

文章编号:1005-0523(2018)03-0069-07

基于环境保护的拥挤收费定价研究

胡 畔,耿庆武

(大连交通大学交通运输工程学院,辽宁 大连 116028)

摘要:为了缓解城市交通拥挤和污染问题,从降低交通需求以及环境保护的角度,建立合理的机动车拥挤收费定价模型。以大连市6条拥堵路段为调查对象,开展道路交通流量和道路平均车速的交通调查,利用拥挤收费定价模型计算出定价,并通过博弈论模型进行征收范围确定,最后,通过SP/RP调查方法了解居民对拥挤收费的接受度,研究如何通过拥挤定价实现缓解交通压力的同时更大力度解决尾气污染的问题。研究表明,恰当设置交通拥挤收费将引导人们更多的向公共交通出行,未来城市交通拥挤情况能够得到明显改善,环境污染问题也能得到减缓。

关键词:城市交通;环境保护;拥挤收费模型;拥堵路段;SP/RP调查

中图分类号:U491.1

文献标志码:A

随着社会经济的快速发展与汽车保有量的迅猛增长,交通拥堵和环境污染给城市发展带来了诸多负面影响,缓解交通拥堵和环境污染已颇在眉睫。拥挤收费作为一种特殊的交通需求管理措施,通过经济手段对交通需求加以调节,提高整个城市交通系统的运营效率,减少由于交通拥挤带来的交通延误与交通污染,实现整体社会效益的最大化。拥挤收费目标不是完全消除拥挤,而是使城市交通系统维持一个良好的交通供给与需求动态均衡。长远来看,拥挤收费还会对整个城市社会经济产生广泛而深入的影响。鉴于上述原因,如何恰当的利用拥挤收费,促使公众理性使用机动车,从适当改变出行方式角度来缓解这一矛盾,进而缓解交通拥堵和环境污染,是当今社会亟待解决的问题。

国内外对拥挤收费进行了大量研究。Parry等^[1]提出了考虑外因素衡量的拥挤收费模型,它是针对由于城市道路拥挤带来的其他因素改变程度的大小,如道路的拥挤、事故外部成本、污染与油耗等。Arnott等^[2]将弹性需求纳入结构性模型中进行了研究,其中包括在拥挤收费条件下的多条并行路径网络的路径选择的问题,同时考虑不同的出行者行为与福利得失之间存在多大程度的不同。Nagurney^[3]采用变分不等式的方法,深入研究交通系统中污染控制问题,提出了在对待尾气排放方面需要进行收费的总结。国内罗清玉运用实际发生法研究了由拥挤带来的负外部效应成本的衡量方法,如额外时间成本、环境污染成本和交通事故成本等,并采取典型真实的城市数据的方式,通过对直观真实的数据计算分析,得出了拥挤外部成本数额巨大的结论^[4]。罗朝晖等在拥挤道路收费定价方面也进行了相当深入的研究,利用基尼系数对拥挤收费进行定价,选择适当的基尼系数,满足不同公平性要求的拥挤收费设计^[5]。杨婧根据组合网络用户均衡条件下考虑环境污染的不同车型拥挤收费模型,计算相应的结果并设计了遗传模拟退火算法求解双层规划问题,进行了流量分配、社会福利、公共交通分担率的分析比较,最后提出了发展绿色交通的理念^[6]。

收稿日期:2018-01-10

基金项目:国家自然科学基金项目(11702049)

作者简介:胡畔(1993—),女,硕士研究生,研究方向为城市道路交通特性分析与交通安全理论与方法。

从现有研究来看,不论国内还是国外,均侧重拥挤收费模型及方案研究,在环境保护层次上考虑拥挤收费模型并分析效果评价方面的研究相对较少。鉴于上述情况,本文将在交通调查的基础上,利用拥挤收费模型和 SP/RP 调查,对如何缓解交通拥挤和污染环境等问题进行探讨。研究成果对未来城市发展具有一定的实用价值。

1 拥挤收费模型建立

1.1 拥挤收费模型

交通拥挤成本指交通参与者在拥挤时段和路段占用道路交通时空资源,对其他交通参与者的出行造成影响,却没有做出相应补偿的成本。由于汽车尾气对于社会影响越来越严重,所以本论文中交通拥挤成本仅考虑交通拥挤环境污染成本。

