

方知库
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.7

第40卷 第7期

目次

《大气污染防治行动计划》实施的环境健康效果评估	武卫玲, 薛文博, 王燕丽, 雷宇, 冯涛, 蔡泽林 (2961)
基于达标约束的南京市环境空气质量情景模拟	谢放尖, 史之浩, 李婧祎, 郑新梅, 胡建林, 刘春蕾, 杨峰 (2967)
郑州市 PM _{2.5} 中水溶性离子特征及来源分析	杨留明, 王申博, 郝祺, 韩士杰, 李晨, 赵庆炎, 燕启社, 张瑞芹 (2977)
能见度与 PM _{2.5} 浓度关系及其分布特征	王继康, 张恒德, 桂海林, 饶晓琴, 张碧辉 (2985)
基于扩散模式反演的橡胶轮胎制造行业 VOCs 排放特征	白红祥, 魏巍, 王雅婷, 任云婷, 臧佳欣, 程水源 (2994)
太原市环境空气中挥发性芳香烃碳同位素组成及来源	李颖慧, 闫雨龙, 李志生, 郝爱胜, 李如梅, 杨帆, 彭林 (3001)
办公楼聚集区空气中 PBDEs 谱分布与污染特征	王琳, 邓雅佳, 廖晓勇, 曹红英, 焦杏春 (3008)
南北水调东线中游枢纽湖泊有色可溶性有机物来源组成特征	张柳青, 彭凯, 周蕾, 石玉, 李元鹏, 周永强, 龚志军, 张运林, 杨艳 (3018)
黄土丘陵沟壑区小流域不同水体氢氧同位素特征	张荷惠子, 于坤霞, 李占斌, 李鹏, 赵宾华, 柯浩成, 蒋凯鑫 (3030)
基于碳氮同位素的澜沧江水库 TOC 来源差异性分析	王从锋, 胡子龙, 杨正健, 丹勇, 赵萍, 郝文超, 聂小芬, 聂睿, 徐刘得, 刘德富 (3039)
李家河水库污染物来源及水体分层对水质的影响	徐进, 黄廷林, 李凯, 杨尚业, 温成成, 林子深, 李衍庆, 刘雪晴 (3049)
水库淹没带土壤有机氯农药分布特征及风险评价	王霞, 张青琢, 赵高峰, 王晓燕 (3058)
银川市湿地表层水中多环芳烃的分布、来源及生态风险评价	田大年, 党丽慧, 丁润梅, 蔡倩, 张鹏举, 汪岭, 杨慧芳 (3068)
人类活动影响下的垂直气候带岩溶泉地球化学特征对比: 以重庆金佛山水房泉、碧潭泉为例	谢国文, 杨平恒, 盛婷, 邓书金, 洪爱花 (3078)
漓江冲洪积扇地下水化学特征及控制因素分析	唐金平, 张强, 胡漾, 张宇, 聂保伟 (3089)
三峡库区蓄水期和非蓄水期附石藻类群落变化及其影响因子分析	付君珂, 刘黎, 贺新宇, 张红波, 董聪聪, 杨燕君, 施军琼, 吴忠兴 (3099)
降雨对香溪河库湾主要藻种原位生长的影响	翁传松, 刘德富, 张佳磊, 龚川, 沈旭舟 (3108)
绿狐尾藻分解及其氮磷释放特征	童雄, 罗沛, 刘锋, 黄敏, 陈哲, 肖润林, 吴金水 (3118)
微藻固定化条件优化及其污水氨氮去除潜力分析	刘祥, 王婧瑶, 吴娟娟, 彭飞, 王凯军 (3126)
钛酸盐纳米管对水中氨氮的吸附特性	张政, 冯长生, 张晓瑞, 郑建奎, 蒋彩云, 李攀杰, 王玉萍 (3135)
基于缺陷重构的类芬顿光催化剂在降解染料废水中的应用	唐清文, 安晓强, 兰华春, 刘会娟, 李海翔 (3146)
N 原子杂化石墨烯高效活化过一硫酸盐降解 RBK5 染料废水	于永波, 黄湾, 董正玉, 吴丽颖, 张倩, 洪俊明 (3154)
Cu ²⁺ 对以 NO ₃ ⁻ 为电子受体反硝化过程的影响	买文可, 彭永臻, 吉建涛 (3162)
CANON 中试反应器启动及性能优化	孙庆花, 吴迪, 周家中, 郑志佳 (3169)
好氧段碳源浓度对同步去除和富集磷酸盐生物膜的影响	徐林建, 潘杨, 章豪, 冯鑫, 魏攀龙, 尤星怡 (3179)
有机物特性对 AAO 系统污泥沉降性能的影响	刘小博, 袁林江, 陈希, 薛欢婷 (3186)
不同污泥浓度下缺氧 FNA 对硝化菌活性的影响	吕心涛, 周桐, 田夏迪, 谷鹏超, 杨岸明, 王佳伟, 张树军 (3195)
ANAMMOX 菌铁自养反硝化工艺的稳定性	张文静, 黄勇, 毕贞, 胡羽婷, 董石语 (3201)
在线 NaClO 反洗对倒置 A ² O-MBR 系统微生物群落的影响	王旭东, 高森, 王莹莹, 杨永哲, 刚家斌, 符国力, 王磊 (3208)
基于有机物释放和经济性的污泥预处理方法评价	袁悦, 谭学军, 郑舍予 (3216)
北京市清水与再生水协同利用优化模型	张田媛, 谭倩, 王淑萍 (3223)
N-亚硝胺在不同处理工艺污水处理厂中的分布及其去除	柳王荣, 赵建亮, 杨愿愿, 姚理, 刘有胜, 应光国 (3233)
北京市生活污水中曲马多和芬太尼的赋存	周子雷, 杜鹏, 白雅, 韩胜, 黄红梅, 徐泽琼, 李喜青 (3242)
贵阳市污水处理厂中典型抗生素的污染水平及生态风险	杨钊, 李江, 张圣虎, 向福亮, 唐涛涛, 杨娅红 (3249)
紫色土丘陵区畜禽养殖场土壤中抗生素抗性基因分布特征	程建华, 唐翔宇, 刘琛 (3257)
四环素对污泥蚯蚓粪中微生物种群和抗性基因的影响	陈景阳, 夏慧, 黄魁, 吴颖 (3263)
热水解污泥厌氧消化过程中肠球菌抗生素抗性基因与毒力基因的转归	李慧莉, 裴媛玫, 李姗, 何芙蓉, 杨月婷, 魏源送, 佟娟 (3270)
鸡粪与中药渣共堆肥对抗生素抗性基因的影响	武晋萍, 陈建文, 刘勇, 张红, 李君剑 (3276)
宁武亚高山湖泊细菌群落的时空格局及驱动机制	王雪, 刘晋仙, 柴宝峰, 罗正明, 赵鹏宇, 暴家兵 (3285)
石家庄市春季景观水体 nirS 型反硝化细菌群落特征分析	张艺冉, 李再兴, 孙悦, 霍然, 孟文茹, 王凌霄, 申邵恒, 杨子程, 周石磊 (3295)
磷差异性调控水稻根际 nirK/nirS 型反硝化菌组成与丰度	湛钰, 高丹丹, 盛荣, 魏文学, 秦红灵, 张文钊, 侯海军, 汤亚芳 (3304)
会仙岩溶湿地、稻田与旱地土壤细菌群落结构特征比较	贾远航, 靳振江, 袁武, 程跃扬, 邱江梅, 梁锦桃, 潘复静, 刘德深 (3313)
湘中典型稻田系统 Cd 平衡分析	蒋凯, 邓潇, 周航, 龙坚, 李欣阳, 董霞, 王树兵, 刘文辉, 侯红波, 彭佩钦, 廖柏寒 (3324)
改良剂对根际土壤-水稻系统中镉运移的影响	李义纯, 王艳红, 唐明灯, 巫彬芳, 李林峰, 艾绍英, 凌志祥 (3331)
重金属固定植物促生细菌的筛选及其阻控小麦富集重金属效应	韩辉, 王晓宇, 蔡红, 姚伦广, 蔡倩迪, 王逸雪, 陈兆进 (3339)
不同品种辣椒镉亚细胞分布和化学形态特征差异	彭秋, 李桃, 徐卫红, 焦璐琛, 邓继宝 (3347)
添加磷对水稻-油菜轮作土壤 N ₂ O 排放影响	孙正, 苏荣琳, 徐鹏, 吴宏涛, 胡金丽, 赵劲松, 胡荣桂 (3355)
渭北旱原土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响	刘杰, 马艳婷, 王宪玲, Sompouviset Thongsouk, 李利敏, 秦亚旭, 赵志远, 郑伟, 翟丙年 (3361)
不同土地利用类型的土壤中多环芳烃的纵向迁移特征	鲁垠涛, 向鑫鑫, 张士超, 刘明丽, 王静, 李爽, 姚宏, 孙绍斌 (3369)
西湖景区土壤中邻苯二甲酸酯污染水平、来源分析和空间分布特征	廖健, 邓超, 陈怡, 周文钊, 林春绵, 张辉 (3378)
生物炭对壤土土壤容重和团聚体的影响	李倩倩, 许晨阳, 耿增超, 张久成, 陈树兰, 王慧玲, 张妍, 负方悦, 杨林, 董胜虎 (3388)
《环境科学》征订启事 (3194) 《环境科学》征稿简则 (3222) 信息 (3256, 3284, 3323)	

