

# 城市交通拥堵与空气污染的交互影响机制研究<sup>①</sup>

——基于滴滴出行的大数据分析

袁 韵<sup>1</sup>, 徐 戈<sup>2, 3\*</sup>, 陈晓红<sup>2, 4</sup>, 贾建民<sup>5, 6</sup>

(1. 西南交通大学经济管理学院, 成都 610031; 2. 湖南工商大学大数据与互联网创新研究院, 长沙 410205; 3. 湖南工商大学工商管理学院, 长沙 410205; 4. 中南大学商学院, 湖南省两型社会与生态文明 2011 协同创新中心, 长沙 410083; 5. 香港中文大学(深圳) 经管学院, 深圳 518172; 6. 深圳市大数据研究院, 深圳 518172)

**摘要:** 城市交通拥堵与空气污染等问题给我国城市的持续发展带来了严峻挑战. 本文以成都市为样本, 通过融合滴滴出行订单数据、空气质量数据、气候信息等, 采用断点回归模型和中介变量分析, 对交通拥堵与空气污染之间的交互影响机制进行了研究. 结果显示, 网约车运行规模的增加会加剧城市的空气污染, 其机制是由于车辆流动效率降低这一中介变量的作用, 即交通拥堵导致空气污染的增加. 但另一方面, 空气污染又会对交通拥堵产生抑制作用, 而这一现象产生的机制是由于空气污染会促使人们的出行减少, 车辆需求和运行规模的减少反而使流动效率增加. 本文从人们流动性行为的视角, 揭示了城市交通拥堵与空气污染之间的复杂关系, 为这些问题的协同治理提供了理论和实证依据.

**关键词:** 城市交通拥堵; 空气污染; 流动性行为; 滴滴出行; 断点回归模型; 中介变量分析

**中图分类号:** X51; C912.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2020)02-0053-20

## 0 引言

随着我国经济水平的快速发展, 以及各地城市化进程的加快, 机动车保有数量的逐年增长使得城市交通拥堵与空气污染状况日益严重. 今年的《政府工作报告》明确指出要加强机动车污染源的治理工作. 机动车尾气因含有颗粒物、氮氧化物、硫氧化物等空气污染物, 经过在空气中发生的化学反应, 严重破坏大气物质平衡, 已成为公认的空气污染重要排放源之一. 同时, 大规模的机动车出行会直接影响交通效率, 造成交通拥堵, 使机动车无法维持匀速行驶状态, 并需要频繁启停以保障驾驶安全, 从而使各种污染物排放增加<sup>[1]</sup>. 各种研究也表明, 交通拥堵会进一步加剧空气污染,

因此城市交通拥堵与空气污染之间本应该存在正相关关系. 但实际上, 百度、高德发布的交通报告中的数据 displays, 多数城市的交通拥堵指数与空气质量指数之间呈负相关关系, 也有一些学者在研究发现了同样现象, 因此, 两者之间可能存在着双向的影响关系.

空气污染已经成为危害人类健康的“隐形杀手”, 不但严重威胁人们的身体健康, 也对心理健康产生巨大负面影响. 面对空气污染, 人们会自觉采取各种应对手段, 减少不必要的出行是最为简单有效的防护方法, 因此, 空气污染可能也是影响城市交通状况的一个重要因素. 有关机动车出行与空气污染之间是否存在交互影响的问题, 在以往的研究中鲜有讨论.

① 收稿日期: 2019-05-31; 修订日期: 2019-11-26.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71490722; 71790615; 71704052); 中国工程院重大咨询项目(2019-ZD-38); 新零售虚拟现实技术湖南省重点实验室(2015TP); 湖南省移动电子商务 2011 协同创新中心的资助、湖南省自然科学基金青年项目(2018JJ3263); 湖南省教育厅优秀青年项目(18B334).

通讯作者: 徐 戈, 女, 广东广州人, 博士, 副教授. Email: 765443615@qq.com

本文将基于成都市“滴滴出行”的网约车使用数据,并融合对应时间的空气质量数据,采用断点回归设计和中介变量分析方法,建立多种因素之间的统计分析模型,探讨网约车运行规模、出行效率及空气污染三者之间的因果推断及交互影响机制,对城市交通和空气污染的优化与治理具有重要的现实意义。

## 1 文献回顾及研究假设

我国城镇化与机动车数量的快速增长,使交通拥堵成为困扰大城市可持续发展的普遍问题。城市的汽车数量与街道容量的相互作用决定了机动车的运行效率及拥堵程度<sup>[2]</sup>,城市的道路条件在较短时期内并不会发生显著变化,道路容量会保持稳定的水平,这使得城市的机动车运行数量成为引起交通拥堵的关键。因此,城市机动车运行规模的增加会直接对个体车辆运行速度产生负向影响,甚至造成交通拥堵;反之,限制机动车的运行规模可以提高个体车辆的行驶速度,缓解交通拥堵。国内外研究也表明,世界各国政府为治理城市交通拥堵,纷纷采取机动车限购<sup>[3]</sup>、限行<sup>[4]</sup>等管理手段以及燃油税<sup>[5]</sup>、拥堵收费<sup>[6]</sup>等税收政策。近年来,网约车的兴起和发展丰富了居民的出行选择,同时也增加了车辆的出行率<sup>[7]</sup>,使得大城市的交通拥堵现象恶化<sup>[8]</sup>,但也有研究认为网约车的出现可以减少私家车上路数量<sup>[9]</sup>。有关报告显示,2018年我国网约车完成客运量约200亿人次,网民使用率高达40%,刘名敏等<sup>[10]</sup>通过数学建模和算例分析表明,网约车平台的出现对城市道路交通带来严重的影响。网约车使用的增加可以直接体现居民出行需求的增加,并反映为城市道路上机动车运行数量的增加,因此会导致个体车辆行驶速度的降低,使得道路的拥堵程度提高,影响出行效率,据此提出本文的假设1:

**假设1** 网约车运行规模的增加会负向影响个体车辆的出行效率。

近年来,人类的社会活动对城市空气环境的负面影响日益显著。随着国民经济的发展和机动车保有量的快速增长,机动车排放对环境的污染

问题日趋严重,许多大城市的空气污染已经由燃煤型污染转向燃煤和机动车混合型污染。以往研究中也表明,汽车尾气排放是城市空气污染的重要原因之一<sup>[11,12]</sup>,道路上行驶车辆的增加会直接导致氮氧化物 $\text{NO}_x$ 、颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_{10}$ 等空气污染物排放量的进一步增加<sup>[13,14]</sup>,造成空气污染<sup>[15]</sup>。邵帅等<sup>[16]</sup>根据1998年~2012年中国省级的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度数据,使用动态面板数据模型对雾霾污染的影响因素进行探究,发现交通运输是使城市雾霾污染加剧的重要原因。秦蒙等<sup>[17]</sup>根据2001年~2013年中国地级市的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度数据,研究了城市蔓延与雾霾污染之间的关系,结果表明城市扩张及人口规模的增加均会加剧城市的空气污染。因此,网约车运行规模的增加,预示着城市机动车上路量的增加以及尾气排放的增加,可能会导致空气质量的恶化,据此提出本文的假设2:

**假设2** 网约车运行规模的增加会加剧城市的空气污染。

机动车上路量增加所造成的拥堵效应,会导致个体车辆行驶速度的降低及启停次数的增加,同时会引起 $\text{NO}_x$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{CO}$ 等空气污染物排放量的增加<sup>[18]</sup>。马丽梅等<sup>[19]</sup>采用2001年~2010年中国31个省市的人口加权 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度数据,探究交通拥堵与雾霾污染之间的关系,结果发现交通拥堵是雾霾污染最直接的影响因素并且不同区域之间存在着显著差异,特别是东部地区的交通拥堵对雾霾污染的影响作用尤为突出。胡志远等<sup>[20]</sup>在对公交车的各种污染物排放研究中发现,其在加速状态中的 $\text{PM}_{2.5}$ 排放因子最高,大约是减速或怠速行驶下的6倍~10倍。汽车尾气中的主要污染物 $\text{NO}_x$ 、 $\text{CO}$ 等排放因子也会随着车速的增加而减小<sup>[21]</sup>。另一项研究表明,由于我国国民不喜欢数字4,在选择汽车牌照时会尽可能地避免尾号为4,所以在北京市限号政策实施时,限号尾数为4也就预兆着城市道路上会有更多的行驶车辆,以此推断出道路上机动车数量增加及造成的交通拥堵,会加剧 $\text{NO}_2$ 的排放<sup>[14]</sup>。也有研究证实,交通限行或限号手段在短期甚至某些特别时期,例如2008年北京奥运会期间,对城市的空气污染具有显著的抑制作用<sup>[13,22]</sup>。因为公共交通方式的人均

占用的能源、空间资源最少,使得人均空气污染物排放最低<sup>[23]</sup>,对私家车使用的负面影响可以缓解交通拥堵及改善空气质量,因此城市轨道交通<sup>[24]</sup>及公共交通建设<sup>[25]</sup>在各国城市中广泛践行. Mohring<sup>[26]</sup>早期的研究也指出,轨道交通设施的建设可以吸引一部分私家车驾驶者转移,从而降低城市的空气污染. Yang等<sup>[27]</sup>等将北京市地铁开通作为准自然实验,研究表明地铁开通后的短期时间里可以缓解交通拥堵,使路面机动车的行驶速度增加. 若将空气污染作为一种结果考虑,机动车运行规模和交通拥堵均会对其产生影响,具体来说,以网约车为代表的机动车运行规模的增加会带来空气污染问题,而对个体出行效率的负面影响可能会进一步加剧空气污染,据此提出本文的假设3:

**假设3** 车辆出行效率在网约车运行规模对空气污染的影响中起中介变量的作用.

自从2012年政府及新闻媒体公布各地的PM<sub>2.5</sub>数据以来,空气污染已经成为中国乃至世界各国政府及民众极为重视的环境问题,以雾霾问题尤为突出,更是给北京、成都等大中型城市居民的生活方式及生活规律带来了不同程度的影响. 大量研究成果表明,空气污染会严重影响人体健康,甚至对生命安全造成严重威胁<sup>[28-30]</sup>,若长期直接接触污染物浓度较高的户外空气会显著减少人类的寿命<sup>[31,32]</sup>,在一项基于中国218个城市数据的实证研究中也表明,城市的空气污染使得医院的就诊率明显增加<sup>[33]</sup>. 空气污染具有污染物种类多、弥漫速度快、人体直接接触等特征,不仅从身体健康上对人类造成不利影响,还会对心理健康产生负面作用. 最近一项关于社交媒体的研究也表明,空气污染会严重影响城市居民的情绪和幸福感<sup>[34]</sup>. 根据 Maddux等<sup>[35]</sup>提出的保护动机理论( protection motivation theory, PMT),在危险认知下,人们会对不健康行为进行威胁评估,对健康行为进行应对评估,从而判断是否产生保护动机,进而采取保护行为. 在空气污染中,人们采取保护或应对行为的动机,源自于自身对空气污染感知风险的评估,以及各种应对行为的效能评价,污染物PM<sub>2.5</sub>浓度对感知风险有显著的正向影响<sup>[36]</sup>,对环境风险感知越大的人会增加出行,并且有更多的环境行为<sup>[37]</sup>. 徐戈等<sup>[38]</sup>研究中也表明,在雾霾

污染下,对雾霾感知风险越大、感知可控性越强的群众会采取更多的防护及应对措施,其对相关防护产品的购买意愿也越强,此外,雾霾感知风险在环境信息与应对意愿之间起着重要的中介作用. 以往研究也提及,面对城市的空气污染威胁,人们往往会采取减少室外活动、减少外出、减少开窗时间等应对措施<sup>[39-42]</sup>. 郑思齐等<sup>[43]</sup>以雾霾污染严重的北京市为例,使用大众点评网站的数据衡量人们外出就餐的意愿,证实了城市空气中PM<sub>2.5</sub>浓度的增加会抑制人们外出就餐的行为. 刘铁军等<sup>[44]</sup>在研究中发现,城市的交通拥堵与空气污染之间的相关系数为-0.155. 所以,如果将空气污染看作一种影响行为的驱动性因素,人们在出行选择中会对空气污染进行风险规避,从而避免外出或路面交通工具的使用,其中一部分表象为网约车的使用规模的减少,反映城市道路上的机动车流量减少,进而提高城市的交通效率,对交通拥堵产生缓解作用,据此提出本文的假设4、假设5和假设6:

**假设4** 空气污染会对网约车运行规模产生负面影响.

**假设5** 空气污染会对个体车辆出行效率产生正面影响.

**假设6** 网约车运行规模在空气污染对车辆出行效率的影响中起中介变量的作用.

## 2 研究设计

### 2.1 数据来源

随着交通运输部相关法律条例的制定,网约车行业愈加趋于合法化和规范化,由于平台技术与服务质量以及顾客需求的不断提升,网约车市场开始呈现出优胜劣汰的发展趋势. 在2016年8月份滴滴出行并购Uber后,滴滴出行已然成为我国网约车行业的统领者,日均出行服务次数高达2500万,其平台每日产生的海量出行数据对城市交通与规划、人类出行行为等领域的研究均具有重要意义.

