ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第1期

Vol.35 No.1

2014

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35卷 第1期
2014年1月15日

目 次

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 …… 谢元博,陈娟,李巍(1)
长白山 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子季节变化特征研究 …… 赵亚南,王跃思,温天雪,戴冠华(9)
青岛大气颗粒物数浓度变化及对能见度的影响 …… 柯馨姝,盛立芳,孔君,郝泽彤,屈文军(15)
重庆市大气二噁英污染水平及季节变化 …… 张晓岭,卢益,朱明吉,蹇川,郭志顺,邓力,孙静,张芹,罗财红(22)
西南地区再生铝冶炼行业二噁英大气排放 …… 卢益,张晓岭,郭志顺,蹇川,朱明吉,邓力,孙静,张芹(30)
西南地区新型干法水泥生产中的二噁英大气排放 …… 张晓岭,卢益,蹇川,郭志顺,朱明吉,邓力,孙静,张芹(35)
杭州市办公场所室内空气中 PBDEs 的污染现状与特征 …… 蒋欣慰,孙鑫,裴小强,金漫彤,李云龙,沈学优(41)
模拟不同排放源排放颗粒及多环芳烃的粒径分布研究 …… 符海欢,田娜,商惠斌,张彬,叶素芬,陈晓秋,吴水平(46)
川东北地区元素大气沉降通量及其季节变化 …… 童晓宁,周厚云,游镇烽,汤静,刘厚均,黄颖,贺海波(53)
重庆市铁山坪 2001 ~ 2010 年酸沉降变化 …… 余德祥,马萧萧,谭炳全,赵大为,张冬保,段雷(60)
汉江上游金水河流域氮湿沉降 …… 王金杰,张克荣,吴川,张全发(66)
麦秸及其烟尘中正构脂肪酸的组成 …… 刘刚,李久海,吴丹,徐慧(73)
兰州市室内大气降尘环境磁学特征及其随高度变化研究 …… 吴铎,魏海涛,赵瑞瑞,张蕊,刘建宝(79)
中亚热带针阔混交林土壤-大气界面释汞通量研究 …… 马明,王定勇,申源源,孙荣国,黄礼昕(85)
水稻秸秆生物炭对耕地土壤有机碳及其 CO_2 释放的影响 …… 柯跃进,胡学玉,易卿,余忠(93)
黄海和东海海域溶解铋地球化学分布特征 …… 吴晓丹,宋金明,吴斌,李学刚(100)
浑河上游(清原段)水环境中重金属时空分布及污染评价 …… 马迎群,时瑶,秦延文,郑丙辉,赵艳民,张雷(108)
POCIS 采样技术应用于九龙江流域水环境中雌激素的检测 …… 张利鹏,王新红,李永玉,吴玉玲,张祖麟(117)
降雨条件下岩溶地下水微量元素变化特征及其环境意义 …… 陈雪彬,杨平恒,蓝家程,莫雪,师阳(123)
锡林河流域地表水水化学主离子特征及控制因素 …… 唐玺雯,吴锦奎,薛丽洋,张明泉, Frauke Barthold, Lutz Breuer, Hans-Georg Frede (131)
子牙河水系河流氮素组成及空间分布特征 …… 赵钰,单保庆,张文强,王超(143)
水稻种植对中亚热带红壤丘陵区小流域氮磷养分输出的影响 …… 宋立芳,王毅,吴金水,李勇,李裕元,孟岑,李航,张满意(150)
黄东海表层沉积物中磷的分布特征 …… 宋国栋,刘素美,张国玲(157)
河流沉积物中有机磷提取剂(NaOH-EDTA)提取比例与机制研究 …… 张文强,单保庆,张洪,唐文忠(163)
沉积物短期扰动下 BAPP 再生和转化机制 …… 武晓飞,李大鹏,汪明(171)
三峡库区典型农村型消落带沉积物风险评价与重金属来源解析 …… 敖亮,雷波,王业春,周谐,张晟(179)
太湖东部不同类型湖区疏浚后沉积物重金属污染及潜在生态风险评价 …… 毛志刚,谷孝鸿,陆小明,曾庆飞,谷先坤,李旭光(186)
滇池沉积物中主要污染物含量时间分异特征研究 …… 王心宇,周丰,伊旋,郭怀成(194)
浓度层析荧光光谱局部匹配溢油鉴别技术 …… 王春艳,史晓凤,李文东,张金亮(202)
光电 Fenton 技术处理污泥深度脱水液研究 …… 王现丽,王世峰,吴俊峰,濮文虹,杨昌柱,张敬东,杨家宽(208)
同步脱氮除磷颗粒污泥硝化反硝化特性试验研究 …… 刘小英,林慧,马兆瑞,王磊,刘静伟,郭超,姜应和(214)
垃圾填埋场渗滤液短程生物脱氮的长期稳定性实验研究 …… 孙洪伟,郭英,彭永臻(221)
油田区土壤石油烃组分残留特性研究 …… 胡迪,李川,董倩倩,李立明,李广贺(227)
水稻光合同化碳在土壤中的矿化和转化动态 …… 谭立敏,彭佩钦,李科林,李宝珍,聂三安,葛体达,童成立,吴金水(233)
土地利用及退耕对喀斯特山区土壤活性有机碳的影响 …… 廖洪凯,李娟,龙健,张文娟,刘灵飞(240)
水稻土团聚体 Cu^{2+} 吸附过程中铝的溶出及土壤溶液 pH 变化 …… 许海波,赵道远,秦超,李玉姣,董长勋(248)
Cr(Ⅵ)对两种黏土矿物在单一及复合溶液中Cu(Ⅱ)吸附的影响 …… 刘娟娟,梁东丽,吴小龙,屈广周,钱勋(254)
淹水时长对 3 种丛枝菌根(AM)真菌侵染 2 种湿地植物的影响 …… 马雷猛,王鹏腾,王曙光(263)
太湖水质与水生生物健康的关联性初探 …… 周笑白,张宁红,张咏,牛志春,刘雷,于红霞(271)
3 种典型污染物对水生生物的急性毒性效应及其水质基准比较 …… 姜东生,石小荣,崔益斌,李梅(279)
某制药废水对发光细菌急性毒性的评价研究 …… 杜丽娜,杨帆,穆玉峰,余若祯,左剑恶,高俊发,余忻,滕丽君,汤薪瑶(286)
异丙甲草胺与锌共存对斜生栅藻毒性手性差异影响 …… 胡晓娜,张淑娴,陈彩东,刘惠君(292)
Biotic Ligand Model 的简化模型及预测性能评价 …… 王万宾,陈莎,吴敏,苏德丽,赵婧(299)
基于 USEtox 的焦化行业优先污染物筛选排序研究 …… 郝天,杜鹏飞,杜斌,曾思育(304)
微囊藻毒素降解菌 *Paucibacter* sp. CH 菌的分离鉴定及其降解特性 …… 游狄杰,陈晓国,向荟圯,欧阳潦,杨冰(313)
硝酸盐抑制油田采出水中硫酸盐还原菌活性研究 …… 杨德玉,张颖,史荣久,韩斯琴,李光哲,李国桥,赵劲毅(319)
降解纤维素产甲烷的四菌复合系 …… 吴俊妹,马安周,崔萌萌,于清,齐鸿雁,庄绪亮,庄国强(327)
中国陆地生态系统土壤异养呼吸变异的影响因素 …… 谢薇,陈书涛,胡正华(334)
内蒙古羊草草原根呼吸和土壤微生物呼吸区分的研究 …… 史晶晶,耿元波(341)
南京河流夏季水-气界面 N_2O 排放通量 …… 韩洋,郑有飞,吴荣军,尹继福,孙霞(348)
杀菌剂对湖泊水体温室气体浓度分析的影响 …… 肖启涛,胡正华,James Deng,肖薇,刘寿东,李旭辉(356)
生物表面活性剂强化剩余污泥微生物燃料电池产电特性研究 …… 彭海利,张植平,李小明,杨麒,罗琨,易欣(365)
不同硅铝比 Fe-ZSM-5 催化剂对氧化亚氮催化分解性能的研究 …… 卢仁杰,张新艳,郝郑平(371)
硫酸铵和尿素对废物焚烧过程中多种途径生成氯苯类的抑制作用 …… 严密,祁志福,李晓东,胡艳军,陈彤(380)
县域尺度的京津冀都市圈 CO_2 排放时空演变特征 …… 汪浩,陈操操,潘涛,刘春兰,陈龙,孙莉(385)
保水剂性能及其农用安全性评价研究进展 …… 李希,刘玉荣,郑袁明,贺纪正(394)
《环境科学》征订启事(65) 《环境科学》征稿简则(220) 信息(226,270,298,364)