《大气污染防治行动计划》实施的环境健康效果评估

武卫玲¹, 薛文博¹, 王燕丽¹, 雷宇^{1*}, 冯涛², 蔡泽林²

(1. 生态环境部环境规划院, 区域空气质量模型与管控研究中心, 北京 100012; 2. 国网湖南省电力有限公司防灾减灾中心, 电网输变电设备防灾减灾国家重点实验室, 长沙 410129)

摘要: 为了定量评估《大气十条》实施带来的环境健康效益, 本文首先依据 $PM_{2.5}$ 浓度和人口数据, 分析 2013 ~ 2017 年全国人口加权浓度的变化, 其次利用 BenMAP 模型对全国 338 个地级及以上城市 2013 年 $PM_{2.5}$ 基准情景和 2017 年 $PM_{2.5}$ 控制情景进行分析, 定量分析全国 31 个省(市)及 338 个地级及以上城市减少过早死亡人数。结果表明, 由于 $PM_{2.5}$ 浓度大幅下降, 2013 ~ 2017 年全国 $PM_{2.5}$ 人口加权浓度呈逐年下降趋势; 北京、天津、河北等京津冀及周边地区减少过早死亡人数最多。2017 年全国 280 个城市避免过早死亡人数有所增加, 58 个城市避免过早死亡人数有所下降。以 WHO 过渡期第 1 阶段目标值($PM_{2.5}$ 年均浓度为 $35 \mu g \cdot m^{-3}$)作为控制情景, 估算 2013 年全国过早死亡人数约为 101 293 人, 2017 年约为 41 080 人, 《大气十条》的实施大约避免 60 213 人过早死亡。依据支付意愿法调查结果, 估算增加的健康效益约为 549.7 亿元。

关键词: $PM_{2.5}$; BenMAP 模型; 大气十条; 健康效益; 过早死亡

中图分类号: X196 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)07-2961-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.201811110

Health Benefit Evaluation for Air Pollution Prevention and Control Action Plan in China

WU Wei-ling¹, XUE Wen-bo¹, WANG Yan-li¹, LEI Yu^{1*}, FENG Tao², CAI Ze-lin²

(1. Center for Regional Air Quality Simulation Intervention, Chinese Academy for Environmental Planning, Beijing 100012, China; 2. State Key Laboratory of Disaster Prevention & Reduction for Power Grid Transmission and Distribution Equipment, State Grid Hunan Electric Power Corporation Limited Disaster Prevention & Reduction Center, Changsha 410129, China)

Abstract: To quantitatively assess the health benefits brought by the implementation of the Action Plan of Air Pollution Prevention and Control, we firstly analyzed the spatial and temporal changes of $PM_{2.5}$ population-weighted concentrations over China from 2013 to 2017. The BenMAP model was used to analyze the differences in premature death between the $PM_{2.5}$ baseline scenario in 2013 and the control scenario in 2017 in 338 prefecture-level cities nationwide, so as to quantitatively analyze the number of premature deaths in 31 provinces. The results show that compared with other provinces, the largest reduction in premature deaths due to the significant decrease of $PM_{2.5}$ concentration occurred in the Beijing-Tianjin-Hebei region and its surrounding regions, and the environmental health benefits from air quality have been greatly improved. The results show that from 2013 to 2017 the population weighted $PM_{2.5}$ concentration was decreasing year by year due to the significant decrease in $PM_{2.5}$ concentration; Beijing, Tianjin, Hebei, and the surrounding areas witnessed the largest reduction in premature deaths. In 2017, the number of avoided premature deaths in 280 prefecture-level cities nationwide increased, but declined in 58 cities. Taking the target value of the first phase of the WHO transition period (an annual average $PM_{2.5}$ concentration of $35 \mu g \cdot m^{-3}$) as the control scenario, it is estimated that the number of premature deaths in 2013 was approximately 101 293, and in 2017 was approximately 41 080. The implementation of the Action Plan helped to avoid approximately 60 213 premature deaths. According to the method of 'willingness to pay', the monetary benefits are estimated to be approximately 54.97 billion yuan.

