

中国 PM_{2.5} 污染健康效应的国民经济影响分析

曾贤刚*,阮芳芳 (中国人民大学环境学院,北京 100872)

摘要: 为合理评估 PM_{2.5} 污染,通过 Meta 分析,系统回顾已有文献并对中国人群的 PM_{2.5} 健康效应进行定量评估.在此基础上,综合运用 Benmap 模型和 CGE 模型,估计 2017 年全国 PM_{2.5} 污染造成的国民经济影响.结果表明,中国 PM_{2.5} 污染造成的全因早逝、慢性阻塞性肺病(住院)、脑卒中(住院)、缺血性心脏病(住院)、心血管疾病(门诊)、呼吸系统疾病(门诊)OR 值分别为 1.007(95%CI:1.005,1.009)、1.014(95%CI:1.009,1.019)、1.006(95%CI:1.002,1.011)、1.007(95%CI:1.005,1.010)、1.006(95%CI:1.002,1.010)、1.006(95%CI:1.004,1.008)(per 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).2017 年,PM_{2.5} 污染引起的中国年均劳动损失为 2590.34 万 d,居民额外医疗支出为 86.39 亿元,造成的经济损失约占当年 GDP 的 1.48%.

关键词: PM_{2.5}; 健康效应; Meta 分析; CGE 模型; 中国

中图分类号: X32 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2020)07-3228-11

Analysis on the national economic impact of PM_{2.5}-induced health effects in China. ZENG Xian-gang*, RUAN Fang-fang (School of Environment & Natural Resources, Renmin University of China, Beijing 100872, China). *China Environmental Science*, 2020,40(7): 3228~3238

Abstract: In order to reasonably assess PM_{2.5} pollution, this paper systematically reviewed the existing literature and conducted quantitative reviews on adverse health effects of PM_{2.5} in China through Meta-analysis. After that, Benmap model and CGE model were comprehensively applied to estimate the national economic impact caused by PM_{2.5} pollution in 2017. The simulation results show that, The overall risk estimates of total non-accidental mortality, hospital admissions due to chronic obstructive pulmonary disease, stroke, ischemic heart disease, outpatient visits due to respiratory disease, cardiovascular disease were 1.007 (95%CI: 1.005, 1.009), 1.014 (95%CI: 1.009, 1.019), 1.006 (95%CI: 1.005, 1.010), 1.006 (95%CI: 1.005, 1.010), 1.006 (95%CI: 1.002, 1.010), 1.006 (95%CI: 1.002, 1.010), and 1.006 (95%CI: 1.006, 1.010), respectively CI: 1.004, 1.008) for each 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ increase in PM_{2.5}. In 2017, PM_{2.5} pollution lead to annual work loss hour of 25.9034 million days and additional health expenditure of 8.639 billion Yuan, which combined caused GDP loss of 1.48%.

Key words: PM_{2.5}; health effects; meta-analysis; CGE model; China

流行病学研究表明,PM_{2.5} 是空气污染中最主要的致病因素,相较于 PM₁₀,PM_{2.5} 污染对人体健康影响更大,已被公认为呼吸系统、心血管系统和其他特定病因疾病发病率和死亡率增加的主要危险因素^[1].全球疾病负担研究显示^[2],2017 年,全球 5.25%的死亡可归因于 PM_{2.5} 污染,是第八大死亡因素.其中,东南亚、东亚和大洋洲归因于 PM_{2.5} 污染的死亡率从 1990 年的第 15 位上升到 2017 年的第 1 位.随着经济的惊人增长,中国已成为世界上最大的能源消费国和第二大经济体,同时,中国多地相继发生严重的区域性大气污染事件,是世界上 PM_{2.5} 污染最严重的国家之一.近年来,PM_{2.5} 一直是我国首要大气污染物.2018 年,338 个城市中,以 PM_{2.5} 为首要污染物的天数仍然占重度及以上污染天数的 60.0%,PM_{2.5} 年平均浓度为 39 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,超过世界卫生组织(W.H.O)颁布的《空气质量准则》^[3](Air Quality Guidelines)的标准 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,有 56.2%的城市年平均浓度超过国家

二级标准(35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Bai 等^[4]将常用空气污染的健康成本核算方法分为 2 类,静态模型和动态模型.目前较为常用的健康成本核算方法主要是静态模型,通过流行病学的暴露-反应函数估计各个健康终端的健康损失(如早逝人数),然后利用静态影响估计方法(如人力资本法(HC)、修正人力资本法(AHC)、疾病成本法(COI)、条件价值评估法(CVM)等)货币化每个健康终端的经济成本,从而估计得到空气污染的社会经济负担成本.按照这类评估方法,吕铃钥等^[5]计算(VSL、COI)得 2013 年 PM_{2.5} 污染造成京津冀地区健康经济损失约为 1342.9 亿元,占当年该地区生产总值的 2.16%;基于统计生命价值法(VSL)估计得到 2013 年中国因 PM_{2.5} 污染造成的过早死亡经济损失约为 281 亿

收稿日期: 2019-11-29

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0702701)

* 责任作者, 教授, zengxg@ruc.edu.cn

元^[6].曾贤刚等^[7]研究表明,2017年我国3.25%的死亡可归因于环境 $\text{PM}_{2.5}$ 污染,由此造成的健康经济损失约为12625亿元,占当年全国GDP的1.53%.

采用静态方法的研究存在一个关键问题,即只侧重个体的疾病经济负担,而忽略了经济损害的累积维度^[8]以及对社会经济体系的影响.这种由污染引起的资源配置扭曲,很可能导致整个经济的低效率,如果不考虑这些累积维度,可能会严重低估污染健康成本.作为动态估计方法,可计算一般均衡模型(CGE)能够反映社会经济系统内部的联系,捕捉经济损失随时间的累积效应,近年来逐渐被应用于测量空气污染的健康影响评估.杨宏伟等^[9]以 PM_{10} 为空气污染的代表性指标,通过CGE模型模拟了2000年中国空气污染对国民经济的影响,空气污染导致当年GDP损失约0.38%.王桂芝等^[10]通过CGE模型量化了北京市2013年 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的健康效应.谢杨等^[11]以京津冀地区为典型,评估了 $\text{PM}_{2.5}$ 污染对宏观经济的影响,结果表明,如果不引入适当的污染控制政策,2020年北京、天津、河北的GDP损失将分别达2.46%、2.79%、2.15%.

上述方法均基于暴露-反应关系,在计算污染的健康损失时将研究单位视为整体,忽视了中国空气质量、社会经济地区差异性和国内暴露-反应系数的选取,从而使得估计结果不准确.此外,评估 $\text{PM}_{2.5}$ 污染疾病经济负担的另一个关键问题是“暴露-反应关系”效应值的选取.已有的动态模型评估文献基本直接引用流行病学的研究成果,未对中国 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的暴露-反应关系做更加深入的思考.由于不同地区的颗粒物组成、人群特点及暴露方式不同,“暴露-反应关系”效应值也各不相同.为了减少不确定性,克服传统文献综述的缺陷,使结论更适用于总体人群,许多学者采用Meta分析的方法对特定区域的流行病学研究结果进行系统评价.Meta分析得出的浓度-响应函数在支持健康影响评估综合信息的流行病学证据方面得到了充分的认可^[12].本文在已有研究结果的基础上,系统回顾各类文献,确定 $\text{PM}_{2.5}$ 污染人群健康效应终点,并采用Meta分析的方法估计以我国人群为研究对象的暴露-反应效应值;利用BenMap-CE模型模拟得到全国2017年 $10\text{km} \times 10\text{km}$ 空间网格尺度上的污染健康损失;构建CGE模型,通过劳动力损失和额外医疗费用支出来

估计 $\text{PM}_{2.5}$ 污染对整个经济体系造成的影响.

