率预测方法估算得到 2013~2017 年的人口空间分布。各年龄组的基线死亡率来自文献^[18], 省级基线死亡率参考 Zhou 等^[19] 的研究。本文引入户外活动时间及室内外 $PM_{2.5}$ 浓度比两个参数来精确健康负担的计算结果, 各省份的户外活动时间数据来自文献^[20], 室内外 $PM_{2.5}$ 浓度比值使用 Zhou 等^[12] 的研究结果。

1.4 健康效应评估

本研究使用 Burnett 等^[21] 开发的综合暴露响应

模型 (integrated exposure-response, IER) 计算 ≥ 25 岁成年人群的 PM_{2.5} 相关健康负担. IER 模型于 GBD2010 报告中首次提出后, 已被广泛应用于 PM_{2.5} 健康效应的相关研究^[22~24]. 选取缺血性心脏病 (ischemic heart disease, IHD)、慢性阻塞性肺病 (chronic obstructive pulmonary disease, COPD)、肺癌 (lung cancer, LC) 和中风 (stroke, STK) 这 4 个成人主要致死疾病作为健康终点. 相对风险 (relative risk, RR) 通过公式 (1) 进行计算:

$$RR_{IER}(Z) = \begin{cases} 1, & Z \leq Z_{cf} \\ 1 + \alpha \{1 - \exp[-\gamma(Z - Z_{cf})^\delta]\}, & Z > Z_{cf} \end{cases} \quad (1)$$

式中, Z 为暴露浓度 ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), Z_{cf} 为不同健康终点对应的阈值, 当浓度小于等于阈值时认为相对风险为 1, 不会产生额外健康风险, 当浓度超过阈值时, 相对风险随浓度升高而增加. α 、 γ 和 δ 是根据来自环境空气污染、二手烟、室内空气污染和吸烟的研究数据, 针对不同健康终点而拟合的暴露响应曲线分布的参数.

本文结合人群的室外活动时间和室内外 PM_{2.5} 比值对人群实际暴露浓度进行了精确计算:

$$Z = Z_0 \times \frac{t_i + (24 - t_i) \times \lambda}{24} \quad (2)$$

式中, Z_0 为卫星反演的 PM_{2.5} 浓度, t_i 为网格 i 的人群室外活动时间, $\lambda = 0.79$ 为室内外 PM_{2.5} 浓度比值. 由公式 (3) 计算归因死亡数 ΔMor :

$$\begin{aligned} \Delta\text{Mor} &= y_0 \times \text{Pop} \times \left(\frac{RR - 1}{RR} \right) \\ &= y_0 \times \text{Pop} \times \text{AF} \end{aligned} \quad (3)$$

式中, y_0 代表基线死亡率, Pop 为人口, $(RR - 1)/RR$ 代表归因分数 (attributable fraction, AF), 用于衡量风险因素对疾病或死亡率的贡献.

此外, 本研究还计算了当 PM_{2.5} 浓度达到国家二级标准 ($35 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)、一级标准 ($15 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) 和 WHO 的 AQG ($10 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) 标准时的健康效益和经济效益. 早逝造成的经济损失使用统计寿命价值法 (value of a statistical life, VSL) 进行评估, 选用的 VSL 值为 524 万元 (95% CI: 351, 698)^[25].

1.5 各因子对健康负担的相对贡献

健康负担的变化主要是由 PM_{2.5} 暴露浓度、人口总量、老龄化程度和基线死亡率这 4 个因子综合决定. 为了量化关键驱动因素的影响, 本研究进行了 4 次敏感性分析, 其中一个因子使用 2017 年的值, 其他 3 个因子使用 2013 年的值, 以此获得每个因子的单独影响. 由于各因子与健康负担的关系是非线性的, 各因子的作用之和不等于他们的共同作用, 因此

使用敏感性分析结果与 2013 年基准情景 (所有因子都使用 2013 年的值) 结果的差值, 代表各因素对健康负担的相对贡献.

2 结果与讨论

2.1 PM_{2.5} 暴露评估

图 2 显示了 2013~2017 年 PM_{2.5} 浓度的时空分布变化, 在整个研究区域内 PM_{2.5} 浓度呈现出显著下降的趋势. 2013、2014、2015、2016 和 2017 年的 PM_{2.5} 人口加权平均浓度分别为 62.30、58.23、52.60、47.72 和 44.40 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. 与 2013 年相比, 2017 年 PM_{2.5} 人口加权浓度下降了 28.73%, 大多数省份的 PM_{2.5} 污染都有不同程度的改善, 尤其是北京、天津、河北、河南和山西, 这些地区的 PM_{2.5} 浓度降幅超过 30%, 海南、福建和广东部分地区的 PM_{2.5} 年均浓度小于等于 35 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. 在此期间, PM_{2.5} 污染的空间分布相对保持稳定, 重污染主要集中在北京、天津、河北、河南、山东和湖北的部分区域.

2013~2017 年, PM_{2.5} 年均暴露浓度在 35 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 以下的人口比例从 11.23% 增加到 27.91%, PM_{2.5} 年均暴露浓度在 70 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上的人口比例从 36.65% 降低到 4.20%. 从图 3 可以看出, 高污染地区明显减少, 但大部分人群的暴露环境仍然超过国家二级标准, 而且直到 2017 年也仅有 0.06% 的人群 PM_{2.5} 暴露环境能够满足国家一级标准, 没有人群的暴露环境能够达到 AQG 标准. 京津冀地区作为大气污染的重灾区, PM_{2.5} 浓度一直高于研究区域平均水平, 该地区有 98.66% (2013 年)、98.13% (2014 年)、97.22% (2015 年)、94.46% (2016 年) 和 91.50% (2017 年) 的人群生活在 PM_{2.5} 年均浓度超过国家二级标准的环境中. 广东是 3 个大气污染重点治理区域中 PM_{2.5} 年均浓度最低的, 2017 年 76.39% 的人群 PM_{2.5} 暴露浓度满足国家二级标准.

2.2 健康效应评估

使用结合暴露因子的 IER 模型计算的 2013、2015 和 2017 年研究区域内可归因于 PM_{2.5} 的健康负担分别为 73.92 万人 (95% CI: 33.24, 102.76)、77.76 万人 (95% CI: 34.84, 110.23) 和 74.10 万人 (95% CI: 33.36, 106.69). 从图 4 可以看出, PM_{2.5} 相关的死亡分布呈现出明显的空间差异性, 大部分地区的网格死亡人数小于 5 人, 而像北京、天津、上海、广州、河南和河北等地区由于污染严重或人口密度大, 网格死亡人数可以超过 100 人.

