环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2019
Vol.40 No.6
第40卷 第6期

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第 40 卷　第 6 期
2019 年 6 月 15 日

目　次

万方知库 Eco-Environmental Knowledge Web

环 境 科 学
Environmental Science

第 40 卷 第 6 期 2019 年 6 月
Vol. 40, No. 6 Jun., 2019

2014 ~ 2016 年间郑州市控制 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 污染的健康效益评估

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

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

摘要: 根据郑州市 2014 ~ 2016 年间大气中 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 年平均浓度数值, 采用泊松回归相对危险模型, 评估了控制 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 污染后所能带来的 95% 置信区间下的健康效应及健康效益. 结果表明, 2014 ~ 2016 年间, PM_{10} 浓度达到二级限值后所带来的经济效益(以亿元计, 括号中为置信区间, 下同)分别为 181.8 (150.4, 211.2)、242.5 (202.5, 279.4) 和 206.2 (173.3, 239.2), 分别占郑州市当年生产总值的 2.7%、3.3% 和 2.5%; $PM_{2.5}$ 浓度达标后所带来的经济效益分别为 178.8 (143.7, 211.6)、216.5 (174.6, 255.3) 和 172.5 (137.8, 205.5), 分别占郑州市当年生产总值的 2.6%、3.0% 和 2.1%. PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度达标后, 城镇受益人数高于农村, 急性支气管炎减少人数高于其他健康终端, 对于慢性支气管炎, 成人受益比儿童大, 哮喘则相反. 慢性支气管炎人数减少带来的健康经济效益最高, 其次为哮喘, 门诊和住院的健康效益最低.

关键词: PM_{10} 和 $PM_{2.5}$; 健康效应; 健康效益; 城镇; 乡村

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

Health Benefit Evaluation for PM_{10} and $PM_{2.5}$ Pollution Control in Zhengzhou, China, 2014-2016

HAN Shi-jie[1], WANG Jia[2], YAN Qi-she[1], YANG Liu-ming[1], ZHAO Qing-yan[1], WANG Shen-bo[1], LI Chen[1], ZHANG Yi-shun[1], ZHANG Rui-qin[1*]

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

Abstract: Based on the annual average concentration values, the health effects and health benefits as well as 95% confidence intervals of PM_{10} and $PM_{2.5}$ pollution control from 2014 to 2016 in Zhengzhou were evaluated by applying the Poisson regression relative risk model. Results showed that the health benefits of PM_{10} pollution control were 18.18 billion RMB (15.04, 21.12), 24.25 billion RMB (20.25, 27.94), and 20.62 billion RMB (17.33, 23.92), which accounted for 2.7%, 3.3%, and 2.5% of the GDP of Zhengzhou, respectively, in 2014-2016. The health benefits of $PM_{2.5}$ pollution control were 17.88 billion RMB (14.37, 21.16), 21.65 billion RMB (17.46, 25.53), and 17.25 billion RMB (13.78, 20.55), which accounted for 2.6%, 3.0%, and 2.1% of the GDP of Zhengzhou, respectively, in 2014-2016. After the PM_{10} and $PM_{2.5}$ pollution was controlled, the number of urban beneficiaries was higher than that of rural areas, and acute bronchitis beneficiaries were higher than the beneficiaries of other health end-points. For chronic bronchitis, adults benefited more than children, while the opposite occurred for asthma. In this study, chronic bronchitis had the highest health benefit, followed by asthma, and outpatient and inpatient setting had the lower health benefits.

Key words: PM_{10} and $PM_{2.5}$; health effects; health benefit; urban; rural

近年来, 郑州市空气质量情况不容乐观, 其主要大气污染物为颗粒物[1]. 颗粒物中的 PM_{10} 又称可吸入颗粒物, $PM_{2.5}$ 更可通过呼吸道沉积在肺泡中, 进入血液循环, 由此造成的居民健康危害及经济损失较大[2]. 因此有必要定量评估大气中 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 污染的健康危害, 并进行经济学评价[3, 4]. 目前多采用流行病学研究得出的暴露-反应关系来评估大气中 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 造成的健康损失, 并将其货币化[5]. 如阚海东等[6]、黄德生等[7] 以及魏国茹等[8] 分别评估了上海、京津冀地区以及西安市 $PM_{2.5}$ 浓度达到空气质量标准后所实现的健康效益, 表明 $PM_{2.5}$ 污染对当地居民健康影响显著, 造成的经济损失较大.

