

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.6

第40卷 第6期

目次

北京城区大气金属元素干湿沉降特征	张国忠, 潘月鹏, 田世丽, 王永宏, 熊秋林, 李广, 顾梦娜, 吕雪梅, 倪雪, 何月欣, 黄威, 刘博文, 王跃思	(2493)
北京城郊 PM _{2.5} 中金属元素的污染特征及潜在生态风险评价	徐静, 李杏茹, 张兰, 陈曦, 杨阳, 刘永桥, 赵清	(2501)
上海城区二次气溶胶的形成: 光化学氧化与液相反应对二次气溶胶形成的影响	高杰, 乔利平, 楼晟荣, 严茹莎, 周敏, 刘瑜存, 冯加良, 黄丹丹	(2510)
天津市 2017 年重污染过程二次无机化学污染特征分析	徐虹, 肖致美, 陈魁, 李立伟, 杨宁, 高璟赞, 李源, 孔君, 毕温凯, 邓小文	(2519)
典型非金属矿物制造工艺过程源成分谱特征	赵雪艳, 于高峰, 王信梧, 张向炎, 殷宝辉, 刘盈盈, 王歆华, 杨文, 赵若杰	(2526)
垃圾焚烧厂排放颗粒物组分粒径分布特征	余卓君, 吴建会, 张裕芬, 张进生, 冯银厂, 李蒲	(2533)
天津市春季样方法道路扬尘碳组分特征及来源分析	马妍, 姬亚芹, 国纪良, 赵静琦, 李越洋, 王士宝, 张蕾	(2540)
霾天气下城市气溶胶吸湿性的观测	杨素英, 田芷洁, 张铁凝, 于兴娜, 李艳伟, 安俊琳, 赵秀勇, 李岩, 王梓航, 吴尚	(2546)
宁东能源化工基地大气 PM _{2.5} 中硝基多环芳烃污染特征及呼吸暴露风险	刘攀亮, 剧媛丽, 毛蒲萱, 黄韬, 高宏, 马建民	(2556)
2014 ~ 2016 年间郑州市控制 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 污染的健康效益评估	韩士杰, 王佳, 燕启社, 杨留明, 赵庆炎, 王申博, 李晨, 张轶舜, 张瑞芹	(2565)
1990 ~ 2017 年中国地区气溶胶光学厚度的时空分布及其主要影响类型	刘莹, 林爱文, 覃文敏, 何利杰, 李霄	(2572)
北京春季一次霾-沙天气污染特性与成因分析	王耀庭, 李青春, 郑祚芳, 窦有俊	(2582)
江苏省内河船舶大气污染物排放清单及特征	徐文文, 殷承启, 许雪记, 张玮	(2595)
亚热带稻区大气 NO ₂ 、HNO ₃ 及硝态氮污染特征及干湿沉降	欧阳秀琴, 王波, 沈健林, 朱潇, 王杰飞, 李勇, 吴金水	(2607)
长江源区降水氢氧稳定同位素特征及水汽来源	汪少勇, 王巧丽, 吴锦奎, 何晓波, 丁永建, 王利辉, 胡召富	(2615)
基于高山湖泊沉积记录的贵州北部大气重金属污染历史重建	梁梦瑶, 刘恩峰, 张恩楼, 纪明, 李小林	(2624)
青岛 4 个海水浴场微塑料的分布特征	罗雅丹, 林千惠, 贾芳丽, 徐功娣, 李锋民	(2631)
鄱阳湖湿地候鸟栖息地微塑料污染特征	刘淑丽, 简敏菲, 周隆胤, 李文华, 吴希恩, 饶丹	(2639)
三峡库区消落带土壤溶解性有机质溯源: 基于氮/碳比值的线性双端元源负荷分析	江韬, Joeri Kaal, 梁俭, 刘江, 张耀玲, 王定勇, 魏世强, 赵铮	(2647)
水生生物光合作用对雪玉洞岩溶水体中 CDOM 的影响	范佳鑫, 蒋勇军, 贺秋芳, 王家楠, 何瑞亮, 张彩云, 马丽娜, 汪啟容	(2657)
水化学和环境同位素对济南东源饮用水源地地下水演化过程的指示	张雅, 苏春利, 马燕华, 刘伟江	(2667)
崇左响水地区地下水水质分析及健康风险评价	周巾枚, 蒋忠诚, 徐光黎, 覃小群, 黄奇波, 张连凯	(2675)
云南荞麦地流域地下水水化学特征及物质来源分析	张勇, 郭纯青, 朱彦光, 于爽	(2686)
鄱阳湖流域多尺度 C、N 输送通量及其水质参数变化特征	陆瑶, 高扬, 贾珺杰, 宋贤威, 陈世博, 马明真, 郝卓	(2696)
合流制面源污染传输过程与污染源解析	房金秀, 谢文霞, 朱玉玺, 沈雷, 马玉坤, 李佳, 姜智绘, 李叙勇, 赵洪涛	(2705)
强化浅基质层干植草沟对道路径流的脱氮效果	段进凯, 李田, 张佳炜	(2715)
水源水库暴雨径流过程水体锰的迁移及其影响	邓立凡, 黄廷林, 李楠, 李凯, 吕晓龙, 毛雪静	(2722)
巢湖十五里河沉积物磷吸收潜力及对外源碳的响应	李如忠, 鲍琴, 张瑞钢, 陈慧	(2730)
金盆水库沉积物磷的来源及分布特征	毛雪静, 黄廷林, 李楠, 徐金兰, 苏露, 吕晓龙, 邓立凡	(2738)
水库水体热分层的水质及细菌群落分布特征	王禹冰, 王晓燕, 庞树江, 杨晓明, 刘洋	(2745)
不同水温分层水库沉积物间隙水营养盐垂向分布与细菌群落结构的关系	王慎, 张思思, 许尤, 官卓宇, 杨正健, 刘德富, 马骏	(2753)
表面流人工湿地长期运行后的底泥营养盐累积特征与释放规律	朱伊梦, 姜翠玲, 朱立琴, 杜观超, 高旭, 陈红卫, 李峰东, 张海阔, 张雪, 秦文凯, 李一平	(2764)
针铁矿改性生物炭对砷吸附性能	朱司航, 赵晶晶, 尹英杰, 商建英, 陈冲, 瞿婷	(2773)
改性稻壳生物炭对水溶液中甲基橙的吸附效果与机制	史月月, 单锐, 袁浩然	(2783)
厌氧膜生物反应器处理含盐废水运行效能及膜污染特性	闫欢沙, 许振钰, 金春姬, 邵梦雨, 郭亮, 赵阳国	(2793)
污水处理厂出水有机磷污染特征及强化去除	王小东, 王子文, 陈明飞, 王燕, 王硕, 李激	(2800)
碱度对沸石序批式反应器亚硝化的影响	王瑞鑫, 陈婧, 汪晓军, 胡浩林, Karasuta Chayangkun	(2807)
活性污泥物理结构对呼吸过程的影响	郭耀, 李志华, 杨成建, 王慧娟, 李亚明, 姜阳	(2813)
好氧颗粒污泥处理畜禽养殖沼液污染物的特性	廖杰, 叶嘉琦, 曾志超, 刘琳, 徐开钦, 刘超翔	(2821)
快速城市化区河流温室内空气排放的时空特征及驱动因素	刘婷婷, 王晓峰, 袁兴中, 龚小杰, 侯春丽	(2827)
生物炭对潜流人工湿地污染物去除及 NO ₃ -N 排放影响	邓朝仁, 梁银坤, 黄磊, 方丹丹, 陈玉成, 杜刚	(2840)
曾用抗生素磺胺二甲嘧啶对稻田 N ₂ O 排放的影响及其微生物机制	吴杰, 李志琳, 徐佳迎, 王珏, 蒋静艳	(2847)
不同施氮水平对紫花苜蓿草地土壤呼吸和土壤生化性质的影响	胡伟, 张亚红, 李鹏, 张鹏, 李满友, 尤璟涛, 田水泉	(2858)
典型城市化区域土壤重金属污染的空间特征与风险评价	何博, 赵慧, 王铁宇, 孟晶, 肖荣波, 刘胜然, 周云桥, 史斌	(2869)
西南高锡地质背景区农田土壤与农作物的重金属富集特征	刘意章, 肖唐付, 熊燕, 宁增平, 双燕, 李航, 马良, 陈海燕	(2877)
基于 GIS 和受体模型的枸杞地土壤重金属空间分布特征及来源解析	白一茹, 张兴, 赵云鹏, 王幼奇, 钟艳霞	(2885)
喀斯特地区小尺度农业土壤砷的空间分布及污染评价	汪花, 刘秀明, 刘方, 唐启琳, 王世杰	(2895)
黄土高原不同植被带人工刺槐林土壤团聚体稳定性及其化学计量特征	瞿晴, 徐红伟, 吴旋, 孟敏, 王国梁, 薛蓁	(2904)
秸秆还田配施氮肥对喀斯特农田微生物群落及有机碳矿化的影响	徐学池, 苏以荣, 王桂红, 刘坤平, 胡亚军, 陈香碧, 郑小东, 何寻阳	(2912)
生物炭施用及老化对紫色土中抗生素吸附特征的影响	阴文敏, 关卓, 刘琛, 何杨, 杨飞, 唐翔宇	(2920)
稳定性同位素 DNA-SIP 示踪中性紫色土的氨氧化过程	刘天琳, 王智慧, 闫小娟, 赵永鹏, 贾仲君, 蒋先军	(2930)
纳米银和银离子对土壤中硝化微生物及其氨氧化速率的影响	伍玲丽, 张旭, 舒慧慧, 张丽, 司友斌	(2939)
农田沟道土壤中锰氨氧化 (Mn-ANAMMOX) 过程的探究	陈湜, 李正魁, 覃云斌, 丁帮环, 陈志浩	(2948)
污泥四环素含量对蚯蚓堆肥中氨氧化菌群的影响	吴颖, 黄魁, 夏慧, 陈景阳	(2954)
《环境科学》征订启事 (2929)	《环境科学》征稿简则 (2947)	信息 (2646, 2656, 2857)