2013~2017 年期间, 研究区域内可归因于 PM_{2.5} 的死亡人数在中国总死亡人数中的占比从 7.90% 减少到 7.09%, 在 4 个健康终点总死亡数中

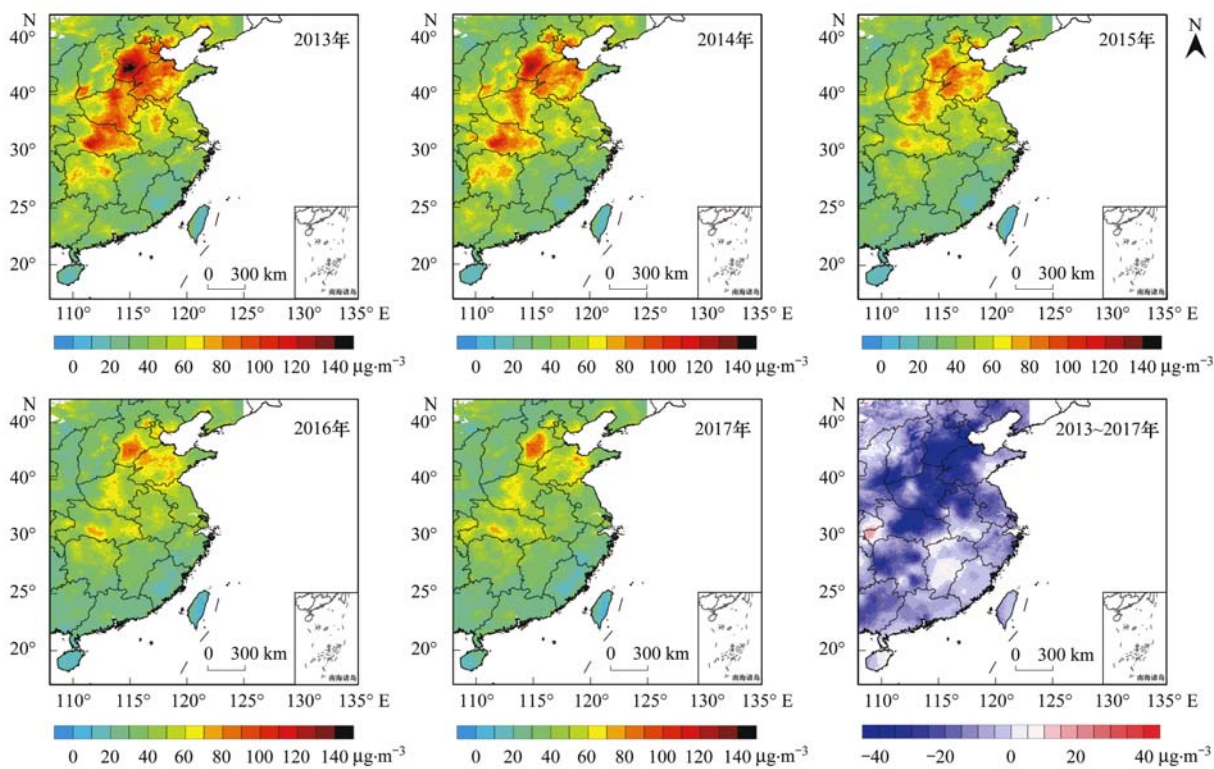


图2 2013~2017年PM_{2.5}年均浓度及2017和2013年PM_{2.5}浓度差值

Fig. 2 Annual PM_{2.5} concentrations and changes in PM_{2.5} concentrations during the period 2013-2017

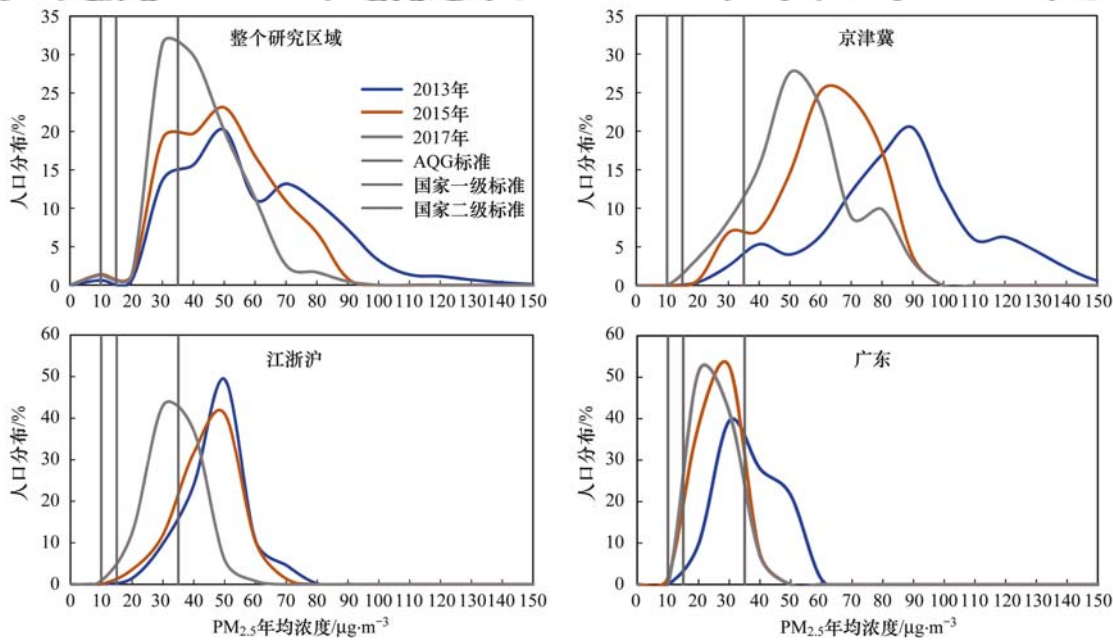


图3 人口在不同污染区间的分布

Fig. 3 Distribution of grid level population with various ambient PM_{2.5} concentrations

的占比从15.12%降低到13.43% [图5(a)]. 2017年较2013年,可归因于PM_{2.5}的总死亡人数变化不大,但死亡率由127.68/10万人降为119.60/10万人,死于IHD的人数增加了3.26万人,死于STK、COPD和LC的人数分别减少了2.02、1.04和0.02万人[图5(c)]. STK占比仍然最大为51.66%,其次是IHD占比31.34%,LC占比9.81%,COPD占比

7.18%. 2013年PM_{2.5}相关死亡人数最多的5个省份是河南11.17万人(95% CI: 5.13, 15.16)、山东10.83万人(95% CI: 4.99, 14.88)、河北10.14万人(95% CI: 4.72, 13.61)、广东5.97万人(95% CI: 2.68, 8.69)和湖北5.46万人(95% CI: 2.42, 7.44). 这5个省份的死亡人数分别占到了研究区域总死亡人数的15.16%、14.70%、13.76%、

