

中国城市车辆耗能与公共交通效率研究^{*}

林伯强 杜之利

内容提要：城市公共交通的发展为人们出行提供了更有效、更节能的交通方式，但是高效率的城市公共交通系统是否会有效地抑制车辆的能源消费，或者这一抑制效应到底有多大？这是在目前城市公共交通优先发展战略背景下需要明确的一个重要问题。本文试图从城市道路公交的角度，来分析城市道路公共交通的运行效率对城市车辆能源消费的抑制效应。本文利用中国36个中心城市2010—2015年的道路公交运营数据，结合非径向方向距离函数（NDDF）的方法，对不同城市的公交车和出租车的运行效率进行评价。在此基础上，对城市道路公共交通的运行效率对车辆能源消费的抑制效应进行分析。本文还利用IV-GMM方法处理内生性问题，以得到更为合理的估计结果。最后，利用面板门限模型对收入效应带来的影响进行了深入讨论。

关键词：城市公共交通效率 车辆能源消费 非径向方向距离函数

一、引言

（一）汽车产业发展现状

在中国经济飞速发展的今天，城市化水平也随之不断提升，汽车部门作为交通运输业的重要组成部分，也进入了高速增长阶段。2016年中国汽车产销量分别达到了2811.9万辆和2802.8万辆，比上年同期分别增长14.5%和13.7%，产销量连续八年位居世界第一。据公安部交管局统计，截至2016年底，全国汽车保有量达1.94亿辆，其中小型载客汽车1.6亿辆，2016年新注册登记的汽车达2752万辆，保有量净增2212万辆，均为历史最高水平。全国汽车保有量超过百万辆的城市有49个，超过两百万辆的城市多达18个。

随着人们生活水平的不断提高，越来越多的人成为了有车一族，中国私人汽车的数量和比例都在不断扩大。2016年中国私人汽车保有量已经达到1.46亿辆，从2005年的1300万辆上升到1.46亿辆，上涨超过了十倍，并且私人汽车占总的汽车保有量比重也从38%上升到了75%。目前全国平均每百户家庭拥有36辆私家车，成都、深圳、苏州等城市每百户家庭拥有私家车超过70辆，因此本文对于城市车辆的计算主要是指私人汽车。快速发展的汽车部门带来了巨大的能源消费量。根据Lin & Du(2017)的计算，2015年中国汽车的能源消费约占全国能耗的9.4%，并且石油消费所占比重已经超过50%。中国汽车行业正处在飞速发展的时期，即使按照目前每年约2800万辆的增速，汽车保有量激增带来的能源消费也会快速增长。

抑制车辆能源消费的意义首先在于缓解石油对外依存度逐渐扩大的趋势，保障石油安全。到2016年，中国石油消费5.56亿吨，进口量为3.81亿吨，对外依存度超过了68%。汽车能耗作为最主要的石油消费因素，其能源消费量将直接决定中国的石油安全。因此，抑制汽车数量的增长以及汽车能源消费量是缓解中国石油对外依存度扩大，保障石油安全的重要途径。其次，抑制

^{*} 林伯强、杜之利，厦门大学管理学院中国能源政策研究院、能源经济与能源政策协同创新中心，邮政编码：361005，电子邮箱：bqlin@xmu.edu.cn，duzhili620@126.com。本文得到国家社会科学基金重点项目（No. 17AZD013）的支持。作者感谢匿名审稿专家的建设性意见，但文责自负。

汽车能源消费是改善空气环境的重要措施。汽车在行驶时,会排放出碳氢化合物、氮氧化物、一氧化碳、二氧化硫、含铅化合物等污染物,是雾霾形成的重要原因(周峤,2015)。公安部交管局的数据显示,2016年中国新能源汽车保有量为109万辆,其中纯电动汽车保有量74.1万辆,新能源汽车只占到汽车总量的0.56%。因此,抑制汽车能源消费对改善空气质量和缓解雾霾将起到重要的作用。

(二) 城市道路公共交通的发展

广义的公共交通包括民航、铁路、公路、水运等交通方式;狭义的公共交通是指城市范围内定线运营的公共汽车及轨道交通、公共自行车、渡轮、索道等交通方式。如果按照属性来分类,可以分为道路公共交通、轨道公共交通、水上公共交通以及其他公共交通。

城市公共交通系统的重要性不言而喻,它是整个城市经济发展的持久动力,紧密联系了物资的生产、流通,以及人们各方面的生活,保持了城市功能的正常运转,是提升城市综合竞争力的关键。改革开放以来,我国城市公共交通有了较快发展,但同时也浮现出一些问题。人口的持续激增、经济社会的发展与城市化进程的加快,使得大城市的交通状况日益恶化。面对这一困境,如果只是简单的扩路增车是行不通的。

根据《中国交通运输统计年鉴》的数据,截至2015年,全国共有城市公共汽电车辆超过63万标准台,客运量约为765亿人次,运营线路总长度约90万公里;全国快速公交系统运营线路总长度超过3000公里,公交专用车道约8500公里;全国已有25个城市开通了轨道交通线路,运营线路总长度约3200公里,客运量超过140亿人次。2012年12月,《国务院关于城市优先发展公共交通的指导意见》在国家层面进一步确立了城市公共交通优先发展战略;2016年7月,交通运输部印发《城市公共交通“十三五”发展纲要》,提出了“十三五”时期公共交通的发展目标。

相比于私人小型载客汽车,城市公共交通更有效率,这一效率既体现在更多的客运量又表现在更少的能源消费。尤其是交通运输部在十二届人大四次会议上也强调“新能源车的推广和运用和优先发展公共交通是我国城市交通发展过程中一个十分重要,也是优先发展的问题。”因此,未来公交车节油的意义可能愈发凸显,也能够非常有效的缓解石油安全与城市环境问题。并且,汽车保有量增多也带来了日益严重的交通拥堵问题。TomTom公司发布了2016年世界城市拥堵指数报告,^①该报告覆盖了48个国家的城市,拥堵指数前100名中,中国城市占了21个,前20名中国有8个城市入围。抑制汽车能源消费意味着汽车保有量的减少或使用频率的降低,因此城市公共交通优先发展战略有着突出的积极意义。

城市公共交通的发展为人们出行提供了更有效、更节能的交通方式,但是高效率的城市公共交通系统是否会有效的抑制车辆能源消费,或者这一抑制效应到底有多大?这是在目前城市公共交通优先发展战略背景下需要明确的一个重要问题,以便为未来公共交通发展提供决策提供证据支持。基于数据获取性以及私人汽车的相关性,本文试图从城市道路公交的角度,分析城市道路公共交通的运行效率对车辆能耗的抑制效应。本文首先利用中国36个中心城市^②不同类型公交车、出租汽车2010—2015年的运营数据,结合非径向方向距离函数(NDDF)的方法,对不同城市的公交车和出租车的运行效率进行评价。其次,我们对各城市私人小型载客汽车的能源消费进行计算,并在此基础上对城市道路公共交通的运行效率对车辆能耗的抑制效应进行分析。再次,利用IV-GMM方法处理内生性问题,得到更为合理的估计结果。最后利用面板门限模型对收入效应带来的影响进行深入讨论。

^① https://www.tomtom.com/en_gb/trafficindex/list?citySize=LARGE&continent=ALL&country=CN.

