

# 城市交通效率的多目标评价方法研究 ——以北京市城六区为例

季 珏<sup>1,2</sup>, 高晓路<sup>2</sup>, 刘星辰<sup>2</sup>

(1. 住房和城乡建设部城乡规划管理中心, 北京 100835; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**摘要:** 高速城镇化和机动化阶段, 面临与日剧增的环境压力, 城市交通的多目标发展成为交通可持续发展的关键。在提升居民出行满意度的同时, 降低交通碳排放是目前及未来城市交通可持续发展关注的核心目标, 是城市交通效率的主要内涵。由此, 本文从交通出行便捷与交通碳减排双目标综合评估的角度, 提出基于中观尺度的城市交通出行满意度和交通碳排放的定量测算方法; 并利用数据包络分析(Data Envelopment Analysis, DEA)法探讨城市交通综合效率评价方法。对北京市城六区的实证结果显示, 在三环以内地区, 城市交通综合效率较高, 五环以外大部分地区较差。交通综合效率较高的地区集中分布于: ①西三环至西四环万寿路街道的公主坟-五棵松地区。②北三环和平里街道安贞桥附近地区。③东北三环的三里屯地区。而综合效率较差的地区大多位于城市外围, 例如西北六环周边, 西南五环至西南六环部分地区, 以及东五环外常营地区等, 交通碳排放较高是这些地区交通效率较差的主要原因。此外, 交通效率的空间差异与地理空间环境的差异性呈现高度的相关。例如, 交通效率较差的地区大多是高档别墅区集聚的地区, 以及城市五环周边公共交通不完善的部分居住区。通勤中机动化比例较高和通勤距离较长是碳排放强度较高的主要原因。

**关键词:** 交通效率; 多目标综合评价; 数据包络分析; 交通碳排放; 交通满意度

## 1 引言

城市机动化的高速发展在一定程度上给居民带来了更加丰富的出行选择, 提升了部分城市居民的出行便捷性。但与此同时, 快速的机动化也带来了严重的城市交通和环境问题。在中国特大城市, 接踵而至的城市环境污染和交通拥堵等大城市病尤为明显。为了积极应对这些大城市病, 北京等特大城市力图从行政手段、城市交通建设等多个方面入手解决城市交通问题。例如北京市利用摇号上牌和路面限号来干预路面小汽车的数量, 这种行政手段在一定程度上可以缓解城市交通拥堵的交通

问题, 但却牺牲了部分社会群体的利益。显然, 以大力发展小汽车为导向的追求交通便捷性和最大限度抑制小汽车为导向的追求城市交通环境效益的政策和措施都是片面的, 违反了城市交通可持续发展的内涵。未来, 如何在提升居民出行便捷性的同时, 降低交通对于城市环境的影响是综合测评城市交通效率需要考虑的关键问题。

为解决上述关键问题, 首要的是如何理解城市交通效率的内涵, 以及如何对城市交通效率进行多目标测评。以往学者们对于城市交通效率关注的目标大多都是单目标的。例如关注交通的便捷性(高晓路等, 2009), 居住与就业匹配的交通问题

收稿日期: 2015-02; 修订日期: 2015-05。

基金项目: 博士后基金项目(2015T80126, 2014M550820); 国家自然科学基金项目(41171138); 国家软科学研究计划项目(2014GXS4B072) [Foundation: China Postdoctoral Science Foundation, No.2015T80126, No.2014M550820; National Natural Science Foundation of China, No.41171138; Soft Science Project, No.2014GXS4B072]。

作者简介: 季珏(1985-), 女, 内蒙古人, 博士, 主要研究方向为城市空间结构评价、城市交通、环境性能评价、GIS空间分析等, E-mail: jitutu99@163.com。

通讯作者: 高晓路(1969-), 女, 内蒙古包头人, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为城市与区域规划, 居住环境评价, 城市地理等, E-mail: gaolx@igsnrr.ac.cn。

引用格式: 季珏, 高晓路, 刘星辰. 2016. 城市交通效率的多目标评价方法研究: 以北京市城六区为例[J]. 地理科学进展, 35(1): 118-125. [Ji J, Gao X L, Liu X C. 2016. Multi-objective evaluation of urban transportation efficiency: Take Beijing as an example[J]. Progress in Geography, 35(1): 118-125.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2016.01.013

