

# 基于效用最大化慢行出行行为选择分析

马健霄 吴杰 谭春华 陆涛

**【摘要】**基于效用最大化原理建立个体慢行出行选择模型，以南通市 2012 年居民出行调查为依据，将慢行出行的影响因素分为个体属性、家庭属性、出行特性以及慢行环境因素，标定影响因素系数，得到慢行交通方式选择概率。分析得出，个人收入和年龄对出行选择的影响最大，以上学为目的的出行选择慢行出行的概率较大，家庭的机动化有不可逆转性，慢行环境对慢行出行的影响有待提高。

**【关键词】** 交通规划，慢行交通方式，效用最大化，慢行环境

步行和自行车交通等以人力为空间移动动力的交通，统称慢行交通。与机动化出行方式相比，其有着低碳环保、出行成本低、可达性好等优势。然而随着我国机动化水平的快速提高，越来越多的人舍弃了慢行这种弱势交通方式，而选择机动化出行。

良好的慢行交通系统，不但能提高慢行出行的吸引力，使慢行与其他交通方式有效衔接，更应该有效平衡机动车与慢行交通的关系。因此，本文从个体交通需求角度，分析影响慢行与机动化出行选择的相关因素，为城市慢行交通规划提供决策依据。

## 1 慢行出行影响因素相关分析

影响慢行出行的因素多种多样，根据国内外相关研究，整理目前慢行交通的需求分析及评价的相关资料，可知慢行出行的影响因素主要包括：气候天气、可达性好坏、个体特性、出行特性、家庭特性、土地利用特性、路段和路网属性、路段和路网的亲和度等方面，具体内容如表 1 所示。

表 1 慢行出行影响因素表

影响因素	解释变量
气候天气	全年降雨天数、全年冰冻天数
可达性	医院邻近、学校邻近、桥梁邻近
个体特性	性别、年龄、受教育程度、收入、是否自行车初学者、是否拥有公交 IC 卡
出行特性	出行目的、出行距离、出行时间
家庭特性	家庭车辆数、家庭工作人数、家庭成年人数
土地利用	人口、就业岗位、商业密度、地块大小
路段/路网属性	步行道和自行车道平均间距、跨越屏障的通道间距、路网密度、连接度、道路坡度、交通量、道路宽度、路面质量
路段/路网亲和度	快速路、主次干路平均人行过街设施间距、绿化遮荫率、隔离设施（机非隔离、人非隔离）
其他出行方式特性	是否在 0.4 公里公交站点范围内、其他出行方式（如公交、自行车租赁）的使用成本、安全性、舒适性、便捷性
政策方面	停车收费政策、小汽车限制政策、公交优先政策、慢行优先

考虑到国内外政策、气候环境、交通构成条件等的差异，以及在我国数据获取的难易程度，在进行慢行交通各影响因素分析时，本文基于效用最大化原理，分析个人、家庭、出行属性因素和慢行环境等四类因素与慢行和机动化出行选择结果的关联性大小。

## 2 出行方式效用最大化模型建立

效用最大化原理，源自微观经济学中对多种商品进行选择时，消费者希望选择其所能负担的最优的商品组合。在出行方式的选择时亦相类似，理论基础是出行者在交通方式选择时追求“效用”最大化这一假说。模型的建立基于如下假设：（1）出行者是交通行为意志决定的最基本单位。（2）出行者在特定的选择条件下，选择效用最大的方案。对出行者来说，“效用”就是影响出行行为选择的众多因素。

在概率论类型中，其代表模型为 *logit* 模型与 *probit* 模型，因为 *logit* 模型在理论上对个体的行为研究具有较强的说服力，且结构较为简单，操作方便，适用性较强，因此本文采用 *logit* 模型进行建模。

