

城市蔓延、私人交通与雾霾污染

王素凤, 项莹莹*

(安徽建筑大学经济与管理学院, 安徽合肥 230601)

【摘要】 本文选取中国280个地级市2009—2018年的面板数据为研究样本, 探究城市蔓延与雾霾污染之间的作用机制。以私人交通为门槛变量, 考察城市蔓延对雾霾污染的门槛效应。研究结果表明: ①城市蔓延对雾霾污染的影响呈现出先降后升的U形曲线特点; ②私人交通对雾霾污染的影响表现为倒U形的曲线特征, 即随着私人交通发展水平的提高, 雾霾污染呈现先增后减的趋势; ③城市蔓延对雾霾污染的影响存在双重门槛效应, 当私人交通的门槛值小于第一个门槛值($e^{11.6130}=110\ 525$ 辆)时, 城市蔓延会加剧雾霾污染; 当私人交通的门槛值介于第一个门槛值和第二个门槛值($e^{12.2473}=208\ 417$ 辆)之间时, 城市蔓延对雾霾污染的影响系数为正, 但未通过显著性检验; 当私人交通跨过第二个门槛值时, 城市蔓延水平的提高有助于抑制雾霾污染。研究城市蔓延、私人交通与雾霾污染这三者之间的关系对于促进城市的健康可持续发展具有重要的意义。

【关键词】 城市蔓延; 私人交通; 雾霾污染; 面板门槛模型

【中图分类号】 X513; X21

【文献标识码】 A

【文章编号】 1674-6252(2022)02-0095-09

【DOI】 10.16868/j.cnki.1674-6252.2022.02.095

引言

随着大量的农村人口不断向城市聚集, 城市的土地面积不断向外扩展, 中国的城镇化进程得到快速推进。相比于人口城镇化的发展速度, 土地城镇化的增长速度明显快于人口城镇化的增长速度, 导致城市的空间结构不断向城市边界扩张, 即城市蔓延^[1]。城市蔓延的过程中会产生一些负面影响, 比如环境污染、交通拥堵等。根据生态环境部发布的《2020中国生态环境状况公报》, 2020年全国337个地级市中有135个城市空气质量超标, 主要污染物为PM_{2.5}、PM₁₀、O₃等。生态环境部发布的《中国移动源环境管理年报》报告了2019年中国机动车保有量达到3.48亿辆, 已经连续11年成为世界机动车产销第一大国。高德地图发布的《2017年度中国主要城市交通分析报告》称, 2017年中国364个城市中有26%的城市处于交通拥堵状态, 55%的城市交通处于缓行状态, 仅有19%的城市不受交通拥堵的影响。机动车排放的汽车尾气是影响城市大气污染的主要来源^[2]。面对当前城市发展过程出现的城市蔓延、交通拥堵以及雾霾污染问题, 思考雾霾污染与城市蔓延之间存在什么样的关系, 雾霾污染与交通拥堵之间存在什么样的关系, 雾霾污染与城市蔓延、道路交通这三者之间存在什么样

的关系, 研究这些问题对于改善城市空气质量、提升城市居民生活幸福感以及推动城市可持续发展具有重要的意义。考虑到行政区域的调整划分以及数据缺失等问题, 本文采用中国2009—2018年280个地级市的面板数据, 分别考察城市蔓延和私人交通对雾霾污染的影响, 并以私人交通作为门槛变量, 考察城市蔓延对雾霾污染影响的门槛效应。

1 文献综述与研究假设

1.1 城市蔓延与雾霾污染

城市蔓延是城市化进程中土地城镇化大于人口城镇化的一种现象。目前, 关于城市蔓延对雾霾污染的影响, 国内外学者主要有三种观点: 第一种观点认为, 城市蔓延加剧了城市的雾霾污染^[3]。具体来说, 城市蔓延会直接导致农业用地大量减少, 大量的建筑用地(工厂、学校、商场、住宅等)不断地侵蚀着农业用地, 而建筑用地在建设过程中产生的大量扬尘和烟尘对城市的环境质量产生了消极的影响; 与此同时, 建设用地的不断增加, 工业用地向郊区转移造成第一产业比重的下降, 二、三产业比重的增加, 相较于第一产业, 第二产业对雾霾污染的影响更大; 无序的、低密度的城市蔓延不仅会造成城市基础建设的低

资助项目: 2021年安徽建筑大学科研储备库培育项目“公平与效率视角下长三角雾霾治理生态补偿与合作减排机制研究”(2021XMK05)。

作者简介: 王素凤(1978—), 女, 教授, 硕士生导师, 研究方向为环境经济管理与决策优化, E-mail: 271093151@qq.com。

* **责任作者:** 项莹莹(1991—), 女, 硕士研究生, 研究方向为环境经济学, E-mail: 2510374033@qq.com。

效率和建设资源的浪费,还会对绿地面积造成破坏^[4],导致城市热岛效应,不利于改善城市的环境质量。范建双和周琳等^[5]采用动态空间面板模型研究发现,城市蔓延对雾霾污染的影响具有空间溢出效应,城市蔓延不仅会导致本地雾霾污染的增加也会对邻近地区的雾霾污染产生消极影响。第二种观点认为,城市蔓延可以降低雾霾污染^[6]。城市向周边地区蔓延可以缓解城市中心区的压力,比如交通拥堵、人口密度大、环境质量差,相较于城市中心区,郊区的人口密度小,建筑密度低,大气的净化能力强,可以降低排放的污染物浓度;同时,随着城市蔓延水平的提高,城市的空间结构开始发生变化,城市的社会经济文化中心开始逐渐向郊区转移,促进了郊区社会经济的发展,对于改善老城区的空气质量以及提高人民生活幸福感具有重要的积极意义。第三种观点认为,雾霾污染与城市蔓延之间存在非线性关系。邵帅和李欣等研究发现,紧凑集约的城市空间结构有利于显著地降低雾霾污染,而低密度无序扩张的城市发展不利于降低雾霾污染^[7]。鉴于上述研究,提出假设1。