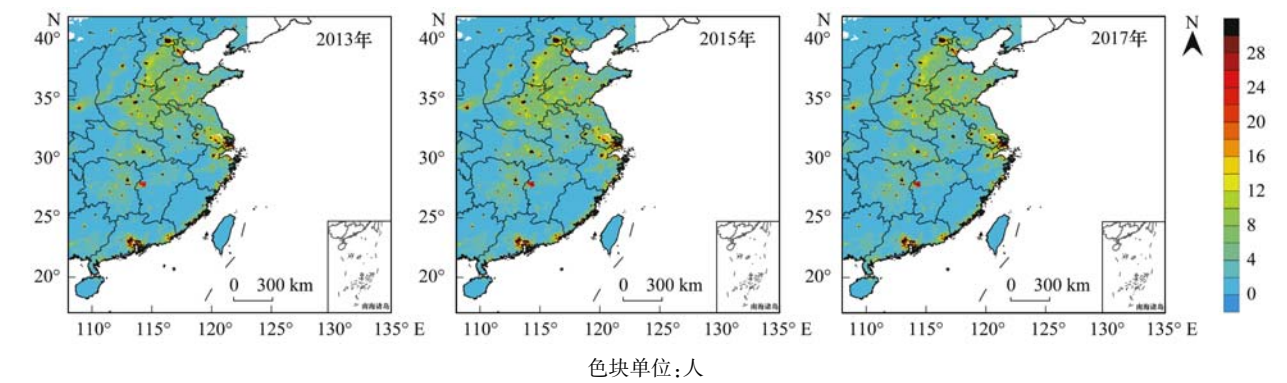


图 4 可归因于 PM_{2.5} 的死亡人数分布

Fig. 4 Distribution of deaths attributable to PM_{2.5}

9.10% 和 7.41%, 共计 58.94%。这些省份中,除广东省外,其他省份均为 PM_{2.5} 污染严重区域。广东省 2017 年常住人口达到了 1.1 亿,是中国常住人口最多的省份,因此健康负担较重。2013 年 PM_{2.5} 相关健康负担最小的 5 个地区是海南 0.26 万人 (95% CI: 0.12, 0.40)、上海 0.93 万人 (95% CI: 0.40, 1.32)、天津 1.30 万人 (95% CI: 0.64, 1.79)、福建 1.63 万人 (95% CI: 0.70, 2.47) 和北京 1.89 万人 (95% CI: 0.91, 2.60)。2017 年 PM_{2.5} 相关死亡人数最多的 5 个省份仍然是河南、山东、河北、广东和湖北,与 2013 年相比 PM_{2.5} 相关死亡人数减少超过 1 千人的省份是山西、河南、安徽和湖南。

如果考虑到人口因素,结果则有所不同。表 1

汇总了各省可归因于 PM_{2.5} 的死亡人数、死亡率和单位面积死亡人数,结果显示,虽然广东的总死亡人数较高,但死亡率和单位面积死亡人数较低,健康负担相对较轻。河北的死亡率最高,是海南的 3 倍。上海、天津和北京的总死亡人数较少,但单位面积死亡人数很高。这 3 个直辖市是中国经济实力雄厚的大都市,人口密度极高,上海的人口密度甚至可以达到其他省份的 10 倍以上。同时由于 PM_{2.5} 污染的空间分布与人口分布之间存在很强的正相关关系,因此在人口稠密的特大城市加强 PM_{2.5} 污染控制是非常必要的,更有利于减轻居民健康负担^[26]。

2013 ~ 2017 年间,PM_{2.5} 呈现出线性下降的趋势 [图 5 (c)], 由于 PM_{2.5} 浓度的降低, 2015 年和 2017

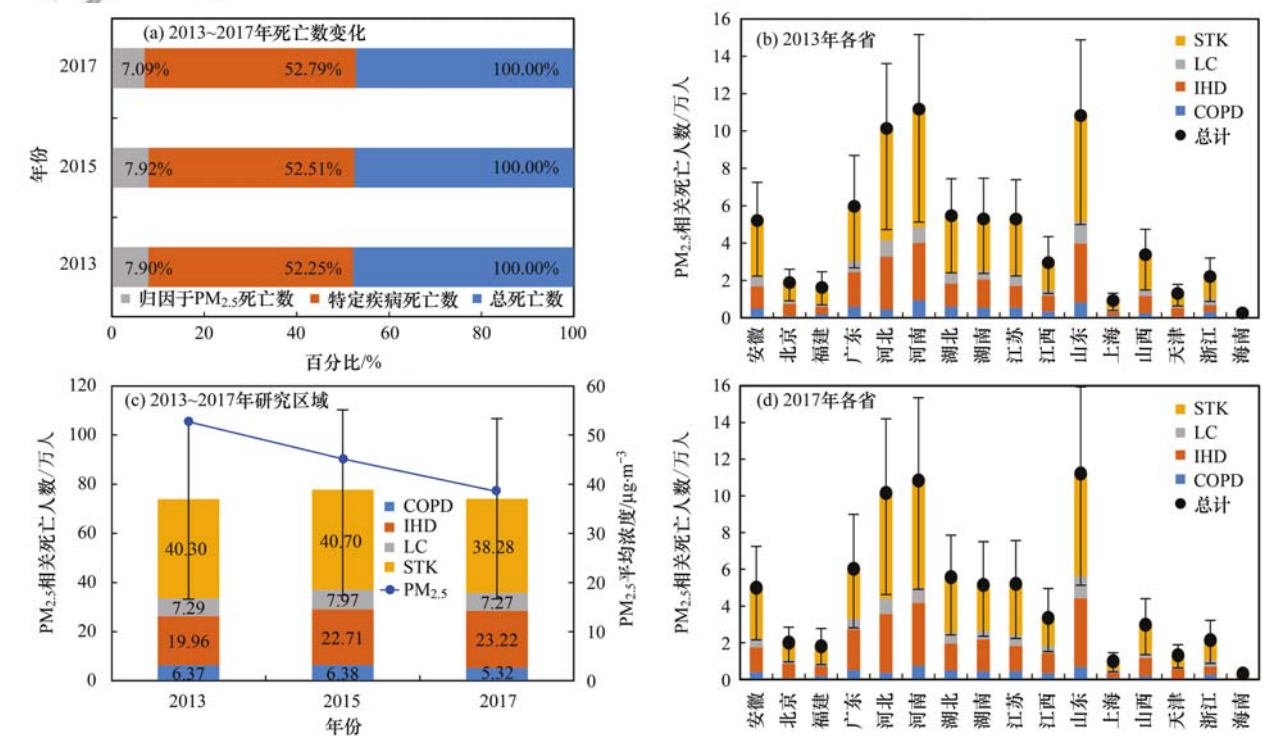


图 5 2013 ~ 2017 年可归因于 PM_{2.5} 的死亡统计

Fig. 5 Statistical analysis of deaths attributable to PM_{2.5} during the period 2013-2017

表 1 可归因于 PM_{2.5} 的死亡人数、死亡率和单位面积死亡人数¹⁾
Table 1 Total deaths, mortality rates, and deaths per unit area attributed to PM_{2.5}