郑州市是国家重要的交通枢纽, 同时也是国家中心城市之一, 但目前对该地区 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的健康效益评估的研究还相对较少. 李慧娟等[9] 对 2015 年郑州市 $PM_{2.5}$ 健康风险和经济损失进行评价, 结果表明郑州市健康风险和经济损失问题突出. 但李慧娟等[9] 以市区常住人口作为暴露人口, 未考虑农村暴露人口和 PM_{10} 的健康影响. 事实上, 由于城镇和农村地区人均收入水平、人口数量、消费观念、医疗费用的差异, 控制 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 污染的健康效

收稿日期: 2018-10-30; **修订日期**: 2019-01-07
基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0212400)
作者简介: 韩士杰(1994 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气环境污染与防治, E-mail: hansj15237124500@163.com
* 通信作者, E-mail: rqzhang@zzu.edu.cn

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

1 材料与方法

1.1 评估方法

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

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

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

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

1.1.1 环境健康效应评估

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

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

$$\Delta E = P \times (E - E_0) = P \times E \times \left[1 - \frac{1}{\exp[\beta(c - c_0)]}\right] \tag{3}$$

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

1.1.2 环境健康价值评估

参考文献[6, 7], 采用统计学意义上的生命价值(value of a statistical life, VOSL), 即人们为降低死亡风险而愿意付出的代价并用货币化进行衡量的方法, 评估由于居民早逝而带来的经济损失. 目前郑州地区并未开展VOSL的研究, 因此, 本文参考谢旭轩[11]在2010年对北京市VOSL的研究结果, 考虑到两地的收入水平差距, 以人均可支配收入为指标, 评估郑州地区VOSL值, 公式如下[4, 7, 12]:

$$\text{VOSL}_{ZZ} = \text{VOSL}_{BJ} \times \left(\frac{G_{ZZ}}{G_{BJ}}\right)^e \tag{4}$$

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

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

$$\text{EC}_i = (\text{EC}_{pi} + G \times T_i) \times \Delta E \tag{5}$$

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

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

1.2 数据来源

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

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

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

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

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

表 1　不同健康终端的 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 暴露-反应系数与基准发生率

Table 1　PM_{10} and $PM_{2.5}$ exposure-reaction coefficients and baseline incidence data for different health end-points

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

表 2　各健康终端次均住院或门诊天数及医疗费用

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

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

2　结果与讨论

2.1　PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度分析

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

2.2　人群健康效应变化

如表 3 所示，在 2014 ~2016 年间，PM_{10} 达到标准限值后，所受益人数(以万人计，括号中为 95% 置信区间)分别为 35.7 (19.1, 50.0)、45.9 (24.9, 63.5) 和 37.2 (19.8, 52.4). 城镇受益人数明显高于农村受益人数，分别占总受益人数的 68.3%、69.9% 和 71.2%，且城镇地区哮喘(15 岁及以上)受益人数是农村的 3.4 ~3.9 倍，表明空气质量改善后城镇居民受影响更大. 各健康终端对 PM_{10} 的敏感程度不同，其中门诊减少的人数远高于住院，急性支气管炎受益人数远高于慢性支气管炎. 急性支气管炎、哮喘和内科人群受益最大，3 种健康终端受益人数占全部受益人数的 70.6% ~80.6%. 心血管疾病和早逝人数减少较少，仅占全部人数的 1.2% ~1.3%. 在不同年龄阶段，受益人数也有所不同，对于慢性支气管炎，成人(15 岁及以上)受益人数高于儿童(0 ~14 岁)，而哮喘受益人数是儿童高于成人.