2014~2016年间郑州市控制PM₁₀和PM_{2.5}污染的健康效益评估

韩士杰¹, 王佳², 燕启社¹, 杨留明¹, 赵庆炎¹, 王申博¹, 李晨¹, 张轶舜¹, 张瑞芹^{1*}

(1. 郑州大学化学与分子工程学院, 环境科学研究院, 郑州 450001; 2. 郑州大学公共卫生学院, 郑州 450001)

摘要: 根据郑州市2014~2016年间大气中PM₁₀和PM_{2.5}年平均浓度数值, 采用泊松回归相对危险模型, 评估了控制PM₁₀和PM_{2.5}污染后所能带来的95%置信区间下的健康效应及健康效益。结果表明, 2014~2016年间, PM₁₀浓度达到二级限值后所带来的经济效益(以亿元计, 括号中为置信区间, 下同)分别为181.8 (150.4, 211.2)、242.5 (202.5, 279.4)和206.2 (173.3, 239.2), 分别占郑州市当年生产总值的2.7%、3.3%和2.5%; PM_{2.5}浓度达标后所带来的经济效益分别为178.8 (143.7, 211.6)、216.5 (174.6, 255.3)和172.5 (137.8, 205.5), 分别占郑州市当年生产总值的2.6%、3.0%和2.1%。PM₁₀和PM_{2.5}浓度达标后, 城镇受益人数高于农村, 急性支气管炎减少人数高于其他健康终端, 对于慢性支气管炎, 成人受益比儿童大, 哮喘则相反。慢性支气管炎人数减少带来的健康经济效益最高, 其次为哮喘, 门诊和住院的健康效益最低。

关键词: PM₁₀和PM_{2.5}; 健康效应; 健康效益; 城镇; 乡村

中图分类号: X196; X503.1; X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)06-2565-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.201810255

Health Benefit Evaluation for PM₁₀ and PM_{2.5} Pollution Control in Zhengzhou, China, 2014-2016

HAN Shi-jie¹, WANG Jia², YAN Qi-she¹, YANG Liu-ming¹, ZHAO Qing-yan¹, WANG Shen-bo¹, LI Chen¹, ZHANG Yi-shun¹, ZHANG Rui-qin^{1*}

(1. Research Institute of Environmental Science, College of Chemistry and Molecular Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. College of Public Health, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Based on the annual average concentration values, the health effects and health benefits as well as 95% confidence intervals of PM₁₀ and PM_{2.5} pollution control from 2014 to 2016 in Zhengzhou were evaluated by applying the Poisson regression relative risk model. Results showed that the health benefits of PM₁₀ pollution control were 18.18 billion RMB (15.04, 21.12), 24.25 billion RMB (20.25, 27.94), and 20.62 billion RMB (17.33, 23.92), which accounted for 2.7%, 3.3%, and 2.5% of the GDP of Zhengzhou, respectively, in 2014-2016. The health benefits of PM_{2.5} pollution control were 17.88 billion RMB (14.37, 21.16), 21.65 billion RMB (17.46, 25.53), and 17.25 billion RMB (13.78, 20.55), which accounted for 2.6%, 3.0%, and 2.1% of the GDP of Zhengzhou, respectively, in 2014-2016. After the PM₁₀ and PM_{2.5} pollution was controlled, the number of urban beneficiaries was higher than that of rural areas, and acute bronchitis beneficiaries were higher than the beneficiaries of other health end-points. For chronic bronchitis, adults benefited more than children, while the opposite occurred for asthma. In this study, chronic bronchitis had the highest health benefit, followed by asthma, and outpatient and inpatient setting had the lower health benefits.

Key words: PM₁₀ and PM_{2.5}; health effects; health benefit; urban; rural

近年来, 郑州市空气质量情况不容乐观, 其主要大气污染物为颗粒物^[1]。颗粒物中的PM₁₀又称可吸入颗粒物, PM_{2.5}更可通过呼吸道沉积在肺泡中, 进入血液循环, 由此造成的居民健康危害及经济损失较大^[2]。因此有必要定量评估大气中PM₁₀和PM_{2.5}污染的健康危害, 并进行经济学评价^[3, 4]。目前多采用流行病学研究得出的暴露-反应关系来评估大气中PM₁₀和PM_{2.5}造成的健康损失, 并将其货币化^[5]。如阚海东等^[6]、黄德生等^[7]以及魏国茹等^[8]分别评估了上海、京津冀地区以及西安市PM_{2.5}浓度达到空气质量标准后所实现的健康效益, 表明PM_{2.5}污染对当地居民健康影响显著, 造成的经济损失较大。

郑州市是国家重要的交通枢纽, 同时也是国家中心城市之一, 但目前对该地区PM₁₀和PM_{2.5}的健康效益评估的研究还相对较少。李慧娟等^[9]对2015年郑州市PM_{2.5}健康风险和经济损失进行评价, 结果表明郑州市健康风险和经济损失问题突出。但李慧娟等^[9]以市区常住人口作为暴露人口, 未考虑农村暴露人口和PM₁₀的健康影响。事实上, 由于城镇和农村地区人均收入水平、人口数量、消费观念、医疗费用的差异, 控制PM₁₀和PM_{2.5}污染的健康效

收稿日期: 2018-10-30; 修订日期: 2019-01-07

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0212400)

作者简介: 韩士杰(1994~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气环境污染与防治, E-mail: hansj15237124500@163.com

* 通信作者, E-mail: rqzhang@zzu.edu.cn

益有所不同. 本文考虑到某些健康终端在不同年龄段的暴露反应关系系数、基准发生率和医疗费用等的不同以及城镇与农村的基本差异, 根据文献[10]中郑州市 2014~2016 年间 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度数值, 采用泊松回归模型评价了郑州市城镇和农村连续 3a 的 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度达到 GB 3095-2012 中二级限值浓度后所能带来的健康效应及健康经济效益, 以期对郑州市实施颗粒物空气质量标准的成本效益分析提供科学依据, 并为郑州市环境空气质量的管理提供参考.