(Kan, 2002; 郑思齐等, 2011), 交通设施配置的可达性(Martínez, 1995; 孟斌, 2009), 城市交通的低碳性(马静等, 2011), 公共交通的服务水平等(Ji et al, 2010)。极少有学者关注城市交通效率的多目标性, 可能是由于对交通效率的内涵理解不全面, 以及多个目标的综合方法不清晰等。特别是当多个目标有冲突时, 如何考虑各个目标的相互作用和矛盾关系, 求得最优的决策或评价方案成为难点问题(白鹤松, 2008)。例如对于城市居民来讲, 私家车的普及率越高, 交通出行的便捷度会越高; 然而交通的负外部性则会导致社会交通成本的上升, 以及有损城市交通的环境效益。如何决策交通的便捷性和城市环境效益两个目标就成为难点问题。此外, 以往对于交通发展水平或交通碳排放定量测算的研究中, 多个目标之间面临着尺度不一和量纲不一的问题。例如, 有以时间、距离等作为可达性的测评指数(曹小曙等, 2013), 也有学者以个人的满意度作为出行便捷度的评价指数(Ji et al, 2010); 而交通碳排放测算则多以能源消耗数据, 或者依据个人活动出行数据来推算(马静等, 2011)。这些定量指标的评价尺度和数据来源多元化, 要想实现精细化的空间评价, 如何在同一尺度上利用这些量化的指标成为难点问题。

本文认为, 为居民提供便捷的交通出行是交通效率关注的最主要目标。与此同时, 由于城市发展对环境带来的负外部性与日剧增, 降低城市交通的负外部环境的影响也是城市交通未来关注的目标之一。最优的城市交通效率是城市出行便捷度的最大化与城市交通碳排放的最小化。基于此, 本文主要研究解决两个基本的问题: ①如何对各个目标进行定量的测度; ②如何对于相互矛盾或相互作用的各个目标在同一空间尺度上进行多目标测评, 即评价城市交通效率。

## 2 多目标综合评价的方法探讨

在多目标评价的方法中, 模糊评价法、层次分析法等成为最常用的评价法(徐建华, 2006; 张侠等, 2009; 方国华等, 2011), 但这些方法的主观性较强, 客观数据的作用明显不足, 评价结果对于决策者的决策偏好十分依赖, 而对解决多个目标冲突问题贡献不足。相对而言, 数据包络分析(以下简称 DEA)评价虽然算法复杂, 但其对解决量纲不一的相对效率问题具有突出的作用, 且对于决策者的主

观依赖较小。基于此, 本文利用 DEA 多目标评价法对于包含城市交通满意度以及交通环境效益的城市交通效率进行测评。

### 2.1 DEA 多目标评测方法

数据包络分析(Data Envelopment Analysis, DEA)由美国著名运筹学家 Charnes、Cooper 和 Rhodes 于 1978 年首先提出, 是一种主要衡量效率相对有效性的非参数方法。其原理是通过保持决策单元(Decision Making Unit, 简称 DMU)的输入或输出不变, 借助数学规划方法确定相对有效的生产前沿面, 将各 DMU 投影到 DEA 的生产前沿面上, 并通过比较各 DMU 偏离 DEA 前沿面的程度来评价其相对有效性。DEA 分析不需要主观的权重系数, 完全依靠客观信息评价效率情况, 在处理具有多投入、多产出指标的同类型部门间的效率问题时, DEA 具有明显的优势。

### 2.2 交通效率的 DEA 评价

DEA 分析的最终目的是要评价同类决策单元效率的有效性的问题, 其有效的意义是以最小的投入换取最大的产出。具体到城市交通效率的评价中, 需要对城市的出行便捷度和交通碳排放进行综合评测。交通碳排放和出行便捷度与经济系统中投入和产出的关系十分类似, 即城市交通可持续发展的目标是以最小的交通碳排放获取最大的出行便捷度。交通发展综合效率的评估, 要考虑以最小的投入获得最大的经济产出, 与运用 DEA 进行综合效率测评的思路十分吻合。在此, 本文利用 DEA 方法对于城市交通综合效率进行评估。

本文以图示说明交通效率 DEA 分析的基本思路。图 1 中 M1-M5 表示 5 个地区交通碳排放和交通便捷度的组合。M1 和 M3 相比, M3 点由于出行便捷度较高, 交通效率优于 M1 点; M1 和 M4 相比, 同样的出行便捷度水平下, 由于 M4 的交通碳排放水

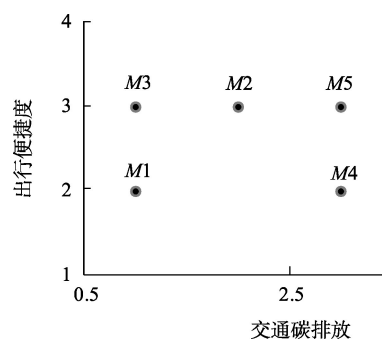


图1 交通效率评价示意图

Fig.1 Schematic diagram of transportation efficiency

平较高,则其交通效率低于M1点。

### 3 城市交通效率的定量测评方法

#### 3.1 交通碳排放的定量测评方法

交通碳排放,是居民在出行过程中由于选择了特定的交通方式,在出行过程中产生的。基于此,本文对于交通碳排放的测算,主要是从居住的角度出发,研究居民每日出行中到达各类目的地过程中所产生的碳排放强度,其计算的结果实际是静态的归结到起始地,是平均水平,而并非具体到碳排放产生的动态过程。