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

谢元博,陈娟,李巍*
(北京师范大学环境学院,水环境模拟国家重点实验室,北京 100875)

摘要: 开展短期内高浓度空气污染造成的人体健康风险评价以及健康经济损失研究,对推进城市大气污染防控,保证人民群众的健康水平具有重要的科学价值和实际意义. 研究选择 2013 年 1 月发生的北京市雾霾重污染事件,采用泊松回归模型评价全市居民对 10 ~ 15 日高浓度 $PM_{2.5}$ 暴露的急性健康损害风险,并采用环境价值评估方法估算人群健康损害的经济损失. 结果表明,短期高浓度 $PM_{2.5}$ 污染对人群健康风险较高,约造成早逝 201 例,呼吸系统疾病住院1 056例,心血管疾病住院 545 例,儿科门诊7 094例,内科门诊16 881例,急性支气管炎10 132例,哮喘7 643例. 相关健康经济损失高达 4.89 亿元(95% CI:2.04 ~ 7.49),其中早逝与急性支气管炎、哮喘三者占总损失的 90% 以上. 建议应针对不同人群不同健康终点的健康风险进行健康预警并开展及早医学干预,以降低类似空气重污染事件给居民健康带来的风险和损失.

关键词:北京居民; 高浓度暴露; $PM_{2.5}$; 健康风险; 损害价值评估
中图分类号: X820.4 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2014)01-0001-08

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

XIE Yuan-bo, CHEN Juan, LI Wei
(State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: It has important scientific value and practical significance for urban atmospheric air pollution control and people health protection to carry out health risk assessment as well as impaired value assessment of short-term high concentrations of air pollution. Using the Poisson regression model and environmental valuation method, this study estimated the health risks and impaired values of Beijing residents in a consecutive high-level $PM_{2.5}$ exposure during the heavy haze pollution occurred from January 10th to 15th, 2013. The results show that, substantial health risks due to $PM_{2.5}$ air pollution were occurred in six pollution days, including 201 cases of premature deaths, 1 056 and 545 cases of hospital admissions for respiratory and cardiovascular diseases, 7 094 and 16 881 cases of pediatric and internal outpatients each, 10 132 cases of acute bronchitis and 7 643 cases of asthma respectively. Correspondingly, approximate 489 (95% CI: 204- 749) million RMB health-related economic loss was evaluated, of which more than 90% was attributable to premature deaths, acute bronchitis and asthma. It is recommended that health risks and economic losses can be reduced through early health warning and timely medical intervention for various groups of people with different health endpoints.

Key words: Beijing resident; high-level exposure; $PM_{2.5}$; health risk; impaired value assessment

伴随着快速工业化和城镇化,我国许多城市的环境空气质量都呈现出恶化趋势,环境空气重污染事件频发,影响范围越来越广,包括北京在内的我国多个城市都曾经出现在世界 10 大空气污染城市名单之中[1],对居民健康和社会经济的危害日趋显著. 受不利天气和污染排放增加等多重因素的影响,包括北京在内涉及我国中东部 130 多万 km^2 的严重雾霾污染事件,更是引起了全社会对大气环境污染及其健康损害的空前关注. 短期高浓度的空气污染对人体健康影响严重,20 世纪著名的世界公害事件如比利时马斯河谷工业区 4 日内 SO_2 污染事件,美国宾夕法尼亚州多诺拉镇 1948 年 6 日内 SO_2 以及粉尘污染事件,40 年代初美国洛杉矶光化学烟雾事件,1952 年英国伦敦 4 日内烟雾事件[2]中,由于大气污染物高浓度暴露水平,引起了不同程度的居民急性死亡、喉痛、咳嗽、呼吸困难等大气污染性疾病、并致使更多人患上支气管炎、冠心病、肺结核乃至癌症. 定量评估高浓度 $PM_{2.5}$ 暴露下的居民健康风险并提出空气重污染事件的健康预警和应急措施意义重大.

健康风险评估目前多采用危险度评价方法,通过评价主要污染物每增高一个单位所产生的健康损失,定量表征污染物浓度变化产生的人体健康效

收稿日期:2013-02-14; **修订日期**:2013-06-26
基金项目:中国清洁发展机制基金项目(1213075); 中央高校基本科研业务费专项(105560GK)
作者简介:谢元博(1986 ~),男,博士, 主要研究方向为大气污染防治、战略环境评价、生态价值评估,E-mail:former_007@163.com
* 通讯联系人,E-mail:weili@bnu.edu.cn

应[3]. 其中,暴露反应关系链接了大气质量变化和人群健康效应终点的变化,是定量评价大气污染健康危害的关键. 国内外针对多种呼吸系统、心脑血管系统疾病发病率、就诊人数与 PM_{10}、SO_2 和 NO_2 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患相关疾病的几率和死亡率之间的相关关系[4~6]. 国内目前在上海、香港、武汉、广州、西安和北京等地分别开展了 PM_{10}, $PM_{2.5}$暴露与城区居民健康影响的相关研究[7~9],但是,针对突发性空气重污染事件的人群健康风险评价和健康预警研究在国内外均属鲜见. 在人群健康风险评估基础上,多以年作为时间尺度评价大气污染健康损害的经济损失[10~12],其中包括对北京市 2000 ~ 2004 年期间以及 2006 年和 2009 年大气污染所开展的健康损失经济价值评估[10~12]. 这些评估大多采用疾病成本法(cost of illness, COI)、人力资本法、支付意愿法(willingness to pay, WTP)等方法[13]. 国内许多城市和地区包括兰州、重庆,天津、江苏、贵州、上海、九江和南宁等均开展了针对大气污染的人群健康支付意愿调查[14~17].

受能源消费和机动车数量快速增长的影响,北京市空气质量仍然较差,在世界卫生组织 2011 年公布的全球 91 个国家1 100个城市中空气质量排名第 1 036位,全市严重污染日占到每年天数的 6% 且有增加的态势[18],主要空气污染物 $PM_{2.5}$长期超标,灰霾问题日趋严重. 因此极有必要对短期的高浓度空气污染健康风险进行识别、评估与防控. 本研究以 2013 年 1 月 10 ~ 15 日的严重雾霾污染事件为背景,选择北京市常住人口作为评估样本并利用主要污染物 $PM_{2.5}$逐日浓度数据,定量评估连续 6 日高浓度 $PM_{2.5}$暴露下的居民健康风险并对潜在的健康损害进行价值估算,以期为改进和完善针对空气重污染事件的健康预警和应急措施提供依据.