对于交通拥挤环境污染成本,主要考虑拥挤造成的汽车尾气排放加剧大气污染的成本。采用实际发生法,分析不同污染物的排放量以及污染物的影响成本。计算公式如下:

$$EC_{\text{cap}}^k = EC_{\text{ap}}^k + \lambda_{\text{CT}}^k + \varepsilon_c \quad (1)$$

$$EC_{\text{ap}}^k = EC_{ij}^k(V) \times \theta_i \quad (2)$$

式中: EC_{cap}^k 为路段 K 上交通拥挤造成的环境污染成本,元; EC_{ap}^k 为路段 K 上机动车尾气排放造成的环境污染总成本,元; λ_{CT}^k 为路段 K 上拥挤路段长度占路段总长度的比例,%; ε_c 为大气污染强度调整参数,反映拥挤相对于不拥挤尾气排放污染强度的增加(取值 0.03); $EC_{ij}^k(V)$ 为路段 K 上第 j 种车型单位出行距离第 i 种污染物排放率,g,它是速度的函数; θ_i 为单位第 i 种污染物带来的负面影响成本,元/克,(取值为 0.000 032^[6])。

机动车尾气包括多种污染物,尾气指标的选择是交通污染测度和预测模型的基础。CO 在车辆尾气中危害最为严重,选择 CO 作为车辆尾气污染的单一指标也可以,但不能全面的作为尾气排放的测量之指标,尤其是随着发动机技术的改进。燃烧更为充分,需要充分考虑 HC 和 NO_x 污染物。参考 Greene 等^[7]人的研究成果,结合 TRAEMS、TRANSYT 等模型对交通污染计算方法,构造了交通尾气污染总量和速度的关系模型为

$$EC_{ij}^k(V) = \sum_k \sum_j N_{k,j} [P_{\text{HC},j}(S) + P_{\text{CO},j}(S) + P_{\text{NO}_x,j}(S)] \quad (3)$$

式中: $N_{k,j}$ 为路段 K 上 j 类机动车的数量,辆; $P_{\text{HC},j}$ 为 j 类机动车的 HC 排放量与速度 S 的关系式,g/辆; $P_{\text{CO},j}$ 为 j 类机动车的 CO 排放量与速度 S 的关系式,g/辆; $P_{\text{NO}_x,j}$ 为 j 类机动车的 NO_x 排放量与速度 S 的关系式,g/辆。

路段 K 上 j 类机动车的数量 $N_{k,j}$ 与路段 K 上 j 类机动车的流量 $Q_{k,j}$,运行速度 $S_{k,j}$ 以及路段长度 L_k 的关系式为

$$N_{k,j} = \frac{Q_{k,j} L_k}{S_{k,j}} \quad (4)$$

随着机动车速度的变化,不同类型的尾气排放量呈现出不同的规律。拟合不同机动车类型的 $P_{\text{HC},j}(S)$, $P_{\text{CO},j}(S)$ 和 $P_{\text{NO}_x,j}(S)$ 函数曲线表达式如下:

$$\left. \begin{aligned} P_{\text{HC},j}(S) &= \alpha_{1,j} S^{\beta_{1,j}} \\ P_{\text{CO},j}(S) &= \alpha_{2,j} S^{\beta_{2,j}} \\ P_{\text{NO}_x,j}(S) &= \alpha_{3,j} S^2 + b_{3,j} S + c_{3,j} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: S 为机动车运行速度, km/h; $\alpha_{1,j}, \beta_{1,j}$ 为 j 类机动车关于速度 S 的 HC 尾气排放参数; $\alpha_{2,j}, \beta_{2,j}$ 为 j 类机动车关于速度 S 的 CO 尾气排放参数; $\alpha_{3,j}, \beta_{3,j}, c_{3,j}$ 为 j 类机动车关于速度 S 的 NO_x 尾气排放参数。

模型说明: 由于不同车型其污染物排放率存在差异, 本文参考王玮等人的研究结果, 这几种主要污染物的排放率与车速的拟合模型如表 1 所示。值得注意的是拟合模型是基于南京市的数据得到, 对于大连市具有借鉴意义, 拟合模型仍然需要进行修正。