^② 全国36个中心城市包括各省省会、直辖市以及5个计划单列市(大连、宁波、青岛、深圳及厦门)。

二、文献综述

(一) 城市公共交通效率

数据包络分析(DEA) 的方法在公共交通效率评价中的应用较为广泛。Nooreha et al. (2000) 使用 DEA 方法对马来西亚雪兰莪道路交通部门的效率进行了评价。刘云枫和王楠(2015) 将从业人数、运营车辆数和运营线路长度作为投入指标, 将出行分担率、年客运量作为产出指标, 使用 DEA-Malmquist 指数方法, 对北京市 2007—2013 年公共交通行业的效率进行了实证研究, 发现北京市公共交通行业效率进步的主要原因是技术进步。李磊和姚璇宇(2015) 使用 DEA-Tobit 二阶段方法测算了中国各省份公共交通效率, 并分析了公共交通效率的影响因素。张竞轶和张竞成(2016) 使用三阶段 DEA 模型, 对中国各地区物流行业的效率进行了综合评价。随机前沿分析(SFA) 也在公共交通效率评价中得到广泛的应用。Sami et al. (2013) 使用 SFA 方法, 基于企业层面的微观数据测算了道路公共交通系统的效率, 发现企业规模对公共交通系统效率有较为显著的影响。从方法的角度上来看, 参数的随机前沿方法和非参的数据包络分析方法各有优劣, 因此一些文献同时使用两种方法来进行效率评价, 两种方法得到的结果也可以进行稳健性检验。朱伟权等(2013) 使用 DEA 和 SFA 构建了两阶段的分析方法, 从微观层面通过引入表征影响公交线路绩效的外部营运环境指标构建了绩效评价体系。还有一些文献使用最小费用流(MCF) 方法对公共交通系统的效率进行评价。Terelius & Johansson(2015) 使用这一方法估算了纽约市出租车行业的效率水平, 类似的研究还有 Aggarwal et al. (1993) 。

(二) 汽车能源消费

Eom & Schipper(2010) 、Schipper et al. (2000) 认为交通运输活动、交通运输工具的构成、每种交通运输方式的能源强度三方面影响整体交通运输的能耗。这两种观点都表明了汽车保有量、汽车使用频率、交通运输方式的构成以及燃料强度是交通能耗的决定因素。其中, 由于收入的增长, 汽车保有量也会随之增长(Chemin, 2009; Dargay et al., 2007) , 汽车的保有量会随着经济的发展而进入不同的发展阶段。Dargay et al. (2007) 利用 1960—2002 年世界 45 个国家(地区) 的面板数据进行实证研究, 发现汽车数量的增速与收入呈倒 U 型关系。经济增长也会通过影响货物运输和旅行的目的来影响客流量。EEA(2008) 通过 27 个欧盟国家的样本发现在经济增长和货物运输活动之间有非常显著的正向作用。

除了经济方面的因素, 交通运输活动和能耗也会受到人口增长和城市化的影响。一个国家人口规模越大, 交通需求量就越大(Chemin, 2009) 。人口增长是交通需求的驱动因素之一(Schäfer, 2006; Scholl et al., 1996) 。Rodrigue et al. (2006) 研究说明, 当一个国家地区人口规模越大的时候, 它的交通运输需求就越高, 进而引起能源需求的增加。除此之外, 还有学者讨论了产业结构对于交通运输能耗的影响, 交通运输与工业、商业活动有着密切的关系。EEA(2008) 研究表明, 制造业对运输有显著的正向影响, 而旅游、商业及教育活动都会增加交通运输的能源消费。Phetkeo et al. (2012) 通过实证研究也证明了, 三产业比重对交通运输能耗有显著的促进作用。

综合来看, 目前对于城市公共交通效率的研究主要有两个改进方向, 一是, 已有研究主要集中在某一特定地区, 缺少多区域效率的横向比较。二是, 已有研究使用的方法集中在基础的 DEA 模型。在此基础上, 本文利用了中国 36 个中心城市 2010—2015 年的数据, 测算了不同城市道路公交系统的运行效率。而且, 本文加入了拥堵指标作为非期望产出, 丰富了之前效率指标的内涵和维度。而在汽车能源消费的影响因素方面, 目前还缺少对公共交通效率与车辆能源消费关系的讨论, 这也是本文的一个重要贡献。在此基础上, 本文对二者之间的内生性加以讨论, 对模型进行更为合理的估计, 并且利用 Caner & Hansen (2008) 的方法, 克服门槛模型中含有内生变量的问题, 进一步对收入效应的影响进行分析。

三、城市道路公交效率的测算

(一) 研究方法

Zhang et al. (2014) 综合了 Sueyoshi(2011) 和 Zhou(2012) 的方法, 提出了全要素非径向方向距离函数, 并得到了 UEI(unified efficiency index) 综合效率指标。该方法在构建效率指标时不仅考虑了单一要素的效率, 而是综合考虑了所有投入产出要素的效率。本文借鉴 Zhang et al. (2014) 的方法, 使用全要素非径向方向距离函数(TNDDF) 方法, 构建城市公交车和出租车的全效率指标, 对城市道路公交效率进行测定。

假设投入变量 K, L, E 能获得期望产出 Y 以及非期望产出 C , 定义一个闭集并且有限投入只能生产有限产出的技术 T 根据 Färe et al. (2007), T 需要满足弱可处置性和零结合性两个条件。弱可处置性意味着非期望产出 C 减少的同时期望产出 Y 也会减少; 而零结合性代表生产过程一定会产生非期望产出 C 。如果有 N 个决策单元, 可以描述生产技术集如下:

$$T = \{ (K, L, E, Y, C) : (K, L, E) \text{ 可以生产 } (Y, C) \} \quad (1)$$

$$\sum_{n=1}^N \gamma_n^* K_n \leq K, \sum_{n=1}^N \gamma_n^* L_n \leq L, \sum_{n=1}^N \gamma_n^* E_n \leq E,$$

$$\sum_{n=1}^N \gamma_n^* Y_n \geq Y, \sum_{n=1}^N \gamma_n^* C_n = C,$$

$$n = 1, 2, \dots, N$$

其中 γ_n 是一个强度变量, 通过一个凸组合, 用来构建环境生产技术集。此后, 我们用非径向距离函数(NDDF) 来估算具体的效率值。

由于非径向方向距离函数(NDDF) 方法在效率度量方面可以克服径向假设约束的局限性, 因而得到广泛应用(Chang & Hu, 2010; Choi et al., 2012; Zhang & Choi, 2013)。本文参照 Lin & Du (2014) 给出 NDDF 的定义:

$$\vec{D}(K, L, E, Y, C; g) = \sup\{ \Psi^T \eta : (K, L, E, Y, C) + \text{diag}(\eta) * g \in \Omega \} \quad (2)$$

其中 $\psi = (\psi_K, \psi_L, \psi_E, \psi_Y, \psi_C)^T$ 是一个指派给生产系统中投入要素和产出的标准化权重变量; $\eta = (\eta_K, \eta_L, \eta_E, \eta_Y, \eta_C)^T$ 是代表各个变量的缩放系数, $g = (g_K, g_L, g_E, g_Y, g_C)^T$ 是一个显性的方向向量。

