

Impact Analysis of City Scale on Trip Distance of Urban Residents

Min Zhang*, Xiaoning Zhang, Hua Wang

School of economics and management, Tongji University, Shanghai
Email: *Candice910812@163.com

Received: Dec. 9th, 2015; accepted: Dec. 24th, 2015; published: Dec. 29th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

In the urban transport system, it's important to study the urban trip distance distribution. In this paper, trip distance distribution function was analyzed by using probability theory under some hypothesis conditions, and was fitted by using resident trip data of 26 cities, the rationality of hypothesis conditions was tested, the effect factors of the function parameters were discussed, such as urban scale, urban population and traffic structure, a general function of trip distance distribution was established through quantitative analysis and nonlinear regression, and the general formula of the travel distance of the urban residents is finally derived. Hopefully, a few insightful results in this research could have important and practical value for urban development and urban transportation planning.

Keywords

Urban Traffic, Trip Distance Distribution, Parameter Analysis, Nonlinear Regression

城市规模对居民出行距离的影响研究

张敏*, 张小宁, 王华

同济大学经济与管理学院, 上海
Email: *Candice910812@163.com

收稿日期: 2015年12月9日; 录用日期: 2015年12月24日; 发布日期: 2015年12月29日

*通讯作者。

摘要

在城市交通系统中,城市居民的出行分布研究很重要。本文在一定假设条件下,运用概率统计理论推导居民出行距离的概率分布函数形式。在国内外相关研究的基础上,通过国内26个城市居民出行样本数据的计量分析,验证该假设条件的合理性,分析了函数参数的相关影响因素,如城市规模、城市人口和交通结构等,对其进行量化与非线性回归,得出居民出行距离的概率分布函数的一般形式,并最终推导出城市居民出行距离的一般公式。本文研究成果可以为城市发展和城市交通规划提供实用的参考借鉴价值。

关键词

城市交通, 出行距离分布, 参数分析, 非线性回归

1. 引言

随着我国城市规模的不断扩大,人口数量的增加,城市居民的出行越来越频繁,日益严重的交通问题极大地影响了城市的发展进程,对城市居民出行特征的研究是解决交通问题中非常重要的工作。城市规模的效益随着城市人口的扩大而递增。城市的经济水平并不直接影响居民的出行特征,但它与居民的家庭收入和城市的交通设施和服务的水平密切相关。城市经济水平越高,城市用于交通设施的建设投入越多,交通系统的服务水平、类型、数量、质量才越高。城市经济水平越高,居民的就业机会和收入越高,家庭的收入水平越高,购买交通工具的能力越高,选择合适的交通方式的机会越高,其日常活动的范围较大,每次出行的平均距离也相对较远。本文从我国城市交通实践出发,通过计量实证分析,探寻影响我国城市居民出行距离的因素,为交通政策的制定提供基础性依据。

国外学者对城市居民出行影响因素做了大量的实证研究,史密斯(Schmitz)对前西德通勤区域的调查发现,出行距离随着城市人口规模的扩大相应增加[1]。塞维罗(Cervero)通过对1985年全美住户调查数据的分析发现,提高开发密度并结合土地的混合利用,可以降低机动车的出行距离[2]。国外的交通工程经典书籍在描述重力分布模型的阻抗函数时提供了幂函数与指数函数,讨论了二者在应用中的局限性,并创新性的提出Gamma函数,此函数的最大特征是出行率随距离先增大后减小,但该书并未就这个问题作深入探讨,只给出Gamma函数的简单形式[3][4]。

