ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第8期

Vol.39 No.8

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

中国期刊方阵 双奖期刊 中华人民共和国新闻出版总署

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第 39 卷 第 8 期
2018 年 8 月 15 日

目 次

我国城市 $PM_{2.5}$ 污染的健康风险及经济损失评价 …… 李惠娟,周德群,魏永杰(3467)
冬季电力行业对长江中游城市群空气质量影响 …… 孙晓伟, 郭秀锐, 程水源(3476)
基于区域传输矩阵和 $PM_{2.5}$ 达标约束的大气容量计算方法 …… 李敏辉, 廖程浩, 杨柳林, 曾武涛, 唐喜斌(3485)
利用 SPAMS 研究天津市夏季环境空气中细颗粒物化学组成特征 …… 温杰,史旭荣,田瑛泽,徐娇,史国良,冯银厂(3492)
重庆市北碚城区气溶胶中有机碳和元素碳的污染特征 …… 彭小乐, 郝庆菊, 温天雪, 吉东生, 刘子锐, 王跃思, 陈建博, 江长胜(3502)
杭甬地区大气中含碳气溶胶特征及来源分析 …… 徐宏辉, 徐婧莎, 何俊, 浦静姣, 齐冰, 杜荣光(3511)
城市生活垃圾露天焚烧 $PM_{2.5}$ 及其组分排放特征 …… 王艳, 郝炜伟, 程轲, 支国瑞, 易鹏, 樊静, 张洋(3518)
民用燃煤排放分级颗粒物中碳组分排放因子 …… 杨国威, 孔少飞, 郑淑睿, 吴剑, 郑明明, 郑煌, 严沁, 刘海彪, 王伟, 吴方琪, 程溢(3524)
大连地区夏季非甲烷烃(NMHC)特征及其来源解析 …… 纪德钰(3535)
“十三五”挥发性有机物总量控制情景分析 …… 张嘉妮, 陈小方, 梁小明, 柯云婷, 范丽雅, 叶代启(3544)
浙江省包装印刷行业挥发性有机物排放特征及排放系数 …… 王家德, 吕建璋, 李文娟, 顾震宇, 缪孝平(3552)
有机溶剂使用企业挥发性恶臭有机物排放特征及特征物质识别 …… 翟增秀, 孟洁, 王亘, 翟友存, 曹阳, 邹克华(3557)
基于 MODIS_C006 的乌鲁木齐 10 年气溶胶光学厚度变化特征 …… 胡俊, 亢燕铭, 陈勇航, 刘鑫, 李霞, 刘琼(3563)
基于路网车流量的北京城市副中心机动车污染控制情景 …… 樊守彬, 郭津津, 李雪峰(3571)
北京典型跑步区域空气污染特征及跑步者呼吸暴露 …… 陶双成, 高硕晗, 熊新竹, 姚嘉林, 邓顺熙(3580)
丹江口水库调水前后表层沉积物营养盐和重金属时空变化 …… 李冰,王亚,郑钊,许信,辛英督,黄进,郭诗君,毕升阁,胡兰群,陈兆进,李玉英(3591)
太湖北部湖区春、冬季节天然有机质的荧光特征及环境意义 …… 吕伟伟, 姚昕, 张保华(3601)
太湖重点区域水环境中邻苯二甲酸酯的污染水平及生态风险评价 … 朱冰清, 高占啟, 胡冠九, 王骏飞, 于南洋, 韦斯(3614)
台风强降雨输入水源水库悬浮泥沙的氮磷吸附特性 …… 姚玲爱, 赵学敏, 马千里, 梁荣昌, 夏北成, 卓琼芳(3622)
珠江三角洲高砷地下水赋存环境特征及成因分析 …… 张昌延, 何江涛, 张小文, 倪泽华(3631)
有机污染物对杭州湾海域浮游细菌群落的影响 …… 宣丽霞, 戴文芳, 郁维娜, 周素明, 欧昌荣, 熊金波(3640)
澜沧江流域浮游细菌群落结构特征及驱动因子分析 …… 程豹, 望雪, 徐雅倩, 杨正健, 刘德富, 马骏(3649)
碧流河水库细菌群落结构特征及其关键驱动因子 …… 王欢, 赵文, 谢在刚, 魏杰, 姜洋(3660)
浑河底泥反硝化厌氧甲烷氧化菌群落多样性的时空分布特征及其与环境因子关系分析 …… 张亚迪, 宋永会, 彭剑峰, 张剑桥, 张盼月, 刘瑞霞, 石国强(3670)
人类活动对河流沉积物中反硝化厌氧甲烷氧化菌群落特征的影响 …… 刘洋, 陈永娟, 王晓燕, 许康利(3677)
外源氮输入对不同土地利用排水沟底泥反硝化和 N_2O 排放影响 …… 佘冬立, 陈心逸, 高雪梅, 张文娟, 夏永秋(3689)
雨水管道沉积物沉淀特性及主要污染物含量分布 …… 尚宇, 周毅, 廖安意, 方正(3696)
水体中Cr(Ⅵ)对不同混凝剂混凝过程的影响 …… 高倩, 张大为, 徐慧, 徐建坤, 张崇淼, 王东升(3704)
$Co_3O_4/BiVO_4$ 复合阳极活化过一硫酸盐强化光电催化降解双酚 A …… 李蒋, 王雁, 张秀芳, 赵旭(3713)
海藻酸钙/生物炭复合材料的制备及其对Pb(Ⅱ)的吸附性能和机制 …… 于长江, 董心雨, 王苗, 林强(3719)
磁性生物炭对水中 CIP 和 OFL 的吸附行为和机制 …… 赵华轩, 郎印海(3729)
污水中新精神活性物质的分析方法优化及验证 …… 陈培培, 杜鹏, 周子雷, 徐泽琼, 高婷婷, 李喜青(3736)
臭氧-CNT 膜改性联用工艺对 PVDF 中空纤维膜污染进程的缓解 …… 关羽琪, 王凯伦, 祝学东, 董丹, 薛小雷, 马艳林, 栾桂荣, 郭瑾(3744)
阴离子交换树脂生物再生去除硝酸盐氮 …… 叶婷, 张光, 王珂, 双陈冬, 李爱民(3753)
普鲁士蓝@酵母菌催化剂的合成及其 Fenton 性能 …… 陈思, 白波, 王洪伦, 索有瑞(3759)
PN/A 双菌层系统的构建及其脱氮性能 …… 许静怡, 杜俊, 杨一烽, 吕锋, 夏四清(3767)
苯酚对 EBPR 系统除磷性能的抑制作用 …… 马娟, 王谨, 俞小军, 周猛, 李光银, 孙洪伟(3775)
反硝化-短程硝化-厌氧氨氧化工艺处理晚期垃圾渗滤液的脱氮除碳性能 …… 王凡, 陆明羽, 殷记强, 李祥, 黄勇(3782)
好/厌氧条件下反硝化细菌脱氮特性与功能基因 … 康鹏亮, 陈胜男, 黄廷林, 张海涵, 商潘路, 钊珍芳, 王跃, 谭欣林(3789)
苯并[a]芘厌氧降解的苯酚共基质协同作用与污泥微生物特性 …… 吴海珍, 胡肖怡, 王鸣, 韦景悦, 范一文, 韦朝海, 钟练文, 彭亚环(3797)
污泥超高温堆肥过程中 DOM 结构的光谱分析 …… 刘晓明, 余震, 周普雄, 罗海林, 王跃强, 廖汉鹏, 周顺桂(3807)
生物炭对华北农田土壤 N_2O 通量及相关功能基因丰度的影响 …… 刘杏认, 赵光昕, 张晴雯, 田秀平(3816)
设施菜田土壤 N_2O 产生对 O_2 的响应 …… 陈吉吉, 宋贺, 曹文超, 王乙然, 王敬国(3826)
利用 μ-XRF 和 XANES 研究铅锌矿区土壤铅形态及其生物有效性 …… 孙晓艳, 柳检, 罗立强(3835)
南京市铅锌矿采矿场土壤重金属污染评价及优势植物重金属富集特征 …… 李俊凯, 张丹, 周培, 刘群录(3845)
Fe-Al 改性硅藻土的制备及其对土壤 Cd 污染固定化效果 …… 杨雨中, 朱健, 肖媛媛, 谭蓉, 王平, 陈润华, 徐海音, 杨雄(3854)
基于稳定碳同位素技术的干旱区绿洲土壤有机碳向无机碳的转移 …… 李杨梅, 贡璐, 安申群, 孙力, 陈新(3867)
生境过滤驱动庞泉沟华北落叶松林土壤真菌群落的构建过程 …… 赵鹏宇, 李毳, 柴宝峰(3876)
转 *cry1Ab* 和 *epsps* 基因玉米 C0030.3.5 对土壤固氮细菌丰度和群落结构的影响 …… 王蕊, 朱珂, 李刚, 刘惠芬, 王晶, 修伟明, 赵建宁, 杨殿林(3885)
脱硫石膏对稻田 CH_4 释放及其功能微生物种群的影响 …… 胡翔宇, 向秋洁, 木志坚(3894)
长期施肥对不同深度稻田土壤碳氮水解酶活性的影响特征 …… 杜林森, 唐美铃, 祝贞科, 魏亮, 魏晓梦, 周萍, 葛体达, 王久荣, 邹冬生, 吴金水(3901)
黄河口滨岸潮滩湿地泥沙沉积及外源镉 Cd 输入对碱蓬物质量分配及抗氧化酶活性的影响 …… 宋红丽, 王立志, 郁万妮, 吴希媛(3910)
黄河下游开封段引黄灌区小麦中重金属污染特征及健康风险评价 …… 康国华, 张鹏岩, 李颜颜, 杨丹, 庞博, 何坚坚, 闫宇航(3917)
氧化石墨烯对邻苯二甲酸二丁酯藻毒性的影响 …… 涂海峰, 刘成, 王宇擎, 储祺, 侯晓冬, 李锋民(3927)
有机物对厌氧氨氧化微生物燃料电池脱氮产电性能的影响 …… 祖波, 马兰, 刘波, 卢培利, 许君(3937)
中国氢燃料电池车燃料生命周期的化石能源消耗和 CO_2 排放 …… 林婷, 吴烨, 何晓旖, 张少君, 郝吉明(3946)
气溶胶水相反应生成二次有机气溶胶研究进展 …… 叶招莲, 瞿珍秀, 马帅帅, 盖鑫磊(3954)
《环境科学》征订启事(3543) 《环境科学》征稿简则(3570) 信息(3600, 3728, 3844)