1 材料与方法

1.1 评估方法

本研究首先评估控制 PM_{10} 或 $PM_{2.5}$ 污染的健康效应, 进行货币化后得到环境效益. 公式如下^[7]:

$$L = \sum_{i=1}^M L_i = \sum_{i=1}^M E_i \times L_{pi} \quad (1)$$

式中, L 为控制 PM_{10} 或 $PM_{2.5}$ 污染所带来的所有健康终端效益的总和; L_i 为健康终端 i 相应的健康效益; E_i 为健康终端 i 的健康效应变化量; L_{pi} 为健康终端 i 的单位经济价值.

参考文献[4, 8], 本文选择早逝、呼吸系统住院、心血管系统住院、内科门诊、儿科门诊、急性支气管炎、慢性支气管炎(0~14 岁, 15 岁及以上)和哮喘(0~14 岁, 15 岁及以上)作为健康效应终端.

1.1.1 环境健康效应评估

采用泊松回归相对危险模型, 结合暴露-反应关系系数计算控制 PM_{10} 或 $PM_{2.5}$ 浓度后人群的健康效应值, 公式如下:

$$E = E_0 \times \exp[\beta(c - c_0)] \quad (2)$$

$$\Delta E = P \times (E - E_0)$$

$$= P \times E \times \left[1 - \frac{1}{\exp[\beta(c - c_0)]} \right] \quad (3)$$

式中, β 为暴露-反应关系系数; c 和 c_0 分别为大气中 PM_{10} 或 $PM_{2.5}$ 的实际浓度和参考浓度值 ($\mu g \cdot m^{-3}$), 在此, c 为当年的年均浓度, c_0 为我国环境空气污染物二级浓度限值; E 和 E_0 分别为相应浓度下人群的健康风险; ΔE 为归因于 PM_{10} 或 $PM_{2.5}$ 污染的健康效应; P 为当前暴露人口数.

1.1.2 环境健康价值评估

参考文献[6, 7], 采用统计学意义上的生命价值(value of a statistical life, VOSL), 即人们为降低死亡风险而愿意付出的代价并用货币化进行衡量的方法, 评估由于居民早逝而带来的经济损失. 目前郑州地区并未开展 VOSL 的研究, 因此, 本文参考

谢旭轩^[11]在 2010 年对北京市 VOSL 的研究结果, 考虑到两地的收入水平差距, 以人均可支配收入为指标, 评估郑州地区 VOSL 值, 公式如下^[4, 7, 12]:

$$VOSL_{ZZ} = VOSL_{BJ} \times \left(\frac{G_{ZZ}}{G_{BJ}} \right)^e \quad (4)$$

式中, $VOSL_{ZZ}$ 和 $VOSL_{BJ}$ 分别代表郑州市和北京市的 VOSL; G_{ZZ} 和 G_{BJ} 分别代表郑州市与北京市的人均可支配收入; e 为收入弹性系数, 取 $e = 1$.

采用疾病成本法评估由于门诊和住院而带来的经济损失, 包括相应疾病的人均医疗费用与误工导致的经济损失. 公式如下^[13]:

$$EC_i = (EC_{pi} + G \times T_i) \times \Delta E \quad (5)$$

式中, EC_i 为健康终端 i 造成的疾病总成本; EC_{pi} 为健康终端 i 的单位病例的医疗费用, 包括直接医疗费用与间接医疗费用, 元; T_i 为因健康终端 i 导致的误工时间, 设为 0.5 d^[8]; G 为日人均 GDP, 元 $\cdot d^{-1}$.

慢性支气管炎病程缓慢, 患病时间难以确定, 不宜采用疾病成本法计算^[4, 7]. 本文参考国内外部分学者的研究成果^[8, 14, 15], 假设慢性支气管炎的单位成本为统计寿命价值的 40%.

1.2 数据来源

根据文献[16~18], 在 2014~2016 年间, 郑州市总人口数分别为 937.8、956.9 和 972.4 万人; 城镇化率分别为 68.3%、69.7% 和 71.0%; 城镇人口数等于总人口数乘以城镇化率, 农村人口数为总人口数减去城镇人口数, 在此假定所有人口均暴露于 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 污染下. 以 2014 年为基准年, CPI 指数分别为 100%、101.1% 和 103.4%; 城镇居民的人均可支配收入分别为 29 095、31 099 和 33 214 元, 而农村居民的人均可支配收入分别为 15 470、17 125 和 18 426 元.

郑州市 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度数据来源于文献[10]. 由于农村地区污染物浓度获取困难, 故在此假定农村地区 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度与城镇地区相同. 所选取的各健康终端的基准发生率如表 1 所示. 郑州地区部分数据缺失, 以全国平均数据代替; 当年数据缺失部分以最近年份研究结果代替; 农村地区缺失部分以城镇地区数据代替.

考虑到不同种族不同地区的人们对 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 污染的敏感性及国内外大气污染程度的不同, 暴露-反应关系系数值在国内外有所差异. 因此在选择时, 应尽量参考国内研究. 阚海东等^[6]和谢鹏等^[19]利用 Meta 分析法, 评价我国人群大气颗粒物暴露对各健康效应终点的暴露-反应关系. 吕铃钥等^[4]总结了国内外不同研究, 计算了不同粒径下颗

粒物的暴露-反应关系系数. 本文借鉴前人研究, 选取暴露-反应关系系数如表 1 所示.

健康终端的住院或门诊天数及相关医疗费用如表 2 所示, 由于郑州地区某些年份的医疗费用难以获得, 部分数据采用了全国居民的平均值或者最近年份的研究结果.

表 1 不同健康终端的 PM₁₀和 PM_{2.5}暴露-反应系数与基准发生率

Table 1 PM₁₀ and PM_{2.5} exposure-reaction coefficients and baseline incidence data for different health end-points