1 方法与数据

1.1 健康效应终端选取与Meta分析

1.1.1 健康效应终端选取 依据GBD研究成果^[2],环境颗粒物污染与8种健康结局的因果关联证据较强,分别是下呼吸道感染、气管、支气管和肺癌,缺血性心脏病(IHD),缺血性脑卒中,脑出血,蛛网膜下腔出血,慢性阻塞性肺疾病(COPD)和2型糖尿病.

已有研究表明 $\text{PM}_{2.5}$ 污染与多种健康结局之间存在相关关系^[2],但不是每一种健康结局都有充足的证据表明两者之间有因果关联.从数据的可靠性出发,结合ICD-10报告^[13](国际疾病分类第10版)(ICD-10,2016)对各类疾病的定义,本文选取与GBD2017上的健康结局相关的健康效应终端作为文献检索的关键词.同时,由于每一种健康结局在文献中又可划分为早逝、住院、门诊、急诊、患病等多种形式,为避免重复计算,仅选取早逝、住院和门诊三类健康影响.

1.1.2 文献检索 通过对中国知网、万方、PubMed以及ISI Web of Science等数据库进行污染物 $\text{PM}_{2.5}$ 健康效应的文献初筛,检索建库至2018年12月公开发表的关于中国 $\text{PM}_{2.5}$ 人群健康效应的中英文文献.检索词至少包含一个与 $\text{PM}_{2.5}$ 暴露相关的中英文词(如“ $\text{PM}_{2.5}$ ”、“细颗粒物”)和一个研究地点的中英文词(如“中国”、“China or Chinese”)以及各类疾病的名称.

1.1.3 文献筛选 文献的纳入标准包括:①文献是关于 $\text{PM}_{2.5}$ 与人体疾病之间关系的;②全文文献;③具有定量的效应值(OR/RR值,或可换算成OR值的数值);④文献类型为期刊论文、会议论文或学位论文,剔除系统综述类和Meta分析类文献;⑤研究类型为病例-对照(Case-Control, Case-Crossover)研究、横断面群组(Cross-Sectional)研究、队列(Cohort)研究或时间序列(Time-Series)研究.⑥利用Newcastle-Ottawa Scale (NOS)文献质量评价量表进行相关文献的质量评估,要求评分大于等于5.

1.1.4 数据录入 尽管目前尚未对Meta分析所需要的最小文献数量有要求^[14],为了能够进行稳健性分析和敏感性分析,本文设定最小文献数量为4篇.在一项文献中,如果对健康效应终点的风险估计结

果不止一个,本文最终选择的风险估计要求包括:①应用单污染模型;②与更为广阔的地理区域内的人口相关;③与污染物的年暴露量(或季节暴露量)相关;④与最严格的健康效应终点定义相关。

1.1.5 统计分析 采用 Stata14.0 软件进行统计分析.本文最终结果以 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度每升高 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$,各健康效应终点的优势比 OR 值表示.采用逆方差法对所选研究的效果估计值进行汇总,其总体效果估计值为单个研究效果估计值的平均值,由研究方差的逆加权得到.在本文的 Meta 分析中,首先用 I^2 统计量和 P 值进行异质性检验.一般地,当 $I^2 > 50\%$, P 值 ≤ 0.1 时,认为研究之间存在异质性^[15].若 $I^2 < 50\%$,使用固定效应模型估计健康效应风险;反之,用随机效应模型进行估计^[16].其次,对于异质性较大的研究,依次通过固定效应模型、剔除 Meta 分析中权重最大的研究、剔除病例对照研究、剔除特殊研究重新进行 Meta 分析来探讨异质性可能的来源以及 Meta 分析的稳健性和敏感性,其中特殊研究通过逐一剔除法获得.最后,通过漏斗图进行发表性偏倚识别。

1.2 BenMAP-CE 模型

BenMAP-CE 是环境效益制图与分析项目软件的简称,是基于空间网格化的人口、污染物相关发病率、空气质量等数据,依据健康影响函数,代入到模拟区域中来估计总体健康损失.主要步骤如下:①确定空间网格尺度;②获得相应尺度的暴露人口分布和空气质量分布;③估计网格化的污染物健康效应;④整合研究结果。

1.3 暴露-反应关系

本文采用泊松回归的相对危险度模型,计算模型如下所示。

$$E_i = P \times I_i \times \left[1 - \frac{1}{\exp(\beta_i \times (C - C_0))} \right] \quad (1)$$

$$\beta_i = \frac{\ln \text{OR}_i}{\Delta C} \quad (2)$$

式中: E_i 是第 i 种健康效应终端的健康效应变化量; P 是暴露人口数; I_i 是第 i 种健康效应终端的基线发生率; β_i 是第 i 种健康效应终端的暴露-反应系数; C 是 $\text{PM}_{2.5}$ 的实际浓度, $\mu\text{g}/\text{m}^3$; C_0 是 $\text{PM}_{2.5}$ 的基准浓度, $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 本文选用世界卫生组织(WHO)空气质量标准值 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ 作为基准浓度; OR_i 是第 i 种健康效

应终端的优势比; ΔC 是 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

1.4 额外健康支出与劳动时间损失

$\text{PM}_{2.5}$ 污染引起的居民额外健康支出主要指住院费用和门诊费用.以《2018 年中国卫生健康统计年鉴》^[17]中的单位住院病例和单位门诊病例平均支出为基础,通过疾病成本法估计 2017 年我国居民的额外健康支出,具体计算公式如下:

$$\text{HE} = \sum_i E_i \times \text{RP}_i \quad (3)$$

式中:HE 表示居民因 $\text{PM}_{2.5}$ 污染引起的总额外健康支出,亿元; i 表示 $\text{PM}_{2.5}$ 导致的居民住院和门诊健康效应终点; RP_i 表示 i 类健康效应终点的居民单位医疗费用; E_i 表示居民因 $\text{PM}_{2.5}$ 污染导致的 i 类患病数量。

居民劳动时间损失主要针对劳动人口,主要包括两部分,一部分是由于直接暴露于高浓度空气污染中导致的劳动力过早死亡即早逝,另一部分是住院和门诊所导致的误工时间.年均劳动损失率计算公式如下所示:

$$\text{WLD} = \sum_i E_i \times \delta_i \times \text{PDM}_i + E_{\text{death}} \times \lambda \times \text{DPY} \quad (4)$$

$$\text{WLR} = \frac{\text{WLD}}{\text{DPY} \times P_{15-64}} \times 100\% \quad (5)$$

$$\text{LAB} = \text{LAB0} \times (1 - \text{WLR}) \quad (6)$$

式中:WLD 是年均劳动损失日(d/a); i 是 $\text{PM}_{2.5}$ 污染导致的居民住院和门诊类型; E_i 是 i 类健康效应影响人数; δ_i 是 i 类健康效应影响人群中 15~64 岁人群占比; PDM_i 是 i 类患病导致的单位平均误工天数; E_{death} 是 $\text{PM}_{2.5}$ 污染导致的人群早逝人数; λ 是早逝人群中 15~64 岁人群占比; DPY 是每个劳动力年均劳动日(d/a);WLR 是年均劳动损失率(%); P_{15-64} 是年龄在 15~64 岁的暴露人群数量;LAB 是劳动力损失后的劳动力供给;LAB0 是参考情景下的劳动力供给。

1.5 CGE 模型

以 2015 年全国投入产出表为基础,构建封闭 CGE 模型,为方便计算,将 42 部门合并为煤炭、石油、天然气、其他能源、农业、轻工业、重工业、建筑业、交通运输业、卫生服务业、其他服务业等 11 个部门.其中,卫生服务业是指卫生、社会保障和社会福利业,该部门同本文所研究的居民额外健康支出密切相关,故单列为一个部门.社会活动矩阵

(SAM)的其他数据来源于《2016 年中国金融统计年鉴》^[18]、《2016 年中国统计年鉴》^[19]、《2016 年中国财政年鉴》^[20]。CGE 模型主要包括生产模块、价格模块、国际贸易模块、经济主体(居民、企业、政府)模块、市场均衡模块等。其中,生产模块采用多层嵌套形式,如图 1 所示,第 1 层为 CES 函数;第二层非能源投入之间为 Leontief 函数,能源和要素投入之间为 CES 函数;第三层煤炭、石油、天然气、其他能