国内学者对于城市交通出行影响因素的研究相对较少,且大多局限于定性描述或经验总结上,认为随着城市规模的扩大,一般会带来平均出行距离的增加,而出行次数则相对减少。主要有颜敏提出的居民出行距离影响因素,从出行主体心理和个性特征分析我国城市居民的出行距离特征,提出了出行距离影响度概念[5]。刘伟平提出的负指数分布,证明了出行距离服从负指数分布。文献用实例证明了这一分布函数的可靠性,但实例中的数据均为区域交通出行距离[6]。陈尚云等通过建立数学模型,模拟城市土地利用形态的不同种类,计算城市出行总量的距离分布和空间分布,总结出反映城市出行总量距离分布的二阶爱尔兰分布模型[7]。石飞在研究刘伟平和陈尚云的研究结论局限性的基础上,运用概率统计理论证明出行距离符合瑞利分布,并界定了特大城市、大中城市分布函数的取值范围[8]。

纵观近年来的国内外研究成果,多因素定量化分析成为趋势,国内学者在定性分析的基础上也开始进行定量研究,但大样本量的计量检验还不多。本文在回顾国内外研究成果及利弊分析后,从理论推导和试验的双重角度研究显得更为科学和实用。在一定假设条件下,运用概率统计理论推导居民出行距离的概率分布函数形式,并对函数参数影响因素分析,得出城市居民出行距离的一般公式。

2. 出行距离概率分布函数形式的确定

我们先通过概率论推导出出行距离分布的一般函数形式。由随机理论的观点可知，车辆或居民从出发地到目的地的出行距离，是一随机变量 X 。对于已出行了 r 距离的车辆，本文假设在以后的 Δr 距离内终止的概率应与已出行的距离 r 成正比[9]，这一概率为：

$$P\{r < X \leq r + \Delta r | X > r\} = \lambda r \Delta r + o(\Delta r) \quad (1)$$

式中： λ 为不依赖于 Δr 和 r 的常数 $r > 0$ ； $o(\Delta r)$ 为 Δr 的高阶多项式。

等式左边为条件概率，进一步换算得：

$$\begin{aligned} P\{r < X \leq r + \Delta r | X > r\} &= \frac{P\{r < X \leq r + \Delta r \cup X > r\}}{P\{X > r\}} \\ &= \frac{P\{r < X \leq r + \Delta r\}}{P\{X > r\}} = \frac{F(r + \Delta r) - F(r)}{1 - F(r)} = \lambda \Delta r + O(\Delta r) \end{aligned} \quad (2)$$

所以：

$$F'(r) = \lim_{\Delta r \rightarrow 0} \frac{F(r + \Delta r) - F(r)}{\Delta r} = \lambda r [1 - F(r)] \quad (3)$$

求解线性微分方程，联系初始条件 $F(0)$ 为 0，可得出行距离分布函数和密度函数分别为：

$$F(r) = 1 - \exp(-0.5\lambda r^2) \quad (4)$$

$$f(r) = \lambda r \exp(-0.5\lambda r^2) \quad (5)$$

3. 城市出行距离分布的拟合

在推导出距离分布属于瑞利分布函数后(见图 1)，我们用已有城市的出行距离资料来进行拟合。Origin 软件对收集的 26 个城市的出行数据进行拟合，拟合参数只有 λ 。由于部分出行距离较大，考虑到调查和统计误差，我们进行分段统计，具体数据见表 1。

我们采用瑞利分布函数作为基本函数形式进行拟合，用 Origin 软件进行拟合瑞利分布函数，得出 λ 和 R^2 ，绝大部分城市拟合的相关系数 R^2 大于 97%。因此，用瑞利分布来描述城市出行距离分布具有很高