项目	健康终端	暴露-反应系数β值 (95% 置信区间)		E					
		PM ₁₀	PM _{2.5}	城镇			农村		
				2014 年	2015 年	2016 年	2014 年	2015 年	2016 年
早逝	死亡率	0.000 38 ^[19] (0.000 35, 0.000 42)	0.000 40 ^[19] (0.000 19, 0.000 62)	0.004 39 ^[16]	0.004 59 ^[17]	0.005 44 ^[18]	0.004 39 ^[16]	0.004 59 ^[17]	0.005 44 ^[18]
住院	呼吸系统疾病	0.001 24 ^[19] (0.000 84, 0.001 62)	0.001 09 ^[7] (0, 0.002 21)		0.011 5 ^[20]			0.015 1 ^[20]	
	心血管疾病	0.000 66 ^[19] (0.000 36, 0.000 95)	0.000 68 ^[7] (0.000 43, 0.000 93)		0.007 1 ^[20]			0.006 7 ^[20]	
门诊	儿科	0.000 39 ^[4] (0.000 14, 0.000 64)	0.000 56 ^[7] (0.000 20, 0.000 90)	0.097 1 ^[21]	0.108 1 ^[22]	0.117 1 ^[23]	0.097 1 ^[21]	0.108 1 ^[22]	0.117 1 ^[23]
	内科	0.000 34 ^[4] (0.000 19, 0.000 49)	0.000 49 ^[7] (0.000 27, 0.000 70)	0.281 9 ^[21]	0.285 1 ^[22]	0.282 2 ^[23]	0.281 9 ^[21]	0.285 1 ^[22]	0.282 2 ^[23]
患病	急性支气管炎	0.005 5 ^[4] (0.001 89, 0.009 11)	0.007 9 ^[7] (0.002 7, 0.013 0)		0.037 2 ^[4]			0.037 2 ^[4]	
	慢性支气管炎 (0~14 岁)	0.003 4 ^[4] (0.002 81, 0.003 99)	0.004 86 ^[4] (0.004 01, 0.005 70)		0.006 2 ^[23]			0.008 1 ^[23]	
	慢性支气管炎 (≥15 岁)	0.004 8 ^[4] (0.004 02, 0.005 58)	0.006 86 ^[4] (0.005 74, 0.007 97)		0.006 2 ^[23]			0.008 1 ^[23]	
	哮喘(0~14 岁)	0.004 4 ^[4] (0.002 70, 0.006 20)	0.006 30 ^[4] (0.003 90, 0.008 90)		0.023 8 ^[24]			0.023 8 ^[24]	
	哮喘(≥15 岁)	0.003 9 ^[4] (0.001 90, 0.005 90)	0.005 60 ^[4] (0.002 70, 0.008 40)		0.016 ^[25]			0.010 ^[25]	

表 2 各健康终端次均住院或门诊天数及医疗费用

Table 2 Medical expenses and average hospital stays for different health end-points

年份	次均住院天数/d				次均住院费用/元			次均门诊 天数 ^[8] /d	次均直接门 诊费用 ^[30] /元		次均间接门 诊费用 ^[30] /元		次均间接住 院费用 ^[30] /元		日均 GDP ^[16~18] /元	
	心血管 疾病 ^[21~23]		呼吸系统 疾病 ^[21~23]		哮喘 ^[26] (城镇和农村)	心血管疾 病 ^[27~29]	呼吸系统疾 病 ^[21~23]		哮喘 ^[25]							
	(城镇和农村)	城镇	农村													
				城镇						农村	城镇	农村	城镇	农村		
2014	9.8	8.2	7.3	10.7	24 706	5 358	13 951	0.5	312	128	20	15	706	523	200	
2015	9.8	8.9	7.2	10.7	25 454	5 495	13 951	0.5	312	128	20	15	706	523	211	
2016	9.4	8.4	7.2	10.7	26 057	5 662	13 951	0.5	312	128	20	15	706	523	230	

2 结果与讨论

2.1 PM₁₀和 PM_{2.5}浓度分析

从文献[10]可知, 2014 ~2016 年 PM₁₀的年均浓度分别为 145.3、167.4 和 144.5 μg·m⁻³, 超出国家二级浓度限值 107%、139% 和 106%; PM_{2.5}的年均浓度分别为 87.8、95.9 和 78.6 μg·m⁻³, 超出国家二级浓度限值的 151%、174% 和 124%. 数据显示, 2014 ~2016 年期间, 郑州市 PM₁₀和 PM_{2.5}污染较为严重.

2.2 人群健康效应变化

如表 3 所示, 在 2014 ~2016 年间, PM₁₀达到标准限值后, 所受益人数(以万人计, 括号中为 95% 置信区间)分别为 35.7 (19.1, 50.0)、45.9 (24.9,

63.5)和 37.2 (19.8, 52.4). 城镇受益人数明显高于农村受益人数, 分别占总受益人数的 68.3%、69.9% 和 71.2%, 且城镇地区哮喘(15 岁及以上)受益人数是农村的 3.4 ~3.9 倍, 表明空气质量改善后城镇居民受影响更大. 各健康终端对 PM₁₀的敏感程度不同, 其中门诊减少的人数远高于住院, 急性支气管炎受益人数远高于慢性支气管炎. 急性支气管炎、哮喘和内科人群受益最大, 3 种健康终端受益人数占全部受益人数的 70.6% ~80.6%. 心血管疾病和早逝人数减少较少, 仅占全部人数的 1.2% ~1.3%. 在不同年龄阶段, 受益人数也有所不同, 对于慢性支气管炎, 成人(15 岁及以上)受益人数高于儿童(0 ~14 岁), 而哮喘受益人数是儿童高于成人.

表 3 PM₁₀达到空气质量标准所带来的健康效应/人

Table 3 Health effects of achieving the PM₁₀ air quality standard/person

项目	健康终端	2014 年		2015 年		2016 年	
		城镇	农村	城镇	农村	城镇	农村
早逝	死亡率	793 (731, 875) ¹⁾	368 (339, 406)	1 112 (1 026, 1 227)	484 (446, 534)	1 048 (967, 1 157)	428 (395, 473)
住院	呼吸系统疾病	6 567 (4 515, 8 460)	4 000 (2 751, 5 153)	8 725 (6 025, 11 194)	4 983 (3 441, 6 393)	7 006 (4 816, 9 027)	3 757 (2 583, 4 841)
	心血管疾病	2 205 (1 216, 3 140)	965 (533, 1 375)	2 948 (1 631, 4 184)	1 210 (670, 1 717)	2 352 (1 297, 3 349)	907 (500, 1 291)
门诊	儿科	18 187 (6 590, 29 568)	8 437 (3 057, 13 717)	26 870 (9 763, 43 565)	11 686 (4 246, 18 947)	23 152 (8 388, 37 643)	9 456 (3 426, 15 375)
	内科	45 647 (25 653, 65 417)	21 176 (11 901, 30 348)	61 930 (34 861, 88 607)	26 935 (15 162, 38 537)	48 731 (27 384, 69 841)	19 904 (11 185, 28 527)
患病	急性支气管炎	80 810 (31 612, 118 297)	37 489 (14 665, 54 880)	102 886 (41 710, 145 927)	44 748 (18 141, 63 467)	86 342 (33 732, 126 546)	35 267 (13 778, 51 688)
	慢性支气管炎 (0~14 岁)	8 971 (7 574, 10 307)	5 437 (4 591, 6 247)	11 656 (9 900, 13 314)	6 623 (5 625, 7 565)	9 578 (8 085, 11 007)	5 111 (4 314, 5 874)
	慢性支气管炎 (≥15 岁)	12 048 (10 374, 13 626)	7 302 (6 287, 8 258)	15 440 (13 396, 17 335)	8 773 (7 611, 9 850)	12 869 (11 078, 14 559)	6 867 (5 912, 7 769)
	哮喘 (0~14 岁)	42 999 (28 050, 56 875)	19 948 (13 013, 26 385)	55 320 (36 701, 71 947)	24 060 (15 962, 31 292)	45 925 (29 940, 60 783)	18 758 (12 229, 24 827)
	哮喘 (≥15 岁)	26 083 (13 664, 36 767)	7 563 (3 962, 10 660)	33 721 (18 026, 46 638)	9 166 (4 900, 12 678)	27 853 (14 580, 39 289)	7 110 (3 722, 10 030)

1) 均值及 95% 置信区间, 下同

如表 4 所示, 在 2014~2015 年间, PM_{2.5} 达到二级浓度限值后, 所受益人数(以万人计, 括号中为 95% 置信区间)分别为 35.4 (18.3, 49.9)、41.3 (21.5, 57.8) 和 31.4 (16.0, 44.9)。其中城镇受益人数占总受益人数的 68.5%、69.8% 和 71.3%。急

性支气管炎、哮喘和内科人群受益最大, 2014~2016 年间, 3 种健康终端受益人数占全部受益人数的 79.3%~80.1%。心血管疾病和早逝人数减少较少, 仅占全部人数的 0.9%。不同年龄阶段, 受益人数分布规律与 PM₁₀ 浓度达标后相同。本研究中总受

