

动态交通政策的长期优化设计 ——通过定价机制寻求社会福利最大化

Luis A. Guzman¹, Daniel de la Hoz¹, Andrés Monzón¹ 著, 刘斌² 译
(1. TRANSyT 交通研究中心, 马德里工业大学, 西班牙 马德里 28036; 2. 中国城市规划设计研究院, 北京 100037)

摘要: 针对交通政策设计中决策过程的可选方法展开探讨。探索对出行政策进行综合预测、评价、优化以实现决策方案最优的可能性。从长远来看, 为了适应像城市这样一个动态系统, 采用了用地与交通相互影响模型(LUTI)的长期评估方法。在评估的全过程中, 通过成本效益分析来衡量实施LUTI动态决策所产生的社会福利, 然后通过优化程序使其达到最大化。这一模型在马德里收费站最优定价策略项目中得到验证, 该项目要求保证系统效率、社会公平以及环境质量。与其他定价方案相比, 最优方案能以相对较低的收费产生更多的社会盈余。该实践结果突出强调了不同因素对研究区域以及对社会福利盈余的主要贡献者的影响, 从而反思采用的成本分析方法是否可以作为设计可持续政策的最佳方法。

关键词: 城市交通政策; 成本效益分析法; 政策优化; 可持续交通

Optimal and Long-Term Dynamic Transport Policy Design: Seeking Maximum Social Welfare through a Pricing Scheme

Written by Luis A. Guzman¹, Daniel de la Hoz¹, and Andrés Monzón¹, Translated by Liu Bin²

(1. TRANSyT-Transport Research Center, Universidad Politecnica de Madrid, Madrid 28036, Spain; 2. China Academy of Urban Planning & Design, Beijing 100037, China)

Abstract: This article presents an alternative approach to the decision-making process in transport strategy design. The study explores the possibility of integrating forecasting, assessment and optimization procedures in support of a decision-making process designed to reach the best achievable scenario through mobility policies. Long-term evaluation, as required by a dynamic system such as a city, is provided by a strategic Land-Use and Transport Interaction (LUTI) model. The social welfare achieved by implementing mobility LUTI model policies is measured through a cost-benefit analysis and maximized through an optimization process throughout the evaluation period. The method is tested by optimizing a pricing policy scheme in Madrid on a cordon toll in a context requiring system efficiency, social equity and environmental quality. The optimized scheme yields an appreciable increase in social surplus through a relatively low rate compared to other similar pricing toll schemes. The results highlight the different considerations regarding mobility impacts on the case study area, as well as the major contributors to social welfare surplus. This leads the authors to reconsider the cost-analysis approach, as defined in the study, as the best option for formulating sustainability measures.

Keywords: urban transport policy; CBA approach; policy optimization; sustainable transportation

收稿日期: 2014-01-02

作者简介: Luis A. Guzman(1977—), 男, 哥伦比亚人, 博士, 土木工程师, 主要研究方向: 交通与用地模型、动态系统、可持续交通、交通规划。E-mail: laguzman@caminos.upm.es

译者简介: 刘斌(1986—), 男, 山东威海人, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向: 城市交通规划与设计。E-mail: caupd_liubin@163.com

文章来源: International Journal of Sustainable Transportation, 2014年第8卷第4期297-316页, Taylor & Francis Ltd.(http://www.tandfonline.com)版权所有, 文章链接: http://dx.doi.org/10.1080/15568318.2012.696772

1 概述

可持续性已经成为每个城市管理者所面临的挑战。近年来,随着小汽车使用率的连续快速增长,交通拥堵、大气污染、资源消耗、社会不平等、生活质量恶化等成为城市管理者未来几年需要解决的问题。

当下政策措施层出不穷,然而城市系统日益复杂且动态变化,而可持续发展的观念又涵盖了经济、环境、社会层面的发展目标,这就增加了为提升社会福利提出组合政策的难度。基于此,本文的研究目的是探索一种综合预测、分析、评估的方法,以期实现决策最优化。以下将从简单定价政策优化实现途径进行研究。

当前广泛实行的政策既包括控制交通量的出行管理政策,以及以直接的定价制度实现交通外部性的内部化^[1]。同时,收费所得收益能够再投入交通系统中,以提高公共交通服务水平来获得更大的效益^[2]。

政策优化旨在缓解CBD的交通拥堵状况,减少交通拥堵对这一高密度人群和商业活动集聚的敏感区域的负面影响,如尾气排放和噪声。

最常见的收费制度,如伦敦市的拥挤收费策略^[3~4]、新加坡区域许可证制度^[5]以及挪威的收费环线^[6],即对通过收费区域的车辆征收一定的费用。由于政策和技术手段不同,具体的收费方式可能有所不同。

英国伦敦市在城市中心区实施了拥挤收费政策(分区域定价)。这项措施成功地使收费时段收费区域内交通量降低15%、进入区域的交通量降低18%,由此使区域内交通延误降低30%。尽管如此,目前车速又回到政策实施之前的水平。瑞典斯德哥尔摩市2006年拥挤收费的成本收益分析(Cost Benefit Analysis, CBA)显示,除投资和运营成本,仍可获得相当多的社会剩余^[7]。在挪威,道路收费主要用来保障城市道路基本投资。挪威最近修订立法后,将公共交通基础设施和运营管理纳入收费盈利的投资范围^[8],同时也制定了根据拥堵程度进行差别化收费的定价机制^[9]。

尽管拥挤收费政策已在一些城市取得成功,但依旧存在一些通病^[1]。根据一般性假设,收费区域越拥堵,小汽车使用减少带来

的潜在效益越大。

中心城区收费制度的评估通常采用静态成本收益分析^[10,7,9]。然而,这类研究未考虑定价策略可能会对城市活动产生的长期影响以及居住与工作模式之间的动态关系。收费政策不但会影响交通量及驾驶人行为,还会影响其他城市要素,包括居住及工作地点、交通事故率、空气质量以及温室气体的排放,因此需要采取其他评估体系。此外,可持续的交通政策是长期的,往往持续一段时间才能产生实际而持久的影响^[10]。

立足于可持续发展的目标(社会福利最大化)以及土地使用与动态交通,本文对进入特定区域的最优收费价格进行研究。

研究的关键在于把握与目标函数相关变量的动态特征及其对城市系统的远期影响。收费制度能够减少道路拥堵,增加财政收入以改善公共交通并鼓励少出行、短距离出行、错峰出行。系统动态学理论(System Dynamics, SD)提供了一种模拟用地和交通长期关系这一复杂系统的有效方法。这种方法能够确定基于仿真模型的机动性理论的因果关系和出行行为模式,对城市复杂的交通体系进行模拟,并可靠地反映出行者交通行为^[11]。