从源头来讲,交通碳排放量主要由居民出行距离、出行频率、出行方式以及出行目的决定。据此,本文提出交通碳排放的估算方法:

$$C_{jk} = \sum_{i=1}^n \gamma_{ijk} \times \eta_i \times \beta_{ijk} \times R_{jk} \times T_{jk} \quad (1)$$

式(1)中: $C_{jk}$ 表示第 $j$ 个评价尺度内基于第 $k$ 种出行目的的平均碳排放强度,单位为 $\text{g}/\text{人}$ ;  $\gamma_{ijk}$ 为第 $k$ 种出行目的的第 $i$ 种交通方式在第 $j$ 个评价单元内的比例;  $\eta_i$ 为第 $i$ 种交通方式的碳排放标准系数;  $\beta_{ijk}$ 为 $j$ 个评价单元内第 $k$ 种出行目的下,使用交通方式 $i$ 的居民的平均出行距离;  $R_{jk}$ 为第 $j$ 个评价单元内第 $k$ 种出行目的的比例分布;  $T_{jk}$ 为第 $j$ 个评价单元基于第 $k$ 种出行目的的出行频率的比例构成。

需要说明的是,在测算中,交通方式构成、交通距离、出行频率等均为出行的基本特征变量,可通过行为调研方式获取。而模型中不同交通方式的碳排放标准系数 $\eta_i$ 为目前需要估测的参数,柴彦威等(2011)学者根据中国各种交通方式的能耗和碳排放系数进行了推算,本文以此为参考。

#### 3.2 出行满意度的定量测评方法

人是交通便捷与否的主要体验者,如仅以空间

覆盖率、空间邻近性等客观数量指标来刻画城市交通便捷性,虽然容易度量,但难以体现城市居民差异化和多元化的交通出行。而出行满意度是居民在出行过程中对于客观出行环境和出行过程的评价和感受,能够间接地反映城市交通的便利程度。但难点是由于满意度为主观的感受,不能直接观测。目前学者们常用的获取居民出行满意度的方式是通过调研,例如张文忠等(2006)在北京的出行评价研究中,根据不同的出行目的,例如通勤、日常出行等,在受访者中按照满意程度对便利性进行打分,以此获取满意度评价的空间分布。

而将个体抽样的出行满意度进行城市尺度上的定量推测,则是依据个人出行的效用函数按照多元序次Logistic模型进行满意度的推导。

$$U(x) = \sum_{i=1}^n a_i x_i + \varepsilon \quad (2)$$

式(2)中: $U(x)$ 为居民的选择效用; $x_i$ 为影响因素,例如城市交通设施的覆盖率和邻近性,城市实体环境指标,居民属性等; $a_i$ 为权重系数,即当其余变量保持不变, $x_i$ 变化一个单位,则居民效用相应地变化 $a_i$ ;  $\varepsilon$ 为效用函数的常数项。

$$\begin{aligned} \log\left(\frac{P_1}{1-P_1}\right) &= U_1(x) \\ \log\left(\frac{P_1+P_2}{1-P_1-P_2}\right) &= U_2(X) \\ \log\left(\frac{P_1+P_2+P_3}{1-P_1-P_2-P_3}\right) &= U_3(X) \end{aligned} \quad (3)$$

以满意度评价四类为例,式(3)中 $P_1, P_2, P_3$ 为类别为因变量取第一类、第二类和第三类的概率,第四类作为对比的基准水平。满意度的选择以概率最大的原则进行定量推测。

### 4 北京市城市交通效率多目标评估的实证分析

#### 4.1 数据来源及空间尺度确定

北京市中心城区居民出行的满意度评价数据来自于2005年北京市居民对于通勤出行满意度的调查数据(张文忠等, 2006),包括在北京市中心城六区(原城八区)以及城郊回龙观居住区范围内共获取的样本7341份。调研中,通勤出行满意度以分级的方式分为非常满意、比较满意、一般、比较不满意、非常不满意五类。此项大样本空间数据能够较均衡的反应中心城区交通满意度的空间特征,本文将

表1 不同交通方式的碳排放强度(柴彦威等, 2011)

Tab.1 Carbon intensities of various traffic modes (Chai et al, 2011)

交通类别	交通方式	碳排放强度/ ( $\text{g}/(\text{人} \cdot \text{km})$ )
小型汽车类	私家车、出租车、单位配车	135.0
公共汽车类	公共汽车、单位班车、物业和购物巴士	35.0
轨道交通类	地铁/城铁	9.1
个人助动类	电动车、残联助动车、轻型摩托车	8.0
其他	步行、自行车	0.0