Key words: $PM_{2.5}$; BenMAP; air pollution prevention and control action plan; health benefit; premature death

2013 年, 国务院颁布了《大气污染防治行动计划》(《大气十条》), 《大气十条》实施以来, 相关部门出台了 20 余项配套政策, 累计淘汰落后炼钢炼铁产能 2 亿 t、水泥 2.5 亿 t、平板玻璃 1.1 亿重量箱、电解铝 130 多万 t 及整治 6.2 万家“散乱污”工业企业^[1]。这些工程措施使得重点区域及大部分省份空气质量得到极大改善。2017 年, 全国地级及以上城市 PM_{10} 平均浓度比 2013 年下降 22.7%, 京津冀、长三角和珠三角等重点区域 $PM_{2.5}$ 平均浓度分别比 2013 年下降 39.6%、34.3% 和 27.7%, 北京市 $PM_{2.5}$ 年均浓度降至 $58 \mu g \cdot m^{-3}$, 《大气十条》确

定的环境空气质量改善目标全面完成^[2]。环境质量的改善带来很大的健康效益, 如何定量评估空气质量改善带来的环境健康影响, 国内外学者已经进行了大量研究。结果表明, 人群呼吸系统和心血管系统疾病发病率、住院人数以及人群死亡率等都与大气中 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度相关^[3~14]。

大气 $PM_{2.5}$ 相关的各种健康效应终点中, 死亡

收稿日期: 2018-11-16; 修订日期: 2019-01-09

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0214005)

作者简介: 武卫玲(1985~), 女, 硕士, 主要研究方向为大气环境管理, E-mail: wuwl@caep.org.cn

* 通信作者, E-mail: leiyou@caep.org.cn

是其中最显著的一条, $\text{PM}_{2.5}$ 污染与人群死亡变化的关系已成为国际环境流行病学研究的热点之一. 过早死亡是指个体未达到人口平均预期寿命即死亡, 目前国际上通用的人口平均预期寿命为 70 岁, 也即 70 岁以前的死亡为过早死亡. 对大气颗粒物的健康风险进行定量分析和评价的关键在于建立颗粒物污染与人群健康效应终点之间的暴露-反应关系, 谢鹏等^[15]分别针对 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的研究进行了区分, 推导出适用于中国地区 $\text{PM}_{2.5}$ 健康效应评估的暴露-反应系数; 刘晓云等^[16]针对 $\text{PM}_{2.5}$ 的急性健康效应进行了 Meta 分析并得到相应的暴露-反应系数; 阚海东等^[17]按照健康的慢性效应和急性效应, 分别对中国的流行病学研究结果进行了 Meta 分析, 得到不同健康终端的暴露-反应系数. 基于 GIS 的 BenMAP 模型是目前国际范围内较为前沿的评估模型, 屈金娥^[18]利用 BenMAP 评估了杭州市 2002 ~ 2010 年控制 PM_{10} 空气污染产生的人体健康效应及其对应的经济效益; 黄德生等^[19]和段显明等^[20]分别对京津冀地区 $\text{PM}_{2.5}$ 达标排放、珠三角地区 PM_{10} 污染控制的健康效益进行过评估; 2015 年雷宇等^[21]基于 $\text{PM}_{2.5}$ 模拟数据预测《大气十条》实施将带来的公众健康效益. 从国内外研究成果来看, 环境健康效果评估已得到广泛应用, 但针对《大气十条》实施 $\text{PM}_{2.5}$ 改善带来的健康效益几乎空白.

为了定量评估《大气十条》实施带来的环境健康效益, 本文在前人研究成果基础上, 就 $\text{PM}_{2.5}$ 污染改善所带来的全国性健康效益进行研究. 首先依据 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和人口数据, 分析 2013 ~ 2017 年全国人口加权浓度的时间变化; 其次利用 BenMAP 模型对全国 338 个地级及以上城市 $\text{PM}_{2.5}$ 污染改善造成的健康效益及经济影响进行评估, 定量分析全国 31 个省(市)及 338 个地级及以上城市避免过早死亡人数, 以期为环境质量管理 and 环保部门政策决策提供重要参考.

1 材料与方法

1.1 数据来源

2017 年全国 338 个地级及以上城市 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度数据来源于 1 436 个国控环境空气质量自动监测站点(图 1), 但 2013 年全国只有 74 个城市开展了 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度监测, 针对 2013 年 $\text{PM}_{2.5}$ 监测数据缺失的城市, 本文依据 2013 年 PM_{10} 年均浓度和 2014 ~ 2017 年间 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度占 PM_{10} 年均浓度的比例反推计算 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度; 人口数据来源于城市统计年鉴; 全因死亡率来源于中国统计年鉴, 扣除意外死亡率.

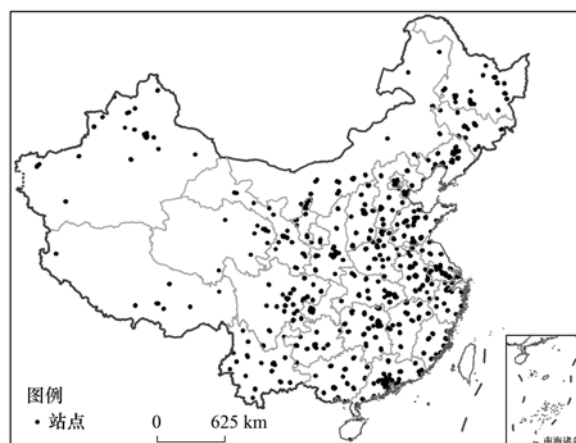


图 1 全国 1 436 个国控环境空气质量自动监测站分布示意

Fig. 1 Distribution of 1 436 monitoring sites in China

1.2 研究方法

(1) 估算 2013 年 $\text{PM}_{2.5}$ 监测数据缺失城市的年均浓度

$\text{PM}_{2.5}$ 指环境空气中空气动力学当量直径小于等于 $2.5 \mu\text{m}$ 的颗粒物, PM_{10} 指空气动力学当量直径小于等于 $10 \mu\text{m}$ 的颗粒物, 包括漂浮在空气中的固态和液态颗粒物. $\text{PM}_{2.5}$ 是 PM_{10} 的一部分, 它们是包含关系, 对某一城市来讲, 其 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 比值相对稳定^[22, 23]. 为了避免某一年 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 引入较大误差, 本研究选取 2015 ~ 2017 年 3 年间各城市 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度与 PM_{10} 平均浓度的比值, 基于 2013 年各城市 PM_{10} 年均浓度, 回溯 2013 年 $\text{PM}_{2.5}$ 监测数据缺失城市的年均浓度.

(2) 2013 ~ 2017 年 $\text{PM}_{2.5}$ 人口加权浓度

计算全国 $\text{PM}_{2.5}$ 人口加权浓度时, 根据各省(市)的暴露人口重新计算 $\text{PM}_{2.5}$ 人口加权浓度, 权重为各省(市)的暴露人口占全国暴露人口比例. $\text{PM}_{2.5}$ 人口加权平均值可以更加客观、合理地反映空气污染对于居民健康的影响, 同时, 分析不同 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度水平下的暴露人口比例, 也为制定环境与健康政策提供科学依据.

基于人口加权的全国 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度平均值 ($\text{PPM}_{2.5}$) 计算方法如下:

$$\text{PPM}_{2.5} = \sum_{k=1}^{31} \text{PM}_{2.5k} \times P_k / P_z \quad (1)$$

式中, $\text{PPM}_{2.5}$ 为全国人口加权浓度, $\text{PM}_{2.5k}$ 为某省(市) $\text{PM}_{2.5}$ 浓度平均值, 单位为 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, P_k 为其人口数量, P_z 为全国总人口数, 单位为人.