源之间为 Leontief 函数,劳动和资本之间为 CES 函数。完整模型见参考文献[21],其中居民福利模块通过希克斯等价变动来衡量实施外部政策冲击后对居民社会福利的影响,其计算公式如下:

$$EV=e(P0,u(QH1))-e(P0,u(QH0)) \quad (7)$$

式中:EV 是等价性变化量; $e(P,u)$ 是微观经济学中的支出函数; $P0$ 是初始价格; $QH0$ 、 $QH1$ 分别是政策实施前和实施后居民对商品的需求向量。

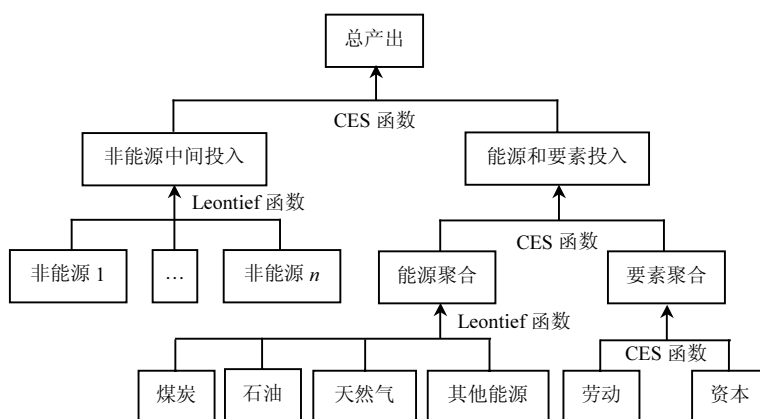


图 1 产业部门多层生产嵌套结构

Fig.1 Sectors' nested producing structure

2 结果与讨论

2.1 Meta 分析结果

2.1.1 文献整理结果 初步调查共检索出相关文献 2392 篇,根据入选标准筛选标题和摘要后,纳入 509 篇全文文献进行全面资格审查。依据本文所需的健康效应终点,最终 2007~2019 年发表的 60 篇文献被纳入 Meta 分析。其中 42 篇以英文发表,18 篇以中文发表,研究开展时间为 2001~2017 年。病例对照研究 14 篇,时间序列研究 46 篇。文献中的研究区域主要以单个城市为主,主要研究城市有北京(15 篇)、济南(6 篇)、台北(5)篇、上海(3 篇)、广州(3 篇)、成都(2 篇)、深圳(2 篇)、宁波(2 篇)、香港(2 篇)、东莞(1 篇)、高雄(1 篇)、杭州(1 篇)、兰州(1 篇)、青岛(1 篇)、沈阳(1 篇)、石家庄(1 篇)、太原(1 篇)、无锡(1 篇)、张家口(1 篇)珠海(1 篇),其他文献为多城市研究。健康效应终点包括全因早逝、慢性阻塞性肺疾病(住院)、脑卒中(住院)、缺血性心脏病(住院)、心血管疾病(门诊)、呼吸系统疾病(门诊)。

2.1.2 效应量合并结果 PM_{2.5} 污染 6 个健康效应

终点的 Meta 分析结果析结果、异质性参数和每个分析中包含的研究数量如表 1 所示,该表还包括相应的异质性分析、敏感性分析等相关数据。

依据随机效应模型 Meta 分析的结果,PM_{2.5} 浓度每增加 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,人群的 6 种健康效应风险均在统计学上显著增加。其中,全因死亡风险的 OR(95%CI)为 1.007(1.005,1.009),COPD 住院风险、脑卒中住院风险、IHD 住院风险的 OR(95%CI)分别为 1.014(1.009,1.019)、1.006(1.002,1.011)、1.007(1.005,1.010),心血管疾病门诊、呼吸系统疾病门诊的 OR(95%CI)分别为 1.006(1.002,1.010)、1.006(1.004,1.008)。此外,依据异质性参数,6 种健康效应的 Meta 分析估计结果均存在较高的异质性,且固定效应模型的 Meta 分析结果具有可比性。

2.1.3 敏感性分析 敏感性分析结果表明,总体风险估计的随机效应仍然在统计学上显著增加。剔除权重最大的研究使得 OR 估计值均有所提高,除心血管疾病(门诊)外,其他健康效应终点估计结果的异质性并未降低;剔除病例对照研究后,部分健康效应的 OR 估计值有所下降,同时 IHD(住院)健康效应估计

的异质性有所降低,表明研究类型的不同可能是该健康效应估计的异质性来源;应用逐一剔除法表明,全因死亡、脑卒中(住院)、心血管疾病(门诊)这 3 种健康效应终点的 Meta 分析前后结果没有发生本质改变,表明 Meta 分析的结论具有稳健性.而 COPD(住院)、IHD(住院)、呼吸系统疾病(门诊)这 3 健康效应终点的 Meta 分析结论稳健性欠佳,表现为删除某个(或某几个)研究后,合并效应量的点估计落在总的合并效应量 95%CI 之外.

2.1.4 发表偏倚识别 识别发表偏倚最常用的方法是绘制漏斗图(funnel plot),但在绘制漏斗图以及对其进行不对称检验时,一般认为至少需要 10 个研究,如果少于 10 个研究,不建议进行漏斗图不对称检验^[22].鉴于纳入 Meta 分析的文献数量不多,本文通过 Egger 检验进行发表偏倚识别,结果如表 2 所示.只有全因死亡和心血管疾病(门诊)的 P 值 ≤ 0.05 ,认为存在发表偏倚,而其他 4 种健康效应的 Meta 分析文献收集较为完整,不存在发表偏倚.

表 2 Egger 检验 bias 相关参数

Table 2 Bias related parameters of Egger's inspection

健康效应终点		P	95%CI
早逝	全因死亡	0.002	1.832~6.727
	COPD	0.076	-0.451~6.779
住院	脑卒中	0.742	-22.286~27.983
	IHD	0.075	-1.281~18.967
门诊	心血管疾病	0.002	1.400~2.990
	呼吸系统疾病	0.302	-2.917~8.753

注:COPD为慢性阻塞性肺疾病;IHD为缺血性心脏病,下同.

2.2 PM_{2.5} 污染健康损失

健康的基线发生率见表 3.其中,全因死亡数据来源于《2018 年中国统计年鉴》^[23],其他健康效应终点的数据来源于最新一次的国家卫生服务调查报告^[24].关于污染物的阈值浓度,本文设置基于在北美进行的流行病学研究估计得到的 PM_{2.5} 理论最小风险暴露水平(TMREL)为 2.4~5.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ^[2],本文将 PM_{2.5} 的阈值浓度设定为 5.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.BenMAP-CE 健康损失评估模型需要模拟污染物和暴露人口的网格尺度空间分布,本文参照曾贤刚等^[7]的参数设定,建立 10km $\times$ 10km 空间网格数据.

估计得到的 PM_{2.5} 健康损失如表 4 所示.全因早逝人数为 280549 例 (95% CI:201853~358592),

COPD、脑卒中、IHD 住院人数分别为 216415 例 (95% CI:141117~290327)、233287 例(95% CI:59328~404316)、122287 例(95% CI:79104~165036),心血管疾病和呼吸系统疾病门诊人数分别为例 104862 (95% CI:35336~173333)、914728 例 (95% CI: 614505~1212459).