成都市是我国西南地区的重要城市,根据《中国城市统计年鉴(2016)》报告,成都市2016年的年平均人口为1219万,随着经济和工业的快速

发展,交通拥堵及空气污染问题日益严重.滴滴出行“盖亚”数据开放计划旨在为学术界提供真实、高质量的滴滴特色数据集,其中成都市网约车的历史数据为本文研究交通拥堵与空气污染之间的关系奠定了坚实的数据基础.

基于滴滴的数据开放计划,本文研究采用的数据主要分为如下三类:1) 2016年11月成都市网约车使用数据,具体包括载客时间及地点坐标、卸客时间及地点坐标等,大约有600万条.2) 2016年11月成都市空气质量的小时数据(来自pm2.5.in网站收集的政府环保部门公布的数据),包括AQI,以及主要空气污染物PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>、NO<sub>2</sub>和SO<sub>2</sub>的浓度.在这个时间窗口中,每天的空气质量指数均值为120,最高244,最低50,其中重度污染天气分别有两天,空气质量为优的天气也分别有两天,轻度污染以上的天数占16天.3) 2016年11月成都市气象信息的小时数据(收集自weather underground网站),包括空气温度、湿度、风力等级、风向和天气等.由于时间窗口只有一个月,气候条件、城市基础设施

$$D(p_1, p_2) = 2 \arcsin \left( \sqrt{\sin^2 \left( \frac{lat_1 - lat_2}{2} \right) + \cos(lat_1) \cos(lat_2) \sin^2 \left( \frac{lng_1 - lng_2}{2} \right)} \right) \times R \quad (2)$$

其中 $p_1$ 和 $p_2$ 分别代表载客点和卸客点; $t_1$ 和 $t_2$ 分别代表载客时间和卸客时间; $D(p_1, p_2)$ 代表起讫点间的位移距离; $R$ 代表地球半径.

**定义2** 网约车的运行规模:定义运行规模 $S$ 为在一个时间窗口 $w$ 覆盖区间城市中网约车的总体使用频次,用它来间接反映该时段城市居民外出意愿的强弱及城市道路上行驶的机动车规模大小.据统计,网约车的平均运载时间为1260s(21min),标准差为761s(13min),故本文的时间窗口 $w$ 设定为载客时间前后各30min,如式(3),其中 $t_j^i$ 是出行 $j$ 的载客时间

$$S_i = \sum_{j=1}^N w(t_j^i, t_j^i) \quad (3)$$

$$w(t_j^i, t_j^i) = \begin{cases} 1, & \text{if } t_j^i \geq t_j^i - 1800 \text{ and } t_j^i \leq t_j^i + 1800 \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (4)$$

数据计算示例:假设某网约车出行 $i$ 的载客时间为8:26:12am,根据定义2,选择的时间窗口 $w$ 为[7:56:12am, 8:56:12am];计算当天载客时间位于窗口 $w$ (即 $t_j \in w$ )的出行数据的样本量 $n$ (如

和居民社会活动的变化幅度不大,这些自然条件为本文研究提供了一个以空气污染状况变化为主的观测环境,使其可以应用“准自然”实验的分析方法.

### 2.2 重要变量定义

基于对原始数据的融合及预处理,本文采用的重要变量的定义及计算方法如下:

**定义1** 出行效率:在一次网约车出行服务中,乘客由载客点被运送至卸客点,本文将起讫点间的空间直线距离定义为出行的位移距离,这个距离与运载时间的比值定义为出行效率 $E$ (km/h),理论上,出行效率的数值低于行驶的平均速度.但由于它们之间存在高度的正相关性(部分数据显示, $r=0.9368, p<0.001$ ),因此本项研究中采用式(1)的出行效率来简化实际平均速度的计算.另外,因为地理距离会受高维空间的稀疏性影响,本文使用Haversine方法计算任意地点坐标之间的实地距离,如式(2)

$$E = \frac{D(p_1, p_2)}{t_2 - t_1} \quad (1)$$

$n_i = 9788$ ),作为数据 $i$ 的网约车运行规模.

**定义3** 空气质量指标:成都市范围存在有7个城市空气质量监测站,分别位于金泉两河、十里店、三瓦窑、沙河铺、梁家巷、君平街和灵岩寺(三环以外),如图1所示.因为气体具有流动性和扩



图1 成都市空气监测站分布

Fig. 1 Distribution of air monitoring stations in Chengdu

散性,风力及风向都会影响其扩散速度与方向,空气污染物的迁移扩散可以近似为随机游走<sup>[45]</sup>,任一位置的空气质量指标可以参照多个监测站的数据来估计.假设待测地点与某个监测站点的距离越小,数值与其越加接近,本文采用距离倒数加权方法来估计载客点及卸客点的空气质量指标  $AQ$ ,如式(5)

$$AQ(p_1) = \frac{\sum_{k=1}^7 AQ_k \times (1/D(p_1, q_k))}{\sum_{k=1}^7 (1/D(p_1, q_k))} \quad (5)$$

$$AQ(p_2) = \frac{\sum_{k=1}^7 AQ_k \times (1/D(p_2, q_k))}{\sum_{k=1}^7 (1/D(p_2, q_k))}$$

$$AQ = \frac{AQ(p_1) + AQ(p_2)}{2} \quad (6)$$

其中  $AQ(p_1)$  和  $AQ(p_2)$  分别是网约车出行中载客点及卸客点的空气质量指标,包括 AQI, 以及  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 、 $NO_2$  和  $SO_2$  等空气污染物的浓度; $AQ$  是起迄点间的指标均值,以反映出行  $i$  对应的空气质量; $AQ_k$  代表监测站  $k$  在具体时刻的数据; $D(p_1, q_k)$  和  $D(p_2, q_k)$  分别代表载客点及卸客点与监测站  $k$  之间的实地距离.将出行  $i$  载客前一时

刻的数据代入公式,可近似得到出行  $i$  发生之前的空气质量指标;若将出行  $i$  卸客后一时刻的数据代入公式,可近似得到出行  $i$  结束之后的空气质量指标.

### 2.3 样本描述性统计

表 1 是本文所使用数据的描述性统计,剔除极端离群数据及存在缺失值的数据后,还剩余 5 308 364个观测样本.网约车的出行距离均值为 5.8 km,可见居民倾向于在中短距离的出行中选择网约车方式;在 60 min 的时间窗口中,网约车的运行规模均值为 10 438 次;网约车的出行效率的均值为 17.41 km/h,与其他研究中的数值相当<sup>[2,46]</sup>;AQI 均值在 120 附近,整体处于中轻度空气污染水平.

图 2 是样本数据中各项指标在成都市范围内的分布情况,基本上呈放射状的环形格局.成都市具有显著的城市中心体系,城市中心处因其具有高密度的商业中心及各类功能性场所,吸引交通工具将大量的人口运输至此,不论机动车流量还是人流量均远远高于城市外围区域.因此,与城市中心距离越接近的地区,网约车的出行频率越高、出行距离越短、出行效率越低,因汽车尾气引起的空气污染更加严重.

表 1 主要变量的描述性统计

Table 1 Descriptive statistics of variables

变量字段	中位数	平均值	标准差	最小值	最大值
出行效率/(km/h)	16.256	17.419	6.867	2.001	69.998
网约车的运行规模/(次/h)	11 234	10 438.060	2 876.541	635.000	14 682.000
出行距离/(km)	5 011.724	5 815.723	3 547.777	1 000.004	34 152.900
载客点与城市中心间的距离/(km)	4 125.786	4 602.726	2 896.833	2.687	20 964.540
卸客点与城市中心间的距离/(km)	4 071.701	4 635.561	2 978.277	11.452	20 918.280
出行之前 AQI 指数	108.730	119.069	56.731	14.683	326.178
出行之前 $PM_{2.5}$ 浓度/( $\mu g/m^3$ )	78.291	86.247	48.373	5.844	276.211
出行之前 $PM_{10}$ 浓度/( $\mu g/m^3$ )	134.512	146.375	73.699	13.231	393.095
出行之前 $SO_2$ 浓度/( $\mu g/m^3$ )	14.899	16.634	7.235	4.227	120.585
出行之前 $NO_2$ 浓度/( $\mu g/m^3$ )	63.855	68.504	24.251	7.756	184.005
出行之后 AQI 指数	109.023	119.312	56.505	14.581	326.178
出行之后 $PM_{2.5}$ 浓度/( $\mu g/m^3$ )	78.349	86.361	48.205	5.687	276.211
出行之后 $PM_{10}$ 浓度/( $\mu g/m^3$ )	135.187	146.880	73.382	13.018	393.095
出行之后 $SO_2$ 浓度/( $\mu g/m^3$ )	14.714	16.478	7.182	4.366	119.619
出行之后 $NO_2$ 浓度/( $\mu g/m^3$ )	65.191	69.551	24.424	8.07	188.191