1 材料与方法

1.1 资料或数据来源

2013 年 1 月 10 ~ 15 日,北京市 23 个大气环境监测站点的主要污染物均为细颗粒物,本文研究时间段内 $PM_{2.5}$污染数据来源于北京市环境保护局每日公布 23 个大气环境监测站点空气质量数据.

考虑到数据年份的可获得性和统一性,本研究人口及居民健康终点的发病、死亡率统一以 2011 年数据为准,其中以“北京市公共卫生信息中心”公布的 2011 年底全市分区县常住人口作为暴露人群. 实际死亡率以及其他健康终端的基准发生率分别从《2011 年北京市卫生事业发展统计公报》、《2012 年中国卫生统计年鉴》和《北京市 2011 年度卫生与人群健康状况报告》中获得. 评估的参考浓度选取 WHO 制定的健康浓度指导值,$PM_{2.5}$日均浓度为 25 $\mu g \cdot m^{-3}$.

1.2 评估方法

采用空气污染流行病学研究中应用较广的泊松回归模型,评价连续多日高浓度 $PM_{2.5}$暴露下的居民健康急性风险[19],公式如下:

$$E = \exp[\beta(c - c_0)]E_0 \tag{1}$$

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

式中,ΔE 为实际浓度与参考浓度下居民健康效应之差,即由于 $PM_{2.5}$浓度变化带来的居民健康效应变化量; P 为居民数量,万人; β 为暴露-反应关系系数; c 为实际暴露浓度; c_0 为参考浓度; E 为实际浓度下的居民健康效应,E_0 为参考浓度下的居民健康效应,两者常以发病或死亡表示.

定量评估大气污染引起的健康损失并进行货币化估算是环境保护措施成本-效益分析的基础,对加强政府的大气污染治理力度具有重要意义. 采用疾病成本法(COI)估算对高浓度 $PM_{2.5}$暴露引发的各种相关疾病所造成的经济价值损失,基本计算公式为:

$$c_i = (c_{Pi} + GDP_P \times T_{Li}) \times I_i \tag{3}$$

式中,c_i 为 $PM_{2.5}$对健康终点 i 造成的疾病总成本, c_{Pi}为健康终点 i 的单位病例的治疗成本, GDP_P 为北京地区国内生产总值的每日人均值[元·(人·d)$^{-1}$],T_{Li}为因健康终点 i 的疾病导致的误工时间,ΔI_i 为健康终点 i 因 $PM_{2.5}$污染导致的健康效应变化量.

1.3 数据处理

在公式(1)中,北京市常住人口2 018.6万人,人口年总死亡率为 5.9‰,其中心血管疾病死亡率为 2.745 9‰,呼吸系统疾病死亡率为0.621 4‰. 北京市医疗卫生机构总住院率为9.947 5%,其中呼吸系统疾病住院占总住院率的 12.86%,心血管疾病住院占总住院率的 9.94%. 因此,呼吸系统疾病住院率为 1.279%,心血管疾病住院率为 0.989%. 针对 $PM_{2.5}$与相关健康终点的暴露-反应系数,杨敏娟等[7]和谢鹏等[20]提出了适用于中国地区 $PM_{2.5}$健康

效应评估的暴露-反应系数. 黄德生等[21]基于流行病学综合研究成果总结了京津冀地区 $PM_{2.5}$ 引起的各健康终端的暴露-反应系数. 本研究综合以上研究成果,结合北京市实际情况,提取各健康终点基准发生率,$PM_{2.5}$ 污染暴露-健康反应关系系数(β 值)及其 95% 可信限(CI),详见表 1.

综合考虑国内流行病学研究现状及数据的可获取性,本研究所选择的与可吸入颗粒物污染相关的急性健康效应终点包括哮喘患病、急性支气管炎患病、呼吸系统疾病、心血管系统疾病、内科及儿科门诊. 其中呼吸系统疾病住院中不包括哮喘、急性支气管炎患病,门诊诊问包括儿科与内科诊问,主要估算不同年龄阶段人群访问次数.

表 1　主要健康终点的 $PM_{2.5}$ 污染暴露-居民健康反应系数和基准发生率1)

Table 1　Concentration-response (CR) coefficients for mortality and morbidity and reference incidence rates of different health terminals used in this study

健康终点		β 值(95% 置信区间)/%	E 值/‰
早逝	总死亡	0.40(0.19,0.62)	0.016 164 4
	呼吸系统疾病死亡率	1.43(0.85,2.01)	0.001 702 5
	心血管疾病死亡率	0.53(0.15,0.9)	0.007 523 0
住院	呼吸系统	1.09(0,2.21)	0.035 041 1
	心血管	0.68(0.43,0.93)	0.027 090 4
门诊诊问	儿科(0~14 岁)	0.56(0.2,0.9)	0.419 178 1
	内科(15 岁以上)	0.49(0.27,0.7)	1.126 164 4
患病	急性支气管	7.90(2.7,13)	0.104 109 6
	哮喘	2.10(1.45,2.74)	0.153 698 6

1)β 值为 $PM_{2.5}$ 浓度每增加 10 $\mu g \cdot m^{-3}$ 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

健康终点的单位价值乘以 ΔE 就是该健康终点的人群归因经济损失,各健康终点的经济损失相加即为大气 $PM_{2.5}$ 污染的人群总归因经济损失. 考虑到健康的单位经济损失评估方法多样,且不同的评估方法最后结果不一,基于各健康终点经济损失基本数据的可获得性,本研究综合年鉴分析与相关研究成果进行估算,参考《中国卫生统计年鉴(2010)》的相关统计数据进行公式(3)计算,同时综合近年关于空气污染导致的居民健康损害(包括疾病和早逝)的经济价值评估和研究结果(表 2)进行估算.

为评估不同健康终点的经济损失,本研究依据北京地区人均 GDP 增长率和 2012 年人均可支配收入将表 2 中不同研究年份的研究成果最终修正为 2012 年各健康终点经济成本,同时对不同健康终点的经济成本进行纵向比较,取其中的高、中、低经济成本作为本研究的基础数据(表 3)以便更全面的评估.

表 2　相关研究中北京地区空气污染健康损害单位经济成本评估结果

Table 2　Unit cost of resident health damage due to air pollution in Beijing estimated by relevant studies

研究年份	早逝 /万元·例$^{-1}$	急性支气管炎 /元·例$^{-1}$	哮喘 /元·例$^{-1}$	门诊 /元·例$^{-1}$	住院/元·例$^{-1}$ 心血管疾病	住院/元·例$^{-1}$ 呼吸系统疾病	文献
2004	112.1	—	—	231.8	13 463.3	6 648.8	[10]
2006	100.0	—	—	300.0	10 400.0	6 700.0	[11,22]
2009	—	4 186.8	—	322.0	15 028.9		[23]
2010	110.0	—	—	519.7	8 906.5	6 088.0	[24]
	168.0	2 500.1	1 840.3	515.1	16 959.1		[21]

表 3　北京地区 2012 年相关健康终点的单位损害经济成本

Table 3　Unit damage costs of related health terminals in Beijing area in year 2012

损害成本	早逝 /万元·例$^{-1}$	急性支气管炎 /万元·例$^{-1}$	哮喘 /万元·例$^{-1}$	门诊 /万元·例$^{-1}$	住院/万元·例$^{-1}$ 心血管疾病	住院/万元·例$^{-1}$ 呼吸系统疾病
高	238.80	0.52	1.06	0.06	2.87	1.86
中	181.40	0.29	0.64	0.05	1.95	1.42
低	126.50	0.27	0.21	0.04	1.02	1.06

2　结果与讨论

2.1　居民健康风险评价结果

全市主要地区 10~15 日 $PM_{2.5}$ 日均浓度变化如图 1 所示. 可见在雾霾重污染期间,10 日和 11 日全市 $PM_{2.5}$ 浓度逐渐增高,并在 12 日和 13 日到达峰值; 尤其是在 12 日,东城区、西城区、朝阳区、丰台区、石景山区、大兴区、通州区的监测浓度均超过了最高标准限值 500 $\mu g \cdot m^{-3}$,最高值出现在 12 日的通州区(788 $\mu g \cdot m^{-3}$)和朝阳区(768 $\mu g \cdot m^{-3}$).