地区	2013 年			2017 年		
	死亡人数/万人	死亡率(1/10 万)	单位面积死亡人数 /万人·km ⁻²	死亡人数/万人	死亡率(1/10 万)	单位面积死亡人数 /万人·km ⁻²
河南	11.17(5.13, 15.16)	179.52(82.48, 243.69)	0.67(0.31, 0.91)	10.84(4.92, 15.35)	162.75(73.84, 230.54)	0.65(0.29, 0.92)
山东	10.83(4.99, 14.88)	163.79(75.54, 225.03)	0.70(0.32, 0.97)	11.22(5.13, 15.93)	158.57(72.48, 225.19)	0.73(0.33, 1.04)
河北	10.14(4.72, 13.61)	192.71(89.75, 258.63)	0.54(0.25, 0.72)	10.16(4.62, 14.20)	180.43(82.15, 252.21)	0.54(0.25, 0.76)
广东	5.97(2.68, 8.69)	94.2(42.30, 137.14)	0.33(0.15, 0.48)	6.03(2.82, 9.00)	88.98(41.54, 132.70)	0.34(0.16, 0.50)
湖北	5.46(2.42, 7.44)	145.47(64.35, 198.20)	0.29(0.13, 0.40)	5.57(2.43, 7.86)	138.70(60.40, 195.65)	0.30(0.13, 0.42)
湖南	5.30(2.38, 7.47)	125.48(56.31, 177.04)	0.25(0.11, 0.35)	5.15(2.35, 7.51)	114.00(52.09, 166.14)	0.24(0.11, 0.35)
江苏	5.28(2.24, 7.39)	99.87(42.33, 139.68)	0.52(0.22, 0.72)	5.21(2.24, 7.57)	92.02(39.49, 133.68)	0.51(0.22, 0.74)
安徽	5.21(2.23, 7.25)	132.46(56.73, 184.27)	0.37(0.16, 0.52)	4.99(2.16, 7.25)	118.58(51.18, 172.12)	0.36(0.15, 0.52)
山西	3.38(1.49, 4.74)	132.74(58.67, 186.17)	0.22(0.10, 0.30)	2.98(1.36, 4.40)	109.53(49.78, 161.51)	0.19(0.09, 0.28)
江西	2.96(1.31, 4.35)	91.14(40.34, 134.15)	0.18(0.08, 0.26)	3.35(1.52, 4.96)	96.65(43.78, 142.82)	0.20(0.09, 0.30)
浙江	2.22(0.89, 3.20)	63.47(25.37, 91.66)	0.22(0.09, 0.31)	2.14(0.87, 3.21)	57.26(23.35, 86.02)	0.21(0.09, 0.31)
北京	1.89(0.91, 2.60)	119.54(57.63, 164.41)	1.13(0.54, 1.55)	2.01(0.95, 2.85)	118.45(56.38, 168.22)	1.19(0.57, 1.70)
福建	1.63(0.70, 2.47)	70.67(30.33, 107.34)	0.13(0.06, 0.20)	1.81(0.80, 2.77)	73.42(32.67, 112.63)	0.15(0.07, 0.23)
天津	1.30(0.64, 1.79)	120.13(58.56, 164.94)	1.15(0.56, 1.59)	1.32(0.63, 1.89)	113.48(53.98, 162.70)	1.17(0.56, 1.67)
上海	0.93(0.39, 1.32)	62.28(26.08, 88.29)	1.48(0.62, 2.09)	0.99(0.42, 1.46)	62.18(26.29, 91.10)	1.58(0.67, 2.31)
海南	0.26(0.12, 0.40)	49.60(23.30, 77.32)	0.07(0.03, 0.11)	0.32(0.15, 0.50)	58.04(27.40, 89.16)	0.09(0.04, 0.14)

1) 括号外数值为对应数值, 括号内数值为 95% 置信区间

年因此可避免的死亡人数为 4.87 万人(95% CI: 2.69, 6.89) 和 10.68 万人(95% CI: 5.37, 15.07), 可避免的经济损失为 2 554.32 亿元(95% CI: 1 411.84, 3 610.11) 和 5 588.41 亿元(95% CI: 2 815.20, 7 898.31). 图 6 显示了当 PM_{2.5} 年均浓度达到国家二级标准、一级标准和 AQG 标准时的健康效益, 归因死亡人数较 2017 年分别减少了 6.09 万人(95% CI: 2.83, 8.92)、40.79 万人(95% CI: 16.60, 62.83) 和 58.80 万人(95% CI: 27.99, 84.82), 占 2017 年可归因于 PM_{2.5} 总死亡人数的 8.22%、55.05% 和 79.36%, 可避免经济损失 3190.85 亿元(95% CI: 1 484.18, 4 674.11)、21 374.38 亿元(95% CI: 8 698.38, 32 925.87) 和 30 812.97 亿元(95% CI: 14 666.17, 44 061.94). 有研究估算大气污染防治行动计划的投资为

1.84 万亿元^[27], 大气污染治理的投入可以通过空气质量改善获得的健康效益而得到回报.

2.3 因子贡献分析

PM_{2.5} 健康效应的估算结果不仅与空气质量变化有关, 还与人口总量、老龄化程度及基线死亡率等社会因素有关. 在本研究中, 虽然 2013~2017 年 PM_{2.5} 年均浓度逐年降低, 但由于其他因素的影响, 可归因于 PM_{2.5} 的死亡人数并没有减少, 甚至出现了一定程度的增加. 为确定各因素(人口总量、人口老龄化、基线死亡率和 PM_{2.5} 浓度)对健康效应计算影响的大小, 通过敏感性分析, 对其相对贡献进行量化.

图 7 显示了各因素导致的死亡人数变化. 2013~2017 年, 研究区域内所有省份的人口均呈增加趋势, 人口总量从 8.79 亿增加到 9.03 亿, 增长了 2.69%. 人口的变化使得健康负担增加了 19 816 人, 占到健康效应变动的 2.69%. 在人口密集的地区, 如北京、天津、上海、广州和深圳等大城市, 人口增长的负面作用尤为明显. 65 岁以上人群占总人口的比例从 2013 年的 9.68% 增长至 2017 年的 11.39%, 老龄化程度的加剧使得健康负担增加了 91 189 人, 占到健康效应变动的 12.38%, 是加重健康负担的主要因素. 基线死亡率的下降在一定程度上减轻了健康负担, 但贡献较小, 共使得 12 261 人避免死亡, 占健康效应变动的 1.66%. PM_{2.5} 浓度降低是健康负担减轻的主要原因, 107 332 人因此受益, 占健康效应变动的 14.57%.