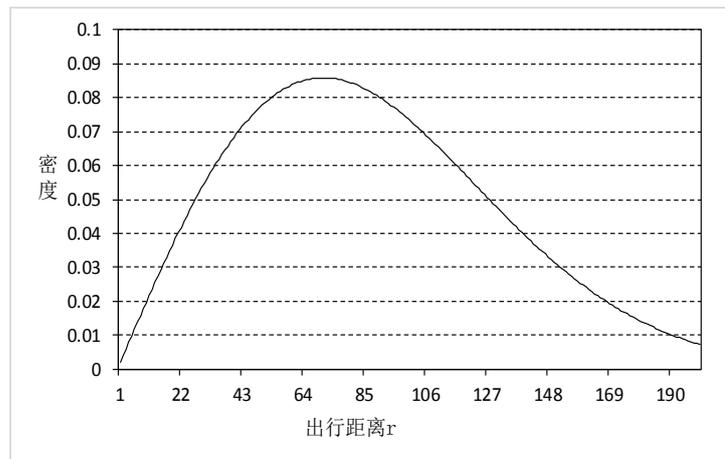


Figure 1. The basic form of Rayleigh density function
图 1. 瑞利密度函数基本形态

Table 1. Trip distance distribution
表 1. 出行距离分布

城市	出行距离 ≤ 5 km	5~10 km	10~15 km	15~20 km	20~30 km	30~40 km	>40 km
北京	0.555	0.170	0.112	0.066	0.063	0.022	0.012
天津	0.568	0.180	0.103	0.062	0.057	0.021	0.009
石家庄	0.801	0.117	0.035	0.021	0.015	0.009	0.002
太原	0.876	0.056	0.026	0.018	0.015	0.008	0.001
沈阳	0.834	0.071	0.042	0.028	0.016	0.008	0.001
长春	0.852	0.059	0.038	0.028	0.015	0.007	0.001
上海	0.566	0.176	0.102	0.065	0.059	0.022	0.010
南京	0.696	0.138	0.056	0.046	0.038	0.019	0.007
无锡	0.842	0.069	0.038	0.028	0.015	0.007	0.001
常州	0.889	0.043	0.027	0.018	0.014	0.008	0.001
苏州	0.689	0.144	0.088	0.041	0.023	0.014	0.001
杭州	0.825	0.073	0.047	0.029	0.016	0.008	0.002
宁波	0.871	0.057	0.028	0.019	0.017	0.007	0.001
温州	0.889	0.051	0.021	0.017	0.016	0.006	0.000
福州	0.884	0.052	0.025	0.017	0.016	0.006	0.000
厦门	0.865	0.065	0.031	0.017	0.016	0.006	0.000
泉州	0.892	0.048	0.021	0.017	0.016	0.006	0.000
青岛	0.877	0.056	0.023	0.019	0.017	0.008	0.000
武汉	0.678	0.143	0.068	0.046	0.038	0.019	0.008
长沙	0.798	0.128	0.037	0.021	0.015	0.009	0.002
广州	0.587	0.164	0.109	0.057	0.051	0.022	0.010
深圳	0.591	0.161	0.102	0.061	0.056	0.021	0.008
珠海	0.956	0.021	0.011	0.005	0.004	0.003	0.000
东莞	0.968	0.012	0.008	0.005	0.004	0.003	0.000
中山	0.975	0.007	0.006	0.005	0.004	0.003	0.000
成都	0.681	0.141	0.068	0.046	0.038	0.019	0.007

的可信度。

4. 模型参数拟合

4.1. 拟合模型参数的相关影响因素

为对模型的通用性和有效性进行验证, 探讨 λ 的取值规律。借鉴国内外相关研究, 并综合考虑数据的可能性, 对 λ 取值的影响因素进行讨论, 并作回归分析。本文以城市用地规模、城市常住人口和城市客运交通结构作为瑞利模型参数的 3 大影响因素, 进行多元非线性回归。由于目前国内缺乏对交通出行数据的统计, 故本文所运用城市客运交通结构指标来源于国内已经发表的论文、专著以及各大交通网站,

而城市人口、建成区面积指标则来源于相关年份的城市统计年鉴。这些数据来源不同，记录手段也存在差异，本文在分析时对一些具有明显偏差的数据进行了修正，最终拥有 26 个城市出行调查的样本数据。

