

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第7期

Vol.39 No.7

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

近20年来中国典型区域PM _{2.5} 时空演变过程	罗毅,邓琼飞,杨昆,杨扬,商春雪,喻臻钰 (3003)
西安市PM _{2.5} 健康损害价值评估	魏国茹,史兴民 (3014)
河北香河亚微米气溶胶组分特性、来源及其演变规律分析	江琪,王飞,孙业乐 (3022)
南京北郊秋季PM _{2.5} 碳质组分污染特征及来源分析	徐足飞,曹芳,高嵩,鲍孟盈,石一凡,章炎麟,刘晓妍,范美益,张雯淇,卞航,刘寿东 (3033)
临安夏季霾和清洁天气PM _{2.5} 化学组成特征比较	梁林林,孙俊英,张养梅,刘畅,徐婉筠,张根,刘旭艳,马千里 (3042)
盘锦市秋冬季节PM _{2.5} 中碳组分特征及来源解析	张蕾,姬亚芹,张军,王士宝,李越洋,赵静琦,张伟 (3051)
南京冬季气溶胶光学特性及黑碳光吸收增强效应	黄聪聪,马嫣,郑军 (3057)
夏季青岛大气粗细粒子中微量元素的浓度、溶解度及干沉降通量	李鹏志,李茜,石金辉,高会旺,姚小红 (3067)
太原市夏季降水中溶解态重金属特征及来源	叶艾玲,程明超,张璐,何秋生,郭利利,王新明 (3075)
杭州地区大气CO ₂ 体积分数变化特征及影响因素	浦静姣,徐宏辉,姜瑜君,杜荣光,齐冰 (3082)
典型工业源VOCs治理现状及排放组成特征	景盛翱,王红丽,朱海林,杨强,卢滨,夏阳,余传冠,陶士康,李莉,楼晟荣,黄成,唐伟,井宝莉 (3090)
地级市域工业VOCs排放源产排特性及其控制技术应用现状:以秦皇岛市为例	胡旭睿,虎啸宇,王灿 (3096)
青霉素发酵尾气VOCs污染特征及健康风险评价	郭斌,么瑞静,张硕,马磊,康江,王姗姗 (3102)
轻型汽油车尾气OC和EC排放因子实测研究	黄成,胡馨遥,鲁君 (3110)
南京市大气降尘重金属污染水平及风险评价	田春晖,杨若杼,古丽扎尔·依力哈木,钱新,王金花,李慧明 (3118)
西安城区路面细颗粒灰尘重金属污染水平及来源分析	石栋奇,卢新卫 (3126)
三峡库区主要河流秋季pCO ₂ 及其影响因素	罗佳宸,毛蓉,李思悦 (3134)
泾河支流地表水地下水的水化学特征及其控制因素	寇永朝,华琨,李洲,李志 (3142)
生物滞留对城市地表径流磷的去除途径	李立青,刘雨倩,杨佳敏,王娟 (3150)
淀山湖浮游植物功能群演替特征及其与环境因子的关系	杨丽,张玮,尚光霞,张军毅,王丽卿,魏华 (3158)
抚仙湖硅藻群落的时空变化特征及其与水环境的关系	李蕊,陈光杰,康文刚,陈丽,王教元,陈小林,刘园园,冯钟,张涛 (3168)
蓝藻水华及其降解对沉积物-水微界面的影响	王永平,谢瑞,晁建颖,姬昌辉,于剑 (3179)
生物炭对人工湿地植物根系形态特征及净化能力的影响	徐德福,潘潜澄,李映雪,陈晓艺,王佳俊,周磊 (3187)
Mn-Co/蜂窝陶瓷催化剂制备及催化臭氧化对苯二酚效能	张兰河,高伟国,陈子成,张海丰,王旭明 (3194)
Fe/Cu双金属活化过一硫酸盐降解四环素的机制	李晶,鲍建国,杜江坤,冷一非,孔淑琼 (3203)
铈酸盐改性钛酸纳米片对水中Cd(II)的吸附行为及机制	康丽,刘文,刘晓娜,刘宏芳,李一菲 (3212)
铁锰原位氧化产物吸附微量磷的实验	蔡言安,毕学军,张嘉凝,董杨,刘文哲 (3222)
制备方法对铁钛复合氧化物磷吸附性能的影响:共沉淀法与机械物理混合法	仲艳,王建燕,陈静,张高生 (3230)
电导率对厌氧产酸、正渗透与微生物燃料电池耦合工艺运行性能的影响	陆宇琴,刘金梦,王新华,李秀芬,李晔 (3240)
不同磷浓度下生物除磷颗粒系统的COD需求	李冬,曹美忠,郭跃洲,梅宁,李帅,张杰 (3247)
基质浓度对ABR反应器SAD协同脱氮除碳效能影响	张敏,姜滢,汪瑶琪,韦佳敏,陈重军,沈耀良 (3254)
采用含硫铁化学污泥作为反硝化电子供体进行焦化废水中总氮深度去除	付炳炳,潘建新,马景德,王丰,吴海珍,韦朝海 (3262)
间歇曝气下短程硝化耦合污泥微膨胀稳定性	高春娣,孙大阳,安冉,赵楠,焦二龙,祝海兵 (3271)
基于高通量测序的SBR反应器丝状膨胀污泥菌群分析	洪颖,姚俊芹,马斌,徐双,张彦江 (3279)
纳米零价铁(NZVI)对厌氧产甲烷活性、污泥特性和微生物群落结构的影响	苏润华,丁丽雨,任洪强 (3286)
气水比对后置固相反硝化滤池工艺脱氮及微生物群落影响	张千,吉芳英,付旭芳,陈晴空 (3297)
活性污泥胞外多聚物提取方法的比较	孙秀玥,唐珠,杨新萍 (3306)
耐冷嗜碱蒙氏假单胞菌H97的鉴定及其好氧反硝化特性	蔡茜,何腾霞,冶青,李振轮 (3314)
PFOS前体物质(PreFOSs)降解菌的分离鉴定及其降解特性	赵淑艳,周涛,王博慧,梁田坤,柳丽芬 (3321)
采油井场土壤微生物群落结构分布	蔡萍萍,宁卓,何泽,张敏,石建省 (3329)
铜尾矿坝不同恢复年限土壤理化性质和酶活性的特征	王瑞宏,贾彤,曹苗文,柴宝峰 (3339)
广西某赤泥堆场周边土壤重金属污染风险	郭颖,李玉冰,薛生国,廖嘉欣,王琼丽,吴川 (3349)
邻苯二甲酸酯在重庆市城市土壤中的污染分布特征及来源分析	杨志豪,何明靖,杨婷,卢俊峰,魏世强 (3358)
成都平原区水稻土有机碳剖面分布特征及影响因素	李珊,李启权,王昌全,张浩,肖怡,唐嘉玲,代天飞,李一丁 (3365)
塔里木盆地北缘绿洲不同连作年限棉田土壤有机碳、无机碳含量与环境因子的相关性	赵晶晶,贡璐,安申群,李杨梅,陈新 (3373)
塔里木盆地北缘绿洲4种土地利用方式土壤有机碳组分分布特征及其与土壤环境因子的关系	安申群,贡璐,李杨梅,陈新,孙力 (3382)
高原喀斯特土壤有机碳短期稳定的温度作用机制	唐国勇,张春华,刘方炎,马艳 (3391)
施硼对水稻幼苗吸收和分泌砷的影响	朱毅,孙国新,陈正,胡莹,郑瑞伦 (3400)
不同改良剂对铅镉污染农田水稻重金属积累和产量影响的比较分析	胡雪芳,田志清,梁亮,陈俊德,张志民,朱祥民,王士奎 (3409)
南京大气臭氧浓度的季节变化及其对主要作物影响的评估	赵辉,郑有飞,魏莉,关清 (3418)
三峡库区涪陵和忠县两地居民发汞含量水平及影响因素分析	程楠,谢青,樊宇飞,王永敏,张成,王定勇 (3426)
人粪便好氧堆肥过程中典型抗生素的消减特性	时红蕾,王文昌,李倩 (3434)
COD/SO ₄ ²⁻ 对青霉素菌渣厌氧消化影响	强虹,李玉友,裴梦富 (3443)
果蔬类垃圾主发酵堆肥产物储放和利用的恶臭释放特征	何品晶,蒋宁玲,徐贤,韦顺艳,邵立明,吕凡 (3452)
曾用抗生素磺胺二甲嘧啶对稻田NH ₃ 挥发的影响	庞炳坤,张敬沙,吴杰,李志琳,蒋静艳 (3460)
《环境科学》征订启事(3141)	
《环境科学》征稿简则(3202)	
信息(3229, 3433, 3451)	