死亡率的下降和 PM_{2.5} 浓度的降低减轻了健康

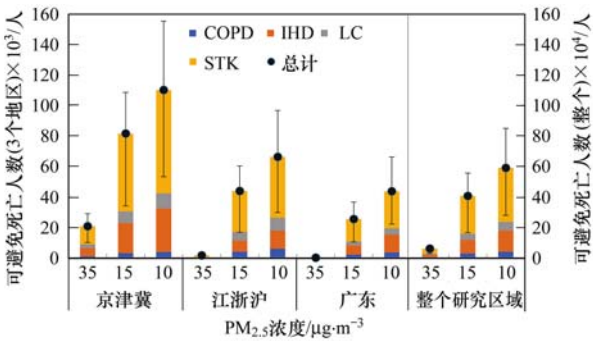
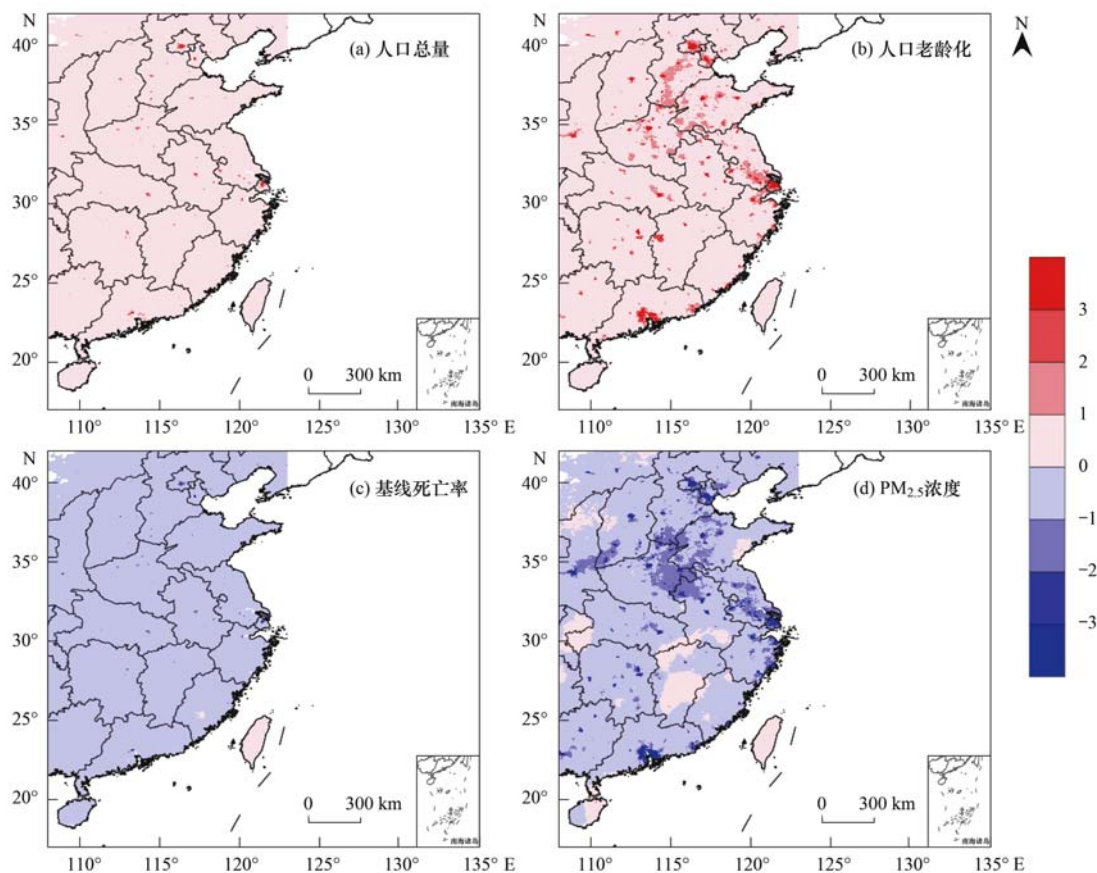


图 6 满足不同空气质量标准时的健康效益
Fig. 6 Health benefits of meeting different air quality standards



色块为量化单位(人), 负值表明改变该因子减少了人群死亡, 降低了健康负担
图 7 改变人口总量、人口老龄化、基线死亡率和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度带来的健康效应

Fig. 7 Estimated health effects due to the change in population gross, population aging, baseline mortality rates, and $\text{PM}_{2.5}$ concentration

负担,然而这些正面作用被人口增长和人口老龄化的加剧所抵消,因此虽然 $\text{PM}_{2.5}$ 污染不断改善,但归因死亡人数并没有明显减少,部分地区还发生了增加. 如图 8 所示,福建和江西由于 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度降幅较小,人口因素的负作用大于暴露减少的正作用导致归因死亡人数增加. 而河南和河北的 $\text{PM}_{2.5}$ 降幅较大,污染暴露接触减少的正作用更显著,超过人口和

老龄化的负作用,归因死亡人数净减少. 尽管人口因素的变化不利于减轻公众健康负担,但控制污染物排放、降低 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度仍是减轻健康负担最主要最有效的途径^[28, 29]. 另外,由于 IER 模型的非线性,贡献率也与该地区的 $\text{PM}_{2.5}$ 背景浓度有关(图 9). 浓度越低,相对风险曲线越陡峭,边际健康效益越高.

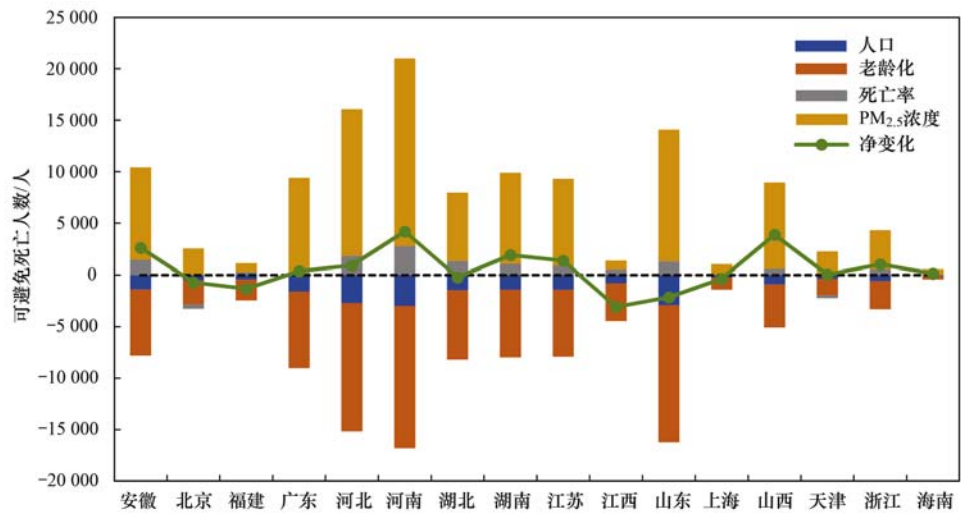


图 8 归因于各因子的可避免死亡人数

Fig. 8 Avoided deaths attributable to factors

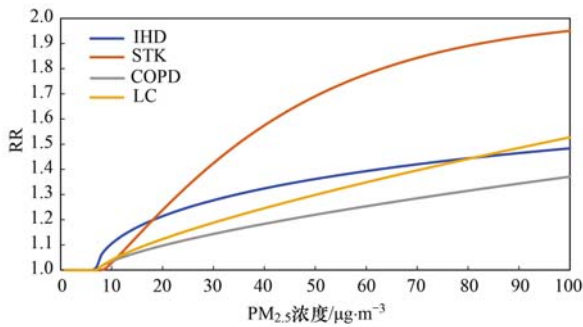
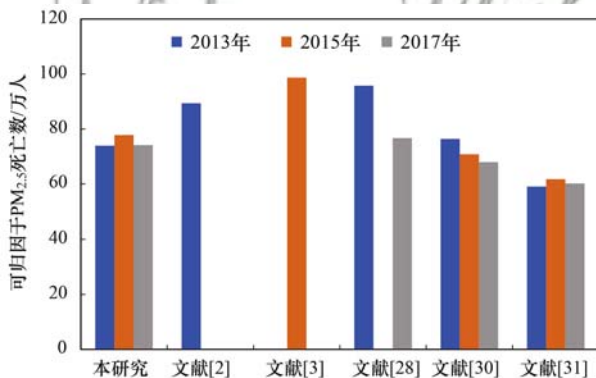


图9 特定疾病的相对风险

Fig. 9 Disease-specific relative risk

2.4 不确定性分析

本文采用结合暴露因子的 IER 模型对 2013 ~ 2017 年中国东部和中部地区的健康负担进行了估算. 与同类研究相比^[2,3,28,30,31] (图 10), 本研究的结果偏低一些, 这是因为结合暴露因子的 PM_{2.5} 浓度低于环境 PM_{2.5} 浓度, 导致相对风险较低. 另外, Song 等^[3] 和 Ding 等^[28] 除 COPD、IHD、LC 和 STK 外还计算了急性下呼吸道感染 (acute lower respiratory infection, ALRI) 的疾病负担, 这也使得他们的结果要更高一些. 除此之外, 网格大小、人口、基线死亡率和浓度阈值等数据的选择也会在一定程度上影响计算结果.