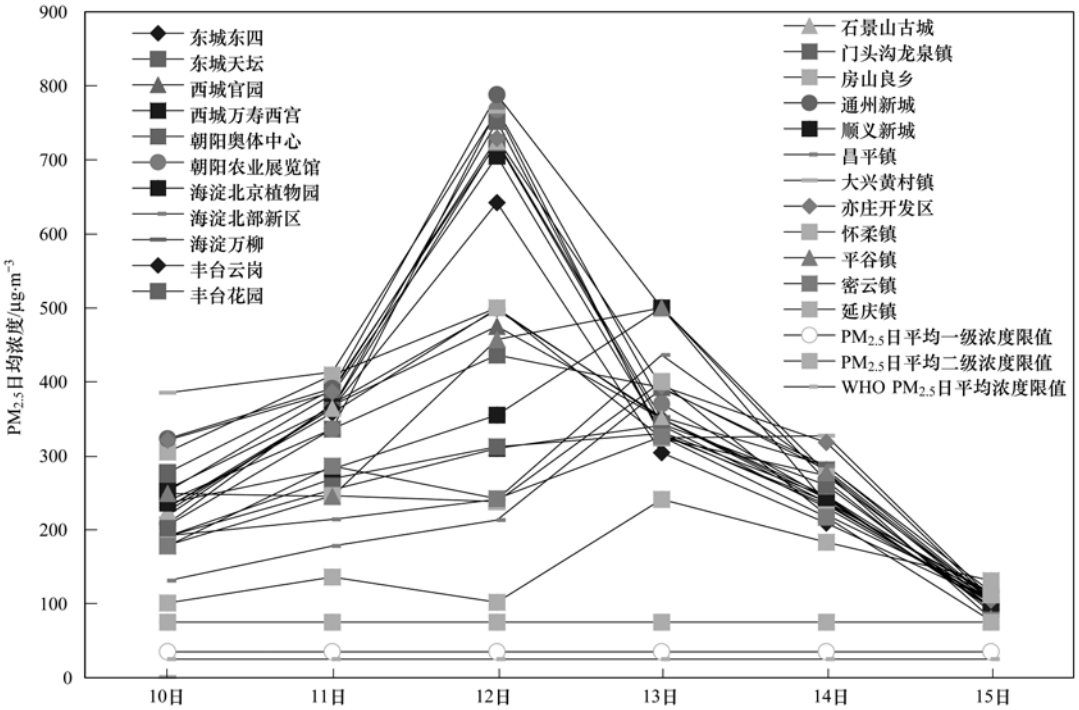

图 1 北京市主要空气质量监测点位 1 月 10 ~ 15 日 $PM_{2.5}$ 日均浓度变化

Fig. 1 Variations of daily averaged $PM_{2.5}$ concentrations at the main air quality monitoring stations in Beijing during the period from January 10th to 15th, 2013

13 日,主城区 $PM_{2.5}$ 浓度有所下降,郊区如昌平(城市清洁对照点)、顺义、平谷、密云、怀柔和延庆等浓度有所上升;此后由于较强冷空气来临,到 14 日浓度出现明显下降,至 15 日部分地区降至二级标准限值(75 $\mu g \cdot m^{-3}$)附近. 在整个研究时段内,$PM_{2.5}$ 逐日平均浓度市区为 306.57 $\mu g \cdot m^{-3}$,郊区为 283.89 $\mu g \cdot m^{-3}$,分别为二级标准限值的 4.09 和 3.79 倍.

通过将研究时段内北京市主要城区常住人口数据、$PM_{2.5}$ 浓度、急性健康效应终点基线数据、暴露-反应关系系数等代入评价模型,计算得到雾霾重污染期间全市居民针对 $PM_{2.5}$ 持续高浓度暴露的急性健康效应(表 4). 为了避免重复计算,评价过程中将不同健康终点的次日影响人数减去前一日受影响人数,作为逐日累积的健康受损人数.

计算结果显示,研究时段内 $PM_{2.5}$ 高水平暴露下北京市人群健康风险将显著增大,受危害总数约 43 553例(95% CI:24 766 ~ 57 332),占常住总人口的 2.2‰. 其中,突发性死亡约 201 例(95% CI:99 ~ 300),呼吸系统疾病住院约为1 056例(95% CI:0 ~ 1 805),心血管疾病住院约 545 例(95% CI:360 ~ 715),儿科门诊 7094 例(95% CI:2 700 ~ 10 764),内科门诊16 881例(95% CI:9 670 ~ 23 260),急性支气管炎10 132例(95% CI:6 116 ~ 11 375),哮喘 7643 例(95% CI:5 820 ~ 9 114).

2.2 健康损害价值评估结果

在人群健康风险评价基础上,结合表 3 中各健康终点的单位损害经济成本,计算得出研究时段内居民健康损失的经济价值,结果见表 5.

结果显示,研究时段内人群健康经济损失均值约为 4.89 亿元(95% CI:2.04 ~ 7.49),约占北京市 2012 年 GDP 的 0.275‰(0.140‰ ~ 0.395‰). 其中,对应高、中、低这 3 个评估标准,居民健康损害经济价值分别为 6.68 亿元(95% CI:3.44 ~ 9.58)、4.83 亿元(95% CI:2.46 ~ 6.98)和 3.15 亿元(95% CI:1.58 ~ 4.57).

结合我国空气环境标准进行超标期间居民健康影响及相关经济损失分析. 重污染期间,$PM_{2.5}$ 日均浓度在《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)二级标准限值 75 $\mu g \cdot m^{-3}$ 基础上每升高 10 $\mu g \cdot m^{-3}$,将会造成北京市常住居民早逝增加 8 例,呼吸系统住院增加 41 例,心血管住院增加 21 例,儿科门诊增加 277 例,内科门诊增加 659 例,急性支气管患病增加 396 例,哮喘患病增加 299 例,共增加健康受损人群 1 701例. 相应增加健康经济损失约1 915.0万元,其中早逝损失1 434.0万元,呼吸系统住院损失 59.7

表 4　雾霾重污染期间持续高浓度 $PM_{2.5}$ 暴露下北京市居民健康风险评估结果

Table 4　Estimated outcomes of resident health risk in exposure of consecutive high-level $PM_{2.5}$ during the period of heavy haze pollution in Beijing