西安市 PM_{2.5} 健康损害价值评估

魏国茹^{1,2}, 史兴民^{1,2*}

(1. 陕西师范大学地理科学与旅游学院, 西安 710062; 2. 地理学国家级实验教学示范中心(陕西师范大学), 西安 710062)

摘要: 选取2014、2015、2016年冬季PM_{2.5}(24 h)浓度平均值,采用泊松回归模型评价全市居民连续3 a冬季PM_{2.5}暴露的急性健康损害效应,修正的人力资本法评估过早死亡经济损失,疾病成本法评估住院、患病与门诊经济损失。结果表明,研究时段内(2014、2015、2016年冬季)由PM_{2.5}造成的经济损失约为335.23亿元(95% CI: 249.61~369.75)、211.05亿元(95% CI: 135.60~268.80)、371.32亿元(95% CI: 272.46~411.64),分别约占当年GDP的6.10%(4.54%~6.73%)、3.64%(2.34%~4.63%)、5.91%(4.34%~6.55%);健康经济损失与当年冬季PM_{2.5}浓度均值呈正相关关系;PM_{2.5}污染物对西安市常住人口健康影响显著,影响的病例(2014、2015、2016年)分别约为1 071 338例(95% CI: 646 432~1 385 847)、438 273例(95% CI: 246 842~599 989)、1 019 503例(95% CI: 611 407~1 324 547);对哮喘儿童患者的影响比成人显著,而慢性支气管炎的影响成人比儿童显著。该研究可为西安市实施PM_{2.5}空气质量标准的成本效益分析提供科学的依据,为环境质量管理提供参考。

关键词: 西安; 健康损害; PM_{2.5}; 疾病成本法; 修正人力资本

中图分类号: X196; X503.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)07-3014-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201710174

Evaluation the Extent of Health Damage Caused by PM_{2.5} Particulate in Xi'an City

WEI Guo-ru^{1,2}, SHI Xing-min^{1,2*}

(1. School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China; 2. National Demonstration Center for Experimental Geography Education(Shaanxi Normal University), Xi'an 710062, China)

Abstract: The study evaluated the acute health damage effect of PM_{2.5} exposure in winter in Xi'an City, using the average concentration of PM_{2.5} (24 h) and the Average Poisson Regression Model for three consecutive years, from 2014 to 2016. The Corrected Human Capital Method was used to evaluate the economic loss from premature death. The cost of illness was used to assess the economic loss of hospitalization, illness and clinic. The results show that the economic loss in the study period (2014, 2015, 2016) caused by PM_{2.5} was about 33.523 billion yuan (95% CI: 24.961-36.975), 21.105 billion yuan (95% CI: 13.560-26.880), and 37.132 billion yuan (95% CI: 27.246-41.164). The proportions of GDP were as follows: 6.10% (4.54%-6.73%), 3.64% (2.34%-4.63%), and 5.91% (4.34%-6.55%) for each of the three years. The health economic loss was positively correlated with the average PM_{2.5} concentration in winter. PM_{2.5} pollutants have a significant impact on the health of residents in Xi'an. The number of reported cases was about 1 071 338 (95% CI: 646 432-1 385 847), 438 273 (95% CI: 246 842-599 989), and 1 019 503 (95% CI: 611 407-1 324 547) for each of the three years. The effects on children with asthma were significantly higher than that on adults, while adults with chronic bronchitis were affected more significantly than children. This study can provide a scientific basis for cost-benefit analysis of the PM_{2.5} air quality standard in Xi'an, and provide a reference for the management of environment quality.

Key words: Xi'an; health cost; PM_{2.5}; disease and cost method; corrected human capital

随着工业化和城镇化进程加快,国内许多城市的空气质量越来越差,污染事件频发,影响范围逐年扩大。研究表明,大气污染对不同健康终点带来不良影响,如过早死亡(即“早逝”,通常称为非事故性过早死亡)、慢性支气管炎、肺功能降低、哮喘、中风、肺癌、不良生殖结局以及门急诊、住院等^[1]。因此,对霾天气中高浓度颗粒物PM_{2.5}暴露下的居民健康损害价值进行评估具有重要意义。

国内外学者采用危险度评价方法评估健康损害,即通过暴露-反应关系对大气污染人体健康造成

的危害进行定量分析。针对多种呼吸系统、心脑血管系统疾病发病率、就诊人数与PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂和NO₂等主要空气污染物之间的暴露-反应关系开展了一系列研究,初步获取了主要污染物暴露水平与老年人、儿童等特定敏感人群相关疾病的患病率和死亡率之间的相关关系^[2]。国内学者针对突发性

收稿日期: 2017-10-22; 修订日期: 2017-12-28

基金项目: 教育部人文社科基金项目(15YJCZH141)

作者简介: 魏国茹(1992~),女,硕士研究生,主要研究方向为环境变化与人类适应, E-mail: 453092234@qq.com

* 通信作者, E-mail: realsimon@163.com

重污染事件中人群健康风险和健康预警方面做了一些研究,结果发现 PM_{2.5}较粒径大的颗粒能够吸附更多的有害物质,PM_{2.5}浓度上升能够引起人体心肺疾病发生率、死亡率的显著增加。同时,毒理学相关的研究表明 PM_{2.5}对人体呼吸系统、心血管系统、生殖系统、血液系统和免疫系统等均有毒性作用^[3],揭示了 PM_{2.5}浓度及其化学性质与居民超额死亡率增加的相关性^[4];大气 PM_{2.5}浓度的升高会引起相应疾病死亡率的增加^[5]。谢鹏等^[6]利用 Meta 分析法评价我国 PM₁₀和 PM_{2.5}对各健康效应终点的暴露-反应关系;Zhang 等^[7]研究了太原 2000、2010 和 2015 年在替代情景下建立能源使用,空气污染和公共卫生影响之间的联系认为,在 2000 年超过 2 200 人的过度死亡可能是由颗粒物(PM)污染引起的,虽然 2015 年空气质量达到国家二级标准,但过早死亡人数仍达到 1 330 左右,经济成本在 2015 年达到城市 GDP 的 1%~2% 左右。此外,京津冀^[8,9]地区已展开过关于 PM_{2.5}颗粒物造成的经济损失研究。西安市^[10]主要评价 PM₁₀颗粒物造成的经济损失,在人体健康损失方面并没有进行健康终点分类别分析。已有的研究均是建立在短时间尺度上,或是以某次霾严重事件为依据,忽略了 PM_{2.5}对健康影响的滞后效应。