注:样本容量 Obs = 5 308 364

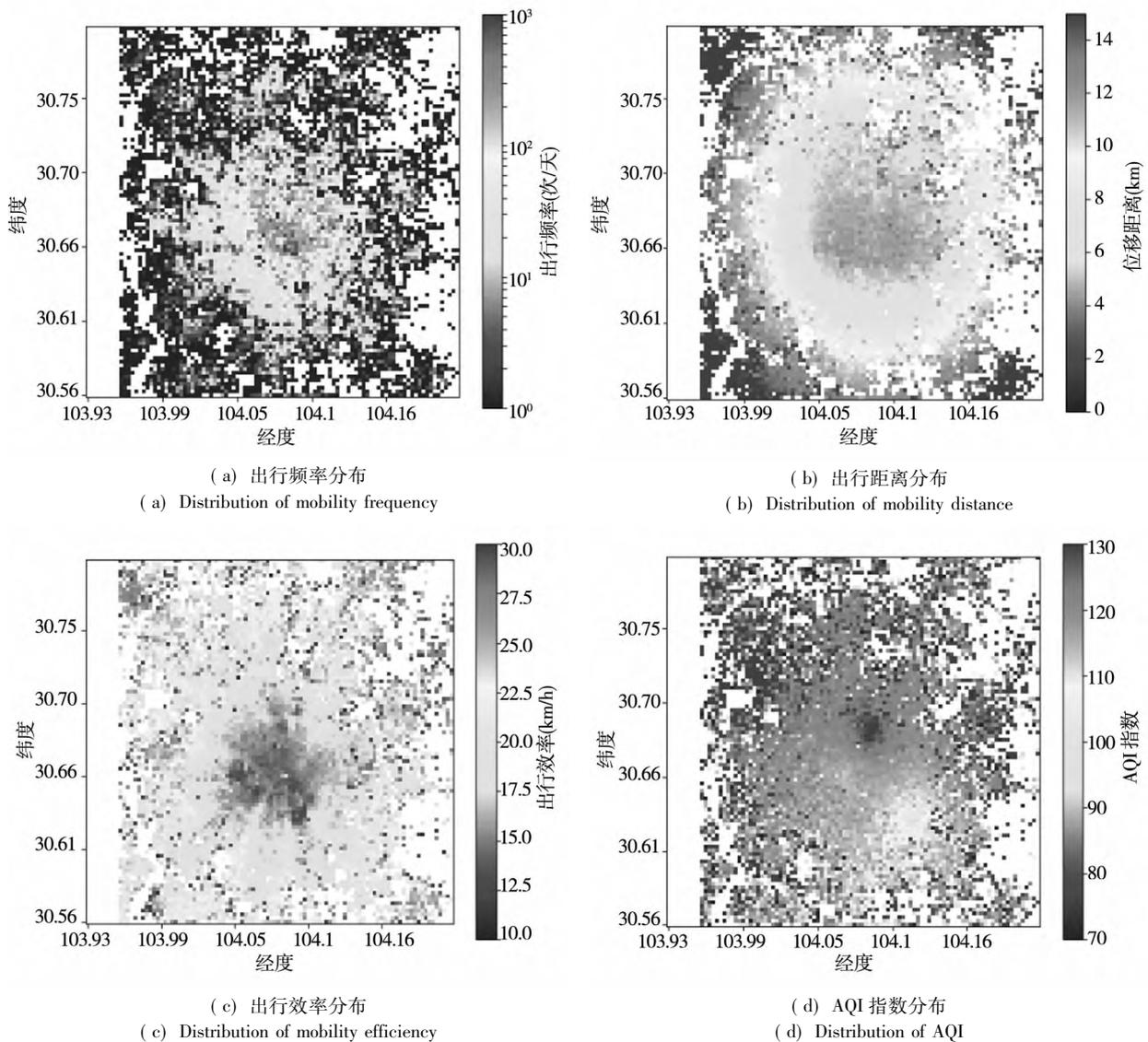


图 2 样本数据各种指标在成都市的分布

Fig. 2 Distribution of sample data indexes in Chengdu

### 3 模型设定

#### 3.1 因果推断模型

探究城市交通拥堵和空气污染之间的因果关系是本文的主要目标,为克服参数估计产生的内生性问题,本文拟使用断点回归设计(RDD)方法,这是一种在非实验的条件下检验处理效应的随机“准自然”实验方法,另外,现有研究中使用的RDD大多是对单个断点的讨论,少数国内外文献涉及多个阈值的断点回归分析<sup>[47-50]</sup>,即在多个断点附近划分数据并综合评估.断点回归设计的思想为,找到一个或多个阈值,当执行变量大于阈

值时,认为个体接受处理,作为实验组;当执行变量小于阈值时,认为个体未接受处理,作为控制组,以此来反映个体在执行变量接受处理前后的差异,尤其在变量连续的情况下,断点阈值附近样本之间的差异可以很好地推断执行变量和结果变量之间的因果联系,故本文主要使用断点回归方法验证两个变量之间的因果关系.

首先,本文推测网约车运行规模的增加所反映的机动车上路量的增加会导致个体车辆流动效率的降低.出租车轨迹数据可以用于测量及反映城市居民的出行特征,网约车作为传统出租车产业与互联网技术的结合,其运行规模同样具有明显的时间演变规律(如图3),且在每日的工作时

段(8am~8pm,同时存在出行高峰现象)和非工作时段(8pm~次日8am)存在显著差异,这与居民的生活作息规律和社会活动相当符合,和以往研究中的趋势相一致<sup>[51-53]</sup>.另外,网约车运行规模和出行效率呈明显的反向变化趋势(如图3),数值上为显著的负相关关系( $r = -0.367, p < 0.001$ ),交通拥堵时由于有限道路容量下机动车运行数量增加,城市道路车辆比率过低和车辆密度过高所导致的.所以,本文假设网约车运行规模的增加可以反映如下两个事实,其一是直接代表人们对网约车服务使用的增加,其二是间接反映居民出行意愿和出行需求增强所导致的机动车上路量的增加.

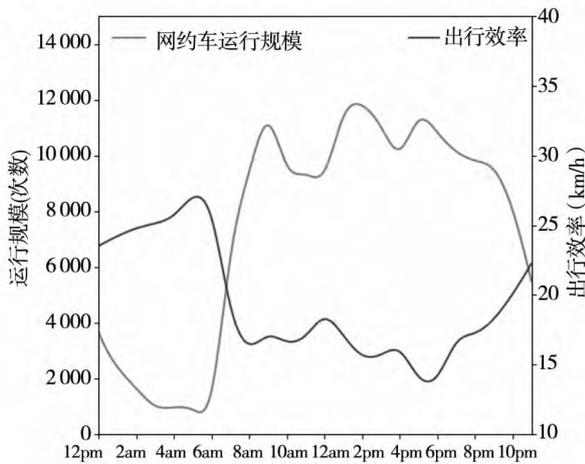


图3 网约车运行规模与出行效率的时间规律  
Fig. 3 The temporal characteristics of traffic flow and mobility efficiency

因为日间(8am~8pm)和夜间(8pm~次日8am)时段的数据在网约车运行规模上存在显著差异,本文以时间为标准,将数据划分为日间出行和夜间出行两类.运行规模是连续整型数值,分别计算日间和夜间时段的运行规模均值  $S_1$  和  $S_2$ ,将两者的平均值  $C$  作为断点,即假设数据的运行规模  $S$  在断点  $C$  处,个体是夜间出行到日间出行的处理概率由  $a$  跳跃到  $b$ .因此,采用以日间和夜间出行为界限的模糊断点回归策略(Fuzzy RD),执行变量是网约车的运行规模,处理变量为是否为日间时段的出行.

首先,定义被解释变量  $E$ ,代表网约车方式的出行效率,反映了城市路面交通的拥堵程度,同时

定义处理变量  $daytime$ ,代表是否为日间时段的出行.当  $daytime_i = 1$  时,个体的出行处于日间时段; $daytime_i = 0$  则代表个体的出行处于夜间时段,故提出解释网约车运行规模和出行效率之间因果关系的FRD模型1

$$E_i = \beta_0 + \beta_1 daytime_i + f(S_i - C) + \gamma X_i + \varepsilon_i \tag{7}$$

其中  $S_i$  为执行变量, $S_i - C$  定义为实际运行规模与设定断点之间的距离, $f(S_i - C)$  是运行规模距离的多项式函数.为了准确估计出式(7)中的参数,需要考虑运行规模条件和实际是否为日间出行之间的相关关系,故给出第一阶段方程

$$daytime_i = \alpha_0 + \alpha_1 D_i + f(S_i - C) + \delta X_i + \varepsilon_i \tag{8}$$

其中  $D_i$  为处置变量, $D_i = 1\{S_i - C \geq 0\}$ ;  $f(S_i - C)$  是执行变量的一个多项式函数,Gelman等<sup>[54]</sup>推荐执行变量的多项式应尽量采用局部线性或二次形式; $X_i$ 代表模型的前定控制变量,主要是出行距离;系数  $\beta_1$  解释了运行规模断点附近是否为日间出行对出行效率的局部平均处理效应,系数  $\alpha_1$  解释了运行规模断点附近对是否为日间出行的影响,式(7)和式(8)共同构成FRD模型,可以采用参数2SLS估计<sup>[55]</sup>.

断点回归之所以能够克服遗漏变量、解决内生性问题,是因为假设在断点附近范围内的样本是随机产生的,如果存在样本操纵,可能会对模型参数产生估计偏误.对此,本文使用McCrary方法<sup>[56]</sup>对执行变量进行断点处的连续性检验,其基本步骤是将断点附近的样本分配到不同的等宽箱体,然后通过计算各个箱体的概率密度,检验断点前后箱体的概率密度是否具有显著性地“跳跃”.另外,如果RD是有效的,那么运行规模在断点前后不应该对个体的其它控制因素的影响存在差异<sup>[57]</sup>,故采用式(9)检验前定变量的连续性,将前定控制变量作为运行规模变量的被解释变量,若检验结果显著(即在断点处不连续),该前定控制变量应该从RD模型中剔除

$$Z_i = \theta_0 + \theta_1 D_i + f(S_i - C) + \varepsilon_i \tag{9}$$

进一步地,可以将空气污染看做交通行为造成的一种后果.空气污染受多种因素的共同作用,除城市机动车交通排放外,还有社会经济活动、气

候气象变化等复杂因素的影响,研究数据的时间跨度仅为1个月,城市基础设施和社会经济活动的变化较小,所以昼夜的气象条件差异对空气质量影响较大,不宜将数据划分为日间和夜间时段进行研究.经数据统计,可以发现运行规模在工作日和周末的早高峰(8am~10am)时段存在显著性差异,与居民的出行规律一致.因此,选取早高峰时段的数据片段,将数据划分为工作日和周末日两类,减弱了经济活动、气象等外部因素的影响,同时,计算各组中运行规模的均值以确定断点 $C$ .为验证网约车运行规模对出行后空气质量具有显著影响,用出行后AQI指数替换FRD模型1中的出行效率,作为被解释变量.同时定义处理变量 $weekday$ ,代表是否为工作日的出行,得到FRD模型2,如式(10)和式(11)

$$AQI_i^2 = \beta_0 + \beta_1 weekday_i + f(S_i - C) + \gamma X_i + \varepsilon_i \quad (10)$$

$$weekday_i = \alpha_0 + \alpha_1 D_i + f(S_i - C) + \delta X_i + \varepsilon_i \quad (11)$$

其中 $AQI_i^2$ 代表网约车出行 $i$ 结束之后的AQI指数;系数 $\beta_1$ 解释了运行规模断点附近高峰出行对空气污染的局部平均处理效应,系数 $\alpha_1$ 解释了运行规模断点附近对是否为工作日出行的影响.同理,分别使用McCrary方法和式(9)检验执行变量和前定控制变量在断点处的连续性.

若转变研究视角,将空气污染看成影响居民行为的一种原因,其可能对人类的生活方式产生影响,当空气污染危害存在时,城市居民会采取例如减少出行等各种应对手段使自己免受负面影响.为验证空气污染会抑制人们外出,对网约车运行规模产生的影响,同样采用RD方法分析.众所周知,AQI指数可以直接反映空气污染的程度,从优、良、轻度污染到中度污染等等,存在多个阈值(即断点),并且AQI指数在断点前后对空气质量级别的改变是确定性的,所以采取多个阈值的确定断点回归(Multi-thresholds Sharp RD)更为合理,参考席鹏辉等<sup>[48]</sup>等研究空气污染对地方投保影响时的多断点回归处理方式,若存在 $n$ 个断点,则以各相邻断点之间的均值进行样本划分,若 $C_j$ 代表第 $j$ 个断点,那么在 $C_j$ 附近的对照组(断点左侧)中执行变量的取值范围是 $(\frac{C_{j-1} + C_j}{2}, C_j)$ ,处

理组(断点右侧)中执行变量的取值范围是 $(C_j, \frac{C_j + C_{j+1}}{2})$ ,故本文建立MSRD模型3-1,如式(12)

$$S_i = \alpha_0 + \alpha_1 D_i + f(AQI_i^1 - C_j) + \lambda X_i + \delta_i + \xi_i + \varepsilon_i \quad (12)$$

其中 $S_i$ 代表出行 $i$ 对应时段内网约车的运行规模; $AQI_i^1$ 代表出行 $i$ 开始之前的AQI指数; $D_i$ 为处置变量, $D_i = 1\{AQI_i^1 - C_j > 0\}$ ;  $f(AQI_i^1 - C_j)$ 是执行变量的一个多项式函数;因居民的出行行为具有周期性的时间规律,需要固定时间效应 $\delta_i$ ;  $\xi_i$ 为断点固定效应,在总体断点回归中控制各个断点之间的影响差异.