我国城市 $PM_{2.5}$ 污染的健康风险及经济损失评价

李惠娟[1,2],周德群[1],魏永杰[3]
(1. 南京航空航天大学经济与管理学院, 南京 211106; 2. 徐州工程学院经济学院, 徐州 221111; 3. 中国环境科学研究院, 北京 100012)

摘要: 开展大样本城市的空气污染造成人群健康风险及经济损失研究,对于推进空气污染的防控与区域合作治理、公众健康素养提升具有重要意义. 本文以我国 62 个环保重点监测城市为样本, 运用环境健康风险与环境价值评估方法, 对 2015 年 $PM_{2.5}$ 污染引发的健康风险及经济损失进行评价,结果表明 $PM_{2.5}$ 污染造成约 12.51 万人早逝[95% CI (置信区间):3.33 ~ 20.59 万人]及1 009.59万人次患病、门诊和住院(95% CI: 470.38 ~ 1 501.93万人次),占这些城市市区总人口的 3.53% (95% CI: 1.64% ~ 5.26%). 造成经济损失5 705.57亿元(95% CI: 1 930.82 ~ 8 742.14亿元),占这些城市 GDP 总和的 1.53% (95% CI: 0.52% ~2.35%),人均经济损失1 970元(95% CI: 667 ~ 3 018元). 四大城市群中,京津冀在健康风险、健康经济损失及其占 GDP 比重、人均损失方面均高于长三角、珠三角及东北. 三大经济区中,东部的健康风险及经济损失高于中部与西部,三地的人均经济损失差别不大. 南北方的经济损失相差很小,但北方的经济损失占 GDP 比重与人均损失均远高于南方. 保定、郑州、济南、北京等市 $PM_{2.5}$ 浓度很高,健康风险与经济损失问题突出.

关键词: $PM_{2.5}$; 健康风险; 经济损失; 评价; 环保重点监测城市
中图分类号: X503.1; X196 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2018)08-3467-09 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201711237

An Assessment of $PM_{2.5}$-Related Health Risks and Associated Economic Losses in Chinese Cities

LI Hui-juan[1,2], ZHOU De-qun[1], WEI Yong-jie[3]
(1. College of Economics and Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China; 2. Economic School, Xuzhou University of Technology, Xuzhou 221111, China; 3. China Research Academy of Environmental Science, Beijing 100012, China)

Abstract: It is important to carry out research on health risks and associated economic losses caused by air pollution using a large sample city in order to control air pollution and improve public health literacy. Using environmental health risk and environmental value assessment methods, the health risks of $PM_{2.5}$ pollution in 2015, as well as the corresponding economic losses, were estimated in this study using the environmental monitoring data of 62 key cities as samples. The results show that significant impacts due to $PM_{2.5}$ pollution occurred in 2015, including about 125.1 [95% confidence interval (CI): 33.29-205.90] thousand premature deaths and 10.10 (95% CI: 4.70-15.02) million cases of illness, hospital admissions, and outpatients, which accounted for 3.53% (95% CI: 1.64%-5.26%) of the total urban population. The total economic loss associated with the health risks was approximately 570.6 (95% CI: 193.08-874.21) billion yuan, which accounts for 1.53% (95% CI: 0.52%-2.35%) of the total GDP in 2015. The per capita loss was 1970 (95% CI: 667-3 018) yuan for these cities. Among the four major urban agglomerations of Beijing-Tianjin-Hebei, the Yangtze River Delta, the Pearl River Delta, and Northeast China, Beijing-Tianjin-Hebei has the highest health risks, associated economic losses, the proportion of associated economic losses to GDP, and associated economic loss per capita because of its high concentration of $PM_{2.5}$ and dense population than other three urban agglomerations. Among the three economic areas of Eastern, Central, and Western China, the health risks and associated economic losses were highest in the former. However, economic loss per capita did not differ greatly in the three economic areas. The difference in economic losses was very small between South and North China. However, the proportion of economic loss to GDP and per capita loss were much higher in the North than in the South. As to specific cities, the problems of health risks and economic losses were outstanding in Baoding, Zhengzhou, Jinan, and Beijing, which have higher $PM_{2.5}$ concentrations.

Key words: $PM_{2.5}$; health risks; economic losses; assessment; key cities of environmental monitoring

随着工业化、城镇化的快速推进,我国经济获得快速发展,但是环境质量尤其是空气质量下降明

收稿日期: 2017-11-26; **修订日期**: 2018-02-26
基金项目: 国家社会科学基金重大项目(15ZDA053); 国家社会科学基金一般项目(17BGL141); 国家自然科学基金青年科学基金项目(71603257); 中国博士后科学基金项目(2016M601809); 江苏省"六大人才高峰"高层次人才项目(JY-082); 江苏省教育厅高校哲社项目(2016SJD790028)
作者简介: 李惠娟(1974 ~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为资源与环境经济、生态价值评估, E-mail:chinajslhj@163.com

显，霾天气常态化，对居民健康和社会经济发展造成较大危害. 环境流行病学及环境毒理学研究证实，短期或长期暴露于污染、尤其是重污染空气中，会造成人体的呼吸、心血管、神经和免疫系统等疾病，染色体、DNA 结构发生变化或损伤，而且空气污染与癌症、出生缺陷、早逝的发生也有显著正相关关系[1~6]. 在这些污染物中，细颗粒物（$PM_{2.5}$）对人体健康的不利影响最显著[7~11]. 然而我国很多城市大部分时段的首要污染物均为 $PM_{2.5}$.

近年来，颗粒物造成的大样本城市健康损失估算研究主要有美国、西班牙和中国等. 对美国 51 个大城市中 211 个地区 1970 ~ 1980 年和 1990 ~ 2000 年的期望寿命进行分析的结果显示，$PM_{2.5}$ 年均浓度每降低 10 $\mu g \cdot m^{-3}$，人群期望寿命增加约（0.61 ± 0.20）a[12]. 对美国 545 个县 2000 ~ 2007 年的研究发现，$PM_{2.5}$ 年均浓度每降低 10 $\mu g \cdot m^{-3}$，人群期望寿命增加约（0.35 ± 0.16）a，人口密度大的大城市增加更加显著[13]. 西班牙巴塞罗那大都市区 57 个城市 2005 年的 PM_{10} 浓度若能降低至 WHO 推荐标准（20 $\mu g \cdot m^{-3}$），每年将有约 64 亿欧元的收益[14]. 对中国 113 个城市的研究发现，2006 年 PM_{10} 引起的总归因健康经济损失达3 414.03亿元，其中早逝的损失占 87.79%[15].