行政区域	人口基数/万人	总死亡	死亡/例		住院/例		门诊/例		患病/例	
			呼吸系统	心血管	呼吸系统	心血管	儿科	内科	急性支气管	哮喘
东城	91.0	10 (5,14)[1)]	3 (2,4)	6 (2,9)	50 (0,85)	26 (17,34)	340 (130,514)	809 (465,1 113)	469 (289,522)	362 (277,430)
西城	124.0	13 (6,19)	4 (3,5)	8 (2,12)	67 (0,115)	35 (23,46)	454 (173,688)	1 081 (620,1 489)	631 (388,702)	486 (371,578)
朝阳	365.8	38 (19,57)	12 (8,15)	23 (7,37)	201 (0,340)	104 (69,136)	1353 (517,2 046)	3 221 (1 849,4 430)	1867 (1 149,2 078)	1441 (1 102,1 711)
海淀	340.2	30 (14,44)	10 (6,13)	18 (5,29)	159 (0,279)	81 (53,107)	1048 (393,1 608)	2 487 (1 413,3 452)	1673 (956,1 908)	1180 (884,1 426)
丰台	217.0	24 (12,35)	7 (5,9)	14 (4,22)	122 (0,206)	64 (42,83)	829 (318,1 250)	1 976 (1 137,2 712)	1111 (693,1 234)	872 (670,1 032)
石景山	63.4	7 (3,10)	2 (1,3)	4 (1,7)	36 (0,61)	19 (13,25)	247 (95,372)	589 (339,807)	327 (205,364)	258 (199,305)
门头沟	29.4	2 (1,4)	1 (0,1)	1 (0,2)	13 (0,23)	6 (4,9)	83 (31,129)	197 (112,275)	143 (79,164)	96 (71,117)
房山	96.7	10 (5,15)	3 (2,4)	6 (2,10)	54 (0,93)	28 (18,37)	365 (138,554)	867 (496,1 197)	509 (316,559)	395 (300,470)
通州	125.0	16 (8,24)	5 (3,6)	10 (3,15)	82 (0,133)	43 (29,56)	566 (220,843)	1 353 (785,1842)	659 (444,714)	567 (444,660)
顺义	91.5	9 (4,13)	3 (2,4)	5 (2,8)	46 (0,80)	24 (16,31)	307 (116,469)	729 (416,1 009)	461 (273,518)	339 (256,407)
昌平	173.8	12 (6,19)	4 (3,6)	8 (2,12)	68 (0,122)	34 (22,46)	445 (166,687)	1 054 (596,1 469)	791 (423,936)	516 (382,630)
大兴	142.9	18 (9,27)	6 (4,7)	11 (3,17)	92 (0,152)	48 (32,63)	633 (245,948)	1511 (873,2 064)	769 (508,831)	646 (503,757)
怀柔	37.1	3 (1,4)	1 (1,1)	2 (1,3)	16 (0,28)	8 (5,10)	101 (38,156)	240 (136,335)	177 (96,206)	117 (87,143)
平谷	41.8	4 (2,6)	1 (1,2)	3 (1,4)	22 (0,38)	11 (7,15)	148 (56,225)	351 (201,485)	209 (128,233)	160 (122,191)
密云	47.1	3 (2,5)	1 (1,2)	2 (1,3)	19 (0,34)	9 (6,13)	122 (45,189)	289 (163,403)	217 (117,253)	142 (105,174)
延庆	31.9	2 (1,2)	1 (0,1)	1 (0,2)	8 (0,16)	4 (3,6)	54 (20,84)	126 (71,178)	119 (55,152)	66 (48,83)
全市	2018.6	201 (99,300)	64 (42,82)	121 (37,193)	1 056 (0,1 805)	545 (360,715)	7 094 (2 700,10 764)	16 881 (9 670,23 260)	10 132 (6 116,11 375)	7 643 (5 820,9 114)

1)表中括号内数值为根据 95% 可信限(CI)预测所得,下同

表 5　$PM_{2.5}$ 重度污染造成的北京居民健康价值损失

Table 5　Estimated losses in economic value of residents' health damage due to severe $PM_{2.5}$ pollution in Beijing

健康终点		健康受损人数(人)	健康损害经济价值(万元)		
			高	中	低
死亡		201 (99, 300)	47 999 (23 641, 71 640)	36 455 (17 956,54 411)	25 427 (12 524, 37 950)
住院	心血管	1 056 (0, 1 805)	3 031 (0, 5 180)	2 059 (0, 3 520)	1 077 (0, 1 841)
	呼吸系统	545 (360, 715)	1 014 (670, 1 330)	774 (511, 1 015)	578 (382, 758)
门诊	儿科	7 094 (2 700, 10 764)	426 (162, 646)	369 (140, 560)	28 (11, 43)
	内科	16 881 (9 670, 23 260)	1 013 (580, 1 396)	878 (503, 1 210)	68 (39, 93)
	急性支气管炎	10 132 (6 116, 11 375)	5 269 (3 180, 5 915)	2 938 (1 774, 3 299)	2 736 (1 651, 3 071)
	哮喘	7 643 (5 820, 9 114)	8 102 (6 169, 9 661)	4 892 (3 725, 5 833)	1 605 (1 222, 1 914)
合计			66 852 (34 403, 95 768)	48 365 (24 608, 69 847)	31 518 (15 828, 45 670)

万元,心血管住院损失 41.5 万元,儿科门诊损失 13.9 万元,内科门诊损失 33.0 万元,急性支气管患病损失 142.5 万元,哮喘患病损失 190.1 万元.

3 讨论

此次评估的重点是雾霾重污染期间典型污染物 $PM_{2.5}$ 对人群健康的影响与经济损失,未考虑其他污染物如 SO_2,NO_x,PM_{10} 等对人群健康的影响. 鉴于各种大气污染物可能对人体健康损害产生协同作用,因此,此次的评估结果有可能低估研究时段 $PM_{2.5}$ 污染导致的急性健康危害. 对比北京市 2009 年 $PM_{2.5}$ 年均低浓度连续 6 日暴露的健康风险评估结果(719 例)[21],本次针对高浓度暴露的急性健康风险评价结果约为其 60 倍,说明此次雾霾重污染事件对居民健康损害的急性效应是十分严重的.

目前 $PM_{2.5}$ 对健康的影响机制尚不完全清晰,因此实际测算的健康终点可能不够全面. 尽管有研究提示肺功能降低、限制活动天数、不良生殖结局等也与 $PM_{2.5}$ 有关,但国内缺乏相关的流行病研究和基础健康资料,因此评估相应的健康损失存在较大的不确定性,依赖于流行病学的研究结果所得到的暴露-反应系数尚待更深入研究. 同时,本次暴露-反应关系的过程本身仍存在不确定因素,例如流行病学研究中对各种混杂因素(如天气、其他污染物、居民暴露模式等)的定义和控制过程中存在的差异会对暴露-反应系数的研究带来一定的困难[25]. 本研究对国内不同地区的暴露-反应关系进行了综合分析并尽量选取了北京市相关研究结果,避免了采用单个研究结果可能导致的误差,也在一定程度上将不确定性控制在相对可靠的范围.

基于有限的流行病学研究得到的 $PM_{2.5}$ 暴露反应关系,难以全面而真实地反映我国城市人群在急性大气污染物暴露下健康反应现状,目前国内大气污染急性健康效应的流行病学研究在国内开展较为罕见,尚需国内同行开展更多的大气污染流行病学研究,特别是严格设计的多城市时间序列研究和病例交叉研究. 另外,本研究发现,$PM_{2.5}$ 高浓度暴露对人群急性支气管和哮喘的患病率影响较大,高浓度颗粒物暴露对儿童呼吸系统疾病如哮喘和支气管炎影响与内科门诊尤为严重. 据相关报道[26],此次雾霾重污染期间北京市儿童医院门诊量最高峰曾达到9 000多人次,呼吸道感染占到内科病患的 50% 以上; 解放军总医院急诊科 1 月 13 日接诊的 500 多名患者中,大部分是呼吸道疾病患者.

当前有学者已提出分病因的暴露反应关系系数通常大于不分病因的暴露反应关系系数[27],但由于我国医疗机构在门诊、急诊登记时并未严格区分病种,以致内科门诊成为唯一可利用的门诊健康终点,因此,本研究有可能低估大气颗粒物污染对呼吸疾病引起的健康终点人数及其他健康终点人群.

