Eco-Environmental Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2019
Vol.40 No.1
第40卷 第1期

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第40卷 第1期
2019年1月15日

目 次

2015~2016年北京市3次空气重污染红色预警 $PM_{2.5}$ 成因分析及效果评估 …… 吕喆, 魏巍, 周颖, 程水源, 王晓琦(1)
长三角地区重点源减排对 $PM_{2.5}$ 浓度的影响 …… 于燕, 王泽华, 崔雪东, 陈锋, 徐宏辉(11)
上海市实施清洁空气行动计划的健康收益分析 …… 戴海夏, 安静宇, 李莉, 黄成, 严茹莎, 朱书慧, 马英歌, 宋伟民, 阚海东(24)
京津冀及周边地区 $PM_{2.5}$ 时空变化特征遥感监测分析 …… 陈辉, 厉青, 李营, 张连华, 毛慧琴, 周伟, 刘伟汉(33)
MODIS C006 气溶胶光学厚度产品在京津冀典型环境背景下的适用性 …… 王海林, 刘琼, 陈勇航, 孙冉, 李霞, 张华, 魏刚, 胡俊, 刘统强(44)
气象因素对香港地区臭氧污染的影响 …… 赵伟, 高博, 刘明, 卢清, 马社霞, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳(55)
天津夏季边界层低层大气中 PAN 和 O_3 的输送特征分析 …姚青, 马志强, 林伟立, 刘敬乐, 王晓佳, 蔡子颖, 韩素芹(67)
成都冬季 $PM_{2.5}$ 化学组分污染特征及来源解析 …… 吴明, 吴丹, 夏俊荣, 赵天良, 杨清健(76)
郑州市冬季大气 $PM_{2.5}$ 传输路径和潜在源分析 …… 段时光, 姜楠, 杨留明, 张瑞芹(86)
常州春季 $PM_{2.5}$ 中 WSOC 和 WSON 的污染特征与来源解析 …… 李清, 黄雯倩, 马帅帅, 黄红缨, 叶招莲, 陈敏东(94)
天津隧道机动车 VOCs 污染特征与排放因子 …… 孙露娜, 刘妍, 赵静波, 孙世达, 宋从波, 张静, 李悦宁, 林应超, 王婷, 毛洪钧(104)
机动车源大气颗粒物粒径分布及碳组分特征 …… 梅德清, 朱宗宁, 孙天硕, 王向丽, 梅丛蔚, 肖政臻(114)
超低排放路线下燃煤烟气可凝结颗粒物在 WFGD、WESP 中的转化特性 …… 杨柳, 张斌, 王康慧, 麻丁仁, 盛重义(121)
超低排放燃煤电厂颗粒物脱除特性 …… 阮仁晖, 谭厚章, 段钰锋, 杜勇乐, 刘鹤欣, 萧嘉繁, 杨富鑫, 张朋(126)
北京建筑施工裸地时空变化及扬尘污染排放 …… 张立坤, 李令军, 姜磊, 赵文慧, 鹿海峰, 王新辉, 邱昀(135)
SCR 装置对焦炉煤气燃烧废气中 PCDD/Fs、PCBs 和 PCNs 的协同脱除 …… 任美慧, 樊芸, 王胜, 许亮, 张宁, 张雪萍, 陈吉平, 张海军(143)
古浪河流域大气降水稳定同位素的时空特征及其环境意义 …… 桂娟, 李宗省, 冯起, 卫伟, 李永格, 吕越敏, 袁瑞丰, 张百娟(149)
夏季闽江 CDOM 的空间分布与降解特征 …… 程琼, 庄婉娥, 王辉, 陈苇, 杨丽阳(157)
亚热带河口陆基养虾塘水体 CDOM 三维荧光光谱平行因子分析 …… 朱爱菊, 孙东耀, 谭季, 黄佳芳, 罗敏(164)
基于 UV-vis 及 EEMs 解析周村水库夏秋季降雨不同相对分子质量 DOM 的光谱特征及来源 …… 周石磊, 张艺冉, 黄廷林, 刘艳芳, 张磊, 李贵霞, 岳琳, 罗晓(172)
分层型水源水库溶解性有机物性质及其膜污染特性 …… 李凯, 王晓东, 黄廷林, 李舒, 刘双(185)
重庆西部山区典型湖泊水-气界面 CO_2 交换通量及其影响因素 …… 罗佳宸, 倪茂飞, 李思悦(192)
基于稀疏表达的水体遥感反射率高光谱重构及其应用 …… 李渊, 李云梅, 郭宇龙, 张运林, 张毅博, 胡耀躲, 夏忠(200)
巢湖十五里河河床地貌单元沉积物硝化速率及污染特征 …… 李如忠, 阙凤翔, 熊鸿斌, 王莉(211)
特大城市河流表层沉积物磷形态分布及有效性:以成都市为例 …… 丁瑶, 欧阳莉莉, 石清, 高平川, 赖承钺, 陈舒平, 贾滨洋, 姚刚(219)
黄河中游(渭南—郑州段)全/多氟烷基化合物的分布及通量 …… 李琦路, 程相会, 赵祯, 郭萌然, 袁梦, 华夏, 方祥光, 孙红文(228)
重工业城市岩溶地下水中多环芳烃污染特征及来源 …… 苗迎, 孔祥胜, 李成展(239)
沈抚新城地下水中 PAHs 的污染特征及健康风险评价 …… 张士超, 姚宏, 向鑫鑫, 刘殷佐, 刘明丽, 鲁垠涛, 于晓华(248)
多环芳烃及其衍生物在北京纳污河流中的分布及健康风险 …… 付璐婧, 李一兵, 乔梦, 赵旭(256)
原水性质对新型含 Ca^{2+} 复合混凝剂混凝过程的影响 …… 曲江东, 徐慧, 徐建坤, 段晋明, 门彬, 王东升(263)
水体中磺胺甲噁唑间接光降解作用 …… 李聪鹤, 车潇炜, 白莹, 石晓勇, 苏荣国(273)
MoS_2/BiOI 复合光催化剂制备及其光催化氧化还原性能 …… 张亮, 赵朝成, 高先瑶, 闫青云, 王帅军, 董培, 侯亚璐(281)
纳米零价铜活化分子氧降解水中恩诺沙星 …… 倪永炯, 程永清, 徐梦苑, 邱春根, 马晓雁, 李军, 邓靖(293)
不同类型 LDHs 负载改性麦饭石对Cr(Ⅵ)吸附性能 …… 张翔凌, 邓礼楚, 方晨佳, 雷雨, 何春艳, 高晨光, 赵双杰, 向洋(300)
单层硅烷负载磁铁矿纳米颗粒的制备及除磷性能 …… 邢明超, 谢强, 陈守慧, 吴德意(310)
新生态型聚硅酸铁锰处理染料废水的优化 …… 唐立朋, 魏群山, 吕强, 张弛, 刘亚男, 柳建设(318)
不同外电压下自养型生物阴极还原硫酸盐的性能及生物膜群落响应 …… 胡佳萍, 曾翠平, 骆海萍, 刘广立, 张仁铎, 卢耀斌(327)
碳源对O/A-F/F模式积累内源聚合物及反硝化的影响 …… 崔有为, 金常林, 王好韩, 李晶(336)
进水 C/P 对 SNEDPR 系统脱氮除磷性能的影响 …… 甄建园, 于德爽, 王晓霞, 陈光辉, 都叶奇, 袁梦飞, 杜世明(343)
不同污泥龄(SRT)对 SNEDPR 系统脱氮除磷影响 …王晓霞, 甄建园, 赵骥, 于德爽, 都叶奇, 杜世明, 袁梦飞, 张帆(352)
后置短程反硝化 AOA-SBR 工艺实现低 C/N 城市污水的脱氮除磷 …… 巩秀珍, 于德爽, 袁梦飞, 王晓霞, 陈光辉, 王钧, 毕春雪, 都叶奇(360)
缺氧-好氧连续流亚硝化颗粒污泥反应器的启动及稳定运行 …… 李冬, 郭跃洲, 劳会妹, 曹美忠, 张杰(369)
低温 SNAD 颗粒污泥工艺启动方式 …… 李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 刘志诚, 张杰 (376)
不同取样尺度和数量下针阔混交林土壤呼吸的空间异质性 …… 严俊霞, 孙琦, 李君剑, 李洪建(383)
轮作方式对冬水田温室气体排放的影响 …… 冯夕, 江长胜, 彭小乐, 李彦沛, 郝庆菊(392)
紫色土 N_2O 排放及氨氧化微生物群落结构对玉米秸秆与化肥减量配施的响应 …… 黄容, 高明, 王蓥燕, 黎嘉成, 徐国鑫, 罗梅, 徐畅(401)
岩溶地区不同土地利用方式土壤固碳细菌群落结构特征 …… 张双双, 靳振江, 贾远航, 李强(412)
丹江口库区库滨带植被土壤细菌群落多样性及 PICRUSt 功能预测分析 …… 孙峰, 田伟, 张菲, 陈彦, 任学敏, 庞发虎, 李玉英, 姚伦广, 陈兆进(421)
硫酸盐还原菌介导的吸附态砷的迁移转化 …… 贾欠欠, 李伟, 王亚男, 段晋明, 刘玉灿(430)
铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属污染空间分布特征及风险评估…… 王洋洋, 李方方, 王笑阳, 杨志辉, 韩科, 阮心玲(437)
新疆干旱区某矿冶场对周围土壤重金属累积的影响 …… 杨伟光, 王美娥, 陈卫平(445)
九龙江流域水稻土重金属赋存形态及污染评价 …… 林承奇, 黄华斌, 胡恭任, 于瑞莲, 郝春莉, 林颖(453)
草海典型高原湿地食物链中汞同位素组成特征 …… 许议元, 何天容(461)
Cd、Zn 交互作用对三七景天根系形态和重金属吸收积累的影响 …… 郭俊姆, 杨俊兴, 杨军, 陈同斌, 李厚恩, 徐铁兵, 周小勇, 叶勇, 于豹(470)
不同浓度镧处理对铅胁迫下玉米生长和铅吸收的影响 …… 王起凡, 郭伟, 常青, 潘亮, 周昕南, 杨亮, 李娥(480)
广西龙江鱼类镉含量分布特征及生物积累特性分析 …… 王俊能, 赵学敏, 胡国成, 钟松雄, 姚玲爱, 马千里, 许振成(488)
6 种消解方法对荧光测定生物体内聚苯乙烯微塑料的影响 …… 邹亚丹, 徐攀攀, 张哲, 李富云, 李锋民(496)
一种负载功能型微生物的营养缓释填料的制备及性能评价 …… 冯克, 徐丹华, 成卓韦, 於建明, 陈建孟(504)
《环境科学》征订启事(113) 《环境科学》征稿简则(238) 信息(93, 262, 342)