假设1:城市蔓延对雾霾污染的影响呈现先负后正的特点,即二者存在U形曲线关系。

1.2 私人交通与雾霾污染

人口向城市不断集聚,私家车数量的迅速增加,导致城市道路交通通行缓慢甚至导致城市的交通拥堵^[8,9]。私家车在城市道路上的行驶速度受到很多因素的影响,比如交叉路口的数量、红绿灯的数量、斑马线、道路宽度^[10]、私家车数量等。道路交通处于缓和和拥堵状态下,车辆处于频繁启动的状态,相比于畅通状态下消耗更多的化石燃料,产生更多的汽车尾气^[11-13]。随着城市化的发展,由于私家车在时间和空间上的可达性,私家车对于缓解城市中心的交通拥堵程度和促进城市内部区域职住分离具有重要的意义。私家车数量的逐年增加让原本的道路交通基础设施不能满足交通行驶的要求,造成道路交通通行效率的下降,而通过建造城市轨道交通、高速公路等方式可以提高城市的道路交通基础设施利用效率和通行速度。轨道交通、快速公交(Bus Rapid Transit, BRT)等公共交通工具相对于私人交通工具具有一定的转移作用,公共交通工具对于雾霾污染具有抑制作用^[14],因此当公共交通发展到一定水平时,公共交通的转移效应就会产生效果。交通基础设施的不断发展和完善有利于发挥私人交通的环境友好型作用。上述观点认为私人交通对雾霾污染的影响不仅具有负外部性还具有

正外部性,据此提出假设2。

假设2:随着私人交通发展水平的提高,雾霾污染的变化趋势呈现出先增后减的倒U形特点。

1.3 城市蔓延、私人交通与雾霾污染

城市蔓延主要利用土地结构的转变、产业结构的变化以及私人交通方式的改变对雾霾污染产生直接或间接的影响,其中私家车在城市蔓延中起到重要的推动作用。城市蔓延与私人交通之间的关系主要有以下几种观点:第一,私人交通促进城市蔓延。张邓澜等^[15]发现私人汽车消费数量的增加会加剧城市蔓延,但是私人汽车消费达到一定程度时,私人汽车消费将减弱对城市蔓延的影响。藏家新等^[16]研究认为相比于公共交通对城市蔓延的制约作用,目前私人交通对城市蔓延的推动作用显著增强。第二,城市蔓延会影响私人交通的发展。赵一帆等^[17]城市蔓延会促进人们购买私家车的数量。第三,非线性关系。姜竹青等^[18]使用空间计量的方法发现城市化水平与私人交通之间存在先上升后下降的倒U形关系。

一方面,随着土地城镇化大于人口城市化的进程中,当私人交通的负外部性大于正外部性时,此时私人交通因其自身数量的增加导致城市道路交通产生集聚效应即交通拥堵,交通拥堵产生的汽车尾气加剧了城市的雾霾污染程度^[19];另一方面,随着城市不断向周围蔓延,当私人交通的正外部性大于负外部性时,此时私人交通因自身优点的原因可以缩短居住地和工作的距离,促进城市中心职住分离,降低城市中心的居住密度,缓解拥堵的城市交通,提高道路交通的通行效率,从而改善城市的环境质量,同时可以通过改变汽油的油品质量,减少汽油在消耗过程中产生的污染物,从而发挥私人交通对环境的正外部性作用。城市蔓延作为城市化发展中的一个产物,对雾霾污染的影响是长期存在的,因此,在私人交通的作用下,城市蔓延对雾霾污染的影响是非线性的,进而提出假设3。

假设3:在不同的私人交通发展水平下城市蔓延对雾霾污染的影响可能存在门槛特征。当私人交通未跨过门槛值之前,城市蔓延对雾霾污染的影响具有促进作用;当私人交通跨过门槛值后,城市蔓延的环境效应为正,即城市蔓延对雾霾污染具有抑制效应(图1)。

综上所述,首先,现有文献大多研究城市蔓延、私人交通与雾霾污染两两之间的影响,较少有学者将城市蔓延、私人交通与雾霾污染放在同一个研究框架

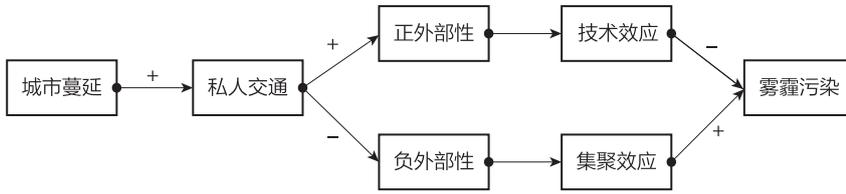


图1 基于私人交通发展水平下城市蔓延对雾霾污染的影响机制

下,探究私人交通、城市蔓延以及二者的交互项对雾霾污染的影响;其次,目前研究城市蔓延、私人交通对雾霾污染影响的学者选取的研究样本对象多集中在大中城市或者某个区域,缺少选择将数量较多的地级市作为研究对象,因此本文采用中国2009—2018年280个地级市的面板数据作为研究样本;最后,考虑到自然因素在雾霾污染的形成扩散中发挥着重要的作用,因此将影响雾霾污染的自然因素作为控制变量纳入研究中。

2 模型设定与数据选取

2.1 模型设定

为了验证假设1和假设2,本文将城市蔓延和私人交通的二次项纳入计量模型中,分别设定公式(1)、公式(2):

$$\ln \text{PM}_{2.5it} = \beta_0 + \beta_1 \text{sprawl}_{it} + \beta_2 (\text{sprawl}_{it})^2 + \beta_3 X_{it} + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

$$\ln \text{PM}_{2.5it} = \beta_0 + \beta_1 \ln \text{car}_{it} + \beta_2 (\ln \text{car}_{it})^2 + \beta_3 X_{it} + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