卫生部公布的 2016 年前三季度全国 74 个城市空气质量排名中,空气质量相对较差的城市中西安市排第十,空气质量长期处于超标状态,重度污染霾事件频繁发生,引起政府、社会和有关专家学者的广泛关注。国内外对该地区 PM_{2.5}颗粒物健康影响和经济损害价值方面的研究相对薄弱。本研究从较长时间尺度分析了 2014、2015 与 2016 年冬季长时间高浓度 PM_{2.5}给西安市带来的健康经济损失,以及近 3 a 浓度变化及其造成的健康经济损失动态变化情况。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本文研究时段内的 PM_{2.5}污染物浓度数据主要来自西安市环保局,空气质量监测平台发布的 13 个监测站点不同污染物(24 h)平均浓度。以《西安统计年鉴》公布的年末常住人口作为暴露人群。健康终点死亡率、患病率从《中国卫生年鉴》、《中国心血管疾病报告》、《全国卫生服务调查》、《陕西省卫生计生事业发展统计公报》以及中国哮喘联盟调查数据等获得。

1.2 估算方法

福利经济学认为大气颗粒物对健康的影响是一对多的复杂关系,人们对于健康影响赋予的价值不尽相同。所以,大气污染颗粒物带来的健康损害等于各种健康影响的价值加总,包括过早死亡带来的经济损失和各种健康终点患病门诊和住院的直接和间接损失。对于总人口来说,每日死亡数是小概率事件,作为一种时间序列模型,其实际分布近似泊松分布,该模型是对传统广义对数线性模型的进一步拓展^[11]。模型中除拟合普通的线性项外,还可将一些与因变量之间存在复杂非线性关系的变量以不同函数加和的形式拟合入模型^[12]。因此,采用空气污染流行病中应用比较广泛的泊松回归模型,评价西安市高浓度 PM_{2.5}暴露下居民健康的风险及其经济损失^[2],公式如下:

$$E = \exp[\beta(c - c_0)] E_0 \quad (1)$$

$$\Delta E = P(E - E_0) = P\left[1 - \frac{1}{\exp[\beta(c - c_0)]}\right] E \quad (2)$$

式中, ΔE 为实际浓度与参考浓度下居民健康损害之差,即由 PM_{2.5}浓度变化带来的居民健康效应变化量; P 为常住人口数量(万人); β 为暴露-反应系数(PM_{2.5}浓度每增加 10 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 导致的人群发病率和死亡率增加的百分数); c 为实际暴露浓度($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$); c_0 为参考基准浓度值[取国家(24 h)平均浓度二级限值 75 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]; E 为实际浓度下居民健康损害; E_0 为参考浓度下的居民健康损害,以发病或死亡率表示。

人力资本法(收入损失法)认为人过早死亡的社会损失等于丧失工作时间时的劳动价值和预期收入的现值^[13]。人力资本法能够节约时间和资金,并且所需要的数据也比较容易获得,计算方法简便。但是,人力资本法忽视了个人健康价值和社会幸福价值。修正的人力资本法将人均 GDP 视为一个统计生命年对社会的贡献,从全社会角度考察人力资本,因此可以不考虑个体差异^[14]。修正的人力资本法用基准年的人均 GDP 代替了个体收入,计算公式如下:

$$K = \sum_{i=1}^t \text{GDP}_{\text{pvi}}^{\text{dv}} = \text{GDP}_{\text{pco}} \cdot \sum_{i=1}^t \frac{(1 + \alpha)^i}{(1 + r)^i} \quad (3)$$

式中, K 为修正的人力资本损失; t 为人均损失寿命年; $\text{GDP}_{\text{pvi}}^{\text{dv}}$ 为第 i 年的人均 GDP 贴现值; GDP_{pco} 为基准年的人均 GDP; α 为人均 GDP 增长率; r 为社会贴现率。

疾病成本法指大气污染对健康损害用治疗疾病

的医药费来计算,疾病成本法所计算的总成本,包括患病期间与患病有关的直接费用和间接费用,主要由三部分组成,即就诊费用、住院费用和未就诊患者的自我诊疗和药费. 计算公式如下:

门诊费用 = 门诊时间 × 日人均 GDP +
 门诊人次 × (人均直接门诊费用 +
 人均间接门诊费用) (4)

住院费用 = 住院时间 × 日人均 GDP + 住院人次 ×
(人均直接住院费用 + 人均间接住院费用) (5)

未就诊费用 = 未就诊人次 × 人均自我治疗费用 (6)

1.3 健康终点选择

医学研究表明 PM_{2.5} 进入机体后可沉积在肺泡,导致肺炎、哮喘、慢性支气管炎、肺功能下降等,可能与炎症反应、氧化应激、基因毒性诱导的肺功能损伤,PM_{2.5} 长期暴露可降低心血管患者预期寿命损害,通过刺激肺泡引发炎症而影响心血管;也可激活肺泡表面敏感受体,改变自主神经功能,间接作用心血管^[15]. 考虑到数据的可获得性,本文选择与 PM_{2.5} 暴露有关的健康效应终端包

括:慢性支气管炎、全因死亡、心血管疾病住院与患病率、呼吸系统住院与患病率、内科门诊、哮喘发作和儿科门诊,部分临床和亚临床症状未包括在内.

1.4 数据整理

式(2)中西安市常住人口,2014、2015、2016 年分别为 862.75、870.56、883.21 万人,式(3)人均 GDP 分别为63 794、66 938、71 647元. 式(4)中门诊花费时间假设为 0.5 d. 呼吸系统疾病死亡率、住院率,心血管疾病死亡率、住院率,哮喘、慢性支气管炎患病率,门诊访问率,见表 1. 对于无法直接获得当年的数据,用可获得的最近年数据作为参考,最大程度上减少误差值. PM_{2.5} 大气颗粒物的健康风险进行定量分析和评价的关键在于暴露-反应关系,借助“暴露-反应”关系系数 β 值,可计算暴露人群的相对危险度水平^[16]. 由于国内关于人群颗粒物污染暴露-反应关系系数方面研究尚不完全,本文采用成果参照法,然后取平均值整理出关于 PM_{2.5} 暴露-反应关系系数(见表 1).

表 1 不同健康终点 PM_{2.5} 暴露-反应系数与基准发生率¹⁾

Table 1 PM _{2.5} exposure-reaction coefficient and baseline incidence of different health endpoints used in this study					
项目	健康终点	β 值(置信区间 95%) / %	E 值 / ‰		
			2014 年	2015 年	2016 年
早逝	总死亡	0.2 (0.07, 0.33) ^[4]	0.005 470 ^[17]	0.005 510 ^[18]	0.005 400 ^[19]
	呼吸系统疾病死亡率	0.19 (-0.2, 0.59) ^[4]	0.000 742 ^[20]	0.000 734 ^[21]	0.000 734
	心血管疾病死亡率	0.27 (0.08, 0.46) ^[4]	0.002 788 ^[22]	0.002 816 ^[23]	0.002 816
住院	呼吸系统疾病	1.26 (0.425, 2.11) ^[2,9]	0.013 300 ^[24]	0.013 300	0.013 300
	心血管疾病	0.605 (0.29, 0.915) ^[2,9]	0.006 900 ^[24]	0.006 900	0.006 900
患病	慢性支气管炎(0~14 岁)	5.73 (1.815, 9.64) ^[6,9]	0.007 200 ^[21]	0.007 200	0.007 200
	慢性支气管炎(15 岁以上~)	6.86 (5.74, 7.97) ^[9]	0.007 200	0.007 200	0.007 200
	哮喘(0~14 岁)	4.19 (2.54, 5.95) ^[6,9]	0.018 300 ^[25]	0.018 300	0.018 300
	哮喘(15 岁以上~)	3.85 (2.075, 5.57) ^[2,6,9]	0.012 400 ^[26]	0.012 400	0.012 400
门诊	儿科(0~14 岁)	0.56 (0.2, 0.9) ^[2,9]	0.096 400 ^[20]	0.095 300 ^[21]	0.095 300
	内科(15 岁以上~)	0.49 (0.27, 0.7) ^[2,9]	0.236 000 ^[20]	0.236 000 ^[21]	0.236 000