表 3 PM_{10}达到空气质量标准所带来的健康效应/人

Table 3 Health effects of achieving the PM_{10} air quality standard/person

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

1)均值及 95% 置信区间, 下同

如表 4 所示, 在 2014~2015 年间, $PM_{2.5}$达到二级浓度限值后, 所受益人数(以万人计, 括号中为 95% 置信区间)分别为 35.4 (18.3, 49.9)、41.3 (21.5, 57.8) 和 31.4 (16.0, 44.9). 其中城镇受益人数占总受益人数的 68.5%、69.8% 和 71.3%. 急性支气管炎、哮喘和内科人群受益最大, 2014~2016 年间, 3 种健康终端受益人数占全部受益人数的 79.3%~80.1%. 心血管疾病和早逝人数减少较少, 仅占全部人数的 0.9%. 不同年龄阶段, 受益人数分布规律与 PM_{10}浓度达标后相同. 本研究中总受

表 4 $PM_{2.5}$达到二级空气质量标准所带来的健康效应/人

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

项目	健康终端	2014 年		2015 年		2016 年	
		城镇	农村	城镇	农村	城镇	农村
早逝	死亡率	588 (281, 906)	273 (130, 420)	737 (352, 1 134)	320 (153, 493)	649 (310, 1 002)	265 (127, 409)
住院	呼吸系统疾病	4 120 (0, 8 114)	2 510 (0, 4 942)	4 925 (0, 9 657)	2 813 (0, 5 515)	3 685 (0, 7 293)	1 976 (0, 3 911)
	心血管疾病	1 604 (1 021, 2 179)	702 (447, 954)	1 921 (1 224, 2 607)	788 (502, 1 070)	1 432 (910, 1 948)	552 (351, 751)
门诊	儿科	18 310 (6 601, 29 165)	8 494 (3 062, 13 530)	24 170 (8 727, 38 448)	10 512 (3 796, 16 722)	19 500 (7 019, 31 110)	7 965 (2 867, 12 707)
	内科	46 123 (25 562, 65 527)	21 397 (11 859, 30 399)	55 896 (31 006, 79 346)	24 311 (13 485, 34 510)	41 182 (22 801, 5 8564)	16 821 (9 313, 23 921)
患病	急性支气管炎	81 277 (31 663, 118 347)	37 705 (14 689, 54 903)	94 740 (37 614, 135 678)	41 205 (16 359, 59 010)	74836 (28 522, 111 121)	30 567 (11 650, 45 387)
	慢性支气管炎 (0~14 岁)	8 989 (7 579, 10 322)	5 448 (4 593, 6 256)	10 592 (8 959, 12 126)	6 019 (5 090, 6 890)	8 174 (6 866, 9 419)	4 362 (3 664, 5 026)
	慢性支气管炎 (≥15 岁)	12 069 (10 384, 13 643)	7 315 (6 294, 8 269)	14 119 (12 197, 15 899)	8 023 (6 931, 9 034)	11 066 (9 477, 12 565)	5 905 (5 057, 6 705)
	哮喘(0~14 岁)	43 143 (28 374, 57 167)	20 015 (13 163, 26 520)	50 573 (33 554, 66 409)	21 996 (14 593, 28 883)	39 466 (25 694, 52 847)	16 120 (10 495, 21 585)
	哮喘(≥15 岁)	26 237 (13 618, 36 717)	7 607 (3 949, 10 646)	30 833 (16 178, 42 726)	8 381 (4 398, 11 614)	23 931 (12 268, 33 875)	6 109 (3 132, 8 648)