基于SD的政策优化方法,较少文献有所研究,部分文献将优化过程与SD相结合^[12~17]。为了理解不同的交通政策,一些学者已经将SD方法应用到交通建模中,但是缺乏拥挤收费政策对收费区域影响的动态评估方法^[18]。文中提出基于SD理论的模型构架,使决策者能够把握城市交通系统内部拥挤收费政策复杂、动态的特性。

文献[19~20]提出了一种SD模型用以研究交通与土地利用的相互关系,将其作为一项政策工具进行模拟,并剖析了随着时间增加对公路通行能力的影响。对文献[21]运用SD模型研究上海市交通问题时发现,仅增加道路供给,交通拥堵将更加严重。

文献[22]针对美国华盛顿都市区,以具体的交通网络模型分析福利及其分布的影响。文献[23]基于土地利用、交通战略、区域经济整合模型评估道路定价政策的长期影响,并与其他模型得到的短期影响进行比较。文献[24]引入多种道路收费模式,分析美国德克萨斯州奥斯汀地区交通、土地利用和福利对道路收费的影响。另一方面,文献

[25]关注了跨区域不同管理者不同收费标准的拥挤收费制度。依据竞争性、合作性、区域性道路收费和多区域网络的混合行为提出了五种收费制度。这些研究均未涉及最优化过程。文献[26]阐述了制定可持续拥挤收费政策中的最优化问题。在拥挤收费中考虑环境、外部性因素,以避免城市交通系统的不可持续性。这一方法将不确定的需求与供应的影响整合在道路拥挤收费模型中,用于政策评估。

一旦在土地利用与交通影响(Land-Use and Transport Interaction, LUTI)模型中融入SD理论,即建立了以社会福利最大化为目标函数(Objective Function, OF)、以通行费用为变量的长期优化程序。文献[17]和[27]中有类似研究,从单一政策的应用中选取最优的交通策略。本文以西班牙马德里都市区作为研究案例,分析假设的拥挤收费计划的主要特征和影响。2004年马德里都市区人口586.7万,用地和交通方式极为复杂。

文章结构如下:首先概述相关理论,简要描述LUTI模型。详细介绍优化过程以及目标函数。基于案例研究提出收费计划的最优化结果,并综合分析得到的主要结论。最后讨论定价政策的有效性,并针对收费

产生的影响提出解决方法。

2 方法的提出

系统是一组为了某一特定目标相互作用、相互影响的实体,可以指整个系统也可以是其中一部分。文中采用的SD方法囊括土地利用、交通子系统及优化方法。

图1显示了各个子模型、政策实施、优化过程之间的相互作用,LUTI模型与优化过程通过一种基于动态成本效益分析的目标函数整合在一起,也可以通过交通政策联系在一起。政策的强度会随着目标函数的优化迭代过程而发生变化。

3 土地利用和交通模型

如果系统间的交互随时间发生变化,系统即是动态的,适用于研究行为受复杂交互影响的长期效应。

本文提出的方法基于LUTI模型。用地和交通系统被看作是一种长期的SD。战略的、动态的城市用地和交通整合模型构成了LUTI模型的基本框架。LUTI模型已经被应用于马德里市区。本文选择大都市区出行活

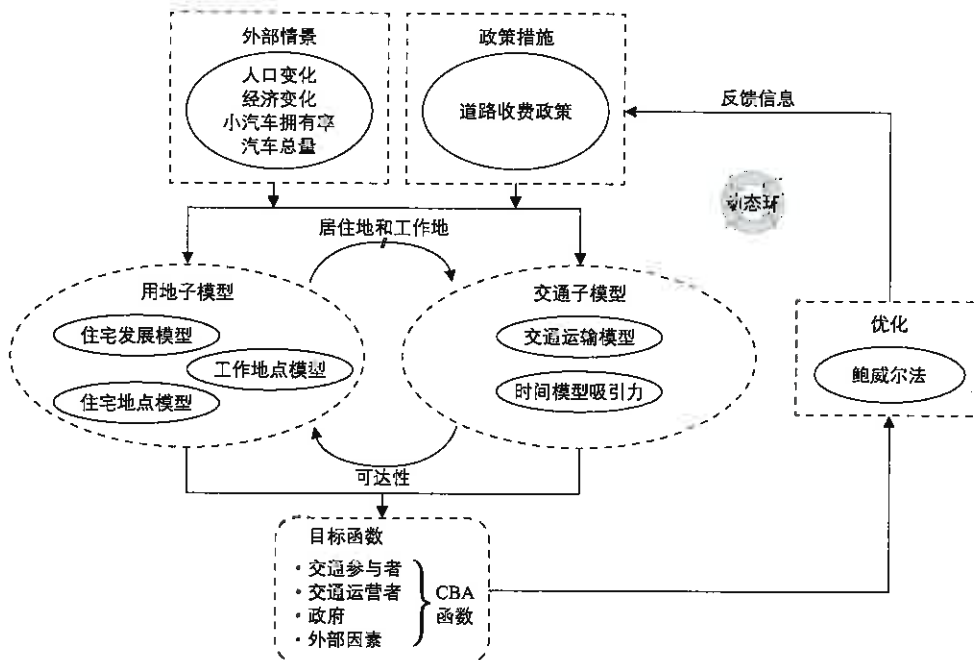


图1 综合程序的动态长期循环——优化评估模型的基本结构

Fig.1 Dynamic long-term loop of the integrated process. Basic structure of the evaluation and optimization model

动模型 (Metropolitan Activity Relocation Simulator, MARS)^[28], 因为该模型能够很好地适应多种交通方式和出行活动之间复杂的相互作用, 能够很好地满足研究需求。

MARS是一种用来研究长期战略问题的方法, 可以预测未来30年的结果, 每3个月为一个时间节点, 平均运行时间小于10 min。因此用户能够通过一系列指令测试多种不同

的政策在任一时间段(最长可以达到30年)之后产生的效应。这对于社会福利目标函数最大化来说很有必要。关于MARS模型的详细介绍可参考文献[28]。

MARS通过关联的因果关系涵盖了交通、房地产开发、居住地选择、就业地选择、就业地发展模型, 同时包含了能耗和排放模型, 呈现小汽车(驾驶人和乘客)、公共交通(公共汽车和轨道交通)、步行和自行车交通模型中出行时耗预算恒定的概念^[29]。通勤出行被假定为刚性需求, 因此高峰拥堵时段出行减少时, 非高峰时段出行会增加^[27]。表1是MARS模型的主要特征。