表 1 小汽车排放不同污染物与车速的拟合模型
Tab.1 The fitting model of different pollutants and speed of vehicle emission

污染物	排放因子拟合模型
HC	$P_{\text{HC}}=68.725 2 S^{-0.776 0}$
CO	$P_{\text{CO}}=163.154-5.291 1 S+0.066 2 S^2-0.000 3 S^3$
NO_x	$P_{\text{NO}_x}=2.016 4-0.014 2 S+0.000 1 S^2-5.3 \times 10^{-7} S^3$

1.2 交通拥堵收费的博弈论模型

在对交通量拥挤收费进行模型建设的过程中, 首先要掌握影响交通拥挤收费定价的具体因素, 影响定价的因素有很多, 当然, 城市交通拥挤费用的定价不能过高, 因为过高的收费会给人们的生活带来更多不利的影响, 在实际征收中, 征收的交通拥挤费用与理论值有一定的差距。因此, 在确定交通拥挤收费标准之后, 应该看看是否在可以接受的交通拥挤收费的范围之内。影响整个交通拥挤收费定价最主要的因素是交通量, 收费额的大小直接来源于交通量的大小。

用 Q 代表道路的交通量, C 代表交通的最大承受能力, Q/C 的值控制在一定范围, 即 (r_1, r_2) 。同时, 有这样的关系 $D=f(Q)$ (D 为成本, Q 为交通量), 那么 ΔD 表示交通拥挤收费的值, ΔQ 表示交通量减少的值, 可以得到以下关系:

$$D+\Delta D=f(Q+\Delta Q)\Rightarrow Q+\Delta Q=f^{-1}(D+\Delta D)$$

所以
$$r_1 < \frac{Q+\Delta Q}{C} < r_2, r_1 < \frac{f^{-1}(D+\Delta D)}{C} < r_2$$

由此可以得出结论: $-D+f(r_1C) < \Delta D < -D+f(r_2C)$, 这就是交通拥挤费用的征收范围。

通过采用格林希尔茨于 1933 年提出 $v-p$ 的线性关系模型和经典边际成本定价模型, 推导出基于交通载量的拥挤收费定价公式为^[9]

$$D=f(Q)=\beta \times \frac{L}{V_f \left(1 - \frac{Q}{LK_j}\right)} \quad (6)$$

式中: D 为路段 K 上交通成本; L 为路段 K 的长度, km; V_f 为路段 K 车流密度趋于 0, 车辆可以畅行无时的平均速度, km/h; K_j 为路段 K 车流密集到所有车辆无法移动 ($v=0$) 时的密度, 辆/h; Q 为路段 K 上的车辆数, 辆; β 为经典定价理论中定义的一个时间因子 (取值 24)。

模型说明: 由于车型划分中包含很多车辆类型, 本文为了方便将全部调查车辆按规定比例换算成标准小汽车。

2 实例分析

2.1 交通调查及数据处理

本次交通调查针对大连市核心区中心地带的 6 个相对拥挤路段。采取人工计数法, 集中一天采集交通

流量与地点车速数据。调查时段为早高峰 6:30-9:00 与晚高峰 16:00-19:00。

对于机动车行驶速度数据的获得,利用雷达测速仪进行测速,综合统计高峰时期路段速度,最终算出路段行驶平均车速。本文以第一天观测到的中心区域 6 条道路机动车流量、路段平均车速以及道路饱和度为例,汇总于表 2 中。

表 2 中心区域主要路段早高峰时段交通量和平均车速

Tab.2 The traffic volume and average speed during the early peak period of the main sections in the central area

路段名	方向	早高峰流量/ (pcu/h)	平均车速/ (km/h)	饱和度	路段名	方向	早高峰流量/ (pcu/h)	平均车速/ (km/h)	饱和度
西北路	南向北	3840	30.7	0.46	长江路	东向西	1796	28.0	0.36
	北向南	3390	31.4	0.41		西向东	2553	19.2	0.51
华北路	南向北	3602	9.4	0.72	长春路	北向南	3274	29.3	0.49
	北向南	3209	32.0	0.64		南向北	2394	31.5	0.48
东北路	南向北	3166	9.1	0.63	五惠路	东向西	4662	18.0	0.70
	北向南	3882	10.5	0.77		西向东	6162	14.4	0.92