Eco-Environmental Knowledge Web

环 境 科 学
Environmental Science

第 40 卷 第 1 期 2019 年 1 月
Vol. 40, No. 1 Jan., 2019

上海市实施清洁空气行动计划的健康收益分析

戴海夏[1,2], 安静宇[1], 李莉[1*], 黄成[1], 严茹莎[1], 朱书慧[1], 马英歌[1], 宋伟民[2], 阚海东[2]

(1. 上海市环境科学研究院, 国家环境保护城市大气复合污染成因与防治重点实验室, 上海 200233; 2. 复旦大学公共卫生学院, 公共卫生安全教育部重点实验室, 上海 200032)

摘要: 为掌握上海市实施清洁空气行动计划(2013~2017 年)的人群健康收益, 综合采用空气质量数值模拟、健康风险评估、环境价值评估方法定量评价行动计划实施后居民大气 $PM_{2.5}$ 暴露水平变化及健康和经济效益. 结果表明, $PM_{2.5}$ 年均暴露浓度在 35 μg·m^{-3} 及以下的人口比例由基准年的 1.62% 上升至控制年的 34.06%, 归因 $PM_{2.5}$ 暴露死亡风险由基准年的 15.2% 下降至控制年的 11.9%. 实现的健康收益总和为 118.41 亿元(95% CI: 50.24~178.19 亿元), 占 2013 年上海市国民生产总值 0.55% (95% CI:0.23%~0.82%). 行动计划的实施对保护人群健康具有积极作用, 外环线以内人口密集且 $PM_{2.5}$ 降幅较高的区域健康收益更加显著.

关键词: 清洁空气行动; $PM_{2.5}$; 空气质量模拟; 暴露; 死亡率; 健康效益

中图分类号: X513; X196 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2019)01-0024-09 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201804201

Health Benefit Analyses of the Clean Air Action Plan Implementation in Shanghai

DAI Hai-xia[1,2], AN Jing-yu[1], LI Li[1*], HUANG Cheng[1], YAN Ru-sha[1], ZHU Shu-hui[1], MA Ying-ge[1], SONG Wei-min[2], KAN Hai-dong[2]

(1. State Environmental Protection Key Laboratory of the Cause and Prevention of Urban Air Pollution Complex, Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China; 2. Key Laboratory of Public Health Safety of Ministry of Education, School of Public Health, Fudan University, Shanghai 200032, China)

Abstract: To understand the public health benefits of the Clean Air Action Plan implemented in Shanghai from 2013-2017, the changes of the $PM_{2.5}$ exposure levels and related health and economic benefits were quantitatively evaluated by using air quality numerical modeling, health risk assessment, and environmental valuation methods. The results show that the proportion of the population exposed to a mean annual $PM_{2.5}$ concentration lower than or equal to 35 μg·m^{-3} has increased from 1.62% in the base year to 34.06% in the control year. The death risk attributable to ambient $PM_{2.5}$ exposure decreased from 15.2% in the base year to 11.9% in the control year. The total health benefits are approximately 11.841 billion RMB(95% CI: 5.024-17.819 billion RMB), accounting for 0.55% (95% CI: 0.23%-0.82%) of Shanghai's GDP in 2013. The implementation of the action plan has a positive effect on the protection of the health of the population. Health benefits in areas with dense populations and high $PM_{2.5}$ declines are more pronounced within the outer ring line of Shanghai City.

Key words: clean air action plan; $PM_{2.5}$; air quality modeling; exposure; mortality; health benefits

近年来, 随着我国国民经济的快速发展和城市化进程的推进, 区域性大气复合污染日益凸显, 其中, 大气细颗粒物($PM_{2.5}$)是复合型大气污染的主要污染物, $PM_{2.5}$ 污染导致能见度恶化、并对人群健康造成潜在威胁. 根据 2015 年全球疾病负担(global burden of disease, GBD)的研究结果[1], 大气 $PM_{2.5}$ 造成中国 2015 年 110 万例(95% CI:100 万~180 万例)死亡, 而美国大气 $PM_{2.5}$ 的归因死亡人数为 8.84 万例(95% CI:6.68 万~11.5 万例), 以 $PM_{2.5}$ 为代表的复合型大气污染已经成为影响我国城市和区域可持续发展和群众健康的重大环境问题.

为改善空气质量, 保护人群健康, 我国在 2013 年 9 月发布了《大气污染防治行动计划》[2], 要求京津冀、长三角、珠三角等区域 2017 年 $PM_{2.5}$ 浓度分别较基准年下降 25%、20%、15% 以上. 为贯彻《大气污染防治行动计划》, 上海市于 2013 年 11 月发布了《上海市清洁空气行动计划》(2013~2017 年)[3](行动计划), 从能源、工业、交通、建设、生活、农业等六大领域部署了两百多条措施, 政策自实施以来, 上海市大气 $PM_{2.5}$ 的年均质量浓度从 2013 年的 62 μg·m^{-3}, 下降至 2017 年的 39 μg·m^{-3} (降幅 37.1%), 空气质量得到明显改善. 上海作为我国特大城市, 行动计划实施究竟带来多大的环境和社会效益, 受到社会各界的高度关注, 然而迄今关于这项

收稿日期: 2018-04-24; **修订日期**: 2018-07-13
基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0207506)
作者简介: 戴海夏(1977~), 女, 高级工程师, 主要研究方向为大气环境污染防控政策和人群健康影响, E-mail: Daihx@saes.sh.cn
* 通信作者, E-mail: lili@saes.sh.cn

重大政策实施的人群健康收益尚鲜有报道.

评价大气 $PM_{2.5}$ 的人群健康影响，需要准确认知人群 $PM_{2.5}$ 暴露水平和暴露反应关系. 利用地面固定监测站数据通过统计学插值模型估算人群大气 $PM_{2.5}$ 暴露水平在我国应用较多[4~10]，此方法受制于监测站布点和数据质量，并且难以考虑当地排放源的影响. 基于天气模式(weather research and forecasting，WRF)-通用多尺度空气质量模型(community multiscale air quality，CMAQ)的数值模拟方法结合了污染源排放、气象、地形等信息，可充分描述一定范围内人口对大气 $PM_{2.5}$ 的暴露特征，近年在人群大气污染物暴露评价中得到应用[11~13]. 该方法与监测数据互为验证补充[14~16]，可更为准确地描述人群污染物暴露水平. 另一方面，由于我国大气颗粒物流行病学研究的局限性，$PM_{2.5}$ 暴露反应关系的健康终点大多为短期暴露的急性死亡效应，缺乏急慢性发病效应研究及慢性健康效应队列研究. 因此，大气 $PM_{2.5}$ 对人群发病影响估算大多通过大气 PM_{10} 流行病学研究结果推导而来[4, 5, 10, 17]或参考国外研究结果[18, 19]，导致研究结论可能存在一定偏差.

为准确评价上海市实施行动计划所获得的健康收益，本文调研了近年来国内外大气 $PM_{2.5}$ 与人群死亡、发病的流行病学研究进展，综合采用 WRF-CMAQ 空气质量模型、环境暴露风险评估和环境价值评估方法，利用美国环保署、清华大学、华南理工大学共同开发的环境效益分析及图像展示系统(Environmental Benefits Mapping and Analysis Program-Community Edition，Benmap-CE)[20]，对行动计划在上海实施所带来的大气 $PM_{2.5}$ 浓度改善、人群健康效益和经济价值进行评估，旨在为行动计划的成本效益分析、环境政策的跟踪评估、后续的环境管理决策提供参考依据.

1　材料与方法

1.1　评估方法

1.1.1　$PM_{2.5}$ 暴露浓度模拟方法

采用 WRF-CMAQ 空气质量模型估算上海市实施行动计划后大气 $PM_{2.5}$ 浓度变化. 基于 WRF 模式提供的气象场资料，结合基准年(2013 年)和控制年(2017 年)大气污染物排放清单，利用 CMAQ5.0 模型开展模拟，具体技术方法详见文献[21]. 模拟结果采用行动计划实施期间上海市国控点监测数据进行了校正.