(1) 城市用地规模

城市规模的大小直接决定了出行距离的界限，规模越大，出行距离的上限越大，相反则越小，因此，城市用地规模是出行距离分布的首要影响因素。城市用地规模可用建成区面积来表示，为了与出行距离具有可比性，采用建成区面积的平方根作为回归分析影响因素项，记为自变量 x_1 。

(2) 城市常住人口

城市人口的多少很大程度上影响着城市规模的大小，相应的会影响人均出行次数及出行距离。根据国内外的研究结果，出行距离会随着城市人口规模的增大而相应增加。这里将城市常住人口记为自变量 x_2 。

(3) 城市客运交通结构

出行距离对城市客运交通结构的影响是显而易见的。前文讨论的城市用地规模和城市形状都是城市客运交通结构的影响因素，除此之外，城市交通政策、居民收入、城市人口年龄结构因素也都在影响着客运交通结构，因此，将这些因素综合作用的结果用客运交通结构来表达，引入客运交通结构作为影响瑞利分布模型的参数。本文采用公交出行比例与私家车出行比例的比值作为模型参数的影响因素项。经过试算表明，有些城市的这一比例过高，故取其以 10 为底的对数，以平和数据范围，记为自变量 x_3 。

4.2. 实证研究

本文选取城市用地规模、城市常住人口和城市客运交通结构作为瑞利模型的 3 大影响因素，进行多元线性非线性回归。26 个城市出行调查的样本数据，见表 2。

基于表 2 以及之前求得的各城市的 λ 值，利用 Excel 的多元回归分析结果如表 3。

由表 3 的回归分析结果，我们可以得到城市居民平均出行距离与城市用地规模、城市常住人口以及城市客运交通结构的多元线性回归模型：

$$\lambda = 1.050143794 - 0.061905586x_1 + 0.0000450514x_2 - 0.423848526x_3 - 0.00000850088x_1x_2 \\ + 0.026199631x_1x_3 - 0.000177843x_2x_3 + 0.00123271x_1^2 + 0.0000000485987x_2^2 + 0.155131211x_3^2$$

其中： $R^2 \approx 0.93$ 。

多元回归模型中， R^2 比较接近于 1，表示模型与样本观测值数据拟合效果比较好，整体效果的 F 检验通过。结果显示自变量和因变量具有较高的相关程度，从系数的正负得如下结论：

(1) 随着建成区面积的增大， λ 值逐渐减小，在图像上反映出来的结果是图像的横轴宽度越宽，这显然与城市规模越大，最大出行距离也越大的规律相一致。

(2) 城市常住人口越小， λ 值也随之减小，城市常住人口越小，意味着城市人口越小，居民出行活动越少， λ 值越小。

(3) 公交车与私家车出行比例的比值越小，则 λ 值越大，这表明在国内城市大力发展公共交通的背景下，私家车出行比例越大，瑞利分布曲线越陡。显然，回归结果与实际情况吻合，这是因为在机动化优势出行距离范围内，私家车出行比例的提高意味着某一距离机动化出行量的提升。

而由 $f(r) = \lambda r \exp(-0.5\lambda r^2)$ 推出：

居民平均出行距离为 L ：

$$L = \int_0^x \lambda x^2 e^{-\lambda x^2/2} dx = -xe^{-\lambda x^2/2} + \int_0^x e^{-\lambda x^2/2} dx = -xe^{-\lambda x^2/2} + \sqrt{2\pi/\lambda} \int_0^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-(\sqrt{\lambda}x)^2/2} d(\sqrt{\lambda}x) = -xe^{-\lambda x^2/2} + \sqrt{\pi/2\lambda}$$