式中, $\ln \text{PM}_{2.5it}$ 表示城市 i 在时间 t 的雾霾污染浓度,单位为 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; $\ln \text{car}_{it}$ 表示第 i 个城市在时间 t 的私人交通; sprawl_{it} 表示第 i 个城市在时间 t 的城市蔓延; X_{it} 表示第 i 个城市在时间 t 的一系列控制变量,包括经济发展水平 (gdp)、产业结构 (indus2)、人均绿地面积 (rgreen)、降水量 (rain)、日照时长 (sunt) 和风速 (wind); β_0 为待估的常数项,公式(1)中 β_1 、 β_2 为待估的半弹性系数, β_3 为弹性系数,公式(2)中 β_1 、 β_2 、 β_3 为待估的弹性系数; ε_{it} 为随机误差项。

本文采用 Hansen 在 1999 年提出的面板门槛模型,探究不同私人交通发展水平下城市蔓延对雾霾污染的影响是否存在门槛效应,构建面板门槛模型公式:

$$\ln \text{PM}_{2.5it} = \alpha_0 + \alpha_1 \text{sprawl}_{it} \cdot I(\ln \text{car}_{it} \leq \gamma) + \alpha_2 \text{sprawl}_{it} \cdot I(\ln \text{car}_{it} > \gamma) + \alpha_3 X_{it} + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

式中, $\ln \text{car}_{it}$ 为门槛变量; γ 为门槛估计值, $I(\bullet)$ 为指示函数,满足条件取 1,不满足取 0; ε_{it} 为随机

误差项。

门槛值的估算方法:首先,将门槛变量的所有观测值作为可能的门槛值纳入模型,采用最小二乘法 (OLS) 进行回归,得到残差平方和,当残差平方和为最小残差平方

和即满足 $\hat{\gamma} = \arg \min S(\gamma)$ 时,得到门槛估计值;其次,构造似然比统计量使用 Bootstrap 反复抽样得到相应的 P 值,即当 P 值为 0.01、0.05、0.10 时,门槛值在 1%、5% 和 10% 的显著性水平下通过检验;最后,构造似然比检验统计量确定门槛值的置信区间。

2.2 变量选取与来源

2.2.1 被解释变量

被解释变量设定为雾霾污染 ($\text{PM}_{2.5}$)。关于城市蔓延对雾霾污染影响的文献中大多数学者多选取工业废气、工业二氧化硫、工业烟尘以及综合三者的环境污染指数作为衡量雾霾污染的指标,少数学者使用 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度数据。借鉴邵帅^[20]的做法,本文采用达尔豪斯大学大气成分分析组公布的 V4.CH.03 版本的年度 $\text{PM}_{2.5}$ 数据集^①,利用 ArcGIS 软件将栅格数据转化解析为中国 2009—2018 年 280 个地级市的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度值。

2.2.2 解释变量

门槛变量:私人交通 (car)。将地级市拥有的私家车数量作为衡量私人交通的指标。

核心解释变量:城市蔓延指数 (sprawl)。关于测度城市蔓延指数的方法主要有单指标方法和多指标方法,本文主要采用的是单指标方法^[17],即将城市建成区面积增速比率与市辖区人口增速比率之比作为衡量城市蔓延的指标。

$$\text{sprawl}_{it} = \frac{S_{it} / S_{i0}}{P_{it} / P_{i0}} \quad (4)$$

公式(4)中, sprawl_{it} 表示城市 i 在时间 t 的城市蔓延指数; S_{it} 和 S_{i0} 分别表示城市 i 在 t 年和基期的建成区面积; P_{it} 和 P_{i0} 分别表示城市 i 在 t 年和基期的市辖区人口,本文以 2009 年为基期。若 $\text{sprawl} \leq 1$,说明城市未发生蔓延;若 $\text{sprawl} > 1$,表示城市发生蔓延,值越大说明城市蔓延程度越严重。表 1 为不同年份城市蔓延排名前 8 的城市。

① 网站: http://fizz.phys.dal.ca/~atmos/martin/?page_id=140。

表1 不同年份城市蔓延排名前8的城市

排名	2010年	2012年	2015年	2018年
1	黄冈市 (2.15)	云浮市 (3.81)	东莞市 (9.78)	东莞市 (6.19)
2	德州市 (2.11)	濮阳市 (3.15)	吴忠市 (3.32)	巴中市 (3.71)
3	西宁市 (1.75)	德州市 (3.15)	中山市 (3.23)	中山市 (3.23)
4	陇南市 (1.66)	汕尾市 (2.79)	清远市 (3.20)	孝感市 (2.75)
5	大连市 (1.50)	西宁市 (2.16)	呼伦贝尔市 (2.96)	西宁市 (2.52)
6	咸宁市 (1.49)	玉溪市 (1.87)	西宁市 (2.53)	南通市 (2.43)
7	佳木斯市 (1.45)	衡阳市 (1.66)	三亚市 (2.34)	呼伦贝尔市 (2.41)
8	忻州市 (1.42)	南通市 (1.65)	张掖市 (2.33)	汕尾市 (2.37)

2.2.3 控制变量

经济发展水平(gdp)以城市地区生产总值(2009年不变价)衡量;产业结构(indus2)采用第二产业占地区生产总值的比重衡量^[21];绿化水平(rgreen)以人均绿地面积衡量;气象变量包括:降雨量(rain)、风速(wind)和日照时长(sunt),这些数据来源于中国气象数据共享网。本文采用的数据主要来源于《2010—2019中国城市统计年鉴》《中国统计年鉴》以及地级市国民经济和社会发展统计公报,对于缺失值,采用插值法补齐。除了城市蔓延之外,其余变量均取对数。描述性统计如表2所示。