表1 都市区出行活动(MARS)模型的主要参数

Tab.1 Main characteristics of the MARS model

模型参数	MARS
小区数	90个
出行方式	小汽车, 公共交通, 步行和自行车
拥堵影响	通勤出行特定OD的速度-流量曲线, 假设非高峰时段其他出行不受影响
广义费用	车辆时耗, 收费, 进入/离开时间, 寻找停车位时耗, 等待时间, 缴费时间
出行目的	通勤, 其他
时间段	高峰, 非高峰
小汽车拥有	0(无车), 1(有车)
人口、家庭特征	平均家庭人口数, 就业人口, 小汽车人均拥有率, 小区平均收入
路径选择	是
方式、目的地选择	否
时间段选择	同步
需求反馈	否
用地反馈	通勤出行时耗, 出行时耗预算恒定

MARS模型结构基于图2所示的因果循环图的概念之上, 说明了不同变量之间的因果关系。例如, 小汽车通勤出行取决于就业人口、小汽车吸引力, 同时又影响小汽车速度。MARS模型有两种循环: 平衡和强化。吸引力依赖于实用性、费用和时间, 不仅仅是小汽车, 其他交通方式也如此。同时, 吸引力也依据小汽车使用强度的不同而发生变化, 因为交通拥堵可能导致小汽车出行时耗增加, 相比其他交通方式其吸引力下降(图2中L1)。另一方面, 交通拥堵同时也可能对公共交通运行产生影响, 从而提高小汽车吸引力, 形成加强循环(图2中L3)。由于车速还与耗油量有关, 因此还需要加上第三个循环(图2中L2)。所有子系统、相关变量

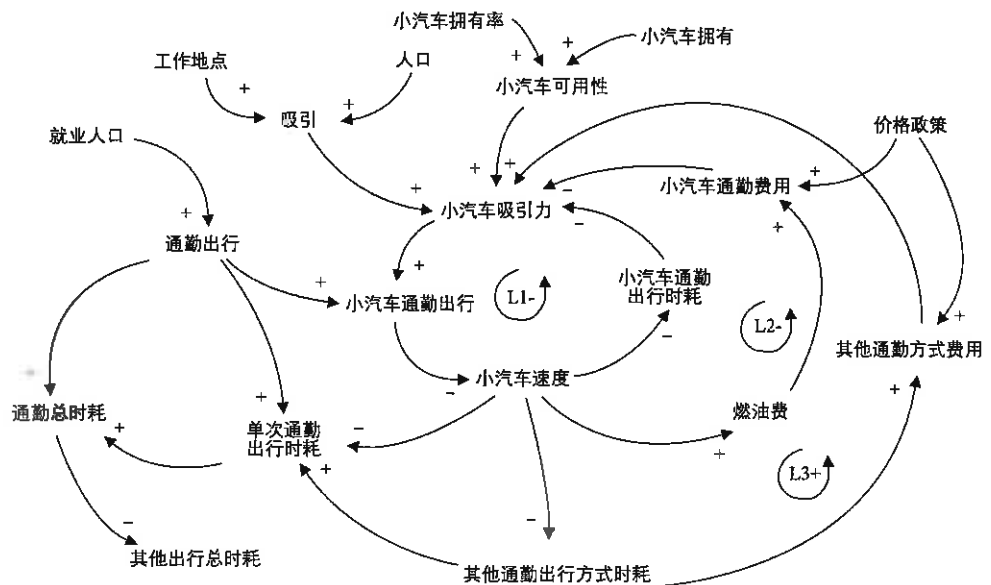


图2 小汽车通勤出行循环图

Fig.2 Causal loop diagram for commute car trips

按相似的原理运行，共同构成一个复杂的系统^[30]。

这样，定价策略可以通过影响小汽车吸引力来改变由系统各个循环所产生的平衡关系。这种简单的因果循环结构以及面向用户的软件(Vensim)提高了模型的透明度及实用性。

此外，MARS模型还假定用地不是一个恒量，而是受交通基础设施影响的SD中的一部分^[17]。交通与用地之间的相关关系通过二者长达30年的时间反馈循环实现表达。SD模型的扩展，关于流量-存量(stock-flow)流程图的基本理论可以参考文献[28]。从长远来看，交通可达性发生了变化，就会影响居住地点和就业地点。变化的强度与政策措施的强度直接相关^[31]。

3.1 优化方法

优化模型可以衡量某一交通政策实施后的影响强度。

优化技术一直以来是交通规划的一个重要研究领域^[17, 27, 32-37]。然而，对这些技术的评价以及在现实交通中的应用是否成功还有待验证。

本文应用鲍威尔(Powell)优化方法^[32]。该方法是一种搜寻由一系列线性无关的方向向量组成的目标函数的局部最优解，而不需要求导的算法。该算法的细节问题可以参考文献[39]，完整算法可参考文献[40]。

该方法可以应用于多种交通与用地政策的优化问题。本文案例中应用了两个变量寻求最优的交通政策，即马德里市中心区的载客车辆定价策略(短期和长期)。关于交通政策的其他优化方法可以参考文献[17, 26, 33, 36]。

3.2 目标函数

按以往的做法，评估定价策略采用的是不连续的方法，并且在单一的时间段内进行分析。然而，有效的规划需要进行长期的评估。

效用函数是指在整个时间段内所获取的社会效益；然而，目标函数必须提供针对方案有效力度的一个评判。这就意味着需要一个参照方案作为对比。

式(1)中的目标函数 OF 能够衡量与 $A0$

方案(不采取任何措施，对照方案)相比社会福利的变化。这个函数定义如下： ΔCS_{ij} 为实施 X 策略之后的消费者盈余变化，包括费用成本(或节约)和时间成本节约； ΔO_{ij} 为运营者利益变化，包括由票价和运费产生的税收； ΔG_j 为政府利益变化，包括燃油税、减少的道路维修费； ΔE_j 为外部因素变化产生的效益，来源于道路事故率、温室气体排放量的减少，以及良好空气质量(NO_x 和 $PM10$)带来的效益。

$$OF = \sum_{t=0}^{30} \sum_j \left[\frac{1}{(1+r)^t} \right] \times [\Delta CS_{ij}(t) + \Delta O_{ij}(t) + \Delta G_j(t) + \Delta E_j(t)] \quad (1)$$

目标函数分析评估的结果表现为净现值(Net Present Value, NPV)在未来的价值。引用社会贴现率 $r=4.8\%$ ^[40]。变量 t 为时间， i 和 j 分别为小区的起讫点。

表2 污染物排放及事故伤亡减少价值预测

Tab.2 Estimated emissions values and casualties avoided

年份	污染物排放价值预测 (欧元/吨)		
	CO	NO _x	PM10
2004-2009	22		
2010-2019	26		
2020-2029	32	5 300	2 873
2030-2039	40		
2040-2049	55		
2050	83		
事故伤亡减少价值预测 (欧元)			
死亡	103 685	147 755	11 171
重伤			
轻伤			