式(12)中的估计系数 $\alpha_1$ 反映当空气污染程度提高一个级别时,对网约车运行规模的影响,是考虑了各个AQI断点处影响的综合断点效应.为了更好地横向比较不同的空气污染水平变化对运行规模的影响,有必要估计出各个断点处的断点效应.为此,采取与席鹏辉等<sup>[48]</sup>相同的做法,构建虚拟变量 $A_j$ ,当 $AQI_i^1 \in (\frac{C_{j-1} + C_j}{2}, \frac{C_j + C_{j+1}}{2}]$ 时, $A_j$ 为1,否则为0,据此建立MSRD模型3-2,如式(13).其中,系数 $\beta_j$ 代表第 $j$ 个断点处,因空气污染程度的提高对网约车运行规模(也反映乘客的出行意愿和路面交通方式的使用率)的影响

$$S_i = \beta_0 + \sum_{j=1}^n \{\beta_j D_i \times A_j + f(AQI_i^1 - C_j) \times A_j\} + \lambda X_i + \delta_i + \varepsilon_i \quad (13)$$

为保证多确定断点回归模型的有效性,依然使用McCrary方法检验执行变量在各断点处的连续性,并可以使用式(14)检验前定控制变量在各断点处的连续性

$$Z_i = \alpha_0 + \alpha_1 D_i + f(AQI_i^1 - C_j) + \delta_i + \xi_i + \varepsilon_i \quad (14)$$

### 3.2 交互影响分析模型

中介变量是联系两个观测变量之间关系的纽带,意味着一种内部机制.引入中介变量可以在因果推断中分析变量之间的因果关系及其机制,有更好地解释在网约车运行规模、出行效率以及空气污染三者之间的交互影响关系.

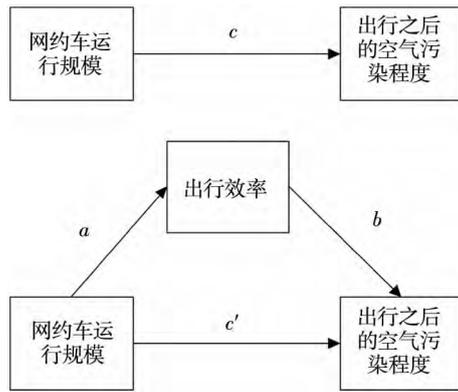


图 4 运行规模与空气污染的关系模型

Fig. 4 Relationship model of traffic flow and air pollution

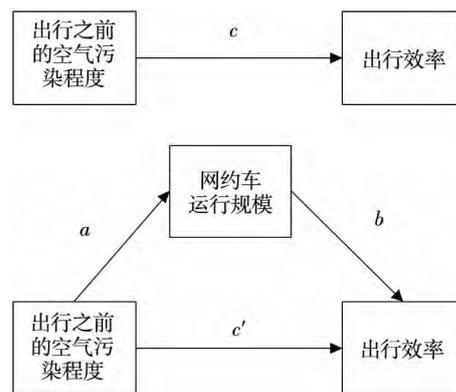


图 5 空气污染与出行效率的关系模型

Fig. 5 Relationship model of air pollution and mobility efficiency

根据本文提出的假设,分别建立如图 4 和图 5 所示的概念模型. 在图 4 所示的运行规模与空气污染的关系模型中,空气污染受到以下路径方式的影响: ①网约车运行规模对空气污染产生直接影响; ②网约车运行规模对个体出行效率产生直接影响,交通拥堵又会直接影响到车辆的尾气排放,因此出行效率在运行规模和空气污染之间起到中介变量的作用. 为验证这种影响的路径关系,进一步证实假设 1 ~ 假设 3,建立回归模型 4,其设定如下

$$AQ_i^2 = \alpha + \beta V_i + cS_i + \varepsilon_i \quad (15a)$$

$$E_i = \alpha + \beta V_i + aS_i + \varepsilon_i \quad (15b)$$

$$AQ_i^2 = \alpha + \beta V_i + c'S_i + bE_i + \varepsilon_i \quad (15c)$$

其中  $AQ_i^2$  是出行  $i$  结束之后的空气质量指标,包括 AQI 指数,以及城市空气中  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 、 $NO_2$  和  $SO_2$  的浓度;  $S_i$  是出行  $i$  对应时段内网约车的运行规模 ( $10^3$  次/h);  $E_i$  是网约车出行  $i$  的出行效率,直接反映车辆行驶速度的快慢及道路拥堵程度;  $V_i$  是一组控制变量,包括出行  $i$  开始之前空气质量指标(与  $AQ_i^2$  的选择一致)、出行  $i$  的位移距离 (km)、载客点与城市中心间的距离 (km)、卸客点和城市中心间的距离 (km)、空气温度、空气湿度、风力等级,以及天气状态的虚拟变量(阴、多云、下雨和晴)、载客点方位的虚拟变量(城东、城南、城西和城北)和卸客点方位的虚拟变量(城东、城南、城西和城北)。

另外,在图 5 所示的空气污染与出行效率的关系模型中,出行效率受到以下路径方式的影响: ①空气污染对个体出行效率产生直接影响; ②空

气污染抑制人们的外出行为,对网约车运行规模产生直接影响,网约车运行规模又会显著地影响个体出行效率,所以运行规模在空气污染和出行效率之间起到中介变量的作用. 为验证这种影响的路径关系,进一步证实假设 4 ~ 假设 6,建立回归模型 5,其设定如下

$$E_i = \alpha + \beta V_i + cAQ_i^1 + \varepsilon_i \quad (16a)$$

$$S_i = \alpha + \beta V_i + aAQ_i^1 + \varepsilon_i \quad (16b)$$

$$E_i = \alpha + \beta V_i + c'AQ_i^1 + bS_i + \varepsilon_i \quad (16c)$$

其中  $E_i$  是网约车出行  $i$  的出行效率;  $AQ_i^1$  是出行  $i$  开始之前的空气质量指标;  $S_i$  是出行  $i$  对应时段内网约车的运行规模;  $V_i$  是一组控制变量,剔除空气质量指标外,其他与模型 4 的设定相同. 另外,因居民每天的出行具有可循的时间规律,故添加时间虚拟变量以固定时间效应,包括周末虚拟变量和 24h 的时刻虚拟变量。

## 4 实证结果

经过数据计算,网约车运行规模在日间时段和夜间时段的分布近似正态,分布均值的平均数为 9 580,故在 FRD 模型 1 中将运行规模等于 9 580 次作为断点. 首先,使用 Stata 软件中 DCdensity 命令检验执行变量在断点处的连续性,报告中断点处统计量的标准误差远小于 1.96,故可接受运行规模的密度函数在断点处  $C(S = 9 580)$  处连续的原假设. 为检验不同带宽对模型估计结果的影响,选择 200、225 和 250 这三种不同运行规模的带宽,同时,多项式的阶数选择一阶线性和二阶

形式,对模型进行稳健性检验.

表2报告了网约车运行规模对个体出行效率的影响,即FRD模型1的估计结果.根据模型的第一阶段结果,对于运行规模这一执行变量,其断点虚拟变量 $D_i$ 的系数均在0.1%的置信水平上高度显著,意味着在日间和夜间时段,居民的网约车使用规模及其所反映外出需求均存在显著性差异,且系数为正,表明在日间时段,网约车存在更多的使用需求,间接可以推断出与夜间比较,日间的城市道路上运行更多的机动车,如图6(a)所示,横轴代表网约车的运行规模,纵轴代表数据为日间出行的概率,在 $S = 9\ 580$ 前后存在明显的断点.在第二阶段回归中,被解释变量为出行效率,运行规模是否达到预定的断点值作为日间出行的

工具变量,前定控制变量为居民的出行距离,报告中处理变量  $daytime$  的系数均在5%的水平下显著为负,证实日间时段,网约车的出行效率会受到运行规模增加引起的负向影响,如图6(b)所示,横轴依旧代表网约车的运行规模,纵轴则代表出行效率.同时,随着带宽的增加,样本容量随之扩大,估计效率得以提高,参数估计的标准差减小.从不同带宽和多项式阶数选择上看,参数估计的符号及显著性均保持一致,所以FRD模型1的结果是稳健的.另外,经检验,前定变量出行距离的断点系数不显著,在断点C处并未发生明显的“跳跃”.总体来说,日间出行时段所反映的网约车运行规模的增加会负向影响个体的出行效率,可能会引起交通拥堵的产生,假设1成立.

表2 模糊断点回归模型1的估计结果  
Table 2 Estimated results of FRD model 1

变量	带宽 $h( + / - 200)$		带宽 $h( + / - 225)$		带宽 $h( + / - 250)$	
	一阶 $p(1)$	二阶 $p(2)$	一阶 $p(1)$	二阶 $p(2)$	一阶 $p(1)$	二阶 $p(2)$
第一阶段: 运行规模对日间出行概率的影响						
$D_i$ (运行规模 > 9 580)	0.144*** (0.004 5)	0.152*** (0.004 6)	0.115*** (0.004)	0.123*** (0.004)	0.077*** (0.004)	0.082*** (0.004)
(运行规模 - 9 580)	-0.000 4*** (0.000 02)	-0.000 5*** (0.000 02)	-0.000 28*** (0.000 02)	-0.000 3*** (0.000 02)	-0.000 05*** (0.000 01)	-0.000 07*** (0.000 01)
(运行规模 - 9 580) <sup>2</sup>		0.000 001 3*** (0.000 000 09)		0.000 000 1*** (0.000 000 01)		-0.000 000 6*** (0.000 000 06)
出行距离(log)	0.005** (0.001 8)	0.005** (0.001 8)	0.005*** (0.001 7)	0.005** (0.001 7)	0.005*** (0.001 6)	0.005*** (0.001 6)
第二阶段: 日间出行( $IV =$ 运行规模)对出行效率的影响						
日间出行( $IV =$ 运行规模)	-0.703* (0.35)	-0.98** (0.34)	-0.753* (0.4)	-1.019** (0.39)	-1.07* (0.54)	-1.177* (0.56)
(运行规模 - 9 580)	-0.001 7*** (0.000 1)	-0.001 6*** (0.000 1)	-0.0016*** (0.000 1)	-0.001 5*** (0.000 1)	-0.001 5*** (0.000 1)	-0.001 5*** (0.000 1)
(运行规模 - 9 580) <sup>2</sup>		-0.000 007*** (0.000 001)		-0.000 004*** (0.000 000 1)		-0.000 001*** (0.000 000 6)
出行距离(log)	5.56*** (0.02)	5.56*** (0.02)	5.56*** (0.019)	5.56*** (0.019)	5.55*** (0.018)	5.56*** (0.018)
前定控制变量的连续性检验						
出行距离(log)	0.011 (0.006)	0.011 (0.006)	-0.002 (0.005 5)	0.000 1 (0.006)	-0.008 6 (0.005 4)	-0.006 6 (0.005)
$D_i$ (运行规模 > 9 580)						
样本量	198 244		221 509		244 203	

注: 括号内为稳健标准差.\*\*\*, \*\*, \* 分别表示0.1%, 1%和5%的显著性水平.