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

2.3　健康经济效益

如表 5 所示，2014 ~2016 年间，控制 PM_{10} 污染后所带来的健康经济效益(以亿元计，括号内为 95% 置信区间)分别为 181.8(150.4，211.2)、242.5(202.5，279.4)和 206.2(173.3，239.2)，分别占郑州市当年生产总值的 2.7%、3.3% 和 2.5%，稍高于吕铃钥等[4]对京津冀地区的研究. 由于受益人数和次均医疗费用的不同，各健康终端对总的健康效益贡献也有所差距. 其中慢性支气管炎贡献最多，分别为 150.3(128.3，171.1)、200.0(172.0，226.3)和 169.2(144.5，192.8)，分别占总效益的 82.7%、82.5% 和 82.1%，占比高于文献[4]的研究；其次为早逝，分别占总效益的 6.0%、6.7% 和 7.7%，占比远低于文献[4]的研究. 上述结果可能与不同地区的污染水平和经济发展情况有关，不同的污染水平导致受益人数不同，而经济发展情况导致 VOSL 有所差异. 本文中门诊和住院人数较少，带来的经济效益贡献最小，仅占全部效益的 1.1% ~1.2%. 尽管急性支气管炎受益人数最多，但由于其次均医疗费用相对较低，其总的经济效益贡献也处于较低水平. 由于医疗费用、住院天数和暴露人口数目的差距，各健康终端在城镇与农村之间的健康经济效益贡献有所差距，城镇总体贡献明显高于农村，分别占总经济效益的 64.3%、65.8% 和 67.3%. 城镇中各健康终端的健康效益分别是农村的 1.6 ~4.1、1.8 ~4.2 和 1.8 ~4.4 倍. 不同年龄阶段，健康经济效益贡献不同，对于慢性支气管炎，成人(15 岁及以上)贡献高于儿童(0 ~14 岁)，而哮喘则是儿童贡献高于成人.

表 5　PM_{10} 达到二级空气质量标准所带来的健康效益/亿元

Table 5　Health benefits of achieving the PM_{10} air quality standard/hundred million RMB

<table>
<tr><th rowspan="2">项目</th><th rowspan="2">健康终端</th><th colspan="2">2014 年</th><th colspan="2">2015 年</th><th colspan="2">2016 年</th></tr>
<tr><th>城镇</th><th>农村</th><th>城镇</th><th>农村</th><th>城镇</th><th>农村</th></tr>
<tr><td>早逝</td><td>死亡率</td><td>8.8
(8.1, 9.7)</td><td>2.2
(2.0, 2.4)</td><td>13.1
(12.1, 14.4)</td><td>3.1
(2.9, 3.5)</td><td>12.9
(11.9, 14.2)</td><td>2.9
(2.7, 3.2)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">住院</td><td>呼吸系统疾病</td><td>0.5
(0.4, 0.6)</td><td>0.3
(0.2, 0.4)</td><td>0.7
(0.5, 0.9)</td><td>0.4
(0.3, 0.5)</td><td>0.6
(0.4, 0.7)</td><td>0.3
(0.2, 0.4)</td></tr>
<tr><td>心血管疾病</td><td>0.6
(0.3, 0.9)</td><td>0.3
(0.2, 0.4)</td><td>0.8
(0.5, 1.2)</td><td>0.3
(0.2, 0.5)</td><td>0.7
(0.4, 0.944)</td><td>0.2
(0.1, 0.4)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">门诊</td><td>儿科</td><td>0.1
(0.0, 0.1)</td><td>0.0
(0.0, 0.1)</td><td>0.1
(0.0, 0.2)</td><td>0.1
(0.0, 0.1)</td><td>0.1
(0.044, 0.2)</td><td>0.0
(0.0, 0.1)</td></tr>
<tr><td>内科</td><td>0.2
(0.1, 0.3)</td><td>0.1
(0.0, 0.1)</td><td>0.3
(0.2, 0.5)</td><td>0.1
(0.1, 0.2)</td><td>0.2
(0.1, 0.3)</td><td>0.1
(0.0, 0.1)</td></tr>
<tr><td rowspan="5">患病</td><td>急性支气管炎</td><td>1.5
(0.6, 2.1)</td><td>0.7
(0.3, 1)</td><td>2.0
(0.8, 2.8)</td><td>0.9
(0.4, 1.2)</td><td>1.7
(0.7, 2.5)</td><td>0.7
(0.3, 1.0)</td></tr>
<tr><td>慢性支气管炎
(0 ~14 岁)</td><td>40.0
(33.7, 45. 9)</td><td>24.2
(20.4, 27.8)</td><td>54.9
(46.1, 62.7)</td><td>31.2
(26.5, 35.6)</td><td>47.1
(39.8, 54.1)</td><td>25.1
(21.2, 28.9)</td></tr>
<tr><td>慢性支气管炎
(≥15 岁)</td><td>53.6
(46.2, 60. 7)</td><td>32.5
(28.0, 36.8)</td><td>72.7
(63.1, 81.6)</td><td>41.3
(35.8, 46.4)</td><td>63.3
(54.5, 71.6)</td><td>33.8
(29.1,38.2)</td></tr>
<tr><td>哮喘
(0 ~14 岁)</td><td>7.2
(4.7, 9.6)</td><td>3.4
(2.2, 4.4)</td><td>9.3
(6.1, 12.0)</td><td>4.0
(2.7, 5.2)</td><td>7.6
(5.0, 10.1)</td><td>3.1
(2.0, 4.1)</td></tr>
<tr><td>哮喘
(≥15 岁)</td><td>4.4
(2.3, 6.2)</td><td>1.3
(0.7, 1.8)</td><td>5.6
(3.0, 7.8)</td><td>1.5
(0.8, 2.1)</td><td>4.6
(2.4, 6.5)</td><td>1.2
(0.6, 1.7)</td></tr>
</table>