以此为基础,利用模型对其进行空间和时间的推演。

而用于计算居民出行碳排放的数据需要进行居民的出行行为调研。北京大学行为调研小组于2007年对于不同类型居住区居民出行行为进行了调研(柴彦威等, 2011),包括出行距离、出行方式、出行时间等,在此利用该项共享数据作为碳排放研究的基础。

首先,为了突出北京市中心城区空间上的差异性,本文以城市路网形成的街区为空间尺度进行精细化的评价。具体是以城市次干路为基础,同时考虑到三环以内居民空间出行的空间范围有收敛的趋势,所以三环以内以城市支路为基准组成的城市街区为基本评价单元,共计1049个。

其次,考虑到在街区尺度上进行交通碳排放的测算,需要对各街区内部交通方式构成、交通出行的平均距离等有基本的估算。由于城市交通行为受到空间环境的客观约束(Krizek, 2003; Kwan, 2012),在具有相似特征的地理环境下,居民的交通行为也具有一定的相似性。基于此,本文根据交通行为与城市空间环境的相互关系为基础(季珏等, 2012),以小区为单位,搜集各小区的二手房价、交通服务水平、规划特征等变量进行空间聚类,最终划分出5种不同类型的空间环境(表2)。依据5种类型所处的空间位置、主导的房屋类型(四合院、单位大院、别墅、政策性住房、其他普通商品房)、规划特征等,本文将5种类型标定为:高档别墅区、外围中档区、历史老城区、高档高密度区、成熟完善区。

结合行为调研的数据,分析得出上述5类空间环境的小区在交通方式比例、交通出行距离等方面

具有明显的差异性(表3)。例如成熟完善区居民平均通勤距离仅为5.8 km,远远低于高档别墅区及外围中档区居民。

据此,本文将行为调研所得的交通行为规律和居民构成按照5类小区与街区的位置关系,拓展至街区的评价单元,对于同一街区内部小区类型不一致的现象,进一步按照小区的泰森多边形将街区分割,最终得到本文的评价单元。

4.2 碳排放强度的空间估算

按照式(1)的计算方法,研究得出2007年北京市中心城区通勤出行碳排放的空间格局(图2)。由图2可知,目前北京市城六区交通通勤产生的碳排放强度呈现由中心向四周递减的趋势,即居住在城市外围的居民每日通勤的碳排放强度明显高于城市中心。

表3 不同环境类别居民交通行为特征  
Tab.3 Features of travel behavior in each type of residential area

环境类别	交通方式使用比例/%						平均通勤距离/km
	步行	自行车	地铁	小汽车	公共汽车	其他	
高档别墅区	3.0	1.0	10.0	80.0	5.0	1.0	16.8
外围中档区	11.7	9.7	16.8	29.3	30.3	2.2	11.1
历史传统区	7.8	30.2	4.0	5.1	47	5.9	10.1
高档高密度区	12.1	21.0	10.2	15.4	38.3	3.0	13.8
成熟完善区	16.6	21.5	9.4	10.8	38.2	3.5	5.8

表2 各类型区空间环境特征  
Tab.2 Features of transportation system in each type of residential area

类别	房屋主导类型	800 m内站点个数	1 km内地铁站点数	容积率	物业管理费/(元/(m <sup>2</sup> ·月))	二手房价/(万元/m <sup>2</sup> )	建成时间/a
高档别墅区	高档别墅	7.9	0.4	1.5	3.7	3.6	8.1
外围中档区	商品房	6.9	0.2	1.0	0.9	2.4	13.0
历史老城区	胡同、四合院	25.6	1.8	0.6	0.2	4.9	14.7
高档高密度区	商品房	17.7	0.7	3.7	3.2	3.2	9.6
成熟完善区	商品房	20.9	1.2	1.0	0.5	3.2	17.3

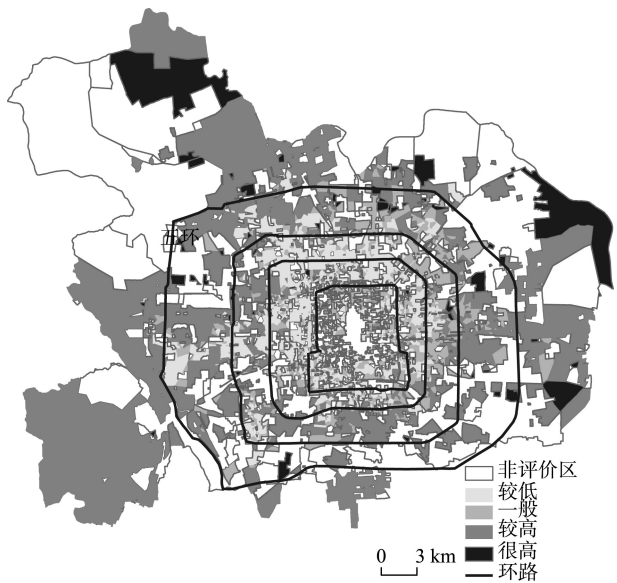


图2 北京市中心城区交通碳排放强度的空间格局  
Fig.2 Spatial distribution of travel-related CO2 emission in central Beijing