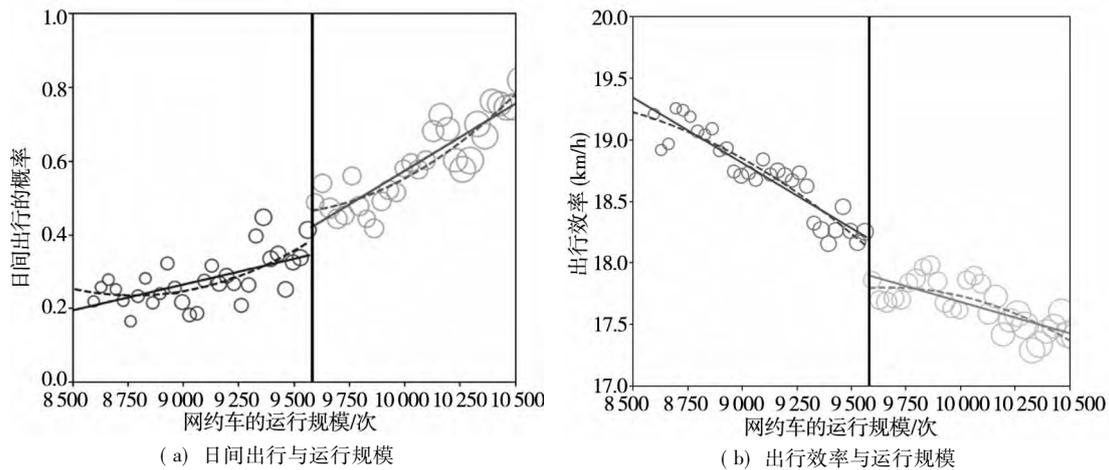


图6 网约车运行规模对出行效率的影响

Fig. 6 The impact of traffic flow on mobility efficiency

其次,经过数据计算,FRD模型2中将运行规模等于9 500作为断点.同样,执行变量运行规模经过 McCrary 检验,在断点处连续.表3报告了网约车运行规模对空气污染的影响,即模糊断点回归模型2的估计结果.根据模型的第一阶段结果,对于运行规模这一执行变量,其断点虚拟变量  $D$  的系数均在 0.1% 的置信水平上高度显著,意味着在工作日和周末时间,居民的网约车使用规模及其所反映居民出行行为存在显著性差异,且系数为正,表明在工作日,早间时段内网约车存在更多的使用需求,即城市居民的早高峰出行现象.在第二阶段回归中,被解释变量为空气质量指数(AQI),数值越高,代表空气污染越严重,运行规模是否达到预定的断

点值作为工作日出行的工具变量,前定控制变为网约车的出行距离,报告中处理变量 *weekday* 的系数均在 0.1% 的水平下极为显著且为正,证实在日间时段,空气质量指数会受到运行规模增加引起的正向影响,即空气污染的加剧.同时,随着带宽的增加,样本容量随之扩大,估计效率得以提高,参数估计的标准差减小.并且从不同带宽和多项式阶数选择上看,参数估计的符号及显著性均保持一致,所以FRD模型2的结果也是稳健的.另外,经检验,前定变量出行距离依旧在断点C处连续.总体来说,工作日早高峰出行时段所反映的网约车运行规模的增加会正向影响之后城市的AQI指数,会造成一定程度的空气污染,假设2成立.

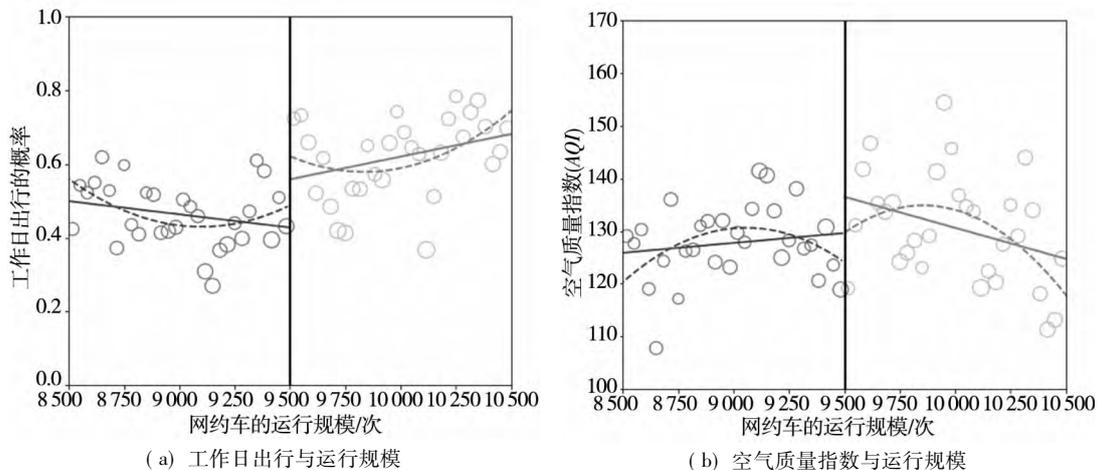


图7 网约车运行规模对AQI的影响

Fig. 7 The impact of traffic flow on AQI

表 3 模糊断点回归模型 2 的估计结果

Tabel 3 Estimated results of FRD model 2

变量	带宽 $h( + / - 200)$		带宽 $h( + / - 225)$		带宽 $h( + / - 250)$	
	一阶 $p(1)$	二阶 $p(2)$	一阶 $p(1)$	二阶 $p(2)$	一阶 $p(1)$	二阶 $p(2)$
第一阶段: 运行规模对工作日出行概率的影响						
$D_i$ (运行规模 > 9 500)	0.259*** (0.009 3)	0.258*** (0.009 3)	0.235*** (0.008 7)	0.234*** (0.008 7)	0.212*** (0.008 3)	0.209*** (0.008 2)
(运行规模 - 9 500)	-0.001*** (0.000 04)	-0.001*** (0.000 04)	-0.000 8*** (0.000 03)	-0.000 8*** (0.000 03)	-0.000 7*** (0.000 03)	-0.000 7*** (0.000 03)
(运行规模 - 9 500) <sup>2</sup>		-0.000 002 3*** (0.000 000 02)		-0.000 000 3*** (0.000 000 01)		-0.000 000 3*** (0.000 000 01)
出行距离(log)	-0.061** (0.003 8)	-0.06** (0.003 8)	-0.065*** (0.003 6)	-0.063** (0.003 6)	-0.068*** (0.003 4)	0.066*** (0.003 4)
第二阶段: 工作日出行 ( $IV =$ 运行规模) 对空气质量指数的影响						
工作日出行 ( $IV =$ 运行规模)	25.24*** (3.96)	25.63*** (3.97)	43.57*** (4.01)	43.96*** (4.03)	57.32*** (4.17)	58.58*** (4.23)
(运行规模 - 9 530)	0.047*** (0.002 3)	0.044*** (0.002 2)	0.033*** (0.001 8)	0.029*** (0.001 8)	0.025*** (0.001 6)	-0.021*** (0.001 5)
(运行规模 - 9 530) <sup>2</sup>		0.000 2*** (0.000 02)		0.000 3*** (0.000 02)		0.000 3*** (0.000 02)
出行距离(log)	1.63*** (0.48)	1.59*** (0.48)	2.81*** (0.47)	2.63*** (0.46)	3.90*** (0.46)	3.76*** (0.45)
前定控制变量的连续性检验						
出行距离(log)	-0.001 5 (0.012)	-0.001 1 (0.012)	-0.003 6 (0.011)	-0.003 3 (0.011)	-0.004 6 (0.01)	-0.003 8 (0.01)
$D_i$ (运行规模 > 9 500)						
样本量	44 130		51 021		57 164	

注: 括号内为稳健标准差。\*\*\*, \*\*, \* 分别表示 0.1%, 1% 和 5% 的显著性水平。

表 4 是我国《环境空气质量指数(AQI)技术规范(试行)》中对 AQI 指标的分类标准<sup>[58]</sup>, AQI 值越大, 表明城市空气污染的质量等级越高, 空气污染情况越严重, 人们所面临的健康威胁越强, 所以 AQI 分类标准为本文空气污染断点的确定提供了很好的依据. AQI 是一个连续型变

量, 但各个阈值附近的空气污染等级都会发生明显的“跳跃”, 阈值前后 AQI 指数的略微变化会引起空气污染程度显著且确定性的改变. 经数据统计, 对于 90% 以上的数据样本, AQI 值小于 200, 故选择 50、100、150 和 200 这四个断点构建 MSRD 模型 3.

表 4 AQI 指标的分类标准

Tabel 4 Classification criteria of AQI

AQI	质量等级	质量状况	健康影响
0 ~ 50	一级	优	空气质量令人满意, 基本无空气污染
51 ~ 100	二级	良	空气质量可接受, 但某些污染物可能对极少数异常敏感人群健康有较弱影响
101 ~ 150	三级	轻度污染	易感人群症状有轻度加剧, 健康人群出现刺激症状
151 ~ 200	四级	中度污染	进一步加剧易感人群症状, 可能对健康人群心脏、呼吸系统有影响
201 ~ 300	五级	重度污染	心脏病和肺病患者症状显著加剧, 运动耐力降低, 健康人群普遍出现症状
> 300	六级	严重污染	健康人群运动耐力降低, 有明显的强烈症状, 提前出现某些疾病

模型3中不加入额外的前定控制变量,并选择4、6、8三种不同的带宽,多项式则选择一阶和二阶形式,以检验模型估计的稳健性.首先,经过McCrary方法检验,执行变量AQI在各个断点 $C_j$ 附近均连续.表5报告了模型3的结果,根据断点综合效应在0.1%的水平上显著为负,可以推断出当城市的空气污染程度提高一个等级时,会对居民的外出意愿产生显著的负向影响,直接表现为对网约车使用的减少,此时人们会更加倾向于选择非路面交通方式或避免不必要的出行.各断点处的子效应均在0.1%的水平上极为显著,且综合负效应主要来自第1个断点、第3个断点和第4个断点,第2个断点的影响系数较低,如图8所示,横轴代表当前的空气质量指数,纵轴则代表之后的网约车运行规模.当空气质量从优转为良时,大部分易感人群开始出现安全预警,会减少外出以避免空气污染带来的健康威胁;当空气质量由良转为轻度污染时,对健康人群的出行影响较小;当城市的空气质量进一步恶化,从轻度污染转为中度污染或者从中度污染转为重度污染时,对

健康人群的呼吸系统、神经系统和心血管等均会具有严重的安全威胁.从不同带宽和多项式阶数选择上看,参数估计的符号及显著性均保持一致,所以MSRD模型3的估计结果是稳健的.总体来说,空气污染会显著地抑制居民的外出,其中一部分表现为其对网约车出行需求的降低,对网约车的运行规模具有负向的抑制作用,假设4成立.