2.2 尾气污染物含量分析

在国外大中型城市中,汽车尾气的污染占整个大气污染的 60% 以上,汽车尾气污染已成为城市的无形杀手。汽车尾气污染物主要有一氧化氮、烃类化合物、氮氧化物和细颗粒物等。而由于每个城市所处环境不同,机动车保有量、使用率不等,还有相关的汽车尾气排放标准差异,汽车的构造技术不同等,使得不同城市的尾气污染不同,尾气污染物的排放量也是有差异的。

在相关环保部门得知相关资料,2015 年,大连市机动车排放一氧化碳共 7.20 万 t,碳氢化合物共 0.90 万 t,氮氧化物 4.6 万 t,PM2.5 共 0.19 万 t,PM10 共 0.21 万 t。排放污染物比例如图 1 所示。

参考《道路机动车大气污染物排放清单编制技术指南》对不同平均车速条件下的污染物排放给出的建议修正因子,对上述拟合模型进行修正。由图 2 可知,机动车在低速行驶状态下污染物的排放量明显高于经济时速(40~80 km/h),其平均车速<20 km/h 的 PM 和 HC 的排放量是经济时速(40~80 km/h)排放量的 5 倍。

在进行实地交通调查的同时,用高德地图进行实时的区域尾气污染物含量观测。具体数据如表 3 所示。

2.3 模型求解

1) 拥挤收费定价。通过对已调查的 6 条拥挤道路进行数据对比和现场实地观察,本次选取具有代表意义的东北快速路为例,进行拥挤收费计算。东北快速路是双向 6 车道,连接着大连火车站和大连北站的主要道路,交通车流量很大,拥堵问题经常发生,给来往通过东北快速路的车辆带来了不便。将东北快速路实地调查的流量和速度代入到公式(3)中,计算出机动车尾气排放造成的环境污染总成本 8.08 元,最后根据公式(1)计算拥挤收费定价 8.36 元。

2) 征收范围。本文将饱和度控制在 0.6~0.75 之间,属于二级服务水平。根据大连市道路限速的相关规定和实地调查资料,对交通拥挤博弈论模型中相关参数进行量化标定, $V_r=40$ (km/h), $K_j=167$ (pcu/h),将各参数数值带入模型中计算出拥挤收费定价的征收范围为: $5.64 \leq \Delta D \leq 10.29$ 。

