

PM_{2.5}污染对中国人口死亡率的影响 ——基于346个城市面板数据的实证分析

陈 钺^{1,2,3}, 黄柏石^{1,2,3}, 刘 晔^{1,2,3*}

(1. 中山大学地理科学与规划学院, 广州 510006; 2. 广东省公共安全与灾害工程技术研究中心, 广州 510006;
3. 广东省城市化与地理环境空间模拟重点实验室, 广州 510006)

摘 要:中国生态文明建设和“健康中国”战略强调切实治理影响人口健康的环境问题,建设健康人居环境。论文基于2000年和2010年中国人口普查资料以及2005年和2015年各省级行政单元1%人口抽样调查等数据资料,论文使用探索性空间分析方法刻画中国城市人口死亡率的时空变化特征,并采用空间回归方法,揭示城市PM_{2.5}的平均浓度对人口死亡率的影响及其空间溢出效应,以及社会经济因素对PM_{2.5}—人口死亡率关联的调节效应。结果表明:①中国城市人口死亡率的分布特征呈现明显的异质性,高死亡率地区早期集聚分布于西南地区,2005年后在西南地区、华北地区、华东地区和华中地区呈现逐渐集聚分布态势。低死亡率地区长期集中分布于西北地区、东北地区、长三角地区、珠三角地区和京津两市。②人口死亡率的分布存在空间关联性,高一高类型地区早期集中分布于西南地区,后期向东扩展;低—低类型地区主要分布于北疆、内蒙古西部和广东省及其周边地区。③城市PM_{2.5}浓度对人口死亡率具有显著的正向影响,并且对邻近地区的人口死亡率具有显著的空间溢出效应。④中国城市PM_{2.5}浓度对人口死亡率的影响存在学历差异和城乡差异,地区高学历人群集聚可降低PM_{2.5}的健康风险,城镇化发展进程缓慢则会加重PM_{2.5}的健康风险。研究旨在为防范空气污染暴露导致的健康风险、建设健康人居环境提供科学依据。

关 键 词:PM_{2.5};人口死亡率;空间回归模型;调节效应;中国

改革开放以来,中国经济迅速发展,人民生活水平显著提高。但是粗放型经济发展方式致使环境污染问题持续突出,中国经济社会的可持续发展受到严峻挑战。根据《2019年中国生态环境状况公报》,全国超过一半的城市空气污染浓度超标,以PM_{2.5}为首要污染物的天数占严重、重度污染天数的78.8%。中国的空气污染问题,尤其是PM_{2.5}污染问题严峻。据估算,中国每年可归因于PM_{2.5}污染的死亡人数到2017年已增加至97.1万^[1]。空气污染导

致的健康风险和危害已成为社会关注的公共话题。中国生态文明建设强调“解决损害群众健康突出环境问题”,国家“十四五”规划和2035年远景目标纲要重视建立“公众健康影响评估制度”。因此,揭示空气污染,尤其是PM_{2.5}污染对居民健康的影响,对于评估空气污染的健康风险和促进健康人居环境建设具有现实意义。

近年来,空气污染对健康的影响研究受到医学、环境科学、地理学等领域学者的关注,环境健康

收稿日期:2021-10-22;修订日期:2021-12-26。

基金项目:国家自然科学基金项目(42171196,41930646,41971194);中央高校基本科研业务费项目(20lgzd10);中国博士后科学基金项目(2020M683149)。[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 42171196, 41930646 and 41971194; The Fundamental Research Funds for the Central Universities, No. 20lgzd10; China Postdoctoral Science Foundation, No. 2020M683149.]

第一作者简介:陈钺(1998—),女,广东潮州人,硕士生,主要研究方向为健康地理。E-mail: chenm253@mail2.sysu.edu.cn

*通信作者简介:刘晔(1986—),男,广东广州人,教授,博士生导师,主要研究方向为城市人居环境与居民健康福祉、城市化与人口流动、人才流动的机制与影响。E-mail: liuye25@mail.sysu.edu.cn

引用格式:陈钺,黄柏石,刘晔. PM_{2.5}污染对中国人口死亡率的影响:基于346个城市面板数据的实证分析[J]. 地理科学进展, 2022, 41(6): 1028-1040. [Chen Man, Huang Baishi, Liu Ye. Effects of PM_{2.5} concentration on mortality in China: A study based on city-level panel data. Progress in Geography, 2022, 41(6): 1028-1040.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2022.06.007

风险评估是健康地理学的重要议题^[2]。与其他大气颗粒物相比,PM_{2.5}存在更大的健康风险和危害^[3],PM_{2.5}粒径小、表面积大,易携带空气中的毒害成分被吸入肺部,引发肺部炎症或参与全身血液循环^[4],影响人体呼吸系统和心血管健康。环境流行病学领域对PM_{2.5}暴露—反应关系的研究比较成熟,运用队列研究^[5]、时间序列^[6-7]和病例交叉^[8]等方法,评估PM_{2.5}污染造成的各类疾病负担、对死亡和预期寿命的影响等,其中死亡率是评估居民PM_{2.5}健康风险的重要指标。发达国家和地区从PM_{2.5}的暴露浓度、暴露时间进行研究,发现高浓度PM_{2.5}显著提高地区死亡率^[9]和心血管等特定疾病死亡率^[5];长期暴露于低浓度PM_{2.5}环境也会显著提高死亡风险^[10]。然而中国PM_{2.5}的暴露水平、化学成分和毒性特征与发达国家明显不同,西方发达国家的研究结论不能完全用于评估中国PM_{2.5}污染对健康的影响^[11]。流行病学领域的研究成果已经证实PM_{2.5}污染显著提高中国居民的死亡风险^[12]。从地理学角度出发,学者们基于省级行政单元^[13]、城市^[14]、县级^[15]等地理尺度研究PM_{2.5}对人口死亡率的影响。健康地理研究表明,PM_{2.5}对中国居民的健康影响存在空间相关性和空间分异性^[16]。

既有研究表明,影响中国人口死亡率的因素还包括人口结构、社会文化程度、城镇化水平、经济增长和经济结构、医疗卫生、自然环境等方面。在人口结构方面,健康脆弱群体(如少年儿童、老年人)的比重越高,地区人口死亡率越高^[17]。地区居民受教育程度的提高有利于提高健康素养和改善个人生活习惯,进而改善健康状况^[18]。在城镇化水平上,一方面,城镇化的快速发展带来的交通拥挤、居民生活压力大等问题损害居民健康,使得死亡率上升^[19];另一方面,城镇化发展使得医疗卫生资源配置更加完善,居民生活水平提高,从而降低人口死亡率^[20]。城市经济发展(如人均GDP或居民收入的提高)改善居民生活水平、拓宽健康信息的获取渠道,进而降低人口死亡率^[18,21-22]。在经济结构方面,经济结构优化减少了工业污染的排出,改善居民生活环境和健康状况^[23]。不利的自然环境(如高温、寒冷)提高心脑血管或呼吸系统等疾病的发病率和死亡率^[24],而有利的自然环境(如蓝绿空间)通过减轻环境危害、缓解压力 and 为社会交往提供场所3种途径促进人体健康,降低人口死亡风险^[25]。

基于空气污染和社会因素对健康的共同影响,

健康、社会和环境不平等“三重危险”引起学者们的探讨^[26]。空气污染暴露的健康影响群体差异和环境公正研究是健康地理学的研究热点^[27]。学者们关注环境公正和基于社会经济发展差距造成的产品、服务分配、污染暴露等分布不均引起的健康不平等问题^[28-31]。PM_{2.5}与人口死亡风险的关系研究重点关注婴幼儿^[32]、孕产妇^[33]、老年人^[34]等弱势群体。中国PM_{2.5}对人口健康的影响在不同城市类型^[35]、城乡之间^[36]均存在显著的差异。其他大气污染物和社会经济因素的交互作用对居民健康影响的研究较为成熟,但PM_{2.5}作为对人体健康危害最严重的大气污染物^[37],目前关于PM_{2.5}和社会经济因素的交互作用对人口死亡率影响的研究较少。空气污染对社会经济地位较低的弱势群体的健康影响更为严重,低收入水平、低学历人群等更容易暴露在较高空气污染环境,并且具有较差的健康状况^[38]。当环境污染与健康、社会经济因素和不平等问题相互影响时,极有可能陷入“环境健康贫困陷阱”,导致污染暴露—健康危害的恶性循环^[39]。社会经济因素可以调节空气污染—健康的关系,中国城镇化发展使得医疗卫生资源配置更完善,提供改善居民健康的机会,有效调节空气污染对健康的影响^[20,40]。经济结构优化降低居民的空气污染暴露度,减少了归因于PM_{2.5}污染的过早死亡人数^[41]。高收入^[42]、高学历^[43]人群有更高的环境支付意愿和更高效的污染暴露规避措施,显著降低大气污染导致的健康危害。