表 4 PM_{2.5}达到二级空气质量标准所带来的健康效应/人

Table 4 Health effects of achieving the PM_{2.5} air quality standard/person

项目	健康终端	2014 年		2015 年		2016 年	
		城镇	农村	城镇	农村	城镇	农村
早逝	死亡率	588 (281, 906)	273 (130, 420)	737 (352, 1 134)	320 (153, 493)	649 (310, 1 002)	265 (127, 409)
住院	呼吸系统疾病	4 120 (0, 8 114)	2 510 (0, 4 942)	4 925 (0, 9 657)	2 813 (0, 5 515)	3 685 (0, 7 293)	1 976 (0, 3 911)
	心血管疾病	1 604 (1 021, 2 179)	702 (447, 954)	1 921 (1 224, 2 607)	788 (502, 1 070)	1 432 (910, 1 948)	552 (351, 751)
门诊	儿科	18 310 (6 601, 29 165)	8 494 (3 062, 13 530)	24 170 (8 727, 38 448)	10 512 (3 796, 16 722)	19 500 (7 019, 31 110)	7 965 (2 867, 12 707)
	内科	46 123 (25 562, 65 527)	21 397 (11 859, 30 399)	55 896 (31 006, 79 346)	24 311 (13 485, 34 510)	41 182 (22 801, 58 564)	16 821 (9 313, 23 921)
患病	急性支气管炎	81 277 (31 663, 118 347)	37 705 (14 689, 54 903)	94 740 (37 614, 135 678)	41 205 (16 359, 59 010)	74 836 (28 522, 111 121)	30 567 (11 650, 45 387)
	慢性支气管炎 (0~14 岁)	8 989 (7 579, 10 322)	5 448 (4 593, 6 256)	10 592 (8 959, 12 126)	6 019 (5 090, 6 890)	8 174 (6 866, 9 419)	4 362 (3 664, 5 026)
	慢性支气管炎 (≥15 岁)	12 069 (10 384, 13 643)	7 315 (6 294, 8 269)	14 119 (12 197, 15 899)	8 023 (6 931, 9 034)	11 066 (9 477, 12 565)	5 905 (5 057, 6 705)
	哮喘(0~14 岁)	43 143 (28 374, 57 167)	20 015 (13 163, 26 520)	50 573 (33 554, 66 409)	21 996 (14 593, 28 883)	39 466 (25 694, 52 847)	16 120 (10 495, 21 585)
	哮喘(≥15 岁)	26 237 (13 618, 36 717)	7 607 (3 949, 10 646)	30 833 (16 178, 42 726)	8 381 (4 398, 11 614)	23 931 (12 268, 33 875)	6 109 (3 132, 8 648)

益人数稍高于李慧娟^[9]等的研究, 因本文同时考虑了对哮喘的影响. 另外, 由于选取的暴露人口、暴露系数和各健康终端的基准发生率的不同, 本研究中早逝、内科和儿科受益人数低于文献^[9], 而呼吸系统疾病和急性支气管炎受益人数偏高.

2.3 健康经济效益

如表 5 所示, 2014 ~ 2016 年间, 控制 PM₁₀ 污染后所带来的健康经济效益 (以亿元计, 括号内为 95% 置信区间) 分别为 181.8 (150.4, 211.2)、242.5 (202.5, 279.4) 和 206.2 (173.3, 239.2), 分别占郑州市当年生产总值的 2.7%、3.3% 和 2.5%, 稍高于吕铃钥等^[4]对京津冀地区的研究. 由于受益人数和次均医疗费用的不同, 各健康终端对总的健康效益贡献也有所差距. 其中慢性支气管炎贡献最多, 分别为 150.3 (128.3, 171.1)、200.0 (172.0, 226.3) 和 169.2 (144.5, 192.8), 分别占总效益的 82.7%、82.5% 和 82.1%, 占比高于文献

[4] 的研究; 其次为早逝, 分别占总效益的 6.0%、6.7% 和 7.7%, 占比远低于文献^[4] 的研究. 上述结果可能与不同地区的污染水平和经济发展情况有关, 不同的污染水平导致受益人数不同, 而经济发展情况导致 VOSL 有所差异. 本文中门诊和住院人数较少, 带来的经济效益贡献最小, 仅占全部效益的 1.1% ~ 1.2%. 尽管急性支气管炎受益人数最多, 但由于其次均医疗费用相对较低, 其总的经济效益贡献也处于较低水平. 由于医疗费用、住院天数和暴露人口数目的差距, 各健康终端在城镇与农村之间的健康经济效益贡献有所差距, 城镇总体贡献明显高于农村, 分别占总经济效益的 64.3%、65.8% 和 67.3%. 城镇中各健康终端的健康效益分别是农村的 1.6 ~ 4.1、1.8 ~ 4.2 和 1.8 ~ 4.4 倍. 不同年龄阶段, 健康经济效益贡献不同, 对于慢性支气管炎, 成人 (15 岁及以上) 贡献高于儿童 (0 ~ 14 岁), 而哮喘则是儿童贡献高于成人.

表 5 PM₁₀ 达到二级空气质量标准所带来的健康效益/亿元

Table 5 Health benefits of achieving the PM₁₀ air quality standard/hundred million RMB

项目	健康终端	2014 年		2015 年		2016 年	
		城镇	农村	城镇	农村	城镇	农村
早逝	死亡率	8.8 (8.1, 9.7)	2.2 (2.0, 2.4)	13.1 (12.1, 14.4)	3.1 (2.9, 3.5)	12.9 (11.9, 14.2)	2.9 (2.7, 3.2)
	住院						
	呼吸系统疾病	0.5 (0.4, 0.6)	0.3 (0.2, 0.4)	0.7 (0.5, 0.9)	0.4 (0.3, 0.5)	0.6 (0.4, 0.7)	0.3 (0.2, 0.4)
	心血管疾病	0.6 (0.3, 0.9)	0.3 (0.2, 0.4)	0.8 (0.5, 1.2)	0.3 (0.2, 0.5)	0.7 (0.4, 0.944)	0.2 (0.1, 0.4)
门诊	儿科	0.1 (0.0, 0.1)	0.0 (0.0, 0.1)	0.1 (0.0, 0.2)	0.1 (0.0, 0.1)	0.1 (0.044, 0.2)	0.0 (0.0, 0.1)
	内科	0.2 (0.1, 0.3)	0.1 (0.0, 0.1)	0.3 (0.2, 0.5)	0.1 (0.1, 0.2)	0.2 (0.1, 0.3)	0.1 (0.0, 0.1)
患病	急性支气管炎	1.5 (0.6, 2.1)	0.7 (0.3, 1)	2.0 (0.8, 2.8)	0.9 (0.4, 1.2)	1.7 (0.7, 2.5)	0.7 (0.3, 1.0)
	慢性支气管炎 (0 ~ 14 岁)	40.0 (33.7, 45.9)	24.2 (20.4, 27.8)	54.9 (46.1, 62.7)	31.2 (26.5, 35.6)	47.1 (39.8, 54.1)	25.1 (21.2, 28.9)
	慢性支气管炎 (≥15 岁)	53.6 (46.2, 60.7)	32.5 (28.0, 36.8)	72.7 (63.1, 81.6)	41.3 (35.8, 46.4)	63.3 (54.5, 71.6)	33.8 (29.1, 38.2)
	哮喘 (0 ~ 14 岁)	7.2 (4.7, 9.6)	3.4 (2.2, 4.4)	9.3 (6.1, 12.0)	4.0 (2.7, 5.2)	7.6 (5.0, 10.1)	3.1 (2.0, 4.1)
	哮喘 (≥15 岁)	4.4 (2.3, 6.2)	1.3 (0.7, 1.8)	5.6 (3.0, 7.8)	1.5 (0.8, 2.1)	4.6 (2.4, 6.5)	1.2 (0.6, 1.7)