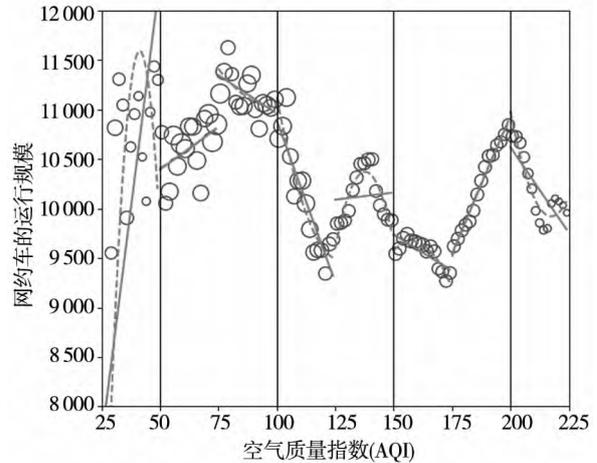


图8 AQI对网约车运行规模的影响  
Fig. 8 The impact of AQI on traffic flow

表5 多确定断点回归模型3的估计结果  
Tabel 5 Estimated results of MSRD model 3

变量	带宽 $h(+/-4)$		带宽 $h(+/-6)$		带宽 $h(+/-8)$	
	一阶 $p(1)$	二阶 $p(2)$	一阶 $p(1)$	二阶 $p(2)$	一阶 $p(1)$	二阶 $p(2)$
多项式阶数						
$D(\text{断点综合效应})$	-138.53*** (4.18)	-142.57*** (4.19)	-139.09*** (3.43)	-142.83*** (3.44)	-138.28*** (3)	-143.69*** (3)
$(AQI - C_j)$	-17.13*** (0.9)	-15.92*** (0.9)	-15.1*** (0.49)	-14.37*** (0.5)	-14.65*** (0.33)	-13.93*** (0.33)
$(AQI - C_j)^2$		-4.01*** (0.22)		-1.39*** (0.08)		-1.05*** (0.4)
各断点处的效应估计						
$D_1(AQI=50)$	-273.71*** (5.06)	-274.75*** (5.06)	-248.53*** (4.08)	-248.9*** (4.08)	-224.63*** (3.52)	-225.9*** (3.52)
$D_1(AQI=100)$	-2.71*** (4.55)	-6.28*** (4.56)	-12.9*** (3.72)	-16.2*** (3.73)	-26.59*** (3.26)	-33*** (3.27)
$D_1(AQI=150)$	-219.24*** (5.01)	-222.87*** (5.01)	-192.07*** (4.12)	-194.36*** (4.13)	-184.64*** (3.61)	-188.33*** (3.61)
$D_1(AQI=200)$	-193.87*** (5.2)	-198.29*** (5.21)	-211.4*** (4.31)	-214.79*** (4.32)	-216.05*** (3.79)	-222.92*** (3.8)
样本量	825 625		1 259 071		1 665 215	

注: 括号内为稳健标准差.\*\*\*, \*\*, \* 分别表示0.1%, 1%和5%的显著性水平.

进一步地,采用因果逐步回归方法<sup>[59,60]</sup> (Causal Step Regression) 对回归模型4和回归模型5的中介变量进行检验.模型4中将空气污染看作被解释变量,式(15a)表示网约车运行规模对空气污染影响的总效应,式(15b)表示第一阶段影响,式(15c)表示第二阶段影响及直接效应.分别对以上三个方程式的系数使用OLS估计,计算结果如表6所示.①网约车运行规模对个体出行效率起显著的负向影响(系数  $a < 0, p < 0.001$ ),与FRD模型1中因果关系一致,验证假设1成立.②网约车运行规模对出行结束之后的AQI指数及污染物浓度的直接效应与总效应均表

现为显著的正向影响(系数  $c' > 0, c > 0, p < 0.001$ ),与FRD模型2中因果关系一致,验证假设2成立.③出行效率对出行结束之后的AQI指数及污染物浓度起显著的负面影响,且出行效率的中介变量经检验成立,起部分中介作用,表现为互补的中介效应<sup>[61]</sup> ( $a \times b \times c' > 0$ ),验证假设3成立.为了更加清晰且直观地展示中介变量的影响路径,根据表6的结果,画出中介效应图,图9(a)~图9(e)分别是空气质量指标为AQI指数,以及PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>、NO<sub>2</sub>和SO<sub>2</sub>浓度时的中介效应图.其中,第一阶段和第二阶段的影响均显著成立,且影响方向为负;直接效应也显著成立,影响方向为正.

表6 回归模型4的中介效应分析

Table 6 Mediation effect analysis of regression model 4

污染指标	系数估计				效应		
	$c$	$a$	$b$	$c'$	直接效应	间接效应	总效应
AQI 指数	0.171 4*** (0.001 7)	-0.818 7*** (0.000 9)	-0.020 3*** (0.000 8)	0.154 8*** (0.001 8)	0.154 8*** (0.001 8)	0.016 6*** (0.000 6)	0.171 4*** (0.001 7)
PM <sub>2.5</sub> 浓度	0.104 5*** (0.001 4)	-0.819 4*** (0.000 9)	-0.016 2*** (0.000 6)	0.091 2*** (0.001 5)	0.091 2*** (0.001 5)	0.013 3*** (0.000 5)	0.104 5*** (0.001 4)
PM <sub>10</sub> 浓度	0.251 6*** (0.002 2)	-0.818 0*** (0.001 0)	-0.045 9*** (0.001 0)	0.214 1*** (0.002 4)	0.214 1*** (0.002 4)	0.037 5*** (0.000 8)	0.251 6*** (0.002 2)
NO <sub>2</sub> 浓度	0.660 9*** (0.001 5)	-0.822 6*** (0.001 0)	-0.105 9*** (0.000 7)	0.573 7*** (0.001 6)	0.573 7*** (0.001 6)	0.087 1*** (0.000 6)	0.660 9*** (0.001 5)
SO <sub>2</sub> 浓度	0.030 1*** (0.000 5)	-0.821 5*** (0.001 0)	-0.000 6** (0.000 2)	0.029 7*** (0.000 5)	0.029 7*** (0.000 5)	0.000 5** (0.000 2)	0.030 1*** (0.000 5)

注: 括号内为稳健标准差.\*\*\*, \*\*, \* 分别表示 0.1%, 1% 和 5% 的显著性水平.

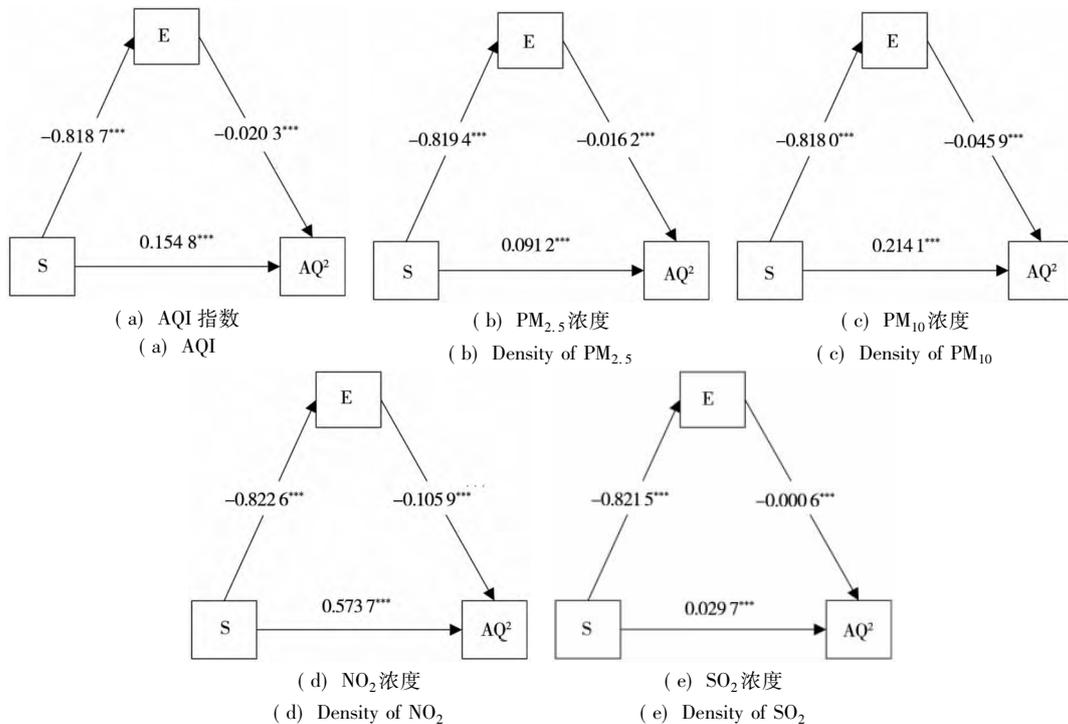


图9 回归模型4的中介效应图

Fig. 9 Mediation effect diagram of regression model 4

模型5将空气污染看作解释变量,式(16a)表示空气污染对个体车辆出行效率影响的总效应,式(16b)表示第一阶段影响,式(16c)表示第二阶段影响及直接效应.分别对以上三个方程式的系数使用OLS估计,结果如表7所示.①除NO<sub>2</sub>以外,AQI指数及其余污染物浓度均对网约车运行规模具有显著的负面影响(系数 $a < 0$ ,  $p < 0.001$ ),与MSRD模型3中因果关系一致,验证假设4成立.②空气污染对出行效率起到显著且正向的直接效应和总效应(系数 $c' > 0$ ,  $c > 0$ ,  $p <$

$0.001$ ),并且运行规模的中介效应均显著( $p < 0.001$ ),起部分中介作用,验证假设5和假设6成立.同样,为了更加清晰且直观地展示中介变量的影响路径,根据表7的结果,画出中介效应图,图10(a)~图10(e)分别是空气质量指标为AQI指数,以及PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>、NO<sub>2</sub>和SO<sub>2</sub>浓度时的中介效应图.其中,除NO<sub>2</sub>外,第一阶段的影响均显著为负;第二阶段影响均显著成立,且方向为负;空气质量指标对个体出行效率影响的直接效应均显著为正.

表7 回归模型5的中介效应分析

Table 7 Mediation effect analysis of regression model 5

污染指标	系数估计				效应		
	$c$	$a$	$b$	$c'$	直接效应	间接效应	总效应
AQI 指数	0.003 7*** (0.000 1)	-0.001 3*** (0.000 01)	-0.661 6*** (0.002 6)	0.002 8*** (0.000 1)	0.002 8*** (0.000 1)	0.000 9*** (0.000 01)	0.003 7*** (0.000 1)
PM <sub>2.5</sub> 浓度	0.004 5*** (0.000 1)	-0.001 6*** (0.000 01)	-0.661 5*** (0.002 6)	0.003 4*** (0.000 1)	0.003 4*** (0.000 1)	0.001 1*** (0.000 01)	0.004 5*** (0.000 1)
PM <sub>10</sub> 浓度	0.002 6*** (0.000 03)	-0.000 9*** (0.000 01)	-0.662 1*** (0.002 6)	0.002 1*** (0.000 04)	0.002 1*** (0.000 04)	0.000 6*** (0.000 01)	0.002 6*** (0.000 03)
NO <sub>2</sub> 浓度	0.003 8*** (0.000 1)	0.001 5*** (0.000 02)	-0.673 2*** (0.002 6)	0.004 9*** (0.000 1)	0.004 9*** (0.000 1)	-0.001 0*** (0.000 01)	0.003 8*** (0.000 1)
SO <sub>2</sub> 浓度	0.016 4*** (0.000 4)	-0.012 0*** (0.000 1)	-0.664 7** (0.002 6)	0.008 4*** (0.000 4)	0.008 4*** (0.000 4)	0.008 0*** (0.000 1)	0.016 4*** (0.000 4)

注: 括号内为稳健标准差.\*\*\*, \*\*, \* 分别表示 0.1%, 1% 和 5% 的显著性水平.