在健康损害价值评估计算中,基于 WTP 法的评估方法能反映被测量人群的个人意愿和偏好,相对全面地反映由于疾病或过早死亡给个人带来的经济损失和痛苦等负效用. 人力资本法和 COI 法也被广泛应用于健康效应的经济学评价,但未能全面反映健康损害对人们造成的负效用和福利损失. 有可能低估疾病的经济学价值[28]. 对此,研究在充分参考北京地区早逝与各种疾病成本的相关研究成果基础上,对潜在居民健康损失的经济成本分别进行高、中、低这 3 个层次的估值,这样可在一定程度上提高健康损害价值评估的可靠性. 本研究时段内北京市 $PM_{2.5}$ 高浓度污染所造成的健康经济损失高达 4.89(95% CI:2.04 ~ 7.49)亿元. 早逝占的经济损失最大,其次是哮喘和急性支气管炎的发病,心血管疾病和呼吸系统疾病住院.

研究时段主城区空气污染程度要明显高于郊区,导致位于北京市中心的 6 个城区的急性死亡和患病人数占到健康受损害总人数的 60.2%. 其中,居民健康受损害人数最多的 3 个区依次分别是朝阳、海淀和丰台. 经比较,通州、大兴、石景山和房山这 4 个区的健康风险较高,延庆、昌平、密云和怀柔这 4 个区的健康风险则明显低于其他区. 因此,相对于北部地区,这次空气重污染事件对北京市南部地区居民健康影响较大.

4 建议

在空气重污染期间,即便高浓度的大气污染物暴露持续短短几日,也会导致大多数受影响居民出现不同程度的喉痛、咳嗽、呼吸困难等呼吸系统疾病症状,并可能诱使更多人罹患或加重急性支气管炎、心血管疾病、肺癌等,甚至可能导致敏感人群的急性死亡,由此造成严重的居民健康损害和经济损失. 空气重污染将给相关疾病患者特别是低保家庭带来较大的财务压力. 老人、小孩以及心肺疾病患者是 $PM_{2.5}$ 污染的敏感人群.

(1)在重污染期间应针对退休老人和学龄前儿童因污染患病就医和心肺病患者因病情加重急诊就医实行免费或补贴,这部分成本可通过设立重污染

日敏感人群应急医疗补助专项资金并纳入现行的应急方案来解决. 同时,也可为建立与空气污染相关的居民健康调查统计体系以及开展相关课题研究提供间接支持.

(2)针对重污染期间对人群造成的严重健康经济损失,建议对于重污染天气要尽可能提前预报和预防,在重污染期间除继续加大污染物减排力度之外,还要在重污染日发生前 3 日或 1 周内就要采取各种措施大幅削减主要大气污染物的排放,以此预防或缓解不利天气条件下大气污染物的累积,尽可能降低影响居民健康的污染暴露水平,最大限度地减少受影响人群规模及发病人数.

(3)机动车、燃煤、工业污染和扬尘是北京市大气污染的主要来源. 北京 2012 年末常住人口已经超过2 000万,到 2015 年常住人口将达到2 300万;机动车保有量目前已达 520 万辆,每年 50 亿人次乘坐公共交通出行;全市燃煤总量保持在2 300万 t,汽柴油消费总量达到 630 万 t;全市建筑施工面积仍高达 1.9 亿 m^2,这些使得全市污染物排放总量持续居高不下. 因此可以基本肯定的是,如果还出现类似不利天气条件,极有可能再次发生空气重污染事件. 因此考虑到未来短期内无法实现全年特别是冬季污染物大幅度减排的情况下,应进一步完善针对空气重污染日的健康预警、应急医疗和健康防护措施,最大程度地降低由于空气污染造成的居民健康危害和损失.

5　结论

(1)研究时段内北京市急性人群健康风险显著增大,常住居民中受影响病例约为43 553例(95% CI:24 766 ~ 57 332),即北京目前2 000多万常住人口中,每1 000人中就有 2 ~ 3 人的健康遭受急性损害. 其中,突发死亡 201 例,因突发呼吸系统和心血管疾病住院分别为1 056例和 545 例,儿科和内科门诊分别为7 094例和16 881例,急性支气管炎和哮喘发病分别为10 132例和7 643例.

(2)研究时段内因高浓度 $PM_{2.5}$ 暴露导致的居民健康损害价值总计近 5 亿元,约占北京市 2012 年 GDP 的 0.275‰(95% CI:0.140‰ ~ 0.395‰). 早逝与急性支气管炎、哮喘是健康损失的主要来源,三者占总损失的 90% 以上.

(3)高浓度 $PM_{2.5}$ 重污染期间可能导致内科门诊量和急性支气管炎的患病人数激增,哮喘发病人数和儿科门诊量也会有大幅增加,短期内会对全市主要医疗机构造成较大压力. 对此,建议加大社区医疗单位的应急能力建设和事前准备,不仅可以降低重污染期间全市主要医疗单位的门诊压力,而且可加快对老人、儿童等需要协助就医的易感人群的医疗处置,减少居民患病就医的交通出行量和距离,进一步提高重污染期间医疗应急和健康防护的总体效果.

参考文献:

[1] 张庆丰, 罗伯特·克鲁特斯. 迈向环境可持续的未来——中华人民共和国国家环境分析[M]. 北京: 中国财政经济出版社, 2012. 45-48.

[2] 宫克. 世界八大公害事件与绿色 GDP[J]. 沈阳大学学报, 2005, **17**(4): 3-6, 11.

[3] Cohrssen J J, Covello V T. Risk analysis: a guide to principles and methods for analyzing health and environmental risks [M]. DIANE Publishing, 1999.

[4] Gianicolo E A L, Bruni A, Mangia C, *et al*. Acute effects of urban and industrial pollution in a government-designated "Environmental risk area": the case of Brindisi, Italy [J]. International Journal of Environmental Health Research, 2013, **23**(1): 1-15.

[5] Seaton A, Godden D, MacNee W, *et al*. Particulate air pollution and acute health effects [J]. The Lancet, 1995, **345**(8943): 176-178.

[6] Pope C A, Dockery D W. Acute health effects of PM_{10} pollution on symptomatic and asymptomatic children [J]. American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, 1992, **145**(5): 1123-1128.

[7] 杨敏娟, 潘小川. 北京市大气污染与居民心脑血管疾病死亡的时间序列分析[J]. 环境与健康杂志, 2008, **25**(4): 294-297.

[8] 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.

[9] 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.

[10] Zhang M S, Song Y, Cai X H, *et al*. Economic assessment of the health effects related to particulate matter pollution in 111 Chinese cities by using economic burden of disease analysis [J]. Journal of Environmental Management, 2008, **88**(4): 947-954.

[11] 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.

[12] Hou Q, An X Q, Wang Y, *et al*. An assessment of China's PM_{10}-related health economic losses in 2009 [J]. Science of the Total Environment, 2012, **435-436**(1): 61-65.

[13] 韩茜. 北京市大气污染物中可吸入颗粒物(PM_{10})造成的健康损失研究——人力资本法实例研究[J]. 北方环境, 2011, **23**(11): 150-152.

[14] 岳立, 高新才, 张钦智. 西部城市大气污染支付意愿的实证分析——以兰州市为例[J]. 社科纵横, 2010, **25**(9): 15-18, 39.

[15] Wang H, Mullahy J. Willingness to pay for reducing fatal risk by improving air quality: a contingent valuation study in Chongqing, China [J]. Science of the Total Environment, 2006, **367**(1): 50-57.