其中 x ：城市居民可能出行的最远距离。

Table 2. City basic information
表 2. 城市基本信息

城市	建成区面积/ (平方公里)(S)	建成区面积 平方根(x_1)	城市常住人口 (万人)(x_2)	公交出行比例	公交车出行 与私家车出行的比值	比值对数(x_3)
北京	1261	35.5106	2069.3	27.2	0.8344	-0.0786
天津	722	26.8701	1413	16	1.194	0.077
石家庄	216	14.6969	1038.6	7.91	2.1378	0.33
太原	310	17.6068	425.63	22.9	1.7891	0.2526
沈阳	455	21.3307	822.8	16	0.374	-0.4271
长春	434	20.8327	758.9	47.6	2.6444	0.4223
上海	886	29.7658	2380	25.2	1.26	0.1004
南京	653	25.5539	816.1	36	1.791	0.2531
无锡	316	17.7764	646.55	12.8	0.4923	-0.3078
常州	183	13.5277	468.7	9.44	1.324	0.1219
苏州	437	20.9045	1300	10	0.7968	-0.0987
杭州	453	21.2838	880.2	20.37	2.2508	0.3523
宁波	290	17.0294	763.9	13.3	0.743	-0.129
温州	204	14.2829	915.61	31.4	2.1361	0.3296
福州	240	15.4919	727	21.3	2.3152	0.3646
厦门	264	16.2481	367	39.34	4.0102	0.6032
泉州	193	13.8924	728.07	20	1	0
青岛	375	19.3649	760	22.1	0.7782	-0.1089
武汉	520	22.8035	1012	23.5	0.651	-0.1864
长沙	316	17.7764	714.66	24.3	2.5052	0.3988
广州	1010	31.7805	1279.51	26.57	1	0
深圳	763	27.6225	1054.74	38.3	0.8705	-0.0602
珠海	124	11.1355	158.26	11.2	1	0
东莞	107	10.3441	829.23	13.7	1.5393	0.1873
中山	84	9.1652	307	25	1	0
重庆	1052	32.4345	2945	30	6.3425	0.8023
成都	516	22.7156	1405	26.46	0.882	-0.0545

我们假设 x ：特大城市(城市常住人口大于 500 万)居民可能出行的最远距离为一固定值 40 km，中小城市居民的最远出行距离为 25 km。由上式计算出居民每次出行的平均出行距离，取平均出行距离与常住人口的乘积作为居民总出行距离，结果见表 4 所示。

4.3. 回归模型结果的分析

我们根据上述表 4 所得城市居民平均出行距离的结果和变量建成区面积、城市常住人口以及公交出行比例的结果，可以绘制出相关关系的趋势图。我们以居民平均出行距离和城市常住人口的结果为例，绘制出如图 2 所示的趋势线。以居民总出行距离和城市常住人口的结果为例，绘制出如图 3 所示的趋势线。

Table 3. Multiple regression statistics
表 3. 多元回归统计

回归统计								
Multiple R	0.963172142							
R Square	0.927700574							
Adjusted R Square	0.889424408							
标准误差	0.045831818							
观测值	27							
方差分析								
	df	SS	MS	F	Significance F			
回归分析	9	0.458201032	0.050911226	24.2370294	0			
残差	17	0.035709444	0.002100556					
总计	26	0.493910475						
	Coefficients	标准误差	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%	下限 95.0%	上限 95.0%
Intercept	1.0501	0.1047	10.0265	0.0000	0.8292	1.2711	0.8292	1.2711
X Variable 1	-0.0619	0.0146	-4.2321	0.0006	-0.0928	-0.0310	-0.0928	-0.0310
X Variable 2	0.0000	0.0001	0.3165	0.7555	-0.0003	0.0003	-0.0003	0.0003
X Variable 3	-0.4238	0.2671	-1.5867	0.1310	-0.9874	0.1397	-0.9874	0.1397
X Variable 4	0.0000	0.0000	-0.6581	0.5193	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
X Variable 5	0.0262	0.0182	1.4380	0.1686	-0.0122	0.0646	-0.0122	0.0646
X Variable 6	-0.0002	0.0001	-1.2071	0.2439	-0.0005	0.0001	-0.0005	0.0001
X Variable 7	0.0012	0.0005	2.2715	0.0364	0.0001	0.0024	0.0001	0.0024
X Variable 8	0.0000	0.0000	0.5334	0.6007	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
X Variable 9	0.1551	0.1506	1.0304	0.3173	-0.1625	0.4728	-0.1625	0.4728