以效用最大化行为假说为前提条件<sup>[6]-[7]</sup>，若令  $U_{in}$  为个体  $n$  选择交通方式  $i$  时的效用， $C_n$  为出行者  $n$  的选择方案集合。则该出行者  $n$  从选择方案集合  $A_n$  中选择交通方式  $i$  的条件为

$$U_{in} > U_{jn}, i \neq j, j \in C_n。$$

效用函数表达式为

$$U_{in} = V_{in} + \varepsilon_{in} \quad (1)$$

其中  $V_{in}$  为出行者  $n$  选择第  $i$  种交通方式效用函数的固定项， $\varepsilon_{in}$  为出行者  $n$  选择第  $i$  种方式效用函数的随机项。 $V_{in}$  与其中包含的影响变量之间呈线性关系，其表达式如下：

$$V_{in} = A'X_n + B'Y + C'Z_i + D'W, i \in C_n \quad (2)$$

其中： $X_n$ —与个体  $n$  的特性有关的向量；

$Y$ —与家庭有关的向量；

$Z_i$ —与出行方式  $i$  有关的向量；

$W$ —与慢行出行环境因素有关的向量；

$A', B', C', D'$ —待估计的模型列向量参数；

则出行者  $n$  选择第  $i$  种出行方式的概率  $P_{in}$  为：

$$\begin{aligned} P_{in} &= \text{Pr ob}(U_{in} > U_{jn}, i \neq j, j \in C_n) \\ &= \text{Pr ob}(V_{ij} + \varepsilon_{ij} > V_{jn} + \varepsilon_{jn}, i \neq j, j \in C_n) \end{aligned} \quad (3)$$

其中， $0 \leq P_{in} \leq 1$

在本模型中，假设效用函数的概率项服从 *Gumbel* 分布，可推导出城市居民出行方式选择的 ML 模型：

$$P_{in} = \frac{e^{V_{in}}}{\sum e^{V_{in}}}, i \in C_n \quad (4)$$

### 3 慢行交通方式选择的影响因素

#### 3.1 数据处理和筛选

本研究依据《2012年南通市居民出行调查》，选择南通市主城206个交通小区，收集了南通市2012年各小区人口、就业岗位等社会经济的相关信息，并对南通主城区现有土地利用、道路网、公交站点等进行梳理。由于居民出行调查的空间数据只精确到交通小区级，故将相应各小区的环境因素变量等其他信息均导入TransCAD软件，通过地理信息分析功能进行量化，有助于模型分析。