1) 以2004年欧元价格计。

表3 研究区域特征

Tab.3 Features of Study Zone

项目	收费区域 CBD	外围其他 区域	大都市区 建设区域	大都市 范围	总建设 区域
人口/人	1 010 545	2 142 739	1 992 333	712 662	5 867 299
就业岗位/个	877 695	1 633 833	587 450	1 86 826	2 215 804
面积/km ²	41.8	562.2	2 272.6	5 151.7	8 031.4
方式划分 (公共交通/私人机动车辆)	71/29	35/45	31/69	13/87	35/45
机动车千人拥有率/辆	450	379	625	506	516

注：2004年数据，由文献[42]整理得到。

外部效应的取值(见表2和表3)来自欧盟项目“交通成本核算和项目评估的欧盟协调方法研究”(Developing Harmonized European Approaches for Transport Costing and Project Assessment)^[3]。公式(1)不考虑投资费用。

为了能评估多方式联运系统,根据文献[44]提出的研究方法,本文采用一种基于不同交通方式、不同起点效益分布的动态成本效益分析方法。交通参与者的非集计福利函数,即消费者盈余(Consumer Surplus, CS)

$$\Delta CS = \frac{1}{2} \sum_i \sum_{j,m} (T_{ijm}^0 + T_{ijm}^1) \times [(t_{ijm}^0 - t_{ijm}^1) + ((c_{ijm}^0 + \tau_{ijm}^0) - (c_{ijm}^1 + \tau_{ijm}^1))], \quad (2)$$

式中: T_{ijm} 为小区 i 到小区 j 采用方式 m 的交通需求; t_{ijm} 为出行时间与时间价值的乘积; c_{ijm} 为运营成本(燃油费+固定费用); τ_{ijm} 为与票价、停车费以及其他收费相关的费用; 上标 k 为原始方案 ($k=0$) 以及备选方案 ($k=1$)。

式(2)中的方括号部分, 第一项(出行时间)表示实施策略后获得的时间价值, 第二项和第三项(运营成本、票价和收费)用于评估小汽车结余费用, 主要是燃油费用, 也表达了系统的税收。这是交通参与者的非集计函数。通勤交通出行时间价值假定为 10.45 欧元·h⁻¹, 其他出行时间价值为 5.7 欧元·h⁻¹^[45]。

式(3)表达了运营者的净收益, 包括公共

交通票价、通行费以及停车费, 计算长达 30 年的总收益, 但不考虑最初基础设施费用。该公式包括了停车场运营者、通行费收取者以及公共交通运营者。式(4)表达了由于燃油税的变化 (ΔF_{ij}) 以及道路维修费的变化 (ΔM_{ij}) 给政府带来的收益或损失。式(5)表达外部效应的价值, 包括温室气体排放 (ΔGHE_{ij})、大气污染 (ΔP_{ij}) 以及交通安全 (ΔS_{ij})。

1) 运营者收益:

$$\sum_i \sum_{j,m} T_{ijm}^1 \times (\tau_{ijm}^1 + c_{ijm}^1) - T_{ijm}^0 \times (\tau_{ijm}^0 + c_{ijm}^0). \quad (3)$$

2) 政府收益:

$$\sum_i \sum_{j,m} (T_{ijm}^1 - T_{ijm}^0) \times (F_{ijm} + M_{ijm}). \quad (4)$$

3) 外部效益:

$$\sum_i \sum_{j,m} (T_{ijm}^1 - T_{ijm}^0) \times (GHE_{ijm} + P_{ijm} + S_{ijm}). \quad (5)$$

根据计算, 运营成本 (c_{ijm}) 和分方式的出行时间 (t_{ijm}) 与每个 OD 对有很大的关系(距离和出行时间不同)。较高的出行费用可能导致目的地小区的变化, 所以不同的方案情景下运营成本也有所不同。计算运营成本及出行费用有助于提高对于消费者盈余的估计精度, 因为较高的时间成本使出行者更倾向于短距离出行或者选择较便宜的出行方式。因此, CS 又可以拆分成基于交通方式 m 的通勤出行和其他出行。

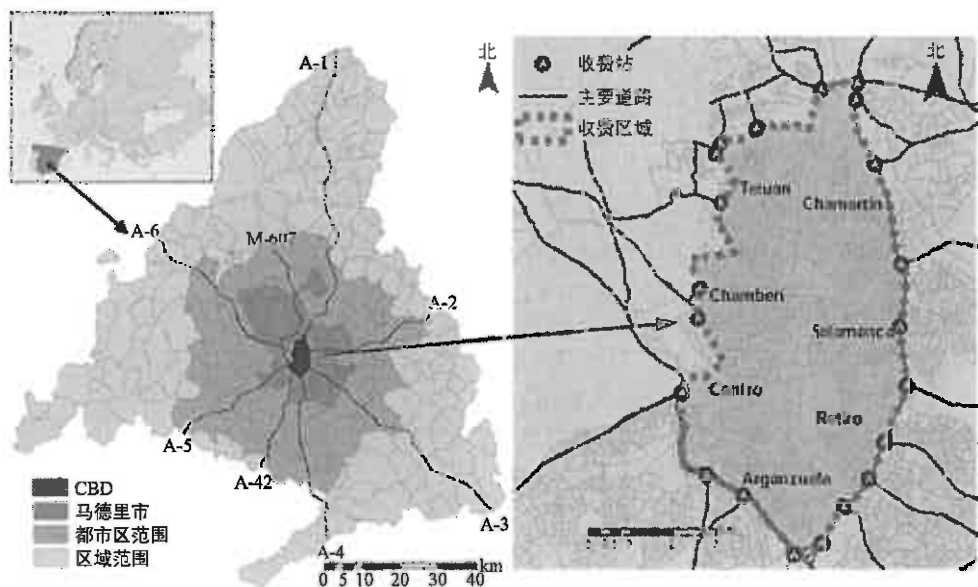


图3 研究区域(马德里市)

Fig.3 Study area - Madrid

3.3 马德里市案例分析

如图3所示,马德里市在CBD区域实施拥挤收费策略。收费区域面积约为41.8 km²。建模区域的基本信息见表3。根据马德里市2004年居民出行调查^[2],约有25万小汽车出行者居住在收费区域(CBD)内而工作地点在外围地区,同样也有26万小汽车出行者居住在外围地区而工作地点在CBD区域内。

马德里市MARS模型主要将收费区域划分为90个小区进行描述。

在收费区域边缘(图3中虚线所示)设置若干收费站。在道路收费政策中,假设驾驶人经过收费区域时自动收取费用而不必停车;使用收费道路的出行者无论驾车类型以及居住地位置,都需要支付相同的费用。

本研究不考虑在马德里市实施和运营收费策略的费用,而且马德里市收费策略可以在现有的高速公路上实施,因为2007年该市就已经在各个入口配置了这样的收费站以及管理控制中心等设施。因此,如果运营系统采用现代化的电子标签收费技术,则与收费管理有关的额外费用就会相当少。