2013 年我国出台《大气污染防治行动计划》（“国十条”），把空气污染治理提高到前所未有的重要程度. 2016 年底出台的《“健康中国 2030”规划纲要》要求把公众健康摆在优先发展的战略地位. 本文基于近年来国内外 $PM_{2.5}$ 流行病学综合研究成果，以 2015 年为基准年，以环境空气质量标准（GB 3095-2012）二级浓度限值 35 $\mu g \cdot m^{-3}$ 为基准浓度，以我国 62 个环保重点监测城市为样本，评估归因于 $PM_{2.5}$ 的居民健康风险与健康经济损失，并对不同城市、不同区域的评估结果进行比较，以期为国家制订空气污染防控、空气污染区域合作治理、公众健康素养提升等政策提供成本-效益分析依据或决策参考，以减少全社会的福利损失.

1 材料与方法

1.1 方法

本文运用环境健康风险与环境价值评估方法对我国城市居民暴露于 $PM_{2.5}$ 污染下的健康风险与健康经济损失进行定量评估[15, 16]. 具体如下.

由流行病学的研究结果可知，$PM_{2.5}$ 浓度与健康风险之间存在着暴露-反应关系. 根据泊松回归比例风险模型，归因于 $PM_{2.5}$ 的人群健康风险如式（1）所示：

$$RR = RR_0 \cdot \exp[\beta \cdot (c - c_0)] \quad (1)$$

式中，RR 为 $PM_{2.5}$ 污染实际浓度下的健康风险，RR_0 为 $PM_{2.5}$ 污染参考基准浓度下的健康风险，β 为暴露-反应关系系数，c 为 $PM_{2.5}$ 实际浓度（$\mu g \cdot m^{-3}$），c_0 为 $PM_{2.5}$ 参考基准浓度（$\mu g \cdot m^{-3}$）.

当暴露人群数量为 P，则归因于 $PM_{2.5}$ 的健康效应变化量 ΔE 如式（2）所示：

$$\Delta E = P \cdot (RR - RR_0) = P \cdot RR \cdot \left(1 - \frac{1}{\exp[\beta \cdot (c - c_0)]}\right) \quad (2)$$

$PM_{2.5}$ 引起所有不良健康终点的总经济损失如式（3）所示：

$$L = \sum_{i=1}^{m} L_i = \sum_{i=1}^{m} P \cdot \Delta RR_i \cdot L_{ip} \quad (3)$$

式中，L 为 $PM_{2.5}$ 污染导致所有健康终点的损失，L_i 为 $PM_{2.5}$ 污染导致健康终点 i 的损失，m 为健康终点个数，L_{ip} 为 $PM_{2.5}$ 污染导致健康终点 i 的单位损失.

1.2 数据来源与处理

1.2.1 $PM_{2.5}$ 污染浓度

我国很早就已经开始对 PM_{10}、SO_2、NO_2 等空气污染物进行监测，但近年来空气污染愈演愈烈，原有监测标准无法满足环境治理需要.《环境空气质量标准》（GB 3095-2012）于 2013 年开始实施后，将 $PM_{2.5}$、O_3 等纳入标准，并定期公布 8 种污染物（$PM_{2.5}$、PM_{10}、SO_2、NO_2、CO、O_3 等）浓度. 2013 年，有 74 个新标准第一阶段监测实施城市，包括京津冀、长三角、珠三角等重点区域及直辖市、省会城市和计划单列市. 环保部每月定期对第一阶段监测的 74 个重点城市的空气质量进行排名，以厘清这些城市的空气质量状况与变化趋势.

本文从环境保护部网站查询 2015 年各月《城市空气质量状况月报》，依据 74 个重点城市 $PM_{2.5}$ 的月均浓度值，计算其年均浓度值. 结果表明，74 个城市 $PM_{2.5}$ 年均浓度为 55.29 $\mu g \cdot m^{-3}$；海口的年均浓度最低，为 22.08 $\mu g \cdot m^{-3}$；保定的年均浓度最高，为 107.08 $\mu g \cdot m^{-3}$；邢台、衡水、郑州、邯郸、济南的年均浓度居前，达到或超过 90 $\mu g \cdot m^{-3}$.

当 $PM_{2.5}$ 参考浓度选择为环境空气质量（GB 3095-2012）的二级浓度限值 35 $\mu g \cdot m^{-3}$ 时，中山、江门、深圳、珠海、惠州、舟山、昆明、海口、厦门、福州、拉萨、张家口这 12 个城市的年均浓度低于此限值，其余 62 个城市均超标，因此只估算这 62 个

城市居民的健康风险与健康经济损失.

1.2.2 暴露人口

我国的空气质量监测点几乎都分布于市区，县级市及县区较少. 另外，考虑到 62 个城市的外来人口较多，常住人口通常大于户籍人口，常住人口在本市长期工作生活，暴露于本市污染空气中. 因此，以 62 个城市的市区常住人口作为暴露人口. 根据各城市统计年鉴，2015 年 62 个城市市区常住人口 2.9 亿人，占全国总人口的 21.1%. 北京、上海、重庆这 3 个城市的暴露人口均超过 2 000 万；广州、成都、武汉、天津这 4 个城市的暴露人口均超过 1 000 万；东莞、南京等 10 个城市的暴露人口为 500 ~ 1 000 万；青岛、济南等 16 个城市的暴露人口为 300 ~ 400 万；其余 40 个城市的暴露人口小于 300 万.

1.2.3 暴露-反应关系系数

暴露-反应关系系数的选取是健康风险评估的关键环节之一. 本文选取的健康风险终点为早逝、住院（呼吸系统疾病与心血管系统疾病）、门诊（内科与儿科）、患病（慢性支气管炎与急性支气管炎）. 参考文献[16, 17]，选取的暴露-反应关系系数如表 1 所示.

表 1　各健康终点的暴露-反应关系系数[1)]

Table 1　Dose-response relationship coefficients of different health outcomes

项目		暴露-反应系数 β（95% 置信区间）	文献	基准发生率/‰		
				东部	中部	西部
早逝	全因死亡	0.002 96（0.000 76，0.005 04）	[17]	各城市死亡率		
门诊	内科	0.000 49（0.000 27，0.000 70）	[17]	各城市内科就诊率		
	儿科	0.000 56（0.000 20，0.000 90）	[17]	各城市儿科就诊率		
住院	呼吸系统疾病	0.001 09（0.000 00，0.002 21）	[16]	8.8	8.9	16.9
	心血管系统疾病	0.000 68（0.000 43，0.000 93）	[16]	14.2	16.6	14.6
患病	急性支气管炎	0.007 90（0.002 70，0.013 00）	[16]	28.1	24.9	53.2
	慢性支气管炎	0.010 09（0.003 66，0.015 59）	[16]	4.6	4.0	10.3

1）β 值为 $PM_{2.5}$ 浓度每增加 1 $\mu g \cdot m^{-3}$ 导致的人群发病率和死亡率增加的百分数

1.2.4 基准发生率

早逝的基准发生率，来自于文献[18]中各城市死亡率.

住院和患病的基准发生率，由于缺乏各城市的相应资料，因此选用文献[19]中东部、中部、西部居民的相应疾病住院率与慢性病患病率，如表 1 所示.

对于各城市内科与儿科的门诊基准发生率，按以下步骤估算而得. 首先，假设 62 个城市的内科、儿科人次在总门诊人次中的比例与全国平均水平相同，内科、儿科病人均匀分布于每省各市的市区及县区. 其次，由文献[19]计算全国医疗卫生机构的内科、儿科人次占总门诊人次比重. 第三，对于可以公开查到各市门诊总人次的北京、上海、天津、重庆、广东、浙江、江苏等省市，按市区常住人口占全市总常住人口的比例估算出市区常住人口的门诊总人次，再按内科、儿科所占比例分摊相应就诊人次，最后得到内科、儿科就诊率. 第四，对于无法公开查到各市门诊总人次的其它城市，按市区常住人口占全省总常住人口的比例计算该市市区常住人口的门诊总人次，再按内科、儿科所占比例分摊相应就诊人次，最后得到每个城市内科、儿科的基准发生率.

1.2.5 健康终点的单位经济损失

早逝的单位经济损失，以北京市居民统计寿命价值（value of statistical life，VSL）168 万元人民币[20]为基础，运用各市人均可支配收入及 CPI 指数折算 2015 年 62 个城市居民的统计寿命价值.

门诊损失与住院损失，采用疾病成本法计算. 疾病成本法对某种疾病 i 单位成本的计算公式如式（4）所示：

$$C_i = C_{ip} + GDP_p \times T_{iL} \quad (4)$$

式中，C_i 为 $PM_{2.5}$ 污染导致健康终点 i 的单位经济损失，C_{ip} 为健康终点 i 的单位病例医疗费，GDP_p 为人均日误工成本[元·(人·d)$^{-1}$]，T_{iL} 为因治疗健康终点 i 导致的误工时间.