如表 6 所示，2014 ~2016 年间，$PM_{2.5}$ 达到二级浓度限值后所带来的健康经济效益(以亿元计，括号内为 95% 置信区间)分别为 178.8(143.7，211.6)、216.5(174.6，255.3)和 172.5(137.8，205.5)，分别占郑州市当年生产总值的 2.6%、3.0% 和 2.1%，稍高于吕铃钥等[4]和魏国茹等[8]的研究. 相比于李慧娟等[9]的研究，由于各健康终端医疗费用和受益人数的不同，尤其是增添了哮喘这一健康终端，本文中 $PM_{2.5}$ 达标后的健康经济效益约是文献[9]的 1.5 ~1.9 倍. 本研究中慢性支气管炎对总经济效益的贡献最高，分别占了 84.2%、84.3% 和 84.1%. 门诊和住院人数减少带来的经济效益仍然最低，仅占全部效益的 0.8% ~1.0%. 在城镇地区，$PM_{2.5}$ 浓度达标后带来的经济效益占全部效益的 67.1%、68.3% 和 69.7%，与 PM_{10} 浓度达标后经济效益占比持平. 不同年龄阶段，经济效益贡献有的分布规律与 PM_{10} 浓度达标后相同.

随着城镇化进程的推进，暴露于 PM_{10} 和

$PM_{2.5}$污染下的城镇居民数增加，而如住院等的健康终端次均医疗费用逐年上升，因此有必要控制 PM_{10}和 $PM_{2.5}$浓度，减少因其污染而造成的健康经济损失. 在 2014 ~ 2016 年间，$PM_{2.5}$浓度占 PM_{10}的 54.4% ~ 60.4%，而健康效应占 83.6% ~ 99.2%，经济效益占 83.6% ~ 98.3%，因此当优先控制 $PM_{2.5}$，降低其浓度的同时达到更大的经济效益.

表 6 $PM_{2.5}$达到二级空气质量标准所带来的健康效益/亿元

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

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

3 结论

(1) 在 2014 ~ 2016 年间，郑州市 PM_{10}和 $PM_{2.5}$污染较为严重. 控制 PM_{10}和 $PM_{2.5}$污染后，受益人数分别为 35.7 ~ 45.9 万和 35.4 ~ 41.3 万. 城镇受益人数占总受益人数的 68.3% ~ 71.2% 和 68.5% ~ 71.3%. 其中急性支气管炎患病人数下降最多，其次为哮喘患病和内科门诊. 不同年龄阶段，对于慢性支气管炎，成人受益比儿童更大，哮喘则相反.

(2) 控制 PM_{10}和 $PM_{2.5}$污染后，所带来的健康经济效益分别为 181.8 (150.4, 211.2) ~ 242.5 (202.5, 279.4) 亿元和 172.5 (137.8, 205.5) ~ 216.5 (174.6, 255.3) 亿元，分别占当年生产总值的 2.5% ~ 3.3% 和 2.1% ~ 3.0%，其中慢性支气管炎和早逝人数减少而带来的经济效益贡献最大，门诊和住院人数减少而带来的经济效益贡献最小，城镇的健康经济效益远高于农村.