表2 描述性统计

变量	单位	样本量	平均值	标准差	最小值	最大值
ln PM _{2.5}	μg/m ³	2 800	3.654 4	0.488 8	1.279 7	4.701 5
sprawl	—	2 800	1.205 9	0.479 0	0.213 8	9.896 1
ln car	辆	2 800	12.411 9	1.042 9	8.638 1	15.557 7
ln gdp	万元	2 800	15.57 2	1.193 4	12.453 3	19.938 2
ln indus2	%	2 800	3.845 4	0.282 4	2.276 2	4.497 0
ln rgreen	hm ² /人	2 800	3.593 0	0.819 1	0.882 7	8.004 0
ln wind	m/s	2 800	3.151 7	0.976 7	0.737 7	8.145 2
ln rain	mm	2 800	6.763 6	0.633 2	3.737 6	8.071 8
ln sunt	h	2 800	7.547 2	0.274 6	6.394 2	8.124 4

3 实证结果分析

3.1 面板模型的检验

3.1.1 平稳性检验

因本文采用的数据是面板数据,在进行数据分析

之前需要检验面板数据是否存在单位根,从而避免在回归中出现伪回归的现象。检验单位根的方法很多,比如 LLC 检验、IPS 检验、HT 检验、Fisher 检验等,本文选择其中的 LLC 检验、IPS 检验、ADF 检验作为检验方法。检验结果显示所有变量在三种检验方法下均显著拒绝存在单位根,即数据是平稳的(表3),不存在单位根,可以进行回归分析。

表3 面板单位根检验

变量	LLC	IPS	ADF	平稳
ln PM _{2.5}	-28.990 1***	-16.010 0***	1147.565 8***	平稳
ln car	-19.749 4***	-5.257 2***	1173.139 5***	平稳
sprawl	-14.776***	-3.583 3***	1163.296 5***	平稳
ln gdp	-41.836 1***	-16.096 1***	2448.697 8***	平稳
ln indus2	-14.413 4***	-8.160 9***	1460.437 8***	平稳
ln rgreen	-35.815 1***	-14.233 1***	1379.360 3***	平稳
ln wind	-42.281 5***	-24.095 5***	1374.704 9***	平稳
ln rain	-42.937 6***	-26.543 2***	1373.628 8***	平稳
ln sunt	-38.515 4***	-24.313 5***	1258.587 1***	平稳

注:***、**、*分别表示1%、5%、10%的显著性水平

3.1.2 多重共线性检验

为避免选取的指标间存在多重共线性问题,需要对所有的变量进行多重共线性检验。多重共线性的判断标准为方差膨胀因子即vif是否大于10,当vif大于10则认为指标之间存在多重共线性。表4检验结果显示所有变量的vif以及平均vif皆小于10,因此可以认为选取的指标之间不存在多重共线性问题。

表4 多重共线性检验

变量	vif	1/vif
sprawl	1.03	0.973 2
ln car	2.30	0.434 6
ln gdp	2.44	0.410 3
ln indus2	1.11	0.897 4
ln rgreen	1.15	0.868 5
ln wind	1.28	0.780 1
ln rain	1.74	0.575 1
ln sunt	2.02	0.495 1
Mean vif	1.63	0.679 2

3.1.3 个体效应

由于本文选择的研究样本个体是中国280个地级市,而每个地级市的情况存在差异,F统计量在1%

的水平下强烈拒绝混合回归优于固定效应回归,即存在个体固定效应。与此同时采用 LSDV (最小二乘虚拟变量估计) 进行估计,估计结果显示大部分虚拟变量在 1% 的水平上拒绝原假设个体虚拟变量的系数为 0,即认为拒绝混合回归,存在个体固定效应。

3.1.4 异方差检验

考虑到选取的面板数据为短面板数据 ($N=280$, $T=10$, $N > T$), 可能存在异方差问题, 因此采用 White^[22] 提出的检验是否存在异方差问题的方法, 结果发现 P 值为 0.0000, 强烈拒绝不存在异方差的原假设, 即存在异方差问题。对此采用聚类稳健标准误差以及 Driscoll 等^[23] 在 1998 年提出的方法进行校正 (具体见表 5、表 6、表 8、表 9)。

3.1.5 豪斯曼检验

面板数据模型回归需要判断选择哪种效应模型, 具体有固定效应模型和随机效应模型。一般情况下采用豪斯曼检验来判断是否选择固定效应模型, 但是如果存在异方差问题, 传统的豪斯曼检验则无法使用, 此时需要对模型进行校正检验, 采用稳健的豪斯曼检验 (过度识别检验) 进行模型的选择。传统的豪斯曼检验结果的 P 值为 0.001, 强烈拒绝原假设随机效应是最优的, 即认为固定效应模型优于随机效应模型, 故选择固定效应模型。稳健的豪斯曼检验的 P 值为 0.0000, 强烈拒绝选择随机效应, 即选择固定效应模型。传统的豪斯曼检验和稳健的豪斯曼检验均显示固定效应模型最优。

3.2 城市蔓延对雾霾污染的影响

为了验证假设 1, 城市蔓延对雾霾污染是否存在非线性影响, 以及存在什么样的影响, 本文将城市蔓延的二次项加入回归, 结果发现雾霾污染与城市蔓延之间存在 U 形的非线性关系, 即城市雾霾污染会随着城市蔓延程度的增加呈现先下降后上升的趋势, 刘晓红等^[24] 运用静态和动态面板模型探究 2007—2016 年中国 273 个地级市的雾霾污染与城市蔓延之间的关系, 研究结果认为雾霾污染与城市蔓延之间存在 U 形曲线关系, 与本文的研究结论一致。进一步探究中国不同区域间雾霾污染与城市蔓延的关

系是否存在差异, 按照经济发展水平将中国分为东部地区、中部地区和西部地区, 分别研究城市蔓延对雾霾污染的影响, 研究结果发现东部、中部、西部地区的雾霾污染与城市蔓延之间的关系与全国样本的研究结论是一致的。