本文将城市道路公交运行的投入要素、期望产出和非期望产出的无效率都纳入到目标函数中, 从而可以在全要素框架下测量城市道路公交的综合效率。本文定义全要素非径向距离函数(TANDDF) 为 $\vec{D}(K, L, E, Y, C; g)$, 通过求解 DEA 模型来计算:

$$\vec{D}(K, L, E, Y, C; g) = \max \psi_K \eta_K + \psi_L \eta_L + \psi_E \eta_E + \psi_Y \eta_Y + \psi_C \eta_C \quad (3)$$

$$\text{s. t. } \sum_{n=1}^N \gamma_n K_n \leq K - \eta_K g_K,$$

$$\sum_{n=1}^N \gamma_n L_n \leq L - \eta_L g_L,$$

$$\sum_{n=1}^N \gamma_n E_n \leq E - \eta_E g_E,$$

$$\sum_{n=1}^N \gamma_n Y_n \geq Y + \eta_Y g_Y,$$

$$\sum_{n=1}^N \gamma_n C_n = C - \eta_C g_C,$$

$$n = 1, 2, \dots, N$$

$$\eta_K, \eta_L, \eta_E, \eta_Y, \eta_C \geq 0$$

根据 Zhang et al. (2014) 提出的 UEI(unified efficiency index) 综合效率指标, 构建所有投入产出要素测算的城市道路公交综合效率指标, 其中权重向量的选取为 (1/9, 1/9, 1/9, 1/3, 1/3)。权重向量的选取基于如下考虑: 首先, 假设投入、期望产出以及非期望产出是同等重要的, 并且每种投入

之间的重要性也无差别。另外,根据 Zhou et al. (2012)、Barros et al. (2011) 以及 Zhang et al. (2014) 的研究,如果没有明确的划分依据,可以将各个投入指标进行平均处理。

综合上述考虑,我们对每个生产决策单元定义其综合效率指数 UEI,假设 $\eta = (\eta_K^* \ \eta_L^* \ \eta_E^* \ \eta_Y^* \ \eta_C^*)^T$ 表示方程的求解值,则 UEI 可以表示为:

$$\begin{aligned}
 UEI &= \frac{\frac{1}{4} [(1 - \eta_K^*) + (1 - \eta_L^*) + (1 - \eta_E^*) + (1 - \eta_C^*)]}{1 + \eta_Y^*} \\
 &= \frac{1 - \frac{1}{4} (\eta_K^* + \eta_L^* + \eta_E^* + \eta_C^*)}{1 + \eta_Y^*} \quad (4)
 \end{aligned}$$

UEI 反映了每个生产决策单元的产出效率和投入要素利用率的综合情况。UEI 取值范围是从 0 到 1,其取值越大代表决策单元的效率越高。

(二) 指标选择与数据

前文提到,城市道路公交系统主要由公交车和出租车组成,本文分别测算了各城市公交车和出租车的运行效率。对于公交车来说,投入变量分别为公交车运营数量、从业人员数量以及公交线路里程,其中公交车数量包括空调车、安装卫星定位车、快速公交车以及其他公交车,不同类型车辆按照《中国交通运输统计年鉴》的系数折算成标准运营车数。出租车方面,投入变量为出租车运营数量、从业人员数量以及出租车运营里程。两者的期望产出分别为公交车和出租车的客运量,本文选取了二者对道路资源的空间抢占作为拥堵指标,来刻画非期望产出。具体的计算公式如下:

$$C_n = \frac{\gamma_n \times VN_n \times LL_n}{RS}, \quad n = i, j \quad (5)$$

其中 C_n 表示拥堵指数, VN 表示运营车数量, LL 表示运营里程, RS 表示城市道路面积,而 γ_i 和 γ_j 分别表示公交车和出租车的的影响系数。根据冉伟和张晓星 (2014) 的研究,一辆公交车的占路面积约比普通小型载客汽车的四倍,因此 γ_i 和 γ_j 分别取 4 和 1。计算结果如图 1 所示。

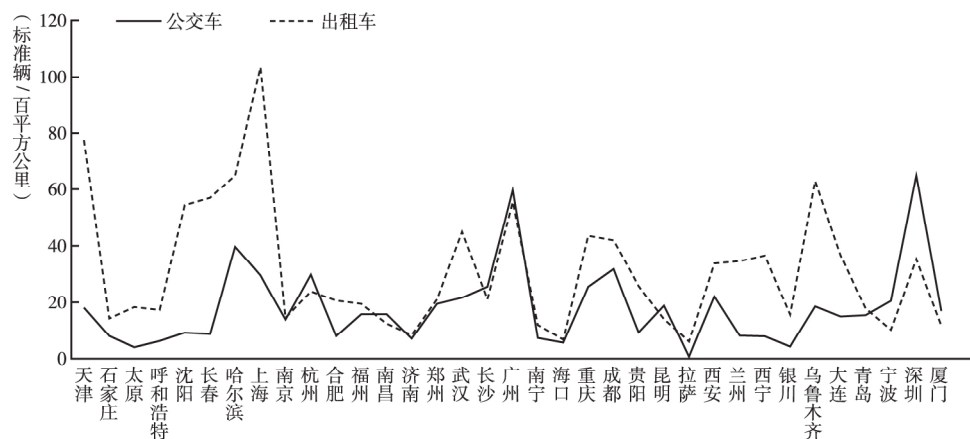


图 1 2015 年各城市公交车与出租车拥堵指数

注:本部分所采用的 36 个中心城市的运营车辆数量、从业人员数、公交线路里程、运营里程以及客运量的数据均来自于 2010—2015 年的《中国交通运输统计年鉴》,城市道路面积数据来自于 CEIC 数据库。

从图 1 中可以看到,绝大多数城市的出租车拥堵指数更高,说明出租车挤占了更多的道路资源,这主要是出租车的运营里程要远大于公交车。另外为了使图示更为清晰,图 1 去掉了数值过大的样本北京。2015 年北京公交车和出租车的拥堵指数分别为 182 和 402,远大于其他城市。并且,能够看到城市道路公交拥堵指数最高的几个城市分别为北京、天津、上海、广州、重庆,这些是中国

汽车和人口最为密集的城市,因此也导致了道路资源的相对不足。

(三) 效率测算结果

根据前文提到的全要素非径向方向距离函数,我们分别构建了36个中心城市的公交车和出租车运行效率指标 *BUEI* 和 *TUEI*。本文中效率的测算为全局指标,因此可以在时间层面进行比较。如图2所示,2015年的公交车效率和出租车效率都比2010年有所提高,但是公交效率的提升并不明显。并且,2015年公交车和出租车的平均效率分别为0.56和0.62,仍然比较低,说明城市道路公交的运行效率仍有很大的发展空间。