表 3 基线发生率

Table 3 Baseline incidence

健康效应终点		基线发生率(‰)
早逝	全因死亡	7.11
	COPD	2.8
住院	脑卒中	6.9
	IHD	3.1
门诊	心血管疾病	3.1
	呼吸系统疾病	27.0

表 4 中国 PM_{2.5} 污染健康损失

Table 4 Health loss of PM_{2.5} pollution in China

健康效应终点		平均值	95%CI
早逝	全因	280549	201853~358592
	COPD	216415	141117~290327
住院	脑卒中	233287	59328~404316
	IHD	122287	79104~165036
门诊	心血管疾病	104862	35336~173333
	呼吸系统疾病	914728	614505~1212459

2.3 PM_{2.5} 污染对国民经济的影响

与饮酒、吸烟等行为危险因素和高血压、血糖等代谢危险因素不同,PM_{2.5} 污染是一种不依赖于个体行为变化的潜在可改变的环境危险因素^[25].因此,降低大气污染物浓度,加强个人防护,可以在预防多种疾病尤其是呼吸道疾病上发挥特殊优势,从而从公共卫生的角度减轻 PM_{2.5} 污染带来的健康和经济负担.PM_{2.5} 污染已对我国居民的公共健康造成巨大的威胁,评估 PM_{2.5} 污染造成的健康损失和社会经济负担是公共卫生工作者的一项紧迫任务.本文从国民经济系统出发,讨论 PM_{2.5} 污染对国民经济的影响.一个时期内由污染造成的工资损失,意味着在接下来的时期内可用于增长的资本投入减少,这种影响在一个经济体中会持续很长一段时间^[26].而过早死亡或者患病造成的一段时期内劳动力减少也会影响市场均衡.此外,污染风险的增加推动了对医疗服务的需求,要求一个经济体以牺牲其他部门的产出

为代价,将更多可用的中间投入或要素投入分配给 医疗部门^[27].

表 1 PM_{2.5} 健康效应 Meta 分析结果
Table 1 Meta-analysis results of PM_{2.5} health effects

健康效应终点		总体 OR(95%CI)	总体 OR(95%CI)	研究数 量	敏感性分析(随机效应模型 Meta 分析)		
		随机效应模型	固定效应模型		剔除权重最大的研究	剔除病例对照研究	剔除特殊研究(逐一剔除法)
早逝	全因死亡	1.007(1.005,1.009), <i>I</i> ² =94.5%, <i>P</i> = 0.000	1.004(1.003,1.004), <i>I</i> ² =94.5%, <i>P</i> = 0.000	19 ^[28-46]	研究:Li 等 ^[38] (权重 7.55%)	研究:Li 等 ^[44] ,Tsai 等 ^[31-32] ,Yang 等 ^[30] ,Ma 等 ^[29]	无
					1.008(1.006,1.010), <i>I</i> ² =94.0%, <i>P</i> = 0.000	1.006(1.004,1.008), <i>I</i> ² =94.4%, <i>P</i> = 0.000	
	COPD	1.014(1.009,1.019), <i>I</i> ² =93.5%, <i>P</i> = 0.000	1.006(1.005,1.007), <i>I</i> ² =93.5%, <i>P</i> = 0.000	8 ^[47-54]	研究:Tian 等 ^[53] (权重 18.7%)	研究:Tsai 等 ^[47]	研究:Tian 等 ^[53] ,孟德杨 ^[48]
					1.020(1.010,1.030), <i>I</i> ² =94.1%, <i>P</i> = 0.000	1.011(1.007,1.016), <i>I</i> ² =92.1%, <i>P</i> = 0.000	1.024(1.012,1.035), <i>I</i> ² =90.1%, <i>P</i> = 0.000
住院	脑卒中	1.006(1.002,1.011), <i>I</i> ² =98.1%, <i>P</i> = 0.000	1.005(1.005,1.006), <i>I</i> ² =98.1%, <i>P</i> = 0.000	5 ^[55-59]	研究:江波等 ^[57] (权重 24.61%)	研究:Chiu 等 ^[55] ,Huang 等 ^[56]	无
					1.008(1.002,1.014), <i>I</i> ² =98.4%, <i>P</i> = 0.000	1.006(1.001,1.011), <i>I</i> ² =98.6%, <i>P</i> = 0.000	
	IHD	1.007(1.005,1.010), <i>I</i> ² =98.6%, <i>P</i> = 0.000	1.003(1.003,1.003), <i>I</i> ² =98.6%, <i>P</i> = 0.000	7 ^[60-66]	研究:Liu 等 ^[65] (权重 16.9%)	研究:Dai 等 ^[64] ,Chiu 等 ^[60] ,Liu 等 ^[65] , 吴钦城等 ^[66]	研究:Chiu 等 ^[60]
					1.010(1.006,1.013), <i>I</i> ² =98.6%, <i>P</i> = 0.000	1.004(1.002,1.006), <i>I</i> ² =83.1%, <i>P</i> = 0.000	1.005(1.003,1.007), <i>I</i> ² =98.3%, <i>P</i> = 0.000
门诊	心血管疾病	1.005(1.001,1.008), <i>I</i> ² =66.0%, <i>P</i> = 0.000	1.002(1.001,1.003), <i>I</i> ² =66.0%, <i>P</i> = 0.000	6	研究:Xu 等 ^[67] (权重 31.08%)	研究:Guo 等(2009), Liang 等 ^[68] ,Guo 等 ^[69]	无
					1.006(1.002,1.010), <i>I</i> ² =47.0%, <i>P</i> = 0.000	1.004(1.000,1.008), <i>I</i> ² =64.0%, <i>P</i> = 0.000	
	呼吸系统疾病	1.006(1.004,1.008), <i>I</i> ² =98.5%, <i>P</i> = 0.000	1.004(1.004,1.004), <i>I</i> ² =98.5%, <i>P</i> = 0.000	16 ^[70-85]	研究:陈献 ^[73] (权重 8.12%)	研究:Liang 等 ^[68]	研究:彭朝琼等 ^[75]
					1.007(1.004,1.010), <i>I</i> ² =98.6%, <i>P</i> = 0.000	1.006(1.004,1.008), <i>I</i> ² =98.6%, <i>P</i> = 0.000	1.004(1.003,1.005), <i>I</i> ² =92.2%, <i>P</i> = 0.000

2.3.1 劳动力损失与额外医疗支出 为了便于计算,本文做以下几个假设:①拥有劳动能力和时间的居民年龄范围为 15~64 岁之间,且为完全就业,日工作时间为 8h,365d 扣除 52 个双休日和 11 个法定假日,年工作时间 250d;②PM_{2.5} 污染导致的早逝、住院和门诊病例中人群年龄分布与我国总体人群早逝、患病年龄分布一致;③由于缺少我国人群相关疾病住院、门诊分年龄病例数据,本文用我国相关疾病患病人群年龄分布来代替。

“Global Health Data Exchange(GHDx)”是世界上最全面的人口普查、生命统计和其他卫生相关调查的数据库.本文通过 GHDx 数据库获得 2017 年中国相关疾病分年龄死亡人数和患病人数,并依据本文假设估计得到 PM_{2.5} 污染造成的健康影响人群中劳动人口占比,具体如表 5 所示。

关于劳动人口平均住院时间和人均医药费用,通过“2017 年 30 种疾病平均住院医药费用”^[17]估算

得到;关于劳动人口门诊导致的平均误工时间和人均医药费用,其中平均误工时间通过 15~64 岁在业人口患病休工天数和患病休工率^[24]估算得到,人均医药费用用 2017 年中国门诊病人次均医药费代替,具体如表 5 所示.此外,2017 年中国总人口中 15~64 岁人口数占比 71.8%^[23].

表 5 健康损失中 15~64 岁劳动人口占比、单位误工时间及人均医药费

Table 5 the proportion of the labor force aged 15~64 years, the time of missed work of health loss and per capita medical expenses				
健康效应终点	劳动人口占比(%)	误工时间(d)	人均医药费(元)	
早逝	全因	26.90	250	-
住院	COPD	52.61	10.8	8808.2
	脑卒中	51.85	12.6	14065.8
	IHD	45.77	11.1	26079.3
门诊	心血管疾病	53.74	6.1	257.0
	呼吸系统疾病	59.46	6.1	257.0

通过式(3)~(5)计算得出,2017 年,中国因 $\text{PM}_{2.5}$ 污染引起的年均劳动损失日为 2590.34 万 d (95%CI:1751.06~3421.07),年均劳动损失率为 2.59% (95%CI:1.75%~3.43%);其中由早逝造成的劳动损失时间占总劳动损失时间的 72.84%(70.49%~77.52%),可以看到,早逝是造成居民劳动力损失最主要的因素;因 $\text{PM}_{2.5}$ 污染造成的居民医疗额外支出为 86.39 亿元(95%CI:53.40~129.04).