另一方面,在CBD区域实施停车收费,包括区内居民。为简化研究,停车费用采用居民现费用的平均水平,保持2.5欧元不变。

参考1996年和2004年的居民出行调查,可以发现马德里市内部出行量总体减少:1996—2004年从57.1%减少至48.6%^[6],同时,向外围区域的出行、外围环线之间的径向出行(radial trips)以及外围环线区域内的出行相对快速增长。

总体来看,近年来马德里市中心区与外围区域之间的放射式出行总体比例在逐渐减小。1996—2004年发生了一个重大变化:出行活动的分散使大都市区人口迅速扩张(见图4)。这对系统模型的分布和效率产生很大影响,因为最迅猛的扩张恰恰出现在那些以小汽车作为主要出行方式的区域。

3.4 方案情景

参考方案(A0)仅包括2004年已建的基础设施,不考虑30年内(2004—2034年)任何的设施变化。在A0方案下,社会净福利设置为0。备选方案A1中确定的最优定价使

NPV目标函数(与A0方案相比之下的社会福利增加值)达到最大。

定义最优化程序之后,假定在一般情形下定价策略可以应用于评估的任一时间段($t=1, 2, \dots, 30$)。这样,对于每一个措施理论上都应该有30个最优解。然而,根据文献[27]的研究,由于最优化策略应容易理解,以直观的方式展现给决策者,因此研究中并未涉及这么多最优解。

在本案例中,优化程序应用了两个变量:短期最优定价值(2010年)以及长期最优定价值(2034年)。研究假定2010—2034年收费呈线性增长。另外,针对一日内两个时段进行收费最优化:高峰时段和非高峰时段。收费策略仅针对客车,研究始于2004年而收费政策假定实施于2010年。经济和人口增长等外部变量的预测基于由文献[47]整理的官方数据。

4 研究结果

该项研究评价了收费策略的整体影响,主要结论显示研究所得到的某一收费策略(或几个组合)可能会对城市的长远发展有很大帮助。

图5展示了最优定价策略的评估结果,该评估基于30年的社会净收益。案例研究结果显示,马德里市的最优定价策略是:高峰时段2010年收费1欧元,2034年收费2欧元;非高峰时段不收费。

研究中提到的非高峰时段不收费是因为

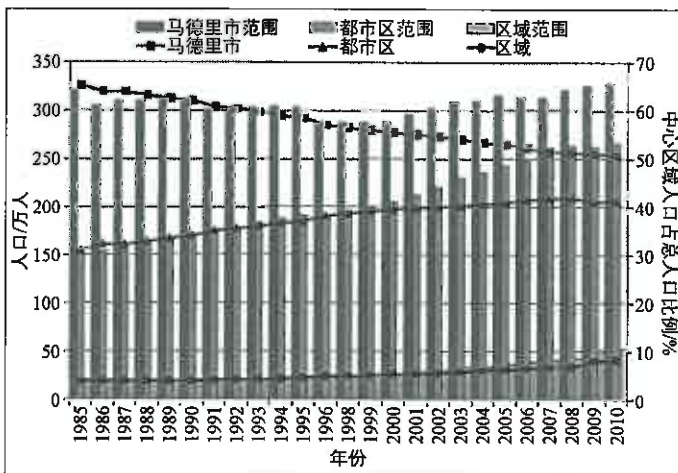


图4 马德里市区域人口变化(按环线区域)

Fig.4 Evolution of the population (by rings) in Madrid Region

这些时段没有出现严重的交通拥堵,这与文献[17]和[48]的研究结果相一致。出行时间节省是成本效益分析中最相关的因素^[49]。通过收费政策可节省的时间成本有限,达到收费方案最佳值时的时间成本节约几乎为0。而根据文献[17]和[48]的研究,高峰时段道路最优收费值是5欧元,非高峰时段是2欧元(固定值而非最优值)。

可以看到,收费策略的实施会使社会福利直接下降,这是由于该阶段是对策略的适应期。收费措施成本会对广义费用产生直接影响,继而对居民行为产生影响,从新的不同平衡条件中得到的出行时间也会发生变化,因为其依赖于每个系统中存在的需求。

这意味着居民会有一段时间来适应新的系统环境。长达一年的适应期在年度社会盈余评估中体现。出行者能够应对当下出行成本的变化,但从增加的道路通行能力中获益

会延迟一段时间,此时系统已经实现了新的平衡。

与预期相似,2034年在收费时段内进入收费区域的小汽车交通量将减少9%。如图6所示,在向心出行(外围区域至中心区的出行)中,交通方式的使用发生变化,有大约3%的出行由小汽车转移至公共交通。这一交通方式的转移为公共交通带来了2200万欧元的税收收入。另外,由于进出城市中心区的通道通行能力的增加,交通拥堵明显减少。车速的增加不仅使小汽车使用者受益,同样也提高了公共交通的服务水平。这给公共交通出行者节约的时间价值相当于9760万欧元。然而,6%的向心小汽车出行者改变了其目的地,与其他区域相比,CBD的吸引力急剧减弱。

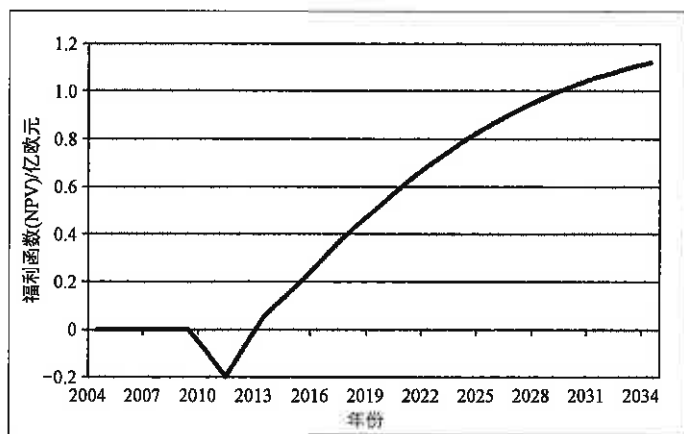
关于CBD区域内部出行,该方案通过减少城市中心区道路的使用,使延误降低3%,更多CBD地区居民选择在免费时段使用小汽车。应对这些动态的变化需要适时调整收费制度(收费政策随时间变化并非不可能)^[4],或者需要与其他交通政策同时使用,例如新的停车收费政策。

表4是马德里市中心区收费产生的成本与收益的净现值(与方案A0相比的福利盈余)。重点是显著地节省了时间和由于环境影响(污染和CO₂排放)引发的外部费用。收费区域内由于车速增加导致交通事故率增加,会产生更高的事故费用。