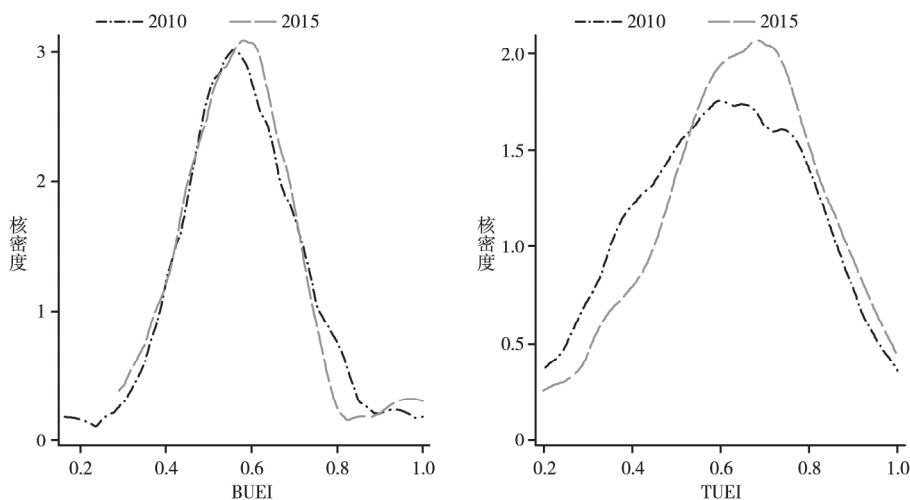


图2 城市公交车与出租车运行效率核密度

从36个城市横向比较的结果来看,在公交车效率方面,北京、上海、南京、宁波几个城市排在最末,平均效率仅有0.38左右。除了自身运营和规划方面的问题外,客观条件上,几个城市都拥有轨道交通,会对公交选择进行有力的替代。但是另一方面,深圳2015年的公交车效率排在第四位,仅排在兰州、海口、哈尔滨之后,并且深圳早在2004年就开通了轨道交通,汽车保有量已经超过300万辆。从图2也可以看到,深圳是少有的几个公交挤占道路资源超过出租车的城市之一。作为全国首个“公交示范”城市,深圳在城市公交发展方面做出了极大的努力。在提高公交覆盖率的同时,积极扩建公交专用通道。2015年深圳的公交专用通道已经达到了820公里,公交专用道设置率为6.5%。同时,深圳更科学地规划了公交的运行线路,在道路拥堵不断加剧的情况下,深圳的常规公交高峰车速稳步提升,从2010年的15.9公里/小时提高到20.2公里/小时,提高了27%,人均公交出行时间也较2010年的38分钟节省了6.8分钟。此外,南昌、大连、沈阳的公交效率排名也非常靠前,三者也都是拥有轨道交通的城市。在出租车运行效率方面,北京、上海都排在末端,而排名第一的城市是拉萨。拉萨的出租车数量较少,2015年仅有1600余辆,但是客运量却非常大,一个可能的解释是,拉萨旅游业较为发达,直接带动了出租车效率的提升。相比之下,拉萨的公交车效率仅有0.59,略高于平均水准。

综合来看,轨道交通、汽车保有量以及投入量都不是影响城市道路公交效率最直观的理由,良好的规划、配套设施以及乘坐体验对效率的影响更为主要。

四、城市道路公交效率对车辆能源消费的影响

基于上文测算的城市道路公交效率代表了一定的投入下产生更多的客运量并挤占更少的道路资源。但实际上,效率指标蕴含了更丰富的内涵意义。正如前文对深圳公交效率的分析,城市道路

公共交通效率的提高意味着城市公交规划更为合理,覆盖率更高,线路设计更加科学。并且,配套设施完善,提高车辆运行速度,节省出行时间,从而为居民带来更好的出行体验。这些内涵意义都可能导致人们出行倾向的改变,从而减少车辆的购买或使用,进而减少能源消费。本文正是基于这样的考虑,在这部分分析城市道路公交效率对车辆能源消费的影响。

(一) 模型设定和数据选取

为分析城市道路公交效率对车辆能源消费的影响,构建模型如下:

$$E_{i,t} = \alpha + \beta_1 \times BUEI_{i,t} + \beta_2 \times TUEI_{i,t} + \sum_{j=1}^m \gamma_j X_{i,t}^j + \mu_i + \varepsilon_{i,t} \quad (6)$$

其中 $E_{i,t}$ 表示 i 地区 t 年的车辆能源消费; $BUEI$ 和 $TUEI$ 分别表示城市公交车效率和出租车效率指标; X^j 表示第 j 种控制变量,模型共有 m 个控制变量; μ_i 表示不随时间改变的个体固定效应,本文由于面板时间序列较短,并没有考虑时间效应; $\varepsilon_{i,t}$ 代表误差项。

为刻画车辆能源消费的变化,根据 Lin & Du (2017),本文的控制变量选择包括城市人口数量 (p),人均收入 (inc),城市道路里程 (rd),并引入是否汽车限购 (res) 的虚拟变量来描述政策冲击以及是否开通轨道交通 ($rail$) 来考察其对汽车能源消费的影响。为降低数据量纲和异方差的影响,所有绝对数值的变量采用对数形式进行回归。

在数据选取方面,本文对于汽车能源消费的估算借鉴贾顺平等(2010)的方法。在《中国统计年鉴》的数据中,统计了各种类型车辆数目,具体分类为:大型、中型、小型、微型客车,重型、中型、轻型、微型货车以及其他车辆。由于与城市道路公交密切相关的实际上是私人汽车的概念,因此本文所定义的车辆是私人小微型载客汽车。

Lin & Du (2017) 也采用这一方法计算了 2003—2013 年中国部分城市的汽车能源消费。但是该计算采用静态数据会造成汽车能源消费的高估,一方面忽略了汽车燃油效率提升以这一事实;另一方面,随着汽车保有量的提高,车辆年平均行驶里程会有下降的趋势。根据工信部数据显示,中国小型客车平均油耗已经从 2013 年的 7.33 升/百公里下降到 7.04 升/百公里,燃油效率年均提高 2%。根据这一设定,我们调整了历年的平均油耗,来刻画技术进步带来的燃油效率的提升。在平均行驶里程方面, Huo et al. (2007) 对中小客车从 2008 年到 2015 年的增长有明确的设定,并按照设定的增长率对其他年份进行推算。按照这一计算办法,我们计算了 36 个中心城市 2010 年到 2015 年的汽车能源消费。城市人口数量选取城市常住人口,人均收入通过城市实际 GDP 除以人口数得到,所有数据均来自于 CEIC 数据库。本文选取主要变量的统计特征如表 1 所示。

表 1 主要变量统计特征

| 变量 | 均值 | 标准差 | 最小值 | 最大值 | 样本量 |
|--------|--------|--------|--------|--------|-----|
| E | 104.2 | 90.41 | 5.520 | 446.8 | 216 |
| p | 8553 | 5991 | 504 | 30000 | 216 |
| rd | 15000 | 19000 | 1617 | 130000 | 216 |
| inc | 0.0650 | 0.0230 | 0.0260 | 0.133 | 216 |
| res | 0.134 | 0.342 | 0 | 1 | 216 |
| $rail$ | 0.435 | 0.497 | 0 | 1 | 216 |

(二) 模型结果与内生性的讨论

1. 基本模型估计结果

本文利用 36 个中心城市 2010—2015 年的数据,由于数据时间较短,截面较多,因而采用个体固定效应的面板模型对公式 6 进行估计,具体结果如表 2 所示。

表2 固定效应模型估计结果

| 变量 | (1) <i>LnE</i> | (2) <i>LnE</i> | (3) <i>LnE</i> | (4) <i>LnE</i> | (5) <i>LnE</i> | (6) <i>LnE</i> |
|--------------|---------------------|----------------------|-----------------------|---------------------|----------------------|-----------------------|
| <i>BUEI</i> | -0.502** (0.247) | -0.327*** (0.106) | -0.313*** (0.103) | -0.496** (0.246) | -0.326*** (0.106) | -0.312*** (0.103) |
| <i>TUEI</i> | 0.206 (0.278) | 0.223 (0.117) | 0.017 (0.113) | | | |
| <i>lninc</i> | | 1.312*** (0.072) | 1.354*** (0.074) | | 1.313*** (0.072) | 1.354*** (0.074) |
| <i>lnp</i> | | 1.563*** (0.409) | 1.856*** (0.402) | | 1.566*** (0.407) | 1.858*** (0.400) |
| <i>lnrd</i> | | 0.323** (0.164) | 0.245 (0.159) | | 0.323** (0.163) | 0.244 (0.159) |
| <i>res</i> | | | -0.195*** (0.051) | | | -0.195*** (0.051) |
| <i>rail</i> | | | 0.029 (0.043) | | | 0.029 (0.043) |
| 常数项 | 4.453*** (0.225) | -8.619*** (3.222) | -10.340*** (3.142) | 4.579*** (0.145) | -8.633*** (3.213) | -10.352*** (3.132) |
| 样本量 | 216 | 216 | 216 | 216 | 216 | 216 |