(3) 环境健康效益

$$\Delta\text{HE}_{\text{hx}} = f_{\text{hx}}(c - c_0) \times P \times \text{BI}_{\text{h}} \quad (2)$$

式中, $\Delta\text{HE}_{\text{hx}}$ 为 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化引起的健康终端效益变化, f_{hx} 为 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度-反应关系函数, 本文采用谢鹏等的研究结果^[15], $\text{PM}_{2.5}$ 浓度每升高 $10 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,

所引起的人群急性死亡率增加 0.40% (95% CI: 0.19% ~ 0.62%); c 为控制情景下的污染物浓度 ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), c_0 为基准情景下的污染物浓度 ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$); P 为暴露总人口 (万人); BI_h 为健康终端的基线发病率, 本文采用非意外死亡率(‰), 扣除了各类事故死亡的因素. 根据文献[24], 2017 年全国全因死亡率为 7.11‰, 意外死亡率为 0.37‰, 非意外死亡率为 6.74‰.

在运用空气污染与健康效益评估模型 BenMAP 进行分析时, 本研究在该模型框架基础上, 建立了适用于我国的本土化计算参数. 以 338 个地级及以上城市为研究范围, 分别采用 2013 年(情景 1)和 2017 年(情景 2) $\text{PM}_{2.5}$ 污染情况为基准场景设定两种情景, 控制情景均采用 WHO 过渡期第 1 阶段目标值($\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度为 $35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$).

2 结果与讨论

2.1 338 个地级及以上城市 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度

2015 ~ 2017 年 3 年 338 个地级及以上城市 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 比值范围分布在 0.29 ~ 0.82 之间, 平均值为 0.59. 利用 2013 年已有 99 个城市 $\text{PM}_{2.5}$ 监测数据进行验证, 2013 年 $\text{PM}_{2.5}$ 反推值与实际监测值相关性较好, $R^2 = 0.91$, 据此补齐 2013 年 338 个地级及

以上城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度数据. 2013 年全国 $\text{PM}_{2.5}$ 污染较重, 约 27.7% 的城市 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度大于 $70 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 浓度高值区主要集中在京津冀及周边地区.

相比 2013 年, 2017 年全国 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度大幅下降, $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度高于 $70 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的城市仅占 5.0%, 浓度下降最显著的省(市)为山东、河北、上海、浙江、重庆、天津、北京和江苏, 其降幅均超过 30%, 山西、内蒙古和广东的下降幅度在 20% ~ 30% 之间. 全国大部分地级城市 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度有不同程度的下降, 其中, 克孜勒苏柯尔克孜自治州、海南藏族自治州、海北藏族自治州、济宁、喀什地区、阿坝藏族羌族自治州、西宁、毕节、邢台等 9 个地级城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降幅度超过 50%, 铜仁、临沂、黔东南布依族苗族自治州、南京、丽江、德州、黔南布依族苗族自治州、南通、菏泽、酒泉、廊坊、聊城、哈密地区、黔东南苗族侗族自治州等 14 个地级城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降幅度超过 45%. 但是, 仍有部分城市 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度不降反升, 其中, 五家渠、昭通、石嘴山、普洱、博尔塔拉蒙古自治州、玉林、阿拉善盟、昌吉州、咸阳、黄南藏族自治州等 10 个地级城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度上升幅度超过 30%. 2013 年和 2017 年 338 个地级及以上城市 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度及差值的空间分布见图 2 和图 3.

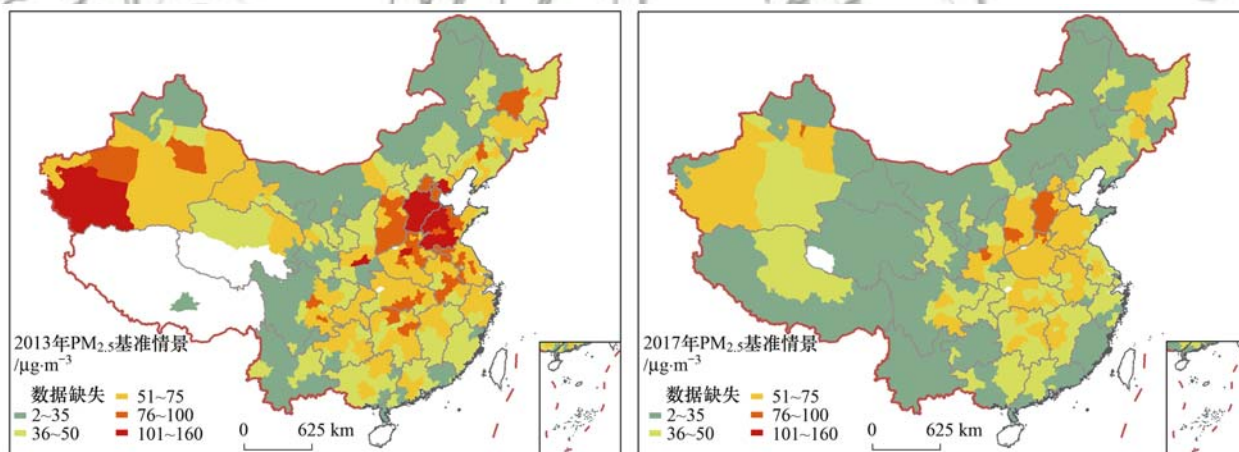


图 2 2013 年和 2017 年 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度

Fig. 2 Annual average concentration of $\text{PM}_{2.5}$ in 2013 and 2017

2.2 2013 ~ 2017 年 $\text{PM}_{2.5}$ 人口加权浓度

利用 2013 ~ 2017 年全国 31 省(市)人口数据(表 1)[25, 26] 及 2013 ~ 2017 年 $\text{PM}_{2.5}$ 各省平均浓度, 计算《大气十条》实施以来全国 $\text{PM}_{2.5}$ 人口加权浓度. 从 2013 ~ 2017 年全国 $\text{PM}_{2.5}$ 人口加权浓度来看, 呈逐年下降趋势, 人口加权浓度均高于当年全国 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度, 见图 4; 这意味着算术平均法低估了空气中颗粒物对其暴露人口带来的影响; 改善人口较为密集省(市)的空气质量, 将显著降低全国

$\text{PM}_{2.5}$ 人口加权浓度.