特别需要说明的是,在碳排放强度极高的地区,例如在机场高速沿线、海淀区金盏乡,以及城市内部的一些异质性地区如西北三环内角一侧,均是由于这些地区居住类型的差异性,例如别墅区、高档小区等所致,这些小区私家车拥有率较高,部分小区出行距离较长导致碳排放强度较高。

4.3 出行满意度的空间评价

由于满意度的收集是以调研个体为基础的,需要将个体的调研转换到空间评价单元的面域上。同时,交通效率多目标评价的年份需要一致,因此本文需要将2005年满意度评价的数据转换到2007年街区尺度。为此,通过前期研究的满意度评价模型(Ji et al, 2010),以各研究区的平均出行满意度作为因变量,道路优势度、公交800 m覆盖面积、地铁1 km覆盖面积、企业密度、通畅性评价、收入、年龄、平均通勤时间、机动化比例作为自变量等,建立回归模型。其中,为了单位的统一,对于非比例数据,统一采用标准化方法,将变量转化到[0, 1]之间,例如道路优势度、企业密度、平均通勤时间等。

经过逐步回归的筛选,共有5项指标进入回归模型,其中4项指标的显著性水平均在0.005以下,置信水平达到了99.5%。此外,我们对样本进行了不同数量抽样的检验,结果均证明模型的回归系数比较稳定,模型具有稳定性(表4)。

图3显示,北京市城六区出行满意度的空间分布呈现一定的集聚趋势。满意度相对较高的地区大多分布于城市五环以内,特别是西南三环至四环之间,以及东北部地区。而出行满意度评价较差的异质性地区主要分布于城市北五环的上地、立水桥等地区,丰台区的西南三环至西南四环地区,以及双井、劲松等地区,居民的出行满意度也较差。

表4 满意度估测模型的结果  
Tab.4 Regression results of the satisfaction model

变量	项目	估测系数	均方差	t统计量	显著性 概率
	常数项	3.041	0.072	42.080	<0.001
X1	低收入人群比例 (<3000元)	0.120	0.055	2.190	0.029
X2	公交覆盖面积 (800 m范围内)	0.068	0.037	1.830	0.067
X3	地铁覆盖面积 (1 km范围内)	0.096	0.024	4.060	<0.001
X4	老龄化比例(>60岁)	-0.261	0.164	-1.590	0.113
X5	企业密度	0.115	0.051	2.240	0.025
X6	道路优势度	0.251	0.086	2.920	0.004

4.4 城市交通效率的多目标评价结果

利用数据包络分析DEAP 2.1 软件,以各评价单元为决策单元DMU,各DMU的交通碳排放为投入,出行满意度作为产出,进行城市交通综合效率的评估(以下简称综合效率)。特别是,以综合效率为指标,利用1个标准差法对综合效率进行分级,共分为6个等级:很低、较低、一般、较高、很高,以及最佳,其中最佳为DEA有效地区,其他均为非DEA有效地区。

从2007年综合效率的空间分布来看,北京市城六区外围地区的综合效率较低,而城市中心地区特别是三环以内地区,综合效率较高。此外,城市北部整体的综合效率较高,而西部和南部的综合效率较低,特别是城市南部,三环以外大部分地区的综合效率为较低及以下水平,例如西北六环周边的上庄镇附近,西南五环至西南六环部分地区,以及东五环外的常营地区等。

图4中综合效率最高的地区,即DEA有效的地区,位于北三环和平里街道附近,是居民的出行满意度最高,平均通勤出行的碳排放最低的地区。而综合效率较高的地区主要集中在:①西三环至西四环万寿路街道的公主坟—五棵松地区;②北三环和平里街道安贞桥附近地区;③东北三环的三里屯地区。从空间环境类型来看,上述3个片区均属建成年代较早,周边的配套设施比较完善,交通也比较便利的地区,其居民出行的距离较短、通勤出行方