1.1.2　健康效应评估方法

开展健康效益评估的基本原理是利用流行病学发现的浓度-响应关系计算人群由于污染物暴露水平变化而带来的健康影响. 计算公式见式(1)和式(2)：

$$\Delta Y = Y_0(1 - e^{-\beta\Delta PM}) \times Pop \quad (1)$$

$$\beta = \frac{\ln RR}{\Delta PM} \quad (2)$$

式中，ΔY 为污染物浓度变化的健康影响估计；Y_0 为基线发病率；β 为污染物浓度和健康影响的风险系数(浓度-响应关系系数)；ΔPM 为空气质量改善幅度；Pop 为暴露人口；RR 为相对危险度.

评价大气 $PM_{2.5}$ 长期暴露造成的早逝效应时，由于国内缺乏 $PM_{2.5}$ 长期暴露的队列研究成果，因此研究采用 GBD 研究的综合暴露-反应(integrated exposure-response，IER)模型[22, 23]，计算 $PM_{2.5}$ 暴露的人群死亡归因风险(population attributable risk，PAR). 该模型基于全球大气污染、二手烟、主动吸烟和室内空气污染的队列研究成果拟合了与 $PM_{2.5}$ 暴露密切相关的主要死因的相对风险(RR)函数，可以在更大的 $PM_{2.5}$ 暴露浓度范围内描述暴露-反应关系，减少线性外推法可能带来的误差，对于心脑血管疾病死因还给出了分年龄段的拟合曲线. 本研究 IER 模型的具体形式见式(3)~(5)：

$$PAR = \frac{RR_{IER}(Z) - 1}{RR_{IER}(Z)} \quad (3)$$

$$RR_{IER}(Z) = \begin{cases} 1 + \alpha\{1 - \exp[-\gamma(Z - Z_{cf})^{\delta}]\}, & Z \geqslant Z_{cf} \\ 1, & Z < Z_{cf} \end{cases} \quad (4)$$

$$\Delta Y = Y_0 \times PAR \times Pop \quad (5)$$

式中，Z 为 $PM_{2.5}$ 暴露浓度($\mu g \cdot m^{-3}$)；Z_{cf} 为反事实浓度，假设低于这个浓度没有额外风险，超过该阈值时，RR 随浓度升高增大，计算过程中主要采用 GBD 研究提供的参考阈值；α、γ、δ 为暴露效应函数中的计算参数，满足不同的分布；ΔY 为污染物浓度变化的健康影响估计；Y_0 为基线发病率.

1.1.3　健康价值评估方法

对于过早死亡(早逝)等慢性效应的经济损失评价，本文采用统计寿命价值(value of a statistical life，VSL)的方法进行评估. VSL 是衡量社会平均意义和统计意义上的个体对降低死亡等风险的边际支付意愿，可通过意愿调查价值评估等方法研究获得. 考虑到支付意愿会随个人实际收入的增长而相应增加，因此，本文修正了不同年份居民收入变化、通货膨胀等因素带来的影响，计算公式见式(6).

$$VSL_{FY} = VSL_{base} \times \left(\frac{CPI_{FY}}{CPI_{base}}\right) \times \left(\frac{Income_{FY}}{Income_{base}}\right)^{Elasticity} \quad (6)$$

式中，VSL_{FY}、VSL_{base}分别表示评估年、基础年的统计寿命价值(万元·人$^{-1}$)，CPI_{FY}、CPI_{base}分别表示评估年、基础年的消费价格指数，$Income_{FY}$、$Income_{base}$分别表示评估年、基准年的可支配收入(万元·人$^{-1}$)．Elasticity 为收入弹性，表示因收入增加 1% 带来的社会平均意义上的个体对死亡等风险支付意愿的增加比例．参考穆泉等[24]的研究，收入弹性参数取值 1.4 进行计算．

对于门急诊、入院等健康效应的经济价值采取疾病成本法[25]．疾病成本计算患者由于门急诊或住院期间所有因患病所引发的直接和间接费用．包括挂号、诊疗、检查、药费、手术费等以及由于患病所引起的时间损失成本和误工费．计算公式见式(7)．

$$E_i = C_i + \mathrm{GDP_p} \times T_i + O_i \quad (7)$$

式中，E_i 代表某种健康终点 i 的经济成本(元·人$^{-1}$)，C_i 代表健康终点 i 的直接医疗成本(元·人$^{-1}$)，T_i 指治疗疾病所花费的时间(即间接产生的误工时间)(d)，GDP_p 代表人均国民生产总值(元·人$^{-1}$)．O_i 代表其他的间接费用，如营养、交通、陪护等费用(元·人$^{-1}$)．

1.2 数据处理

1.2.1 人口资料

基准年常住人口资料通过文献[26]获得，结合 4 km×4 km 网格和夜间灯光投影卫星数据，制作了人口网格化数据．根据人口数据，本研究计算了人口加权的 $PM_{2.5}$ 暴露水平(population-weighted exposure level，C_p)，其计算见式(8)：

$$C_p = \frac{\sum (P_i \times C_i)}{\sum P_i} \quad (8)$$

式中，i 为网格数，P_i 为该网格内常住人口数，C_i 为该网格内大气 $PM_{2.5}$ 浓度(μg·m^{-3})．

1.2.2 健康终点、暴露反应关系和单位经济价值

大气 $PM_{2.5}$ 的健康效应终点包括亚临床症状、发病、死亡等急慢性效应的终端变化．其中死亡是最主要的疾病负担之一．短期急性和长期慢性暴露都会导致早逝发生．根据流行病学研究结果[27,28]，急性死亡效应往往只占总损失的小部分，且长期暴露中包括了短期死亡效应，因此，为避免重复计数，本研究仅评价长期暴露导致早逝的健康损失．结合 GBD 研究进展，根据国际疾病分类编码 ICD-10，选取缺血性心脏病(ischemic heart disease，IHD，I20 ~ I25)、脑血管病(cerebrovascular diseases，CVD，I60 ~ I69)、慢性阻塞性肺部疾病(chronic obstructive pulmonary disease，COPD，J40 ~ J44)、肺癌(lung cancer，LC，C33 ~ C34)这 4 种疾病死亡数进行研究．此外，慢性健康效应终点还纳入了疾病负担较高的成人慢性支气管炎(chronic bronchitis，J40 ~ J42)．对于急性效应，选择了循环系统疾病(I00 ~ I99)、呼吸系统疾病(J00 ~ J99)两类疾病的门急诊和入院率开展研究(其中急诊未能获得分科数据)．通过文献[26, 28 ~ 31]获得上海市基准年上述健康终点的基线资料．

各类健康终点暴露反应关系系数通过检索国内外大气 $PM_{2.5}$ 急慢性健康效应研究获得．文献选择的原则为：健康效应终点分类明确，研究方法为时间序列、队列研究等成熟方法，优先选择上海市或长三角区域本地研究结果，或多城市研究和 Meta 分析研究．关于大气 $PM_{2.5}$ 长期暴露早逝及慢性支气管炎的暴露反应关系，由于国内缺乏慢性效应的队列研究，本文分别选择了 GBD 研究和 Abbey 等[32]研究提供的暴露反应关系进行估算．

对于死亡、慢性支气管炎的单位价值，综合目前国内开展的意愿调查价值评估研究，分别参考 Voorhees 等[14]和阚海东等[33]在上海开展的支付意愿研究结果，并根据公式(6)，将货币年调整至 2013 年．对于门急诊、住院的经济负担损失，通过查阅文献[26, 31]，根据公式(7)，计算得到 2013 年上海市门急诊、住院的疾病成本费用．

本研究选择的健康终点、基线发病率和暴露反应关系、相应健康终点的单位价值见表 1．

2 结果与分析

2.1 行动计划实施后人群 $PM_{2.5}$ 暴露水平变化

利用 Benmap-CE 软件，输入基准年和控制年经校正的空气质量模拟数据，可获得行动计划实施后大气 $PM_{2.5}$ 的改善幅度、空间分布及暴露在不同浓度水平 $PM_{2.5}$ 下人口比例的变化情况，见图 1 和图 2．

从图 1 中可知，实施了清洁空气行动计划之后，上海总体 $PM_{2.5}$ 年均浓度改善明显，降幅较高的为 7 个中心城区，以及郊区的宝山区、嘉定区、闵行区、松江区的大部分地区、青浦区东北部．从图 2 可知，$PM_{2.5}$ 年均暴露浓度在 35 μg·m^{-3} 及以下的人口比例由基准年 2013 年的 1.62% 上升至 2017 年的 34.06%，$PM_{2.5}$ 年均暴露浓度在 35 ~ 45 μg·m^{-3} 的人口比例由 8.97% 上升至 62.73%，$PM_{2.5}$ 年均暴露浓度在 45 ~ 55 μg·m^{-3} 的人口比例由 18.68% 下降至 3.21%；$PM_{2.5}$ 年均暴露浓度在 55 μg·m^{-3} 以上的人口比例由 70.73% 降至 0．清洁空气行动计划的实施对降低人口 $PM_{2.5}$ 暴露水平作用

表 1　健康终点、人群基线发生率、暴露反应关系和单位经济价值

Table 1　Health endpoints, population baseline incidences, exposure-response coefficients, and unit economic value