从博弈论模型征收范围来看,基于环境保护的拥挤收费定价计算出来的 8.36 元在征收范围内,所以价格上是合理的。

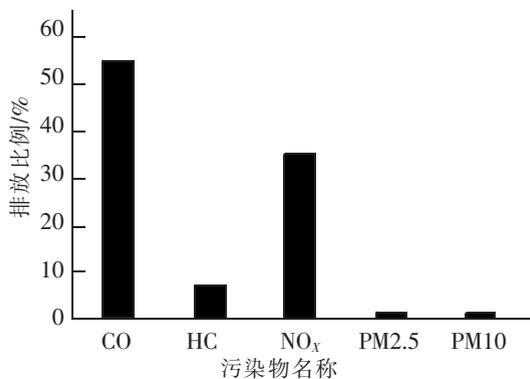


图1 大连市排放污染物比例

Fig.1 The proportion of pollutants discharged in Dalian City

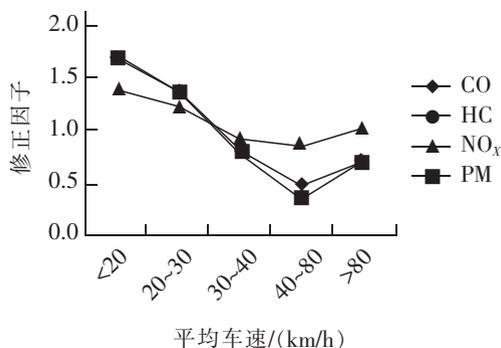


图2 不同车速下污染物排放的修正因子

Fig.2 Correction factor for pollutant emission at different speeds

表3 大连市甘井子区实时的空气质量

Tab.3 Real-time air quality in Ganjingzi district of Dalian City

污染物	CO	NO ₂	O ₃	SO ₂	PM2.5	PM10
含量/(ug/m ³)	591	26	40	21	17	37

3 拥挤收费实施调查分析

为了解居民对计算出来的道路拥挤收费价格持怎样的态度,本文做了一项拥挤收费定价问卷调查。问卷内容包括行为调查(revealed preference, RP)和意向调查(stated preference, SP)。RP调查针对实际情况,反映了被调查者的具体属性及其在现实中对现有情况的选择。SP调查针对被调查者的意愿,反映了被调查者在虚拟情境中对不同状态的偏好程度及选择情况^[8]。此次调查问卷采用纸质问卷和网络问卷两种调查方法,共发放纸质问卷300份,网络有效问卷共150份,共计发放问卷450份。经过筛选,共计有效问卷415份,有效率为92.2%。

3.1 RP 调查结果分析

本次调查的居民属性及对拥挤收费的想法统计结果如表4所示。

以上统计结果显示,大部分居民切身感受到了拥挤的城市交通使排污更严重,空气质量恶化,部分居民支持实施拥挤收费,并大致能理解这是与大力减少排污相关的一项拥挤收费措施。

3.2 SP 调查选项分析

拥挤收费意愿统计结果显示,大部分居民对于道路拥挤收费持勉强接受态度,表示听闻其他城市有实施这个策略的,但并未对拥挤收费策略有实质性的了解。部分居民表示收费透明公开,定价合理且对环境保护有好处,很支持拥挤收费策略。显然,拥挤收费的价格是居民选择是否按原计划走拥挤收费道路最重要的考虑因素之一。本次问卷调查也对拥挤收费的定价进行了意愿调查,本文基于环境保护拥挤收费模型计算得到的拥挤收费定价,从调查结果发现,大部分居民对于此定价还是可以接受的。同时,为了进一步了解拥挤收费之后对居民出行方式的影响,设计了不同出行方式选择的SP调查表格。统计结果表明,由于大连市公共交通线网布局合理,部分居民表示在不着急的情况下,会改变出行交通方式,改坐公共交通出行。由于舒适性和方便性的缘故,大部分居民仍然选择私家车出行,按原计划走拥挤收费路段。

因此综合各类因素考虑,本文提出一种刚柔并施的拥挤收费策略,根据载客人数的不同设立分级收费标准,如表5所示。

表4 RP调查统计结果
Tab.4 PR survey results

属性	统计结果
性别	①男:81.3%;②女:18.7%。
年龄	①19-30岁:31.2%;②31-40岁:28.4%;③40-50岁:23.1%;④50岁以上:17.3%。
学历	①初中高中:8.2%;②中专大专:15.1%;③本科:47.6%;④硕士:26.6%;⑤博士:1.9%;⑥其他:0.6%。
收入	①10万以下:39.8%;②10-15万:36.3%;③15-20万:11.7%;④20-30万:5.4%;⑤30万以上:4.3%;⑥不清楚:0.5%。
环境调查	大连市的空气质量? ①很好:17.6%;②轻度污染:42.1%;③中度污染:33.6%;④严重污染:6.7%。 拥挤情况下排污对空气质量有影响吗? ①很大影响:62.4%;②能接受:13.6%;③轻微影响:21.3%;④没影响:2.7%。
拥挤收费意愿	你行走的路段实施拥挤收费,对你的影响? ①放弃出行计划:13.4%;②选择其他交通方式:36.4%;③选择其他路径:15.3%;④选择收费路径:33.7%;⑤其他:1.2%。 拥挤收费对你购置第二辆车有影响吗? ①取消购车:12.8%;②选购的纯电动汽车:40.7%;③没有影响,按原计划进行:46.5%。 支持实施拥挤收费的理由? ①收费是一种手段,可以接受,利于减少环境污染:42.3%;②有利于发展绿色交通:23.6%;③减少污染,促进纯电动小汽车发展:31.9%;④其他:2.2%。 你认为拥挤收费定价8.5元,能接受吗? ①可以接受:26.3%;②勉强可以接受:48.5%;③价格太高,不接受:25.2%。