本研究结果表明, 2013 ~ 2017 年全国生活在 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度高于 $70 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 地区的人口比例分别为 34.8%、31.4%、20.5%、14.8% 和 5.9%, 重污染地区人口比例呈逐年下降的趋势; 生活在超过《环境空气质量标准(GB 3095-2012)》二级浓度限值($35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)地区的人口比例分别为 89.4%、87.8%、84.7%、80.7% 和 74.9%, 也呈逐年下降趋势, 反之, 生活在 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度低于 $35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

表 1 2013~2017 年全国 31 省(市)人口统计¹⁾/万人

Table 1 Population statistics of 31 provinces in 2013-2017/10⁴ persons

省(市)	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	省(市)	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年
北京	2 115	2 152	2 171	2 173	2 171	湖北	5 799	5 816	5 852	5 885	5 902
天津	1 472	1 517	1 547	1 562	1 557	湖南	6 691	6 737	6 783	6 822	6 860
河北	7 333	7 384	7 425	7 470	7 520	广东	10 644	10 724	10 849	10 999	11 169
山西	3 630	3 648	3 664	3 682	3 702	广西	4 719	4 754	4 796	4 838	4 885
内蒙古	2 498	2 505	2 511	2 520	2 529	海南	895	903	911	917	926
辽宁	4 390	4 391	4 382	4 378	4 369	重庆	2 970	2 991	3 017	3 048	3 075
吉林	2 751	2 752	2 753	2 733	2 717	四川	8 107	8 140	8 204	8 262	8 302
黑龙江	3 835	3 833	3 812	3 799	3 789	贵州	3 502	3 508	3 530	3 555	3 580
上海	2 415	2 426	2 415	2 420	2 418	云南	4 687	4 714	4 742	4 771	4 801
江苏	7 939	7 960	7 976	7 999	8 029	西藏	312	318	324	331	337
浙江	5 498	5 508	5 539	5 590	5 657	陕西	3 764	3 775	3 793	3 813	3 835
安徽	6 030	6 083	6 144	6 196	6 255	甘肃	2 582	2 591	2 600	2 610	2 626
福建	3 774	3 806	3 839	3 874	3 911	青海	578	583	588	593	598
江西	4 522	4 542	4 566	4 592	4 622	宁夏	654	662	668	675	682
山东	9 733	9 789	9 847	9 947	10 006	新疆	2 264	2 298	2 360	2 398	2 445
河南	9 413	9 436	9 480	9 532	9 559						

1) 香港、澳门、台湾资料暂缺,下同

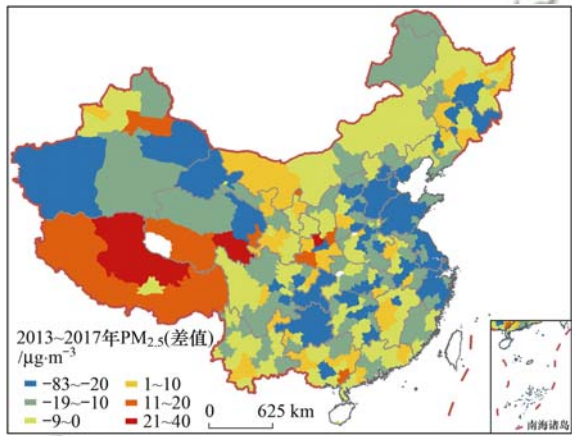


图 3 2017 年和 2013 年 PM_{2.5} 浓度之差

Fig. 3 Reduction in PM_{2.5} annual average concentration between 2017 and 2013

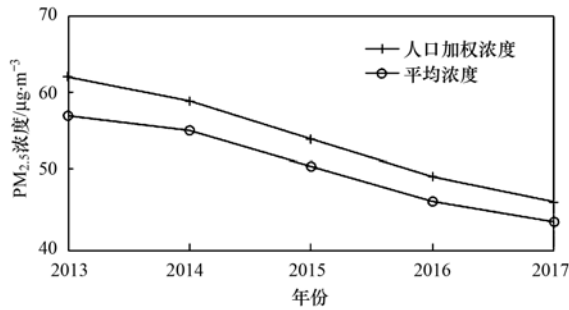


图 4 2013~2017 年全国人口加权浓度

Fig. 4 National population weighted PM_{2.5} concentrations, 2013-2017

地区的人口比例呈逐年上升趋势;不同浓度下的人口分布累计频率见图 5。由此可见,《大气十条》实施带来了巨大的环境健康效益。

2.3 过早死亡人口分析

流行病学研究尚未发现大气污染物对人群健康

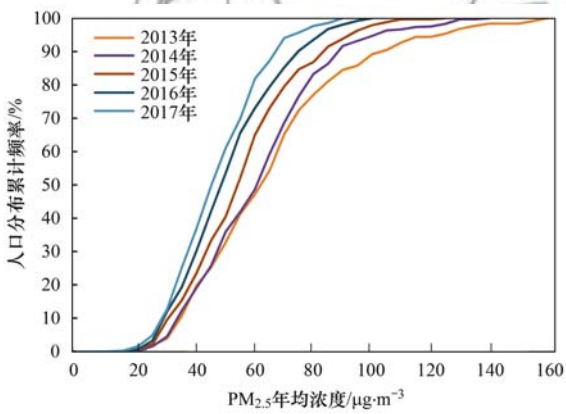


图 5 2013~2017 年 PM_{2.5} 不同污染区间的人口频率分布

Fig. 5 Population frequency distribution of different PM_{2.5} pollution zones, 2013-2017

影响的阈值浓度,WHO 颁布的污染物浓度指导值完全以大气污染对健康的影响为基础而没有考虑技术、经济等其他因素,本研究选取 WHO 过渡期第 1 阶段目标值(PM_{2.5} 年均浓度为 35 μg·m⁻³)作为参考浓度。

以 338 个地级及以上城市 PM_{2.5} 年均浓度为 35 μg·m⁻³ 为控制情景,分别构建 2013 年和 2017 年两个基准情景,利用 BenMAP 模型分别估算 2013 年和 2017 年全国过早死亡人数。2013 年全国过早死亡人数约为 101 293 人,2017 年约为 41 080 人;全国层面来看,2017 年相对 2013 年减少过早死亡人数约为 60 213 人。分析全国 31 省(市)过早死亡人数变化发现,除西藏外,其他 30 个省(市)均有所增加,山东、河北、江苏、河南、四川等省份由于 PM_{2.5} 浓度改善减少过早死亡人数最多,其中山东省高达 1 万人,见图 6。这些省份避免过早死亡人

数较多主要有两个原因,一是 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度改善幅度相对较大,二是这些省份人口分布相对较密集,这也印证在人口密度大的地区环境质量改善带来的健康效益更加明显.

分析全国 338 个地级及以上城市减少过早死亡人数发现,2017 年全国 280 个地级市过早死亡人数有所降低,重庆、石家庄、北京、保定、邢台、成

都、临沂等城市减少过早死亡人数最多,相比 2013 年,2017 年减少过早死亡人数在 1 400 人以上,其中重庆市高达 1 800 人. 由于部分城市 2017 年 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度比 2013 年有所上升,导致 58 个城市过早死亡人数有所增加,其中,咸阳、渭南、玉林、阜阳、昭通、汉中等城市过早死亡人数有所上升,且人数均在 100 人以上,见图 7.