#### 3.2 慢行出行属性对慢行选择行为统计分析

被调查者中，慢行出行次数6604人次，非慢行出行次数1526人次。下面对慢行出行和各相关影响因素间进行交叉分析，如图1至图6。

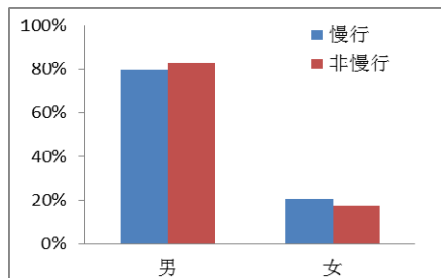


图1 性别对慢行出行方式选择的影响

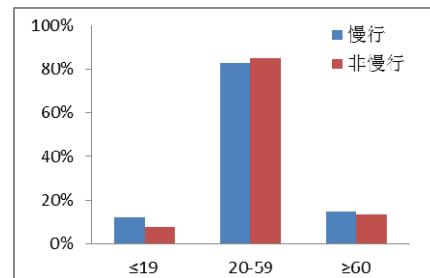


图2 年龄对慢行出行方式选择的影响

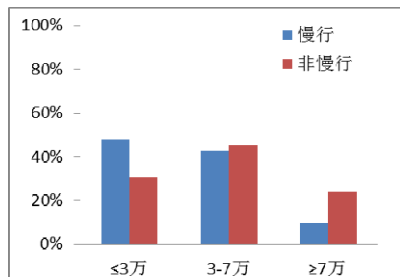


图3 个人收入对慢行出行方式选择的影响

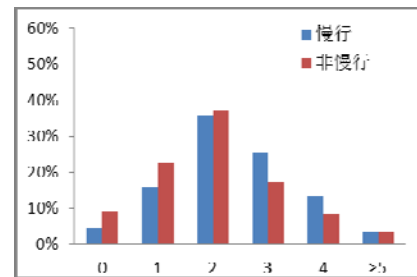


图4 非机动车拥有量对慢行出行方式选择的影响

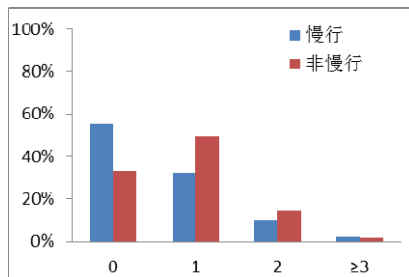


图5 机动车拥有量对慢行出行方式选择的影响

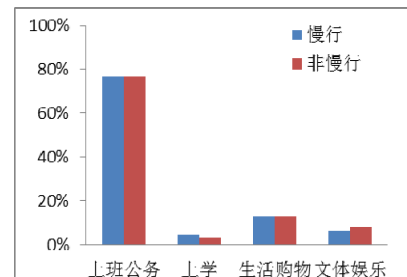


图6 出行目的对慢行出行方式选择的影响

### 3.3 模型参数选择

以慢行为研究对象，将出行者根据其日常生活中最经常采用的交通工具是否为慢行，分为慢行和非慢行出行者。考虑到非慢行出行组成的复杂性，文中的非慢行出行以主要机动化出行方式为主，包括常规公交、私人小汽车和助力摩托车。即对慢行和非慢行两种方式进行选择，即  $i=1$  或  $2$ 。

模型的形式如下式，其中出行者  $n$  选择慢行出行方式的概率  $P_{in} = \frac{1}{1 + e^{(V_{2n} - V_{1n})}}$ ，则出行者  $n$  选择非慢行出行方式的概率  $P_{in} = 1 - p_{1n}$ 。由此可见，选择概率只受不同出行方式的效用之差影响，差值的大小反应影响的大小。

经分析，选择影响慢行出行的 12 个因素，则效用函数  $V_{in}$  是以这 12 个因素为自变量的线性方程为：

$$V_{in} = \text{常数} + a_1 \times \text{性别} + a_2 \times \text{年龄} + a_3 \times \text{个人年收入} + b_1 \times \text{家庭非机动车数} + b_2 \times \text{家庭机动车数} \\ + b_3 \times \text{家庭购车计划} + c_1 \times \text{出行目的} + c_2 \times \text{出行距离} + c_3 \times \text{出行时间} + d_1 \times \text{职住平均密度系数} \\ + d_2 \times \text{路网密度} + d_3 \times \text{公交覆盖率}$$

在对各特性变量分析的基础上，对模型中运用到的特性变量进行量化处理。根据调查所得数据的离散化程度，将慢行与非慢行选择有较明显分歧的个性特征合并为一个数据集合。解释变量包括个性变量、基于起讫点变量和基于起点或终点的变量。解释变量及变量说明见表 2。

表 2 解释变量参数表

影响因素	变量	说明
个体属性 (X)	性别	X1 男性 1, 女性 2
	年龄	X2 19 岁以下、20~59 岁、60 岁及以上, 取值为 1-3
	个人年收入	X3 3 万以下、3~7 万、7 万及以上, 取值为 1-3
家庭属性 (Y)	家庭非机动车数	Y4 以辆为单位, 包括自行车、电动车和三轮车
	家庭机动车数	Y5 以辆为单位, 包括小汽车、摩托车
	家庭购车计划	Y6 未来 2 年打算内买车 1, 两年后打算买车 2, 暂无计划 3
出行特性 (Z)	出行目的	Z7 上班公务 1, 上学 2, 生活购物 3, 文体娱乐 4
	出行距离	Z8 基于起讫点最短路径 OD, 以千米为单位
	出行时间	Z9 出发到达时之差, 以分钟为单位
NEF 得分 (W)	职住平均密度系数	W10 基于出行起点所在小区职住平均系数, 从低到高 1~5
	路网密度	W11 基于出行相关小区道路网密度的平均值, 从低到高 1~5
	300 米公交覆盖率	W12 基于起讫小区公交可达性程度, 从低到高 1~5

慢行环境因素 (简称 NEF, no-motorized environmental factor), 指出行所处交通环境对慢行选择行为的影响, 通过 TransCAD 软件量化与慢行相关的现状环境指标, 分析出行所处环境对慢行选择的影响。由于慢行环境因素较多, 为了方便回归, 选取具有代表性的如下三个指标, 均以交通小区为单位进行考量, 包括:

1) 职住密度平衡系数 (*Mix*): 由某一分区职业和居住的混合密度来表示。居住人口或就业岗位越密集的地方, 吸引慢行出行的比例越大, 且就业岗位和居民数量较为平衡的区域, 吸引慢行出行的比例越大。为了综合评价职与住的密度, 以就业岗位密度 *ED* (employment

density)和家庭密度  $HD$ (household density)的几何平均来计算,即  $Mix=(ED \times HD)/(ED+HD)$ 。

2) 街道路网密度  $Droad_i$ : 是衡量慢行出行可达性的参考指标,通过分区计算各小区内道路及街巷的总长度  $\sum L_j$  与小区面积  $A_i$  相除得出,即  $Droad_i = \sum L_j / A_i$ 。

3) 300 米公交覆盖率  $Dbusi$ : 是衡量公交出行便利性的重要因素,由于 300 米是步行至公交车站的临界距离。通过分区计算各小区内公交站点的 300 米覆盖面积  $S_i$ , 比上小区面积  $A_i$  得出,即  $Dbusi = S_i / A_i$ 。

为了便于统计回归,提高模型的解释性,对 NEF 值的采用分级得分制,得分取 1-5 分。得分情况见图 7 至图 9。

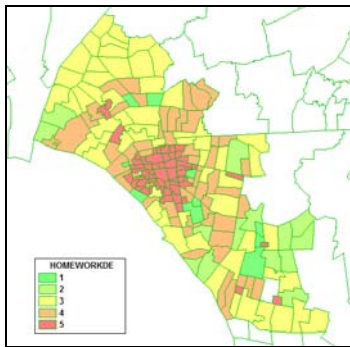


图 7 职住平均密度系数图

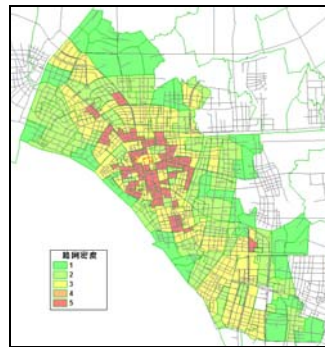


图 8 路网密度得分图

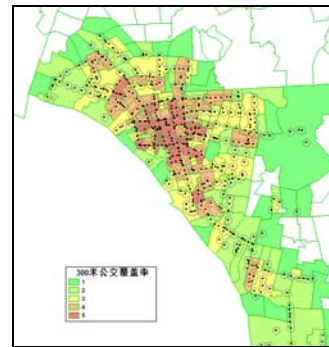


图 9 300 米公交覆盖率得分图

按照对居民出行方式选择有影响的变量所构成的模型进行参数估计,即可得到城市居民慢行与非慢行出行方式选择模型。

## 4 慢行出行效用模型标定及分析

慢行出行效用模型借助统计软件 SPSS 的“多项 Logistic 回归”程序进行标定。“多项 Logistic 回归”过程不受因变量个数限定,且通过在内部分类汇总个案来形成对预测变量具有相同协变量模式的子体,而后基于这些子体生成预测值、残差和拟合优度检验。

### 4.1 模型标定

在模型解释变量筛选时,逐步选择列表中指定的项输入到模型中,每一步从模型中移去最不显著的步进项,直到剩余所有步进项都对模型具有显著的统计作用。本文采用 wald 统计量,反应各解释变量是否与慢行和非慢行概率有显著的线性关系。当变量的 Wald 统计量大于 3.81 (95%的显著性水平)时,说明该自变量的影响程度是显著的。表 3 显示了各解释变量的回归系数检验结果。其中,性别因素由于 wald 检验结果不显著而被删除。表中的第 6, 第 7 列分别是发生比的 95%的置信区间。