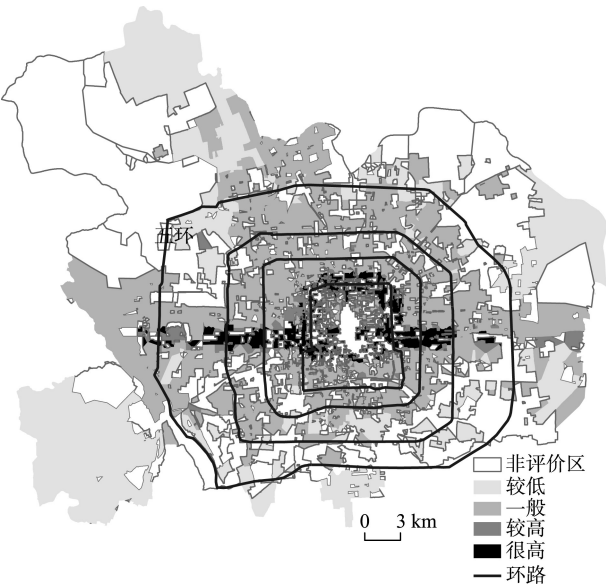


图3 北京市城六区出行满意度的评价  
Fig.3 Evaluation of travel satisfaction in central Beijing

式中公共交通的比例较高、私家车使用的比例较小,是综合效率较高的原因。

与单一目标评价结果不同的是,由于交通效率是由出行满意度和出行碳排放强度二者共同决定的,交通效率综合评价的结果更体现了目标的综合性。有部分地区出行满意度虽非常高,但由于碳排放的高水平而导致交通综合效率较差,这些地区大多位于城市五环周边及外围地区,从空间环境类型上多属于高档别墅区和外围中档区。

进一步分析发现,不同的地理环境类别,城市综合交通效率的差别很大,表5综合统计了各类别交通效率的分级比例。受到行为调研样本偏差的影响,由个体调研推至空间整体可能会导致该比例的绝对数值有所偏差。但从其比例分布的趋势可以看出,目前高档别墅区和外围中档区目前均为交通效率很低和较低的地区,而成熟完善区交通综合效率目前普遍较高。这一结论提示我们,未来针对不同的空间环境类型提升交通综合效率是主要的

着力方向。

对于高档别墅区和外围中档区而言,碳排放强度极高是造成其交通效率较差的主要原因。对位于城市外围、以高档别墅类型为主的地区来讲,依靠交通的规划和政策降低碳排放以达到DEA有效的目标可能较难实现。由于这些地区大多分布于城市外围,地理位置的特殊性,决定了其出行距离成本较大(表3所示,16.8 km);而与出行的经济成本相比,这些居民更重视出行的舒适性和满意度,导致机动化的使用比例极高。未来,即使公共交通体系的发展十分迅速,对该类型区内居民的吸引能力也会受到限制,公共交通很难与与私家车形成有力的竞争,因此政策的引导作用可能不会特别明显。

就外围中档区来讲,结合表3可以推测,居民平均通勤距离较长,出行方式构成中私家车的比例较高可能是其交通效率较差的主要原因。与高档别墅地区不同的是,出行的经济成本对这些居民存在一定的敏感性,相对来说,公共服务水平的不完善,尤其是地铁的服务水平较低(1 km内平均地铁站点数仅为0.6个)等成为影响该处居民机动化比例较高的主要原因。对该类地区,公共交通水平的提升,特别是轨道交通的发展,可能会大幅度降低通勤出行的时间(距离)成本,在出行时间和出行费用的相较下,可能会有部分群体的交通方式选择向公共交通转变。此外,提高该类型地区土地利用的混合程度,增加居民就近就业的概率,通过减少居民的平均出行距离(表2中为11.1 km),来降低小汽车的使用比例,也是减少碳排放强度,提高综合效率的重要手段。

此外,耐人寻味的是,历史传统区碳排放强度(24.2)略低于成熟完善区(28.9),公交站点和轨道交通站点的平均水平也相对较高,但其综合交通效率评价结果却低于后者,主要是由于出行满意度的差异形成的。由于满意度评价是由多个因素决定的,分布于二环以内的历史传统区,企业密度较低使其通勤距离较长(历史地区约10.1 km,成熟完善区只有5.8 km),同时由于老龄化比例较高可能使其对交通舒适性的需求得不到满足,使其出行满意度低于成熟完善区,造成综合效率平均水平也较低。