病人前往医院进行门诊的误工（儿科为陪护）时间统一按 1 d 计算，则门诊损失为门诊医药费与 1 d 误工费之和. 其中，内科、儿科的门诊医药费按如下方法推算：首先由各省市的门诊医药费、各省市的人均可支配收入，推算出各市的门诊医药费. 其次假设各市门诊内科、儿科的医药费占全部门诊医药费的比例与全国的比例相同. 第三，按照相应比例推算出各市内科、儿科的门诊医药费.

对于住院损失，首先根据文献[19]，得到全国呼吸系统、心血管系统疾病的人均医药费及平均住院日，其次根据全国各种疾病平均住院费与两种疾病住院费的比例、各省的平均住院费，折

算出各市两种疾病住院费；根据各省的平均住院日，得到各省呼吸系统、心血管系统疾病的平均住院日，以此作为省内城市两种疾病的住院日. 年人均 GDP 的日均值作为人均日误工成本. 人均 GDP 数据来自文献[18]，再折算为日均值. 误工时间为住院日.

慢性支气管炎病程缓慢，一般不易痊愈，患病时间难以确定，常造成病人极大痛苦，显著降低病人生活质量，因此不宜采用疾病成本法计算单位成本. 本文采用 Viscusi 等[21]与陈晓兰[22]研究结果的中间值，即慢性支气管炎的单位成本为统计寿命价值的 40%. 对于急性支气管炎的单位经济损失，假设它与门诊损失的比例在各城市相同，依据黄德生等[16]门诊与急性支气管炎单位损失比例，结合各市的门诊损失，估算各市急性支气管炎的单位损失.

基于上述方法，估算 62 个城市各类不同健康终点的单位经济损失. 部分城市的单位经济损失如表 2 所示.

表 2 部分城市各健康终点的单位经济损失

Table 2 Economic losses per case of different health outcomes in some cities

城市	VSL /万元·人$^{-1}$	住院		门诊		患病	
		呼吸疾病 /元·人$^{-1}$	心血管疾病 /元·人$^{-1}$	内科 /元·人$^{-1}$	儿科 /元·人$^{-1}$	急性支气管炎 /元·人$^{-1}$	慢性支气管炎 /万元·人$^{-1}$
北京	305.4	26 540	60 654	773	725	3 748	122.2
上海	306.0	21 218	47 835	620	587	3 007	122.4
苏州	291.2	22 259	49 164	776	736	3 765	116.5
广州	270.0	21 157	47 311	736	700	3 570	108.0
杭州	279.2	18 548	41 076	614	584	2 978	111.7
南京	266.4	20 046	44 607	691	655	3 353	106.5
济南	230.5	18 255	41 685	638	599	3 096	92.2
沈阳	211.7	16 376	36 444	627	589	3 042	84.7
天津	197.0	20 960	46 911	613	581	2 972	78.9
重庆	157.2	12 216	27 942	504	468	2 443	62.9

2 结果与分析

2.1 居民健康风险评价结果

表 3 汇总了部分城市的健康风险. 最大的是北京，第二是上海，其它位列前十的城市分别为天津、重庆、武汉、成都、郑州、济南、南京、石家庄. 一方面是因为部分城市的 $PM_{2.5}$ 浓度高，暴露人口数量大，分布密集；另一方面，也与这些城市的人口老龄化程度较深有密切关系. 部分城市的人口老龄化状况如表 4 所示，除石家庄和郑州的人口老龄化程度较轻以外，其余城市的人口老龄化都已达到较严重程度. 老龄人口对 $PM_{2.5}$ 污染的耐受力较差，死亡或生病几率较高[23, 24]. 因此，当 $PM_{2.5}$ 高浓度、暴露人口基数大、老龄化严重三者叠加时，健康风险极大.

从不同健康终点看，各城市因呼吸系统与心血管系统疾病住院的人数相差不大，内科与儿科门诊人次较多，门诊人次远远超过住院人次，急性支气管炎的发病人次超过慢性支气管炎.

把 62 个城市按不同方式划分至不同区域，分类汇总不同区域的各健康终点发生人次与总发生率、人口、$PM_{2.5}$ 浓度等情况，如表 5 所示. 可以看出，归因于 $PM_{2.5}$ 污染的健康终点总发生率为每万人 353 人次(95% CI：164 ~ 526 人次)，其中有 12.51 万例居民早逝(95% CI：3.33 ~ 20.59 万例)，约占 62 个城市居民总死亡人数的 6.65%.

按城市群划分，京津冀的健康终点总发生率最高，为 6.86% (95% CI：3.25% ~ 10.14%)，珠三角最低，均值仅为 0.67%. 京津冀健康终点发生总数高于长三角 47.34 万人次(95% CI：39.21 ~ 108.85 万人次)，主要因为京津冀门诊人次太多导致. 由于人口基数不同，京津冀与东北的早逝人数相差较大，但是早逝发生率却差异较小，均值分别为 6.65‰ 与 5.83‰.

按东中西部划分，健康终点发生总数从高到低依次为东部、中部、西部，这主要是因为东部暴露人口分别为中部、西部的 4.35 倍、3.25 倍. 从健康终点总发生率看，从高到低仍然依次为东部、中部、西部，东部均值是西部的 1.38 倍. 但是西部的呼吸疾病住院、急性支气管炎、慢性支气管炎的发生率远高于东部与中部. 而中部的早逝发生率最高，均值是西部的 1.42 倍.

按南北方划分，南方暴露人口为北方的 1.58 倍，北方健康终点总发生率为 4.96% (95% CI：2.32% ~ 7.35%)，南方为 2.62% (95% CI：1.20%

~3.93%),北方均值为南方的 1.89 倍；进一步分析发现,在南北方全因死亡率相差很小的情况下,北方的早逝、住院、门诊及患病率全部远高于南方,这与北方 $PM_{2.5}$ 浓度远高于南方有密切关系.

表 3　部分城市 $PM_{2.5}$ 污染的健康风险与排序(均值及 95% CI)

Table 3　Health risk and ranking of $PM_{2.5}$ pollution in some cities (mean and 95% CI)

城市	早逝/人	住院/人		门诊/人	
		呼吸疾病	心血管疾病	内科	儿科
北京	13 630(3 678,22 159)	9 307(9,18 398)	9 457(6 104,12 861)	1 132 666(627 267,1 610 362)	521 892(187 930,832 282)
上海	10 802(2 829,18 056)	4 129(5,8 289)	4 172(2 644,5 694)	506 196(279 477,721 774)	233 463(83 650,374 065)
天津	8 116(2 165,13 332)	4 844(5,9 630)	4 911(3 119,6 687)	435 879(241 111,620 387)	200 911(72 211,320 967)
重庆	10 811(2 842,18 004)	9 548(9,19126)	5 169(3 277,7 050)	278 343(153 738,39 6731)	128 359(46 021,205 534)
武汉	6 086(1 623,10 001)	3 534(3,7 027)	4 141(2 630,5 639)	243 455(134 665,346 522)	112 218(40 331,179 285)
成都	4 532(1 201,7 491)	5 541(4,11 053)	3 004(1 906,4 093)	185 803(102 710,264 624)	85 661(30 754,136 991)
郑州	3 822(1 048,6 126)	2 885(3,5 658)	3 399(2 166,4 614)	193 652(107 419,274 897)	89 182(32 199,141 866)
济南	4 851(1 322,7 817)	2 478(2,4 875)	2 523(1 606,3 427)	180 639(100 137,256 580)	83206(30 011,132 489)
南京	2 561(674,4 263)	1 723(1,3 452)	1 743(1 105,2 377)	165 234(91 268,235 503)	76 197(27 321,122 002)
石家庄	3 701(1 007,5 971)	2 158(2,4 247)	2 196(1 398,2 984)	136 720(75 781,194 219)	62 978(22 710,100 299)
沈阳	4 571(1 222,7 496)	1 852(2,3 677)	1 878(1 193,2 557)	88 241(48 821,125 569)	40 670(14 622,64 953)

城市	早逝/人	患病/人		按所有健康终点发生总人数排序	按早逝人数排序
		急性支气管炎	慢性支气管炎		
北京	13 630(3 678,22 159)	185 265(70 988,273 772)	36 966(15 418,50 976)	1	1
上海	10 802(2 829,18 056)	89 962(32 196,141 601)	18 452(7 084,27 185)	2	3
天津	8 116(2 165,13 332)	99 706(37 249,150 770)	20 097(8 129,28 383)	3	4
重庆	10 811(2 842,18 004)	202 584(73 172,316 102)	48 958(19 007,71 466)	4	2
武汉	6 086(1 623,10 001)	63 805(23 817,96 554)	12 624(5 102,17 844)	5	5
成都	4 532(1 201,7 491)	114 708(42 211,175 892)	27 512(10 926,39 428)	6	8
郑州	3 822(1 048,6 126)	48 025(19 060,68 798)	9 275(4 035,12 390)	7	9
济南	4 851(1 322,7 817)	47 942(18 770,69 502)	9 485(4 060,12 825)	8	6
南京	2 561(674,4 263)	37 044(13 394,57 746)	7 566(2 941,11 033)	9	16
石家庄	3 701(1 007,5 971)	41 884(16 356,60 857)	8 295(3 540,11 242)	10	10
沈阳	45 71(1 222,7 496)	37 889(14 218,57 059)	7 623(3 100,10 721)	16	7