2.3.2 GDP 损失与福利损失 $\text{PM}_{2.5}$ 污染引起的劳动力损失,影响了经济体中劳动力的供给.而劳动力是经济发展的重要驱动因素,是居民收入的重要组成部分,因此 $\text{PM}_{2.5}$ 污染健康效应会对宏观经济产生负面影响.另一方面, $\text{PM}_{2.5}$ 污染引起的居民医疗费用增加也会导致居民对其他部门的消费减少.劳动力损失和医疗费用增加共同作用于国民经济系统,对各部门劳动力投入、消费模式产生对负面作用,并通过各部门的关联效应进一步导致整个系统的经济指标发生了不同程度的变化,这种复杂的影响可以通过 CGE 模型模拟较为清晰地看到.

在 CGE 模型中,劳动力的减少使得各生产部门劳动力投入降低,从而对各部门产出产生消极影响.从模拟结果来看,各部门产出均在不同程度上有所下降,影响最大的 3 个部门分别是卫生和社会工作、其他服务业和轻工业,产出减少幅度分别为 4.85%、2.93%、2.21%,影响最小的 3 个部门分别是建筑业、石油和煤炭,产出减少幅度分别为 0.84%、1.12%、1.41%,具体如表 6 所示.从收入和消费模块来看,居民劳动力投入的减少直接影响居民收入水平,使得居民收入和消费总额减少 2.24%(1.51%~2.97%).而居民个人所得税作为政府财政收入重要来源之一,随着居民收入的减少进一步影响了政府的收入和支出,表现为政府收入和消费总额分别减少 7.46% (95%CI:5.04%~9.90%) 、 2.01%(95%CI:1.36%~2.67%).本文研究结果与其他研究结果相似^[8,10-11], $\text{PM}_{2.5}$ 污染对整个宏观经济系统产生负面影响.总体而言, $\text{PM}_{2.5}$ 污染健康效应致使 2017 年中国 GDP 损失约为 1.48%(95%CI:1.00%~1.96%).

通过 CGE 模拟发现,尽管居民医疗支出增加,但居民消费总额下降,这是因为:①居民误工时间的增加必然会降低居民收入水平,收入水平的减少使得居民可消费总额降低;②尽管居民医疗费用有所增

长,但由于卫生服务业在整个经济系统中所占比重较小,不足以拉动居民整体消费用水,因而居民收入和消费总额均呈现减少趋势.

表 6 各部门产出减少情况
Table 6 Output loss in different sectors

部门	平均值(%)	95%CI(%)
煤炭	-1.41	-1.81~-0.91
石油	-1.12	-1.52~-0.81
天然气	-1.60	-2.19~-1.11
其他能源	-1.80	-2.33~-1.18
农业	-1.88	-2.59~-1.27
轻工业	-2.21	-3.00~-1.52
重工业	-1.53	-2.13~-1.03
建筑	-0.84	-1.16~-0.63
交通运输	-2.10	-2.69~-1.41
其他服务业	-2.93	-3.89~-1.98
卫生和社会工作	-4.85	-6.39~-3.29

除了引起 GDP 损失, $\text{PM}_{2.5}$ 污染也会导致居民福利损失.空气污染增加了健康支出,降低收入,直接导致家庭消费水平降低,进而影响个人福利.根据 EV 的公式可知,影响居民福利的主要变量是居民消费量,通过模拟可知,居民消费总额减少 2.24% (95%CI:1.51%~2.97%),从而造成居民福利减少 1.41%(95%CI: 0.95%~1.86%).

3 讨论

在本文的分析过程中,健康效应只选取了早逝、住院和门诊三类,未将患病纳入其中.一是因为在有关 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的流行病学研究中,对于患病病例的定义既有包括住院和门诊病例,又有包括未就诊病例,将患病纳入分析容易造成重复计算,增加结果的不确定性,二是因为未就诊病例的相关数据难以获取.选取早逝、住院和门诊三类健康效应终点可以有效地避免重复估计,但同时会存在低估 $\text{PM}_{2.5}$ 污染健康影响的可能性.

由于对进行 Meta 分析的最小文献数量进行限定,因此一些存在流行病学研究证据的健康效应并未纳入本文的分析中,如抑郁症、糖尿病等.另外,由于缺少特定人群的空间网格尺度基础人口数据,未针对早产、儿童哮喘等特定人群健康效应终点进行相关的分析和探讨.6 种健康效应的 Meta 分析结果均显示具有较大的异质性,除个别健康效应终点外,敏感性分析并未找到异质性的可能来源,需要对文

献进行更进一步的挖掘。

由于人口分布网格地图未对年龄进行分层,且现有的 PM_{2.5} 污染暴露-反应关系缺少分年龄数据,因此只能估计全年龄的 PM_{2.5} 污染健康损失。从这点出发,对劳动力损失的估计是以 3 个假设为基础,其结果具有较大的不确定性。

本文通过 CGE 估计得到的 PM_{2.5} 污染经济损失约占当年全国 GDP 的 1.48%,略低于曾贤刚等^[7]基于统计寿命价值方法和疾病成本法估计得到的结果(1.53%),可能的原因有:①通过 Meta 分析获得更为可靠的健康效应值;②只考虑了污染导致的劳动力和医疗费用变化对经济系统的影响,未考虑非劳动人群市场以及居民休闲的经济价值;③对于医疗费用的计算,仅考虑了住院和门诊的费用,未考虑自我治疗费用、交通费用等,是一种较为保守的估计。

4 结论

4.1 基于 CGE 模型计算的需求,通过文献检索和审查获得 59 篇有关中国人群 PM_{2.5} 污染健康效应的文献,共有 6 类健康效应终点可以进行 Meta 分析,包括全因死亡风险、COPD 住院风险、脑卒中住院风险、IHD 住院风险、心血管疾病门诊风险及呼吸系统疾病门诊风险。Meta 分析结果显示,PM_{2.5} 浓度每增加 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,中国人群的这 6 种健康效应风险均在统计学上显著增加,OR 值分别为 1.007(95%CI:1.005, 1.009)、1.014(95%CI:1.009,1.019)、1.006(95%CI:1.002,1.011)、1.007(95%CI:1.005,1.010)、1.006(95%CI:1.002,1.010)、1.006(95%CI:1.004,1.008)。

4.2 6 种健康效应的异质性检验统计量 I^2 均超过 90%,表明 Meta 分析的估计结果有较大异质性。敏感性分析结果表明,除 IHD 住院风险和心血管疾病门诊风险在剔除病例对照研究后异质性有显著下降,其余健康效应终点的异质性均无明显变化。逐一剔除法的结果表明本文的 Meta 分析结论具有较好的稳健性。此外,本文文献收集较完整,不存在发表偏倚。

4.3 应用 BenMAP-CE 模型在 10km $\times$ 10km 空间网格尺度上估计得到 2017 年中国 PM_{2.5} 污染健康损失,其中,全因早逝人数为 280549 例(95% CI:201853~358592),COPD、脑卒中、IHD 住院人数分别为 216415 例(95% CI:141117~290327)、233287 例(95% CI:59328~404316)、122287 例(95% CI:79104~

165036),心血管疾病和呼吸系统疾病门诊人数分别为 104862(95% CI:35336~173333)、914728 例(95% CI: 614505~1212459)。

