

拥挤度对公共交通方式选择意愿的影响

蒋盛川, 孙轶凡, 杜豫川

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 针对公共交通方式出行特点设计了 RP (revealed preference) 与 SP (stated preference) 调查结合的方法, 并根据正交试验设计的原理对 SP 调查中的变量和水平进行组合设计; 提出根据立席密度对拥挤程度进行描述的方法, 并对拥挤程度进行分级. 以此为基础, 建立包含时间、费用和拥挤度的离散选择模型, 通过对拥挤度的弹性分析研究其对出行者交通方式选择意愿的影响. 实例证明拥挤度对出行者交通方式选择产生巨大影响, 是在构建常规公交和轨道交通方式的效用函数和方式竞争选择模型时不可缺少的因素.

关键词: 拥挤度; 离散选择模型; 弹性分析

中图分类号: U-9

文献标识码: A

Influence of In-vehicle Congestion Degree on Choice of Public Transit Mode

JIANG Shengchuan, SUN Yifan, DU Yuchuan

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: This research paper is directed toward obtaining a better understanding of in-vehicle congestion influence on choice of public transit mode. Considering the complexity of survey respondents, a revealed preference survey and stated preference survey combined survey method is provided. According to orthogonal test principle, composite design is carried out for variables and levels in SP survey. Based on a large-scale survey for tourists in all urban rail transit lines of Shanghai, this paper advances the method to describe and classify congestion degree according to density of standing passengers, so as to establish the discrete choice model including time, cost and congestion, and analyze congestion influence on travellers' desire for choice of traffic mode through elasticity analysis of congestion. The model calibration result shows that travellers are more sensitive to in-vehicle time, and change of congestion will obviously influence travellers' choice of travel mode. The analysis of elasticity show that travellers choosing conventional public

transit are very sensitive to congestion degree, and after congestion decreases, travellers' sensitivity to travel time and travel cost also decreases; and change of rapid transit service level will influence more on demand for conventional public transit.

Key words: in-vehicle congestion degree; discrete choice model; elasticity analysis

随着轨道交通的迅速发展, 轨道交通和常规公交之间的博弈关系也引起了国内外学者的广泛关注. 在城市公共交通体系中影响出行者选择交通方式的主要因素有出行费用、出行时间、运营可靠性、舒适性等. 已有的国内外相关研究大多针对时间、费用等容易量化的客观属性, 较少考虑人的主观感受 (如拥挤度) 在出行者选择行为中发挥的作用和影响. Nuzzolo 等^[1] 建立离散选择模型评估轨道交通的运行时间、运行可靠性及定价政策. Yang 等^[2] 通过广义成本最小化模型利用时间价值对巴士的竞争能力进行研究. 马超群等^[3] 分析了轨道交通和常规公交的出行距离和出行时耗, 并利用包含二者的广义费用函数建立了方式分担的 Logit 模型. 梁丽娟等^[4] 在居民公交出行意愿调查的基础上构建包含出行时间和费用的 Logit 模型, 研究道路公交与轨道交通竞争. 张浩然等^[5-7] 也证明离散选择模型可用于交通方式选择分析, 可以通过对出行时间和出行费用的调整改变交通方式的结构.

而实际研究表明, 主观感受对于出行者决策有较大影响, 是分析选择行为决策形成机理必不可少的因素. Kumar 等^[8] 通过主观偏好调查和离散选择建模分析认为公共交通的发车间隔、舒适度等都是影响公共交通选择的因素. 基于上述考虑, 本文主要分析出行者主观感受中的拥挤度, 通过设计合理的

收稿日期: 2011-12-20

基金项目: 上海市科委重点项目(10231202502); 上海市浦江人才计划(11PJD022)

第一作者: 蒋盛川(1987—), 女, 博士生, 主要研究方向为智能交通系统、运输经济分析. E-mail: jiangsc87@gmail.com

通讯作者: 杜豫川(1976—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为智能交通系统、运输经济分析. E-mail: yedu@tongji.edu.cn