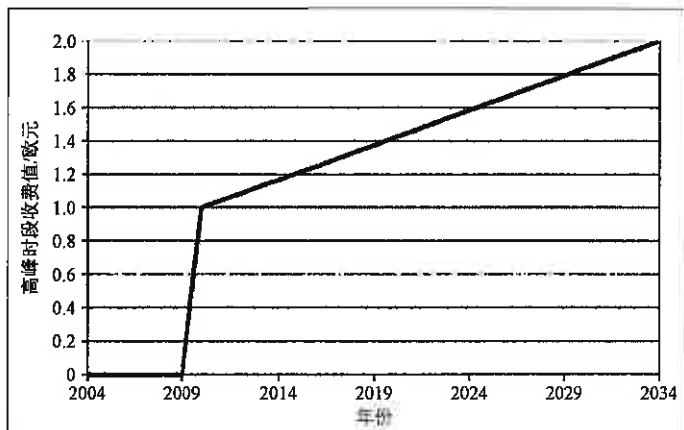
受小汽车使用减少的影响,燃油税也相应减少。虽然小汽车平均出行距离增加,但是需求增加量(车公里)相比出行量减少引发的车公里数小得多。速度增加而能耗减少,能耗随速度单调递减。小汽车使用的减少(节省的车公里数)也带来了更低的道路维护成本(节约了290万欧元),加上燃油利用率提高,政府的税收也有所减少。

得到的NPV受社会折现率(4.8%)的影响很大。这一比率比英国采用的值高^[17]。这意味着相对于短期效益来说,低估了长期效益,如果研究中的建设维护成本采用4.8%的折现率,可能会损害最后的社会福利。该研究没有针对财政约束对目标函数进行最优化,但有实现的可能性。

虽然收费策略的主要目标不是为了增加财政收入,而是减少中心区的小汽车交通拥



a



b

图5 高峰时段社会福利和最优收费值

Fig.5 Social welfare and optimal toll value during peak period

堵,但这一收费策略依旧增加了7.36亿欧元的净收入,可用于实施其他补充措施。政策组合的收益往往大于各项收益累加之和^[48]。

该措施已经在马德里市局部区域得到实施(马德里市域面积的0.52%,所有机动车出行的25%),然而对用地模式(居住地和 workplace 之间的反馈)的影响还很有限,产生的效果也不太明显。

研究得到的结果显示,应用CBA分析方法更看重社会成本(交通事故)以及节省的时间价值,而对环境等外部效应的重视程度相对较少。在可持续发展大背景下,这项研究也许不是城市交通政策规划的最合适方法^[50]。当网络运行效率的优先级较高时,研究结果的可持续性往往会受到影响。

5 结论

由于交通政策决策者需要通过最优策略实现城市福利最大化,特提出本方法。这一过程需要明确道路收费区域合适的通行费以使社会福利最大化。

最佳收费考虑了施加于道路使用者、管理者或外部环境的社会盈余,同时也考虑了用地和交通的动态变化,并与不采取措施的方案情景进行长达30年的对比预测。

鲍威尔的直接优化方法能够快速达到收敛,因此最适于解决这类优化问题。这一方法的优势在于其能与模型很好的整合并且快速的收敛,而且不需要对目标函数的梯度做明确的计算^[49],但由于该目标函数的复杂性,很难得到其梯度。研究结果显示该优化方法有效,并且能适用于不同的目标。

优化过程的结果显示,对小汽车征收通行费可以产生可观的净收益。评估的最佳收费值相比其他收费方案明显偏低。

由于模型的研究区域以及研究人口各不相同,不同的人口应该有不同的收费政策,因此本研究结论不能直接与其他CBA结论对比。另外,得到的净现值高度依赖于社会折现率,在本案例中采用了4.8%的比率,显著高于其他研究采用的3.5%^[4, 17, 48]。另一方面,在CBA方法中对正收益起主要作用的是出行时间节省。与英国模型相比,较低的时间价值假设可能会导致较低的拥挤收费。

尽管如此,引入收费政策已验证常见的结果:小汽车使用者的出行时间减小,公共

交通使用者和管理者也相应受益。

因此,政策的初衷已经实现: CBD 等敏

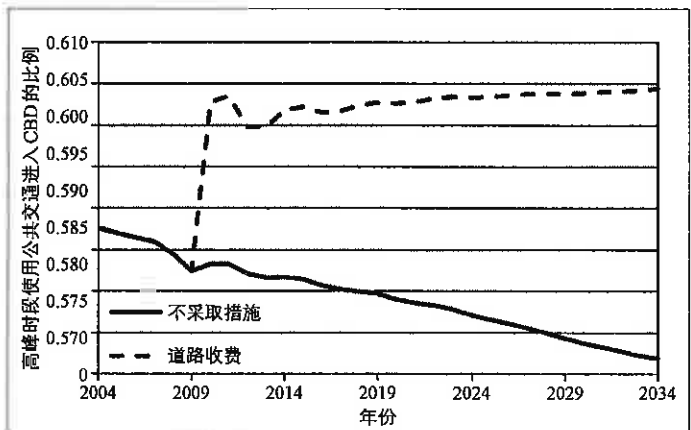
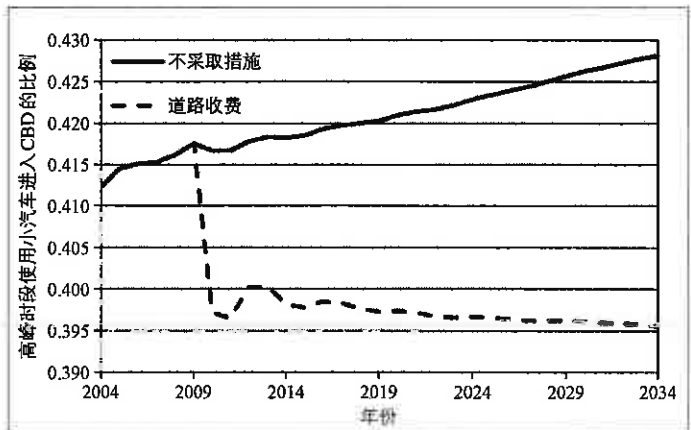


图6 进入CBD区域的出行方式中小汽车和公共汽车的比例

Fig.6 Percentage of car and PT trips among all motorized trips entering CBD

表4 马德里道路收费方案A1与A0相比较的差值(NPV)

Tab.4 Surplus A1/A0 of the Madrid road charge scheme for the optimal toll value [NPV M] 万欧元

类别	子类别	时间节省	运营成本	其他费用	行政支出 百万	合计
小汽车	半辆(PH)	+12 050	+1 340	-91 100		-77 710
	车辆(VH)	+90	-10			-60
公共 交通	乘客(PH)	-9 760				-9 760
	乘客(VH)	+20				-20
政府	燃油税				-2 860	-2 860
	道路维护费				+290	+290
运营商	停车费收入				-13 270	-13 270
	通行费收入				+87 250	+87 250
	票价收入				+2 200	+2 200
外部 环境	交通事故			-1 320		-1 320
	CO ₂			-530		+530
	NO _x 和PM10			-150		+150
合计		+27 920	+1 330	-91 650	+73 600	-71 260