总结现有研究发现,中国学者基于不同的研究区域、研究尺度、研究角度对中国PM_{2.5}污染与人口死亡的关系进行了大量研究。但是目前中国PM_{2.5}污染与死亡指标的关系主要基于横断面数据进行研究,研究尺度集中于省级行政单元或地市级尺度。在研究区域上,全国范围的研究主要围绕省级尺度进行,地市级、县区、乡镇街道尺度的研究多局限于部分区域,尤其是发达地区。研究方法以环境流行病学的研究范式为主,缺少社会经济因素对PM_{2.5}暴露—人口死亡关系的影响探讨。同时,PM_{2.5}污染并不是局部环境问题,可通过大气环流等扩散至邻近地区^[44],具有较强的空间传递性^[45],当前大部分研究缺少考虑PM_{2.5}的空间溢出效应^[46]。基于此,本文使用探索性空间数据分析方法刻画中国城市人口死亡率的时空变化特征,并运用空间回归方法揭示城市PM_{2.5}浓度对人口死亡率的影响及其空间溢出效应,以及社会经济因素对PM_{2.5}—人口死亡率

关联的调节效应,以期为环境污染风险评估和健康人居环境建设提供科学依据。

1 研究区域、数据与方法

1.1 研究区域

本文的研究区域包括全国31个省(自治区、直辖市)范围内的346个地级及以上行政单元(包括4个直辖市、地级及以上城市、自治州、盟以及部分省直辖行政区域),不包括香港、澳门和台湾地区。由于2000—2015年部分城市行政区划发生调整变动,本文将2000、2005、2010年的行政区划按照2015年标准进行归并统一,确保4个年份节点研究单元的行政边界一致。

1.2 数据说明

由于2020年中国城市人口普查资料和收录2020年中国城市社会经济发展情况的统计资料尚未公开发布,本文研究年份选择2000、2005、2010和2015年。区域居民的健康水平通常使用人群健康水平的相对指标或平均指标进行度量^[13]。本文的被解释变量为人口死亡率,用以表征城市居民健康水平,即地区一段时间内死亡人数与该时期总人数的比率。模型的核心解释变量为当年PM_{2.5}浓度,基于PM_{2.5}的健康影响存在时间滞后效应,本文在稳健性分析部分以3年PM_{2.5}均值替代当年PM_{2.5}浓度进行模型验证;中国《环境空气质量标准》(GB3095—2012)规定中国PM_{2.5}准则值年均值为35 μg/m³,本文的稳健性分析部分将当年PM_{2.5}浓度处理为二分类变量,将当年PM_{2.5}浓度≥35 μg/m³的数值定义为1,否则为0,模型中该变量以pm_35表示。控制变量主要从人口结构、社会文化程度、城镇化水平、经济增长与经济结构、医疗卫生和自然环境等6个方面影响人口死亡率的因素中进行选择,选择60岁及以上老年人口比重和0~14岁少儿人口比重反映地区脆弱群体占比;大专及以上学历人口比重反映地区社会文化发展水平;城镇化水平以城镇化率表示;人均GDP表征地区经济发展水平,模型中将人均GDP进行对数变换;第二、三产业比重表征地区经济结构;每万人拥有医生数表征地区医疗卫生资源配置情况;年平均温度、年相对湿度和NDVI平均值反映自然环境因素对人口死亡率的影响。

变量的数据来源如下:①人口死亡率等人口统计指标主要来源于2000年和2010年人口普查资

料、各省级行政单元2005年和2015年1%人口抽样调查资料。由于内蒙古自治区、湖北省、湖南省、吉林省尚未发布2005年《1%人口抽样调查资料》,内蒙古自治区、安徽省、山东省、四川省、西藏自治区尚未发布2015年《1%人口抽样调查资料》,缺失数据的城市通过《国民经济和社会发展统计公报》或省级数据表征城市的平均水平进行数据补齐。②PM_{2.5}数据来源于分辨率为1 km的全球年度PM_{2.5}浓度网格数据集^[47]。在该数据集的基础上,计算处理得到城市当年PM_{2.5}浓度,1998—2000、2003—2005、2008—2010、2013—2015年各3年PM_{2.5}浓度均值。将PM_{2.5}浓度(μg/m³)代入模型后,估计系数至少需要读取至小数点后第三位,难以直观比较PM_{2.5}对人口死亡率的影响及其空间溢出效应,故本文对模型当年PM_{2.5}浓度和3年PM_{2.5}均值指标调整量纲,将PM_{2.5}数据同时乘以100代入模型。③人均GDP、第二、三产业比重数据来源于《中国城市统计年鉴》和各城市统计年鉴;温度、相对湿度数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>);人口密度数据来源于中国人口空间分布公里网格数据集^[48];NDVI数据来源于NASA地球观测系统数据和信息系统LP-DAAC中心^[49]。346个城市的矢量数据来源于国家基础地理信息中心(<http://www.ngcc.cn/>)。

各变量的描述性统计结果如表1所示。

1.3 研究方法

1.3.1 探索性空间分析方法

(1) 全局空间自相关

全局空间自相关用于度量数据的整体空间关联程度,本文采用全局Moran's *I*衡量地区人口死亡率的空间相关性,计算公式为:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (y_i - \bar{y})(y_j - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})} \quad (1)$$

式中: y_i 、 y_j 为地区 i 、 j 的人口死亡率, \bar{y} 为人口死亡率均值, W_{ij} 为空间权重, n 为行政单元总数。 I 的值域范围为 $[-1, 1]$ 。 $I > 0$ 且通过显著性检验,说明地区人口死亡率存在空间正自相关,即高死亡率地区和低死亡率地区分别在地理空间上趋于集聚; $I < 0$ 且通过显著性检验,说明地区人口死亡率存在空间负相关,即高死亡率地区和低死亡率地区分别在地理空间上趋于离散;当 $I = 0$,说明人口死亡率的空间分布是随机的。

表1 变量描述性统计
Tab.1 Descriptive statistics of variables

| 变量名 | 符号 | 2000年 平均值(标准差) | 2005年 平均值(标准差) | 2010年 平均值(标准差) | 2015年 平均值(标准差) |
|---|-----------|-------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 人口死亡率/% | mortality | 5.83 (1.13) | 5.96 (1.46) | 5.56 (1.31) | 5.04 (1.28) |
| 当年PM _{2.5} /(μg/m ³) | pm | 20.78 (11.95) | 33.17 (17.07) | 33.59 (18.15) | 33.23 (19.21) |
| 3年PM _{2.5} 均值/(μg/m ³) | pm3 | 20.96 (10.60) | 30.56 (15.68) | 33.65 (17.76) | 33.39 (18.24) |
| 老年人口比重/% | older | 9.92 (1.90) | 12.23 (2.68) | 12.89 (2.81) | 15.61 (3.93) |
| 少儿人口比重/% | child | 23.73 (4.97) | 20.33 (4.87) | 17.31 (4.68) | 17.67 (6.10) |
| 大专及以上学历人口比重/% | edu | 3.34 (2.59) | 4.89 (3.58) | 7.76 (4.72) | 10.49 (6.17) |
| 城镇化率/% | urban | 36.94 (18.80) | 43.31 (18.24) | 47.58 (17.23) | 52.86 (14.91) |
| 人口密度/(人/km ²) | pop | 343.12 (329.44) | 356.93 (333.02) | 369.66 (331.49) | 385.15 (357.95) |
| 人均GDP/元 | pgdp | 7742.18 (6598.64) | 14529.42 (11736.97) | 30832.91 (21342.19) | 48702.67 (28559.05) |
| 第二产业比重/% | secindust | 40.60 (12.99) | 44.27 (13.23) | 49.35 (11.90) | 45.40 (10.39) |
| 第三产业比重/% | terindust | 35.56 (7.48) | 37.04 (8.90) | 36.01 (9.11) | 41.46 (8.76) |
| 每万人医生数/(位/万人) | doctor | 15.21 (10.32) | 15.55 (7.26) | 18.30 (9.44) | 21.40 (10.67) |
| 年平均相对湿度/% | rh | 69.27 (10.37) | 66.08 (9.73) | 67.02 (10.03) | 68.56 (11.36) |
| 年平均温度/℃ | temp | 13.23 (5.62) | 13.30 (5.59) | 13.35 (5.64) | 13.88 (5.44) |
| NDVI | ndvi | 0.41(0.14) | 0.40 (0.13) | 0.41 (0.14) | 0.44 (0.15) |