图10 不同研究中国东部及中部可归因于 PM_{2.5} 死亡人数结果比较Fig. 10 Comparison of PM_{2.5}-attributable deaths in Eastern and Central China as reported by different studies

暴露-响应关系是导致不确定性的的重要因素, 尽管 Burnett 等^[21] 开发的 IER 模型已被广泛应用, 但 Yin 等^[32] 基于中国本地的流行病学研究结果认为 IER 模型可能低估了高浓度下的健康风险, Burnett 等^[33] 构建的新的长期暴露全球死亡评估模型计算结果约比 IER 高 30%. 另外 IER 只考虑了 5 个主要致死疾病, 但据报道 PM_{2.5} 污染还与二型糖尿病^[34]、哮喘^[35]、婴儿低出生体重和早产^[36] 等有关, 对可归因健康负担存在低估.

本研究尝试使用室外活动时间、室内外浓度比

等暴露参数来估算人群实际暴露浓度, 但无论是室内还是室外 PM_{2.5} 浓度都具有一定的时间特性, 不同的地区也有地域差异, 还无法更进一步解决实际人群暴露浓度问题. 在人口和基线死亡率数据方面, 本研究仅根据研究期间人口的年变化率对人口数据进行简单预测, 忽略了人口流动的影响. 此外, 本文假设不同来源不同组分的 PM_{2.5} 毒性相同, 然而实际上 PM_{2.5} 是一种非常复杂的大气颗粒物, 来自不同污染源的 PM_{2.5} 对人体危害不同^[24], 普遍认为 PM_{2.5} 组分中黑碳、有机碳对人体危害更大^[37].

3 结论

(1) 与 2013 年相比, 2017 年研究区域 PM_{2.5} 人口加权浓度下降了 28.73%, PM_{2.5} 年均浓度在 35 μg·m⁻³ 及以下的人口比例从 11.23% 增加到 27.91%.

(2) 研究期间由于 PM_{2.5} 浓度下降可避免的归因死亡数为 10.68 万人 (95% CI: 5.37, 15.07), 可避免经济损失为 5588.41 亿元 (95% CI: 2815.20, 7898.31). 当 PM_{2.5} 年均浓度达到国家二级标准、一级标准和 AQG 标准时, 归因死亡人数较 2017 年将减少 8.22%、55.05% 和 79.36%, 可避免经济损失 3190.85、21374.38 和 30812.97 亿元. PM_{2.5} 归因死亡数在空间上呈现出不均匀分布, 主要集中在京津冀、长三角等人口密集、PM_{2.5} 污染严重和老龄化程度高的地区.

(3) 人口总量、人口老龄化、基准死亡率和 PM_{2.5} 暴露浓度这 4 个因素对健康负担的贡献为 -2.69%、-12.38%、1.66% 和 14.57%. 老龄化程度加剧和 PM_{2.5} 浓度降低分别是造成 PM_{2.5} 归因死亡数增加和减少的主要原因. 在污染较重的地区如京津冀, 大气污染治理仍需加大力度, 在污染较轻的地区如珠三角, 继续降低 PM_{2.5} 浓度可以带来更高的边际健康效益. 随着中国老龄化程度的不断加深, 未来需要更加注意加强老年敏感人群的卫生防护.

致谢: 感谢中国香港科技大学环境研究所提供的 PM_{2.5} 数据.

参考文献:

- [1] Li T T, Zhang Y, Wang J N, *et al.* All-cause mortality risk associated with long-term exposure to ambient PM_{2.5} in China: a cohort study [J]. *The Lancet Public Health*, 2018, **3** (10): e470-e477.
- [2] Hu J L, Huang L, Chen M D, *et al.* Premature mortality attributable to particulate matter in China: source contributions and responses to reductions [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51** (17): 9950-9959.
- [3] Song C B, He J J, Wu L, *et al.* Health burden attributable to ambient PM_{2.5} in China [J]. *Environmental Pollution*, 2017,

- 223: 575-586.
- [4] Shang Y, Sun Z W, Cao J J, *et al.* Systematic review of Chinese studies of short-term exposure to air pollution and daily mortality [J]. *Environment International*, 2013, **54**: 100-111.
- [5] Cohen A J, Brauer M, Burnett R, *et al.* Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015 [J]. *The Lancet*, 2017, **389**(10082): 1907-1918.
- [6] 国务院. 大气污染防治行动计划 [EB/OL]. http://www.gov.cn/jwqk/2013-09/12/content_2486773.htm, 2013-09-12.
- [7] 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.
- [8] 戴海夏, 安静宇, 李莉, 等. 上海市实施清洁空气行动计划的 健康收益分析 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(1): 24-32.
- Dai H X, An J Y, Li L, *et al.* Health benefit analyses of the clean air action plan implementation in Shanghai [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(1): 24-32.
- [9] 曾贤刚, 阮芳芳, 彭彦彦. 基于空间网格尺度的中国 PM_{2.5} 污染健康效应空间分布 [J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(6): 2624-2632.
- Zeng X G, Ruan F F, Peng Y Y. Health effects/spatial distribution analysis of PM_{2.5} pollution in China based on spatial grid scale [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(6): 2624-2632.
- [10] 薛涛, 刘俊, 张强, 等. 2013~2017 年中国 PM_{2.5} 污染的快速改善及其健康效益 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2020, **50**(4): 441-452.
- Xue T, Liu J, Zhang Q, *et al.* Rapid improvement of PM_{2.5} pollution and associated health benefits in China during 2013-2017 [J]. *Science China Earth Sciences*, 2020, **62**(12): 1847-1856.
- [11] Jiao W, Frey H C, Cao Y. Assessment of inter-individual, geographic, and seasonal variability in estimated human exposure to fine particles [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(22): 12519-12526.
- [12] Zhou Z H, Liu Y R, Yuan J J, *et al.* Indoor PM_{2.5} concentrations in residential buildings during a severely polluted winter: a case study in Tianjin, China [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, **64**: 372-381.
- [13] Lin C Q, Liu G, Lau A K H, *et al.* High-resolution satellite remote sensing of provincial PM_{2.5} trends in China from 2001 to 2015 [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **180**: 110-116.
- [14] Lu X C, Lin C Q, Li W K, *et al.* Analysis of the adverse health effects of PM_{2.5} from 2001 to 2017 in China and the role of urbanization in aggravating the health burden [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **652**: 683-695.
- [15] Lin C Q, Lau A K H, Lao X Q, *et al.* A novel framework for decomposing PM_{2.5} variation and demographic change effects on human exposure using satellite observations [J]. *Environmental Research*, 2020, **182**, doi: 10.1016/j.envres.2020.109120.
- [16] Lin C Q, Li Y, Yuan Z B, *et al.* Using satellite remote sensing data to estimate the high-resolution distribution of ground-level PM_{2.5} [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, **156**: 117-128.
- [17] 国家统计局. 中国统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [18] 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, 2018.
- [19] Zhou M G, Wang H D, Zhu J, *et al.* Cause-specific mortality for 240 causes in China during 1990-2013: a systematic subnational analysis for the Global Burden of Disease Study 2013 [J]. *The Lancet*, 2016, **387**(10015): 251-272.
- [20] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册 (成人卷) [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2013.
- [21] Burnett R T, Pope III C A, Ezzati M, *et al.* An integrated risk function for estimating the global burden of disease attributable to ambient fine particulate matter exposure [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2014, **122**(4): 397-403.
- [22] Apte J S, Marshall J D, Cohen A J, *et al.* Addressing global mortality from ambient PM_{2.5} [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(13): 8057-8066.
- [23] Maji K J, Dikshit A K, Arora M, *et al.* Estimating premature mortality attributable to PM_{2.5} exposure and benefit of air pollution control policies in China for 2020 [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **612**: 683-693.
- [24] Lelieveld J, Evans J S, Fnais M, *et al.* The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale [J]. *Nature*, 2015, **525**(7569): 367-371.
- [25] Huang D S, Andersson H, Zhang S Q. Willingness to pay to reduce health risks related to air quality: evidence from a choice experiment survey in Beijing [J]. *Journal of Environmental Planning and Management*, 2018, **61**(12): 2207-2229.
- [26] Wang J D, Xing J, Mathur R, *et al.* Historical trends in PM_{2.5}-related premature mortality during 1990-2010 across the northern hemisphere [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2016, **125**(3): 400-408.
- [27] 董战峰, 袁增伟. 《大气污染防治行动计划》实施的投融资需求及影响评估 [J]. *中国环境管理*, 2016, **8**(2): 47-51.
- Dong Z F, Yuan Z W. Investment demand and impacts of air pollution prevention and control action plan in China [J]. *Chinese Journal of Environmental Management*, 2016, **8**(2): 47-51.
- [28] Ding D, Xing J, Wang S X, *et al.* Estimated contributions of emissions controls, meteorological factors, population growth, and changes in baseline mortality to reductions in ambient PM_{2.5} and PM_{2.5}-related mortality in China, 2013-2017 [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2019, **127**(6), doi: 10.1289/EHP4157.
- [29] Zheng H T, Zhao B, Wang S X, *et al.* Transition in source contributions of PM_{2.5} exposure and associated premature mortality in China during 2005-2015 [J]. *Environment International*, 2019, **132**, doi: 10.1016/j.envint.2019.105111.
- [30] Zou B, You J W, Lin Y, *et al.* Air pollution intervention and life-saving effect in China [J]. *Environment International*, 2019, **125**: 529-541.
- [31] 朱格. 中国大气污染健康风险的驱动因素与城市特征研究 [D]. 南京: 南京大学, 2019.
- [32] Yin P, Brauer M, Cohen A, *et al.* Long-term fine particulate matter exposure and nonaccidental and cause-specific mortality in a large national cohort of Chinese men [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2017, **125**(11), doi: 10.1289/EHP1673.
- [33] Burnett R, Chen H, Szyszkowicz M, *et al.* Global estimates of mortality associated with long-term exposure to outdoor fine particulate matter [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, **115**(38): 9592-9597.
- [34] Wang B, Xu D H, Jing Z H, *et al.* Effect of long-term exposure