4.4 2017 年,中国因 PM_{2.5} 污染造成的劳动损失 2590.34 万 d(95%CI:1751.06~3421.07),居民医疗额外支出 86.39 亿元(95%CI:53.40~129.04)。构建 PM_{2.5} 污染健康损失 CGE 模型,将劳动力损失和医疗额外支出作为外生力量冲击该模型,可以估计 PM_{2.5} 污染对整个社会经济系统的影响。结果表明,①PM_{2.5} 污染导致居民劳动力投入减少和医疗费用增加,从而造成各生产部门不同程度上的产出减少,减少幅度为 1.41%~4.85%,其中影响最大的是卫生和社会工作、其他服务业和轻工业;②PM_{2.5} 污染造成的健康损失使居民收入和消费均有所降低,影响居民的身体健康和生活质量,另一方面进一步影响了政府的财政收入和支出,表明 PM_{2.5} 污染对社会产生的负面影响的复杂性;③PM_{2.5} 污染造成的 GDP 和居民福利损失分别为 1.48%(95%CI:1.00%~1.96%)、1.41%(95%CI: 0.95%~1.86%)。

4.5 以 CGE 模型为核心,以中国流行病学数据为基础,用 Benmap 空间分析模型作为桥梁,评估了我国空气污染对公共健康和国民经济的影响,充分体现空气污染的区域性特点和数据的高空间分辨率优势。与传统的健康经济损失核算方式相比,本文采用多种模型混合评估的方式,能更好地说明中国空气污染的健康成本。结果表明,空气污染尤其是颗粒物污染对公共健康和国民经济的影响不容忽视。尽管动态模型优于静态模型,仍需注意模型参数稳健性的问题,随着中国空气污染相关数据的增加,需进一步改进模型。

参考文献:

- [1] Miller K A, Siscovick D S, Sheppard L, et al. Long-term exposure to air pollution and incidence of cardiovascular events in women [J]. New England Journal of Medicine, 2007,356(5):447-458.
- [2] Stanaway J D, Afshin A, Gakidou E, et al. Global, regional, and national comparative risk assessment of 84 behavioural, environmental and occupational, and metabolic risks or clusters of risks for 195 countries and territories, 1990-2017: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017 [J]. LANCET, 2018,392(10159): 1923-1994.
- [3] Krzyzanowski M. WHO air quality guidelines for Europe [J]. Journal of Toxicology and Environmental Health-Part A-Current Issues, 2008,71(1/2):47-50.
- [4] Bai R, Lam J C K, Li V O K. A review on health cost accounting of air

- pollution in China [J]. *Environment International*, 2018,120:279–294.
- [5] 吕铃钧,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,(1):69–77.
- Lü L Y, Li H Y. Health economic evaluation of PM_{10} and $PM_{2.5}$ pollution in Beijing–Tianjin–Hebei region of China [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis*, 2016,(1):69–77.
- [6] 穆 泉,张世秋.中国 2001–2013 年 $PM_{2.5}$ 重污染的历史变化与健康影响的经济损失评估 [J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2015,(4):694–706.
- Mu Q, Zhang S Q. Assessment of the trend of heavy $PM_{2.5}$ pollution days and economic loss of health effects during 2001–2013 [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2015,(4):694–706.
- [7] 曾贤刚,阮芳芳,彭彦彦.基于空间网格尺度的中国 $PM_{2.5}$ 污染健康效应空间分布 [J]. *中国环境科学*, 2019,39(6):2624–2632.
- Zeng X G, Ruan F F, Peng Y Y. Health effects' spatial distribution analysis of $PM_{2.5}$ pollution in China based on spatial grid scale [J]. *China Environmental Science*, 2019,(6):2624–2632.
- [8] Matus K, Nam K, Selin N E, et al. Health damages from air pollution in China [J]. *Global Environmental Change–Human and Policy Dimensions*, 2012,22(1):55–66.
- [9] 杨宏伟,宛 悦,增井利彦.可计算一般均衡模型的建立及其在评价空气污染健康效应对国民经济影响中的应用 [J]. *环境与健康杂志*, 2005,(3):166–170.
- Yang H W, Wan Y, Toshihiko Masui. The assessment of health impact of air pollution on China's national economy by applying a computable general equilibrium model [J]. *Journal of Environment & Health*, 2005,(3):166–170.
- [10] 王桂芝,武灵艳,陈纪波,等.北京市 $PM_{2.5}$ 污染健康经济效应的 CGE 分析 [J]. *中国环境科学*, 2017,37(7):2779–2785.
- Wang G Z, Wu L Y, Chen J B, et al. A CGE-based analysis on $PM_{2.5}$ induced health-related economic effect in Beijing [J]. *China Environmental Science*, 2017,37(7):2779–2785.
- [11] 谢 杨,戴瀚程,花岡達也,等. $PM_{2.5}$ 污染对京津冀地区人群健康影响和经济影响 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2016,26(11):19–27.
- xie y, dai h c, HANAOKA Tatsuya, et al. Health and economic impacts of $PM_{2.5}$ pollution in Beijing–Tianjin–Hebei Area [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2016,26(11):19–27.
- [12] Sheehan M C, Lam J, Navas-Acien A, et al. Ambient air pollution epidemiology systematic review and meta-analysis: A review of reporting and methods practice [J]. *Environment International*, 2016, 92–93:647–656.
- [13] WHO. ICD–10 [Z]. 2019, <https://icd.who.int/browse10/2019/en>.
- [14] Vrijheid M, Martinez D, Manzanares S, et al. Ambient air pollution and risk of congenital anomalies: A systematic review and meta-analysis [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2011,119(5):598–606.
- [15] Djillali, Annane, Professor, et al. Corticosteroids for severe sepsis and septic shock: a systematic review and meta-analysis. *BMJ* 329:480 [J]. *Bmj British Medical Journal*, 2004,329(7464):480–484.
- [16] Lau J, Ioannidis J P A, Schmid C H. Quantitative synthesis in systematic reviews [J]. *Annals of Internal Medicine*, 1997.
- [17] 国家卫生健康委员会.中国卫生健康统计年鉴 [M]. 北京:中国协和医科大学出版社, 2018.
- National Health Commission. China health statistics yearbook [M]. Beijing: Peking Union Medical College Press, 2018.
- [18] 中国金融年鉴编辑部.中国金融统计年鉴 [M]. 北京:中国金融年鉴杂志社有限公司, 2016.
- Editorial Department of Almanac of China's Finance and Banking. Almanac of china's finance and banking [M]. Beijing: China Financial Yearbook magazine Co., Ltd, 2016.
- [19] 国家统计局.中国统计年鉴 [M]. 北京:中国统计出版社, 2016.
- National Bureau of Statistics. China statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2016.
- [20] 中国财政年鉴编辑委员会.中国财政年鉴 [M]. 北京:中国财政杂志社, 2016.
- Editorial Committee of China Financial Yearbook. Finance yearbook of china [M]. Beijing: China Finance Press, 2016.
- [21] 张欣著.可计算一般均衡模型的基本原理与编程(第二版) [M]. 上海:格致出版社, 2017.
- Chang Gene H. Principles of computable general equilibrium (CGE) modeling and programming(2E) [M]. Shanghai: Truth & Wisdom Press, 2017.
- [22] 张天嵩,董圣杰,周支瑞.高级 Meta 分析方法基于 Stata 实现 [M]. 上海:复旦大学出版社, 2015:469.
- Zhang T S, Dong S J, Zhou Z R. Advanced meta-analysis in stata [M]. Shanghai: Fudan University Press, 2015:469.
- [23] 国家统计局.中国统计年鉴 [M]. 北京:中国统计出版社, 2018.
- National Bureau of Statistics. China Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2018.
- [24] 国家卫生计生委统计信息中心. 2013 年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.
- NHFPC. An analysis report of national health services survey in China, 2013 [M]. Beijing: Peking Union Medical College Press, 2015.
- [25] Liu H, Tian Y, Xiang X, et al. Air pollution and hospitalization for acute myocardial infarction in China [J]. *American Journal of Cardiology*, 2017,120(5):753–758.
- [26] Nam K, Selin N E, Reilly J M, et al. Measuring welfare loss caused by air pollution in Europe: A CGE analysis [J]. *Energy Policy*, 2010,38(9):5059–5071.
- [27] Matus K, Yang T, Paltsev S, et al. Toward integrated assessment of environmental change: air pollution health effects in the USA [J]. *Climatic Change*, 2008,88(1):59–92.
- [28] Kan H, London S J, Chen G, et al. Differentiating the effects of fine and coarse particles on daily mortality in Shanghai, China [J]. *Environment International*, 2007,33(3):376–384.
- [29] Ma Y, Chen R, Pan G, et al. Fine particulate air pollution and daily mortality in Shenyang, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2011,409(13):2473–2477.
- [30] Yang C, Peng X, Huang W, et al. A time-stratified case-crossover study of fine particulate matter air pollution and mortality in Guangzhou, China [J]. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 2012,85(5):579–585.
- [31] Tsai S, Chang C, Liou S, et al. The effects of fine particulate air pollution on daily mortality: A case-crossover study in a subtropical city, Taipei, Taiwan [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2014,11(5):5081–5093.
- [32] Tsai S, Chen C, Yang C. Short-term effect of fine particulate air pollution on daily mortality: a case-crossover study in a tropical city, Kaohsiung, Taiwan [J]. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*. 2014,77(8):467–477.
- [33] Lee H, Honda Y, Hashizume M, et al. Short-term exposure to fine and coarse particles and mortality: A multicity time-series study in East Asia [J]. *Environmental Pollution*, 2015,207:43–51.
- [34] 李湑湑,崔明亮,陈 晨,等.北京市 2013 年 1 月雾霾天气事件中 $PM_{2.5}$ 相关人群超额死亡风险评估 [J]. *疾病监测*, 2015,30(8):668–671.
- Li T T, Cui L L, Chen C, et al. Air pollutant $PM_{2.5}$ related excess mortality risk assessment in Beijing, January 2013 [J]. *Disease Surveillance*, 2015,30(8):668–671.