(2) 局部空间自相关

局部空间自相关度量具体空间单元数据与其邻近空间单元数据之间的关联程度^[50],计算公式为:

$$I_i = \frac{1}{S^2}(y_i - \bar{y}) \sum_{j=1}^n W_{ij}(y_j - \bar{y}) \tag{2}$$

式中: $S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (y_j - \bar{y})^2$ 。 $I_i > 0$ 且通过显著性检验,表示高(低)死亡率地区 i 与高(低)死亡率地区相邻; $I_i < 0$ 且通过显著性检验,说明高(低)死亡率地区 i 与低(高)死亡率地区相邻;当 $I_i = 0$,说明人口死亡率的空间分布是随机的。

1.3.2 空间回归分析

拉格朗日乘数检验、LM-Error和LM-Lag的检验结果均显著,表明本文应考虑空间因素,选用空间面板回归模型探讨PM_{2.5}对城市人口死亡率的影响。空间面板回归模型主要包括空间滞后模型(spatial lag model, SLM)和空间误差模型(spatial error model, SEM),空间杜宾模型(spatial Durbin model, SDM)是空间滞后模型和空间误差模型的结合。基于检验结果和Log Likelihood值,应选用SLM模型和SEM模型,其中SLM模型的拟合度更优。SLM模型用于研究地区人口死亡率与相邻地区人口死亡率的空间交互关系,将自变量对因变量的影响分解为直接效应、间接效应和总效应^[51]。其中,直接效应反映自变量变化对本地区因变量的平均

影响;间接效应反映本地区自变量的变化对邻近地区因变量的平均影响,即空间溢出效应;而总效应衡量自变量对本地区和邻近地区因变量的平均影响^[52]。空间滞后模型公式如下:

$$y_{it} = \rho W_{ij} y_{it} + \alpha_0 + \alpha_1 pm_{it} + \alpha_2 older_{it} + \alpha_3 child_{it} + \alpha_4 urban_{it} + \alpha_5 edu_{it} + \alpha_6 \ln pgdp_{it} + \alpha_7 pop_{it} + \alpha_8 secindust_{it} + \alpha_9 terindust_{it} + \alpha_{10} doctor_{it} + \alpha_{11} temp_{it} + \alpha_{12} rh_{it} + \alpha_{13} ndvi_{it} + \varepsilon_{it} \tag{3}$$

式中: W_{ij} 为基于行政单元地理邻近性提取的空间权重,若地区 i 、 j 存在公共点或公共边,则 $W_{ij} = 1$, 否则为0; ρ 为空间回归系数,反映相邻地区观测值对本地区观测值的影响; ε_{it} 为随机误差项; y_{it} 代表 i 地区 t 年人口死亡率; α_0 为常数; $\alpha_1 \sim \alpha_{13}$ 为各变量系数;其他符号含义见表1。

运用调节效应分析技术,引入当年PM_{2.5}浓度与社会经济变量的交互项,识别不同社会经济阶层的空气污染暴露风险差异,揭示2000—2015年中国346个城市的“环境健康贫困”问题。调节效应计算公式如下:

$$y_{it} = \rho W_{ij} y_{it} + \alpha_0 + \alpha_1 pm_{it} + \alpha_2 older_{it} + \alpha_3 child_{it} + \alpha_4 urban_{it} + \alpha_5 edu_{it} + \alpha_6 \ln pgdp_{it} + \alpha_7 pop_{it} + \alpha_8 secindust_{it} + \alpha_9 terindust_{it} + \alpha_{10} doctor_{it} + \alpha_{11} temp_{it} + \alpha_{12} rh_{it} + \alpha_{13} ndvi_{it} + \beta pm_{it} \times M_{it} + \varepsilon_{it} \tag{4}$$

式中: M_{it} 表示调节变量,根据前人研究结论,本文的社会经济调节变量包括大专及以上学历人口比重(edu)、城镇化率(urban)、对数人均GDP($\ln pgdp$)和第三产业比重(terindust); β 为交互项系数。为减少交互项与其他变量之间的多重共线性影响,模型对 pm_{it} 、 M_{it} 变量进行中心化操作,即将变量减去样本均值^[53]。

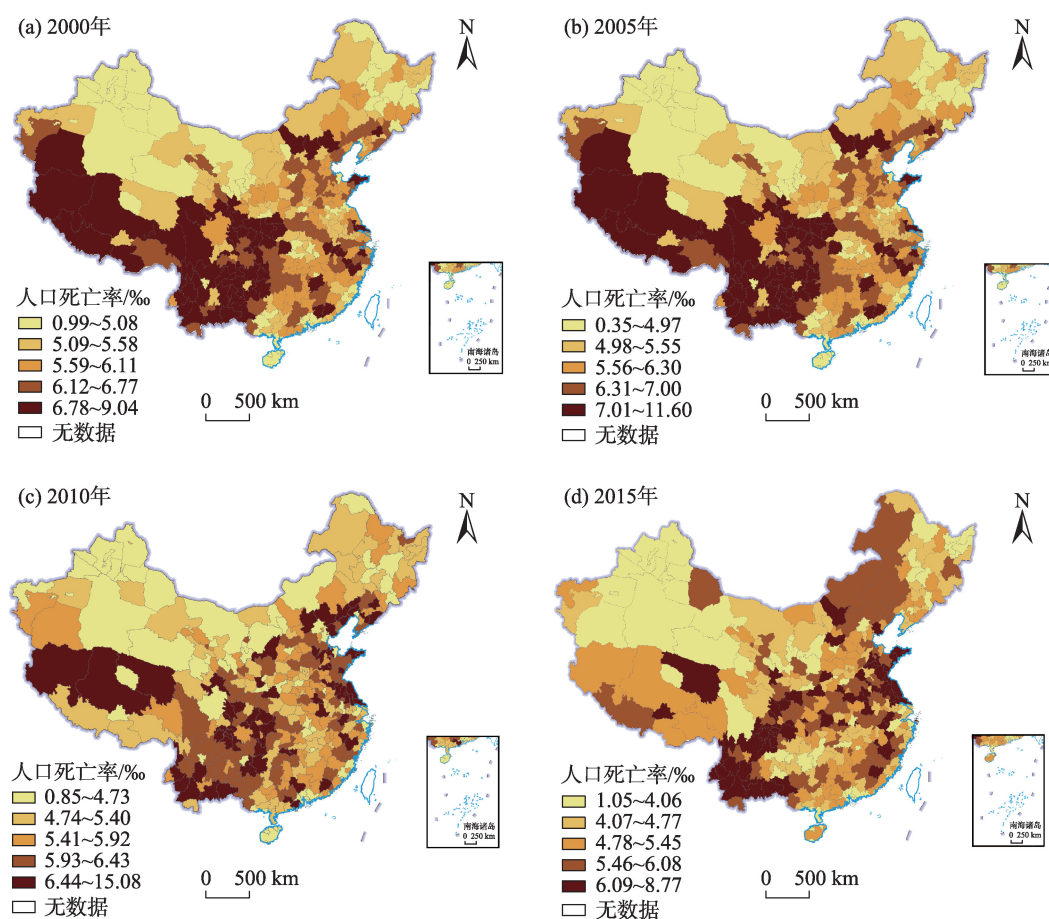
2 中国城市人口死亡率的空间格局及时间变化

2.1 人口死亡率的空间分布特征及变化

为直观反映人口死亡率的时空分布特征,本文采用分位数法将每年人口死亡率从小到大排列分为5个等级,分别为低死亡率地区(当年死亡率排名前20%)、较低死亡率地区(当年死亡率排名前20%~40%)、中等死亡率地区(当年死亡率排名前40%~