如表 6 所示, 2014 ~ 2016 年间, PM_{2.5} 达到二级浓度限值后所带来的健康经济效益 (以亿元计, 括号内为 95% 置信区间) 分别为 178.8 (143.7, 211.6)、216.5 (174.6, 255.3) 和 172.5 (137.8, 205.5), 分别占郑州市当年生产总值的 2.6%、3.0% 和 2.1%, 稍高于吕铃钥等^[4] 和魏国茹等^[8] 的研究. 相比于李慧娟等^[9] 的研究, 由于各健康终端医疗费用和受益人数的不同, 尤其是增添了哮喘这一健康终端, 本文中 PM_{2.5} 达标后的健康经济效

益约是文献^[9] 的 1.5 ~ 1.9 倍. 本研究中慢性支气管炎对总经济效益的贡献最高, 分别占了 84.2%、84.3% 和 84.1%. 门诊和住院人数减少带来的经济效益仍然最低, 仅占全部效益的 0.8% ~ 1.0%. 在城镇地区, PM_{2.5} 浓度达标后带来的经济效益占全部效益的 67.1%、68.3% 和 69.7%, 与 PM₁₀ 浓度达标后经济效益占比持平. 不同年龄阶段, 经济效益贡献有的分布规律与 PM₁₀ 浓度达标后相同.

随着城镇化进程的推进, 暴露于 PM₁₀ 和

PM_{2.5}污染下的城镇居民数增加,而如住院等的健康终端次均医疗费用逐年上升,因此有必要控制 PM₁₀和 PM_{2.5}浓度,减少因其污染而造成的健康经济损失. 在 2014 ~ 2016 年间, PM_{2.5}浓度占

PM₁₀的 54.4% ~ 60.4%,而健康效应占 83.6% ~ 99.2%,经济效益占 83.6% ~ 98.3%,因此当优先控制 PM_{2.5},降低其浓度的同时达到更大的经济效益.

表 6 PM_{2.5}达到二级空气质量标准所带来的健康效益/亿元

Table 6 Health benefits of achieving the PM_{2.5} air quality standard/hundred million RMB

项目	健康终端	2014 年		2015 年		2016 年	
		城镇	农村	城镇	农村	城镇	农村
早逝	死亡率	6.6 (3.1, 10.1)	1.6 (0.8, 2.5)	8.7 (4.1, 13.4)	2.1 (1.0, 3.2)	8.0 (3.8, 12.3)	1.8 (0.9, 2.8)
住院	呼吸系统疾病	0.3 (0, 0.6)	0.2 (0, 0.4)	0.4 (0, 0.8)	0.2 (0, 0.4)	0.3 (0, 0.6)	0.2 (0, 0.3)
	心血管疾病	0.4 (0.3, 0.6)	0.2 (0.1, 0.3)	0.5 (0.3, 0.7)	0.2 (0.1, 0.3)	0.4 (0.2, 0.6)	0.2 (0.1, 0.2)
门诊	儿科	0.1 (0.0, 0.1)	0.0 (0.0, 0.1)	0.1 (0.0, 0.2)	0.1 (0.0, 0.1)	0.1 (0.0, 0.1)	0.0 (0.0, 0.0)
	内科	0.2 (0.1, 0.3)	0.1 (0.0, 0.1)	0.3 (0.2, 0.4)	0.1 (0.1, 0.2)	0.2 (0.1, 0.2)	0.1 (0.0, 0.1)
患病	急性支气管炎	1.5 (0.6, 2.1)	0.7 (0.3, 1.0)	1.8 (0.7, 2.6)	0.8 (0.3, 1.1)	1.5 (0.6, 2.2)	0.6 (0.2, 0.9)
	慢性支气管炎 (0 ~ 14 岁)	40.0 (33.8, 46.0)	24.3 (20.4, 27.9)	49.9 (42.2, 57.1)	28.3 (24.0, 32.4)	40.2 (33.8, 46.3)	21.4 (18.0, 24.7)
	慢性支气管炎 (≥15 岁)	53.7 (46.2, 60.8)	32.6 (28.0, 36.8)	66.5 (57.4, 74.8)	37.8 (32.6, 2.5)	54.4 (46.6, 61.8)	29.0 (24.9, 33.0)
	哮喘 (0 ~ 14 岁)	7.3 (4.8, 9.6)	3.4 (2.2, 4.5)	8.5 (5.6, 11.1)	3.7 (2.4, 4.8)	6.5 (4.2, 8.8)	2.7 (1.7, 3.6)
	哮喘 (≥15 岁)	4.4 (2.3, 6.2)	1.3 (0.7, 1.8)	5.2 (2.7, 7.2)	1.4 (0.7, 1.9)	4.0 (2.0, 5.6)	1.0 (0.5, 1.4)

3 结论

(1)在 2014 ~ 2016 年间,郑州市 PM₁₀和 PM_{2.5}污染较为严重. 控制 PM₁₀和 PM_{2.5}污染后,受益人数分别为 35.7 ~ 45.9 万和 35.4 ~ 41.3 万. 城镇受益人数占总受益人数的 68.3% ~ 71.2%和 68.5% ~ 71.3%. 其中急性支气管炎患病人数下降最多,其次为哮喘患病和内科门诊. 不同年龄阶段,对于慢性支气管炎,成人受益比儿童更大,哮喘则相反.

(2)控制 PM₁₀和 PM_{2.5}污染后,所带来的健康经济效益分别为 181.8 (150.4, 211.2) ~ 242.5 (202.5, 279.4) 亿元和 172.5 (137.8, 205.5) ~ 216.5 (174.6, 255.3) 亿元,分别占当年生产总值的 2.5% ~ 3.3%和 2.1% ~ 3.0%,其中慢性支气管炎和早逝人数减少而带来的经济效益贡献最大,门诊和住院人数减少而带来的经济效益贡献最小,城镇的健康经济效益远高于农村.

(3)本文借鉴国内对 PM₁₀和 PM_{2.5}暴露-反应关系系数的研究结果,同时考虑到城镇与农村暴露人数、健康终端基准发生率和医疗费用等的不同,将城镇与农村的健康效应和健康经济效益分别进行计

算. 但部分数据的缺失,使得研究结果具有一定的不确定性,对于数据缺失的部分,以国家平均值或最近年份的数据代替,这一定程度上降低了不确定性. 同时,根据 PM₁₀和 PM_{2.5}的暴露-反应关系系数的不确定性范围,分别计算了健康效应和健康经济效益相应的 95% 置信区间,以期能更准确地反映控制 PM₁₀和 PM_{2.5}污染后所带来健康效益.

参考文献:

[1] 中华人民共和国生态环境部. 中国生态环境状况公报[EB/OL]. <http://www.mee.gov.cn/hjzl/zghjzkgh/lnzghjzkgh/>, 2018-05-31.

[2] 刘爱明,杨柳,吴亚玲,等. 城市区域大气颗粒物的健康效应研究[J]. 中国环境监测, 2012, 28(5): 19-23.

Liu A M, Yang L, Wu Y L, *et al.* Research on the health effects of atmospheric particulates in city region [J]. Environmental Monitoring in China, 2012, 28(5): 19-23.

[3] 白志鹏,蔡斌彬,董海燕,等. 灰霾的健康效应[J]. 环境污染与防治, 2006, 28(3): 198-201.

Bai Z P, Cai B B, Dong H Y, *et al.* Adverse health effects caused by dust haze-a review [J]. Environmental Pollution and Control, 2006, 28(3): 198-201.