注: *、**、***分别代表在10%、5%以及1%水平上显著 括号内为相应的标准误。下表同。

模型(1)、(2)、(3)是将公交车和出租车效率同时纳入到模型中,而模型(4)、(5)、(6)仅考虑公交车效率的影响。模型(1)和模型(4)仅包含城市道路交通效率指标;模型(2)和模型(5)分别加入了人均收入、人口以及道路里程作为控制变量;在此基础上,模型(3)和模型(6)又加入了限购政策和是否开通轨道交通两个虚拟变量。

从结果中可以看到,出租车效率的系数非常小,并且在三个模型中均不显著,说明作为城市道路公共交通的子系统,出租车的效率对汽车能源消费的影响不大,这与我们之前的判断不同。究其原因,出租车在城市公共交通系统的组成中,定位是辅助公交,其最重要的意义是快速、便捷,并且很好地解决了“最后一公里”问题。另一方面,出租车的乘坐价格相对昂贵,基本上不会成为居民常备的出行方式,因此出租车的出行比率较低。在36个城市样本中,出租车占全部城市公交出行(包括公交、出租车、地铁)的平均比例仅为24%,远低于公交车70%的平均出行率。出租车主要是作为弥补公交车不足而存在的,二者优势互补才构成了相对完整的道路公交系统。因而城市出租车的发展虽然不能减少汽车能源消费,但是从满足人们生活需求多样性的角度来看,它也是城市道路公交系统必不可少的一环。因而在本文接下来的分析中,将着重分析公交车效率的影响。

在全部模型中,城市公交车的运行效率对汽车能源消费的影响都显著为负,这和我们的预期相吻合,说明城市公交效率的提高可以有效抑制汽车能源消费的增长。从几个控制变量的估计结果来看,人口以及人均收入仍然是影响汽车部门能源消费最重要的因素。随着人口的增长以及人均收入的增加,汽车保有量也会随之增加。另外,公路里程只有在模型(2)和(5)中显著,这也与Lin & Du(2017)的结论相同。从两个虚拟变量的估计结果来看,限购政策均在1%的显著性下显著,目前限购政策的城市有上海、北京、贵阳、广州、石家庄、天津和杭州,尽管各地的具体政策措施不同,但这一政策对车辆能耗的抑制效果十分明显。此外,是否开通轨道交通的虚拟变量在两个模型中系数非常小,且均不显著,这主要是因为,在本文样本中,从2010年开始就已经开通轨道交通的城市仅有7个,还有几个城市是最近两年才开始通车。另一方面,从样本数据来看,轨道交通过于

集中 2015 年北京、上海两地的轨道里程占全部样本的 38% ,如果加上广州 ,三个城市的轨道里程所占比重接近一半。这就导致对于大多数城市来说 ,轨道交通的出行率比重非常低 ,样本中 2015 年已经开通轨道交通的 21 个城市 ,轨道交通出行率仅有 16% ,如果不计算北上广三个城市 ,则出行率尚不足 12% 。因此 ,现有样本数据并不能准确说明轨道交通对车辆能源消费的影响。

2. 内生性的讨论

汽车与城市公共交通作为不同的出行选择方式 ,二者之间具有直接的替代效应 ,这就有可能导致内生性问题。尤其对于城市公交车来说 ,如果汽车保有量上升 ,人们在平时的出行选择上 ,可能会更倾向于自己开车 ,进而影响公交客运量。而作为辅助公交的出租车可能替代作用并不明显。

为验证这一猜想 ,本文分别将城市公交车和出租车的效率作为因变量 ,将汽车能源消费作为自变量 ,利用 Tobit 模型进行简单回归 ,结果发现汽车能源消费对城市公交车效率有负向影响 ,且系数在 1% 的显著性水平下显著;而对出租车效率的影响并不显著。因此 ,有必要讨论上一部分模型的内生性问题 ,重新衡量公交车效率与汽车能源消费的关系。

本文采用工具变量法来解决内生性 ,如果面板数据存在自相关与异方差 ,两阶段最小二乘法 (2SLS) 估计结果可能会产生偏误 ,而采用广义矩估计 (GMM) 比 2SLS 更有效。在工具变量的选取上 ,我们首先考虑私人交通能源消费会影响当期的公交车效率 ,但是无法影响上一期的效率 ,因此选取城市公交效率的滞后一阶作为工具变量。另外 ,根据李磊和姚璇宇 (2015) 的研究 ,城市公交效率会受到城市道路面积影响 ,因此本文同时将城市道路面积纳入工具变量的选择。具体结果如表 3 所示。

表 3 IV-GMM 估计结果

| 变量 | (1) <i>LnE</i> | (2) <i>LnE</i> | (3) <i>LnE</i> | (4) <i>LnE</i> |
|-------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <i>BUEI</i> | -0.326 *** (0.106) | -0.312 *** (0.103) | -1.238 *** (0.479) | -1.238 *** (0.478) |
| <i>lninc</i> | 1.313 *** (0.072) | 1.354 *** (0.074) | 1.148 *** (0.169) | 1.162 *** (0.717) |
| <i>lnp</i> | 1.566 *** (0.407) | 1.858 *** (0.400) | 0.981 (0.708) | 1.289* (0.717) |
| <i>lnrd</i> | 0.323 ** (0.163) | 0.244 (0.159) | 0.621* (0.354) | 0.628* (0.354) |
| <i>res</i> | | -0.195 *** (0.051) | | -0.132 ** (0.068) |
| <i>rail</i> | | 0.029 (0.043) | | -0.014 (0.056) |
| Davidson-MacKinnon 检验 | | | 0.007 | 0.007 |
| under identification 检验 | | | 0.003 | 0.004 |
| weak identification 检验 | | | 5.951 | 5.742 |
| Sargan 统计量 | | | 0.197 | 0.170 |
| 样本量 | 216 | 216 | 180 | 180 |

注: Davidson-MacKinnon 检验、Under identification 检验、Sargan 统计量分别提供检验的 p 值 ,Weak identification 检验为 F 统计量。下表同。

模型(1)和(2)是不考虑内生性的面板固定效应模型,而模型(3)和(4)是将公交车效率滞后一期和城市道路面积作为工具变量的估计结果。经过Davidson-MacKinnon检验可以看到,p值仅为0.007,强烈拒绝了原模型无内生性的假设。并且经过检验,工具变量不存在识别不足、过度识别以及弱工具变量的问题。从估计结果来看,公交车效率对车辆能耗的影响仍然高度显著,并且系数更大,说明在不考虑内生性的情况下,会低估城市公交效率对汽车能源消费的抑制作用。另外,在考虑内生性后,道路里程均显著,也进一步修正了前文的结果。