[16] Wang H, He J. The Value of Statistical Life: A Contingent Investigation in China [EB/OL]. https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/3905, 2010-09-01.

[17] Krupnick A, Hoffmann S, Qin P. The Willingness to Pay for Mortality Risk Reductions in China [A]. In: Fourth World Congress of Environmental Economists[C], Canada, 2010.

[18] 李金香, 邱启鸿, 辛连忠, 等. 北京秋冬季空气严重污染的特征及成因分析[J]. 中国环境监测, 2007, **23**(2): 89-94.

[19] Wang X P, Mauzerall D L. Evaluating impacts of air pollution in China on public health: implications for future air pollution and energy policies [J]. Atmospheric Environment, 2006, **40**(9): 1706-1721.

[20] 谢鹏, 刘晓云, 刘兆荣, 等. 珠江三角洲地区大气污染对人群健康的影响[J]. 中国环境科学, 2010, **30**(7): 997-1003.

[21] 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.

[22] World Bank. Cost of pollution in China[R]. Washington D C, 2007.

[23] 卫生部. 中国卫生统计年鉴[M]. 北京: 中国协和医科大学出版社, 2010.

[24] He K, Lei Y, Pan X, *et al*. Co-benefits from energy policies in China [J]. Energy, 2010, **35**(11): 4265-4272.

[25] 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.

[26] 曹滢, 陈元, 李莹, 等. 87 小时雾霾天气下的生活扫描[EB/OL]. http://news.xinhuanet.com/politics/2013-01/14/c_114356015.htm. 2013-01-14.

[27] Aunan K, Pan X C. Exposure-response functions for health effects of ambient air pollution applicable for China-a meta-analysis [J]. Science of the Total Environment, 2004, **329**(1): 3-16.

[28] 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.

HUANJING KEXUE Vol. 35 No. 1
Environmental Science (monthly) Jan. 15, 2014

CONTENTS

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 ..... XIE Yuan-bo, CHEN Juan, LI Wei (1)
Seasonal Variation of Water-Soluble Ions in $PM_{2.5}$ at Changbai Mountain ..... ZHAO Ya-nan, WANG Yue-si, WEN Tian-xue, *et al.* (9)
Variation of Atmospheric Particle Number Concentrations in Qingdao and Its Impact on Visibility ..... KE Xin-shu, SHENG Li-fang, KONG Jun, *et al.* (15)
Concentrations of PCDD/Fs in the Atmosphere of Chongqing City and Its Seasonal Variation ..... ZHANG Xiao-ling, LU Yi, ZHU Ming-ji, *et al.* (22)
Atmospheric Emission of PCDD/Fs from Secondary Aluminum Metallurgy Industry in the Southwest Area, China ..... LU Yi, ZHANG Xiao-ling, GUO Zhi-shun, *et al.* (30)
Atmospheric Emission of PCDD/Fs from Modern Dry Processing Cement Kilns with Preheating in the Southwest Area, China ..... ZHANG Xiao-ling, LU Yi, JIAN Chuan, *et al.* (35)
Pollution Status and Characteristics of PBDEs in Indoor Air of Hangzhou ..... JIANG Xin-wei, SUN Xin, PEI Xiao-qiang, *et al.* (41)
Size Distribution of Particle and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Particle Emissions from Simulated Emission Sources ..... FU Hai-huan, TIAN Na, SHANG Hui-bin, *et al.* (46)
Atmospheric Deposition Fluxes and Seasonal Variations of Elements in Northeast of Sichuan, Central China ..... TONG Xiao-ning, ZHOU Hou-yun, YOU Chen-feng, *et al.* (53)
Trend in Acid Deposition at Tieshanping, Chonging During 2001-2010 ..... YU De-xiang, MA Xiao-xiao, TAN Bing-quan, *et al.* (60)
Wet Deposition of Atmospheric Nitrogen of the Jinshui Watershed in the Upper Hanjiang River ..... WANG Jin-jie, ZHANG Ke-rong, WU Chuan, *et al.* (66)
Chemical Compositions of *n*-Alkanoic Acids in Wheat Straw and Its Smoke ..... LIU Gang, LI Jiu-hai, WU Dan, *et al.* (73)
Magnetic Properties of Indoor Dustfall at Different Heights in Lanzhou ..... WU Duo, WEI Hai-tao, ZHAO Rui-rui, *et al.* (79)
Mercury Fluxes from Conifer-Broadleaf Forested Field in Central Subtropical Forest Zone ..... MA Ming, WANG Ding-yong, SHEN Yuan-yuan, *et al.* (85)
Impacts of Rice Straw Biochar on Organic Carbon and CO_2 Release in Arable Soil ..... KE Yue-jin, HU Xue-yu, YI Qing, *et al.* (93)
Geochemical Distribution of Dissolved Bismuth in the Yellow Sea and East China Sea ..... WU Xiao-dan, SONG Jin-ming, WU Bin, *et al.* (100)
Temporal-spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in the Upper Reaches of Hunhe River (Qingyuan Section), Northeast China ..... MA Ying-qun, SHI Yao, QIN Yan-wen, *et al.* (108)
Determination of Estrogenic Compounds in Water of Jiulong River Using Polar Organic Chemical Integrative Sampler ..... ZHANG Li-peng, WANG Xin-hong, LI Yong-yu, *et al.* (117)
Variation Characteristics and Environmental Significant of Trace Elements Under Rainfall Condition in Karst Groundwater ..... CHEN Xue-bin, YANG Ping-heng, LAN Jia-cheng, *et al.* (123)
Major Ion Chemistry of Surface Water in the Xilin River Basin and the Possible Controls ..... TANG Xi-wen, WU Jin-kui, XUE Li-yang, *et al.* (131)
Forms and Spatial Distribution Characteristics of Nitrogen in Ziya River Basin ..... ZHAO Yu, SHAN Bao-qing, ZHANG Wen-qiang, *et al.* (143)
Impact of Rice Agriculture on Nitrogen and Phosphorus Exports in Streams in Hilly Red Soil Earth Region of Central Subtropics ..... SONG Li-fang, WANG Yi, WU Jin-shui, *et al.* (150)
Study on Distribution of Phosphorus in Surface Sediments of the Yellow Sea and the East China Sea ..... SONG Guo-dong, LIU Su-mei, ZHANG Guo-ling (157)
Characterization and Optimization of the NaOH-EDTA Extracts for Solution ^{31}P-NMR Analysis of Organic Phosphorus in River Sediments ..... ZHANG Wen-qiang, SHAN Bao-qing, ZHANG Hong, *et al.* (163)
Regeneration and Transformation of BAPP in Suspended Solids Under Short-term Sediment Disturbance ..... WU Xiao-fei, LI Da-peng, WANG Ming (171)
Sediment Risk Assessment and Heavy Metal Source Analysis in Typical Country Water Level Fluctuated Zone (WLFZ) of the Three Gorges ..... AO Liang, LEI Bo, WANG Ye-chun, *et al.* (179)
Pollution Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments from the Different Eastern Dredging Regions of Lake Taihu ..... MAO Zhi-gang, GU Xiao-hong, LU Xiao-ming, *et al.* (186)
Study on the Stages of Major Sediments in Dianchi Lake ..... WANG Xin-yu, ZHOU Feng, YI Xuan, *et al.* (194)
Oil Spill Identification Using Partial Surface Fitting Method Based on Concentration-Synchronous-Matrix-Fluorescence Spectra ..... WANG Chun-yan, SHI Xiao-feng, LI Wen-dong, *et al.* (202)
Treatment of Sludge Liquor Produced in Deep Dehydration by Photoelectro-Fenton Process ..... WANG Xian-li, WANG Shi-feng, WU Jun-feng, *et al.* (208)
Characteristics of Nitrification and Denitrification for Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal by Granular Sludge ..... LIU Xiao-ying, LIN Hui, MA Zhao-rui, *et al.* (214)
Study on Long-Term Stability of Biological Nitrogen Removal via Nitrite from Real Landfill Leachate ..... SUN Hong-wei, GUO Ying, PENG Yong-zhen (221)
Compositions and Residual Properties of Petroleum Hydrocarbon in Contaminated Soil of the Oilfields ..... HU Di, LI Chuan, DONG Qian-qian, *et al.* (227)
Dynamics of the Mineralization and Transformation of Rice Photosynthesized Carbon in Paddy Soils - a Batch Incubation Experiment ..... TAN Li-min, PENG Pei-qin, LI Ke-lin, *et al.* (233)
Effects of Land Use and Abandonment on Soil Labile Organic Carbon in the Karst Region of Southwest China ..... LIAO Hong-kai, LI Juan, LONG Jian, *et al.* (240)
Aluminum Dissolution and Changes of pH in Soil Solution During Sorption of Copper by Aggregates of Paddy Soil ..... XU Hai-bo, ZHAO Dao-yuan, QIN Chao, *et al.* (248)
Effect of Cr(Ⅵ) Anions on the Cu(Ⅱ) Adsorption Behavior of Two Kinds of Clay Minerals in Single and Binary Solution ..... LIU Juan-juan, LIANG Dong-li, WU Xiao-long, *et al.* (254)
Effect of Flooding Time Length on Mycorrhizal Colonization of Three AM Fungi in Two Wetland Plants ..... MA Lei-meng, WANG Peng-teng, WANG Shu-guang (263)
Preliminary Study on the Relationship Between the Water Quality and the Aquatic Biological Health Status of Taihu Lake ..... ZHOU Xiao-bai, ZHANG Ning-hong, ZHANG Yong, *et al.* (271)
Acute Toxicity of Three Typical Pollutants to Aquatic Organisms and Their Water Quality Criteria ..... JIANG Dong-sheng, SHI Xiao-rong, CUI Yi-bin, *et al.* (279)
Evaluation of the Acute Toxicity of Pharmaceutical Wastewater to Luminescent Bacteria ..... DU Li-na, YANG Fan, MU Yu-feng, *et al.* (286)
Influence of the Coexistence of Zn^{2+} on the Enantioselective Toxicity of Metolachlor to *Scenedesmus obliquus* ..... HU Xiao-na, ZHANG Shu-xian, CHEN Cai-dong, *et al.* (292)
Simplification of Biotic Ligand Model and Evaluation of Predicted Results ..... WANG Wan-bin, CHEN Sha, WU Min, *et al.* (299)
Priority Pollutants Ranking and Screening of Coke Industry based on USEtox Model ..... HAO Tian, DU Peng-fei, DU Bin, *et al.* (304)
Isolation, Identification and Characterization of a Microcystin-degrading Bacterium *Paucibacter* sp. Strain CH ..... YOU Di-jie, CHEN Xiao-guo, XIANG Hui-yi, *et al.* (313)
Inhibition of the Activity of Sulfate-reducing Bacteria in Produced Water from Oil Reservoir by Nitrate ..... YANG De-yu, ZHANG Ying, SHI Rong-jiu, *et al.* (319)
Bioconversion of Cellulose to Methane by a Consortium Consisting of Four Microbial Strains ..... WU Jun-mei, MA An-zhou, CUI Meng-meng, *et al.* (327)
Factors Influencing the Variability in Soil Heterotrophic Respiration from Terrestrial Ecosystem in China ..... XIE Wei, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua (334)
Study on the Distinguishing of Root Respiration from Soil Microbial Respiration in a *Leymus chinensis* Steppe in Inner Mongolia, China ..... SHI Jing-jing, GENG Yuan-bo (341)
Nitrous Oxide Flux at the Water-Air Interface of the Rivers in Nanjing During Summer ..... HAN Yang, ZHENG You-fei, WU Rong-jun, *et al.* (348)
Effects of Antiseptic on the Analysis of Greenhouse Gases Concentrations in Lake Water ..... XIAO Qi-tao, HU Zheng-hua, James Deng, *et al.* (356)
Electricity Generation of Surplus Sludge Microbial Fuel Cell Enhanced by Biosurfactant ..... PENG Hai-li, ZHANG Zhi-ping, LI Xiao-ming, *et al.* (365)
Fe-ZSM-5 Catalysts with Different Silica-Alumina Ratios for N_2O Catalytic Decomposition ..... LU Ren-jie, ZHANG Xin-yan, HAO Zheng-ping (371)
Inhibition of Chlorobenzene Formation via Various Routes During Waste Incineration by Ammonium Sulfate and Urea ..... YAN Mi, QI Zhi-fu, LI Xiao-dong, *et al.* (380)
County Scale Characteristics of CO_2 Emission's Spatial-Temporal Evolution in the Beijing-Tianjin-Hebei Metropolitan Region ..... WANG Hao, CHEN Cao-cao, PAN Tao, *et al.* (385)
Characterization and Soil Environmental Safety Assessment of Super Absorbent Polymers in Agricultural Application ..... LI Xi, LIU Yu-rong, ZHENG Yuan-ming, *et al.* (394)