1) β 值为 PM_{2.5} 浓度每增加 10 μg·m⁻³ 导致的人群发病率和死亡率增加的百分数; E 值是通过将年死亡率和发病率统计值折算成日均死亡率和发病率来获取

2 结果与讨论

2.1 PM_{2.5} 浓度分析

全市(2014~2016 年) PM_{2.5} (24 h) 浓度变化,如图 1 所示. 从年际间变化来看,2014 年浓度最高,其次是 2016 年,2015 年浓度较低. 春夏季 PM_{2.5} 浓度偏低,秋冬季 PM_{2.5} 浓度偏高,冬季最为突出,浓度最高. 四季中冬季均值超过国家二级浓度限值 75 μg·m⁻³. 2014、2015、2016 年冬季日均值分别为 125、90、120 μg·m⁻³, 超标率分别是 67.1%、20.0%、59.4%. 最高值(527 μg·m⁻³) 出

现在 2014 年冬季,污染最为严重,2015 年 PM_{2.5} 浓度有所下降,但 2016 年又上升,仅次于 2014 年冬季. 所以本文研究时段取冬季(2014 年 12 月 1 日~2015 年 2 月 28 日,2015 年 12 月 1 日~2016 年 2 月 28 日,2016 年 12 月 1 日~2017 年 2 月 29 日).

2.2 健康损害价值评估结果

假设每天的发病率是不变的,结合西安市 2014、2015 和 2016 年末常住人口、PM_{2.5} 冬季日均浓度、健康终点基准发生率、暴露-反应系数,运用式(2),得出冬季持续高浓度 PM_{2.5} 暴露下全市居民健康效应(表 2).

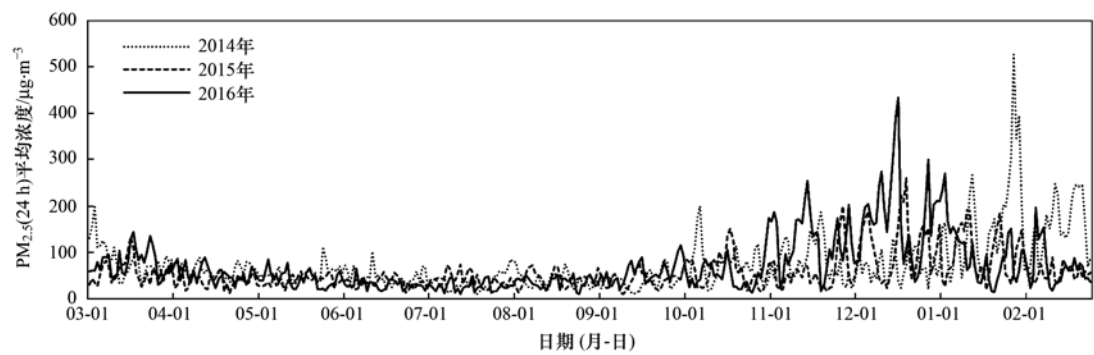


图1 西安市2014、2015、2016年全年PM_{2.5}日均浓度

Fig. 1 Average daily concentration of PM_{2.5} in Xi'an, 2014, 2015 and 2016

表2 冬季PM_{2.5}暴露下西安市居民健康效应量评估结果¹⁾/例

Table 2 Results of the health effects of the residents in Xi'an were exposed during the winter/case

项目	健康终点	2014 年			2015 年			2016 年		
		均值	下限	上限	均值	下限	上限	均值	下限	上限
	总死亡	4 491	1 623	7 178	1 418	501	2 317	4 105	1 479	6 582
死亡	呼吸系统疾病死亡率	580	-673	1635	179	-194	541	531	-610	1 511
	心血管疾病死亡率	3 038	943	4 942	973	292	1 635	2 846	880	4 651
住院	呼吸系统疾病	53 633	21 967	74 792	19 940	7 151	31 413	50 837	20 448	72 015
	心血管疾病	15 539	8 035	21 856	5 211	2 557	7 704	14 525	7 456	20 568
患病	慢性支气管炎(0~14岁)	58 578	37 051	61 617	36 143	14 939	47 918	58 765	35 492	62 760
	慢性支气管炎(15岁以上)	60 106	58 596	60 963	40 281	36 183	43 716	60 689	58 787	61 830
	哮喘(0~14岁)	138 453	113 545	149 824	74 337	50 474	94 053	137 100	110 091	150 518
	哮喘(15岁以上)	91 375	69 073	100 377	47 357	28 873	61 136	90 151	66 469	100 586
门诊	儿科(0~14岁)	203 112	79 146	301 381	66 843	24 520	104 771	187 493	72 444	280 305
	内科(15岁以上)	442 433	257 126	601 282	145 591	81 546	204 785	412 461	238 471	563 221
	合计	1 071 338	646 432	1 385 847	438 273	246 842	599 989	1 019 503	611 407	1 324 547

1) 上限、下限的数值为根据95%可信限(CI)预测所得,下同

表2分析结果显示,冬季PM_{2.5}高浓度暴露水平下,全市2014、2015、2016年受危害总数分别约为1 071 338例(95% CI: 646 432 ~ 1 385 847)、438 273例(95% CI: 246 842 ~ 599 989)、1 019 503例(95% CI: 611 407 ~ 1 324 547),占年末常住人口的12.4%、5.0%、11.5%。其中,呼吸系统和心血管疾病总死亡分别约为3 618例(95% CI: 270 ~ 6 577)、1 152例(95% CI: 98 ~ 2 176)、3 377例(95% CI: 270 ~ 6 162);呼吸系统和细血管疾病总住院约68 172例(95% CI: 30 002 ~ 95 648)、25 151例(95% CI: 9 708 ~ 39 117)、65 362例(95% CI: 27 904 ~ 92 583);慢性支气管炎和哮喘总患病约348 512例(95% CI: 278 265 ~ 372 781)、198 118例(95% CI: 130 469 ~ 246 824)、346 705例(95% CI: 270 839 ~ 375 695);门诊访问约645 546例(95% CI: ~ 902 663)、212 435例(95% CI: 106 065 ~ 309 556)、599 954例(95% CI:

310 915 ~ 843 527)。

2.2.1 过早死亡经济损失

采用修正的人力资本法估算过早死亡带来的经济损失。2014、2015、2016年西安市人均GDP分别为63 794、66 938、71 647元。党的“十六大”指出国内生产总值到2020年翻两番的目标,所以未来经济增长率取7.2%。贴现率根据国家给出的建设项目经济评估指导值,取 $r = 8\%$ 。人均损失寿命年 $t = \sum (\text{年龄别期望寿命} \times \text{年龄别死亡人数}) / (\sum \text{年龄别死亡人数})$ ^[14],参考中国第六次人口普查资料中的城市人口年龄别人口数、实际死亡人数和疾病的年龄别死亡率^[27],结合简略寿命表^[28],计算出疾病别的人均损失寿命年(表3)。2014年和2015年心血管疾病人均寿命损失年约为12 a,呼吸系统疾病人均寿命损失年约10 a,所以2016年也取12 a、10 a。

过早死亡带来的经济损失结合式(3),计算结

果见表 4. 心血管疾病和呼吸系统疾病过早死亡带来的总的经济损失 2014、2015、2016 年分别约为 23.98 亿元 (95% CI: 2.53 ~ 43.00)、8.02 亿元 (95% CI: 0.91 ~ 14.92)、25.15 亿元 (95% CI: 2.76 ~ 45.27). 心血管疾病死亡占总死亡经济损失

的 86.1%、86.5%、86.3%,说明 $PM_{2.5}$ 污染物对心血管疾病的影响较显著. 由于 2015 年冬季 $PM_{2.5}$ 浓度较低,所以过早死亡经济损失较 2014 年和 2016 年低. 从 2014 年和 2016 年来看,过早死亡带来的经济损失呈上升趋势.