- [35] Lin H, Liu T, Xiao J, et al. Mortality burden of ambient fine particulate air pollution in six Chinese cities: Results from the Pearl River Delta study [J]. *Environment International*, 2016,96:91-97.
- [36] Zhang F, Liu X, Zhou L, et al. Spatiotemporal patterns of particulate matter (PM) and associations between PM and mortality in Shenzhen, China [J]. *BMC Public Health*, 2016,16(1):215-225.
- [37] 熊玉霞.广州市大气污染特征及其对人群健康的影响 [D]. 南宁:广西医科大学, 2016.
- Xiong Y X. The characteristics of air pollution and impacts on human health in Guangzhou [D]. Nanning: Guangxi Medical University, 2016.
- [38] Li G, Xue M, Zeng Q, et al. Association between fine ambient particulate matter and daily total mortality: An analysis from 160 communities of China [J]. *Science of the Total Environment*, 2017,599-600:108-113.
- [39] Zhang J, Liu Y, Cui L, et al. Ambient air pollution, smog episodes and mortality in Jinan, China [J]. *Scientific Reports*, 2017,7(1):11209.
- [40] 吴和岩,谭爱军,黄利群,等.珠海市大气污染物与居民每日死亡相关性的时间序列分析 [J]. *环境与健康杂志*, 2017,(9):797-800.
- Wu H Y, Tan A J, Huang L Q, et al. Time-series analysis on association between atmospheric pollutants and daily mortality among residents in Zhuhai [J]. *Journal of Environment & Health*, 2017,(9):797-800.
- [41] Hu K, Guo Y, Hu D, et al. Mortality burden attributable to PM in Zhejiang Province, China [J]. *Environment International*, 2018,121:515-522.
- [42] Li D, Wang J, Zhang Z, et al. Association between short-term exposure to ambient air pollution and daily mortality: a time-series study in Eastern China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018,25(16):16135-16143.
- [43] Liang F, Xiao Q, Gu D, et al. Satellite-based short- and long-term exposure to PM_{2.5} and adult mortality in urban Beijing, China [J]. *Environmental Pollution*, 2018,242:492-499.
- [44] Li T, Yan M, Sun Q, et al. Mortality risks from a spectrum of causes associated with wide-ranging exposure to fine particulate matter: A case-crossover study in Beijing, China [J]. *Environment International*, 2018,111:52-59.
- [45] Liang H, Qiu H, Tian L. Short-term effects of fine particulate matter on acute myocardial infarction mortality and years of life lost: A time series study in Hong Kong [J]. *Science of the Total Environment*, 2018,615:558-563.
- [46] 苏健婷,杜婧,王春梅,等.大气污染物对北京市常住居民死亡影响的时间序列研究 [J]. *环境与健康杂志*, 2018,(5):421-424.
- Su J T, Du J, Wang C M, et al. Relationship between air pollutants and mortality of resident population in Beijing: a time-series analysis [J]. *Journal of Environment & Health*, 2018,(5):421-424.
- [47] Tsai S, Chang C, Yang C. Fine particulate air pollution and hospital admissions for chronic obstructive pulmonary disease: a case-crossover study in Taipei [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2013,10(11):6015-6026.
- [48] 孟德杨.雾霾颗粒对慢性阻塞性肺疾病和哮喘住院率影响研究 [D]. 石家庄:河北医科大学, 2016.
- Meng D Y. The effect of particular matter of haze on hospital admissions of COPD and asthma [D]. Shijiazhuang: Hebei Medical University, 2016.
- [49] 王利亚,龙虎,邱航,等.环境因素与慢性阻塞性肺病住院人次关联分析 [J]. *中国卫生信息管理杂志*, 2018,(4):440-446.
- Wang L Y, Long H, Qiu H, et al. Association analysis of environmental factors and chronic obstructive pulmonary disease admissions [J]. *Chinese Journal of Health Informatics and Management*, 2018,(4):440-446.
- [50] 杨继雷,姚秀叶,袁晓飞,等.张家口市大气颗粒物 PM_{2.5}、PM₁₀ 浓度与慢性阻塞性肺疾病住院人次的关系研究 [J]. *现代生物医学进展*, 2018,18(6):1167-1171.
- Yang J L, Yao X Y, Yuan X F, et al. Relationship between concentration of airborne particulate matter PM_{2.5} and PM₁₀ and number of inpatients with chronic obstructive pulmonary disease in Zhangjiakou City [J]. *Progress in Modern Biomedicine*, 2018,18(6):1167-1171.
- [51] Luo L, Zhang Y, Jiang J, et al. Short-term effects of ambient air pollution on hospitalization for respiratory disease in Taiyuan, China: A Time-Series Analysis [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018,15(216010).
- [52] Qiu H, Yu H, Wang L, et al. The burden of overall and cause-specific respiratory morbidity due to ambient air pollution in Sichuan Basin, China: A multi-city time-series analysis [J]. *Environmental Research*, 2018,167:428-436.
- [53] Tian Y, Xiang X, Juan J, et al. Short-term effects of ambient fine particulate matter pollution on hospital visits for chronic obstructive pulmonary disease in Beijing, China [J]. *Environmental Health*, 2018,17(1):17-21.
- [54] Zhu X, Qiu H, Wang L, et al. Risks of hospital admissions from a spectrum of causes associated with particulate matter pollution [J]. *Science of the Total Environment*, 2019,656:90-100.
- [55] Chiu H, Chang C, Yang C. Relationship between hemorrhagic stroke hospitalization and exposure to fine particulate air pollution in Taipei, Taiwan [J]. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*. 2014,77(19):1154-1163.
- [56] Huang F, Luo Y, Guo Y, et al. Particulate matter and hospital admissions for stroke in Beijing, China: Modification effects by ambient temperature [J]. *Journal of the American Heart Association*, 2016,5(7).
- [57] 江波,牟喆,彭丽,等.上海市大气颗粒污染物对居民出血性脑卒中住院人数的影响 [J]. *同济大学学报(医学版)*, 2017,(3):115-119.
- Jiang B, Mou Z, Peng L, et al. Association between ambient PM levels and daily hemorrhagic stroke inpatients in Shanghai [J]. *Journal of Tongji University (Medical Science)*, 2017,(3):115-119.
- [58] Tian Y, Liu H, Zhao Z, et al. Association between ambient air pollution and daily hospital admissions for ischemic stroke: A nationwide time-series analysis [J]. *Plos Medicine*. 2018,15 (e100266810).
- [59] 吕晨光.济南大气污染物与呼吸及心脑血管疾病患者入院风险的时间序列研究 [D]. 济南:山东大学, 2018.
- Lv C G. Study on the effect of air pollution on the hospitalization of respiratory and cardiovascular system disease in Ji'nan [D]. Jinan: Shandong University, 2018.
- [60] Chiu H, Peng C, Wu T, et al. Short-term effects of fine particulate air pollution on ischemic heart disease hospitalizations in Taipei: A case-crossover study [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2013, 13(5):1563-1569.
- [61] San Tam W W, Wong T W, Wong A H S. Association between air pollution and daily mortality and hospital admission due to ischaemic heart diseases in Hong Kong [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 120:360-368.
- [62] Xie W, Li G, Zhao D, et al. Relationship between fine particulate air pollution and ischaemic heart disease morbidity and mortality [J]. *Heart*, 2015,101(4):257-263.