2.2　居民健康经济损失评价结果

如表 6 所示,若按居民健康经济损失值排序,前十名的城市分别为北京、上海、重庆、天津、成都、武汉、济南、西安、沈阳、南京,与健康风险的前十大城市差别不大. 但是,若按健康经济损失占 GDP 比重排序,则变动很大,前十大占比城市分别为北京、济南、重庆、西安、成都、保定、乌鲁木齐、沈阳、上海、石家庄. 在人均经济损失方面,济南最大,前五的其余城市依次为北京、沈阳、成都、唐山. 河北省有 7 座城市的 $PM_{2.5}$ 浓度、1 座城市的健康风险、2 座城市的健康经济损失分别进入前十名. 从总体看,北京、济南、成都、沈阳等市情况较严重.

结合表 7, 62 个城市的健康经济总损失高达 5705.57 亿元(95% CI：1 930.82 ~8 742.14亿元),占这些城市 GDP 的 1.53% (95% CI：0.52% ~2.35%),占 2015 年全国 GDP 的 0.83% (95% CI：0.28% ~1.27%). 经济损失前五名城市的损失占所有城市损失的 45.33%,前十名城市的损失占所有城市损失的 61.23%. 损失占 GDP 比重前五名城市的平均值为 3.23%,前十名城市的平均值为 2.79%.

表 4　部分城市的人口老龄化状况及 $PM_{2.5}$ 浓度[1)]

Table 4　Population aging and $PM_{2.5}$ concentrations in some cities

城市	暴露人口/万人	60 岁以上人口/万人	在总人口中占比/%	$PM_{2.5}$ 浓度/μg·m^{-3}
北京	2 171	318.10	23.70	80.83
上海	2 415	435.95	30.21	53.00
天津	1 457	230.37	22.43	70.33
重庆	2 420	677.41	20.09	56.67
武汉	1 061	163.76	19.75	70.00
成都	1 048	259.02	21.17	64.17
郑州	506	127.50	13.60	95.75
济南	485	123.17	19.68	89.92
南京	824	130.94	20.08	57.08
石家庄	430	82.59(65 岁以上)	8.13	88.83

1)资料来源：各市统计年鉴

表 5 各区域 $PM_{2.5}$ 污染的健康风险[1)]（均值及 95% CI）

Table 5 Health risks of $PM_{2.5}$ pollution for different areas (mean and 95% CI)

城市	早逝/人	住院/人		门诊/人	
		呼吸疾病	心血管疾病	内科	儿科
京津冀	35 300(9 543,57 302)	22 180(21,43 804)	22 545(14 341,30 652)	2 077 746(1 150 720,2 953 857)	957 333(344 763,1 526 560)
长三角	36 782(9 674,61 235)	19 042(2,38 128)	19 617(12 440,26 754)	1 576 062(870 531,2 246 364)	726 799(260 594,1 163 747)
珠三角	1 269(327,2 153)	956(0,1 933)	963(609,1 316)	117 315(64 670,167 525)	54 134(19 347,86 944)
东北	11 640(3 096,19 178)	5 601(5,11 152)	6 176(3 921,8 412)	230 914(127 693,328 758)	106 446(38 239,170 137)
东部	82 364(21 965,135 410)	45 610(23,90 653)	46 253(29 380,62 974)	4 013 474(2 220 135,5 712 308)	1 849 933(664 914,2 955 332)
中部	21 968(5 873,36 031)	13 947(12,27 693)	16 354(10 391,22 262)	749 482(414 776,1 066 271)	345 410(124 240,551 424)
西部	20 721(5 455,34 462)	22 134(15,44 299)	11 986(7 601,16 345)	663 073(366 309,944 924)	305 759(109 661,489 449)
南方	59 837(15 755,99 511)	39 439(16,78 926)	33 638(21 334,45 869)	2 400 107(1 325 783,3 420 648)	1 106 782(396 882,1 771 982)
北方	65 216(17 538,106 391)	42 252(34,83 720)	40 955(26 038,55 712)	3 025 922(1 675 437,4 302 855)	1 394 320(501 932,2 224 223)
全部	125 053(33 293,205 903)	81 691(50,162 645)	74 593(47 372,101 581)	5 426 029(3 001 220,7 723 503)	2 501 102(898 815,3 996 205)

城市	早逝/人	患病/人		健康终点总发生率/人·(万人)$^{-1}$	人口/万人	$PM_{2.5}$ 浓度/μg·m^{-3}
		急性支气管炎	慢性支气管炎			
京津冀	35 300(9 543,57 302)	439 423(168 950,647 897)	87 584(36 668,120 543)	686(325,1 014)	5 305.98	77.14
长三角	36 782(9 674,61 235)	408 288(147 738,636 111)	82 127(31 941,119 740)	307(143,460)	9 334.36	53.50
珠三角	1 269(327,2 153)	21 832(7 535,35 586)	4 546(1 669,6 952)	67(32,101)	2 985.64	34.41
东北	11 640(3 096,19 178)	108 209(40 146,164 748)	21 658(8 686,30 816)	246(111,367)	1 997.60	64.21
东部	82 364(21 965,135 410)	938 664(350 614,1 422 333)	189 324(76 509,268 214)	380(179,565)	18 834.69	55.19
中部	21 968(5 873,36 031)	255 212(95 783,384 699)	49 337(20 068,69 465)	335(155,499)	4 328.10	66.70
西部	20 721(5 455,34 462)	467 245(169 410,726 615)	112 750(43 974,164 017)	276(121,417)	5 802.50	48.14
南方	59 837(15 755,99 511)	826 651(299 752,1 285 566)	179 387(69 961,260 999)	262(120,393)	17 722.08	47.15
北方	65 216(17 538,106 391)	834 470(316 056,1 248 081)	172 024(70 590,240 697)	496(232,735)	11 243.21	67.92
全部	125 053(33 293,205 903)	1 661 121(615 808,2 533 647)	351 411(140 552,501 696)	353(164,526)	28 965.29	55.29

1)南北方的划分以秦岭-淮河为界

表 6 部分城市 $PM_{2.5}$ 污染的健康经济损失及排序（均值及 95% CI）

Table 6 Health economic losses and ranking of $PM_{2.5}$ pollution of some cities (mean and 95% CI)

城市	经济损失/亿元	占 GDP 比重/%	人均经济损失/元	按经济损失排序	按经济损失占 GDP 比重排序	按人均经济损失排序
北京	895.60 (313.22,1 341.01)	3.89 (1.36,5.83)	4 126 (1 444,6 179)	1	1	2
上海	566.54 (177.73,900.74)	2.26 (0.71,3.58)	2 346 (736,3 729)	2	9	15
重庆	487.95 (168.09,748.29)	3.10 (1.07,4.76)	2 016 (695,3 092)	3	3	22
天津	328.44 (111.21,501.71)	1.99 (0.67,3.03)	2 254 (763,3 444)	4	12	16
成都	307.74 (110.61,461.15)	2.85 (1.02,4.27)	2 938 (1 056,4 402)	5	5	4
武汉	215.23 (71.54,331.05)	1.97 (0.66,3.03)	2 029 (674,3 121)	6	11	21
济南	203.89 (69.96,305.31)	3.34 (1.15,5.01)	4 207 (1 443,6 299)	7	2	1
西安	171.00 (60.35,259.50)	2.95 (1.04,4.47)	2 397 (846,3 638)	8	4	14
沈阳	164.28 (53.39,253.94)	2.26 (0.73,3.49)	3 100 (1 008,4 792)	9	8	3
南京	152.86 (51.04,237.25)	1.57 (0.53,2.44)	1 856 (620,2 881)	10	17	27
保定	77.99 (28.21,113.19)	2.60 (0.94,3.77)	2 779 (1 005,4 034)	19	6	6
乌鲁木齐	67.03 (24.83,99.12)	2.55 (0.94,3.77)	2 572 (953,3 804)	23	7	10
石家庄	117.10 (40.71,174.62)	2.15 (0.75,3.21)	2 721 (947,4 058)	13	10	9
唐山	93.29 (32.12,140.00)	1.53 (0.53,2.29)	2 897 (997,4 348)	17	19	5
郑州	139.59 (49.76,205.39)	1.91(0.68,2.81)	2 759 (983,4 059)	11	16	7
廊坊	25.36 (8.86,37.85)	1.03 (0.36,1.53)	2 727 (953,4 070)	37	30	8

从城市群看,京津冀与长三角的健康经济损失相差很小,但是京津冀的经济损失占 GDP 比重为 2.38% (95% CI: 0.38% ~3.57%),是长三角的 2.05 倍,人均损失为3 080元(95% CI:1 070 ~4 623 元),是长三角的 1.71 倍; 东北的经济损失仅为长三角的 1/4,但人均损失均值为2 002元,高出长三角 11.47%.珠三角的经济损失及其占 GDP 比重、人均损失都较小.