3. 稳健性检验

由于公交车效率指标的选取存在主观性,从而可能会造成结果的差异。因此本文将投入变量中的公交线路里程换成公交车站数量,重新进行效率评价,作为稳健性检验,所得结果如表4所示。

表4 稳健性检验

| 变量 | (1) <i>LnE</i> | (2) <i>LnE</i> | (3) <i>LnE</i> | (4) <i>LnE</i> |
|-------------------------|----------------------|----------------------|---------------------|---------------------|
| <i>BUEI2</i> | -0.305*** (0.114) | -0.271** (0.111) | -0.767** (0.300) | -0.727** (0.293) |
| <i>lninc</i> | 1.305*** (0.072) | 1.343*** (0.075) | 1.225*** (0.136) | 1.236*** (0.135) |
| <i>lnp</i> | 1.454*** (0.423) | 1.768*** (0.418) | 0.584 (0.634) | 0.878 (0.639) |
| <i>lnrd</i> | 0.356** (0.168) | 0.269 (0.164) | 0.547* (0.301) | 0.521* (0.295) |
| <i>res</i> | | -0.189*** (0.051) | | -0.112* (0.058) |
| <i>rail</i> | | 0.035 (0.043) | | -0.010 (0.046) |
| Davidson-MacKinnon 检验 | | | 0.039 | 0.047 |
| under identification 检验 | | | 0.000 | 0.000 |
| weak identification 检验 | | | 13.710 | 13.644 |
| Sargan 统计量 | | | 0.022 | 0.014 |
| 样本量 | 216 | 216 | 180 | 180 |

从稳健性检验的结果来看,结果同之前十分相似。可以看到,公交效率变量都在5%的水平上显著,说明城市公交车的效率提高对车辆能耗有显著的抑制作用。

五、收入效应的进一步讨论

我国各地区尤其是东西地区之间人均收入差异较为明显。样本中,2015年人均GDP最高的深圳(13.34万元)是最低的南宁(4.27万元)的3.13倍,如果忽略差异,仅仅在截面与时间上给出平均影响系数,显然不能客观的刻画现实情况。如果在回归中,随着收入的改变存在结构变化点,那我们只要找到这一结构变化点,并对不同区间下的样本分别估计,就能使回归结果更好的描述现实状况,从而能更好的理解城市道路公交化对汽车能源消费的影响。本文采用Hansen

(1999) 提出的门限回归方法来分析这一问题。对于面板数据, Hansen 提出的固定效应门限回归模型为:

$$y_{it} = \beta_1 x_{it} \times I(q_{it} \leq \gamma) + \beta_2 x_{it} \times I(q_{it} > \gamma) + \mu_i + \epsilon_{it} \quad (7)$$

其中 q_{it} 为门限变量, γ 为待估门限值, 假设 x_{it} 为外生变量, 与扰动项 ϵ_{it} 不相关, μ_i 为个体截距项。但同时 Hansen 也指出, 如果解释变量具有内生性, 则原门限回归模型估计的系数将产生偏误。

为解决这一缺陷, Caner & Hansen(2008) 提出了一种解决核心解释变量为内生变量的门限估计方法, 该模型要求核心解释变量可以为内生变量, 但是门限变量需严格外生于因变量。它的基本思想是: 首先利用外生变量对内生的核心解释变量进行估计; 然后将拟合值带入到门限模型中, 来估计门限值; 最后按照门限值取样本子集, 利用 2SLS 或 GMM 方法对系数进行估计。王华(2011) 利用该方法分析了知识产权对技术创新的门槛效应。

根据 Caner & Hansen(2008) 的方法, 本文以人均 GDP 作为门限变量, 利用 IV-GMM 方法对上文模型进行回归, 回归结果如表 5 所示。

表 5 门限回归估计结果

| 变量 | (FE) LnE | ($lnc < -2.79$) LnE | ($lnc > -2.79$) LnE |
|--------------|----------------------|--------------------------|--------------------------|
| <i>BUEI</i> | -1.238*** (0.478) | -1.739** (0.790) | 0.267 (0.787) |
| <i>lninc</i> | 1.162*** (0.717) | 0.963*** (0.963) | 1.950*** (0.453) |
| <i>lnp</i> | 1.289* (0.717) | 1.257 (1.346) | -1.205 (1.477) |
| <i>lnrd</i> | 0.628* (0.354) | 1.319* (0.683) | 0.395 (0.613) |
| <i>res</i> | -0.132** (0.068) | -0.202 (0.165) | -0.100* (0.060) |
| <i>rail</i> | -0.014 (0.056) | -0.136 (0.123) | 0.047 (0.062) |
| 样本量 | 180 | 83 | 79 |

我们得到的单门限值是 -2.799, 因此可以将样本分为两个区间。为了比较, 表 5 中第一列给出了固定效应的回归结果, 后两列为单门限回归结果。经过检验, 单门限时 bootstrap 得到的 p 值在 1% 的水平下拒绝了不存在门限的原假设, 可以认为本文对于门限模型的设定是合理的。

通过门限回归得到了人均收入的门限值, 经过计算收入门限人均 GDP 为 6.1 万元。从回归结果可以看到, 收入差异下城市道路公交效率对车辆能源消费的影响呈逐渐上升的态势。即对于人均收入较低的城市来说, 道路公交效率的提升对于抑制车辆能源消费的作用更强。造成这种现象的原因可以从两方面来解释。首先, 价格低廉是城市道路公交非常重要的一个吸引点, 而作为一种基础的消费品, 城市道路公交的收入弹性显然是小于 1 的, 因而随着收入的提高, 城市公交的价格优势会逐渐削弱, 因而导致抑制效应逐渐减小。此外, 这一作用机制可能是通过汽车保有量来传导的, 一般情况下, 平均收入低的城市, 汽车绝对数量以及人均保有量都会较低。Dargay(2007) 发现汽车增速与收入呈倒 U 型关系, 当收入水平处在低点时, 汽车保

有量增长率很低,但增长率会随着收入的增加而提高,在达到一定高度后又开始下降。当汽车数量趋近饱和时,收入的增加使人们选择更好的交通工具而不是拥有更多。结合中国城市现状来看,中国每百人汽车保有量不足15辆,远低于世界发达国家。即使像北京这样汽车保有量超过500万辆的城市,百人汽车拥有量也不足25辆。因此,中国汽车保有量仍然处在较低水平。而对于人均收入较高的城市来说,人们对汽车的需求会更大,保有量在高速扩张阶段,因此城市公交效率的提升对汽车能源消费影响较小。而对于收入较低的城市来说,收入水平处在低点时,汽车保有量增长率很低,因此城市道路公交效率的抑制作用会更突出。因此,可能会有这样的猜想,即随着人们收入的逐步提高,汽车保有量达到倒U型拐点之后,城市公交效率的抑制作用会不断放大。

由于不同收入区间导致城市道路公交效率对车辆能耗弹性不同,因而了解我国各城市的现状就十分重要。从2015年的数据看,样本中人均GDP低于6.1万元的城市还有11个,绝大部分均为西部城市。由于我们的样本选择为31个省会城市和5个副省级单列市,因此样本的人均收入水平较高,按照2010年为基年,中国人均GDP尚不足4.5万元,距离6.1万元的门限值仍有较大距离。因此,从全国范围看,对绝大多数城市来说,提高城市道路公交效率对抑制车辆能耗都有非常显著的效果,因此积极推广公交先行战略具有重要和积极的现实意义。