Table 4. The average trip distance of urban residents
表 4. 各城市居民平均出行距离

城市	北京	天津	石家庄	太原	沈阳	长春	上海	南京	无锡
居民平均出行距离(km)	8.1625	7.7525	4.475	3.955	4.3625	4.2075	7.8925	6.245	4.2575
居民总出行距离(km)	16890.66	10954.28	4647.74	1683.37	3589.47	3193.07	18784.15	5096.54	2752.69
城市	常州	苏州	杭州	宁波	温州	福州	厦门	泉州	青岛
居民平均出行距离(km)	3.8775	5.735	4.485	4.0075	3.775	3.82	3.945	3.76	3.9375
居民总出行距离(km)	1817.38	7455.50	3947.70	3061.33	3456.43	2777.14	1447.82	2737.54	2992.50
城市	武汉	长沙	广州	深圳	珠海	东莞	中山	成都	
居民平均出行距离(Km)	6.4375	4.4975	7.6025	7.5625	2.9775	2.9025	2.8575	6.38	
居民总出行距离(km)	6514.75	3214.18	9727.47	7976.47	471.22	2406.84	877.25	9045.44	

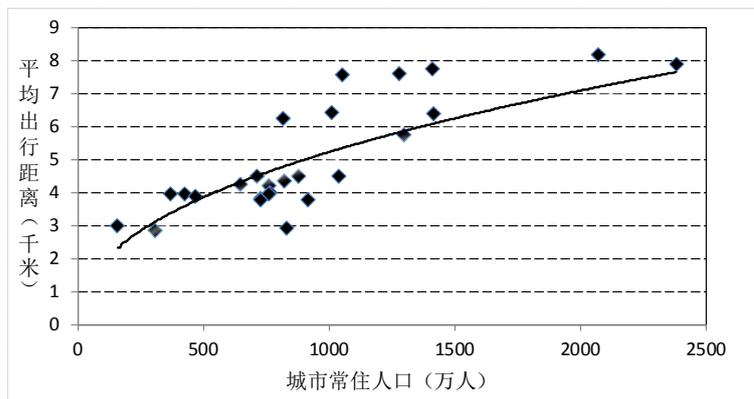


Figure 2. The dependent variable (trip distance) and the independent variable (urban permanent population)

图 2. 因变量 y (居民平均出行距离) 和自变量 x_2 (城市常住人口) 之间的关系

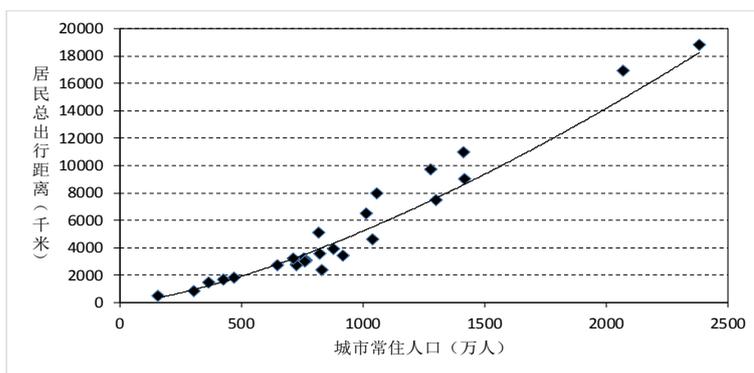


Figure 3. The relationship between the total trip distance and the city's permanent population