表5 拥挤收费价格表
Tab.5 Congestion pricing

载客人数/人	收费价格/元
1~3	8.5
4~5	7.5
5人以上	6

根据拥挤收费价格的不同,减少交通拥挤的同时提高对小汽车的资源利用效率,对缓解空气污染也有一定的帮助。

4 结论

针对日益严重的城市交通拥堵问题以及日渐影响居民健康生活环境的污染问题,在前人研究的基础上,分析了国内外研究现状,提出了基于环境保护的交通拥挤收费模型,并利用博弈论模型进行定价征收范围确定,最后通过SP/RP调查方法了解居民对拥挤收费模型得到的定价结果是否满意,用以缓解交通拥挤的同时更大力度解决机动车尾气排污的问题。具体结论为:

1) 本文以大连市东北快速路为例,通过拥挤收费模型计算出拥挤收费定价为8.5元,并通过拥挤收费博弈论模型确定征收范围,确定8.5元在征收范围里。

2) 在定价之后,通过SP/RP调查方法进行居民属性及拥挤收费意愿调查。通过调查数据分析,有74.8%被调查者对于此定价还是可以接受或是勉强可以接受的。最后,综合各类因素考虑,提出一种刚柔并施的拥挤收费策略,根据载客人数的不同设立分级收费标准,载客越多,拥挤收费越便宜。

本研究进行的拥挤收费模型只针对小汽车进行计算,没能够考虑到不同车型对拥挤收费的影响,从理论到实际还需要解决很多问题;在社会公平性的研究方面,如何让拥挤收费变得更加公平,使得拥挤收费获得公众支持,是一个很值得继续研究的问题。

参考文献:

- [1] PARRY LW H, BENTO A. Estimating the welfare effect of congestion taxes[J]. *Journal of Urban Economice*, 2002, 51: 339-365.
- [2] ARNOTT R, PALMA A, LINDSEY R. Information and time-of -usage decisions in the bottleneck model with stochastic capacity and demand[J]. *European Economic Review*, 1999, 43(3): 525-548.
- [3] NAGURNEY A. Congested urban transportation networks and emission paradoxes[J]. *Transportation Research Part D*, 2000, 5(2): 145-151.
- [4] 罗清玉. 城市道路拥挤收费关键理论问题研究[D]. 长春: 吉林大学, 2008.
- [5] 罗朝晖, 黄克文. 基于基尼系数的交通拥挤收费定价模型[J]. *数学的实践与认识*, 2015, 45(5): 19-27.
- [6] 杨婧. 不同车型下考虑环境污染的交通拥挤收费研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- [7] GREENE D L, PLOTKIN S E. Energy futures for the US transport sector[J]. *Energy Policy*, 2001, 29: 1255-1270.
- [8] JORDAN JL, DAVID AH. On the design and analysis of simulated choice or allocation experiments in travel choice modeling[J]. *Transportation Research Record*, 1982(890): 11-17.
- [9] 王炜, 陈学武. 交通运输工程学[M]. 南京: 东南大学出版社, 2000: 41-44.

Research on Congestion Pricing for Environmental Protection

Hu Pan, Geng Qingwu

(School of Transportation Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

Abstract: To alleviate urban traffic congestion and solve pollution problems, from the angle of reducing traffic demand and from the perspective of environmental protection, a reasonable pricing model of congestion charging in motor vehicles is established. Taking the 6 main roads of Dalian City as the investigation object, the traffic flow and average speed are investigated. The pricing is calculated by using congestion pricing model and the scope of expropriation is determined by game theory model. Finally, this paper, through SP/RP survey method, obtains the residents' acceptance of congestion charges, studies how to alleviate the traffic pressure through congestion pricing and at the same time to make greater efforts to solve the problem of tail gas pollution. The research results shows that the proper setting of traffic congestion charges may guide people to rely more on public transport. And the future urban traffic can be significantly improved, and environmental pollution problems can be reduced greatly.

Key words: urban traffic; environmental protection; congestion charging model; congestion road; SP/RP survey