(3) 本文借鉴国内对 PM_{10}和 $PM_{2.5}$暴露-反应关系系数的研究结果，同时考虑到城镇与农村暴露人数、健康终端基准发生率和医疗费用等的不同，将城镇与农村的健康效应和健康经济效益分别进行计算. 但部分数据的缺失，使得研究结果具有一定的不确定性，对于数据缺失的部分，以国家平均值或最近年份的数据代替，这一定程度上降低了不确定性. 同时，根据 PM_{10}和 $PM_{2.5}$的暴露-反应关系系数的不确定性范围，分别计算了健康效应和健康经济效益相应的95%置信区间，以期能更准确地反映控制 PM_{10}和 $PM_{2.5}$污染后所带来健康效益.

参考文献：

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

[2] 刘爱明，杨柳，吴亚玲，等. 城市区域大气颗粒物的健康效应研究[J]. 中国环境监测，2012，**28**(5)：19-23.
Liu A M, Yang L, Wu Y L, *et al*. Research on the health effects of atmospheric particulates in city region [J]. Environmental Monitoring in China, 2012, **28**(5): 19-23.

[3] 白志鹏，蔡斌彬，董海燕，等. 灰霾的健康效应[J]. 环境污染与防治，2006，**28**(3)：198-201.
Bai Z P, Cai B B, Dong H Y, *et al*. Adverse health effects caused by dust haze-a review [J]. Environmental Pollution and Control, 2006, **28**(3): 198-201.

[4] 吕铃钥，李洪远. 京津冀地区 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 University Nankaiensis, 2016, **49**(1):

69-77.

[5] 刘帅，宋国君. 城市 $PM_{2.5}$ 健康损害评估研究[J]. 环境科学学报，2016，**36**(4)：1468-1476.
Liu S, Song G J. Evaluation of $PM_{2.5}$'s adverse human health effect in cities[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(4): 1468-1476.

[6] 阚海东，陈秉衡，汪宏. 上海市城区大气颗粒物污染对居民健康危害的经济学评价[J]. 中国卫生经济，2004，**23**(2)：8-11.
Kan H D, Chen B H, Wang H. Economic assessment of health impact due to particulate air pollution in urban dreas of Shanghai[J]. Chinese Health Economics, 2004, **23**(2): 8-11.

[7] 黄德生，张世秋. 京津冀地区控制 $PM_{2.5}$ 污染的健康效益评估[J]. 中国环境科学，2013，**33**(1)：166-174.
Huang D S, Zhang S Q. Health benefit evaluation for $PM_{2.5}$ pollution control in Beijing-Tianjin-Hebei region of China[J]. China Environmental Science, 2013, **33**(1): 166-174.

[8] 魏国茹，史兴民. 西安市 $PM_{2.5}$ 健康损害价值评估[J]. 环境科学，2018，**39**(7)：3014-3021.
Wei G R, Shi X M. Evaluation the extent of health damage caused by $PM_{2.5}$ particulate in Xi'an city[J]. Environmental Science, 2018, **39**(7): 3014-3021.

[9] 李惠娟，周德群，魏永杰. 我国城市 $PM_{2.5}$ 污染的健康风险及经济损失评价[J]. 环境科学，2018，**39**(8)：3467-3475.
Li H J, Zhou D Q, Wei Y J. An assessment of $PM_{2.5}$-related health risks and associated economic losses in Chinese cities[J]. Environmental Science, 2018, **39**(8): 3467-3475.

[10] 河南省环保厅. 2017 年河南省环境状况公报[EB/OL]. http://www.hnep.gov.cn/hjzl/hjzlbgs/H600406index_1.htm, 2018-07-04.

[11] 谢旭轩. 健康的价值：环境效益评估方法与城市空气污染控制策略[D]. 北京：北京大学，2011.

[12] Huang D S, Xu J H, Zhang S Q. Valuing the health risks of particulate air pollution in the Pearl River Delta, China[J]. Environmental Science & Policy, 2012, **15**(1): 38-47.