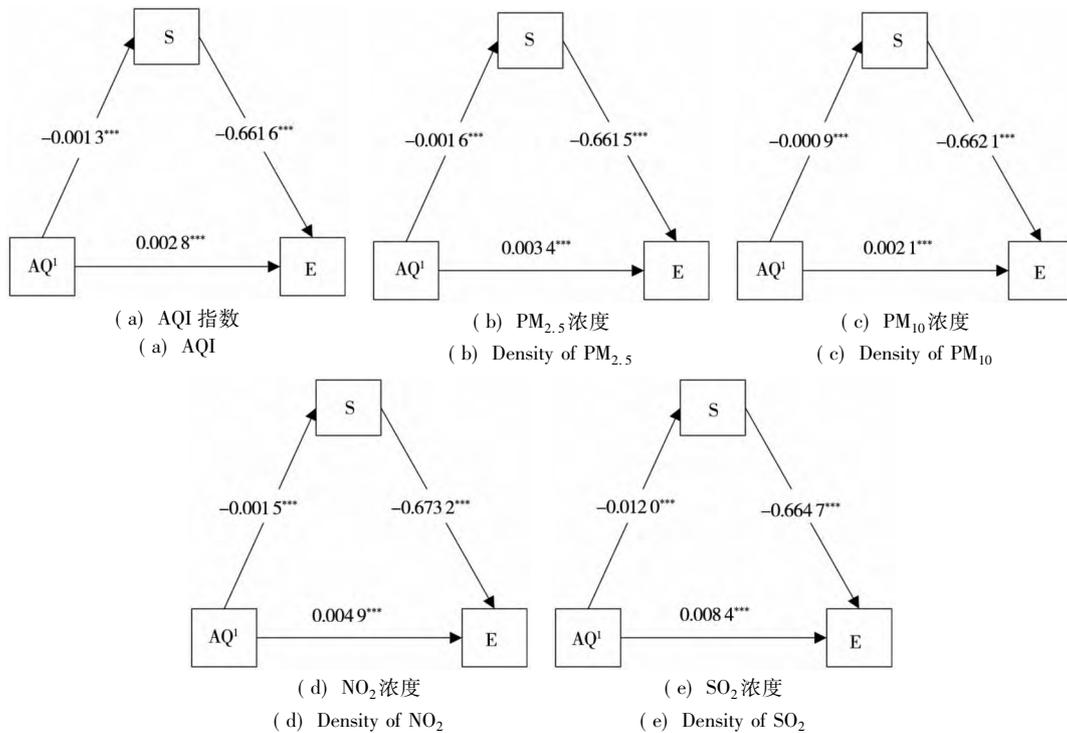


图10 回归模型5的中介效应图

Fig. 10 Mediation effect diagram of regression model 5

## 5 结束语

随着社会的进步,城市交通拥堵与空气污染已成为大中城市发展进程中不可避免、难以解决的问题之一,同时给城市居民的出行及城市发展带来了危害与挑战。道路上行驶的车辆超过道路的实际容量后,造成的交通拥堵会导致个体车辆行驶速度的骤减,浪费大量的时间及人力;当城市中空气污染物经过累积扩散及化学反应后超过临界负载时,对城市生态系统产生极大的破坏,造成严重的空气污染,给居民的生命健康带来威胁,也显著影响人们的流动和生活方式。

大量研究也表明,新兴的网约车服务在城市中造成了许多意想不到的后果,例如车辆出行的增加和交通拥堵,相关污染物的尾气排放会导致空气污染。所以,本文研究以成都市为例,使用“滴滴出行”产生的海量网约车的个体出行数据,来反映城市的交通状态,并融合外部空气质量数据,每小时的细粒度数据也使得可以通过比较时间的先后顺序,判断事件之间的因果逻辑,进而讨论以网约车为代表的机动车出行方式和空气污染之间的因果关系及交互影响。经证实,汽车尾气作为城市空气污染的主要来源之一,当网约车运行规模增加所反映的机动车出行量的增加确实会加剧空气污染的程度,对城市的空气质量产生消极影响;同时,引起的道路交通拥堵也会提高机动车的污染物排放水平,进一步导致空气质量的恶化,而出行效率在网约车运行规模对空气污染的影响中起显著的中介变量作用。因此,本文所揭示的城市交通拥堵与空气污染之间的交互影响关系,可以帮助我们理解城市建设及管理中所采取的限行、限号等手段,来直接或间接控制城市机动车行驶的数量,以达到缓解交通拥堵并降低汽车尾气

的总排放的双重目的。另外,在城市的发展中,亟需采用轨道交通、道路扩建、路网优化、路况监测等方式引导及分散道路车流,提升机动车的运行效率,减少交通拥堵。

另一方面,空气污染也是影响居民出行行为和出行方式选择的重要因素之一,严重的空气污染使得人们的出行将面临着健康风险和交通风险。根据保护动机理论<sup>[35]</sup>,在空气污染条件下,居民会采取减少外出等应对手段以减轻其造成的负面影响,因此会引起机动车出行量的减少,从而使交通效率有所提高,缓解交通拥堵。本文的数据分析结果也显示,除NO<sub>2</sub>之外,城市空气中PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>和SO<sub>2</sub>浓度均会对网约车的运行规模产生显著的负向影响,减弱人们对网约车的出行需求;同时,空气污染物浓度也会正向影响网约车的出行效率,网约车运行规模在两者的影响关系中起显著的中介变量作用,这很好地解释了为什么许多城市交通拥堵指数与空气污染之间呈负相关的关系。

综上所述,空气污染和交通拥堵之间并不是一种恶性循环的单向影响关系,而是双向的交互影响,并处于动态平衡的一种演变状态。空气污染在某种意义上既是交通拥堵造成的结果,也是抑制城市拥堵状态的一种原因。本文从人们流动性行为的视角,去理解城市空气污染与交通拥堵的关系,为相关领域的研究提供了新的洞察。本项研究表明,城市空气污染的治理还是要“以人为本”,即人们对流动性的需求才是造成空气污染和交通拥堵的根本原因,这也是移动污染源难以治理问题在社会和行为等方面的原因所在。正是在空气污染抑制城市居民的外出行为的同时,它也在“自然”地缓解着道路拥堵,正向影响机动车的出行效率。本项研究为今后开展城市空气污染与交通拥堵的综合治理提供了理论和实证依据。

### 参考文献:

- [1] 贺克斌, 霍红, 王岐东, 等. 城市轻型车实际道路瞬态排放的特征[J]. 中国环境科学, 2006, (4): 390-394.  
He Kebin, Huo Hong, Wang Qidong, et al. Characteristics of instantaneous emission of urban light-duty vehicles in real road[J]. China Environmental Science, 2006, (4): 390-394. (in Chinese)
- [2] Çolak S, Lima A, González, et al. Understanding congested travel in urban areas[J]. Nature Communications, 2016, 7: 10793.
- [3] 蒋丽. “限购”对中国汽车产业发展的影响及对策[J]. 企业经济, 2013, (10): 140-144.

- Jiang Li. The impact of “carbuying restriction policy” on the development of China’s automobile industry and counter measures [J]. *Enterprise Economy*, 2013, (10): 140–144. (in Chinese)
- [4] Zhou Y, Wu Y, Yang L, et al. The impact of transportation control measures on emission reductions during the 2008 Olympic Games in Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, 44(3): 285–293.
- [5] Li S, Linn J, Muehlegger E. Gasoline taxes and consumer behavior [J]. *Social Science Electronic Publishing*, 2012, 6(4): 302–342.
- [6] Wu K, Chen Y, Ma J, et al. Traffic and emissions impact of congestion charging in the central Beijing urban area: A simulation analysis [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2017, 51: 203–215.
- [7] Wu T, Shen Q, Xu M, et al. Development and application of an energy use and CO<sub>2</sub> emissions reduction evaluation model for China’s online car hailing services [J]. *Energy*, 2018, 154: 298–307.
- [8] 高永, 安健, 全宇翔. 网络约租车对出行方式选择及交通运行的影响 [J]. *城市交通*, 2016, 14(5): 1–8.  
Gao Yong, An Jian, Quan Yuxiang. The impact of APP-based car sharing on travel mode shift and transportation operation performance [J]. *Urban Transport of China*, 2016, 14(5): 1–8. (in Chinese)
- [9] 梁涛. 软件打车模式普及的经济学分析 [J]. *山西财经大学学报*, 2016, (s1): 47–48.  
Liang Tao. Economic analysis of the popularization of car-hailing model [J]. *Journal of Shanxi Finance and Economics University*, 2016, (s1): 47–48. (in Chinese)
- [10] 刘名敏, 王晓蕾, 等. 网约车对城市居民出行方式影响的建模与分析 [J]. *物流科技*, 2016, 39(10): 79–82.  
Liu Mingmin, Wang Xiaolei, et al. Modeling the impacts of ride-sourcing platforms on urban transportation market [J]. *Logistics Sci-tech*, 2016, 39(10): 79–82. (in Chinese)
- [11] Liu Q, Baumgartner J, Zhang Y, et al. Source apportionment of Beijing air pollution during a severe winter haze event and associated pro-inflammatory responses in lung epithelial cells [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, 126: 28–35.
- [12] 杨昆昊, 夏赞宇, 何芑, 等. 机动车燃油质量及尾气排放与北京市大气污染的相关性 [J]. *中国科学院大学学报*, 2017, 34(3): 304–317.  
Yang Kunhao, Xia Zanyu, He Peng, et al. Correlation of fuel quality and emissions of motor vehicle with atmospheric pollution in Beijing [J]. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 2017, 34(3): 304–317. (in Chinese)
- [13] Viard V B, Fu S. The effect of Beijing’s driving restrictions on pollution and economic activity [J]. *Journal of Public Economics*, 2015, 125: 98–115.
- [14] Zhong N, Cao J, Wang Y. Traffic congestion, ambient air pollution, and health: Evidence from driving restrictions in Beijing [J]. *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 2017, 4(3): 821–856.
- [15] Davis L W. The effect of driving restrictions on air quality in Mexico city [J]. *Journal of Political Economy*, 2008, 116(1): 38–81.
- [16] 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, (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 [J]. *Economic Research Journal*, 2016, (9): 73–88. (in Chinese)
- [17] 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<sub>2.5</sub> 数据的经验分析 [J]. *财贸经济*, 2016, 37(11): 146–160.  
Qin Meng, Liu Xiuyan, Tong Yiting. Does urban sprawl exacerbate haze pollution: An empirical study of fine particles (PM<sub>2.5</sub>) in Chinese cities [J]. *Finance & Trade Economics*, 2016, 37(11): 146–160. (in Chinese)
- [18] Zhang K, Batterman S, Dion F. Vehicle emissions in congestion: Comparison of work zone, rush hour and free-flow conditions [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(11): 1929–1939.
- [19] 马丽梅, 刘生龙, 张晓. 能源结构、交通模式与雾霾污染——基于空间计量模型的研究 [J]. *财贸经济*, 2016, 37(1): 147–160.  
Ma Limei, Liu Shenglong, Zhang Xiao. Study on haze pollution induced by energy structure and transportation: Based on spatial econometric model analysis [J]. *Finance & Trade Economics*, 2016, 37(1): 147–160. (in Chinese)
- [20] 胡志远, 磨文浩, 宋博, 等. 在用国Ⅲ/国Ⅳ/国Ⅴ柴油公交车的颗粒物质量及固态 PM<sub>2.5</sub> 数量排放特性 [J]. *环境科学研究*, 2016, 29(10): 1426–1432.  
Hu Zhiyuan, Mo Wenhao, Song Bo, et al. Emission characteristics of particulate matter mass and quantity of solid PM<sub>2.5</sub> number from in-use China III/IV/V diesel buses [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, 29(10): 1426–1432. (in Chinese)