1) 表示高峰时段; 2) 表示非高峰时段。

感区域内小汽车使用减少、车速提高,使区域内的交通容量释放,小汽车灵动性增加。此类区域通常具有高度可达性和便捷的公共交通服务,但收费政策依旧值得考虑。同样的,周边区域的出行按小区重新分布,与放射式出行相比沿圈层横向出行有所增加。从马德里市交通系统结构来看,虽然这类影响很小,但会在大交通系统中产生一部分不易被捕捉到的小汽车出行量。

另一点需要强调的是,由于道路拥堵减少,车速得到提高,这不仅影响了小汽车使用者,而且也对公共交通使用者产生一定的影响。

本文假定收费站的设置位置是最佳的,然而其他研究表明收费站的位置会在很大程度上影响收费效果^[51]。但这一优化问题已超出本文的研究范围。

最大的社会效益可能来自交通拥堵的减少以及将盈利投资于改善交通领域的其他方面。不过,优化方案中环境因素并没有得到应有重视,也反映出采用的评价方法和基于成本效益分析的目标函数是将提高网络系统本身的效率放在首位,而忽略了其他的可持续因素(社会和环境问题)。因此,后期研究应当聚焦于优化CBA,立足建立涵盖可持续性在内的目标函数。根据文献[52]关于城市交通系统社会可持续性方面的研究,多因素分析法(Multicriteria Analysis, MCA)更适合于建立可持续性的优化模型。

此外,后续研究还需要考虑短期和长期最优收费值相互独立的情况下对社会福利优化过程产生的潜在影响。尽管现有收费措施规定了初始值与终止值,但这一收费政策是基于整个时期的评估。这就意味着需要考虑每年的社会盈余。如果将每段时期单独考虑,可能会得到与现在方法不一样的结论。

结果证明,收费政策应当融合其他交通政策,相互完善以期提高可持续性,尤其是多管齐下能够产生可观的交通运营收益盈余。

因此,为了达到可持续的目标,最优方法不应该仅仅针对某一项措施(收费政策),而应扩展至相互存在协同关系的政策组合中。毋庸置疑,为了使效益最大化,小汽车使用者应当为出行行为负责(如空气污染和道路拥堵税),文中已充分证明,多重收费政策和优惠政策多管齐下能够在不损害未来交通需求的同时满足当下的交通需求,实现

可持续化^[53]。

致谢

对“Spanish Ministerio de Ciencia e Innovación (TRA2008-06682)”项目的财政支持表示由衷感谢。

声明

Disclaimer

文章的中文翻译未经《国际可持续交通杂志》(*International Journal of Sustainable Transportation*)、英文原文作者,以及Taylor & Francis集团审阅。文章中文翻译相关的责任由译者承担。

The translation of the full article was not confirmed by *International Journal of Sustainable Transportation*, the original article's authors, or Taylor & Francis, and any responsibility for the translation belongs with the translator.

参考文献:

References:

- [1] Rich J, Nielsen O A. A Socio-Economic Assessment of Proposed Road User Charging Schemes in Copenhagen[J]. *Transport Policy*, 2007, 14(4): 330-345.
- [2] Ferrari P. Road Network Toll Pricing and Social Welfare[J]. *Transportation Research Part B*, 2002, 36(5): 471-483.
- [3] Litman T. London Congestion Pricing, Implications for Other Cities[M]. Victoria: Victoria Transport Policy Institute, 2006.
- [4] Leape J. The London Congestion Charge[J]. *The Journal of Economic Perspectives*, 2006, 20(4): 157-176.
- [5] Santos G, Li W W, Koh W T H. Transport Policies in Singapore[J]. *Research in Transportation Economics*, 2004, 9: 209-235.
- [6] Lauridsen H. The Impacts of Road Tolling: A Review of Norwegian Experience[J]. *Transport Policy*, 2011, 18(1): 85-91.
- [7] Eliasson J. A Cost-Benefit Analysis of the Stockholm Congestion Charging System[J]. *Transportation Research Part A*, 2009, 43(4): 468-480.
- [8] Ramjerdi F, Minken H, Østmoe K. Norwegian Urban Tolls[J]. *Research in Transportation Economics*, 2004, 9: 237-249.
- [9] Rotaris L, Danielis R, Marcucci E, Massiani