从东中西部看,东部损失高达 3778 亿元(95% CI: 1 265 ~5 805亿元),约为中部、西部经济损失之和的 2 倍; 东部与中部的经济损失占 GDP 比重差别不大,但西部的经济损失占 GDP 比重却为中

部、东部的 1.5 倍；东部与西部的人均损失几乎相同，约高于中部 230 元.

南北方的经济损失相差无几，但是北方的经济损失占 GDP 比重为 2.03%（95% CI：0.7% ~ 3.07%），人均损失 2564 元（95% CI：882 ~ 3875 元），均值约为南方的 1.6 倍.

表 7　各区域 $PM_{2.5}$ 污染的健康经济损失（均值及 95% CI）

Table 7　Health economic losses of $PM_{2.5}$ pollution for different areas (mean and 95% CI)

区域	经济损失/亿元	占 GDP 比重/%	人均损失/元
京津冀	1 634.24（567.64，2 453.01）	2.38（0.83，3.57）	3 080（1 070，4 623）
长三角	1 676.93（543.75，2 630.13）	1.16（0.37，1.82）	1 796（583，2 818）
珠三角	79.37（25.85，126.69）	0.23（0.07，0.37）	266（87，424）
东北	399.98（130.18，620.67）	1.52（0.49，2.36）	2 002（652，3 107）
东部	3 777.86（1 264.89，5 804.69）	1.39（0.46，2.13）	2 006（672，3 082）
中部	766.63（257.81，1 172.71）	1.52（0.51，2.33）	1 771（596，2 710）
西部	1 161.08（408.12，1 764.73）	2.37（0.83，3.59）	2 001（703，3 041）
南方	2 823.29（938.74，4 385.29）	1.23（0.41，1.91）	1 593（530，2 474）
北方	2 882.28（992.08，4 356.85）	2.03（0.70，3.07）	2 564（882，3 875）
全部	5 705.57（1 930.82，8 742.14）	1.53（0.52，2.35）	1 970（667，3 018）

3　讨论

空气污染与经济发展密切相关，而且“国十条”强调对中国三大城市群的全面治理，因此近年来对长三角、珠三角，尤其是对京津冀这一污染最严重区域的研究不断出现. 如 2013 年的 $PM_{2.5}$ 污染造成京津冀健康经济损失1 342.9亿元（95% CI：1 068.5 ~ 1 598.2亿元），相当于当年 GDP 的 2.16%（95% CI：1.72% ~ 2.28%），其中早逝与慢性支气管炎是损失的主要来源[25]. 也有的估算结果更高，如 2009 年京津冀的健康经济损失高达 1729 亿元（95% CI：612 ~ 2 560亿元），相当于当年 GDP 的 4.68%（95% CI：1.66% ~ 6.94%）[16]. 对长三角与珠三角的研究认为，长三角 2010 年 $PM_{2.5}$ 污染导致早逝的经济损失约为 221 亿元[26]. 当参考浓度分别选取中国标准（40 $\mu g \cdot m^{-3}$）与 WHO 指导值（20 $\mu g \cdot m^{-3}$）时，2006 年珠三角健康经济损失相当于当年 GDP 的 0.09% 和 0.13%[27]. 虽然本文研究结果与上述结果有差异，但均反映了不同时期三大城市群的健康经济损失概况.

本文仅考虑 $PM_{2.5}$ 导致的健康影响，未考虑其它污染物如 PM_{10}、O_3、SO_2、NO_x 等. 由于各种污染物进入人体后可能对健康产生协同作用，因此本评估结果可能偏低. 将市区人口作为暴露人口，广大县级及以下人口没有包括在内，而他们也受到 $PM_{2.5}$ 污染的影响，这导致评估结果偏低.

由于卫生基础资料缺乏，评估的健康终点不够全面，仅选择早逝、呼吸系统与心血管系统疾病住院、内科与儿科门诊、急性支气管炎与慢性支气管炎，未考虑肺功能降低、不良生殖等；在估算各健康终点的单位经济损失时采用疾病成本法，所以仅考虑医疗费与误工费，未考虑自我治疗费、交通费等；早逝与慢性支气管炎的损失，是根据北京市暴露人群的损失及各市的人均可支配收入进行推算，未考虑不同收入水平下各城市人群的支付意愿差异[22]，可能使评估结果偏低.

鉴于目前 $PM_{2.5}$ 对健康的影响机制不完全清晰，设计规范的慢性研究、严格设计的多城市研究和队列研究等尚待深入开展. 建立暴露-反应关系的过程仍存在不确定性，如气象因素、人群暴露模式等各种混杂因素均会对研究的定义和控制带来一定困难[28]，不同城市的系数由于各种原因而产生差异[29]. 但由于资料限制，本文只能采用统一的暴露-反应关系系数及其 95% 置信区间，并估算高、低、均值的评估结果，这在一定程度上将不确定性控制在相对可靠范围. 本文还假定样本城市中的暴露人群呈均匀分布，忽略城市内部人群暴露特征与 $PM_{2.5}$ 浓度的差异等，从一定程度上削弱了高人口密度、高污染水平与人口老龄化的叠加效应，可能使评估结果偏低.

由于卫生基础资料缺乏，本文根据文献[19]对各健康终点发生率进行推算. 对于样本城市的住院、患病发生率，由于无法取得更加详细的数据，故采用东部、中部、西部的平均发生率；对于内科与儿科门诊发生率，采用比例分摊法进行推算，虽然与各城市实际基准发生率有所出入，但却是根据公开资料得出的较可信推算结果.

4　结论

（1）从总体看，2015 年 74 个环保重点监测城

市中有 62 个城市的 $PM_{2.5}$浓度超过 35 $\mu g \cdot m^{-3}$,对这些城市居民造成较大健康风险与健康经济损失. 可引起 12.51 万例(95% CI: 3.33 ~ 20.59 万例)早逝,201.25 万人次(95% CI:75.64 ~ 303.53 万人次)患病,792.71 万人次(95% CI: 390.00 ~ 1 171.97万人次)门诊,15.63 万人次(95% CI: 4.74 ~ 26.42 万人次)住院. 患病、门诊和住院人次占居民总数的 3.53% (95% CI: 1.64% ~ 5.26%). 造成经济损失 5705.57 亿元(95% CI: 1 930.82 ~ 8 742.14亿元),占这些城市 GDP 总和的 1.53%(95% CI: 0.52% ~ 2.35%),人均经济损失 1970 元(95% CI: 667 ~ 3 018元).

(2)四大城市群中,长三角暴露人口最多,京津冀的 $PM_{2.5}$浓度最高; 健康风险从高到低依次为京津冀、长三角、东北、珠三角. 京津冀的健康终点总发生人次和总发生率都远高于其它 3 个城市群. 京津冀与长三角的健康经济损失差别很小,但是占 GDP 比重与人均损失却差别很大,前者均值分别为后者的 2.05 倍与 1.71 倍. 珠三角的经济损失及其占 GDP 比重、人均损失均非常小.

(3)三大经济区中,东部的暴露人口最多,健康终点总发生率最高,经济损失也最大,达到3 777.86 亿元(95% CI: 1 264.89 ~ 5 804.69亿元); 中部的 $PM_{2.5}$浓度最高; 西部的呼吸疾病住院、急性支气管炎、慢性支气管炎的发生率远高于东部与中部,经济损失占 GDP 比重最大,为 2.37% (95% CI: 0.83% ~ 3.59%). 东部、中部、西部的人均经济损失差别不大.

(4)南北方中,南方的暴露人口远大于北方,北方的 $PM_{2.5}$浓度是南方的 1.44 倍; 在南北方全因死亡率相差很小的情况下,北方的早逝、住院、门诊及患病率全部远高于南方,北方所有健康终点平均发生率为 4.96%(95% CI: 2.32% ~ 7.35%). 北方与南方的经济损失仅有微小差别,但是北方的经济损失占 GDP 比重与人均损失均值分别为南方的 1.65 倍与 1.61 倍.