3.3 私人交通对雾霾污染的影响

环境库兹涅茨曲线假说认为雾霾污染与经济发展之间存在先上升后下降的倒 U 形曲线关系, 而私人交通发展水平从侧面反映了一个城市的经济发展程度, 故将私人交通的二次项加入回归模型中, 探究私人交通对雾霾污染是不是存在非线性影响, 以及存在什么样的影响。

从全国样本来看, 不论是加入还是未加入控制变量, 私人交通的一次项与二次项系数符号均未发生改变, 即私人交通的一次项系数为正, 二次项系数为负, 且均通过 1% 的显著性水平检验, 说明雾霾污染与私人交通之间存在倒 U 形曲线关系, 即随着私家车数量的增加导致城市的交通拥堵, 私家车在拥堵状态下排放的汽车尾气会造成城市雾霾污染程度的增加^[25], 然而随着私家车使用的油品质量和发动机燃油

表 5 城市蔓延的非线性估计

变量	全国		东部	中部	西部
sprawl	-0.232 8*** (0.042 8)	-0.134 1*** (0.035 2)	-0.183 7** (0.085 6)	-0.226 6*** (0.068 6)	-0.139 8* (0.071 3)
sprawl × sprawl	0.019 7*** (0.004 1)	0.012 0*** (0.003 2)	0.030 1 (0.021 4)	0.035 1** (0.016 7)	0.012 0* (0.006 3)
控制变量	否	是	是	是	是
气象变量	否	是	是	是	是
固定效应	是	是	是	是	是
样本量	2 800	2 800	990	990	810

注: 括号内表示稳健标准误, ***, **, * 分别表示 1%、5%、10% 的显著性水平

表 6 私人交通的非线性估计结果

变量	全国		东部	中部	西部
ln car	0.594 5*** (0.152 0)	0.538 0*** (0.136 3)	0.847 6*** (0.231 8)	0.342 8** (0.162 8)	0.324 9 (0.199 4)
ln car × ln car	-0.034 3*** (0.006 1)	-0.031 3*** (0.005 5)	-0.043 5*** (0.009 3)	-0.022 7*** (0.006 8)	-0.024 0*** (0.008 3)
控制变量	否	是	是	是	是
气象变量	否	是	是	是	是
固定效应	是	是	是	是	是
样本量	2 800	2 800	990	990	810

注: 括号内表示稳健标准误, ***, **, * 分别表示 1%、5%、10% 的显著性水平

效率的不断提高, 私家车在行驶过程中排放的汽车尾气对城市的空气质量影响逐渐减少, 私人交通将发挥其对环境的正面抑制作用, 即私人交通会缓解城市的雾霾污染^[26]。东部地区、中部地区以及西部地区雾霾污染与私人交通之间关系的估计结果如表6所示, 总体来说, 东、中、西部三大区域的雾霾污染与私人交通之间均存在显著的先升后降的倒U形关系。具体来说, 东部、中部、西部地区的私人交通的一次项回归系数均显著为正, 分别为0.8476、0.3428、0.3249, 说明雾霾污染会随着私人交通发展水平的提高而加剧, 且私人交通对雾霾污染的影响呈现区域边际递减的现象, 即对东部区域影响最大, 中部区域次之, 西部区域最低。

3.4 城市蔓延和私人交通对雾霾污染的影响

3.4.1 门槛效应检验

在对面板门槛模型进行分析之前, 需要判断面板门槛模型是否存在门槛效应, 如果存在门槛效应, 计算存在的门槛数量以及对应的门槛值。本文以私人交通作为门槛变量, 利用Stata15.0软件采用Bootstrap反复抽样300次得到单一门槛、双重门槛以及三重门槛的检验结果。如表7所示, 私人交通在1%的水平上通过单一门槛的显著性检验, 在5%的显著性水平下通过双重门槛的显著性检验, 然而没有通过三重

表7 私人交通的门槛检验结果

门槛	RSS	MES	Fstat	Prob	10%	5%	1%
单一	31.6106	0.0113	64.78	0.0000***	16.1500	18.9699	25.8617
双重	31.3413	0.0112	23.98	0.0367**	16.3281	22.2171	32.9037
三重	31.1406	0.0112	17.98	0.5367	34.3299	40.0048	49.2088

注: **、*、* 分别表示1%、5%、10%的显著性水平

门槛的显著性检验, 因此以上检验结果说明私人交通存在双重门槛。私人交通的第一个门槛值为11.6130, 对应原始值约为110525辆($e^{11.6130}$), 95%的置信区间为[11.6074, 11.6195], 私人交通的第二个门槛值为12.2473, 对应的原始值约为208417辆($e^{12.2473}$), 95%的置信区间为[12.2096, 12.2536]。对应的似然比函数图LR见图2。

3.4.2 门槛回归结果分析

门槛回归结果见表8, 当私人交通低于第一个门槛值11.6130($e^{11.6130}=110525$ 辆)时, 城市蔓延对雾霾污染的估计系数为正, 说明随着私家车数量的增加, 城市蔓延会加剧城市的雾霾污染, 这与毛文峰的研究结论一致^[27]; 当私人交通在第一个门槛值和第二个门槛值12.2473($e^{12.2473}=208417$ 辆)之间时, 城市蔓延对雾霾污染的影响系数为正, 但是未通过显著性检验; 当私人交通跨过第二个门槛值时, 城市蔓延对雾霾污染的影响系数为负, 且通过显著性水平检验, 说明随着私人交通发展水平的提高, 城市蔓延对雾霾污染具有抑制效应, 这与李强等的研究结论一致^[28]。可能的原因为当城市的私人交通发展水平较低时, 对应城市的经济发展水平也较低, 城市不断向外扩展城市的边界, 破坏了原有的生态环境, 削弱了环境的净化能力, 一系列的建筑物和配套基础设施的施工建设造成大量的建筑灰尘和扬尘, 恶化了城市的环境质量; 随着私家车数量的不断增加即跨过门槛值, 城市人口不断向城市集聚, 导致城市道路的交通拥堵和环境污染, 城市通过不断地向周围蔓延可以缓解城市中心的交通压力, 降低城市中心区的人口密度, 从而改善了城市的雾霾污染程度。