60%)、较高死亡率地区(当年死亡率排名前60%~80%)和高死亡率地区(当年死亡率排名前80%~100%),绘制2000—2015年中国人口死亡率的空间分布图,以总结中国城市人口死亡率空间差异的变化趋势(图1)。

2000—2015年,低死亡率和较低死亡率地区长期集中分布于西北地区、东北地区、长三角地区、珠三角地区和京津两市,高死亡率和较高死亡率地区由连片分布于西南地区逐渐向东扩展分布。人口死亡率的主要时空分布特征变化为:2000年,中国人口死亡率整体呈现北低南高的空间分布格局,高死亡率和较高死亡率地区连片分布于西南地区,零星分布于华北地区、华东地区;2005年,高死亡率和较高死亡率地区向东扩展,连片分布于西南地区和华东地区,零星分布于东部沿海地区;至2010年,人口死亡率分布格局发生较大变化,呈现零散分布的格局,分布于西南地区的高死亡率地区数量明显减



注:本图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2020)4632号的标准地图制作,底图无修改,下同。

图1 2000—2015年中国人口总死亡率空间分布

Fig.1 Spatial distribution of mortality rates in China during 2000–2015

少,高死亡率和较高死亡率地区在华北、华东地区的集聚趋势明显;2015年,高死亡率和较高死亡率地区集中分布在西南地区、华东地区和华东地区,低死亡率和较低死亡率地区趋向零散分布。

2.2 人口死亡率的空间集聚特征及变化

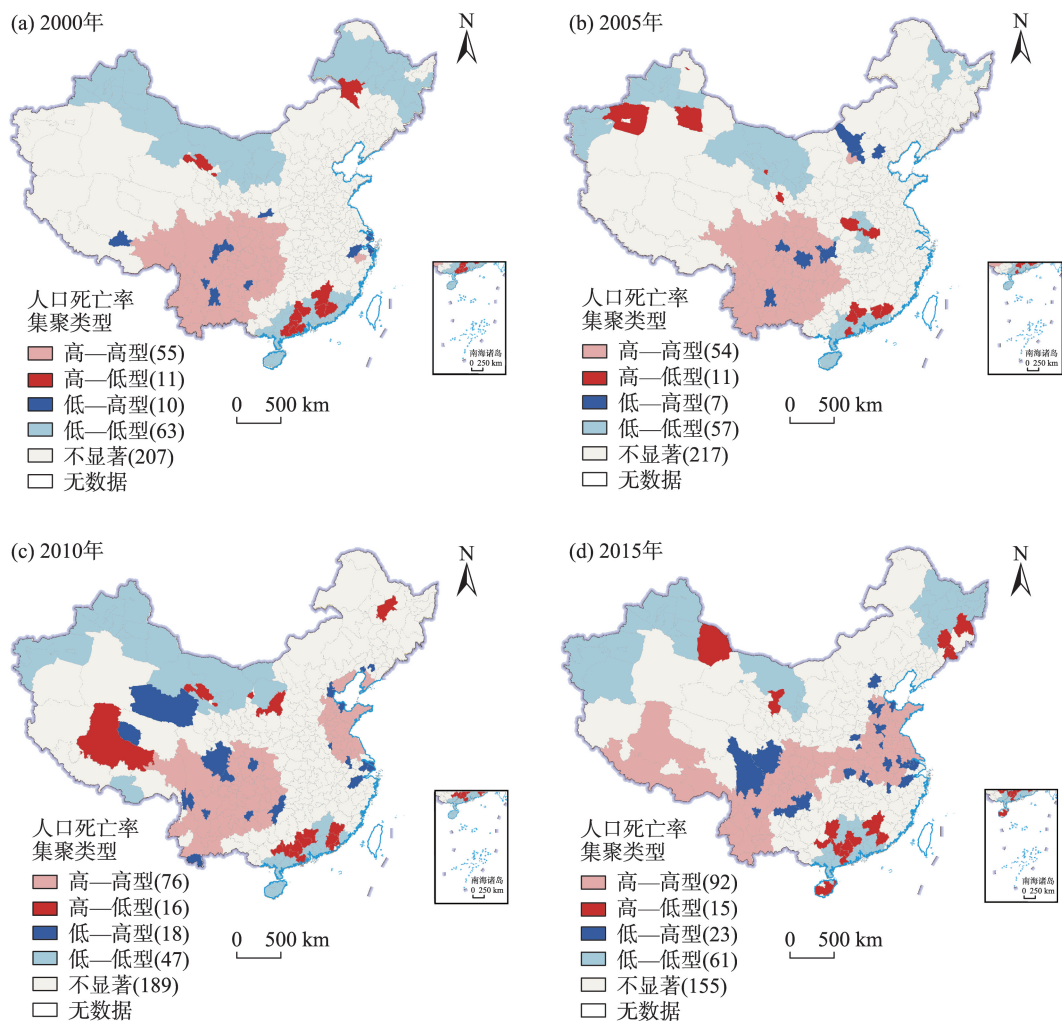
2000—2015年人口死亡率的全局Moran's *I*指数分别为0.25、0.21、0.19、0.26,均显著拒绝原假设,表明中国人口死亡率分布存在显著的空间依赖性。LISA散点图(图2)直观反映出中国城市人口死亡率的局部空间分布特征。2000—2015年,低—高类型地区数量增多且呈现零星分布特征;高一低类型地区呈现零星分布特征,粤东北—赣南地区以及粤西地区持续为人口死亡率高—低类型地区;低—低类型地区长期分布于北疆、内蒙古西部、粤西和珠三角地区;2000—2015年,人口死亡率高—高类

型地区数量显著增加,2000—2005年高一高类型地区集中于西南地区,2010—2015年连片分布于西南地区和华东地区。总体而言,2000—2015年人口死亡率高—高类型地区早期集中在西南地区,而后向华东地区的山东半岛、苏北地区、苏鲁豫皖交界地区延伸,低—低类型地区长期集中在北疆、内蒙古西部和广东省及周边地区。

3 结果与分析

3.1 PM_{2.5}污染对人口死亡率的影响分析

以当年PM_{2.5}浓度为核心解释变量,运用空间滞后模型进行统计建模,识别PM_{2.5}对人口死亡率的影响。如表2所示,空间滞后系数 ρ 在1%的显著性水平下显著为正,说明人口死亡率具有空间依赖性。



注:图例括号中数字为该类型城市数。

图2 2000—2015年中国人口死亡率的LISA地图

Fig.2 LISA map of mortality rates in China during 2000-2015

表2 空间滞后回归模型估计结果
Tab.2 Estimation results of spatial regression model

| 变量 | 模型 1: SLM 估计系数(标准差) | 直接效应 估计系数(标准差) | 间接效应 估计系数(标准差) | 总效应 估计系数(标准差) |
|----------------|------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| pm | 0.906** (0.379) | 0.937** (0.396) | 0.364** (0.161) | 1.301** (0.547) |
| older | 0.060*** (0.014) | 0.061*** (0.014) | 0.024*** (0.007) | 0.084*** (0.020) |
| child | 0.006 (0.005) | 0.006 (0.005) | 0.002 (0.002) | 0.009 (0.007) |
| edu | -0.044*** (0.009) | -0.044*** (0.009) | -0.017*** (0.005) | -0.062*** (0.013) |
| urban | -0.004 (0.004) | -0.004 (0.004) | -0.002 (0.001) | -0.005 (0.005) |
| ln pop | -0.088 (0.060) | -0.086 (0.061) | -0.034 (0.025) | -0.120 (0.085) |
| ln pgdp | -0.137** (0.069) | -0.137** (0.069) | -0.053* (0.028) | -0.189** (0.095) |
| secindust | -0.003 (0.005) | -0.003 (0.004) | -0.001 (0.002) | -0.004 (0.006) |
| terindust | -0.011** (0.006) | -0.012** (0.005) | -0.005** (0.002) | -0.016** (0.008) |
| doctor | 0.003 (0.003) | 0.003 (0.003) | 0.001 (0.001) | 0.004 (0.005) |
| rh | -0.012 (0.010) | -0.013 (0.010) | -0.005 (0.004) | -0.018 (0.014) |
| temp | -0.397*** (0.074) | -0.402*** (0.077) | -0.156*** (0.035) | -0.558*** (0.104) |
| ndvi | -0.532 (1.134) | -0.618 (1.125) | -0.244 (0.455) | -0.861 (1.574) |
| ρ | 0.291*** (0.036) | | | |
| Log likelihood | -1400.340 | | | |
| N | 1384 | | | |