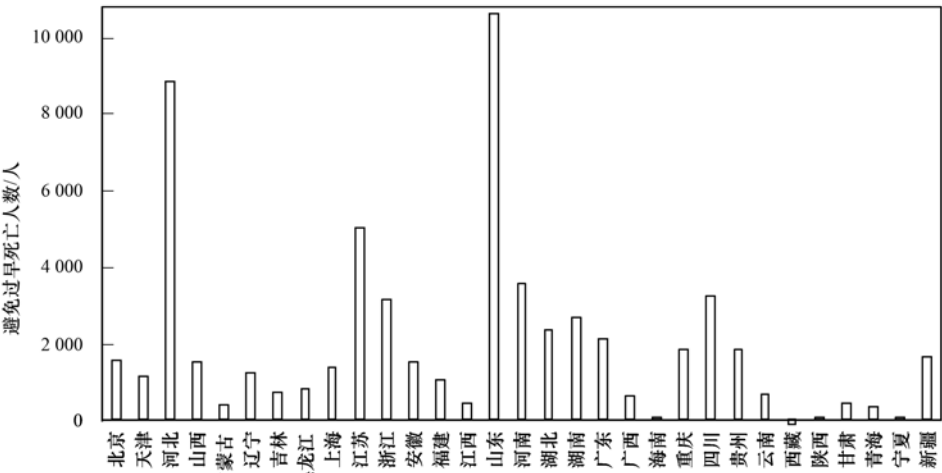


图6 2017 年 31 省(市)避免过早死亡人数统计
Fig. 6 Statistical analysis of premature deaths avoided in 31 provinces in 2017

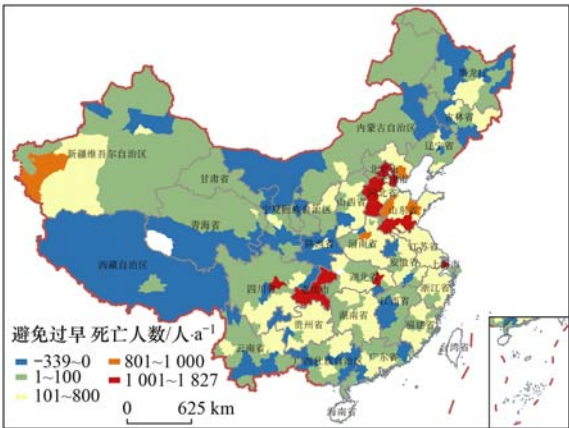


图7 338 个地级及以上城市避免过早死亡人数空间分布
Fig. 7 Spatial distribution of premature deaths avoided in 338 cities

2.4 过早死亡健康效益经济估算

公众为避免过早死亡愿意支付的经济成本与其收入呈一定的相关关系,避免过早死亡对应的经济效益参数来自于“支付意愿法”的调查结果,根据已有的针对我国的支付意愿法研究结果,本文进行健康效益经济估算时,采用统计生命价值约为 91.3 万元^[21],依据《大气十条》实施导致减少的过早死亡人数,估算带来的经济效益约为 549.7 亿元.

2.5 不确定性分析

评估空气质量改善带来的健康效益有很多不确定性,包括健康影响的浓度-响应函数、暴露于空气

污染的人口估计、基线发病率和死亡率等. 本研究受基础研究的局限性等客观因素限制,存在一定的不确定性,主要表现在:①基础数据缺失给评价结果带来一定不确定性,如部分城市缺乏 2013 年 $\text{PM}_{2.5}$ 监测数据,各城市非意外死亡率等数据难以获得. ② $\text{PM}_{2.5}$ 污染和健康终端之间的暴露-反应关系存在一定的不确定性. ③进行健康效益经济估算时,统计生命价值参数的不确定性较高.

3 结论

(1)2013 ~ 2017 年全国人口加权浓度呈逐年下降趋势,2013 ~ 2017 年生活在 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度高于 $70 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 地区的人口比例分别为 34.8%、31.4%、20.5%、14.8% 和 5.9%,重污染地区人口比例逐年下降.

(2)以 WHO 过渡期第 1 阶段目标值($\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度为 $35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)作为 338 个地级以以上城市的控制情景,2013 年全国过早死亡人数约为 101 293 人,2017 年约为 41 080 人;《大气十条》的实施有效降低了 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度,产生了显著的健康效益,大约避免 60 213 人居民过早死亡.

(3)相比 2013 年,2017 年全国 31 省(市)中,除西藏外,其他 30 省(市)过早死亡人数均有所减少,山东、河北、江苏、河南、四川等省份减少最

多,其中山东省高达1万人。全国280个地级市过早死亡人数有所减少,重庆、石家庄、北京、保定、邢台、成都、临沂等城市减少过早死亡人数最多;58个城市过早死亡人数有所增加,咸阳、渭南、玉林、阜阳、昭通、汉中等城市增加人数均在100人以上。

(4)《大气十条》实施所带来的过早死亡人数减少,因此估算全国经济效益增加约为549.7亿元。

参考文献:

- [1] 王金南,雷宇,宁森. 实施《大气污染防治行动计划》:向PM_{2.5}宣战[J]. 环境保护, 2014, 42(6): 28-31.
- [2] 生态环境部. 关于《大气污染防治行动计划》实施情况终期考核结果的通报[EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/stbgh/201806/t20180601_442262.htm, 2018-12-25.
- [3] Kan H D, London S J, Chen G H, *et al.* Differentiating the effects of fine and coarse particles on daily mortality in Shanghai, China[J]. *Environment International*, 2007, 33(3): 376-384.
- [4] Pope III C A, Burnett R T, Thun M J, *et al.* Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution[J]. *JAMA-Journal of the American Medical Association*, 2002, 287(9): 1132-1141.
- [5] Dockery D W, Pope C A, Xu X P, *et al.* An association between air pollution and mortality in six U. S. cities[J]. *The New England Journal of Medicine*, 1993, 329(24): 1753-1759.
- [6] Samet J M, Dominici F, Currier I C, *et al.* Fine particulate air pollution and mortality in 20 U. S. cities, 1987-1994[J]. *The New England Journal of Medicine*, 2000, 343(24): 1742-1749.
- [7] Burnett R T, Cakmak S, Brook J R, *et al.* The role of particulate size and chemistry in the association between summertime ambient air pollution and hospitalization for cardiorespiratory diseases[J]. *Environmental Health Perspectives*, 1997, 105(6): 614-620.
- [8] 常桂秋,潘小川,谢学琴,等. 北京市大气污染与城区居民死亡率关系的时间序列分析[J]. 卫生研究, 2003, 32(6): 565-568.
- Chang G Q, Pan X C, Xie X Q, *et al.* Time-series analysis on the relationship between air pollution and daily mortality in Beijing[J]. *Journal of Hygiene Research*, 2003, 32(6): 565-568.
- [9] 於方,过孝民,张衍桑,等. 2004年中国大气污染造成的健康经济损失评估[J]. 环境与健康杂志, 2007, 24(12): 999-1003.
- [10] Ma G X, Wang J N, Yu F, *et al.* An assessment of the potential health benefits of realizing the goals for PM₁₀ in the updated Chinese Ambient Air Quality Standard[J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2016, 10(2): 288-298.
- [11] 谢鹏,刘晓云,刘兆荣,等. 珠江三角洲地区大气污染对人群健康的影响[J]. 中国环境科学, 2010, 30(7): 997-1003.
- Xie P, Liu X Y, Liu Z R, *et al.* Impact of exposure to air pollutants on human health effects in Pearl River Delta[J]. *China Environmental Science*, 2010, 30(7): 997-1003.
- [12] 秦雨,张强,李鑫,等. 中国燃煤电厂大气污染物排放的健康影响特征[J]. 环境科学, 2018, 39(12): 5289-5295.
- Qin Y, Zhang Q, Li X, *et al.* Patterns of mortality from air pollutant emissions in China's coal-fired power plants[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(12): 5289-5295.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 谢鹏,刘晓云,刘兆荣,等. 我国人群大气颗粒物污染暴露-反应关系的研究[J]. 中国环境科学, 2009, 29(10): 1034-1040.
- Xie P, Liu X Y, Liu Z R, *et al.* Exposure-response functions for health effects of ambient particulate matter pollution applicable for China[J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(10): 1034-1040.
- [16] 刘晓云,谢鹏,刘兆荣,等. 珠江三角洲可吸入颗粒物污染急性健康效应的经济损失评价[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2010, 46(5): 829-834.
- Liu X Y, Xie P, Liu Z R, *et al.* Economic assessment of acute health impact due to inhalable particulate air pollution in the Pearl River Delta[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2010, 46(5): 829-834.
- [17] 阚海东,陈秉衡. 我国部分城市大气污染对健康影响的研究10年回顾[J]. 中华预防医学杂志, 2002, 36(1): 59-61.
- [18] 屈金娥. 基于BenMAP的杭州市控制空气污染的健康效益评估[D]. 杭州:杭州电子科技大学, 2014.
- [19] 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.
- [20] 段显明,屈金娥. 基于BenMAP的珠三角PM₁₀污染健康经济影响评估[J]. 环境保护与循环经济, 2013, 33(12): 46-51.
- [21] 雷宇,薛文博,张衍桑,等. 国家《大气污染防治行动计划》健康效益评估[J]. 中国环境管理, 2015, 7(5): 50-53.
- Lei Y, Xue W B, Zhang Y S, *et al.* Health benefit evaluation for air pollution prevention and control action plan in China[J]. *Chinese Journal of Environmental Management*, 2015, 7(5): 50-53.
- [22] 杨复沫,贺克斌,马永亮,等. 北京PM_{2.5}浓度的变化特征及其与PM₁₀、TSP的关系[J]. 中国环境科学, 2002, 22(6): 506-510.
- Yang F M, He K B, Ma Y L, *et al.* Variation characteristics of PM_{2.5} concentration and its relationship with PM₁₀ and TSP in Beijing[J]. *China Environmental Science*, 2002, 22(6): 506-510.
- [23] 徐宏辉. 北京及周边地区大气气溶胶的质量浓度和无机组分的特征及其来源研究[D]. 北京:中国科学院研究生院(大气物理研究所), 2007.
- [24] 国家卫生健康委员会. 2018年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.
- [25] 国务院人口普查办公室,国家统计局人口和就业统计司. 中国2010年人口普查分乡、镇、街道资料[M]. 北京:中国统计出版社, 2012.
- [26] 中华人民共和国国家统计局. 人口分省年度数据[EB/OL]. <http://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=E0103>, 2018-12-21.