表 3 疾病别过早死亡的人均损失寿命年

Table 3 Disease not premature death of the per capita loss of life years

年龄	人口数	期望寿命/a	心血管疾病					
			死亡率/‰		死亡人数		损失寿命年/a	
			2014 年	2015 年	2014 年	2015 年	2014 年	2015 年
1 岁以下	2 825 962	74.66	0.057 1	0.054 4	161	154	12 047	11 478
1 ~ 4 岁	13 534 485	74.21	0.009 3	0.009 3	126	126	9 341	9 341
5 ~ 9 岁	15 903 218	70.4	0.004 4	0.004 5	70	72	4 926	5 038
10 ~ 14 岁	17 121 336	65.57	0.012	0.008 7	205	149	13 472	9 767
15 ~ 19 岁	30 350 178	60.67	0.023 4	0.023	710	698	43 087	42 351
20 ~ 24 岁	47 547 510	55.76	0.027 7	0.026 2	1 317	1 246	73 440	69 463
25 ~ 29 岁	37 950 735	51.06	0.058 4	0.056	2 216	2 125	113 165	108 515
30 ~ 34 岁	35 576 427	46.31	0.121 9	0.107 6	4 337	3 828	200 836	177 276
35 ~ 39 岁	39 746 202	41.46	0.173 7	0.167 4	6 904	6 654	286 236	275 855
40 ~ 44 岁	37 805 480	36.65	0.391 4	0.369 7	14 797	13 977	542 312	512 246
45 ~ 49 岁	32 412 958	31.79	0.555 2	0.527 4	17 996	17 095	572 082	543 437
50 ~ 54 岁	24 253 446	27.29	1.294 2	1.377 7	31 389	33 414	856 601	911 867
55 ~ 59 岁	22 418 430	23.09	1.622 7	1.545 5	36 378	34 648	839 977	800 015
60 ~ 64 岁	15 298 187	19.3	3.409 4	3.347 6	52 158	51 212	1 006 642	988 396
65 ~ 69 岁	10 418 641	15.48	6.406	6.317	66 742	65 815	1 033 163	1 018 809
70 ~ 74 岁	8 876 835	11.61	11.099 1	10.874 5	98 525	96 531	1 143 874	1 120 727
75 ~ 79 岁	6 366 161	8.52	20.754 6	20.297 9	132 127	129 220	1 125 723	1 100 952
80 ~ 84 岁	3 436 596	6.07	42.368 2	42.87	145 602	147 327	883 806	894 274
85 岁及以上	1 917 253	4.72	96.405 1	102.852 9	184 833	197 195	872 412	930 761
合计	403 760 040				796 594	801 483	9 633 144	9 530 566
$t^{(1)}/a$							12	12

年龄	人口数	期望寿命/a	呼吸系统疾病					
			死亡率/‰		死亡人数		损失寿命年/a	
			2014 年	2015 年	2014 年	2015 年	2014 年	2015 年
1 岁以下	2 825 962	74.66	0.438 8	0.359	1 240	1 015	92 581	75 744
1 ~ 4 岁	13 534 485	74.21	0.042	0.026	568	352	42 185	26 114
5 ~ 9 岁	15 903 218	70.4	0.006 5	0.007 3	103	116	7 277	8 173
10 ~ 14 岁	17 121 336	65.57	0.006 9	0.007	118	120	7 746	7 859
15 ~ 19 岁	30 350 178	60.67	0.006 3	0.003 7	191	112	11 600	6 813
20 ~ 24 岁	47 547 510	55.76	0.006 2	0.003 9	295	185	16 438	10 340
25 ~ 29 岁	37 950 735	51.06	0.010 6	0.009	402	342	20 540	17 440
30 ~ 34 岁	35 576 427	46.31	0.014 9	0.013 9	530	495	24 548	22 901
35 ~ 39 岁	39 746 202	41.46	0.018 8	0.014 2	747	564	30 980	23 400
40 ~ 44 岁	37 805 480	36.65	0.040 6	0.031 5	1 535	1 191	56 254	43 645
45 ~ 49 岁	32 412 958	31.79	0.061 3	0.051 3	1 987	1 663	63 164	52 860
50 ~ 54 岁	24 253 446	27.29	0.166 4	0.141 3	4 036	3 427	110 136	93 523
55 ~ 59 岁	22 418 430	23.09	0.250 6	0.215 3	5 618	4 827	129 721	111 448
60 ~ 64 岁	15 298 187	19.3	0.631	0.590 9	9 653	9 040	186 306	174 466
65 ~ 69 岁	10 418 641	15.48	1.390 7	1.334 3	14 489	13 902	224 293	215 197
70 ~ 74 岁	8 876 835	11.61	2.917 5	2.855 2	25 898	25 345	300 678	294 257
75 ~ 79 岁	6 366 161	8.52	5.984 5	5.742 7	38 098	36 559	324 597	311 482
80 ~ 84 岁	3 436 596	6.07	13.293 6	13.273 1	45 685	45 614	277 306	276 879
85 岁及以上	1 917 253	4.72	32.943 6	34.222 6	63 161	65 613	298 121	309 695
合计	403 760 040				214 356	210 481	2 224 473	2 082 236
$t^{(1)}/a$							10	10

1) t 为心血管疾病和呼吸系统疾病全年龄平均损失寿命年

表 4 冬季 PM_{2.5} 污染造成的西安市居民健康经济损失/亿元

Table 4 Healthy economic loss of residents in Xi'an caused by PM _{2.5} pollution in winter/one hundred million yuan										
项目	健康终点	2014 年			2015 年			2016 年		
		均值	下限	上限	均值	下限	上限	均值	下限	上限
死亡	呼吸系统疾病	3.34	-3.88	9.42	1.09	-1.18	3.27	3.44	-3.95	9.78
	心血管疾病	20.64	6.41	33.58	6.94	2.08	11.65	21.71	6.71	35.49
住院	呼吸系统疾病	4.66	1.91	6.50	1.73	0.62	2.73	4.42	1.78	6.26
	心血管疾病	3.95	2.04	5.55	1.36	0.67	2.02	3.80	1.95	5.38
患病	慢性支气管炎(0~14 岁)	135.07	85.43	142.07	87.45	36.14	124.09	152.18	91.91	162.53
	慢性支气管炎(15 岁以上~)	138.59	135.11	140.57	97.46	87.54	105.77	157.16	152.24	160.12
	哮喘(0~14 岁)	16.48	13.51	17.83	8.85	6.01	11.19	16.32	13.10	17.92
	哮喘(15 岁以上~)	10.88	8.22	11.95	5.64	3.44	7.28	10.73	7.91	11.97
门诊	儿科(0~14 岁)	0.51	0.20	0.76	0.17	0.06	0.27	0.49	0.19	0.73
	内科(15 岁以上~)	1.12	0.65	1.52	0.38	0.21	0.53	1.08	0.62	1.47
合计		335.23	249.61	369.75	211.05	135.60	268.80	371.32	272.46	411.64
GDP		5 492.64	5 492.64	5 492.64	5 801.20	5 801.20	5 801.20	6 282.65	6 282.65	6 282.65
占比/%		6.10	4.54	6.73	3.64	2.34	4.63	5.91	4.34	6.55

2.2.2 健康终点住院、患病、门诊经济损失

健康终点住院、患病、门诊经济损失估算采用疾病成本法,疾病成本包含患者看病期间所有的直接(就诊医药费用)和间接费用(交通、陪护等)。门诊平均费用根据陕西省卫生计生事业发展公报,取部属、省属、地级市属、县级市属和县属的平均费用。呼吸系统疾病平均住院医疗费用和平均住院天数,以肺炎、肺结核、肺源性心脏病、支气管炎等主要疾病病种的平均医疗费用及其平均住院天数来代替;同样,以心血管疾病、充血性心力衰竭、急性心肌梗塞等重要病种平均住院天数来代替心血管疾病