注:***、**、*分别代表通过 1%、5%和 10%显著性水平检验,下同。

当年PM_{2.5}浓度与人口死亡率呈现显著的正相关关系,PM_{2.5}浓度越高,空气中的有毒物质更容易附着于PM_{2.5}通过进入肺泡、进入血液系统引起呼吸系统、心血管系统等病变,导致各类疾病发病率、死亡率显著提高^[36,45]。在邻接空间关联情形下,在直接效应层面,当年PM_{2.5}浓度与本地区人口死亡率具有显著正相关关系,当年PM_{2.5}浓度每提高100 μg/m³,本地区人口死亡率将提高0.937%;间接效应层面,基于PM_{2.5}污染扩散的自然属性,PM_{2.5}的“越境污染”显著影响相邻地区人口死亡率,当年PM_{2.5}浓度每提高100 μg/m³,相邻地区人口死亡率将提高0.364%。当年PM_{2.5}浓度的直接效应估计系数比间接效应估计系数大,说明PM_{2.5}污染对人口死亡率的区域内影响强于区域间溢出效应。

控制变量对人口死亡率的影响表现为:60岁及以上老年人口比重对人口死亡率具有显著的正向预测作用。大专及以上学历人口比重越高的地区,人口死亡率越低,这是因为高学历人群的环境污染防治意识更高、健康素养更高。经济发展和经济结构方面,人均GDP越高,地区人口死亡率越低,因为高收入人群更加具有规避空气污染的意识 and 能力;第三产业比重对人口死亡率具有显著的负向影响;自然环境因素方面,年平均温度越低,死亡率越高,

因为低温影响人体心血管功能等正常运作,影响人体健康。

3.2 社会经济因素对PM_{2.5}—人口死亡率关系的调节效应

本文运用调节效应分析技术,揭示社会经济因素对PM_{2.5}—死亡率关联的调节作用。如表3所示,引入交互项后,当年PM_{2.5}浓度与大专及以上学历人口比重的交互项在5%的显著性水平下显著为负,与城镇化率的交互项在10%的显著性水平下显著为负;当年PM_{2.5}与对数人均GDP、第三产业比重的交互项系数不显著。研究发现了PM_{2.5}—人口死亡率的关系受高学历群体比重差异的调节,证实了涂正革等^[42]、Yang等^[54]的研究发现:高素质人群健康意识更强,具有规避环境污染风险意识和防护能力,能有效缓解PM_{2.5}污染对人体健康的影响;同时,学历与职业分化密切相关,受教育程度低的人群往往从事基础性和有污染性的工作,容易暴露于更高污染浓度的空气之中。其次,发现PM_{2.5}—人口死亡率的关系受到城镇化发展水平差异的调节,证实了Li等^[20]、Liang^[55]等的研究发现:随着城镇化发展水平的提高,居民健康素养提高^[56],规避环境污染风险意识和防护能力增强,减少暴露于PM_{2.5}污染环境;高城镇化水平地区的医疗卫生资源等社会保障

表3 社会经济因素的调节效应分析
Tab.3 Analysis on the moderation effects of socioeconomic factors

| 变量 | 模型2: SLM模型 估计系数(标准差) | 模型3: SLM模型 估计系数(标准差) | 模型4: SLM模型 估计系数(标准差) | 模型5: SLM模型 估计系数(标准差) |
|----------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| pm | 1.512*** (0.477) | 2.091*** (0.714) | 2.383 (1.681) | 1.425* (0.864) |
| older | 0.061*** (0.014) | 0.061*** (0.014) | 0.061*** (0.014) | 0.061*** (0.014) |
| child | 0.007 (0.005) | 0.006 (0.005) | 0.006 (0.005) | 0.006 (0.005) |
| edu | -0.021 (0.014) | -0.040*** (0.010) | -0.042*** (0.009) | -0.043*** (0.009) |
| urban | -0.004 (0.004) | 0.002 (0.005) | -0.004 (0.004) | -0.004 (0.004) |
| ln pop | -0.092 (0.060) | -0.095 (0.060) | -0.091 (0.060) | -0.089 (0.060) |
| ln pgdp | -0.158** (0.070) | -0.148** (0.069) | -0.111 (0.074) | -0.143** (0.069) |
| secindust | -0.004 (0.005) | -0.004 (0.005) | -0.003 (0.005) | -0.003 (0.005) |
| terindust | -0.012** (0.006) | -0.012** (0.006) | -0.012** (0.006) | -0.009 (0.007) |
| doctor | 0.004 (0.003) | 0.004 (0.003) | 0.003 (0.003) | 0.003 (0.003) |
| rh | -0.009 (0.010) | -0.010 (0.010) | -0.011 (0.010) | -0.011 (0.010) |
| temp | -0.414*** (0.075) | -0.410*** (0.074) | -0.408*** (0.075) | -0.396*** (0.074) |
| ndvi | -0.384 (1.135) | -0.373 (1.136) | -0.337 (1.154) | -0.508 (1.135) |
| pm×edu | -0.061** (0.029) | | | |
| pm×urban | | -0.022* (0.011) | | |
| pm×ln pgdp | | | -0.140 (0.155) | |
| pm×terindust | | | | -0.013 (0.019) |
| ρ | 0.287*** (0.036) | 0.287*** (0.036) | 0.290*** (0.036) | 0.291*** (0.036) |
| ε | 0.434*** (0.017) | 0.434*** (0.017) | 0.435*** (0.017) | 0.435*** (0.017) |
| Log likelihood | -1398.1478 | -1398.4257 | -1399.9333 | -1400.1161 |
| N | 1384 | 1384 | 1384 | 1384 |

体系配套更完善^[40,57],居民生活水平提高,有效调节居民健康脆弱性。同时,还发现了人均GDP、第三产业比重对当年PM_{2.5}—人口死亡率的关系没有显著的调节作用,这与Geng等^[41]、孙猛等^[43]的研究发现不一致,原因可能为:一是本文的研究对象为中国346个城市,研究对象不一致;二是关注PM_{2.5}—人口死亡率的关系,Geng等^[41]的研究关注PM_{2.5}—死亡人数的关系,而孙猛等^[43]的研究关注主观感知的空气污染暴露与自评健康的关系,因变量或核心解释变量的不同可能导致最终结果差异。

3.3 稳健性分析

为考察实证研究结果的稳健性,本文基于模型和数据掌握情况,运用空间误差模型(模型6)、替换当年PM_{2.5}浓度变量为3年PM_{2.5}均值浓度(模型7)和重新定义核心解释变量(模型8)的方法进行稳健性检验。模型结果如表4所示,3种稳健性分析方法获得的核心解释变量的系数显著性和方向均没有变化。上述结果表明,PM_{2.5}影响地区人口死亡率,PM_{2.5}浓度越高人口死亡率越高的结论是稳健的。

4 结论与讨论

本文采用2000、2010年中国人口普查资料,各省级行政单元2005年和2015年1%人口抽样调查资料,以及《中国城市统计年鉴》和《中国城市建设统计年鉴》等资料,使用探索性空间分析方法刻画中国城市人口死亡率的空间分布格局及其变化,运用空间滞后模型揭示PM_{2.5}浓度对人口死亡率的影响及其空间溢出效应,以及识别社会经济因素对PM_{2.5}—人口死亡率关联的调节效应。主要结论如下:

(1) 中国城市人口死亡率分布呈现显著的空间分异性。2000—2005年,人口死亡率呈现北低南高的空间分布格局;2010—2015年人口死亡率分布格局发生较大变化,呈现由相对集聚到零散分布态势。高死亡率地区早期集聚分布于西南地区,2005年后在西南地区、华北地区、华东地区和华东地区呈现逐渐集聚分布态势;低死亡率地区长期集中分布于西北地区、东北地区、长三角地区、珠三角地区

表4 稳健性检验结果
Tab.4 Results of robustness test

| 变量 | 模型6: SEM 估计系数(标准差) | 模型7: SLM 估计系数(标准差) | 模型8: SLM 估计系数(标准差) |
|----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| pm | 1.164** (0.477) | | |
| pm3 | | 0.846* (0.477) | |
| pm_35 | | | 0.224*** (0.074) |
| older | 0.069*** (0.016) | 0.067*** (0.013) | 0.063*** (0.013) |
| child | 0.005 (0.006) | 0.006 (0.005) | 0.006 (0.005) |
| edu | -0.050*** (0.010) | -0.043*** (0.009) | -0.043*** (0.009) |
| urban | -0.004 (0.004) | -0.004 (0.004) | -0.004 (0.004) |
| ln pop | -0.080 (0.066) | -0.087 (0.060) | -0.087 (0.060) |
| ln pgdp | -0.223*** (0.075) | -0.145** (0.071) | -0.115* (0.068) |
| secindust | -0.004 (0.005) | -0.002 (0.005) | -0.003 (0.005) |
| terindust | -0.011* (0.006) | -0.011** (0.006) | -0.011** (0.006) |
| doctor | 0.003 (0.003) | 0.003 (0.003) | 0.003 (0.003) |
| rh | -0.020 (0.013) | -0.014 (0.010) | -0.015 (0.009) |
| temp | -0.511*** (0.093) | -0.385*** (0.078) | -0.403*** (0.073) |
| ndvi | -0.896 (1.385) | -1.113 (1.096) | -0.554 (1.115) |
| λ | 0.296*** (0.038) | | |
| ρ | | 0.298*** (0.036) | 0.297*** (0.036) |
| N | 1384 | 1384 | 1384 |
| Log likelihood | -1401.978 | -1401.626 | -1398.653 |

和京津两市。

(2) 人口死亡率分布呈现显著的正向空间关联性。2000—2015年,人口死亡率高—高类型地区数量增加,高一低类型和低—高类型地区数量较少且呈现零散分布的特征。人口死亡率高—高类型地区早期集中分布于西南地区,2010—2015年向华东地区的山东半岛、苏北地区、苏鲁豫皖交界地区和华中地区的湖北省延伸;低—低类型地区长期集中在北疆、内蒙古西部和广东省及周边地区。

(3) $PM_{2.5}$ 污染显著影响人口死亡率且存在空间溢出效应。 $PM_{2.5}$ 浓度越高,人口死亡率越高。区域内 $PM_{2.5}$ 对人口死亡率的影响显著高于相邻地区的 $PM_{2.5}$ “越境污染”影响。人口死亡率除了受 $PM_{2.5}$ 影响外,还受到地区老龄化程度、人口受教育水平和人均GDP、第三产业比重等的影响。 $PM_{2.5}$ 污染对死亡率的影响存在学历差异和城镇化发展程度差异,地区高学历人群集聚可降低 $PM_{2.5}$ 的健康风险,城镇化发展进程缓慢则会加重 $PM_{2.5}$ 的健康风险。社会文化水平较低或城镇化水平较低的地区,居民的健康脆弱性更高。

本文结果对改善 $PM_{2.5}$ 暴露导致的健康风险具有一定的现实启示:城镇化水平低而空气污染严重的地区,应加大对公众的环境污染防治应急教育和健康素养教育;城镇化水平高且空气污染严重地区,如上海、南京、武汉等城市,可以探索城市绿色发展路径,实施区域空气污染防治协作,提高公众的环境污染防治意识和规避能力;城镇化水平高而空气污染较轻的地区,如厦门、福州、贵阳、昆明等城市避免走先污染后治理的老路,探索绿色发展路径,加快产业转型升级。

本文的创新点体现在:首先,基于2000—2015年的面板数据进行研究,面板数据具有控制个体异质性、降低与解释变量相关的遗漏变量影响等优点;其次,基于 $PM_{2.5}$ 的空间扩散自然属性,采用空间回归模型揭示 $PM_{2.5}$ 的空间溢出效应,探讨 $PM_{2.5}$ 暴露的健康影响群体差异。但存在以下几点不足:第一,本文由于以地区群体水平为研究单位,未能控制地区个体的人口学特征,可能存在无法控制的混杂因素;第二,本文因变量为粗死亡率,空气污染对人口健康的影响存在性别、年龄等差异,由于数据受限没有消除人口年龄、性别等的影响;第三,以城市为研究对象的空间尺度较大,无法讨论城市内部的异质性表现。基于以上不足,未来的研究可从多维地理尺度对 $PM_{2.5}$ —人口健康的影响进行讨论,细

化健康水平指标,对较高、较低死亡率地区或人口死亡率高一高、低—低类型集聚的区域进行针对性研究,以深入探讨空气污染对人口健康的影响。

参考文献(References)

- [1] Yue H B, He C Y, Huang Q X, et al. Stronger policy required to substantially reduce deaths from PM_{2.5} pollution in China [J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 1462. doi: 10.1038/s41467-020-15319-4.
- [2] 宋长青, 冷疏影. 地理科学三十年: 从经典到前沿 [M]. 北京: 商务印书馆, 2016: 759-788. [Song Changqing, Leng Shuying. *The geographical sciences during 1986-2015: From the classics to the frontiers*. Beijing, China: The Commercial Press, 2016: 759-788.]
- [3] World Health Organization. Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease [M]. Geneva, Switzerland: World Health Organization, 2016: 19-21.
- [4] 郭杰, 肖纯凌. PM_{2.5}对人群健康影响的流行病学研究进展 [J]. *环境卫生学杂志*, 2017, 7(2): 164-169. [Guo Jie, Xiao Chunling. Progress on epidemiological study of PM_{2.5} effect to human health. *Journal of Environmental Hygiene*, 2017, 7(2): 164-169.]
- [5] Yang Y, Tang R, Qiu H, et al. Long term exposure to air pollution and mortality in an elderly cohort in Hong Kong [J]. *Environment International*, 2018, 117: 99-106.
- [6] Zhang F Y, Xu J, Zhang Z Y, et al. Ambient air quality and the effects of air pollutants on otolaryngology in Beijing [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, 187(8): 495. doi: 10.1007/s10661-015-4711-3.
- [7] 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.
- [8] Di Q, Dai L, Wang Y, et al. Association of short-term exposure to air pollution with mortality in older adults [J]. *JAMA*, 2017, 318(24): 2446-2456.
- [9] Hansell A, Ghosh R E, Blangiardo M, et al. Historic air pollution exposure and long-term mortality risks in England and Wales: Prospective longitudinal cohort study [J]. *Thorax*, 2016, 71(4): 330-338.
- [10] Shi L H, Zanobetti A, Kloog I, et al. Low-concentration PM_{2.5} and mortality: Estimating acute and chronic effects in a population-based study [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2016, 124(1): 46-52.
- [11] Lu F, Xu D Q, Cheng Y B, et al. Systematic review and meta-analysis of the adverse health effects of ambient PM_{2.5} and PM₁₀ pollution in the Chinese population [J]. *Environmental Research*, 2015, 136: 196-204.
- [12] Yang Y, Qi J L, Ruan Z L, et al. Changes in life expectancy of respiratory diseases from attaining daily PM_{2.5} standard in China: A nationwide observational study [J]. *The Innovation*, 2020, 1(3): 100064. doi: 10.1016/j.xinn.2020.100064.
- [13] 孙猛, 李晓巍. 空气污染与公共健康: 基于省际面板数据的实证研究 [J]. *人口学刊*, 2017, 39(5): 5-13. [Sun Meng, Li Xiaowei. Air pollution and public health: An empirical study based on provincial panel data. *Population Journal*, 2017, 39(5): 5-13.]
- [14] Chen Y, Ebenstein A, Greenstone M, et al. Evidence on the impact of sustained exposure to air pollution on life expectancy from China's Huai River policy [J]. *PNAS*, 2013, 110(32): 12936-12941.
- [15] Xue T, Zhu T, Zheng Y, et al. Change in the number of PM_{2.5}-attributed deaths in China from 2000 to 2010: Comparison between estimations from census-based epidemiology and pre-established exposure-response functions [J]. *Environment International*, 2019, 129: 430-437.
- [16] 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 Xiangang, Ruan Fangfang, Peng Yanyan. Health effects' spatial distribution analysis of PM_{2.5} pollution in China based on spatial grid scale. *China Environmental Science*, 2019, 39(6): 2624-2632.]
- [17] 杨振, 敖荣军, 王念, 等. 中国环境污染的健康压力时空差异特征 [J]. *地理科学*, 2017, 37(3): 339-346. [Yang Zhen, Ao Rongjun, Wang Nian, et al. Spatio-temporal difference characteristic of pollution's health stress of China. *Scientia Geographica Sinica*, 2017, 37(3): 339-346.]
- [18] 解丕. 中国地区间健康差异的因素分解 [J]. *山西财经大学学报*, 2011, 33(8): 11-24. [Xie E. Analysis of regional differences in health in China. *Journal of Shanxi Finance and Economics University*, 2011, 33(8): 11-24.]
- [19] 杨振, 刘会敏, 王晓霞. 中国人口健康分布的时空变化与影响因素 [J]. *世界地理研究*, 2017, 26(2): 161-168. [Yang Zhen, Liu Huimin, Wang Xiaoxia. Spatio-temporal variations of population health distribution in China and its influencing factors. *World Regional Studies*, 2017, 26(2): 161-168.]
- [20] Li Y, Wei Y H D. A spatial-temporal analysis of health care and mortality inequalities in China [J]. *Eurasian Geography and Economics*, 2010, 51(6): 767-787.
- [21] 李立清, 许荣. 中国居民健康水平的区域差异分析 [J]. *卫生经济研究*, 2015(1): 14-20. [Li Liqing, Xu Rong. The regional difference of the resident's health level in China. *Health Economic Research*, 2015(1): 14-20.]
- [22] 赵雪雁, 王伟军, 万文玉. 中国居民健康水平的区域差