- to air pollution on type 2 diabetes mellitus risk: a systemic review and meta-analysis of cohort studies [J]. *European Journal of Endocrinology*, 2014, **171**(5): R173-R182.
- [35] Lu F, Xu D Q, Cheng Y B, *et al.* Systematic review and meta-analysis of the adverse health effects of ambient PM_{2.5} and PM₁₀ pollution in the Chinese population [J]. *Environmental Research*, 2015, **136**: 196-204.
- [36] Stieb D M, Chen L, Eshoul M, *et al.* Ambient air pollution, birth weight and preterm birth: a systematic review and meta-analysis [J]. *Environmental Research*, 2012, **117**: 100-111.
- [37] Yang Y, Ruan Z L, Wang X J, *et al.* Short-term and long-term exposures to fine particulate matter constituents and health: a systematic review and meta-analysis [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **247**: 874-882.

欢迎订阅 2021 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如工程索引 Ei Compendex;医学索引 MEDLINE; Scopus; 化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA): Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA): Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS): Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

国内统一连续出版物号:CN 11-1895/X

国际标准连续出版物号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205

国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail:hjcx@rcees.ac.cn;网址:www.hjcx.ac.cn

CONTENTS

Health Impact Attributable to the Control of PM _{2.5} Pollution in China During 2013-2017	ZHANG Meng-jiao, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i> (513)
Contributions of Emissions Reduction and Regional Meteorological Conditions to Air Quality Improvement	WU Wen-qi, ZHANG Kai-shan (523)
Air Pollution Characteristics and Quantitative Evaluation of Multi-scale Transport in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in January, 2016	YAO Sen, ZHANG Han-yu, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (534)
Influence of Burning Fireworks on the Atmosphere During the Spring Festival in Guangzhou in 2020	PEI Cheng-lei, WANG Yu-jun, BI Yan-ru, <i>et al.</i> (546)
Source Apportionment and Optical Properties of Fine Particles Associated with Regional Pollution in the Yangtze River Delta	XIA Li, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (556)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Ions in Particulate Matter Under Different Weather Processes in Nanjing	ZHANG Yang, WANG Hong-lei, LIU An-kang, <i>et al.</i> (564)
Size Distribution of Aerosol Hygroscopic Growth Factors in Winter in Tianjin	DING Jing, ZHANG Yu-fen, ZHENG Nai-yuan, <i>et al.</i> (574)
Time-Determination and Contribution Analysis of Transport, Retention, and Offshore Backflow to Long-Term Sand-Dust Coupling	ZHANG Zhe, QIAO Li-ping, ZHOU Min, <i>et al.</i> (584)
Characterization, Sources, and Health Risks of PM _{2.5} -bound PAHs During Autumn and Winter in Luoyang City	QI Jing-wen, ZHANG Rui-qin, JIANG Nan, <i>et al.</i> (595)
Characteristics, Meteorological Influences, and Transport Source of Ozone Pollution in Zhengzhou City	WANG Xu-dong, YIN Sha-sha, YANG Jian, <i>et al.</i> (604)
Nonlinear Response Characteristics and Control Scheme for Ozone and Its Precursors Based on Orthogonal Experimental Methods	LI Guang-yao, CHEN Qiang, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (616)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in the Automobile Industrial Park of Shanghai	YE Lu, TAI Qing-qing, YU Hua-ming (624)
Establishment of a High-resolution Anthropogenic Emission Inventory and Its Evaluation Using the WRF-Chem Model for Lanzhou	GUO Wen-kai, LI Guang-yao, CHEN Bing, <i>et al.</i> (634)
Trends in Vehicle Emissions in Sichuan Province, 2010-2017	LI Yuan, SHI Jia-cheng, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (643)
Bioavailability and Ecological Risk Assessment of Cadmium in the Sea-Land Interaction Sediments of the Pearl River Delta	WANG Fang-ting, BAO Ke, CHEN Zhi-hua, <i>et al.</i> (653)
Distribution, Sources, and Ecological Risks of Polyfluoroalkyl Substances in the Surface Water of the Wuliangsuhai Watershed	SHI Rui, MAO Ruo-yu, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (663)
Distribution Characteristics of Microplastics in Ice Sheets and Its Response to Salinity and Chlorophyll a in the Lake Wuliangsuhai	WANG Zhi-chao, YANG Jian-lin, YANG Fan, <i>et al.</i> (673)
Effect of Check Dam on Phosphorus Transport and Retention in the Qingshui River, in Zhangjiakou City	WANG Wei, LI Xu-yong (681)
Characteristics of Phosphorus Speciation and Genesis in Typical Tributaries of the Three Gorges Reservoir	YANG Fan, WANG Li-jing, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (688)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in Lake Chaohu Sediments and Pollution Evaluation	WANG Yan-ping, XU Wei-wei, HAN Chao, <i>et al.</i> (699)
Sediment Pollution Characteristics and Dredging in the Nanfei River Estuary, Chaohu Lake	YANG Pan, YANG Chun-hui, MA Xin-yu, <i>et al.</i> (712)
Effect of Oxidation Strengthening on In-situ Phosphorus Immobilization of Calcium Hydroxide	XU Chu-tian, LI Da-peng, YUE Wei, <i>et al.</i> (723)
Impact of Rainfall-Runoff Events on Methane Emission from Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	CHEN Min, XU Hao-ting, WANG Xue-zhu, <i>et al.</i> (732)