CONTENTS

Health Benefit Evaluation for Air Pollution Prevention and Control Action Plan in China	WU Wei-ling, XUE Wen-bo, WANG Yan-li, <i>et al.</i> (2961)
Scenario Simulation Study Constrained by the Ambient Air Quality Standards in Nanjing	XIE Fang-jian, SHI Zhi-hao, LI Jing-yi, <i>et al.</i> (2967)
Characteristics and Source Analysis of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} in Zhengzhou	YANG Liu-ming, WANG Shen-bo, HAO Qi, <i>et al.</i> (2977)
Relationship Between Atmospheric Visibility and PM _{2.5} Concentrations and Distributions	WANG Ji-kang, ZHANG Heng-de, GUI Hai-lin, <i>et al.</i> (2985)
Characteristics of VOCs Emitted from the Rubber Tire Manufacturing Industry Based on the Inverse-Dispersion Calculation Method	BAI Hong-xiang, WEI Wei, WANG Ya-ting, <i>et al.</i> (2994)
Stable Carbon Isotope Compositions and Source Apportionments of Volatile Aromatic Compounds in the Urban Atmosphere of Taiyuan, China	LI Ying-hui, YAN Yu-long, LI Zhi-sheng, <i>et al.</i> (3001)
Spectral Distribution and Pollution Characteristics of Polybrominated Diphenyl Ethers in the Air of an Office Building Clustered Area	WANG Lin, DENG Ya-jia, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (3008)
Characterizing Chromophoric Dissolved Organic Matter in Key Lakes in the Middle Reaches of the East Route of the South-North Water Diversion Project	ZHANG Liu-qing, PENG Kai, ZHOU Lei, <i>et al.</i> (3018)
Characteristics of Hydrogen and Oxygen Isotopes in Different Water Bodies in Hilly and Gully Regions of the Loess Plateau	ZHANG He-hui-zi, YU Kun-xia, LI Zhan-bin, <i>et al.</i> (3030)
Analysis of Total Organic Carbon Source Differences Between New and Old Cascade Reservoirs using Carbon and Nitrogen Isotopes	WANG Cong-feng, HU Zi-long, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (3039)
Pollution Sources and the Stratification Effects on Water Quality in Lijiahe Reservoir	XU Jin, HUANG Ting-lin, LI Kai, <i>et al.</i> (3049)
Distribution and Potential Risk of Organochlorine Pesticides in the Soil of a Submerged Area Around Miyun Reservoir	WANG Xia, ZHANG Qing-zhuo, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (3058)
Distribution, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Waters of the Yinchuan Wetlands	TIAN Da-nian, DANG Li-hui, DING Run-mei, <i>et al.</i> (3068)
Comparison of the Geochemical Characteristics of Karst Springs of a Vertically Zoned Climate Region under Human Activity: A Case of Shuifang Spring and Bitan Spring in the Jinfo Mountain Area, Chongqing	XIE Guo-wen, YANG Ping-heng, SHENG Ting, <i>et al.</i> (3078)
Groundwater Chemical Characteristics and Analysis of Their Controlling Factors in an Alluvial Fan of Jianjiang River	TANG Jin-ping, ZHANG Qiang, HU Yang, <i>et al.</i> (3089)
Dynamics of Epilithic Algae Communities and Their Relationship with Environmental Factors During Storage and Non-storage Periods in the Three Gorges Reservoir	FU Jun-ke, LIU Li, HE Xin-yu, <i>et al.</i> (3099)
Influence of Rainfall on the <i>in situ</i> Growth of Dominant Algae Species in Xiangxi River	WENG Chuan-song, LIU De-fu, ZHANG Jia-lei, <i>et al.</i> (3108)
Decomposition of <i>Myriophyllum aquaticum</i> and the Associated Release of Nitrogen and Phosphorus	TONG Xiong, LUO Pei, LIU Feng, <i>et al.</i> (3118)
Optimization of the Parameters for Microalgae Immobilization and Analysis of Its Recovery Potential for Ammonia Nitrogen in Wastewater	LIU Xiang, WANG Jing-yao, WU Juan-juan, <i>et al.</i> (3126)
Ammonium Adsorption Characteristics in Aqueous Solution by Titanate Nanotubes	ZHANG Zheng, FENG Chang-sheng, ZHANG Xiao-nui, <i>et al.</i> (3135)
Application of Fenton-like Photocatalysts Based on Defect Reconstruction in Degradation of Dye Wastewater	TANG Qing-wen, AN Xiao-qiang, LAN Hua-chun, <i>et al.</i> (3146)
Degradation of RBK5 with Peroxymonosulfate Efficiently Activated by N-Doped Graphene	YU Yong-bo, HUANG Wan, DONG Zheng-yu, <i>et al.</i> (3154)
Effect of Cu ²⁺ on Denitrification Using NO ₂ ⁻ as an Electron Acceptor	MAI Wen-ke, PENG Yong-zhen, JI Jian-tao (3162)
Start-up and Performance Optimization of a CANON Pilot Reactor	SUN Qing-hua, WU Di, ZHOU Jia-zhong, <i>et al.</i> (3169)
Effects of Aerobic Carbon Sources on Biofilm with Simultaneous Phosphate Removal and Enrichment	XU Lin-jian, PAN Yang, ZHANG Hao, <i>et al.</i> (3179)
Effect of Organic Characteristics on Sludge Settability in an AAO System	LIU Xiao-bo, YUAN Lin-jiang, CHEN Xi, <i>et al.</i> (3186)
Effect of Free Nitrous Acid on the Activity of Nitrifying Bacteria in Different Sludge Concentrations Under Anoxic Conditions	LÜ Xin-tao, ZHOU Tong, TIAN Xia-di, <i>et al.</i> (3195)
Stability of ZVI-dependent Autotrophic Denitrification by ANAMMOX Bacteria	ZHANG Wen-jing, HUANG Yong, BI Zhen, <i>et al.</i> (3201)
Effect of On-line NaClO Backwashing on Microbial Communities in an Inverted A ² O-MBR System	WANG Xu-dong, GAO Miao, WANG Ying-ying, <i>et al.</i> (3208)
Evaluation of Organic Matter Release and Economy for Various Pretreatments of Sewage Sludge	YUAN Yue, TAN Xue-jun, ZHENG She-yu (3216)
Model-based Optimization for the Coordinated Supply of Clear and Reclaimed Water in the Central Districts of Beijing, China	ZHANG Tian-yuan, TAN Qian, WANG Shu-ping (3223)
Occurrence and Removal of N-nitrosamines in the Wastewater Treatment Plants Using Different Treatment Processes	LIU Wang-rong, ZHAO Jiang-liang, YANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3233)
Occurrence of Tramadol and Fentanyl Use in Domestic Wastewater in Beijing	ZHOU Zi-lei, DU Peng, BAI Ya, <i>et al.</i> (3242)
Pollution Level and Ecological Risk of Typical Antibiotics in Guiyang Wastewater Treatment Plants	YANG Zhao, LI Jiang, ZHANG Sheng-hu, <i>et al.</i> (3249)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Various Livestock Feedlot Soils of the Hilly Purple Soil Region	CHENG Jian-hua, TANG Xiang-yu, LIU Chen (3257)
Effects of Tetracycline on Microbial Communities and Antibiotic Resistance Genes of Vermicompost from Dewatered Sludge	CHEN Jing-yang, XIA Hui, HUANG Kui, <i>et al.</i> (3263)
Fate of Antibiotic Resistance Genes and Virulence Genes in Enterococci During Anaerobic Digestion Process of Thermal Hydrolyzed Sludge	LI Hui-li, PEI Yuan-mei, LI Shan, <i>et al.</i> (3270)
Effect of Co-composting of Chicken Manure with Chinese Medicinal Herbal Residues on Antibiotic Resistance Genes	WU Jin-ping, CHEN Jian-wen, LIU Yong, <i>et al.</i> (3276)
Spatio-temporal Patterns of Microbial Communities and Their Driving Mechanisms in Subalpine Lakes, Ningwu, Shanxi	WANG Xue, LIU Jin-xian, CHAI Bao-feng, <i>et al.</i> (3285)
Community Structure Characteristics of <i>nirS</i> Denitrifying Bacteria of Spring Typical Parkland Waterbodies in Shijiazhuang City	ZHANG Yi-ran, LI Zai-xing, SUN Yue, <i>et al.</i> (3295)
Differential Responses of Rhizospheric <i>nirK</i> - and <i>nirS</i> -type Denitrifier Communities to Different Phosphorus Levels in Paddy Soil	ZHAN Yu, GAO Dan-dan, SHENG Rong, <i>et al.</i> (3304)
Comparison of Soil Bacterial Community Structure Between Paddy Fields and Dry Land in the Huixian Karst Wetland, China	JIA Yuan-hang, JIN Zhen-jiang, YUAN Wu, <i>et al.</i> (3313)
Cd Balance Analysis of a Typical Rice Paddy System in Central Hunan	JIANG Kai, DENG Xiao, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3324)
Effects of an Amendment on Cadmium Transportation in the Rhizosphere Soil-Rice System	LI Yi-chun, WANG Yan-hong, TANG Ming-deng, <i>et al.</i> (3331)
Isolation of Heavy Metal Immobilizing and Plant Growth-Promoting Bacteria and Its Effects on Reducing Heavy Metal Accumulation in Wheat	HAN Hui, WANG Xiao-yu, CAI Hong, <i>et al.</i> (3339)
Differences in the Cadmium-Enrichment Capacity and Subcellular Distribution and Chemical Form of Cadmium in Different Varieties of Pepper	PENG Qiu, LI Tao, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (3347)
Effect of Phosphorus Addition on N ₂ O Emissions from Rice-Rapeseed Rotation Soils	SUN Zheng, SU Rong-lin, XU Peng, <i>et al.</i> (3355)
Impact of Land Use Type on the Stability and Organic Carbon Content of Soil Aggregates in the Weibei Dryland	LIU Jie, MA Yan-ting, WANG Xian-ling, <i>et al.</i> (3361)
Vertical Distribution Characteristics of PAHs in Soils with Different Land Use Types During Rapid Urbanization	LU Yin-tao, XIANG Xin-xin, ZHANG Shi-chao, <i>et al.</i> (3369)
Pollution Levels, Sources, and Spatial Distribution of Phthalate Esters in Soils of the West Lake Scenic Area	LIAO Jian, DENG Chao, CHEN Yi, <i>et al.</i> (3378)
Impact of Biochar on Soil Bulk Density and Aggregates of Lou Soil	LI Qian-qian, XU Chen-yang, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (3388)