- J. The Urban Road Pricing Scheme to Curb Pollution in Milan, Italy: Description, Impacts and Preliminary Cost-Benefit Analysis Assessment [J]. *Transportation Research Part A*, 2010, 44(5): 359-375.
- [10] Buehler R, Pucher J. Sustainable Transport in Freiburg: Lessons from Germany's Environmental Capital[J]. *International Journal of Sustainable Transportation*, 2011, 5(1): 43-70.
- [11] Sterman J D. *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World* [M]. New York: McGraw Hill Higher Education, 2000.
- [12] Miller J H. Active Nonlinear Tests (ANTs) of Complex Simulation Models[J]. *Management Science*, 1998, 44(6): 820-830.
- [13] Dangerfield B, Roberts C. Optimization as a Statistical Estimation Tool: An Example in Estimating the AIDS Treatment-Free Incubation Period Distribution[J]. *System Dynamics Review*, 1999, 15(3): 273-291.
- [14] Coyle G. Qualitative and Quantitative Modeling in System Dynamics: Some Research Questions [J]. *System Dynamics Review*, 2000, 16(3): 225-244.
- [15] Timms P M, May A D, Shepherd S P. The Sensitivity of Optimal Transport Strategies to Specification of Objectives[J]. *Transportation Research Part A*, 2002, 36(5): 383-401.
- [16] Pfaffenbichler P C, Shepherd S P. A Dynamic Model to Appraise Strategic Land-Use and Transport Policies[J]. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 2003, 2(3/4): 255-283.
- [17] Shepherd S P, Zhangb X, Emberger G, Huds M, May A D, Paulley N. Designing Optimal Urban Transport Strategies: The Role of Individual Policy Instruments and the Impact of Financial Constraints[J]. *Transport Policy*, 2006, 13(1): 49-65.
- [18] Liu S, Triantis K P, Sarangi S. A Framework for Evaluating the Dynamic Impacts of a Congestion Pricing Policy for a Transportation Socioeconomic System[J]. *Transportation Research Part A*, 2010, 44(8): 596-608.
- [19] Haghani A, Lee S Y, Byun J H. A System Dynamics Approach to Land-Use Transportation System Performance Modeling Part I: Methodology[J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2003, 37(1): 1-41.
- [20] Haghani A, Lee S Y, Byun J H. A System Dynamics Approach to Land-use Transportation System Performance Modeling Part II: Application[J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2003, 37(1): 43-82.
- [21] Qian Y, Zhong Y, Yuan J. Investigating Traffic Congestion in Shanghai: A System Dynamics Approach[J]. *International Journal of Services Operations and Informatics*, 2006, 1(4): 363-379.
- [22] Safirova E, Gillingham K, Parry I, Nelson P, Harrington W, Mason D. Welfare and Distributional Effects of Road Pricing Schemes for Metropolitan Washington DC [J]. *Research in Transportation Economics*, 2004, 9(1): 179-206.
- [23] Safirova E, Houde S, Lipman D A, Harrington W, Baglino A. *Congestion Pricing: Long-term Economic and Land-use Effects*[M]. Washington DC: Resources for the Future, 2006.
- [24] Gupta S, Kalmanje S, Kockelman K M. Road Pricing Simulations: Traffic, Land-use and Welfare Impacts for Austin, Texas[J]. *Transportation Planning and Technology*, 2006, 29(1): 1-23.
- [25] Zhang X, Zhang H M, Huang H, Sun L, Tang T. Competitive, Cooperative and Stackelberg Congestion Pricing for Multiple Regions in Transportation Networks[J]. *Transport Metrics*, 2011, 7(4): 297-320.
- [26] Li Z-C, Lam W H K, Wong S C, Sumalee A. Environmentally Sustainable Toll Design for Congested Road Networks with Uncertain Demand[J]. *International Journal of Sustainable Transportation*, 2012, 6(3): 127-155.
- [27] Emberger G, Shepherd S P, May A D. The Effects of Appraisal Methodology on the Specification of Optimal Urban Transport Strategies[J]. *International Journal of Sustainable Transportation*, 2008, 2(1): 58-75.
- [28] Pfaffenbichler P C. *MARS-Metropolitan Activity Relocation Simulator*[M]. Saarbrücken: VDM Verlag Dr. Müller, 2008.
- [29] Levinson D M, Kumar A. The Rational Locator: Why Travel Times Have Remained Stable[J]. *Journal of the American Planning Association*, 1994, 60(3): 319-332.
- [30] Pfaffenbichler P C, Emberger G, Shepherd S

- P. The Integrated Dynamic Land Use and Transport Model MARS[J]. *Networks and Spatial Economics*, 2008, 8(2-3): 183-200.
- [31] de la Hoz D, Guzmán L A, Pfaffenbichler P C, Shepherd S P. Fuel Tax Levels Necessary to Achieve the Agreed Reduction Targets of CO₂ Emissions: The Case of Madrid[M]// Rauch S, Morrison GM, Monzón A. *Highway and Urban Environment*. Madrid: Springer, 2008: 377-386.
- [32] May A D, Shepherd S P, Timms P M. Optimal Transport Strategies for European Cities[J]. *Transportation*, 2000, 27(3): 285-315.
- [33] Mayhew L, Hyman G. Optimizing the Benefits of Urban Road User Charging[J]. *Transport Policy*, 2002, 9(3): 189-207.
- [34] de Palma A, Kilani M, Lindsey R. Congestion Pricing on a Road Network: A Study Using the Dynamic Equilibrium Simulator METROPOLIS[J]. *Transportation Research Part A*, 2005, 39(7-9): 588-611.
- [35] Vold A. Optimal Land Use and Transport Planning for the Greater Oslo Area[J]. *Transportation Research Part A*, 2005, 39(6): 548-565.
- [36] Zhang X, Paulley N, Hudson M, Glyn R. A Method for the Design of Optimal Transport Strategies[J]. *Transport Policy*, 2006, 13(4): 329-338.
- [37] Light T. Optimal Highway Design and User Welfare Under Value Pricing[J]. *Journal of Urban Economics*, 2009, 66(2): 116-124.
- [38] Powell M J D. An Efficient Method for Finding the Minimum of a Function of Several Variables without Calculating Derivatives[J]. *The Computer Journal*, 1964, 7(2): 155-162.
- [39] Brent R P. *Algorithms for Minimization without Derivatives*[M]. Toronto: Prentice-Hall, 1973.
- [40] Press W H, Teukolsky S A, Vetterling W T, Flannery B P. *Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing*[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.
- [41] Souto Nieves G. Discount Rates for the Evaluation of Public Investment: Estimations for Spain[R]. Barcelona: Dirección General de Investigación de la Generalitat de Catalunya, 2003.
- [42] CRTM. *Patterns of Mobility in Metropolitan Madrid*[R]. Madrid: Consorcio Regional de Transportes de Madrid, 2004.
- [43] Bickel P, Friedrich R, Burgess A, Fagiani P, Hunt A, De Jong G, Laird J, et al. *Developing Harmonized European Approaches for Transport Costing and Project Assessment*[R]. Stuttgart: European Commission, Directorate General Energy and Transport, 2005.
- [44] Sugden R. *Developing a Consistent Cost-Benefit Framework for Multimodal Transport Appraisal*[R]. London: Department for Transport, 1999.
- [45] Monzón A, Fernandez A, Jordá P. *Environmental Costs Account: A Base for Measuring Sustainability in Transport Plans*[C]//Rauch S, Morrison G M, Monzón A. *Proceedings of the 9th Highway and Urban Environment Symposium*. Madrid: Springer, 2008: 23-30.
- [46] Guzmán LA, de la Hoz D. *Urban Concentration: Towards a New Culture of Mobility*[J]. *Revista Carreteras*, 2009(167).
- [47] INE. Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid[EB/OL]. 2010[2011-04-13]. www.ines.es.
- [48] May A D, Kelly C, Shepherd S. The Principles of Integration in Urban Transport Strategies [J]. *Transport Policy*, 2006, 13(4):319-327.
- [49] Salling K B, Leleur S. Transport Appraisal and Monte Carlo Simulation by Use of the CBA-DK Model[J]. *Transport Policy*, 2011, 18(1): 236-245.
- [50] Satoh K, Lan L W. Development and Deployment of Sustainable Transportation[J]. *International Journal of Sustainable Transportation*, 2007, 1(2): 69-71.
- [51] May A D, Liu R, Shepherd S, Sumalee A. The Impact of Cordon Design on the Performance of Road Pricing Schemes[J]. *Transport Policy*, 2002, 9(3): 209-220.
- [52] Boschmann E E, Kwan M. Toward Socially Sustainable Urban Transportation: Progress and Potentials[J]. *International Journal of Sustainable Transportation*, 2008, 2(3): 138-157.
- [53] Santos G, Behrendt H, Teytelboym A. Part II: Policy Instruments for Sustainable Road Transport[J]. *Research in Transportation Economics*, 2010, 28(1): 46-91.