[13] 谢元博，陈娟，李巍. 雾霾重污染期间北京居民对高浓度 $PM_{2.5}$ 持续暴露的健康风险及其损害价值评估[J]. 环境科学，2014，**35**(1)：1-8.
Xie Y B, Chen J, Li W. An assessment of $PM_{2.5}$ related Health risks and impaired values of Beijing residents in a consecutive high-level exposure during heavy haze days[J]. Environmental Science, 2014, **35**(1): 1-8.

[14] Viscusi W K, Magat W A, Huber J. Pricing environmental health risks: survey assessments of risk-risk and risk-dollar trade-offs for chronic bronchitis[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 1991, **21**(1): 32-51.

[15] 陈晓兰. 大气颗粒物造成的健康损害价值评估[D]. 厦门：厦门大学，2008.
Chen X L. Evaluating the health damage costs of atmospheric particulates[D]. Xiamen: Xiamen University, 2008.

[16] 郑州市统计局. 郑州统计年鉴 2015[M]. 北京：中国统计出版社，2015.

[17] 郑州市统计局. 郑州统计年鉴 2016[M]. 北京：中国统计出版社，2016.

[18] 郑州市统计局. 郑州统计年鉴 2017[M]. 北京：中国统计出版社，2017.

[19] 谢鹏，刘晓云，刘兆荣，等. 我国人群大气颗粒物污染暴露-反应关系的研究[J]. 中国环境科学，2009，**29**(10)：1034-1040.
Xie P, Liu X Y, Liu Z Y, *et al*. Exposure-response functions for health effects of ambient particulate matter pollution applicable for China[J]. China Environmental Science, 2009, **29**(10): 1034-1040.

[20] 国家卫生计生委统计信息中心. 2013 第五次国家卫生服务调查分析报告[M]. 北京：中国协和医科大学出版社，2015.

[21] 国家卫生和计划生育委员会. 2015 中国卫生和计划生育统计年鉴[M]. 北京：中国协和医科大学出版社，2015.

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

[23] 国家卫生和计划生育委员会. 2017 中国卫生和计划生育统计年鉴[M]. 北京：中国协和医科大学出版社，2017.

[24] 刘传合，洪建国，尚云晓，等. 中国 16 城市儿童哮喘患病率 20 年对比研究[J]. 中国实用儿科杂志，2015，**30**(8)：596-600.
Liu C H, Hong J G, Shang Y X, *et al*. Comparison of asthma prevalence in children from 16 cities of China in 20 years[J]. Chinese Journal of Practical Pediatrics, 2015, **30**(8): 596-600.

[25] 马倩倩，杨土保. 中国城乡成年人群哮喘患病状况及其影响因素[J]. 中南大学学报(医学版)，2017，**42**(9)：1086-1093.
Ma Q Q, Yang T B. Prevalence and influential factors for asthma among adults in Chinese[J]. Journal of Central South University (Medical Science), 2017, **42**(9): 1086-1093.

[26] 谢华，朱天怡，刘美岑，等. ACOS 与同期哮喘和 COPD 患者住院情况调查分析[J]. 现代生物医学进展，2015，**15**(32)：6279-6282.
Xie H, Zhu T Y, Liu M C, *et al*. Investigation and analysis of hospitalized patients of ACOS with asthma and COPD at the same time[J]. Progress in Modern Biomedicine, 2015, **15**(32): 6279-6282.

[27] 国家心血管病中心. 中国心血管病报告 2014[M]. 北京：中国大百科全书出版社，2015.

[28] 国家心血管病中心. 中国心血管病报告 2015[M]. 北京：中国大百科全书出版社，2016.

[29] 国家心血管病中心. 中国心血管病报告 2016[M]. 北京：中国大百科全书出版社，2017.

[30] 卫生部统计信息中心. 2008 年第四次国家卫生服务调查分析报告[M]. 北京：中国协和医科大学出版社，2009.

HUANJING KEXUE Vol. 40 No. 6
Environmental Science (monthly) Jun. 15, 2019

CONTENTS