(5)就城市看,健康风险前十大城市依次为北京、上海、天津、重庆、武汉、成都、郑州、济南、南京、石家庄. 健康经济损失前十大城市也包括西安与沈阳,但不包括郑州与石家庄,其中最高的北京为 895.60 亿元(95% CI: 313.22 ~ 1 341.01亿元). 经济损失占 GDP 比重前十大城市依次为北京、济南、重庆、西安、成都、保定、乌鲁木齐、沈阳、上海、石家庄,其中最高的北京为 3.89% (95% CI: 1.36% ~ 5.83%). 人均经济损失最高的济南为 4 207元(95% CI: 1 443 ~ 6 299 元). 不同城市的 $PM_{2.5}$浓度、人口老龄化程度、生活习惯等有较大差异,所产生的健康损失及由此带来的经济损失也有极大不同. 但保定、郑州、济南、北京等 $PM_{2.5}$浓度很高的城市,无论是健康风险还是健康经济损失问题的确比较突出.

参考文献:

[1] Zanobetti A, Schwartz J. The effect of fine and coarse particulate air pollution on mortality: a national analysis[J]. Environmental Health Perspectives, 2009, **117**(6): 898-903.

[2] Fischer P H, Marra M, Ameling C B, *et al*. Air pollution and mortality in seven million adults: the Dutch environmental longitudinal study (DUELS)[J]. Environmental Health Perspectives, 2015, **123**(7): 697-704.

[3] Ebenstein A, Fan M Y, Greenstone M, *et al*. Growth, pollution, and life expectancy: China from 1991-2012[J]. American Economic Review, 2015, **105**(5): 226-231.

[4] Pope C A III, Burnett R T, Thun M J, *et al*. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution[J]. JAMA, 2002, **287**(9): 1132-1141.

[5] Tie X X, Cao J J. Aerosol pollution in China: present and future impact on environment[J]. Particuology, 2009, **7**(6): 426-431.

[6] Chen W Q, Zheng R S, Baade P D, *et al*. Cancer statistics in China, 2015[J]. CA: A Cancer Journal for Clinicians, 2016, **66**(2): 115-132.

[7] Schwartz J, Dockery D W, Neas L M. Is daily mortality associated specifically with fine particles?[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 1996, **46**(10): 927-939.

[8] 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.

[9] Guo Y M, Zeng H M, Zheng R S, *et al*. The burden of lung cancer mortality attributable to fine particles in China[J]. Science of the Total Environment, 2017, **579**: 1460-1466.

[10] De P Pablo-Romero M, Román R, Limón J M G, *et al*. Effects of fine particles on children's hospital admissions for respiratory health in Seville, Spain[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2015, **65**(4): 436-444.

[11] 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.

[12] Pope C A III, Ezzati M, Dockery D W. Fine-particulate air pollution and life expectancy in the United States[J]. New England Journal of Medicine, 2009, **360**(4): 376-386.

[13] Correia A W, Pope III C A, Dockery D W, *et al*. Effect of air pollution control on life expectancy in the United States: an analysis of 545 U.S. counties for the period from 2000 to 2007

[J]. Epidemiology, 2013, **24**(1): 23-31.

[14] Pérez L, Sunyer J, Künzli N. Estimating the health and economic benefits associated with reducing air pollution in the Barcelona Metropolitan Area (Spain)[J]. Gaceta Sanitaria, 2009, **23**(4): 287-294.

[15] 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.

[16] 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.

[17] 王桂芝, 武灵艳, 陈纪波, 等. 北京市 $PM_{2.5}$ 污染健康经济效应的 CGE 分析[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(7): 2779-2785.
Wang G Z, Wu L Y, Chen J B, *et al*. A CGE-based analysis on $PM_{2.5}$-induced health-related economic effect in Beijing[J]. China Environmental Science, 2017, **37**(7): 2779-2785.

[18] 国家统计局城市社会经济调查司. 中国城市统计年鉴 2016[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016.

[19] 国家卫生和计划生育委员会. 中国卫生和计划生育统计年鉴 2016[M]. 北京: 中国协和医科大学出版社, 2016.

[20] 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.

[21] 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.

[22] 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.

[23] 赵春善, 方今女. 吉林市采暖期 $PM_{2.5}$ 污染水平与老年人呼吸系统健康关系的回顾性研究[J]. 中国卫生统计, 2015, **32**(5): 844-847.

[24] 王媛, 黄薇, 汪彤, 等. 患心血管病老年人夏季 $PM_{2.5}$ 和 CO 的暴露特征及评价[J]. 中国环境科学, 2009, **29**(9): 1005-1008.
Wang Y, Huang W, Wang T, *et al*. Characterization and assessment of exposure to $PM_{2.5}$ and CO for a cardiovascular elderly panel in summer in Beijing[J]. China Environmental Science, 2009, **29**(9): 1005-1008.

[25] 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.

[26] 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.

[27] 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.

[28] 陈仁杰, 陈秉衡, 阚海东. 上海市近地面臭氧污染的健康影响评价[J]. 中国环境科学, 2010, **30**(5): 603-608.
Chen R J, Chen B H, Kan H D. Health impact assessment of surface ozone pollution in Shanghai[J]. China Environmental Science, 2010, **30**(5): 603-608.

[29] Hubert H B, Bloch D A, Oehlert J W, *et al*. Lifestyle habits and compression of morbidity[J]. Journals of Gerontology, 2002, **57**(6): M347-M351.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 39 No. 8