[4] 吕铃钥,李洪远. 京津冀地区 PM₁₀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 PM₁₀ and PM_{2.5} pollution in Beijing-Tianjin-Hebei region of China [J]. Acta Scientiarum Naturalium University Nankaiensis, 2016, 49(1):

- 69-77.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 李惠娟, 周德群, 魏永杰. 我国城市 PM_{2.5} 污染的健康风险及经济损失评价[J]. 环境科学, 2018, **39**(8): 3467-3475.
- Li H J, Zhou D Q, Wei Y J. An assessment of PM_{2.5}-related health risks and associated economic losses in Chinese cities[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(8): 3467-3475.
- [10] 河南省环保厅. 2017 年河南省环境状况公报[EB/OL]. http://www.hnep.gov.cn/hjzl/hjzlbs/H600406index_1.htm, 2018-07-04.
- [11] 谢旭轩. 健康的价值: 环境效益评估方法与城市空气污染控制策略[D]. 北京: 北京大学, 2011.
- [12] Huang D S, Xu J H, Zhang S Q. Valuing the health risks of particulate air pollution in the Pearl River Delta, China[J]. *Environmental Science & Policy*, 2012, **15**(1): 38-47.
- [13] 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.
- [14] Viscusi W K, Magat W A, Huber J. Pricing environmental health risks: survey assessments of risk-risk and risk-dollar trade-offs for chronic bronchitis[J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 1991, **21**(1): 32-51.
- [15] 陈晓兰. 大气颗粒物造成的健康损害价值评估[D]. 厦门: 厦门大学, 2008.
- Chen X L. Evaluating the health damage costs of atmospheric particulates[D]. Xiamen: Xiamen University, 2008.
- [16] 郑州市统计局. 郑州统计年鉴 2015[M]. 北京: 中国统计出版社, 2015.
- [17] 郑州市统计局. 郑州统计年鉴 2016[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016.
- [18] 郑州市统计局. 郑州统计年鉴 2017[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
- [19] 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 Y, 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.
- [20] 国家卫生计生委统计信息中心. 2013 第五次国家卫生服务调查分析报告[M]. 北京: 中国协和医科大学出版社, 2015.
- [21] 国家卫生和计划生育委员会. 2015 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, 2015.
- [22] 国家卫生和计划生育委员会. 2016 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, 2016.
- [23] 国家卫生和计划生育委员会. 2017 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, 2017.
- [24] 刘传合, 洪建国, 尚云晓, 等. 中国 16 城市儿童哮喘患病率 20 年对比研究[J]. 中国实用儿科杂志, 2015, **30**(8): 596-600.
- Liu C H, Hong J G, Shang Y X, et al. Comparison of asthma prevalence in children from 16 cities of China in 20 years[J]. *Chinese Journal of Practical Pediatrics*, 2015, **30**(8): 596-600.
- [25] 马倩倩, 杨士保. 中国城乡成年人群哮喘患病状况及其影响因素[J]. 中南大学学报(医学版), 2017, **42**(9): 1086-1093.
- Ma Q Q, Yang T B. Prevalence and influential factors for asthma among adults in Chinese[J]. *Journal of Central South University (Medical Science)*, 2017, **42**(9): 1086-1093.
- [26] 谢华, 朱天怡, 刘美岑, 等. ACOS 与同期哮喘和 COPD 患者住院情况调查分析[J]. 现代生物医学进展, 2015, **15**(32): 6279-6282.
- Xie H, Zhu T Y, Liu M C, et al. Investigation and analysis of hospitalized patients of ACOS with asthma and COPD at the same time[J]. *Progress in Modern Biomedicine*, 2015, **15**(32): 6279-6282.
- [27] 国家心血管病中心. 中国心血管病报告 2014[M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 2015.
- [28] 国家心血管病中心. 中国心血管病报告 2015[M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 2016.
- [29] 国家心血管病中心. 中国心血管病报告 2016[M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 2017.
- [30] 卫生部统计信息中心. 2008 年第四次国家卫生服务调查分析报告[M]. 北京: 中国协和医科大学出版社, 2009.