表 3 模型参数标定结果

	B	Exp(B)	Wald	显著水平	Exp(B) 的置信区间 95%	
					下限	上限
截距	2.217		78.410	0.000		
[年龄=19 岁以下]	0.675	1.965	4.876	0.027	1.079	3.579
[年龄=20~59 岁]	0.174	1.190	3.209	0.073	0.984	1.439
[年龄=60 岁及以上]	0	.	.	.	.	.
[个人年收入=3 万以下]	1.236	3.440	175.392	0.000	2.865	4.131
[个人年收入=3~7 万]	0.663	1.942	64.463	0.000	1.651	2.283
[个人年收入=7 万及以上]	0	.	.	.	.	.
家庭非机动车数/辆	0.203	1.225	66.274	0.000	1.167	1.286
家庭机动车数/辆	-0.402	0.669	113.429	0.000	0.621	0.720
[家庭购车计划=2 年打算内买车]	0.433	1.542	11.889	0.001	1.206	1.973
[家庭购车计划=2 年后打算买车]	0.237	1.267	5.678	0.017	1.043	1.540
[家庭购车计划=暂无计划]	0	.	.	.	.	.
[出行目的=上班公务]	0.325	1.384	7.467	0.006	1.096	1.746
[出行目的=上学]	0.551	1.735	6.736	0.009	1.144	2.629
[出行目的=生活购物]	0.211	1.235	2.320	0.128	0.941	1.621
[出行目的=文体娱乐]	0	.	.	.	.	.
出行距离/km	-0.145	0.865	249.369	0.000	0.850	0.881
出行时间/min	-0.002	0.998	14.752	0.000	0.997	0.999
职住平均密度	-0.113	0.893	16.565	0.000	0.846	0.943
路网密度	-0.076	0.926	7.848	0.005	0.878	0.977
公交 300 米覆盖率	-0.082	0.921	16.625	0.000	0.885	0.958

对模型拟合优度方面的测度指标，如表 4 所示，通过零模型与当前所建立模型的回归方程显著性比较结果看，零模型的-2 倍的对数似然值为 7783.356，当前模型为 6962.610，似然比卡方值为 820.745，显著水平为 0.000，说明模型选择正确。同时，NagelkerkeR<sup>2</sup> 虽距 1 较近，说明模型越优，本模型 NagelkerkeR<sup>2</sup> 为 0.155 基本符合模型精度要求，认为模型有较好的拟合优度。

对模型预测值和原数据值的对比，模型的总体预测正确率 81.3%。可见，该模型预测效果较好，通过这些影响因素预测慢行与非慢行出行选择模型准确率较高。

表 4 模型拟合优度信息

模型	模型拟合标准	似然比检验		
	-2 倍对数似然值	卡方	df	显著水平
仅截距	7783.356			
最终	6962.610	820.745	16	0.000

表 5 模型预测值与原数据值对比表

观察值	预测值		
	1	2	百分比校正
1	6485	119	98.2%
2	1400	126	8.3%
总百分比	97.0%	3.0%	81.3%

由模型标定过程可得，该模型可以有如下 logistic 回归方程：

$$V_{in}=2.217+0.675 \times (\text{年龄}=1)+1.236 \times (\text{个人年收入}=1)+0.203 \times \text{家庭非机动车数}-0.402 \times \text{家}$$

庭非机动车数+0.433×(家庭购车计划=1)+0.551×(出行目的=2)-0.145×出行距离-0.002×出行时间-0.113×职住平均密度系数-0.076×路网密度-0.082×公交覆盖率

上式表示慢行出行向非慢行出行方式转移的各影响因素间关系。随着该影响因素增加，若系数为正，表示选择慢行出行的概率增加；若为负，则选择慢行出行的概率降低。

## 4.2 模型分析

从回归系数可反应个体属性、家庭属性、出行特性、慢行环境因素在慢行与非慢行方式选择的差异。其中，收入和年龄所属的个体因素对出行方式影响最大，其次是以上学和上班目的为代表的出行特性因素。根据回归分析，环境因素对慢行出行行为的选择相对其他因素较弱。下面结合各相关因素标定结果具体分析：

1) 收入因素：低收入者和低龄人群相对于高收入者和高龄人群更偏向选择慢行出行。低收入者（年收入小于3万）相对高收入者（年收入大于7万），慢行选择效用为1.236，可知低收入者选择慢行的概率是高收入的3.44倍。同理，中等收入者（年收入3-7万）选择慢行出行的概率是高收入者的1.94倍，中低收入的效用系数最大。由此说明，慢行和非慢行交通方式的选择首要根据个人收入因素决定，中低收入人群获取机动化出行的能力较为弱势。