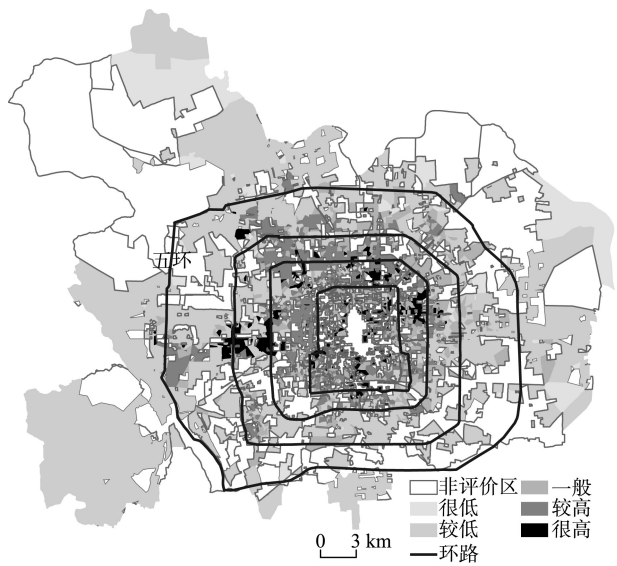


图4 城市交通综合效率的空间评价

Fig.4 Evaluation of travel efficiency in central Beijing

表5 各类型区综合效率的统计分析/%

Tab.5 Evaluation of travel efficiency in each type of residential area

空间环境类别	很低	较低	一般	较高	很高	总计
高档别墅区	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0
外围中档区	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	100.0
历史传统区	0.0	5.8	94.2	0.0	0.0	100.0
高档高密度区	0.0	18.3	81.7	0.0	0.0	100.0
成熟完善区	0.0	0.0	3.9	63.0	33.1	100.0

5 结论

在满足居民日益提升的多样化交通需求的同



时,如何降低城市机动化快速发展带来的负面环境效益也是交通可持续发展所面临的重要问题。本文从多目标评价的角度,拓展了城市交通综合效率的内涵,并利用DEA多目标评价法,综合测评了居民的活动效率和城市交通的环境效益。

(1) DEA评价法由于不受各评价目标的量纲影响,而且能解决多目标之间的冲突问题,评价结果可以反映相对效率。该方法对于城市交通效率的综合测评具有重要意义。

(2) 本文提出了基于城市中观尺度的城市交通碳排放的估算方法。交通方式,交通距离等个体的出行行为特征是决定交通碳排放的主要因素。但受限于个体调研的样本量和覆盖面问题,如何突破基于个体的碳排放估算方法的局限性成为难点问题。本文基于出行行为受到实体环境的约束特征,对实体空间环境进行类型划分,根据各类型内个体行为调研的特征总结,获取各类型内交通出行的特征,进而在城市中观尺度进行城市碳排放的估算。该方法为数据的尺度转换提供了基础。

(3) 北京市城六区交通效率的DEA评价实例显示,目前DEA效率在空间上存在较大的差异性,总体上呈现由中心向外围递减的趋势,交通效率较高的地区集中于三环周边几个片区。特别是,在不同的地理环境类型区内,交通效率呈现明显的差异性。具体表现为:高档别墅区和外围中档区的交通综合效率普遍较差,而交通碳排放较高是这两类地区综合效率较差的主要原因。未来,对于交通建设和交通政策比较敏感的外围中档区,有望通过公共交通的完善、特别是轨道交通的建设来降低碳排放,进而提升交通综合效率。

## 参考文献(References)

白鹤松. 2008. 基于多目标线性规划的决策模型研究[J]. 哈尔滨理工大学学报, 13(6): 57-59. [Bai H S. 2008. Study on the decision-making model based on the multiple objective linear programming[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 13(6): 57-59.]

曹小曙, 黄晓燕, 董哲. 2013. 基于GIS的公共交通可达性与居民出行特征[J]. 华南师范大学学报: 自然科学版, 45(5): 98-105. [Cao X S, Huang X Y, Dong Z. 2013. Transit accessibility and characteristics of residents' transportation based on GIS[J]. Journal of South China Normal University: Natural Science Edition, 45(5): 98-105.]

柴彦威, 肖作鹏, 刘志林. 2011. 基于空间行为约束的北京市

居民家庭日常出行碳排放的比较分析[J]. 地理科学, 31(7): 843-849. [Chai Y W, Xiao Z P, Liu Z L. 2011. Comparative analysis on CO<sub>2</sub> emission per household in daily travel based on spatial behavior constraints[J]. Scientia Geographica Sinica, 31(7): 843-849.]

方国华, 黄显峰. 2011. 多目标决策理论、方法及其应用[M]. 北京: 科学出版社. [Fang G H, Huang X F. 2011. Duomubiao juece lilun, fangfa, jiqi yingyong[M]. Beijing, China: Science Press.]

高晓路, 季珏, 张文忠. 2009. 北京市交通出行环境的空间评价[J]. 地理科学, 29(6): 817-824. [Gao X L, Ji J, Zhang W Z. 2009. Micro-evaluation of traffic environment of Beijing[J]. Scientia Geographica Sinica, 29(6): 817-824.]

季珏, 高晓路. 2012. 基于居民日常出行的生活空间单元的划分[J]. 地理科学进展, 31(2): 248-254. [Ji J, Gao X L. 2012. Identifying the scope of daily life in urban areas based on residents' travel behaviors[J]. Progress in Geography, 31(2): 248-254.]