- 异: 2003—2013 [J]. 地理学报, 2017, 72(4): 685-698. [Zhao Xueyan, Wang Weijun, Wan Wenyu. Regional inequalities of residents' health level in China: 2003-2013. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(4): 685-698.]
- [23] 齐良书. 经济、环境与人口健康的相互影响: 基于我国省区面板数据的实证分析 [J]. 中国人口·资源与环境, 2008, 18(6): 169-173. [Qi Liangshu. Interrelationship between growth, environment and population health: An empirical analysis based on China's provincial data. *China Population, Resources and Environment*, 2008, 18(6): 169-173.]
- [24] 薛倩, 谢苗苗, 郭强, 等. 地理学视角下城市高温热浪脆弱性评估研究进展 [J]. 地理科学进展, 2020, 39(4): 685-694. [Xue Qian, Xie Miaomiao, Guo Qiang, et al. Research progress on urban heat wave vulnerability assessment: A geographical perspective. *Progress in Geography*, 2020, 39(4): 685-694.]
- [25] Hu C Y, Yang X J, Gui S Y, et al. Residential greenness and birth outcomes: A systematic review and meta-analysis of observational studies [J]. *Environmental Research*, 2021, 193: 110599. doi: 10.1016/j.envres.2020.110599.
- [26] Pearce J R, Richardson E A, Mitchell R J, et al. Environmental justice and health: The implications of the socio-spatial distribution of multiple environmental deprivation for health inequalities in the United Kingdom [J]. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 2010, 35 (4): 522-539.
- [27] 周素红, 张琳, 林荣平. 地理环境暴露与公众健康研究进展 [J]. 科技导报, 2020, 38(7): 43-52. [Zhou Suhong, Zhang Lin, Lin Rongping. Progress and prospect of the research on geographical environment exposure and public health. *Science & Technology Review*, 2020, 38(7): 43-52.]
- [28] 杨林生, 李海蓉, 李永华, 等. 医学地理和环境健康研究的主要领域与进展 [J]. 地理科学进展, 2010, 29(1): 31-44. [Yang Linsheng, Li Hairong, Li Yonghua, et al. Progress of medical geography and environmental health studies. *Progress in Geography*, 2010, 29(1): 31-44.]
- [29] 郭文伯, 张艳, 柴彦威. 城市居民出行的空气污染暴露测度及其影响机制: 北京市郊区社区的案例分析 [J]. 地理研究, 2015, 34(7): 1310-1318. [Guo Wenbo, Zhang Yan, Chai Yanwei. Measurement of residents' daily travel air pollution exposure and its mechanism: A case study of suburban communities in Beijing. *Geographical Research*, 2015, 34(7): 1310-1318.]
- [30] 马静, 柴彦威, 符婷婷. 居民时空行为与环境污染暴露对健康影响的研究进展 [J]. 地理科学进展, 2017, 36 (10): 1260-1269. [Ma Jing, Chai Yanwei, Fu Tingting. Progress of research on the health impact of people's space-time behavior and environmental pollution exposure. *Progress in Geography*, 2017, 36(10): 1260-1269.]
- [31] 赵宏波, 冯渊博, 董冠鹏, 等. 大城市居民自评健康与环境危害感知的空间差异及影响因素: 基于郑州市区的实证研究 [J]. 地理科学进展, 2018, 37(12): 1713-1726. [Zhao Hongbo, Feng Yuanbo, Dong Guanpeng, et al. Spatial differentiation and influencing factors of residents' self-rated health and environmental hazard perception: A case study of Zhengzhou City. *Progress in Geography*, 2018, 37(12): 1713-1726.]
- [32] Wang S, Ren Z. Spatial variations and macroeconomic determinants of life expectancy and mortality rate in China: A county-level study based on spatial analysis models [J]. *International Journal of Public Health*, 2019, 64(5): 773-783.
- [33] 程雁鹏, 冯永亮, 段小丽, 等. 孕期大气细颗粒物PM_{2.5}暴露及对早产的影响研究 [J]. 中华流行病学杂志, 2016, 37(4): 572-577. [Cheng Yanpeng, Feng Yongliang, Duan Xiaoli, et al. Ambient PM_{2.5} during pregnancy and risk on preterm birth. *Chinese Journal of Epidemiology*, 2016, 37 (4): 572-577.]
- [34] Sun R, Gu D. Air pollution, economic development of communities, and health status among the elderly in urban China [J]. *American Journal of Epidemiology*, 2008, 168(11): 1311-1318.
- [35] 刁贝娣, 丁镭, 成金华. 不同类型城市的PM_{2.5}健康风险及影响因素差异 [J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31 (8): 90-100. [Diao Beidi, Ding Lei, Cheng Jinhua. Differences of PM_{2.5} health risks and influencing factors in different types of cities. *China Population, Resources and Environment*, 2021, 31(8): 90-100.]
- [36] 蔡瑞婷, 肖舜, 董治宝, 等. 汾渭平原典型城乡PM_{2.5}中多环芳烃特征与健康风险 [J]. 地理学报, 2021, 76(3): 740-752. [Cai Ruiting, Xiao Shun, Dong Zhibao, et al. Characteristics and health risk of polycyclic aromatic hydrocarbons in PM_{2.5} in the typical urban and rural areas of the Fenwei Plain. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76 (3): 740-752.]
- [37] 杨新兴, 冯丽华, 尉鹏. 大气颗粒物PM_{2.5}及其危害 [J]. 前沿科学, 2012, 6(1): 22-31. [Yang Xinxing, Feng Lihua, Wei Peng. Air particulate matter PM_{2.5} in Beijing and its harm. *Frontier Science*, 2012, 6(1): 22-31.]
- [38] 马静, 周创文, Pryce Gwilym. 环境公正视角下空气污染和死亡人数的空间分析及关系研究: 以河北省为例 [J]. 人文地理, 2019, 34(6): 45-52, 98. [Ma Jing, Zhou Chuangwen. Pryce Gwilym. Spatial analysis and modelling of air pollution and death rates in Hebei province,