五、结论与政策建议

本文利用中国36个中心城市2010—2015年的道路公交系统运营数据,结合非径向方向距离函数(NDDF)的方法,对不同城市的公交车和出租车的运行效率进行评价。其次,我们对各城市私人小型载客汽车的能源消费进行计算,并在此基础上,对城市道路公共交通的运行效率对汽车能源消费的抑制效应进行分析。同时,利用IV-GMM方法处理内生性问题,得到更为合理的估计结果。最后利用面板门限模型对收入效应带来的影响进行深入讨论。

基于前文的分析,我们得出以下主要结论:

首先,2015年的公交车效率和出租车效率都比2010年有所提高,但是公交效率的提升并不明显。并且,2015年公交车和出租车的平均效率分别为0.56和0.62,仍然比较低,说明城市道路公交的运行效率仍有很大的发展空间。从36个城市横向比较的结果来看,轨道交通、汽车保有量以及投入量都不是影响城市道路公交效率最直观的理由,良好的规划、配套设施以及乘坐体验对效率的影响更为主要。

其次,城市公交车的运行效率对车辆能耗的影响显著为负,这和我们的预期相吻合,说明城市公交效率的提高可以有效的抑制车辆能源消费的增长。此外,出租车效率的系数非常小且不显著,说明作为城市道路公共交通的子系统,出租车的效率对车辆能耗的影响不大。产生这一结果的主要原因在于出租车在城市公共交通系统中的角色定位是辅助公交,并且出行率比重较低也是重要原因。从控制变量的估计结果来看,人口以及人均收入仍然是影响汽车部门能源消费最重要的因素。随着人口的增长以及人均收入的增加,汽车保有量也会随之增加。限购政策对汽车能源消费的抑制效果十分明显,而是否开通轨道交通的虚拟变量在模型中并不显著。并且在考虑了内生性问题以及稳健性检验之后,上述结论仍然成立。

最后,为进一步讨论收入效应带来的影响,本文利用Caner & Hansen(2004)提出的方法,估计了收入的门限效应。结果显示,城市道路公交效率对私人交通能源消费的影响呈逐渐上升态势,即对于人均收入较低的城市来说,道路公交效率的提升对于抑制车辆能耗的作用更强。一方面可以从收入弹性的角度来解释,另一方面,这一机制可能是通过汽车保有量来传导的。目前中国汽车保有量仍然处在较低的水平。对于人均收入较高的城市来说,人们对汽车的需求会更大,

保有量在高速扩张阶段，因此城市公交效率的提升对车辆能耗影响较小。对于收入较低的城市来说，收入水平处在低点时，汽车保有量增长率很低，因此城市道路公交效率的抑制作用更加突出。

根据上述主要结论，为更好地践行公交先行战略，本文提出以下政策建议：

1. 完善道路公共交通系统规划，提高出行体验。具体而言，可以提高公交系统覆盖率，提高公交系统准点率等方式，改善人们乘坐公交出行过程中的乘坐体验，更多的选择通过公共交通方式出行。与此同时，更多选择公共交通出行可以降低私家车在出行选择中的比重，有效缓解道路拥堵，进一步提高公交系统效率，形成一个相互促进、不断优化提高的良性循环。

2. 加强城市公交配套基础设施建设，扩建公交专用线路。为公共交通设立独立道路，专线专行，可以有效提高城市公共交通的运行效率。尤其是当城市拥堵现象日益严重的情况下，高效快速的运行将成为城市公交最有吸引力的竞争点。

3. 合理发挥市场机制的调节作用，在道路公共交通发展的过程中引入互联网思维。适当放宽行业准入机制，在一些行业适当引入民间资本，比如网约车的发展，可以在很大程度上提高出租车行业的服务质量，提升社会整体的出行效率。未来可以考虑进一步放宽行业准入条件，保证安全的同时引入良性竞争，使用市场的手段提升整体出行效率。

4. 不同收入地区公共交通效率的影响不同，对于较低收入水平的城市来说，目前公交效率提升对于抑制车辆能耗的作用是非常明显的。在这个阶段，相对较低收入城市应把目标集中在公共交通的线路设计、运行速度以及配套基础设施方面，尽早做出合理的规划和布局，以免未来汽车保有量激增之后造成改善难度加大的困境。此外，对于收入相对较高的城市来说，现阶段公共交通的替代作用减弱，应把主要着眼点放在私人汽车的管理，配合限购限行措施等。但从长期来看，对于所有城市来说，城市公交都是抑制汽车能源消费的最有力途径。

由于数据所限，本研究仍存在一些有待研究和改进的方向，未来可以进一步将轨道交通以及共享单车纳入到城市公共交通的体系下，对城市公交系统效率进行整体性的评估，进而分析其对汽车能源消费的影响，可能会得到更加完整充分的结论。

参考文献

- 城市建设研究院 2007 《城市公共交通分类标准》，中国建筑工业出版社。
- 贾顺平、毛保华、刘爽、孙启鹏 2010 《中国交通运输能源消耗水平测算与分析》，《交通运输系统工程与信息》第 10 期。
- 李磊、姚璇宇 2015 《城市化进程中公共交通效率与影响因素研究》，《现代城市研究》第 1 期。
- 刘云枫、王楠 2015 《北京市公共交通效率评价》，《城市问题》第 4 期。
- 冉伟、张晓星 2014 《城市交通拥堵的原因及对策——公交优先政策》，《黑龙江交通科技》第 11 期。
- 王华 2011 《更严厉的知识产权保护制度有利于技术创新吗》，《经济研究》增 2 期。
- 张竟轶、张竟成 2016 《基于三阶段 DEA 模型的我国物流效率综合研究》，《管理世界》第 8 期。
- 周峤 2015 《雾霾天气的成因》，《中国人口·资源与环境》增 1 期。
- 朱伟权、杨晓光、滕靖 2013 《基于数据包络分析和随机前沿分析的公交线路绩效的外部运营环境影响分析》，《吉林大学学报（工学版）》第 5 期。
- Aggarwal, A., A. Bar-Noy, and S. Khuller, D. Kravets, and B. Schieber, 1993, "Efficient Minimum Cost Matching and Transportation Using the Quadrangle Inequality", *Journal of Algorithms*, Vol. 19, 116—143.
- Barros, C., P. S. Managi, and R. Matousek, 2011, "The Technical Efficiency of the Japanese Banks: Non-radial Directional Performance Measurement with Undesirable Output", *Omega*, Vol. 40, 1—8.
- Caner, M., and B. E. Hansen, 2008, "Instrumental Variable Estimation of a Threshold Model", *Econometric Theory*, Vol. 20, 813—843.
- Chang, T. P., and J. L. Hu, 2010, "Total-factor Energy Productivity Growth, Technical Progress and Efficiency Change: An Empirical Study of China", *Applied Energy*, Vol. 87, 3262—3270.