进一步分析门槛回归中控制变量对

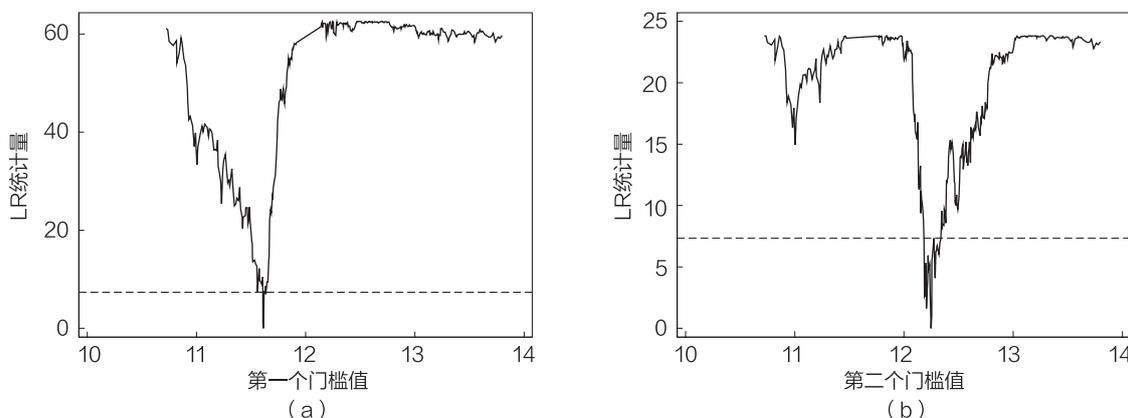


图2 私人交通的双重门槛LR图

表8 门槛回归结果估计

变量名称	回归系数	t 值	稳健标准误
sprawl × I (ln car ≤ 11.6130)	0.056 8***	3.84	0.014 8
sprawl × I (11.6130 < ln car ≤ 12.247 3)	0.006 6	0.49	0.013 3
sprawl × I (ln car > 12.247 3)	-0.020 2***	-2.03	0.009 9
ln gdp	-0.042 1***	-4.88	0.008 6
ln indus2	-0.054 2***	-1.68	0.032 2
ln rgreen	0.002 3	0.39	0.006 0
ln rain	-0.061 4***	-5.24	0.011 7
ln sunt	-0.139 3***	-3.93	0.354
ln wind	0.033 8***	3.79	0.008 9
常数项	5.886 6***	18.21	0.323 2

注：***、**、* 分别表示 1%、5%、10% 的显著性水平

雾霾的影响。经济发展水平对雾霾污染的估计系数显著为负，说明城市经济发展水平的提高有助于降低城市的雾霾污染^[29]。产业结构对雾霾污染的影响系数为负，且通过 1% 的显著性检验，说明产业结构的优化

升级对雾霾污染具有缓解作用^[30]。人均绿地面积的门槛回归系数未通过显著性检验，说明人均绿地面积对雾霾污染的影响不明显。降雨量和日照时长的门槛回归系数显著为负，风速的回归系数为正，说明降雨量和日照时间的增加可以降低雾霾污染的浓度^[31]，而风速的增加可能会促进雾霾污染向周围的扩散，加重了周边地区的雾霾污染程度^[32]。

3.4.3 稳健性检验

为了避免设定的模型存在估计偏误，采用面板固定效应模型进行稳健性检验（表 9）。具体来说，将私人交通作为虚拟变量与城市蔓延的乘积作为交互项纳入面板固定效应模型中，当私人交通小于门槛值 11.6130 ($e^{11.6130}=110\ 525$ 辆) 时，其与城市蔓延的交互项用 `sppc_1` 表示。当私人交通在门槛值 11.6130 ($e^{11.6130}=110\ 525$ 辆) 和 12.2473 ($e^{12.2473}=208\ 417$ 辆) 之间时，其与城市蔓延的交互项用 `sppc_2` 表示。当私人交通大于门槛值 12.2473 ($e^{12.2473}=208\ 417$ 辆) 时，其与城市蔓延的交互项用 `sppc_3` 表示。依次加入经

表9 面板固定效应模型的回归结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
sppc_1	0.049 6*** (0.009 6)	0.0516*** (0.009 4)	0.052 0*** (0.009 4)	0.0518*** (0.009 4)	0.050 3*** (0.009 5)	0.049 7*** (0.009 4)	0.050 2*** (0.009 3)
sppc_2	0.006 3 (0.013 1)	0.006 0 (0.013 2)	0.006 8 (0.013 0)	0.005 9 (0.013 5)	0.006 1 (0.013 6)	0.008 0 (0.013 3)	0.006 5 (0.013 3)
sppc_3	-0.028 5*** (0.009 5)	-0.027 7*** (0.009 3)	-0.027 9*** (0.009 3)	-0.027 7*** (0.009 3)	-0.027 6*** (0.009 3)	-0.028 2*** (0.009 2)	-0.026 6*** (0.009 1)
ln gdp	—	-0.046 9*** (0.009 8)	-0.044 6*** (0.009 4)	-0.044 9*** (0.009 3)	-0.043 9*** (0.009 0)	-0.043 1*** (0.008 8)	-0.042 1*** (0.008 6)
ln indus2	—	—	-0.053 6 (0.034 1)	-0.054 3 (0.034 2)	-0.054 8 (0.033 9)	-0.055 2* (0.033 3)	-0.054 2* (0.032 2)
ln rgreen	—	—	—	0.002 9 (0.006 0)	0.002 9 (0.006 0)	0.002 9 (0.006 1)	0.002 3 (0.006 0)
ln rain	—	—	—	—	-0.051 1*** (0.011 9)	-0.062 0*** (0.012 0)	-0.061 5*** (0.011 7)
ln sunt	—	—	—	—	—	-0.140 6*** (0.035 4)	-0.139 6*** (0.035 5)
ln wind	—	—	—	—	—	—	0.033 8*** (0.008 9)
常数项	3.698 1*** (0.015 5)	4.399 2*** (0.146 6)	4.572 7*** (0.196 6)	4.570 2*** (0.197 0)	4.900 0*** (0.212 7)	6.024 9*** (0.326 7)	5.889 0*** (0.323 3)
固定效应	是	是	是	是	是	是	是
R ²	0.629 0	0.636 3	0.637 9	0.638 0	0.641 2	0.644 5	0.647 7
样本量	2 800	2 800	2 800	2 800	2 800	2 800	2 800