《环境科学》第6届编辑委员会

主　编：欧阳自远

副主编：赵景柱　郝吉明　田　刚

编　委：（按姓氏笔画排序）

万国江　王华聪　王凯军　王绪绪　田　刚　田　静　史培军
朱永官　刘志培　汤鸿霄　陈吉宁　孟　伟　周宗灿　林金明
欧阳自远　赵景柱　姜　林　郝郑平　郝吉明　聂永丰　黄　霞
黄　耀　鲍　强　潘　纲　潘　涛　魏复盛

环境科学

（HUANJING KEXUE）

（月刊　1976年8月创刊）

2014年1月15日　35卷　第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

（Monthly　Started in 1976）

Vol. 35　No. 1　Jan. 15, 2014

主　管	中国科学院	**Superintended** by	Chinese Academy of Sciences
主　办	中国科学院生态环境研究中心	**Sponsored** by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协　办	（以参加先后为序） 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	**Co-Sponsored** by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主　编	欧阳自远	**Editor-in -Chief**	OUYANG Zi-yuan
编　辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱（海淀区双清路18号，邮政编码：100085） 电话：010-62941102，010-62849343 传真：010-62849343 E-mail：hjkx@rcees.ac.cn http://www.hjkx.ac.cn	**Edited** by	The Editorial Board of Environmental Science（HUANJING KEXUE） P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel：010-62941102, 010-62849343; Fax：010-62849343 E-mail：hjkx@rcees.ac.cn http://www.hjkx.ac.cn
出　版	科学出版社 北京东黄城根北街16号 邮政编码：100717	**Published** by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing　100717, China
印刷装订	北京北林印刷厂	**Printed** by	Beijing Bei Lin Printing House
发　行	科学出版社 电话：010-64017032 E-mail：journal@mail.sciencep.com	**Distributed** by	Science Press Tel：010-64017032 E-mail：journal@mail.sciencep.com
订 购 处	全国各地邮电局	**Domestic**	All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 （北京399信箱）	**Foreign**	China International Book Trading Corporation（Guoji Shudian）, P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号：ISSN 0250-3301 / CN 11-1895/X　　**国内邮发代号**：2-821

国内定价：90.00元　　**国外发行代号**：M 205

国内外公开发行