健康终点		基线发生率/‰	暴露反应关系参数 β(95% CI)或多参数					单位价值/万元·人$^{-1}$
			α	γ	δ	Z_{cf}	文献	
早逝(慢性暴露)	LC	0.48[29]	159	0.000 119	0.735	7.24	[7, 34]	268.40
	COPD	0.60[29]	18.3	0.000 932	0.682	7.17		
	IHD	0.53[30]	0.843	0.072 4	0.544	6.96		
	CVD	0.89[30]	1.01	0.016 4	1.14	8.38		
	总死亡	5.24[26]	0.000 90(−0.000 30, 0.001 78)				[35]	
			0.005 2(0.003 4, 0.007 0)				[36]	
慢性支气管炎(≥15 岁)		1.48[28]	0.013 2(−0.000 14, 0.026 505)				[32]	36.00
门诊[1)]	循环系统疾病	1 190.9[31]	0.000 47(0.000 45, 0.000 49)				[37]	4.57×10^{-2}
	呼吸系统疾病	547.3[31]	0.000 50(0.000 30, 0.000 80)				[38, 39]	
急诊	总人次	48[31]	0.000 14(0.000 04, 0.000 28)				[40, 41]	
住院	循环系统疾病	20[31]	0.000 56(0.000 36, 0.000 75)				[42]	1.78
	呼吸系统疾病	8.8[31]	0.001 78(0.001 49, 0.002 08)				[43]	

1) 主要类别疾病门诊年就诊率以 2013 年中国东部城市居民疾病别两周就诊率×26.06 计算得到

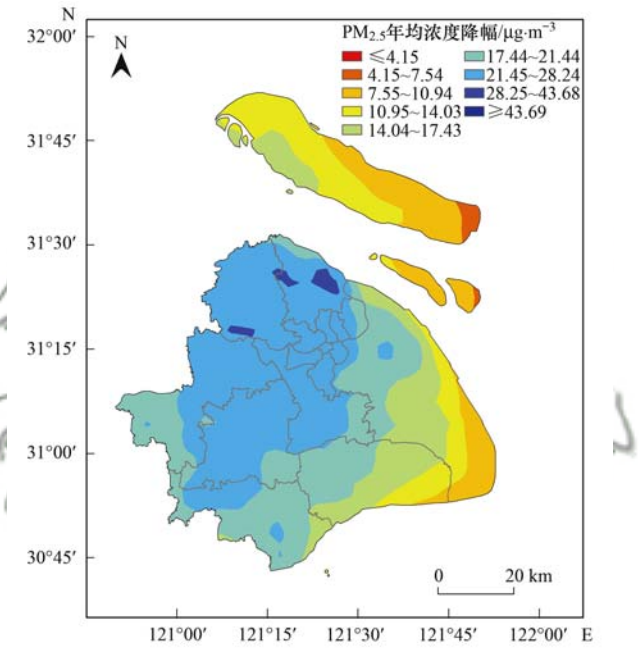

图 1　行动计划实施后 $PM_{2.5}$ 年均浓度降幅

Fig. 1　Reduction of the annual mean concentration of $PM_{2.5}$ due to the implementation of the Clean Air Action Plan

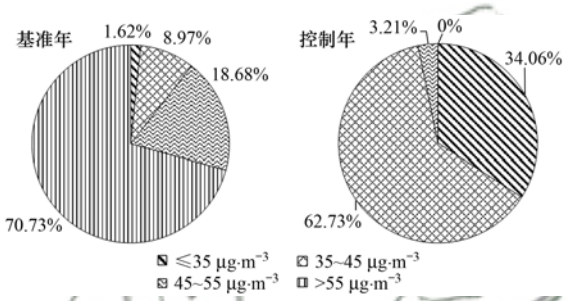

图 2　行动计划实施后暴露在不同水平 $PM_{2.5}$ 的人口比例变化

Fig. 2　Changes in the proportion of the exposure to different levels of $PM_{2.5}$ due to the implementation of the Clean Air Action Plan

明显.

2.2　行动计划实施的健康及经济收益

通过以上测算的人口暴露水平变化，根据表 1 中不同健康终点的基线发生率、暴露-反应关系函数和单位价值可计算得到上海市实施行动计划可避免的归因 $PM_{2.5}$ 污染的主要疾病死亡数、发病数和经济收益，见表 2. 从中可知，以早逝等健康终点进行评价，行动计划实施可带来118.41亿元(95%

表 2　行动计划实施带来的大气 $PM_{2.5}$ 浓度削减获得的健康及经济收益

Table 2　Health and economic benefits of the reduction of the $PM_{2.5}$ levels resulting from the implementation of the Clean Air Action Plan

健康终点	分类	避免健康受损人数/人 (95% 可信区间)	健康收益价值/亿元 (95% 可信区间)
早逝	IHD	427(309, 814)	11.46(8.29, 21.85)
	CVD	1 457(538, 2 380)	39.11(14.44, 63.88)
	COPD	761(488, 920)	20.42(13.10, 24.69)
	LC	794(384, 895)	21.31(10.31, 24.02)
	小计	3 439(1 719, 5 009)	92.30(46.14, 134.44)
慢性支气管炎		6 025(184, 10 656)	21.69(0.66, 38.36)
门诊	循环系统疾病	288 508(276 258, 300 736)	1.319(1.263, 1.374)
	呼吸系统疾病	140 850(70 663, 210 636)	0.644(0.323, 0.963)
	小计	429 358(346 921, 511 372)	1.962(1.585, 2.337)
急诊	总人次	3 745(640, 6 839)	0.017(0.003, 0.031)
住院	循环系统疾病	5 761(3 768, 7 745)	1.027(0.671, 1.380)
	呼吸系统疾病	7 922(6 637, 9 198)	1.412(1.183, 1.639)
	小计	13 683(10 405, 16 944)	2.439(1.854, 3.020)
经济收益合计/亿元	—	—	118.41(50.24, 178.19)
GDP 比重/%	—	—	0.55(0.23, 0.82)

CI：50.24～178.19 亿元)的经济价值，约占 2013 年上海市国内生产总值(GDP)的 0.55%(95% CI：0.23%～0.82%)．其中，避免早逝的健康收益占总收益的 78%，从而可知，削减大气 $PM_{2.5}$ 暴露的死亡风险是空气质量改善健康效益的主要贡献因素．

2.3 归因 $PM_{2.5}$ 污染的早逝风险的时空分布

由于死亡效应是最主要的大气污染疾病负担，为深入了解行动计划实施所获得的人群健康效益的年际变化和地域差别特征，本文针对归因 $PM_{2.5}$ 污染的 4 种主要疾病早逝人数的时空分布开展进一步分析，从而为后续的环境政策制定提供参考依据．

2.3.1 归因 $PM_{2.5}$ 污染的疾病别死亡率年际变化

假设研究期间 4 种疾病死亡率按照基准年发生率保持不变，参考 IER 综合暴露反应模型，可计算出上海市 2013～2017 年，以及分别达到世界卫生组织(WHO)推荐过渡阶段目标值(IT-1、IT-2、IT-3)情景下，由于 $PM_{2.5}$ 年均浓度变化带来的归因死亡人数的变化趋势，见图 3，其中，2013～2017 年上海市逐年常住人口数根据文献[26]获得；达到 IT-1(35 $\mu g \cdot m^{-3}$)情景以 2022 年作为目标年，以基准年人口乘以 2013～2017 年人口平均增速得到，达到 IT-2，IT-3 情景的人口根据文献[44]按2 500 万人计算．从图 3 可知，在大气污染导致的早逝效应中，心脑血管疾病死亡所占的比重较大．随着大气 $PM_{2.5}$ 的稳步改善，归因于空气污染的死亡人数逐渐下降，2017 年及分别达到 WHO 推荐的 IT-1、IT-2、IT-3 情景下归因 $PM_{2.5}$ 疾病死亡数分别较基准年下降 20.3%、25.4%、40.2%、67.8%，其中，肺癌、脑血管疾病死亡人数的降幅更大．将估算所得的归因 $PM_{2.5}$ 污染死亡数与常住人口总死亡数[26]进行逐年对比，获得行动计划实施期间人群归因 $PM_{2.5}$ 污染死亡风险(PAR)变化趋势，见图 4．从中可知，研究期间，总死亡数年际间存在小幅波动，而 PAR 总体呈下降趋势，从 2013 年的 15.2% 下降至 2017 年的 11.9%，降幅 3.3%．

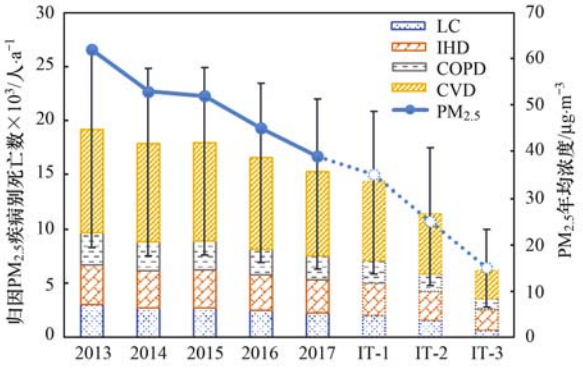

图 3 2013～2017 年及达到 WHO 的 3 个过渡阶段目标值情景下 $PM_{2.5}$ 年均浓度与归因其污染的 4 种疾病死亡率年际变化趋势

Fig. 3 Trends of annual average concentrations of the $PM_{2.5}$ and $PM_{2.5}$-attributable mortality based on four endpoints from 2013 to 2017 and under the three scenarios that achieve WHO interim targets

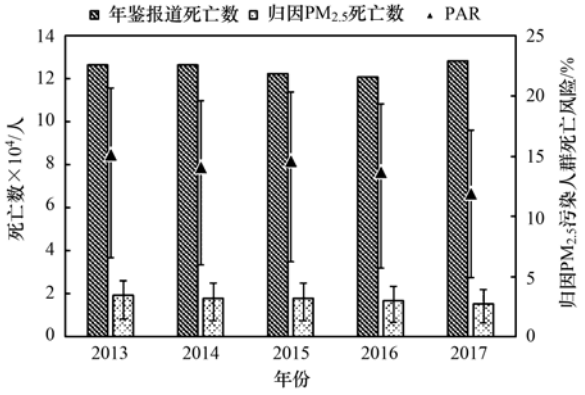

图 4 2013～2017 年上海市总死亡(年鉴报道)及归因 $PM_{2.5}$ 死亡(本研究)变化趋势

Fig. 4 Trends of total deaths (reported in the yearbook) and $PM_{2.5}$-attributable deaths (this study) from 2013-2017 in Shanghai