- [63] Xu A, Mu Z, Jiang B, et al. Acute effects of particulate air pollution on ischemic heart disease hospitalizations in Shanghai, China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2017,14(2):168.
- [64] Dai X, Liu H, Chen D, et al. Association between ambient particulate matter concentrations and hospitalization for ischemic heart disease (I20-I25, ICD-10) in China: A multicity case-crossover study [J]. *Atmospheric Environment*, 2018,186:129-135.
- [65] Liu H, Tian Y, Xiang X, et al. Ambient particulate matter concentrations and hospital admissions in 26 of China's largest cities [J]. *Epidemiology*, 2018,29(5):649-657.
- [66] 吴钦城,郑玉新,朴金梅,等.青岛市大气污染物对心脑血管疾病住院影响的病例交叉研究 [J]. *环境与健康杂志*, 2018,35(4):283-287.
- Wu Q C, Zheng Y X, Piao J M, et al. Effects of air pollution on hospital admissions for cardiovascular and cerebrovascular diseases in Qingdao: a case-crossover study [J]. *Journal of Environment & Health*, 2018,35(4):283-287.
- [67] Xu Q, Wang S, Guo Y, et al. Acute exposure to fine particulate matter and cardiovascular hospital emergency room visits in Beijing, China. [J]. *Environmental Pollution*, 2017,220(Part A):317-327.
- [68] Liang F, Tian L, Guo Q, et al. Associations of PM_{2.5} and black carbon with hospital emergency room visits during heavy haze events: A case study in Beijing, China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2017,14(7):725.
- [69] Guo Y, Jia Y, Pan X, et al. The association between fine particulate air pollution and hospital emergency room visits for cardiovascular diseases in Beijing, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407(17):4826-4830.
- [70] 马关培,邹宝兰,许振成,等.广州市某区医院呼吸系统疾病门诊人数与大气污染关系的时间序列研究 [J]. *环境与健康杂志*, 2012, 29(6):526-528.
- Ma G P, Zou B L, Xu Z C, et al. Association of respiratory diseases outpatient visits and air pollution in a District, Guangzhou: A time-series study [J]. *Journal of Environment & Health*, 2012,29(6): 526-528.
- [71] 崔亮亮,李新伟,耿兴义,等.2013 年济南市大气 PM_{2.5} 污染及雾霾事件对儿童门诊量影响的时间序列分析 [J]. *环境与健康杂志*, 2015,32(06):489-493.
- Cui L L, Li X W, Gen X Y, et al. Effects of PM_{2.5} and haze event on hospital visiting of children in Ji'nan, 2013: a time series analysis [J]. *Journal of Environment & Health*, 2015,32(6):489-493.
- [72] Xu Q, Li X, Wang S, et al. Fine particulate air pollution and hospital emergency room visits for respiratory disease in urban areas in Beijing, China, in 2013 [J]. *Plos One*, 2016,11(4):e153099.
- [73] 陈 献.北京市冬季 PM_{2.5} 污染对呼吸、循环系统疾病影响的时间序列分析 [D]. 石家庄:河北医科大学, 2016.
- Chen X, Research the time series analysis the effect of PM_{2.5} pollution on respiration and circulation system in winter in Beijing [D]. Shijiazhuang: Hebei Medical University, 2016.
- [74] 刘 澎.空气污染对呼吸系统疾病急诊量的影响以及居民的支付意愿研究 [D]. 济南:山东大学, 2016.
- Liu P. Effects of air pollution on hospital emergency room visits for respiratory diseases and assessment of residents' willingness-to-pay for good air quality [D]. Jinan: Shandong University, 2016.
- [75] 彭朝琼,蔡军芳,余淑苑,等.深圳市空气中 PM_{2.5} 与医院呼吸系统疾病门诊日就诊人次的关系研究 [J]. *中华预防医学杂志*, 2016, 50(10):874-879.
- Peng C Q, Cai J F, Yu S Y, Et Al. Impact of PM_{2.5} on daily outpatient numbers for respiratory diseases in Shenzhen, China [J]. *Chinese Journal of Preventive Medicine*, 2016,50(10):874-879.
- [76] Li G, Lan H, Liu Z, et al. The Association between Short-term Exposure to Fine Particulate Matter and Outpatient Visit in Beijing, China [J]. *Iran J Public Health*, 2017,46(11):1486-1494.
- [77] Zhao Y, Wang S, Lang L, et al. Ambient fine and coarse particulate matter pollution and respiratory morbidity in Dongguan, China [J]. *Environmental Pollution*, 2017,222:126-131.
- [78] 张文增,甄国新,陈东妮,等.北京市顺义区大气污染物对呼吸系统疾病门诊量的影响 [J]. *中国卫生统计*, 2017,34(2):275-279.
- Zhang W Z, Zhen G X, Chen D N, et al. Impact of air pollutants on respiratory system outpatients in Shunyi District of Beijing [J]. *Chinese Journal of Health Statistics*, 2017,34(2):275-279.
- [79] Wang S, Li Y, Niu A, et al. The impact of outdoor air pollutants on outpatient visits for respiratory diseases during 2012-2016 in Jinan, China [J]. *Respiratory Research*, 2018,19(1):246-253.
- [80] Wang Y, Zu Y, Huang L, et al. Associations between daily outpatient visits for respiratory diseases and ambient fine particulate matter and ozone levels in Shanghai, China [J]. *Environmental Pollution*, 2018, 240:754-763.
- [81] 姜彩霞,朱 冰,张 龙.2013~2014 年杭州市大气 PM_{2.5} 与呼吸系统疾病就诊人次的时间序列研究 [J]. *环境与职业医学*, 2018, 35(7):589-595.
- Jiang C X, Zhu B, Zhang L. Association between ambient PM_{2.5} and hospital visits for respiratory diseases in Hangzhou in 2013-2014: A time-series study [J]. *Journal of Environmental & Occupational Medicine*, 2018,35(7):589-595.
- [82] 游颖琦,朱晶颖,张旭辉,等.无锡市大气污染对成人内科门诊量影响的时间序列研究 [J]. *山东大学学报(医学版)*, 2018,56(11):53-60.
- You Y Q, Zhu J Y, Zhang X H, et al. Impact of air pollution on the outpatient visits of adult internal medicine in Wuxi city: A time series study [J]. *Journal of Shandong University (Health Sciences)*, 2018, 56(11):53-60.
- [83] Chai G, He H, Sha Y, et al. Effect of PM_{2.5} on daily outpatient visits for respiratory diseases in Lanzhou, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019,649:1563-1572.
- [84] Liu C, Liu Y, Zhou Y, et al. Short-term effect of relatively low level air pollution on outpatient visit in Shennongjia, China [J]. *Environmental Pollution*, 2019,245:419-426.

作者简介: 曾贤刚(1972-),男,江西九江人,教授,博士,研究方向为环境与资源经济学.发表论文 100 余篇。