- Chemin, E. , and S. Panorama ,2009, “Trends and Challenges in Passenger Mobility” , Available at www.ifpenergiesnouvelles.com/content/download/67678/1470168/version/3/file/Panorama2009_06-Passenger_Mobility.pdf (accessed 8. 12. 2011) .
- Choi , Y. , N. Zhang , and P. Zhou ,2012, “Efficiency and Abatement Costs of Energy-related CO₂ Emissions in China: A Slacks-based Efficiency Measure” , *Applied Energy* , Vol. 98 , 198—208.
- Dargay , J. , D. Gately , and M. Sommer ,2007, “Vehicle Ownership and Income Growth , Worldwide: 1960—2030” , *Energy Journal* , Vol. 28 , 143—170.
- Eom , J. , and L. Schipper ,2010, “Trends in Passenger Transport Energy Use in South Korea” , *Energy Policy* , Vol. 38 , 3598—3607.
- European Environmental Agency (EEA) ,2008 , *Beyond Transport Policy: Exploring and Managing the External Drivers of Transport Demand , Illustrative Case Studies from Europe* , Copenhagen: EEA.
- Färe , R. , S. Grosskopf , and C. A. Pasurka ,2007, “Environmental Production Functions and Environmental Directional Distance Functions” , *Energy* , Vol. 32 , 1055—1066.
- Hansen , B. E. ,1999, “Threshold Effects in Non-dynamic Panels: Estimation , Testing , and Inference” , *Journal of Econometrics* , Vol. 93 , 345—368.
- Huo , H. , M. Wang , and L. Johnson , and D. He ,2007, “Projection of Chinese Motor Vehicle Growth , Oil Demand , and CO₂ Emissions through 2050” , *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* , No. 2038 , 69—77.
- Lin , B. Q. , and K. R. Du ,2014, “Sources of the Potential CO₂ Emission Reduction in China: A Nonparametric Meta-frontier Approach” , *Applied Energy* , Vol. 115 , 491—501.
- Lin , B. Q. , and Z. L. Du ,2017, “Can Urban Rail Transit Curb Automobile Energy Consumption?” , *Energy Policy* , Vol. 105 , 120—127.
- Nooreha , H. , M. Abdullah , and S. Kuman ,2000, “Evaluating Public Sector Efficiency With Data Envelopment Analysis (DEA) : A Case Study in Road Transport Department , Selangor , Malaysia” , *Total Quality Management* , Vol. 11 , 830—836.
- Poumanyong , P. , S. Kaneko , and D. Shobhakar ,2012, “Impacts of Urbanization on National Transport and Road Energy Use: Evidence from Low , Middle and High Income Countries” , *Energy Policy* , Vol. 46 , 268—277.
- Rodrigue , J. P. , C. Comtois , and B. Slack ,2008, “The Geography of Transport Systems” , *Journal of Urban Technology* , Vol. 18 , 127—127.
- Sami , J. , F. Pascal , and B. Younes ,2013, “Public Road Transport Efficiency: A Stochastic Frontier Analysis” , *Journal of Transportation Systems Engineering & Information Technology* , Vol. 13 , 64—71.
- Schafer , A. ,2006, “Long-term Trends in Global Passenger Mobility” , *Bridge* , Vol. 36 , 25—32.
- Scholl , L. L. Schipper , and N. Kiang ,1996, “CO₂ Emissions from Passenger Transport: A Comparison of International Trends from 1973 to 1992” , *Energy Policy* , Vol. 24 , 17—30.
- Schipper , L. , C. Marie-Lilliu , and R. Gorham , I. E. Agency ,2000, “Flexing the Link between Transport and Greenhouse Gas Emissions—A Path for the World Bank” .
- Sueyoshi , T. , and M. Goto ,2011, “DEA Approach for Unified Efficiency Measurement: Assessment of Japanese Fossil Fuel Power Generation” , *Energy Economics* , Vol. 33 , 292—303.
- Terelius , H. , and K. H. Johansson ,2015, “An Efficiency Measure for Road Transportation Networks with Application to Two Case Studies” , IEEE Conference on Decision and Control. IEEE , 5149—5155.
- Zhang , N. , and Y. Choi ,2013, “A Comparative Study of Dynamic Changes in CO₂ Emission Performance of Fossil Fuel Power Plants in China and Korea” , *Energy Policy* . Vol. 62 , 324—332.
- Zhang , N. , F. Kong , and Y. Choi , and P. Zhou ,2014, “The Effect of Size-control Policy on Unified Energy and Carbon Efficiency for Chinese Fossil Fuel Power Plants” , *Energy Policy* , Vol. 70 , No. 4 , 193—200.
- Zhouab , P. , and H. Wang ,2012, “Energy and CO Emission Performance in Electricity Generation: A Non-radial Directional Distance Function Approach” , *European Journal of Operational Research* , Vol. 221 , No. 3 , 625—635.

A Study of China's Urban Vehicle Energy Consumption and Public Transport Efficiency

LIN Boqiang and DU Zhili

(School of Management , China Institute for Studies in Energy Policy ,

Collaborative Innovation Center for Energy Economics and Energy Policy , Xiamen University)

Summary: China's urbanization level has increased as its economy has developed rapidly. The vehicle sector, an important part of the transportation industry, has also entered a rapid growth stage. By the end of 2016, China's automobile ownership reached 194 million, with 27.52 million automobiles newly registered. Both numbers set historical records. The rapid development of the vehicle sector has led to a substantial increase in energy consumption. In 2015, China's automobile energy consumption accounted for about 9.4% of the nation's primary energy consumption and more than 50% of China's oil consumption. With the current growth rate of 28 million automobiles annually, the energy consumption of vehicles is expected to expand rapidly.

The urban public transportation system is the major engine of a city's economic development and the key to enhancing a city's competitiveness. The development of urban public transport provides people with more efficient modes of transport. Can highly efficient urban public transport systems effectively reduce the energy consumption of automobiles? This is an important issue that needs to be clarified, especially as urban public transport development is being prioritized. It is necessary to provide evidence to support policies for developing urban public transport in the future. This paper analyzes the effects of urban public transport efficiency on reducing vehicle energy consumption.

This paper considers the operational data of different types of buses and taxis in 36 major central cities in China from 2010 to 2015, applying a non-radial direction distance function (NDDF) method to evaluate the operational efficiency of urban public transportation. Overall, the efficiencies of both buses and taxis increased during this period, but the improvement in bus efficiency was not as large. The average efficiencies of buses and taxis in 2015 were 0.56 and 0.62, respectively, which was still relatively low. This indicates that there is still plenty of room for improvement in the operational efficiency of urban public transport.

Next, we calculate the energy consumption of small-scale private cars in each city. Based on this, we determine the inhibitory effects of urban public transport efficiency on vehicle energy consumption. We use an IV-GMM method to deal with endogeneity problems and to obtain more reasonable estimates. The impact of the operational efficiency of urban buses on vehicle energy consumption is significantly negative, indicating that improvements in urban public transport efficiency can effectively reduce the growth of vehicle energy consumption. The results are robust to the possibility of endogeneity and survive a stability test.

To better understand the impact of income effects, we estimate the threshold effect of income. Our results indicate that the impact of urban bus efficiency on vehicle energy consumption gradually weakens as per capita income increases. In other words, improvements in the efficiency of urban public transport are more effective at reducing vehicle energy consumption in cities with lower per capita income. This may be due to the income elasticity of demand or differences in vehicle ownership. At present, China's vehicle ownership remains relatively low. For cities with high per capita income, the demand for vehicles is strong and vehicle ownership is still in a stage of rapid expansion. As such, improvements in the efficiency of urban public transport have a smaller impact on vehicle energy consumption. For cities with lower income per capita, vehicle ownership is at a low level. The inhibitory effect of improved urban public transport efficiency is thus more obvious.

Keywords: Urban Transport Efficiency; Vehicles Energy Consumption; Non-radial Directional Distance Function

JEL Classification: L91, Q41, Q48

(责任编辑: 陈小亮) (校对: 晓 鸥)