2.3.2 行动计划实施避免早逝效应的空间分布

根据 2.2 节的计算结果可绘制出行动计划实施可避免的 4 种主要疾病死亡数的空间分布，见图 5．从中可知，尽管各类疾病死亡数空间分布存在差异，但是总体特征一致，即单位面积早逝人数削减量由中心城区向周边区域逐渐递减，早逝人数削减量较高的区域集中在外环线以内的区域，包括 7 个中心城区及宝山区、闵行区、浦东新区部分区域．这些区域人口分布密集且空气质量改善幅度也较大，因此具有更加显著的健康效益．

将模型测算的单位网格规避的早逝人数按行政区属性加和，可得到行动计划实施后上海各行政区避免的早逝人数，见表 3．早逝人数降低较多的区包括浦东新区、闵行区、宝山区、嘉定区和松江区等，这些区尽管人口密度低于中心城区，但是由于常住人口基数大，$PM_{2.5}$ 改善幅度较高，因而避免早逝的总人数超过了中心城区．

将各区控制年(2017 年)相对于基准年的人口加权 $PM_{2.5}$ 暴露浓度降幅与归因大气 $PM_{2.5}$ 污染 4 种疾病早逝人数总和降幅进行对比，可得到图 6．从中可知，人口加权的 $PM_{2.5}$ 暴露浓度的降幅范围为 32.4%～41.2%(全市平均 38.3%)，归因大气 $PM_{2.5}$ 污染早逝人数的降幅范围为 9.3%～26.1%(全市平均 17.9%)，前者为后者的 1.5～4.0 倍，反映出死亡效应对 $PM_{2.5}$ 浓度变化呈现非线性响应关系．此外，嘉定、宝山、闵行、青浦等区早逝人次降幅较高，分析原因，这些区地处上海西部或北

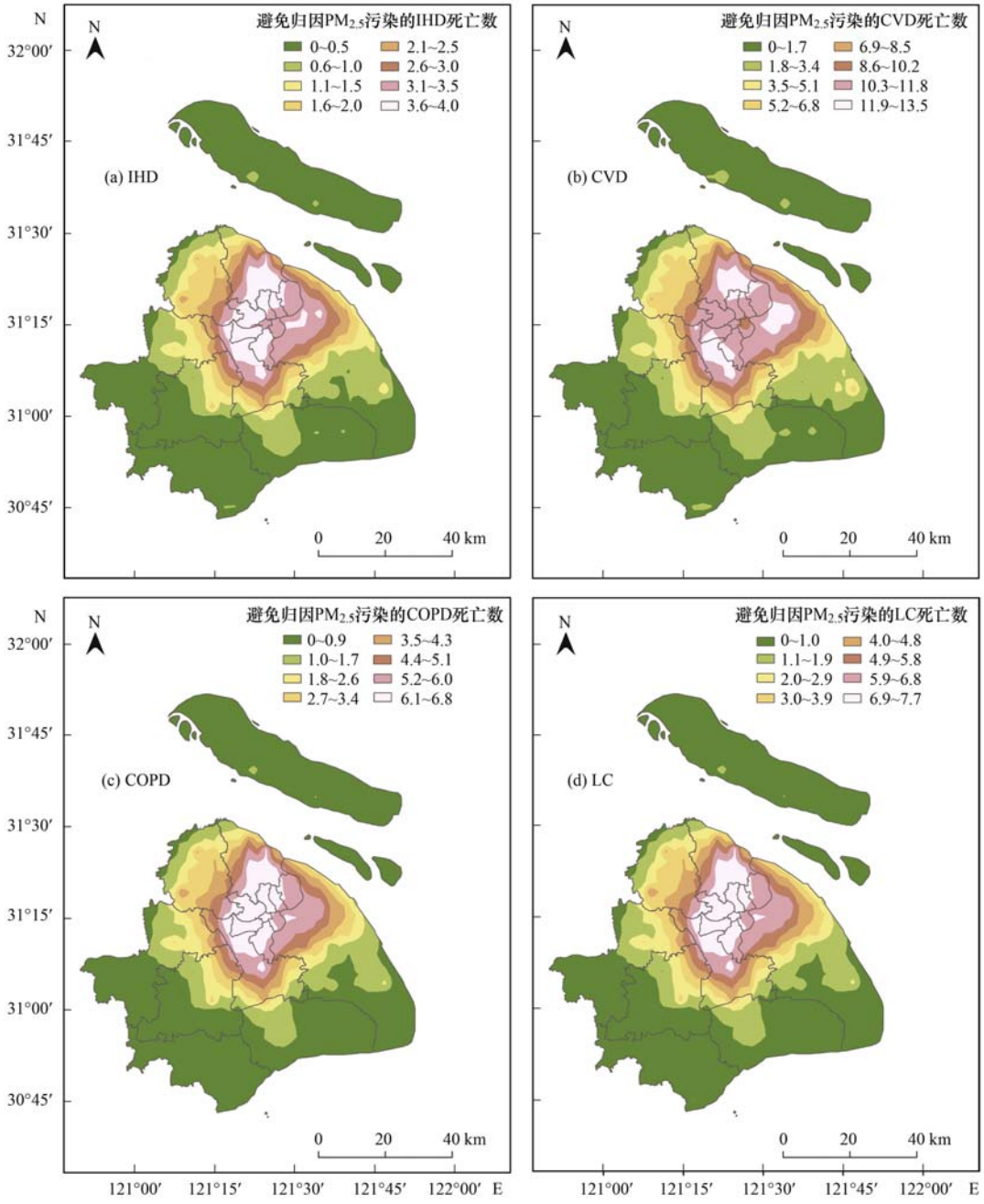

图 5　行动计划实施避免的归因 $PM_{2.5}$ 污染的 4 种疾病死亡人数空间分布

Fig. 5　Spatial distribution of the reduction of four cause-specific premature deaths due to the implementation of the Clean Air Action Plan

部，除本地排放因素以外，由于地理位置、气象条件等因素的影响，$PM_{2.5}$ 本底浓度高于全市平均水平，并且这些区常住人口基数大，因此实施行动计划之后早逝人次降幅更高.

3　讨论

本文采用 IER 综合模型评估行动计划实施以来暴露人群早逝效应的变化. 以研究估算的基准年归因 $PM_{2.5}$ 污染死亡数与同类研究进行对比，见图 7. 从中可知，本研究结果与使用 IER 模型[15, 29, 45]的研究报道结果接近，而与 Cao 等[35]和 Fang 等[36]的计算结果存在差异. 分析原因，Cao 等[35]的队列研究开展年份较早(1999 ~ 2000 年)，且 $PM_{2.5}$ 浓度由 TSP 转化而来，因而存在较大的不确定性；而 Fang 等[36]的 Meta 分析研究健康终点选取的是全死因早逝人数而非 4 种疾病早逝人数之和，因而其计算结果偏高. 可见，暴露反应关系的选择对研究结果具有重要影响. 本研究计算得到的归因 $PM_{2.5}$ 暴露死亡风险与 Cohen 等[1]、Song 等[7]和 Maji 等[46]的报道结果类似，因此，在本地队列研究匮乏的情况下，IER 模型是评估 $PM_{2.5}$ 长期暴露健康影响较为合理的选择.

表 3 清洁行动计划实施上海市各行政区规避的早逝人次

Table 3 Reduction of premature deaths in different districts in Shanghai due to the implementation of the Clean Air Action Plan

序号	辖区	避免早逝人次(95% 可信区间)				
		LC	COPD	IHD	CVD	合计
1	青浦区	44(22, 49)	42(28, 51)	25(18, 47)	79(32, 119)	190(100, 266)
2	金山区	27(13, 31)	26(16, 32)	10(7, 19)	35(12, 60)	98(48, 142)
3	松江区	59(29, 66)	56(36, 68)	27(20, 52)	91(35, 144)	234(120, 330)
4	嘉定区	65(33, 71)	62(41, 74)	48(35, 89)	149(61, 224)	323(170, 457)
5	崇明县	16(6, 20)	15(9, 20)	9(7, 18)	39(11, 80)	79(32, 138)
6	闵行区	87(43, 97)	83(54, 100)	57(42, 109)	191(73, 301)	419(211, 608)
7	宝山区	82(41, 92)	79(52, 95)	58(42, 109)	189(73, 296)	408(208, 592)
8	普陀区	37(20, 40)	36(24, 42)	13(9, 23)	38(17, 56)	124(70, 161)
9	长宁区	23(12, 25)	22(15, 26)	8(6, 15)	26(11, 39)	79(44, 105)
10	奉贤区	38(17, 45)	37(22, 45)	16(11, 31)	59(19, 106)	150(69, 227)
11	徐汇区	33(17, 36)	32(21, 38)	13(9, 24)	40(16, 61)	118(63, 159)
12	原闸北区	28(15, 30)	27(18, 32)	7(5, 12)	20(9, 30)	82(47, 104)
13	原静安区	7(4, 8)	7(5, 8)	2(1, 3)	4(2, 6)	20(12, 24)
14	黄浦区	18(10, 20)	17(12, 21)	4(3, 7)	12(5, 17)	51(30, 65)
15	浦东新区	167(72, 196)	159(96, 198)	114(81, 222)	425(139, 751)	864(388, 1 366)
16	虹口区	25(13, 27)	24(16, 28)	5(4, 10)	16(7, 23)	70(40, 88)
17	杨浦区	37(18, 41)	36(23, 43)	13(9, 24)	43(16, 68)	128(66, 176)
总计		794(384, 895)	761(488, 920)	427(309, 814)	1 457(538, 2 380)	3 439(1 720, 5 009)