2) 年龄因素：低龄人群（小于19岁）选择慢行出行的概率是老龄人群（大于60岁）1.95倍，而中青年人群（19-60岁）是老龄人群的1.19倍，因此低龄人群选择慢行的可能性最大，而老龄人群最不易选择慢行，这也与人随着年龄增长，身体素质降低相关。

3) 出行目的因素：上学出行选择慢行的概率是文体娱乐出行的1.74倍，上班出行选择慢行的概率是文体娱乐出行的1.38倍，生活购物出行选择慢行的概率是文体娱乐出行的1.24倍。说明以上学为目的的出行最可能为慢行出行，这也符合日常出行以上学为目的的人群多为弱势群体，且弱势人群在机动化出行能力方面存在缺陷的客观规律。

4) 家庭车辆因素：家庭每增加一辆机动车，非慢行出行概率提高1.5倍（慢行出行概率降低0.669倍），相比而言，家庭每增加一辆非机动车，慢行出行概率提高1.225倍。家庭增加机动车比增加非机动车对慢行选择造成的影响更大，这也体现了机动化出行或在舒适性、便捷性等占有的先天优势，一旦家庭购买机动车，就较难回归非机动化出行。

5) 慢行环境因素：与个体、出行、家庭因素相比，其并不能成为现状影响慢行出行的最主要因素。三个因素均与慢行选择概率呈负相关性，其中职住平均密度越高、公交覆盖率越高的地区，慢行出行的概率越低，这与客观规律相符。但路网密度越高，慢行出行的概率反而越低，究其原因，主要是由于我国道路网络等级配比结构失调，主干道和次干道所占比例大大超过支路所占的比例，主干道和次干道往往更适合车行交通，因此随着路网密度增加，慢行出行概率有所下降。

## 5 总结

基于效用最大化原理，依托logit模型的出行方式选择模型，能够从个体角度分析影响慢行出行的多个因素及其相互关系，有助于识别现状交通规划中的不足，模型的可操作性高，

移植性强。针对职住平均密度、路网密度、公交 300 米覆盖率 3 个慢行的环境影响因素指标进行分析, 得出其效用值, 验证可应用于慢行系统需求分析和慢行环境的评价。应用居民出行调查数据建立的慢行出行方式与个体属性、家庭属性、出行特性、慢行环境因素的非集计模型, 经过相关检验, 符合有效性要求, 可用于慢行交通方式选择预测。

## 【参考文献】

- [1] Max Nankervis. The effect of weather and climate on bicycle commuting[J]. Transportation Research Part A,1999,33:417-431
- [2] Bhuwan Devkota, Douglas Dudycha, Jean Andrey. Planning for non-motorized travel in rural Nepal: a role for geographic information systems[J]. Journal of Transport Geography, 2012:282-291
- [3] Meghan Winters, Utilitarian Bicycling A Multilevel Analysis of Climate and Personal Influences[J]. American Journal of Preventive Medicine,2007:52-58
- [4] Ronald Eash. Destination and Mode Choice Models for Non-motorized Travel[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1999, 1674:1-8
- [5] Portland pedestrian master plan[S].City of Portland Office of Transportation Engineering and Development Pedestrian Transportation Program,1999
- [6] 殷焕焕, 关宏志, 秦焕美, 刘彤, 巩丽媛. 基于非集计模型的居民出行方式选择行为研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2012, 34(5): 1000-1003
- [7] 刘炳恩, 雋志才, 李艳玲, 龚博文. 居民出行方式选择非集计模型的建立[J]. 公路交通科技, 2008, 25(5): 116-120.
- [8] 南通市居民出行调查分析报告[S]. 2012
- [9] 关宏志. 非集计模型—交通行为分析工具[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.

## 【作者简介】

马健霄, 男, 博士, 南京林业大学汽车与交通工程学院, 院长, 教授。电子信箱:  
majx@njfu.edu.cn

吴杰, 男, 南京林业大学汽车与交通工程学院交通工程系, 研究生

谭春华, 女, 内蒙古包头市园林绿化管理局, 工程师

陆涛, 男, 南京林业大学汽车与交通工程学院交通工程系, 讲师