平均住院天数(见表 5)。基于表 5 数据,依据式(4)、(5)计算得各健康终点住院及门诊的经济损失(见表 4)。慢性支气管炎时间界限无法获得,不宜使用疾病成本法。Viscusi 等^[29]的研究发现人们对于避免慢性支气管炎的赋值相当于统计寿命价值的 32%,有研究也获得了一系列慢性支气管炎的生活质量调整年权重,本文中假设慢性支气管炎的单位经济损失为过早死亡经济损失的 40%^[9,30],得慢性支气管炎带来的经济损失(见表 4)。本文假设,西安市居民患病都会去医院就诊,所以由 PM_{2.5} 污染物导致的患病、住院和门诊的经济损失就包括两大部分。

表 5 疾病别直接、间接医疗次均住院费用与平均住院日

Table 5 Hospitalization expenses and the average hospital stay of the disease are not directly and indirectly										
年份	平均住院日/d			次均住院费用/元·例 ⁻¹			次均门诊费用 /元·例 ⁻¹	间接费用/元·例 ⁻¹		日人均 GDP /元
	心血管疾病	呼吸系统疾病	哮喘	心血管疾病	呼吸系统疾病	哮喘		住院	门诊	
2014	9.8 ^[22]	10.8 ^[24]	10.7 ^[31]	24 706 ^[20]	7 987.66 ^[24]	11 196.5 ^[24]	232.2	706 ^[32]	20 ^[32]	175
2015	9.8	10.8	10.7	25 454 ^[21]	7 987.66	11 196.5	237.9	706	20	183
2016	9.8	10.8	10.7	25 454	7 987.66	11 196.5	240.9	706	20	196

本研究结果表明(表 4),因 PM_{2.5} 造成的患病、住院、门诊总经济损失 2014、2015、2016 年分别约 311.23 亿元(95% CI: 249.61~326.75)、211.05 亿元(95% CI: 135.60~268.80)、371.32 亿元(95% CI: 272.46~411.64)。其中呼吸系统疾病住院经济损失分别约为 4.66 亿元(95% CI: 1.91~6.50)、1.73 亿元(95% CI: 0.62~2.73)、4.42 亿元(95% CI: 1.78~6.26);心血管疾病住院经济损失分别约为 3.95 亿元(95% CI: 2.04~5.55)、1.36 亿元(95% CI: 0.67~2.02)、3.80 亿元(95% CI: 1.95~5.38);慢性支气管炎(儿童、成人)经济患病经济损失分别约为 273.66 亿元(95% CI: 220.54~

282.64)、184.90 亿元(95% CI: 123.68~229.86)、309.34 亿元(95% CI: 244.15~322.64);哮喘疾病(儿童、成人)患病经济损失分别约为 27.36 亿元(95% CI: 21.74~29.78)、14.48 亿元(95% CI: 9.44~18.47)、27.05 亿元(95% CI: 21.02~29.89);门诊(儿科、内科)访问经济损失分别约为 1.63 亿元(95% CI: 0.85~2.28)、0.55 亿元(95% CI: 0.27~0.80)、1.57 亿元(95% CI: 0.81~2.20)。从不同健康终点来看,慢性支气管炎造成的经济损失较高,占患病、住院、门诊 3 a 的总经济损失分别约 87.9%、91.1%、89.4%。其次是哮喘患病,门诊访问经济损失最低,仅占三者总损失的

0.52% (2014)、0.27% (2015)、0.45% (2016)。从年龄别来看,造成的儿童(0~14岁)哮喘经济损失比成人(15岁以上~)高,但慢性支气管炎和门诊访问经济损失成人(15岁以上~)略高于儿童(0~14岁)。

3 结论

(1)本研究时段内(2014、2015、2016冬季),PM_{2.5}污染物对西安市常住人口健康影响显著,影响的病例分别约为1 071 338例(95% CI: 646 432 ~ 1 385 847)、438 273例(95% CI: 246 842 ~ 599 989)、1 019 503例(95% CI: 611 407 ~ 1 324 547),即每100个人中,有5~12个人健康会受到影响。

(2)本研究时段内(2014、2015、2016年冬季)由PM_{2.5}造成的经济损失约为335.23亿元(95% CI: 249.61~369.75)、211.05亿元(95% CI: 135.60~268.80)、371.32亿元(95% CI: 272.46~411.64),分别占当年GDP的6.10%(4.54%~6.73%)、3.64%(2.34%~4.63%)、5.91%(4.34%~6.55%)。从GDP占比情况来看,造成的经济损失与当年冬季PM_{2.5}浓度均值呈正相关关系,即PM_{2.5}日均浓度高,造成的经济损失在当年GDP中占比高。反之,平均浓度降低,经济损失GDP占比下降。因此,要减少PM_{2.5}污染物所带来的经济损失,首先要改善空气质量,降低PM_{2.5}浓度。

(3)冬季高浓度PM_{2.5}污染物导致呼吸系统疾病、心血管疾病、慢性支气管炎和哮喘病患者激增,同时,儿科和内科门诊访问量大幅增加,短期内给全市医疗人员工作量与医疗机构公共资源带来较大压力。健康风险年龄别之间存在差异,对哮喘儿童患者的影响比成人显著,而慢性支气管炎成人比儿童显著。

(4)考虑到数据的可得性和我国统计终端的缺失,评价的结果具有一定的不确定性。主要表现在:①部分的医疗数据来自国家卫生服务健康报告与卫生统计年鉴间接推算,将会影响评价结果的确定性;②鉴于我国针对低浓度PM_{2.5}的健康研究较少,以较高浓度获得的暴露-反应关系系数作为研究依据,可能造成最终的评估结果会偏高;③在选取健康终点时选取时并非全面系统地选取,并且在经济损失估算时未考虑预防疾病带来的经济损失,如购买口罩,安装空气净化器等经济损失,所以PM_{2.5}污染物造成的经济损失估算值偏低。因此,本研究对基线健康