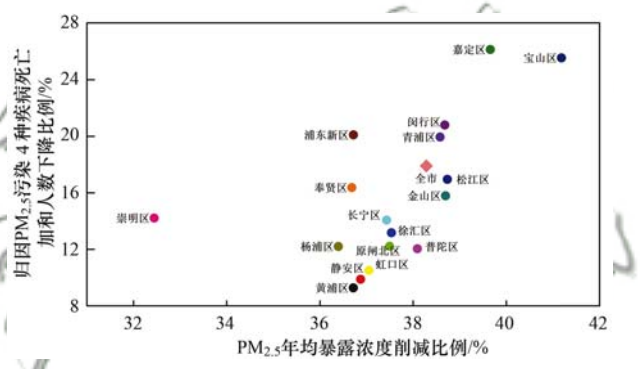

图 6 控制年人口加权 $PM_{2.5}$ 年均浓度削减率与归因 $PM_{2.5}$ 污染的早逝人数削减率

Fig. 6 Reduction of population-weighted annual mean concentrations of $PM_{2.5}$ and $PM_{2.5}$-attributable premature deaths in the control year

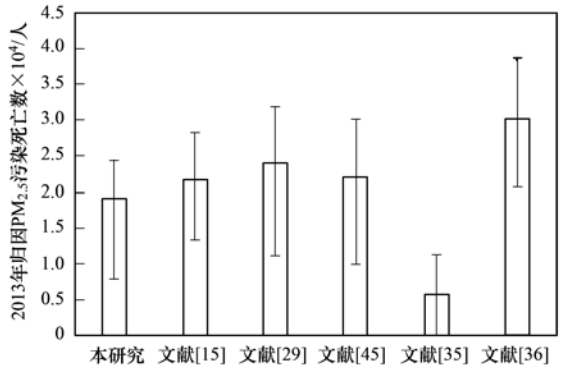

图 7 不同研究关于 2013 年上海市归因大气 $PM_{2.5}$ 污染早逝总人次结果比较

Fig. 7 Results of $PM_{2.5}$-attributable premature death of Shanghai in 2013 reported by this study and other studies

根据本研究，在大气污染导致的早逝效应中，心脑血管系统死亡所占的比重较大，随着大气 $PM_{2.5}$ 浓度逐步降低，相应疾病死亡人数将呈现不同程度的下降，循环系统、肿瘤等疾病在上海市死因顺位中排名靠前，因此，实施持续的空气污染控制，对于预防和干预威胁常住居民的主要疾病，提高公共健康水平具有重要意义，尤其是在 $PM_{2.5}$ 污染本底浓度相对较高、人口密集的区域，能够获得显著的健康和经济收益. 另外，本研究发现，基于 IER 模型，一定比例的 $PM_{2.5}$ 暴露浓度降幅，并未获得等比例的归因 $PM_{2.5}$ 死亡人数降低，分析原因，主要是行动计划实施期间 $PM_{2.5}$ 浓度的变幅范围仍然处于 IER 模型暴露反应关系曲线中较为平坦的部分，因此死亡削减的边际效应较为局限. 未来将结合本地队列研究所获得的暴露反应关系进展，进一步观察人群死亡效应对空气质量改善的响应特征.

本研究的人群基线发病、死亡等健康资料主要来自统计年鉴和 GBD 的报道. 鉴于基础资料的局限，本文选取了流行病学研究和基础健康资料相对较为齐全的健康终点(死亡、门急诊、住院)开展研究，而诸如慢性心脑血管疾病、肺功能降低、限制活动天数、不良生殖结局等与大气污染具有关联的健康终点在本研究中尚不能定量评估，因此，有可能低估行动计划实施后获得的健康效益和经济价值. 此外，在考察空气质量改善健康效益的空间分布时，由于难以获得区、镇、街道的死亡数据，是假设各区基线主要疾病死亡率相同的条件下开展评估的，可能会导致结果存在一定偏差. 生命价值的计算主要是采用成果参照法进行估算，也可能带来一定的不确定性. 未来需进一步优化研究设计，获得更加精细化

的人群基础健康资料和经济数据，从而对大气污染控制的人群健康收益开展更加准确的分析.

此外，大气 $PM_{2.5}$ 是一种混合物，不同来源的大气 $PM_{2.5}$ 组分、毒性及健康影响均有所区别. 然而，由于目前我国 $PM_{2.5}$ 组分健康效应流行病学研究刚刚起步，尚无系统的研究成果可以借鉴，因此本文是假设 $PM_{2.5}$ 各组分的健康效应基本等同的前提下开展分析的. 今后将密切跟踪流行病学研究进展，鉴别控制不同来源 $PM_{2.5}$ 的健康收益差异.

4　结论

(1)上海实施行动计划之后，$PM_{2.5}$ 年均浓度降幅较高的区域为中心城区及北部、西部部分区域. 年均浓度暴露在 35 $\mu g \cdot m^{-3}$ 以下的人口比例由 2013 年的 1.62% 上升至 2017 年的 34.06%.

(2)由于行动计划的实施，避免了 3 439 例(95% CI：1 719 ~ 5 009 例)早逝，6 025 例(95% CI：184 ~ 10 656 例)慢性支气管炎，429 358 例(95% CI：346 921 ~ 511 372 例)门诊，3 745 例(95% CI：640 ~ 6 839 例)急诊，13 683 例(95% CI：10 405 ~ 16 944 例)住院，实现的健康收益总和为 118.41 亿元(95% CI：50.24 ~ 178.19 亿元)，占 2013 年上海市国民生产总值 0.55%(95% CI：0.23% ~ 0.82%). 避免早逝人次的健康收益占总收益的 78%.

(3)心脑血管死亡在大气污染导致的早逝效应中所占的比重较大，随着行动计划的深入推进，归因于大气 $PM_{2.5}$ 污染的死亡人数及死亡风险也随之逐步下降. 其中，肺癌、脑血管疾病死亡人数的下降幅度更大. 从空间分布看，外环线以内人口密集且 $PM_{2.5}$ 改善幅度较大的区域，健康收益更显著.

参考文献：

[1] 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.

[2] 中国国务院. 大气污染防治行动计划[EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2013-09/13/content_4561.htm, 2013-09-13.

[3] 上海市人民政府. 上海市清洁空气行动计划(2013-2017)[EB/OL]. http://www.shanghai.gov.cn/shanghai/node2314/node2319/n31973/n31979/u26ai37377.shtml, 2013-11-07.

[4] 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.

[5] 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.

[6] Song Y S, Wang X K, Maher B A, *et al*. The spatial-temporal characteristics and health impacts of ambient fine particulate matter in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, **112**: 1312-1318.

[7] 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.

[8] Chen H, Lin Y, Su Q, *et al*. Spatial variation of multiple air pollutants and their potential contributions to all-cause, respiratory, and cardiovascular mortality across China in 2015-2016[J]. Atmospheric Environment, 2017, **168**: 23-35.

[9] Chen L, Shi M S, Gao S, *et al*. Assessment of population exposure to $PM_{2.5}$ for mortality in China and its public health benefit based on BenMAP[J]. Environmental Pollution, 2017, **221**: 311-317.

[10] 魏国茹，史兴民. 西安市 $PM_{2.5}$ 健康损害价值评估[J]. 环境科学, 2018, **39**(7): 3014-3021.
Wei G R, Shi X M. Evaluation the extent of health damage caused by $PM_{2.5}$ particulate in Xi'an City[J]. Environmental Science, 2018, **39**(7): 3014-3021.

[11] Boldo E, Linares C, Lumbreras J, *et al*. Health impact assessment of a reduction in ambient $PM_{2.5}$ levels in Spain[J]. Environment International, 2011, **37**(2): 342-348.

[12] Hou X T, Strickland M J, Liao K J. Contributions of regional air pollutant emissions to ozone and fine particulate matter-related mortalities in eastern U. S. urban areas[J]. Environmental Research, 2015, **137**: 475-484.

[13] Wang J D, Wang S X, Voorhees A S, *et al*. Assessment of short-term $PM_{2.5}$-related mortality due to different emission sources in the Yangtze River Delta, China[J]. Atmospheric Environment, 2015, **123**: 440-448.

[14] Voorhees A S, Wang J D, Wang C C, *et al*. Public health benefits of reducing air pollution in Shanghai: a proof-of-concept methodology with application to BenMAP[J]. Science of the Total Environment, 2014, **485-486**: 396-405.

[15] Liu J, Han Y Q, Tang X, *et al*. Estimating adult mortality attributable to $PM_{2.5}$ exposure in China with assimilated $PM_{2.5}$ concentrations based on a ground monitoring network[J]. Science of the Total Environment, 2016, **568**: 1253-1262.

[16] Liu H, Liu S, Xue B R, *et al*. Ground-level ozone pollution and its health impacts in China[J]. Atmospheric Environment, 2018, **173**: 223-230.

[17] 吕铃钥，李洪远. 京津冀地区 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 污染的健康经济学评价[J]. 南开大学学报(自然科学版), 2016, **49**(1): 69-77.
Lü L Y, Li H Y. Health economic evaluation of PM_{10} and $PM_{2.5}$ pollution in Beijing-Tianjin-Hebei region of China[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis, 2016, **49**(1): 69-77.