- [21] 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, (11): 6541–6548.  
Tian Lingdi, Fan Shoubin, Zhang Dongxu, et al. Influence of average speed on vehicle exhaust emissions [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, (11): 6541–6548. (in Chinese)
- [22] Chen Y, Jin G Z, Kumar N, et al. The promise of Beijing: Evaluating the impact of the 2008 Olympic Games on air quality [J]. Journal of Environmental Economics and Management, 2013, 66(3): 424–443.
- [23] 吴孟庭, 李铁柱. 路段公交专用道对车辆燃油消耗与污染物排放的影响分析 [J]. 交通运输工程与信息学报, 2009, (3): 82–90.  
Wu Mengting, Li Tiezhu. Influence analysis of vehicle fuel consumption and exhaust emission on bus lane [J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2009, (3): 82–90. (in Chinese)
- [24] 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.  
Liang Ruobing, Xi Penghui. Heterogeneous effects of rail transit on air pollution: An empirical study with RDID [J]. China Industrial Economics, 2016, (3): 83–98. (in Chinese)
- [25] Kuang Y, Yen B T H, Suprun E, et al. A soft traffic management approach for achieving environmentally sustainable and economically viable outcomes: An Australian case study [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 237: 379–386.
- [26] Mohring H. Optimization and scale economies in urban bus transportation [J]. The American Economic Review, 1972, 62(4): 591–604.
- [27] Yang J, Chen S, Qin P, et al. The effects of subway expansion on traffic conditions: Evidence from Beijing [J]. Journal of Environmental Economics and Management, 2018, 88: 114–133.
- [28] Jerrett M. Atmospheric science: The death toll from air-pollution sources [J]. Nature, 2015, 525(7569): 330–331.
- [29] Lelieveld J, Evans J S, Fnais M, et al. The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale [J]. Nature, 2015, 525(7569): 367–371.
- [30] 郭家瑜, 张英杰, 郑海涛, 等. 北京 2015 年大气细颗粒物的空间分布特征及变化规律 [J]. 环境科学学报, 2017, (7): 4–14.  
Guo Jiayu, Zhang Yingjie, Zheng Haitao, et al. Characteristics of spatial distribution and variations of atmospheric fine particles in Beijing in 2015 [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, (7): 4–14. (in Chinese)
- [31] Chen Z, Wang J N, Ma G X, et al. China tackles the health effects of air pollution [J]. The Lancet, 2013, 382(9909): 1959–1960.
- [32] Ebenstein A, Fan M, Greenstone M, et al. New evidence on the impact of sustained exposure to air pollution on life expectancy from China's Huai River policy [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2017, 114(39): 10384–10389.
- [33] Tian Y, Liu H, Liang T. Ambient air pollution and daily hospital admissions a nation wide study in 218 Chinese cities [J]. Environmental Pollution, 2018, 242: 1042–1049.
- [34] Zheng S, Wang J, Sun C, et al. Air pollution lowers Chinese urbanites' expressed happiness on social media [J]. Nature Human Behaviour, 2019, 3(3): 237–243.
- [35] Maddux J E, Rogers R W. Protection motivation and self-efficacy: A revised theory of fear appeals and attitude change [J]. Journal of Experimental Social Psychology, 1983, 19(5): 469–479.
- [36] Pu S, Shao Z, Fang M, et al. Spatial distribution of the public's risk perception for air pollution: A nationwide study in China [J]. Science of The Total Environment, 2019, 655: 454–462.
- [37] 陈晓红, 徐 戈, 冯项楠, 等. 公众对于“两型社会”建设的态度—意愿—行为分析 [J]. 管理世界, 2016, (12): 90–101.  
Chen Xiaohong, Xu Ge, Feng Xiangnan, et al. Attitude-will-behavior analysis of the construction of “two-oriented society” for publics [J]. Management World, 2016, (12): 90–101. (in Chinese)
- [38] 徐 戈, 冯项楠, 李宜威, 等. 雾霾感知风险与公众应对行为的实证分析 [J]. 管理科学学报, 2017, 20(9): 6–19.  
Xu Ge, Feng Xiangnan, Li Yiwei, et al. Empirical study on the perceived risk of smog and public coping behavior [J]. Journal of Management Sciences in China, 2017, 20(9): 6–19. (in Chinese)
- [39] Enrico M, Matthew N. Pollution, health, and avoidance behavior: Evidence from the ports of Los Angeles [J]. Journal of Human Resources, 2011, 46(1): 154–175.

- [40] Johnson B B. Experience with urban air pollution in paterson, new Jersey and implications for air pollution communication [J]. *Risk Analysis*, 2012, 32(1): 39–53.
- [41] Ward A L S, Beatty T K M. Who responds to air quality alerts? [J]. *Environmental and Resource Economics*, 2016, 65(2): 487–511.
- [42] Xiong L, Li J, Xia T, et al. Risk reduction behaviors regarding PM<sub>2.5</sub> exposure among outdoor exercisers in the Nanjing metropolitan area, China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15(8): 1728–1740.
- [43] 郑思齐, 张晓楠, 宋志达, 等. 空气污染对城市居民户外活动的影响机制: 利用点评网外出就餐数据的实证研究 [J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2016, (1): 89–96.  
Zheng Siqi, Zhang Xiaonan, Song Zhida, et al. Influence of air pollution on urban residents' outdoor activity: Empirical study based on dining-out data from the Dianping website [J]. *Tsinghua Science and Technology*, 2016, (1): 89–96. (in Chinese)
- [44] 刘铁军, 邱大庆, 孙娟. 城市交通拥堵与空气污染相关度的初步研究 [J]. *中国人口资源与环境*, 2017, (S2): 58–60.  
Liu Tiejun, Qiu Daqing, Sun Juan. A preliminary study on correlation between traffic congestion and air pollution [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2017, (S2): 58–60. (in Chinese)
- [45] 蔡旭晖, 张睿, 宋宇, 等. 北京地区大气 PM<sub>10</sub> 和 SO<sub>2</sub> 的背景浓度分析 [J]. *气候与环境研究*, 2004, 9(3): 445–453.  
Cai Xuhui, Zhang Rui, Song Yu, et al. An analysis on background concentration of PM<sub>10</sub> and SO<sub>2</sub> over Beijing area [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2004, 9(3): 445–453. (in Chinese)
- [46] Tang J, Liu F, Wang Y, et al. Uncovering urban human mobility from large scale taxi GPS data [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2015, 438: 140–153.
- [47] Brollo F, Nannicini T, Perotti R, et al. The political resource curse [J]. *American Economic Review*, 2013, 103(5): 1759–1796.
- [48] 席鹏辉, 梁若冰. 空气污染对地方环保投入的影响——基于多断点回归设计 [J]. *统计研究*, 2015, (9): 78–85.  
Xi Penghui, Liang Ruobing. Can air pollution influence the local environmental protection expenditure: Based on the multiple-cutoffs regression discontinuity design [J]. *Statistical Research*, 2015, (9): 78–85. (in Chinese)
- [49] Martinez-Bravo M. The local political economy effects of school construction in Indonesia [J]. *American Economic Journal: Applied Economics*, 2017, 9(2): 256–289.
- [50] Cavalcanti T, Da Mata D, Toscani F. Winning the oil lottery: The impact of natural resource extraction on growth [J]. *Journal of Economic Growth*, 2019, 24(1): 79–115.
- [51] Chen G, Jin X, Yang J. Study on Spatial and Temporal Mobility Pattern of Urban Taxi Services [C] // 2010 IEEE International Conference on Intelligent Systems and Knowledge Engineering, IEEE, 2010: 422–425.
- [52] Kong X, Xia F, Wang J, et al. Time-location-relationship combined service recommendation based on taxi trajectory data [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017, 13(3): 1202–1212.
- [53] Bao J, Liu P, Qin X, et al. Understanding the effects of trip patterns on spatially aggregated crashes with large-scale taxi GPS data [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2018, 120: 281–294.
- [54] Gelman A, Imbens G. Why high-order polynomials should not be used in regression discontinuity designs [J]. *Journal of Business & Economic Statistics*, 2019, 37(3): 447–456.
- [55] Hahn J, Todd P, Van der Klaauw W. Identification and estimation of treatment effects with a regression discontinuity design [J]. *Econometrica*, 2001, 69(1): 201–209.
- [56] McCrary J. Manipulation of the running variable in the regression discontinuity design: A density test [J]. *Journal of Econometrics*, 2008, 142(2): 698–714.
- [57] Lee D S, Lemieux T. Regression discontinuity designs in economics [J]. *Journal of Economic Literature*, 2010, 48(2): 281–355.
- [58] HJ663–2012 环境空气质量指数(AQI)技术规定 [C]. [http://xxgk.changle.gov.cn/XHBJ/201610/t20161008\\_350868.htm](http://xxgk.changle.gov.cn/XHBJ/201610/t20161008_350868.htm).  
HJ663–2012 Technical Requirement of Air Quality Indexes (AQI) [C]. [http://xxgk.changle.gov.cn/XHBJ/201610/t20161008\\_350868.htm](http://xxgk.changle.gov.cn/XHBJ/201610/t20161008_350868.htm) (in Chinese)
- [59] Baron R M, Kenny D A. The moderator-mediator variable distinction in social psychological research: Conceptual, strate-

gic, and statistical considerations [J]. *Journal of Personality and Social Psychology*, 1986, 51(6): 1173–1182.

[60] 温忠麟, 张 雷, 侯杰泰, 等. 中介效应检验程序及其应用 [J]. *心理学报*, 2004, (5): 614–620.

Wen Zhonglin, Zhang Lei, Hou Jietai, et al. Testing and application of the mediating effects [J]. *Acta Psychologica Sinica*, 2004, (5): 614–620. (in Chinese)

[61] Zhao X, Lynch J G, Chen Q. Reconsidering Baron and Kenny: Myths and truths about mediation analysis [J]. *Journal of Consumer Research*, 2010, 37(2): 197–206.

## Study on the interactive mechanism of urban traffic congestion and air pollution: A big data analysis based on DiDi Chuxing

YUAN Yun<sup>1</sup>, XU Ge<sup>2, 3\*</sup>, CHEN Xiao-hong<sup>2, 4</sup>, JIA Jian-min<sup>5, 6</sup>

1. School of Economics and Management, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Institute of Big Data and Internet Innovation, Hunan University of Commerce, Changsha 410205, China;

3. Business School, Hunan University of Technology and Business, Changsha 410205, China;

4. School of Business, Central South University, Resource-conserving & Environment-friendly Society and Ecological Civilization 2011 Collaborative Innovation Center of Hunan Province, Changsha 410083, China;

5. School of Management and Economics, The Chinese University of Hong Kong (Shenzhen), Shenzhen 518172, China;

6. Shenzhen Research Institute of Big Data, Shenzhen 518172, China

**Abstract:** Urban traffic congestion and air pollution bring severe challenges to the sustainable development of Chinese cities. Based on the merge of DiDi's customer ordering data, air quality and climate data in Chengdu, we use regression discontinuity and mediation variable analysis to investigate the interactive mechanism of urban traffic congestion and air pollution. Our results show that the increase of urban traffic flow leads to more air pollution, and mobility efficiency plays a mediation role in such a relation, i. e., the reduction of mobility efficiency or traffic congestion will increase emission and air pollution. On the other hand, air pollution has a positive impact on mobility efficiency which reduces traffic congestion through the mediation effect of traffic flow and demand reduction under air pollution. Based on the new perspective of public mobility behavior, this study sheds light on the relationship between traffic congestion and air pollution, and provides theoretical and empirical evidence to deal with the problems jointly.

**Key words:** urban traffic congestion; air pollution; mobility behavior; DiDi Chuxing; regression discontinuity model; mediation analysis