Aug. 15, 2018

CONTENTS

An Assessment of $PM_{2.5}$-Related Health Risks and Associated Economic Losses in Chinese Cities ····· LI Hui-juan, ZHOU De-qun, WEI Yong-jie (3467)
Impact of the Electric Power Industry on Air Quality in Winter of Urban Agglomerations Along the Middle Reaches of the Yangtze River ··· SUN Xiao-wei, GUO Xiu-rui, CHENG Shui-yuan (3476)
Capacity Simulation Method Based on Regional Transfer Matrix and $PM_{2.5}$ Concentration Target Constraint ····· LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, YANG Liu-lin, *et al.* (3485)
Analysis of Chemical Composition of the Fine Particulate Matter in Summer in Tianjin City via a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS) ····· WEN Jie, SHI Xu-rong, TIAN Ying-ze, *et al.* (3492)
Pollution Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in Atmospheric Aerosols in Beibei District, Chongqing ····· PENG Xiao-le, HAO Qing-ju, WEN Tian-xue, *et al.* (3502)
Characteristics and Source Analysis of Atmospheric Carbonaceous Aerosols in the Cities of Hangzhou and Ningbo ····· XU Hong-hui, XU Jing-sha, HE Jun, *et al.* (3511)
Emission Characteristics and Chemical Components of $PM_{2.5}$ from Open Burning of Municipal Solid Waste ····· WANG Yan, HAO Wei-wei, CHENG Ke, *et al.* (3518)
Size-resolved Emission Factors of Carbonaceous Particles from Domestic Coal Combustion in China ····· YANG Guo-wei, KONG Shao-fei, ZHENG Shu-rui, *et al.* (3524)
Characteristics and Source Analysis of Non-methane Hydrocarbons(NMHC) in Dalian ····· JI De-yu (3535)
Scenario Analyses of the Volatile Organic Compound Emission Allowance and Allocation in the 13th Five-Year Period ····· ZHANG Jia-ni, CHEN Xiao-fang, LIANG Xiao-ming, *et al.* (3544)
Pollution Characteristics and Emission Coefficients of Volatile Organic Compounds from the Packaging and Printing Industry in Zhejiang Province ····· WANG Jia-de, LÜ Jian-zhang, LI Wen-juan, *et al.* (3552)
Emission Characteristics and Characteristic Substance Identification of Volatile Odorous Organic Compounds in Industries Using Organic Solvents ····· ZHAI Zeng-xiu, MENG Jie, WANG Gen, *et al.* (3557)
Analysis of Aerosol Optical Depth Variation Characteristics for 10 years in Urumqi Based on MODIS_C006 ····· HU Jun, KANG Yan-ming, CHEN Yong-hang, *et al.* (3563)
Motor Vehicle Pollution Control Scenarios of Beijing Subsidiary Administrative Center Based on Road Traffic Flow ····· FAN Shou-bin, GUO Jin-jin, LI Xue-feng (3571)
Air Pollution Characteristics and Jogger Inhalation Exposure in Typical Running Area of Beijing ····· TAO Shuang-cheng, GAO Shuo-han, XIONG Xin-zhu, *et al.* (3580)
Temporal and Spatial Changes in Sediment Nutrients and Heavy Metals of the Danjiangkou Reservoir Before and After Water Division of the Mid-route Project ····· LI Bing, WANG Ya, ZHENG Zhao, *et al.* (3591)
Fluorescence Characteristics and Environmental Significance of Organic Matter in the Northern Part of Lake Taihu in Spring and Winter ····· LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua (3601)
Contamination Levels and Ecological Risk Assessment of Phthalate Esters (PAEs) in the Aquatic Environment of Key Areas of Taihu Lake ····· ZHU Bing-qing, GAO Zhan-qi, HU Guan-jiu, *et al.* (3614)
Nitrogen and Phosphorous Adsorption Characteristics of Suspended Solids Input into a Drinking Water Reservoir via Typhoon Heavy Rainfall ····· YAO Ling-ai, ZHAO Xue-min, MA Qian-li, *et al.* (3622)
Geochemical Characteristics and Genesis Analyses of High-arsenic Groundwater in the Pearl River Delta ····· ZHANG Chang-yan, HE Jiang-tao, ZHANG Xiao-wen, *et al.* (3631)
Effects of Organic Pollutants on the Bacterioplankton Community in Hangzhou Bay ····· XUAN Li-xia, DAI Wen-fang, YU Wei-na, *et al.* (3640)
Bacterioplankton Community Structure in the Lancang River Basin and the Analysis of Its Driving Environmental Factors ····· CHENG Bao, WANG Xue, XU Ya-qian, *et al.* (3649)
Bacterial Community Structure Characteristics in the Biliuhe Reservoir and Its Key Driving Factors ····· WANG Huan, ZHAO Wen, XIE Zai-gang, *et al.* (3660)
Analysis of the Temporal and Spatial Distribution of the Diversity of the Denitrifying Anaerobic Methane-Oxidizing Bacterial Community in the Sediments of the Hunhe River and Its Relationship with Environmental Factors ····· ZHANG Ya-di, SONG Yong-hui, PENG Jian-feng, *et al.* (3670)
Influences of Anthropogenic Activities on the Community Structure of N-DAMO Bacteria in the North Canal ····· LIU Yang, CHEN Yong-juan, WANG Xiao-yan, *et al.* (3677)
Impact of Exogenous Nitrogen Import on Sediment Denitrification and N_2O Emissions in Ditches Under Different Land Uses ····· SHE Dong-li, CHEN Xin-yi, GAO Xue-mei, *et al.* (3689)
Sedimentation Characteristics and Pollutant Content Distribution of Storm Drainage Sediments ····· SHANG Yu, ZHOU Yi, LIAO An-yi, *et al.* (3696)
Effect of Cr(Ⅵ) on Coagulation Process of Different Coagulants ····· GAO Qian, ZHANG Da-wei, XU Hui, *et al.* (3704)
Enhancement of Photoelectrocatalytic Degradation of Bisphenol A with Peroxymonosulfate Activated by a $Co_3O_4/BiVO_4$ Composite Photoanode ····· LI Jiang, WANG Yan, ZHANG Xiu-fang, *et al.* (3713)
Preparation and Characterization of a Calcium Alginate/Biochar Microsphere and Its Adsorption Characteristics and Mechanisms for Pb(Ⅱ) ····· YU Chang-jiang, DONG Xin-yu, WANG Miao, *et al.* (3719)
Behaviors and Mechanisms of CIP and OFL Adsorption by Magnetic Biochar ····· ZHAO Hua-xuan, LANG Yin-hai (3729)
Optimization and Validation of the Analytical Method to Detect New Psychoactive Substances in Wastewater ····· CHEN Pei-pei, DU Peng, ZHOU Zi-lei, *et al.* (3736)
Effect of Hybrid Process of Pre-ozonation and CNT Modification on Hollow Fiber Membrane Fouling Control ····· GUAN Yu-qi, WANG Kai-lun, ZHU Xue-dong, *et al.* (3744)
Bioregeneration of Anion Exchange Resin Used in Nitrate Removal ····· YE Ting, ZHANG Guang, WANG Ke, *et al.* (3753)
Preparation of Prussian Blue@Yeast Catalyst and Its Heterogeneous Fenton Performance ····· CHEN Si, BAI Bo, WANG Hong-lun, *et al.* (3759)
Nitrogen Removal of Double-bacteria-layer System via PN/A Process ····· XU Jing-yi, DU Jun, YANG Yi-feng, *et al.* (3767)
Inhibitory Effect of Phenol on Phosphorus Removal Performance of an EBPR System ····· MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, *et al.* (3775)
Treatment of Old Landfill Leachate via a Denitrification-Partial Nitritation-ANAMMOX Process ····· WANG Fan, LU Ming-yu, YIN Ji-qiang, *et al.* (3782)
Denitrification Characteristics and Functional Genes of Denitrifying Bacteria Under Aerobic or Anaerobic Conditions ····· KANG Peng-liang, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, *et al.* (3789)
Characteristic of Benzo[a]pyrene Anaerobic Degradation by Phenol Co-substrate and Microbial Communities from Two Types of Sludge ····· WU Hai-zhen, HU Xiao-yi, WANG Ming, *et al.* (3797)
Spectroscopic Characterization of DOM During Hyperthermophilic Composting of Sewage Sludge ····· LIU Xiao-ming, YU Zhen, ZHOU Pu-xiong, *et al.* (3807)
Effects of Biochar on Nitrous Oxide Fluxes and the Abundance of Related Functional Genes from Agriculture Soil in the North China Plain ····· LIU Xing-ren, ZHAO Guang-xin, ZHANG Qing-wen, *et al.* (3816)
Nitrous Oxide Production in Response to Oxygen in a Solar Greenhouse Vegetable Soil ····· CHEN Ji-ji, SONG He, CAO Wen-chao, *et al.* (3826)
Comprehensive Study of Lead Speciation and Its Bioavailability in Soils From a Lead/Zinc Mining Area by Micro X-Ray Fluorescence and X-Ray Absorption Near-Edge Structure ····· SUN Xiao-yan, LIU Jian, LUO Li-qiang (3835)
Assessment of Heavy Metal Pollution in Soil and Its Bioaccumulation by Dominant Plants in a Lead-Zinc Mining Area, Nanjing ····· LI Jun-kai, ZHANG Dan, ZHOU Pei, *et al.* (3845)
Preparation of Iron-Aluminum Modified Diatomite and Its Immobilization in Cadmium-Polluted Soil ····· YANG Yu-zhong, ZHU Jian, XIAO Yuan-yuan, *et al.* (3854)
Transfer of Soil Organic Carbon to Inorganic Carbon in Arid Oasis Based on Stable Carbon Isotope Technique ····· LI Yang-mei, GONG Lu, AN Shen-qun, *et al.* (3867)
Environmental Filters Drive the Assembly of the Soil Fungal Community in the *Larix principis-rupprechtii* Forests of the Guandi Mountains ····· ZHAO Peng-yu, LI Cui, CHAI Bao-feng (3876)
Effects of Transgenic Maize with *cry1Ab* and *Epsps* Genes C0030.3.5 on the Abundance and Community Structure of Soil Nitrogen-fixing Bacteria ····· WANG Rui, ZHU Ke, LI Gang, *et al.* (3885)
Effects of Gypsum on CH_4 Emission and Functional Microbial Communities in Paddy Soil ····· HU Xiang-yu, XIANG Qiu-jie, MU Zhi-jian (3894)
Effects of Long-term Fertilization on Enzyme Activities in Profile of Paddy Soil Profiles ····· DU Lin-sen, TANG Mei-ling, ZHU Zhen-ke, *et al.* (3901)
Effects of Sediment Burial and Exogenous Cd Input on Biomass Allocation and Antioxidative Enzyme Activities of *Suaeda salsa* in the Coastal Wetland of the Yellow River Delta ····· SONG Hong-li, WANG Li-zhi, YU Wan-ni, *et al.* (3910)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Wheat Grains Cultivated in Kaifeng Irrigation Area of the Yellow River ····· KANG Guo-hua, ZHANG Peng-yan, LI Yan-yan, *et al.* (3917)
Effect of Graphene Oxide on Algal Toxicity of Dibutyl Phthalate ····· TU Hai-feng, LIU Cheng, WANG Yu-qing, *et al.* (3927)
Effects of Organic Substrates on ANAMMOX-MFC Denitrification Electrogenesis Performance ····· ZU Bo, MA Lan, LIU Bo, *et al.* (3937)
Well-to-Wheels Fossil Energy Consumption and CO_2 Emissions of Hydrogen Fuel Cell Vehicles in China ····· LIN Ting, WU Ye, HE Xiao-yi, *et al.* (3946)
Secondary Organic Aerosols from Aqueous Reaction of Aerosol Water ····· YE Zhao-lian, QU Zhen-xiu, MA Shuai-shuai, *et al.* (3954)