- China. Human Geography, 2019, 34(6): 45-52, 98.]
- [39] 祁毓, 卢洪友. 污染、健康与不平等: 跨越“环境健康贫困”陷阱 [J]. 管理世界, 2015(9): 32-51. [Qi Yu, Lu Hongyou. Pollution, health and inequality: Crossing the trap of 'environmental health poverty'. Management World, 2015(9): 32-51.]
- [40] Gong P, Liang S, Carlton E J, et al. Urbanisation and health in China [J]. The Lancet, 2012, 379: 843-852.
- [41] Geng G, Zheng Y, Zhang Q, et al. Drivers of PM_{2.5} air pollution deaths in China 2002–2017 [J]. Nature Geoscience, 2021, 14(9): 645-650.
- [42] 涂正革, 张茂榆, 许章杰, 等. 收入增长、大气污染与公众健康: 基于CHNS的微观证据 [J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(6): 130-139. [Tu Zhengge, Zhang Maoyu, Xu Zhangjie, et al. Income growth, air pollution and public health: Based on the evidence from CHNS. China Population, Resources and Environment, 2018, 28(6): 130-139.]
- [43] 孙猛, 芦晓珊. 空气污染, 社会经济地位与居民健康不平等: 基于CGSS的微观证据 [J]. 人口学刊, 2019, 41(6): 103-112. [Sun Meng, Lu Xiaoshan. Air pollution, SES and residents' health inequality: Micro evidence based on CGSS. Population Journal, 2019, 41(6): 103-112.]
- [44] 邵帅, 李欣, 曹建华, 等. 中国雾霾污染治理的经济政策选择: 基于空间溢出效应的视角 [J]. 经济研究, 2016, 51(9): 73-88. [Shao Shuai, Li Xin, Cao Jianhua, et al. China's economic policy choices for governing smog pollution based on spatial spillover effects. Economic Research Journal, 2016, 51(9): 73-88.]
- [45] 李光勤, 何仁伟. PM_{2.5}污染与健康支出: 时间滞后效应与空间溢出效应 [J]. 安全与环境学报, 2019, 19(1): 326-336. [Li Guangqin, He Renwei. PM_{2.5} pollution and health spending: Temporal lag effects and spatial spillover effects. Journal of Safety and Environment, 2019, 19(1): 326-336.]
- [46] 刘海猛, 方创琳, 黄解军, 等. 京津冀城市群大气污染的时空特征与影响因素解析 [J]. 地理学报, 2018, 73(1): 177-191. [Liu Haimeng, Fang Chuanglin, Huang Jiejun, et al. The spatial-temporal characteristics and influencing factors of air pollution in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(1): 177-191.]
- [47] Center for International Earth Science Information Network-Ciesin-Columbia University. Annual PM_{2.5} concentrations for countries and urban areas, 1998—2016 [DB/OL]. 2021-04-06 [2021-10-20]. NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC), 2021. <https://doi.org/10.7927/rja8-8h89>.
- [48] 徐新良. 中国人口空间分布公里网格数据集 [DB/OL]. 中国科学院资源环境科学数据中心数据注册与出版系统, 2017 [2021-08-20]. <https://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=251>. doi: 10.12078/2017121101. [Xu Xinliang. 1 km grid population spatial distribution dataset of China. Data Registration and Publishing System of the Resource and Environment Science and Data Center of Chinese Academy of Science, 2017 [2021-08-20]. <https://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=251>. doi: 10.12078/2017121101.]
- [49] Didan K. MOD13Q1 MODIS/Terra Vegetation Indices 16- Day L3 Global 250m SIN Grid V006 [DB/OL]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. 2015 [2021-08-20]. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13Q1.006>.
- [50] Anselin L. Local indicators of spatial association: LISA [J]. Geographical Analysis, 1995, 27(2): 93-115.
- [51] Lesage J P, Fischer M M. Spatial growth regressions: Model specification, estimation and interpretation [J]. Spatial Economic Analysis, 2008, 3(3): 275-304.
- [52] 刘华军, 张权, 杨骞. 城镇化、空间溢出与区域经济增长: 基于空间回归模型偏微分方法及中国的实证 [J]. 农业技术经济, 2014, 10: 95-105. [Liu Huajun, Zhang Quan, Yang Qian. Urbanization, spatial spillover and regional economic growth based on partial differential method for spatial regression model and the empirical analysis of China. Journal of Agrotechnical Economics, 2014, 10: 95-105.]
- [53] Robinson C, Schumacker R. Interaction effects: Centering, variance inflation factor, and interpretation issues [J]. Multiple Linear Regression Viewpoints, 2009, 35(1): 6-11.
- [54] Yang X Y, Geng L N, Zhou K X. The construction and examination of social vulnerability and its effects on PM_{2.5} globally: Combining spatial econometric modeling and geographically weighted regression [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2021, 28(21): 26732-26746.
- [55] Liang Z, Wang W Z, Wang Y Y, et al. Urbanization, ambient air pollution, and prevalence of chronic kidney disease: A nationwide cross-sectional study [J]. Environment International, 2021, 156: 106752. doi: 10.1016/j.envint.2021.106752.
- [56] 姚宏文, 石琦, 李英华. 我国城乡居民健康素养现状及对策 [J]. 人口研究, 2016, 40(2): 88-97. [Yao Hongwen, Shi Qi, Li Yinghua. The current status of health literacy in China. Population Research, 2016, 40(2): 88-97.]
- [57] 唐丹. 城乡因素在老年人抑郁症状影响模型中的调节效应 [J]. 人口研究, 2010, 34(3): 53-63. [Tang Dan. The mediating effect of urban and rural residence in the model of depression among Chinese elderly. Population Research, 2010, 34(3): 53-63.]

Effects of PM_{2.5} concentration on mortality in China: A study based on city-level panel data

CHEN Man^{1,2,3}, HUANG Baishi^{1,2,3}, LIU Ye^{1,2,3*}

(1. School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China;

2. Guangdong Key Laboratory for Urbanization and Geo-simulation, Guangzhou 510006, China;

3. Guangdong Provincial Engineering Research Center for Public Security and Disaster, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Health hazards and risks caused by air pollution have become a public topic. Ecological civilization construction and "Healthy China" strategy emphasize the alleviation of environmental stressors and the construction of healthy living environment. Using city-level data of population census and the 1% provincial sample demographic survey from 2000 to 2015, this study examined the spatial-temporal patterns of mortality and the effects of PM_{2.5} concentration on mortality based on spatial regression models. It further examined the moderation effects of regional socioeconomic conditions on the PM_{2.5} concentration- mortality association. Analytical results are as follows: 1) There is a considerable regional variation in mortality rate in China. Cities with high mortality rates initially were mainly concentrated in Southwest China, and they become increasingly concentrated in Southwest China, North China, East China, and Central China after 2005. Cities with low mortality rates have long been concentrated in Northwest China, Northeast China, the Yangtze River Delta, the Pearl River Delta, and Beijing and Tianjin. 2) There is a significant spatial correlation in mortality rates. From 2000 to 2015, mortality rates became increasingly concentrated in particular regions. High-high type areas were concentrated in the southwest in the early stage and then expanded to the east. Low-low type areas are mainly distributed in the north of Xinjiang, the west of Inner Mongolia, and Guangdong Province and its surrounding areas. 3) The concentration of PM_{2.5} has a positive correlation with mortality rates and a significant spatial spillover effect on mortality rates in neighboring areas. 4) The impact of PM_{2.5} on mortality is subject to the influences of educational differences and urban-rural divides: regions with great concentration of highly educated people are less vulnerable to PM_{2.5} health impact, and areas with a low level of urbanization are more subject to health risks of PM_{2.5}. The results show that regional prevention and control of air pollution is important, and in order to reduce health risks, more attention should be paid to the development of high-quality urbanization, optimization of economic structure, and promotion of residents' health literacy. Our findings can provide a scientific reference for the environmental risk assessment of air pollution and the construction of healthy living environments.

Keywords: concentration of PM_{2.5}; mortality rates; spatial regression model; moderation effect; China