[18] Jiang X J, Hong C P, Zheng Y X, *et al*. To what extent can China's near-term air pollution control policy protect air quality and human health? A case study of the Pearl River Delta region[J]. Environmental Research Letters, 2015, **10**(10): 104006.

[19] 刘帅，宋国君. 城市 $PM_{2.5}$ 健康损害评估研究[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(4): 1468-1476.
Liu S, Song G J. Evaluation of $PM_{2.5}$'s adverse human health effect in cities[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(4): 1468-1476.

[20] 杨毅，朱云，Jang C，等. 空气污染与健康效益评估工具 BenMAP CE 研发[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(9): 2395-

2401.
Yang Y, Zhu Y, Jang C, *et al*. Research and development of environmental benefits mapping and analysis program: community edition[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, **33**(9): 2395-2401.

[21] 李莉, 安静宇, 卢清. 清洁空气行动计划实施对长三角地区 $PM_{2.5}$ 污染改善效果模拟评估[J]. 环境科学研究, 2015, **28**(11): 1653-1661.
Li L, An J Y, Lu Q. Modeling assessment of $PM_{2.5}$ concentrations under implementation of Clean Air Action Plan in the Yangtze River Delta region[J]. Research of Environmental Sciences, 2015, **28**(11): 1653-1661.

[22] 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.

[23] Butt E W, Turnock S T, Rigby R, *et al*. Global and regional trends in particulate air pollution and attributable health burden over the past 50 years[J]. Environmental Research Letters, 2017, **12**(10): 104017.

[24] 穆泉, 张世秋. 中国2001—2013年 $PM_{2.5}$ 重污染的历史变化与健康影响的经济损失评估[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2015, **51**(4): 694-706.
Mu Q, Zhang S Q. Assessment of the trend of heavy $PM_{2.5}$ pollution days and economic loss of health effects during 2001-2013[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2015, **51**(4): 694-706.

[25] 穆泉, 张世秋. 2013年1月中国大面积雾霾事件直接社会经济损失评估[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(11): 2087-2094.
Mu Q, Zhang S Q. An evaluation of the economic loss due to the heavy haze during January 2013 in China[J]. China Environmental Science, 2013, **33**(11): 2087-2094.

[26] 上海市统计局. 上海统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2014-2018.

[27] Bank World. Cost of pollution in China: economic estimates of physical damages[M]. Washington DC: World Bank, 2007.

[28] 陈仁杰, 陈秉衡, 阚海东. 我国113个城市大气颗粒物污染的健康经济学评价[J]. 中国环境科学, 2010, **30**(3): 410-415.
Chen R J, Chen B H, Kan H D. A health-based economic assessment of particulate air pollution in 113 Chinese cities[J]. China Environmental Science, 2010, **30**(3): 410-415.

[29] Tian L, Zeng Q, Dong W T, *et al*. Addressing the source contribution of $PM_{2.5}$ on mortality: an evaluation study of its impacts on excess mortality in China[J]. Environmental Research Letters, 2017, **12**(10): 104016.

[30] 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.

[31] 国家卫生和计划生育委员会. 2014中国卫生和计划生育统计年鉴[M]. 北京: 中国协和医科大学出版社, 2014.

[32] Abbey D E, Ostro B E, Petersen F, *et al*. Chronic respiratory symptoms associated with estimated long-term ambient concentrations of fine particulates less than 2.5 microns in aerodynamic diameter ($PM_{2.5}$) and other air pollutants[J]. Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology, 1995, **5**(2): 137-159.

[33] 阚海东, 陈秉衡, 汪宏. 上海市城区大气颗粒物污染对居民健康危害的经济学评价[J]. 中国卫生经济, 2004, **23**(2): 8-11.
Kan H D, Chen B H, Wang H. Economic assessment of health impact due to particulate air pollution in urban areas of Shanghai[J]. Chinese Health Economics, 2004, **23**(2): 8-11.

[34] Lee C J, Martin R V, Henze D K, *et al*. Response of global particulate-matter-related mortality to changes in local precursor emissions[J]. Environmental Science & Technology, 2015, **49**(7): 4335-4344.

[35] Cao J, Yang C X, Li J X, *et al*. Association between long-term exposure to outdoor air pollution and mortality in China: a cohort study[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, **186**(2-3): 1594-1600.

[36] Fang D, Wang Q G, Li H M, *et al*. Mortality effects assessment of ambient $PM_{2.5}$ pollution in the 74 leading cities of China[J]. Science of the Total Environment, 2016, **569-570**: 1545-1552.

[37] 陈献. 北京市冬季 $PM_{2.5}$ 污染对呼吸、循环系统疾病影响的时间序列分析[D]. 石家庄: 河北医科大学, 2016.
Chen X. Research the time series analysis the effect of $PM_{2.5}$ pollution on respiration and circulation system in winter in Beijing[D]. Shijiazhuang: Hebei Medical University, 2016.

[38] 殷永文, 程金平, 段玉森, 等. 上海市霾期间 $PM_{2.5}$、PM_{10} 污染与呼吸科、儿呼吸科门诊人数的相关分析[J]. 环境科学, 2011, **32**(7): 1894-1898.
Yin Y W, Cheng J P, Duan Y S, *et al*. Correlation analysis between the $PM_{2.5}$, PM_{10} which were taken in the hazy day and the number of outpatient about breathing sections, breathing sections of pediatrics in Shanghai[J]. Environmental Science, 2011, **32**(7): 1894-1898.

[39] 梁肖, 闫英洁, 张迪, 等. $PM_{2.5}$ 污染与呼吸系统疾病门诊量关系的 Meta 分析[J]. 环境与职业医学, 2016, **33**(9): 874-879.
Liang X, Yan Y J, Zhang D, *et al*. Meta-analysis on association between $PM_{2.5}$ concentrations and hospital outpatient visits for respiratory diseases in China[J]. Journal of Environmental & Occupational Medicine, 2016, **33**(9): 874-879.

[40] Qiao L P, Cai J, Wang H L, *et al*. $PM_{2.5}$ constituents and hospital emergency-room visits in Shanghai, China[J]. Environmental Science & Technology, 2014, **48**(17): 10406-10414.

[41] Chen G B, Zhang Y M, Zhang W Y, *et al*. Attributable risks of emergency hospital visits due to air pollutants in China: a multi-city study[J]. Environmental Pollution, 2017, **228**: 43-49.

[42] 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 PM_{10} pollution in the Chinese population[J]. Environmental Research, 2015, **136**: 196-204.

[43] 马洪群, 崔莲花. 青岛市大气细颗粒物对呼吸系统疾病患者住院影响的病例交叉研究[J]. 职业与健康, 2017, **33**(7): 961-964.
Ma H Q, Cui L H. Effect of ambient particulate matter on hospitalization of patients with respiratory diseases: a case crossover study in Qingdao City[J]. Occupation and Health, 2017, **33**(7): 961-964.

[44] 上海市人民政府. 上海市城市总体规划(2017-2035年)报告[EB/OL]. http://www.shanghai.gov.cn/newshanghai/xxgkfj/2035001.pdf, 2018-01.

[45] 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.

[46] 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.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 40 No. 1

Jan. 15, 2019

CONTENTS

Cause and Effect Evaluation of $PM_{2.5}$ During Three Red Alerts in Beijing from 2015 to 2016 ····· LÜ Zhe, WEI Wei, ZHOU Ying, *et al.* (1)

Effects of Emission Reductions of Key Sources on the $PM_{2.5}$ Concentrations in the Yangtze River Delta ····· YU Yan, WANG Ze-hua, CUI Xue-dong, *et al.* (11)

Health Benefit Analyses of the Clean Air Action Plan Implementation in Shanghai ····· DAI Hai-xia, AN Jing-yu, LI Li, *et al.* (24)

Monitoring and Analysis of the Spatio-temporal Change Characteristics of the $PM_{2.5}$ Concentration Over Beijing-Tianjin-Hebei and Its Surrounding Regions Based on Remote Sensing ····· CHEN Hui, LI Qing, LI Ying, *et al.* (33)

Applicability of MODIS C006 Aerosol Products in a Typical Environmental Area of the Beijing-Tianjin-Hebei Region ····· WANG Hai-lin, LIU Qiong, CHEN Yong-hang, *et al.* (44)

Impact of Meteorological Factors on the Ozone Pollution in Hong Kong ····· ZHAO Wei, GAO Bo, LIU Ming, *et al.* (55)

Transport Characteristics of PAN and O_3 in the Lower Atmosphere of the Boundary Layer in Tianjin in Summer ····· YAO Qing, MA Zhi-qiang, LIN Wei-li, *et al.* (67)

Analysis of Pollution Characteristics and Sources of $PM_{2.5}$ Chemical Components in Chengdu in Winter ····· WU Ming, WU Dan, XIA Jun-rong, *et al.* (76)

Transport Pathways and Potential Sources of $PM_{2.5}$ During the Winter in Zhengzhou ····· DUAN Shi-guang, JIANG Nan, YANG Liu-ming, *et al.* (86)

Characteristics and Sources of Water-soluble Organic Carbon/Nitrogen in $PM_{2.5}$ During Spring in Changzhou ····· LI Qing, HUANG Wen-qian, MA Shuai-shuai, *et al.* (94)

Pollution Characteristics and Emission Factors of VOCs from Vehicle Emissions in the Tianjin Tunnel ····· SUN Lu-na, LIU Yan, ZHAO Jing-bo, *et al.* (104)

Size Distribution and Carbon Component Characteristics of Atmospheric Particulate Matter from Motor Vehicles ····· MEI De-qing, ZHU Zong-ning, SUN Tian-shuo, *et al.* (114)