Water-air Carbon Dioxide Exchange and Nutritional Controls in a Typical Karst River	LIU Rui, ZHANG Jin, CHEN Zu-sheng, <i>et al.</i> (740)
Occurrence of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Representative Drinking Water Resources in Jiangsu Province	WANG Long-fei, CHENG Yi-qun, HU Xiao-dong, <i>et al.</i> (749)
Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in Tailings Ponds	HUANG Fu-yi, ZHU Yong-guan, SU Jian-qiang (761)
Hydrochemical Characteristics and Origin of Groundwater in the Central Guohe River Basin	ZHENG Tao, JIAO Tuan-li, HU Bo, <i>et al.</i> (766)
Hydrochemical Characteristics and Analysis of the Qilihai Wetland, Tianjin	HE Ming-xia, ZHANG Bing, XIA Wen-xue, <i>et al.</i> (776)
Effects of Straw Mulching and Nitrogen Reduction on the Distribution of Soil Nitrogen and Groundwater Nitrogen Pollution	ZHANG Wan-feng, YANG Shu-qing, SUN Duo-qiang, <i>et al.</i> (786)
Precision of eDNA Metabarcoding Technology for Biodiversity Monitoring of Eukaryotic Phytoplankton in Lakes	ZHANG Li-juan, XU Shan, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (796)
Effect of Phytoplankton Community Composition and Size Structure on Light Absorption Properties	HUANG Xin, SHI Kun, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (808)
Periphytic Algae Community Structure and Its Relation to Environment Factors in the Main Stream of the Songhua River from 2014 to 2019	YU Zong-ling, CHEN Wei, ZHAO Ran, <i>et al.</i> (819)
Diversity and Function Prediction of Bacterioplankton Under Human Disturbance in the Main Stream of the Laoguan River Before and After the Flood Season	HAN Xue-mei, GONG Zi-le, YANG Xiao-ming, <i>et al.</i> (831)
Seasonal Removal Efficiency and Degradation Products of Two Typical PPCPs in Subsurface Flow Constructed Wetlands	LI Chao-yu, YANG Yi-xiao, ZHANG Ning, <i>et al.</i> (842)
Removal of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes from Urban Rivers Using Artificial Ecosystems	ZHOU Hai-dong, HUANG Li-ping, CHEN Xiao-meng, <i>et al.</i> (850)
Distribution Characteristics of Viruses Microorganisms in a Water Supply System with Combined Ultraviolet Chloramine Disinfection	HAN Xue, SUN Jian-wei, ZHANG Li, <i>et al.</i> (860)
Removal of Oxytetracycline from Water Using Blast Furnace Slag Loaded Sulfide Nanoscale Zero-valent Iron	SUN Qiu-nan, ZHANG Rong-bin, DENG Man-jun, <i>et al.</i> (867)
Heavy Metal Ion Adsorption Properties and Stability of Amine-sulfur Modified Biochar in Aqueous Solution	WANG Cun-shi, HE Min-xia, ZHOU Feng, <i>et al.</i> (874)
Characteristics and Removal Mechanism of an Electro-Hybrid Ozonation-Coagulation System in the Treatment of Organic Matters	XIE Xin-yue, XU Jian-jun, ZHANG Shao-hua, <i>et al.</i> (883)
Enhancement Effects and Mechanisms of Microscale Zero Valent Iron on the Performance of Anaerobic Co-digestion of Waste Activated Sludge and Food Waste	CHEN Sheng-jie, YAO Fu-bing, PI Zhou-jie, <i>et al.</i> (891)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils Surrounding a Typical Industrial Area of Henan Province	MENG Xiao-fei, GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (900)
Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Greenbelt Soils of Nanjing City	CHEN Jia-lin, LI Ren-ying, XIE Xiao-jin, <i>et al.</i> (909)
Remediation Effect of Compound Modifier FZB on Arsenic and Cadmium Contaminated Soil	DING Ping, HE Yu-long, HE Huan, <i>et al.</i> (917)
Remediation of Cd Contaminated Acidic Rice Fields Using the Combined Application of Lime and Organic Matter	LI Guang-hui, CHENG Qing, CHEN Hong (925)
Effect and Mechanism of Foliar Application Nano-MnO ₂ on Cadmium Enrichment of Rice	ZHOU Yi-min, HUANG Ya-yuan, LIU Xiao-yue, <i>et al.</i> (932)
Characteristics of Cadmium Enrichment and Pollution Evaluation of a Soil-Crop System in a Typical Karst Area	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> (941)
Comparison of Enrichment and Transport of Cadmium in the Fruit of High and Low Enrichment Pepper Varieties and Its Distribution in Subcells	SHAO Xiao-qing, HE Zhang-mi, XU Wei-hong (952)
Cadmium Accumulation Characteristics of Four Herbs	CHEN Di, LI Bo-qun, YANG Yong-ping, <i>et al.</i> (960)
Characteristics of Dissolved Organic Carbon Loss in Purple Soil Sloping Fields with Different Fertilization Treatments	XIONG Zi-yi, ZHENG Jie-bing, WANG Dan, <i>et al.</i> (967)
Effects of Precipitation Changes on Plant Community Diversity and Soil C:N:P Ecological Stoichiometric Characteristics in a Desert Steppe of China	GAO Jiang-ping, ZHAO Rui-feng, ZHANG Li-hua, <i>et al.</i> (977)
Effect of Water Management on Rice Growth and Rhizosphere Priming Effect in Paddy Soils	LIN Sen, XIAO Mou-liang, JIANG Jia-bin, <i>et al.</i> (988)
Effects of Copper Pollution on Microbial Communities in Wheat Root Systems	GE Yi, XU Min-min, XU Shao-hui, <i>et al.</i> (996)
Ozone Pollution, Nitrogen Addition, and Drought Stress Interact to Affect Non-structural Carbohydrates in the Leaves and Fine Roots of Poplar	LI Pin, ZHOU Hui-min, FENG Zhao-zhong (1004)
Review of Screening and Applications of Organic Tracers in Fine Particulate Matter	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i> (1013)