CONTENTS

Concurrent Measurement of Wet and Bulk Deposition of Trace Metals in Urban Beijing	ZHANG Guo-zhong, PAN Yue-peng, TIAN Shi-li, <i>et al.</i> (2493)
Concentration and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} Collected in Urban and Suburban Areas of Beijing	XU Jing, LI Xing-ru, ZHANG Lan, <i>et al.</i> (2501)
Secondary Aerosol Formation in Urban Shanghai: Insights into the Roles of Photochemical Oxidation and Aqueous-Phase Reaction	GAO Jie, QIAO Li-ping, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (2510)
Secondary Inorganic Pollution Characteristics During Heavy Pollution Episodes of 2017 in Tianjin	XU Hong, XIAO Zhi-mei, CHEN Kui, <i>et al.</i> (2519)
Characterization of PM ₁₀ and PM _{2.5} Source Profiles for Emissions from Nonmetal Mineral Products Manufacturing Processes	ZHAO Xue-yan, YU Gao-feng, WANG Xin-wu, <i>et al.</i> (2526)
Characteristics of Component Particle Size Distributions of Particulate Matter Emitted from a Waste Incineration Plant	YU Zhuo-jun, WU Jian-hui, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (2533)
Characteristics and Source Apportionment of Carbon Components in Road Dust PM _{2.5} and PM ₁₀ During Spring in Tianjin Derived by Using the Quadrat Sampling Method	MA Yan, JI Ya-qin, GUO Ji-liang, <i>et al.</i> (2540)
Urban Aerosol Hygroscopicity During Haze Weather	YANG Su-ying, TIAN Zhi-jie, ZHANG Tie-ning, <i>et al.</i> (2546)
Atmospheric Pollution Characteristics and Inhalation Exposure Risk of Nitrated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} at the Ningdong Energy and Chemical Industry Base, Northwest China	LIU Pan-liang, JU Yuan-li, MAO Xiao-xuan, <i>et al.</i> (2556)
Health Benefit Evaluation for PM ₁₀ and PM _{2.5} Pollution Control in Zhengzhou, China, 2014-2016	HAN Shi-jie, WANG Jia, YAN Qi-she, <i>et al.</i> (2565)
Spatial-temporal Distribution of Aerosol Optical Depth and Its Main Influence Types in China During 1990-2017	LIU Ying, LIN Ai-wen, QIN Wen-min, <i>et al.</i> (2572)
Research on the Pollution Characteristics and Causality of Haze-sand Air Pollution in Beijing in Spring	WANG Yao-ting, LI Qing-chun, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i> (2582)
Vessel Emission Inventories and Emission Characteristics for Inland Rivers in Jiangsu Province	XU Wen-wen, YIN Cheng-qi, XU Xue-ji, <i>et al.</i> (2595)
Atmospheric Nitrogen Dioxide, Nitric Acid, Nitrate Nitrogen Concentrations, and Wet and Dry Deposition Rates in a Double Rice Region in Subtropical China	OUYANG Xiu-qin, WANG Bo, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2607)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Moisture Sources in the Headwaters of the Yangtze River	WANG Shao-yong, WANG Qiao-li, WU Jin-kui, <i>et al.</i> (2615)
Historical Trends of Atmospheric Trace Metal Pollution in Northern Guizhou Province as Reconstructed from Alpine Lake Sediments	LIANG Meng-yao, LIU En-feng, ZHANG En-lou, <i>et al.</i> (2624)
Distribution Characteristics of Microplastics in Qingdao Coastal Beaches	LUO Ya-dan, LIN Qian-hui, JIA Fang-li, <i>et al.</i> (2631)
Pollution Characteristics of Microplastics in Migratory Bird Habitats Located Within Poyang Lake Wetlands	LIU Shu-li, JIAN Min-fei, ZHOU Long-yin, <i>et al.</i> (2639)
Use of the Nitrogen/Carbon Ratio (N/C) and Two End-Member Sources Mixing Model to Identify the Origins of Dissolved Organic Matter from Soils in the Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir	JIANG Tao, JOERI Kaal, LIANG Jian, <i>et al.</i> (2647)
Effects of Photosynthesis of Submerged Aquatic Plants on CDOM in a Karst Water System: A Case Study from Xueyu Cave, Chongqing, China	FAN Jia-xin, JIANG Yong-jun, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (2657)
Indicators of Groundwater Evolution Processes Based on Hydrochemistry and Environmental Isotopes: A Case Study of the Dongyuan Drinking Water Source Area in Ji'nan City	ZHANG Ya, SU Chun-li, MA Yan-hua, <i>et al.</i> (2667)
Water Quality Analysis and Health Risk Assessment for Groundwater at Xiangshui, Chongzuo	ZHOU Jin-mei, JIANG Zhong-cheng, XU Guang-li, <i>et al.</i> (2675)
Chemical Characteristics of Groundwater and Material Sources Analysis in Buckwheat Field, Yunnan Province	ZHANG Yong, GUO Chun-qing, ZHU Yan-guang, <i>et al.</i> (2686)
C and N Transport Flux and Associated Changes of Water Quality Parameters from a Multiscale Subtropical Watershed in the Poyang Lake Area	LU Yao, GAO Yang, JIA Jun-jie, <i>et al.</i> (2696)
Pollutant Transport Analysis and Source Apportionment of the Entire Non-point Source Pollution Process in Combined Sewer Systems	FANG Jin-xiu, XIE Wen-xia, ZHU Yu-xi, <i>et al.</i> (2705)
Nitrogen Removal Efficiencies from Road Runoff by Dry Grass Swales with a Shallow Substrate Layer	DUAN Jin-kai, LI Tian, ZHANG Jia-wei (2715)
Migration Characteristics of Manganese During Rainfall Events and Its Impacts on Water Quality in a Drinking Water Source Reservoir	DENG Li-fan, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2722)
Potential for Phosphorus Uptake by Bed Sediments and Its Response to Carbon Additions in the Shiwuli River, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, BAO Qin, ZHANG Rui-gang, <i>et al.</i> (2730)
Sources and Distribution of Phosphorus in Sediments of the Jinpen Reservoir	MAO Xue-jing, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2738)
Water Quality Characteristics and Distribution of Bacterial Communities During Thermal Stratification in the Miyun Reservoir	WANG Yu-bing, WANG Xiao-yan, PANG Shu-jiang, <i>et al.</i> (2745)
Relationship Between the Vertical Distribution of Nutrients and Bacterial Community Structures in Sediment Interstitial Waters of Stratified Reservoirs with Different Water Temperatures	WANG Shen, ZHANG Si-si, XU You, <i>et al.</i> (2753)
Accumulation Characteristics and Release Regularity of Nutrients in Sediments of a Surface-flow Constructed Wetland After Long-term Operation	ZHU Yi-meng, JIANG Cui-ling, ZHU Li-qin, <i>et al.</i> (2764)
Application of Goethite Modified Biochar for Arsenic Removal from Aqueous Solution	ZHU Si-hang, ZHAO Jing-jing, YIN Ying-jie, <i>et al.</i> (2773)
Effects and Mechanisms of Methyl Orange Removal from Aqueous Solutions by Modified Rice Shell Biochar	SHI Yue-yue, SHAN Riu, YUAN Hao-ran (2783)
Performance and Membrane Fouling Properties in an Anaerobic Membrane Bioreactor for Salty Wastewater	YAN Huan-xi, XU Zhen-yu, JIN Chun-ji, <i>et al.</i> (2793)
Pollution Characteristics and Enhanced Removal of Organic Phosphorus in Effluent from a Wastewater Treatment Plant	WANG Xiao-dong, WANG Zi-wen, CHEN Ming-fei, <i>et al.</i> (2800)
Effects of Alkalinity on Partial Nitrification in a Zeolite Sequencing Batch Reactor	WANG Rui-xin, CHEN Jing, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (2807)
Effects of the Physical Structure of Activated Sludge on Respiration Processes	GUO Yao, LI Zhi-hua, YANG Cheng-jian, <i>et al.</i> (2813)
Performance of an Aerobic Granular Reactor Treating Biogas Slurry from Pig Farm	LIAO Jie, YE Jia-qi, ZENG Zhi-chao, <i>et al.</i> (2821)
Spatial-temporal Characteristics and Driving Factors of Greenhouse Gas Emissions from Rivers in a Rapidly Urbanizing Area	LIU Ting-ting, WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, <i>et al.</i> (2827)
Influences of Biochar on Pollutant Removal Efficiencies and Nitrous Oxide Emissions in a Subsurface Flow Constructed Wetland	DENG Chao-ren, LIANG Yin-kun, HUANG Lei, <i>et al.</i> (2840)
Effects of the Veterinary Antibiotic Sulfamethazine on N ₂ O Emissions and the Associated Microbiological Mechanism in a Rice Field	WU Jie, LI Zhi-lin, XU Jia-ying, <i>et al.</i> (2847)
Effects of Different Levels of Nitrogen Fertilization on Soil Respiration Rates and Soil Biochemical Properties in an Alfalfa Grassland	HU Wei, ZHANG Ya-hong, LI Peng, <i>et al.</i> (2858)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils from a Typical Urbanized Area	HE Bo, ZHAO Hui, WANG Tie-yu, <i>et al.</i> (2869)
Accumulation of Heavy Metals in Agricultural Soils and Crops from an Area with a High Geochemical Background of Cadmium, Southwestern China	LIU Yi-zhang, XIAO Tang-fu, XIONG Yan, <i>et al.</i> (2877)
Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Chinese Wolfberry Land Based on GIS and the Receptor Model	BAI Yi-ru, ZHANG Xing, ZHAO Yun-peng, <i>et al.</i> (2885)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of As at a Small Scale in Agricultural Soils of the Karst Region	WANG Hua, LIU Xiu-ming, LIU Fang, <i>et al.</i> (2895)
Soil Aggregate Stability and Its Stoichiometric Characteristics in <i>Robinia pseudoacacia</i> Forest within Different Vegetation Zones on the Loess Plateau, China	QU Qing, XU Hong-wei, WU Xuan, <i>et al.</i> (2904)
Straw Returning Plus Nitrogen Fertilizer Affects the Soil Microbial Community and Organic Carbon Mineralization in Karst Farmland	XU Xue-chi, SU Yi-rong, WANG Gui-hong, <i>et al.</i> (2912)
Effects of Biochar Application and Ageing on the Adsorption of Antibiotics in Purple Soil	YIN Wen-min, GUAN Zhuo, LIU Chen, <i>et al.</i> (2920)
Ammonia Oxidation in a Neutral Purple Soil Measured by the ¹³ C-DNA-SIP Method	LIU Tian-lin, WANG Zhi-hui, YAN Xiao-juan, <i>et al.</i> (2930)
Effects of Silver Nanoparticles and Silver Ions on Soil Nitrification Microorganisms and Ammonoxidation	WU Ling-li, ZHANG Xu, SHU Kun-hui, <i>et al.</i> (2939)
Insight into the Process of Mn-ANAMMOX in Soils of Agricultural Drainage Ditches	CHEN Shi, LI Zheng-kui, QIN Yun-bin, <i>et al.</i> (2948)
Effects of Different Concentrations of Tetracycline in Sludge on Ammonia Oxidizers During Vermicomposting	WU Ying, HUANG Kui, XIA Hui, <i>et al.</i> (2954)