Conversion Characteristics of Combustible Particles from Coal-fired Flue Gas in WFGD and WESP ····· YANG Liu, ZHANG Bin, WANG Kang-hui, *et al.* (121)

Particle Removal Characteristics of an Ultra-low Emission Coal-fired Power Plant ····· RUAN Ren-hui, TAN Hou-zhang, DUAN Yu-feng, *et al.* (126)

Spatial and Temporal Distribution Characteristics and Fugitive Dust Emission of Building Sites in Beijing ····· ZHANG Li-kun, LI Ling-jun, JIANG Lei, *et al.* (135)

Simultaneous Removal of Polychlorinated Dibenzo-*p*-dioxins/dibenzofurans, Polychlorinated Biphenyls, and Polychlorinated Naphthalenes From Flues Gases From Coke Gas Burning Using Selective Catalytic Reduction Equipment ····· REN Mei-hui, FAN Yun, WANG Sheng, *et al.* (143)

Space-Time Characteristics and Environmental Significance of the Stable Isotopes in Precipitation in the Gulang River Basin ····· GUI Juan, LI Zong-xing, FENG Qi, *et al.* (149)

Spatial Distribution and Degradation of CDOM in the Minjiang River in Summer ····· CHENG Qiong, ZHUANG Wan-e, WANG Hui, *et al.* (157)

Parallel Factor Analysis of Fluorescence Excitation Emission Matrix Spectroscopy of CDOM from the Mid-culture Period of Shrimp Ponds in a Subtropical Estuary ····· ZHU Ai-ju, SUN Dong-yao, TAN Ji, *et al.* (164)

Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter With Different Relative Molecular Weight from Rainwater From Summer and Autumn in the Zhoucun Reservoir Based on UV-Vis and EEMs ····· ZHOU Shi-lei, ZHANG Yi-ran, HUANG Ting-lin, *et al.* (172)

Characteristics and Fouling Potential of Dissolved Organic Matter in a Stratified Source Water Reservoir ····· LI Kai, WANG Xiao-dong, HUANG Ting-lin, *et al.* (185)

Water-Air Interface CO_2 Exchange Flux of Typical Lakes in a Mountainous Area of the Western Chongqing and Their Influencing Factors ····· LUO Jia-chen, NI Mao-fei, LI Si-yue (192)

Reconstruction of Water Hyperspectral Remote Sensing Reflectance Based on Sparse Representation and Its Application ····· LI Yuan, LI Yun-mei, GUO Yu-long, *et al.* (200)

Nitrification Rates and Pollution Characteristics of Sediments with Different Geomorphic Features in the Shiwuli Stream, Chaohu Lake Basin ····· LI Ru-zhong, QUE Feng-xiang, XIONG Hong-bin, *et al.* (211)

Distribution and Bioavability of Phosphorus in Surface Sediments in Megalopolis: A Case Study of Chengdu ····· DING Yao, OUYANG Li-li, SHI Qing, *et al.* (219)

Distribution and Fluxes of Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances in the Middle Reaches of the Yellow River (Weinan-Zhengzhou Section) ····· LI Qi-lu, CHENG Xiang-hui, ZHAO Zhen, *et al.* (228)

Distribution and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Karst Groundwater System in a Strongly Industrial City ····· MIAO Ying, KONG Xiang-sheng, LI Cheng-zhan (239)

Pollution Characteristic and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Groundwater of Shen-Fu New City in the Hunhe River Basin ····· ZHANG Shi-chao, YAO Hong, XIANG Xin-xin, *et al.* (248)

Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in Wastewater-Receiving Rivers in Beijing ····· FU Lu-jing, LI Yi-bing, QIAO Meng, *et al.* (256)

Influence of the Coagulation Mechanism on the Coagulation Performances Using New Composite Coagulants: Role of the Raw Water Characteristics ····· QU Jiang-dong, XU Hui, XU Jian-kun, *et al.* (263)

Indirect Photodegradation of Sulfamethoxazole in Water ····· LI Cong-he, CHE Xiao-wei, BAI Ying, *et al.* (273)

Fabrication of the Heterojunction Photocatalyst MoS_2/BiOI and Its Investigation of Its Photocatalytic Reduction and Oxidation Activities ····· ZHANG Liang, ZHAO Chao-cheng, GAO Xian-yao, *et al.* (281)

Nanoscale Zero-valent Copper-Activated Molecular Oxygen for the Degradation of Enrofloxacin in Water ····· NI Yong-jiong, CHENG Yong-qing, XU Meng-yuan, *et al.* (293)

Adsorption of Cr(Ⅵ) in Water by Maifanite Modified with Different LDHs Coatings ····· ZHANG Xiang-ling, DENG Li-chu, FANG Chen-jia, *et al.* (300)

Preparation of the Silane Monolayer on Magnetite Nanoparticles and Its Performance with Respect to Phosphate Removal from Water ····· XING Ming-chao, XIE Qiang, CHEN Shou-hui, *et al.* (310)

Optimization of Dyeing Wastewater Treatment with New Eco-friendly Polysilicate Ferromanganese ····· TANG Li-peng, WEI Qun-shan, LÜ Qiang, *et al.* (318)

Sulfate Reduction and Microbial Community of Autotrophic Biocathode in Response to Externally Applied Voltage ····· HU Jia-ping, ZENG Cui-ping, LUO Hai-ping, *et al.* (327)

Effect of Carbon Sources on the Accumulation of Endogenous Polymers and Denitritation in the O/A-F/F Mode ····· CUI You-wei, JIN Chang-lin, WANG Hao-han, *et al.* (336)

Effect of the Influent C/P Ratio on the Nutrient Removal Characteristics of the SNEDPR System ····· ZHEN Jian-yuan, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, *et al.* (343)

Effect of Different Sludge Retention Time (SRT) Operations on the Nutrient Removal Characteristics of a SNEDPR System ····· WANG Xiao-xia, ZHEN Jian-yuan, ZHAO Ji, *et al.* (352)

Denitrification and Phosphorus Removal from Low C/N Urban Sewage Based on a Post-Partial Denitrification AOA-SBR Process ··· GONG Xiu-zhen, YU De-shuang, YUAN Meng-fei, *et al.* (360)

Startup and Stabilization of Nitrosation in an Anoxic-aerobic Continuous-flow Reactor with Granules ····· LI Dong, GUO Yue-zhou, LAO Hui-mei, *et al.* (369)

Startup Strategies for the SNAD Granular Sludge Process at Low Temperature ····· LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, *et al.* (376)

Effect of the Sampling Scale and Number on the Heterogeneity of Soil Respiration in a Mixed Broadleaf-conifer Forest ····· YAN Jun-xia, SUN Qi, LI Jun-jian, *et al.* (383)

Effects of the Crop Rotation on Greenhouse Gases from Flooded Paddy Fields ····· FENG Xi, JIANG Chang-sheng, PENG Xiao-le, *et al.* (392)

Response of the Soil N_2O Emission and Ammonia-oxidizing Microorganism Community to the Maize Straw Return with Reducing Fertilizer in Purple Soil ····· HUANG Rong, GAO Ming, WANG Ying-yan, *et al.* (401)

Community Structure of CO_2-fixing Soil Bacteria from Different Land Use Types in Karst Areas ····· ZHANG Shuang-shuang, JIN Zhen-jiang, JIA Yuan-hang, *et al.* (412)

Composition and Predictive Functional Analysis of Rhizosphere Bacterial Communities in Riparian Buffer Strips in the Danjiangkou Reservoir, China ····· SUN Feng, TIAN Wei, ZHANG Fei, *et al.* (421)

Migration and Transformation of Adsorbed Arsenic Mediated by Sulfate Reducing Bacteria ····· JIA Qian-qian, LI Wei, WANG Ya-nan, *et al.* (430)

Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in Surface Farmland Soil Around a Lead and Zinc Smelter ····· WANG Yang-yang, LI Fang-fang, WANG Xiao-yang, *et al.* (437)

Effect of a Mining and Smelting Plant on the Accumulation of Heavy Metals in Soils in Arid Areas in Xinjiang ····· YANG Wei-guang, WANG Mei-e, CHEN Wei-ping (445)

Assessment of the Speciation and Pollution of Heavy Metals in Paddy Soils from the Jiulong River Basin ····· LIN Cheng-qi, HUANG Hua-bin, HU Gong-ren, *et al.* (453)

Characteristics of Stable Mercury Isotopic Compositions in the Food Web of the Caohai Lake ····· XU Yi-yuan, HE Tian-rong (461)

Interaction of Cd and Zn Affecting the Root Morphology and Accumulation of Heavy Metals in *Sedum aizoon* ····· GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, *et al.* (470)

Effects of Different Concentrations of Lanthanum on the Growth and Uptake of Pb by Maize Grown Under Moderate Lead Stress ····· WANG Qi-fan, GUO Wei, CHANG Qing, *et al.* (480)

Distribution and Bioaccumulation Characteristics of Cadmium in Fish Species from the Longjiang River in the Guangxi Autonomous Region ····· WANG Jun-neng, ZHAO Xue-min, HU Guo-cheng, *et al.* (488)

Influence of Six Digestion Methods on the Determination of Polystyrene Microplastics in Organisms Using the Fluorescence Intensity ····· ZOU Ya-dan, XU Qing-qing, ZHANG Ge, *et al.* (496)

Preparation of a Nutritional Slow-release Packing Material with Function Microorganisms and Its Characteristics Evaluation ····· FENG Ke, XU Dan-hua, CHENG Zhuo-wei, *et al.* (504)