注：括号内表示稳健标准误，***、**、* 分别表示 1%、5%、10% 的显著性水平

济发展水平 (ln gdp)、产业结构 (ln indus2)、人均绿地面积 (ln rgreen)、降水量 (ln rain)、日照时长 (ln sunt) 和风速 (ln wind) 进行回归, 回归结果显示: ①在门槛值未达到 11.6130 之前时, 城市蔓延对雾霾污染的估计系数始终为正, 且均通过 1% 的显著性水平检验, 说明城市蔓延每提高 1 个单位, 就会导致雾霾污染的浓度在 4.9% 和 5.2% 之间不同程度的增加, 即城市蔓延会加剧雾霾污染; ②在门槛值介于 11.6130 和 12.2473 之间时, 城市蔓延对雾霾污染的影响具有消极作用, 但未通过显著性检验; ③在跨过门槛值 12.2473 之后, 表 9 中的第 (1) 列至第 (7) 列的城市蔓延对雾霾污染的回归系数均显著为负, 城市蔓延每增加 1 个单位, 雾霾污染就会下降 2.6%~2.8%, 说明城市蔓延有助于降低城市中心的雾霾污染浓度。上述回归结果与面板门槛回归的结果基本一致, 因此说明设定的面板门槛模型是稳健的。

4 结论与政策启示

4.1 结论

本文以 2009—2018 年中国 280 个地级市的面板数据为研究样本, 实证分析了城市蔓延、私人交通与雾霾污染之间的非线性关系。进一步以私人交通为门槛变量, 考察城市蔓延对雾霾污染影响的门槛特征, 得出以下结论:

第一, 雾霾污染与城市蔓延之间存在显著的 U 形关系, 即城市蔓延在发展的初始阶段, 城市蔓延的雾霾效应为正, 说明城市蔓延会改善城市的环境质量, 当城市蔓延发展到一定阶段, 城市蔓延会加剧雾霾污染。

第二, 雾霾污染与私人交通之间存在显著的倒 U 形关系。私人交通对雾霾污染的负面作用会随着私家车数量的增加而增加, 当私人交通发展到一定程度时, 其对雾霾污染的正面作用就会出现。

第三, 在不同的私人交通发展水平下城市蔓延对雾霾污染的影响存在双重门槛特征。具体来说, 当私人交通低于第一个门槛值 11.6130 ($e^{11.6130}=110\ 525$ 辆) 时, 城市蔓延加剧了雾霾污染程度; 当私人交通的门槛值在 11.6130 ($e^{11.6130}=110\ 525$ 辆) 与 12.2473 ($e^{12.2473}=208\ 417$ 辆) 之间时, 城市蔓延对雾霾污染的影响为正, 即加剧了雾霾污染程度, 但是未通过显著性检验; 当私人交通跨过门槛值 12.2473 ($e^{12.2473}=208\ 417$ 辆), 城市蔓延对雾霾污染的正外部性开始产生作用, 城市蔓延可以改善城市的空气质量。

4.2 政策启示

首先, 科学地制定城市的开发边界, 因地制宜地合理规划城市空间结构。为了避免城市蔓延对城市发展的负面影响, 城市管理者可以借鉴发达城市或国家的经验, 再根据城市的具体情况, 系统地规划城市的空间结构, 发挥产业结构的集聚和规模效应, 推进产业结构优化升级, 促进城市可持续健康发展。

其次, 提高公共交通服务水平, 促进新能源汽车的使用。优化城市的公共交通通行路线, 加快城市轨道交通和快速公路的建设, 提高城市公共交通的服务水平, 分担私人交通的压力。积极倡导人们绿色出行, 增加对新能源汽车的使用, 减少城市的交通碳排放。

最后, 城市要根据自身的资源环境承载能力来确定合适的城市发展规模, 控制私人交通的数量, 促进城市蔓延与私人交通的协调发展, 避免以私家车为导向的城市蔓延对环境的污染, 发挥城市蔓延和私人交通对环境的积极作用。

参考文献

- [1] 高楠, 李强. 快速城镇化背景下城市蔓延的环境效应分析 [J]. 华北电力大学学报 (社会科学版), 2016(5): 29-36.
- [2] 单丽, 江飞, 贺晓婧, 等. 中国道路交通源大气污染的健康影响评估 [J]. 中国环境管理, 2018, 10(5): 59-64.
- [3] 秦蒙, 刘修岩, 仝怡婷. 蔓延的城市空间是否加重了雾霾污染——来自中国 PM_{2.5} 数据的经验分析 [J]. 财贸经济, 2016, 37(11): 146-160.
- [4] 李平星, 樊杰. 城市扩张情景模拟及对城市形态与体系的影响——以广西西江经济带为例 [J]. 地理研究, 2014, 33(3): 509-519.
- [5] 范建双, 周琳, 虞晓芬. 高速铁路和城市蔓延对雾霾污染的异质性影响 [J]. 地理研究, 2021, 40(4): 1146-1164.
- [6] 兰佳玮. 城市蔓延对大气污染的影响研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [7] 邵帅, 李欣, 曹建华. 中国的城市化推进与雾霾治理 [J]. 经济研究, 2019, 54(2): 148-165.
- [8] ÇOLAK S, LIMA A, GONZÁLEZ M C. Understanding congested travel in urban areas [J]. Nature communications, 2016, 7(1): 10793.
- [9] 田灵娣, 樊守彬, 张东旭, 等. 行驶速度对机动车尾气排放的影响 [J]. 环境工程学报, 2016, 10(11): 6541-6548.
- [10] LUO Z, WAN G H, WANG C, et al. Urban pollution and road infrastructure: a case study of China [J]. China economic review, 2018, 49: 171-183.
- [11] DAVIS L W. The effect of driving restrictions on air quality in Mexico city [J]. Journal of political economy, 2008, 116(1): 38-81.
- [12] CHOUDHARY A, GOKHALE S. Urban real-world driving