马静, 柴彦威, 刘志林. 2011. 基于居民出行行为的北京市交通碳排放影响机理[J]. 地理学报, 66(8): 1023-1032. [Ma J, Chai Y W, Liu Z L. 2011. The mechanism of CO<sub>2</sub> emissions from urban transport based on individuals' travel behavior in Beijing[J]. Acta Geographica Sinica, 66(8): 1023-1032.]

孟斌. 2009. 北京城市居民职住分离的空间组织特征[J]. 地理学报, 64(12): 1457-1466. [Meng B. 2009. The spatial organization of the separation between jobs and residential locations in Beijing[J]. Acta Geographica Sinica, 64(12): 1457-1466.]

徐建华. 2006. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京: 高等教育出版社: 224-230. [Xu J H. 2006. Mathematical methods in contemporary geography[M]. Beijing, China: Higher Education Press: 224-230.]

张文忠, 尹卫红, 张锦秋, 等. 2006. 中国宜居城市研究报告(北京)[M]. 北京: 社会科学文献出版社. [Zhang W Z, Yin W H, Zhang J Q, et al. 2006. A study of livable cities in China (Beijing) [M]. Beijing, China: Social Sciences Academic Press.]

张侠, 尚建平, 赵德义, 等. 2009. 基于熵值法的城市土地可持续利用评价: 以石家庄市为例[J]. 国土与自然资源研究, (4): 33-35. [Zhang X, Shang J P, Zhao D Y, et al. 2009. Urban land sustainable use evaluation based on entropy method: a case of Shijiazhuang city[J]. Territory & Natural Resources Study, (4): 33-35.]

郑思齐, 孙聪. 2011. 城市经济的空间结构: 居住、就业及衍生问题[J]. 南方经济, (8): 18-31. [Zheng S Q, Sun C.

2011. Urban spatial structure: housing, jobs and related urban Issues[J]. South China Journal of Economics, (8): 18-31.]
- Ji J, Gao X L. 2010. Analysis of people's satisfaction with public transportation in Beijing[J]. Habitat International, 34(4): 464-470.
- Kan K. 2002. Residential mobility with job location uncertainty[J]. Journal of Urban Economics, 52(3): 501-523.
- Krizek J K. 2003. Residential relocation and changes in urban travel: Does neighborhood-scale urban form matter[J]. Journal of the American Planning Association, 69(3): 265-281.
- Kwan M P. 2012. Human space-time behavior as the basis of dynamic conceptualizations of geographic context [C]// Paper presented on the 7<sup>th</sup> Workshop on Spatial Behavior and Planning Research. Beijing: Peking university:1-7.
- Martínez F J. 1995. Access: The transport-land use economic link[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 29(6): 456-470.

## Multi-objective evaluation of urban transportation efficiency: Take Beijing as an example

JI Jue<sup>1,2</sup>, GAO Xiaolu<sup>2</sup>, LIU Xingchen<sup>2</sup>

(1. The Administration Center of Urban-rural Planning Ministry of Housing & Urban-Rural Development of the People's Republic of China, Beijing 100835, China; 2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

**Abstract:** With rapid urbanization, huge populations concentrate in cities, greatly increasing the environmental pressure of urban systems. Improving convenience of travel and at the same time reducing its negative effects on the environment, such as mitigating carbon emissions, is the key objective of present and future sustainable urban transportation development and important indicators of urban transportation efficiency. This research adopted a multi-objective evaluation method to evaluate transportation efficiency, including quantitative models for estimating carbon emission and convenience of travel and integrated methods of carbon emission and transport convenience. The six central urban districts in Beijing were chosen as our study area to test the evaluation method and explore mechanisms of transportation efficiency. The results show that transportation efficiency in Beijing differs between the central city and the outside areas. The efficiency is lower outside the 5th ring road, and higher inside the 3rd ring road. Especially, there are several centers of high and low transportation efficiency areas. The high efficiency centers are located in (1) the Gongzhufen-Wukesong area around the west 3rd and 4th ring roads; (2) the Anzhen Bridge area near the north 3rd ring road; and (3) the Sanlitun area near the east 3rd ring road. The low efficiency centers are located in the suburban areas, such as along the northwest 6th ring road, some areas between the 5th and 6th ring road in the southwest, and the Changying area outside the 5th ring road in the east. Besides, the spatial differences of transportation efficiency in Beijing have a close relationship with the geographic context. High carbon emission is the main cause of low transportation efficiency; this is particularly true in the areas where luxury-villas are located, and where public transportation service provision is insufficient. High proportion of car usage and long commuting distance are the main causes of high carbon emission. In the future, the construction of public transportation, especially the optimization of the subway system development, will improve the spatial distribution of transportation efficiency.

**Key words:** transportation efficiency; multi-objective evaluation; DEA; traffic carbon emission; travel convenience