状况做了一定的假设,认为西安市和全国大城市的基本情况较为一致,对于无法获得的数据,采用成果参照法。根据暴露-反应关系系数的95%置信区间的估计结果进行低值、中值和高值估算,增加了计算结果范围的可信度。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 孙志豪,崔燕平.PM_{2.5}对人体健康影响研究概述[J].环境科技,2013,26(4):75-78.
Sun Z H, Cui Y P. An overview of PM_{2.5} impacts on human health[J]. Environmental Science and Technology, 2013, 26(4): 75-78.
- [4] Huang W, Cao J J, Tao Y B, et al. Seasonal variation of chemical species associated with short-term mortality effects of PM_{2.5} in Xi'an, a central city in China[J]. American Journal of Epidemiology, 2012, 175(6): 556-566.
- [5] 赵珂,曹军骥,文湘闽.西安市大气PM_{2.5}污染与城区居民死亡率的关系[J].预防医学情报杂志,2011,27(4):257-262.
Zhao K, Cao J J, Wen X M. Correlation between PM_{2.5} pollution in air and mortality of residents in urban area, Xi'an[J]. Journal of Preventive Medicine Information, 2011, 27(4): 257-262.
- [6] 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.
- [7] Zhang D S, Aunan K, Seip H M, et al. The assessment of health damage caused by air pollution and its implication for policy making in Taiyuan, Shanxi, China[J]. Energy Policy, 2010, 38(1): 491-502.
- [8] 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.
- [9] 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 Universitatis Nankaiensis, 2016, **49** (1): 69-77.
- [10] 曾先峰, 王天琼, 李印. 基于损害的西安市大气污染经济损失研究[J]. 干旱区资源与环境, 2015, **29**(1): 105-110.
Zeng X F, Wang T Q, Li Y. Economic loss of air pollution in Xi'an city[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, **29**(1): 105-110.
- [11] 赵越. 大气污染对城市居民的健康效应及经济损失研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2007.
Zhao Y. Study on health effects and economic loss on urban citizens caused by air pollution[J]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2007.
- [12] 戴海夏, 宋伟民, 高翔, 等. 上海市 A 城区大气 PM₁₀、PM_{2.5} 污染与居民日死亡数的相关分析[J]. 卫生研究, 2004, **33** (3): 293-297.
Dai H X, Song W M, Gao X, *et al.* Study on relationship between ambient PM₁₀, PM_{2.5} pollution and daily mortality in a district in Shanghai[J]. Journal of Hygiene Research, 2004, **33** (3): 293-297.
- [13] 董小林. 环境经济学[M]. (第二版). 北京: 人民交通出版社, 2011.
Dong X L. Environmental economics (2nd ed.) [M]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [14] 韩明霞, 过孝民, 张衍桑. 城市大气污染的人力资本损失研究[J]. 中国环境科学, 2006, **26**(4): 509-512.
Han M X, Guo X M, Zhang Y S. The human capital loss of air pollution in cities, China [J]. China Environmental Science, 2006, **26**(4): 509-512.
- [15] 张凡, 苏德奇. PM_{2.5} 对人体健康的影响研究进展[J]. 疾病预防控制通报, 2016, **31**(4): 88-91.
Zhang F, Su D Q. Research advance of effect of PM_{2.5} on human health[J]. Bulletin of Disease Control & Prevention (China), 2016, **31**(4): 88-91.
- [16] 刘帅, 宋国君. PM_{2.5} 日平均浓度与死亡率“剂量-反应”关系 meta 分析[J]. 中国公共卫生, 2017, **33**(1): 14-17.
Liu S, Song G J. Dose-response relationship between daily PM_{2.5} concentration and mortality rate: a meta-analysis [J]. Chinese Journal of Public Health, 2017, **33**(1): 14-17.
- [17] 西安市统计局. 西安统计年鉴 2015[M]. 北京: 中国统计出版社, 2015.
Xi'an Municipal Bureau of Statistics. Xi'an statistical yearbook 2015[M]. Beijing: China Statistics Press, 2015.
- [18] 西安市统计局. 西安统计年鉴 2016[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016.
Xi'an Municipal Bureau of Statistics. Xi'an statistical yearbook 2016[M]. Beijing: China Statistics Press, 2016.
- [19] 西安市统计局. 西安统计年鉴 2017[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
Xi'an Municipal Bureau of Statistics. Xi'an statistical yearbook 2017[M]. Beijing: China Statistics Press, 2017.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
National Center for Cardiovascular Diseases, China. Report on cardiovascular diseases in China 2015 [M]. Beijing: Encyclopedia of China Publishing House, 2016.
- [23] 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.
National Center for Cardiovascular Diseases, China. Report on cardiovascular diseases in China 2016 [M]. Beijing: Encyclopedia of China Publishing House, 2017.
- [24] 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 [EB/OL]. <http://www.nhfp.gov.cn/mohwsbwstjxxzx/s8211/201610/9f109ff40e9346fca76dd82cecf419ce.shtml>, 2016-10-26.
- [25] 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.
- [26] 新华网. 我国哮喘患病率增速明显 [EB/OL]. http://news.xinhuanet.com/local/2016-05/05/c_128958941.htm, 2016-05-05.
- [27] 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 年人口普查资料[M]. 北京: 中国统计出版社, 2012.
- [28] 倪宗瓚. 卫生统计学[M]. (第四版). 北京: 人民卫生出版社, 2000.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] 国家卫生计生委统计信息中心. 2008 年第四次国家卫生服务调查分析报告 [EB/OL]. <http://www.moh.gov.cn/mohwsbwstjxxzx/s8211/201009/49165.shtml>, 2010-09-21.