- traffic emissions during interruption and congestion[J]. Transportation research part D: transport and environment, 2016, 43: 59-70.
- [13] ARMAH F A, YAWSON D O, PAPPOE A A N M. A systems dynamics approach to explore traffic congestion and air pollution link in the city of Accra, Ghana[J]. Sustainability, 2010, 2(1): 252-265.
- [14] 高明, 陈丽强, 郭施宏. 轨道交通、BRT 与空气质量——一个城市异质性的视角 [J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(6): 73-79.
- [15] 王家庭, 张邓澜, 孙哲. 私人汽车消费加剧了城市蔓延吗?——来自地级市层面的经验证据 [J]. 经济评论, 2015(6): 108-117, 143-143.
- [16] 王家庭, 臧家新, 卢星辰, 等. 城市私人交通和公共交通对城市蔓延的不同影响——基于我国 65 个大中城市面板数据的实证检验 [J]. 经济地理, 2018, 38(2): 74-81.
- [17] 王家庭, 赵一帆, 李艳旭, 等. 城市蔓延对私家车发展的影响——基于中国 269 个城市的面板数据的分析 [J]. 城市问题, 2019(3): 93-103.
- [18] 姜竹青, 刘建江, 韩峰. 交通拥堵、空间外溢与人口城市化 [J]. 财经论丛, 2019(5): 104-112.
- [19] 梁若冰, 席鹏辉. 轨道交通对空气污染的异质性影响——基于 RDID 方法的经验研究 [J]. 中国工业经济, 2016(3): 83-98.
- [20] 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.
- [21] 王会芝, 杜林蔚, 吕建华. 城市群雾霾污染的空间分异及动态关联研究——基于京津冀城市群的实证分析 [J]. 中国环境管理, 2020, 12(1): 80-86.
- [22] WHITE H. A heteroskedasticity-consistent covariance matrix estimator and a direct test for heteroskedasticity[J]. Econometrica, 1980, 48(4): 817-838.
- [23] DRISCOLL J C, KRAAY A C. Consistent covariance matrix estimation with spatially dependent panel data[J]. The review of economics and statistics, 1998, 80(4): 549-560.
- [24] 刘晓红. 城市蔓延对雾霾污染的影响研究 [J]. 城市问题, 2020(4): 90-96.
- [25] 冯国强, 李菁, 武卓尔, 等. 道路交通拥堵与城市雾霾污染的关系研究 [J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(3): 93-99.
- [26] 赵春明, 潘细牙, 李宏兵, 等. 私人交通、城市扩张与雾霾污染——基于 65 个大中城市面板数据的实证分析 [J]. 财贸研究, 2020, 31(10): 20-29.
- [27] 毛云峰. 城市蔓延对环境污染的影响研究——来自我国 279 个地级市的经验证据 [D]. 天津: 南开大学, 2017.
- [28] 李强, 高楠. 城市蔓延的生态环境效应研究——基于 34 个大中城市面板数据的分析 [J]. 中国人口科学, 2016(6): 58-67, 127-127.
- [29] 张友国. 经济发展方式变化对中国碳排放强度的影响 [J]. 经济研究, 2010, 45(4): 120-133.
- [30] 戴宏伟, 回莹. 京津冀雾霾污染与产业结构、城镇化水平的空间效应研究 [J]. 经济理论与经济管理, 2019(5): 4-19.
- [31] ZHANG H L, WANG Y G, HU J L, et al. Relationships between meteorological parameters and criteria air pollutants in three megacities in China[J]. Environmental research, 2015, 140: 242-254.
- [32] HAN S Q, HAO T Y, ZHANG Y F, et al. Vertical observation and analysis on rapid formation and evolutionary mechanisms of a prolonged haze episode over central-eastern China[J]. Science of the total environment, 2018, 616-617: 135-146.

Urban Sprawl, Private Traffic and Haze Pollution

WANG Sufeng, XIANG Yingying*

(School of Economics and Management, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China)

Abstract: The panel data of 280 prefecture-level cities in China from 2009 to 2018 were selected as the research samples to explore the mechanism of urban sprawl and haze pollution. Taking private traffic as threshold variable, the threshold effect of urban sprawl on haze pollution was investigated. The research results showed that the impact of urban sprawl on haze pollution presented a U-shaped curve of first decline and then rise; The influence of private traffic on haze pollution showed an inverted U-shaped curve, that is, with the improvement of private traffic development level, haze pollution showed a trend of increasing first and then decreasing; There was a double threshold effect of urban sprawl on haze pollution. When the threshold value of private traffic was less than the first threshold value ($e^{11.6130}=110\ 525$ vehicles), urban sprawl aggravated haze pollution. When the threshold of private traffic was between the first threshold and the second threshold ($e^{12.2473}=208\ 417$ vehicles), the influence coefficient of urban sprawl on haze pollution was positive, but it did not pass the significance test. When private transport crossed the second threshold, higher levels of urban sprawl helped curb haze pollution. Studying the relationship among urban sprawl, private traffic and haze pollution is of great significance for promoting the healthy and sustainable development of cities.

Keywords: urban sprawl; private transportation; haze pollution; panel threshold model