图 3. 居民总出行距离和城市常住人口之间的关系

根据图 2 结果显示自变量城市常住人口和因变量居民平均出行距离具有较高的相关程度, 随着城市常住人口的增长, 居民平均出行距离逐渐增大。而且, 从图 3 可以看到, 随着城市常住人口的增长, 居民总出行距离的增长速率也逐渐增大, 城市常住人口和居民平均出行距离之间关系是非线性的。类似地, 根据趋势图可以了解到随着城市建成区面积的增加, 居民平均出行距离也是逐渐增长, 但客运交通结构对居民平均出行距离的影响趋势并不明显。对于一个单中心城市而言, 当城市建成区面积和城市人口较小时, 城市的聚集发展有利于合理安排各类用地, 平均出行距离和出行时间相对较小, 通勤活动可以在人们容忍的时间内完成。但当城市发展到一定规模以后, 中心城区低价的飙升以及城市功能需求的升级, 促使大多数工业企业外迁, 居住 - 就业的失衡以及各类生活服务设施的分散化布置诱发了大量的通勤行为, 从而导致平均出行距离和出行时耗的延长。因而, 建成区面积和人口的增长是影响居民平均出行距离的主要因素。

5. 结语

本文在理论推导的基础上, 以已知 26 座城市居民出行数据为拟合资料, 通过探讨分布函数参数的相关影响因素并建立非线性回归方程, 得到能够反映某一城市的出行分布特征的一般模型, 为城市规划和城市交通规划提供了重要的决策依据。本文的假设条件是为了对问题的假设, 针对这一细节问题仍需作进一步的讨论。

对于一个单中心城市而言,城市规模是影响平均出行距离与时耗的决定性因素。随着城市规模持续扩大,交通拥堵加剧,机动车车速下降,平均出行距离与时耗延长。当城市增长到一定规模后,平均出行距离与时耗超出人们可以接受的范围,维持单中心城市空间结构从交通出行来看已经不合理了。在这种情况下,仅靠调节供需难以解决交通问题,应该从空间结构角度逐渐变单中心城市为多中心的组合城市。城市常住人口和居民平均出行距离具有较高的相关程度,随着城市常住人口的增长,居民平均出行距离逐渐增大。而且,随着城市常住人口的增长,居民总出行距离的增长速率也逐渐增大,城市常住人口和居民出行距离之间关系是非线性的。因此,合理的规划城市人口是必要的。

基金项目

国家自然科学基金项目(71125004, 71361130014); 国家自然科学基金重点项目(71531011)。

参考文献 (References)

- [1] 孙斌栋. 城市交通出行影响因素的计量检验[J]. 城市问题, 2008(7): 11-15.
- [2] Cervero, R. (1996) Mixed Land-Uses and Commuting: Evidence from the American Housing Survey. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, **30**, 361-377. [http://dx.doi.org/10.1016/0965-8564\(95\)00033-X](http://dx.doi.org/10.1016/0965-8564(95)00033-X)
- [3] Ortuzar, J.D. and Willumsen, L.G. (1999) *Modeling Transport*. 2nd Edition, John Wiley and Sons Ltd., Sussex.
- [4] 费舍里松. 城市交通[M]. 第二版. 北京: 中国建筑工业出版社, 1984.
- [5] 颜敏. 城市居民出行距离影响因素研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 西南交通大学, 2005: 10-36.
- [6] 刘伟平. 交通 OD 表的实用计算模型[J]. 中国公路学报, 1995, 8(3): 18-24.
- [7] 陈尚云, 高世廉. 我国特大城市土地利用形态与出行总量的距离分布研究[J]. 四川联合大学学报: 工程科学版, 1999, 3(3): 22-27.
- [8] 石飞, 陆振波. 出行距离分布模型及参数研究[J]. 交通运输工程学报, 2008, 8(2): 110-115.
- [9] 关文斌. 城市道路交通出行距离研究[J]. 黑龙江交通科技, 2008, 31(9): 38-39.