CONTENTS

Spatial-Temporal Change Evolution of PM _{2.5} in Typical Regions of China in Recent 20 Years	LUO Yi, DENG Qiong-fei, YANG Kun, <i>et al.</i> (3003)
Evaluation the Extent of Health Damage Caused by PM _{2.5} Particulate in Xi'an City	WEI Guo-ru, SHI Xing-min (3014)
Analysis of Chemical Composition, Source and Evolution of Submicron Particles in Xianghe, Hebei Province	JIANG Qi, WANG Fei, SUN Ye-le (3022)
Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Components of PM _{2.5} During Autumn in the Northern Suburb of Nanjing	XU Zu-fei, CAO Fang, GAO Song, <i>et al.</i> (3033)
Comparison of Chemical Components Characteristics of PM _{2.5} Between Haze and Clean Periods During Summertime in Lin'an	LIANG Lin-lin, SUN Jun-ying, ZHANG Yang-mei, <i>et al.</i> (3042)
Characteristics and Sources of Carbon Components in PM _{2.5} During Autumn and Winter in Panjin City	ZHANG Lei, JI Ya-qin, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (3051)
Aerosol Optical Properties and Light Absorption Enhancement of EC During Wintertime in Nanjing	HUANG Cong-cong, MA Yan, ZHENG Jun (3057)
Concentration, Solubility, and Dry Deposition Flux of Trace Elements in Fine and Coarse Particles in Qingdao During Summer	LI Peng-zhi, LI Qian, SHI Jin-hui, <i>et al.</i> (3067)
Characteristics and Sources of Dissolved Heavy Metals in Summer Precipitation of Taiyuan City, China	YE Ai-ling, CHENG Ming-chao, ZHANG Lu, <i>et al.</i> (3075)
Characteristics of and Factors Affecting Atmospheric CO ₂ Concentration in Hangzhou	PU Jing-jiao, XU Hong-hui, JIANG Yu-jun, <i>et al.</i> (3082)
Treatment Status and Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds from Typical Industrial Sources	JING Sheng-ao, WANG Hong-li, ZHU Hai-lin, <i>et al.</i> (3090)
Characteristics of Industrial VOCs Emission Sources and Control Technology Application in a Prefecture-level City Region-Based on Qinhuangdao City	 HU Xu-rui, HU Xiao-yu, WANG Can (3096)
Pollution Condition and Health Risk Assessment of VOCs in Fermentation Exhaust from Penicillin Production	GUO Bin, YAO Rui-jing, ZHANG Shuo, <i>et al.</i> (3102)
Measurements of OC and EC Emission Factors for Light-duty Gasoline Vehicles	HUANG Cheng, HU Qing-yao, LU Jun (3110)
Pollution Levels and Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in Nanjing	TIAN Chun-hui, YANG Ruo-zhu, Gulizhaer Yilihamu, <i>et al.</i> (3118)
Contamination Levels and Source Analysis of Heavy Metals in the Finer Particles of Urban Road Dust from Xi'an, China	SHI Dong-qi, LU Xin-wei (3126)
pCO ₂ in the Main Rivers of the Three Gorges Reservoir and Its Influencing Factors	LUO Jia-chen, MAO Rong, LI Si-yue (3134)
Major Ionic Features and Their Possible Controls in the Surface Water and Groundwater of the Jinghe River	KOU Yong-chao, KUA Kun, LI Zhou, <i>et al.</i> (3142)
Urban Runoff Phosphorus Removal Pathways in Bioretention Systems	LI Li-qing, LIU Yu-qing, YANG Jia-min, <i>et al.</i> (3150)
Succession Characteristics of Phytoplankton Functional Groups and Their Relationships with Environmental Factors in Dianshan Lake, Shanghai	 YANG Li, ZHANG Wei, SHANG Guang-xia, <i>et al.</i> (3158)
Spatio-temporal Variations of Diatom Community and Their Relationship with Water Environment in Fuxian Lake	LI Rui, CHEN Guang-jie, KANG Wen-gang, <i>et al.</i> (3168)
Effects of Algal Blooms and Their Degradation on the Sediment-water Micro-interface	WANG Yong-ping, XIE Rui, CHAO Jian-ying, <i>et al.</i> (3179)
Effect of Biochar on Root Morphological Characteristics of Wetland Plants and Purification Capacity of Constructed Wetland	XU De-fu, PAN Qian-cheng, LI Ying-xue, <i>et al.</i> (3187)
Preparation of Mn-Co/Ceramic Honeycomb Catalyst and Its Performance on Catalytic Ozonation of Hydroquinone	ZHANG Lan-he, GAO Wei-wei, CHEN Zi-cheng, <i>et al.</i> (3194)
Degradation Mechanism of Tetracycline Using Fe/Cu Oxides as Heterogeneous Activators of Peroxymonosulfate	LI Jing, BAO Jian-guo, DU Jiang-kun, <i>et al.</i> (3203)
Behavior and Mechanisms of Cd(II) Adsorption from Water by Niobate-Modified Titanate Nanosheets	KANG Li, LIU Wen, LIU Xiao-na, <i>et al.</i> (3212)
Trace Amounts of Phosphorus Removal Based on the in-suit Oxidation Products of Iron or Manganese in a Biofilter	CAI Yan-an, BI Xue-jun, ZHANG Jia-ning, <i>et al.</i> (3222)
Effect of Preparation Methods on Phosphate Adsorption by Iron-Titanium Binary Oxide: Coprecipitation and Physical Mixing	ZHONG Yan, WANG Jiang-yan, CHEN Jing, <i>et al.</i> (3230)
Effects of Conductivity on Performance of a Combined System of Anaerobic Acidification, Forward Osmosis, and a Microbial Fuel Cell	LU Yu-qin, LIU Jin-meng, WANG Xin-hua, <i>et al.</i> (3240)
COD Requirement for Biological Phosphorus Removal Granule System Under Different Phosphorus Concentrations	LI Dong, CAO Mei-zhong, GUO Yue-zhou, <i>et al.</i> (3247)
Effect of Substrate Concentration on SAD Collaborative Nitrogen and Carbon Removal Efficiency in an ABR Reactor	ZHANG Min, JIANG Ying, WANG Yao-qi, <i>et al.</i> (3254)
Evaluation of Advanced Nitrogen Removal from Coking Wastewater Using Sulfide Iron-containing Sludge as a Denitrification Electron Donor	 FU Bing-bing, PAN Jian-xin, MA Jing-de, <i>et al.</i> (3262)
Stability of Nitrification Combined with Limited Filamentous Bulking Under Intermittent Aeration	GAO Chun-di, SUN Da-yang, AN Ran, <i>et al.</i> (3271)
Filamentous Sludge Microbial Community of a SBR Reactor Based on High-throughput Sequencing	HONG Ying, YAO Jun-qin, MA Bin, <i>et al.</i> (3279)
Impact of Nano Zero-Valent Iron (NZVI) on Methanogenic Activity, Physiological Traits, and Microbial Community Structure in Anaerobic Digestion	 SU Run-hua, DING Li-li, REN Hong-qiang (3286)
Effects of Gas/Water Ratio on the Characteristics of Nitrogen Removal and the Microbial Community in Post Solid-Phase Denitrification Biofilter Process	 ZHANG Qian, JI Fang-ying, FU Xu-fang, <i>et al.</i> (3297)
Comparison of Extraction Methods of Extracellular Polymeric Substances from Activated Sludge	SUN Xiu-yue, TANG Zhu, YANG Xin-ping (3306)
Identification and Characterization of a Hypothermic Alkaliphilic Aerobic Denitrifying Bacterium <i>Pseudomonas monteilii</i> Strain H97	CAI Xi, HE Teng-xia, YE Qing, <i>et al.</i> (3314)
Isolation, Identification, and Biodegradation Behaviors of a Perfluorooctane Sulfonic Acid Precursor (PreFOSs) Degrading Bacterium from Contaminated Soil	 ZHAO Shu-yan, ZHOU Tao, WANG Bo-hui, <i>et al.</i> (3321)
Microbial Community Distributions in Soils of an Oil Exploitation Site	CAI Ping-ping, NING Zhuo, HE Ze, <i>et al.</i> (3329)
Characteristics of Soil Physicochemical Properties and Enzyme Activities over Different Reclaimed Years in a Copper Tailings Dam	WANG Rui-hong, JIA Tong, CAO Miao-wen, <i>et al.</i> (3339)
Risk Analysis of Heavy Metal Contamination in Farmland Soil Around a Bauxite Residue Disposal Area in Guangxi	GUO Ying, LI Yu-bing, XUE Sheng-guo, <i>et al.</i> (3349)
Occurrence and Distribution of Phthalate Esters in Urban Soils of Chongqing City	YANG Zhi-hao, HE Ming-jing, YANG Ting, <i>et al.</i> (3358)
Profile Distribution of Paddy Soil Organic Carbon and Its Influencing Factors in Chengdu Plain	LI Shan, LI Qi-quan, WANG Chang-quan, <i>et al.</i> (3365)
Correlation Between Soil Organic and Inorganic Carbon and Environmental Factors in Cotton Fields in Different Continuous Cropping Years in the Oasis of the Northern Tarim Basin	 ZHAO Jing-jing, GONG Lu, AN Shen-qun, <i>et al.</i> (3373)
Soil Organic Carbon Components and Their Correlation with Soil Physicochemical Factors in Four Different Land Use Types of the Northern Tarim Basin	 AN Shen-qun, GONG Lu, LI Yang-mei, <i>et al.</i> (3382)
Short-term Mechanism of Warming-induced Stability for Organic Carbon in the Karst Plateau Soil	TANG Guo-yong, ZHANG Chun-hua, LIU Fang-yan, <i>et al.</i> (3391)
Effects of Boron Treatment on Arsenic Uptake and Efflux in Rice Seedlings	ZHU Yi, SUN Guo-xin, CHEN Zheng, <i>et al.</i> (3400)
Comparative Analysis of Different Soil Amendment Treatments on Rice Heavy Metal Accumulation and Yield Effect in Pb and Cd Contaminated Farmland	 HU Xue-fang, TIAN Zhi-qing, LIANG liang, <i>et al.</i> (3409)
Seasonal Variation in Surface Ozone and Its Effect on the Winter Wheat and Rice in Nanjing, China	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, WEI Li, <i>et al.</i> (3418)
Hair Mercury Concentrations in Residents of Fuling and Zhongxian in the Three Gorges Reservoir Region and Their Influence Factors	CHENG Nan, XIE Qing, FAN Yu-fei, <i>et al.</i> (3426)
Removal of Typical Antibiotics During Aerobic Composting of Human Feces	SHI Hong-lei, WANG Xiao-chang, LI Qian (3434)
Effect of COD/SO ₄ ²⁻ Ratio on Anaerobic Digestion of Penicillin Bacterial Residues	QIANG Hong, LI Yu-you, PEI Meng-fu (3443)
Characteristics of Odor Emissions from Fresh Compost During Storage and Application	HE Pin-jing, JIANG Ning-ling, XU Xian, <i>et al.</i> (3452)
Effects of the Veterinary Antibiotic Sulfamethazine on Ammonia Volatilization from a Paddy Field Treated with Conventional Synthetic Fertilizer and Manure	 PANG Bing-kun, ZHANG Jing-sha, WU Jie, <i>et al.</i> (3460)