RP(revealed preference)调查方案寻求将主观拥挤度进行客观量化的方法,并通过 SP(stated preference)调查获得相关数据,建立相应离散选择模型,通过对模型的解析和应用分析主观拥挤度对出行者交通方式选择意愿的影响。

1 拥挤度划分

目前国内外对于人群拥挤程度的研究主要集中在步行交通设施中人群拥挤及群集行为特性方面^[9],而对车厢内拥挤程度的研究也主要是从地铁车辆定员及运量的角度进行的^[10],较少考虑实际出行者对拥挤程度的主观感知以及该类感知对于公共交通方式选择行为的影响和主观感知的量化标准。国内在公交出行调查中多采用实载率表示公交车辆内的拥挤程度。虽然实载率可以度量车内的拥挤程度,但是由于在实地调查中实载率值较难得到,并且受访者对实载率没有直观感受。因此,本文拟采用立席密度反映乘客对拥挤程度的感受。

车辆的立席密度的计算由扣除座席面积后通过立席的面积和载客数量联合计算得到。由于同一种

车辆的立席面积是固定的,可以通过单位面积上乘客的数量计算得到立席密度,也就是立席标准产生的过程。在国际上,对车辆立席标准可以概括为 2 种概念:一个是舒适度标准,为 $3 \text{ 人} \cdot \text{m}^{-2}$;另一个是拥挤度标准,为 $6 \text{ 人} \cdot \text{m}^{-2}$ 。当前国内已出现 3 种不同的立席密度标准:①《地铁设计规范》规定车辆立席按 $6 \text{ 人} \cdot \text{m}^{-2}$ 、超员按 $9 \text{ 人} \cdot \text{m}^{-2}$ 考虑;②《地铁车辆通用技术条件》中,车辆立席按 $6 \text{ 人} \cdot \text{m}^{-2}$ 、超员按 $8 \text{ 人} \cdot \text{m}^{-2}$ 考虑;③在某些城市的轨道交通建设标准中,车辆立席按 $5 \text{ 人} \cdot \text{m}^{-2}$ 、超员按 $8 \text{ 人} \cdot \text{m}^{-2}$ 考虑。

由于这些标准均为设计标准,并未考虑人的主观感知程度,不能应用于关于主观偏好的调查中。本文根据我国轨道交通 A、B 型车的座位布置形式以及车厢面积计算站立区面积,实测当时的立席密度。调查问卷中设计不同拥挤度以及其对应的立席密度,并根据当时立席密度使受访者明确立席密度的概念。以此为依据对受访者进行调查,得到实测的立席密度和乘客感知的拥挤程度之间的关系,并利用立席密度对拥挤程度进行描述。调查分别于高峰时段与非高峰时段在上海各条轨道交通线上进行。调查结果如图 1 所示。

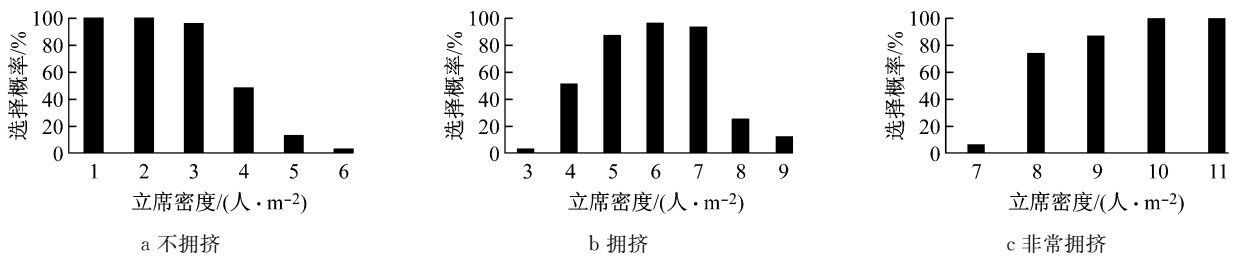


图 1 不同立席密度乘客选择的概率

Fig. 1 Probability of passengers' choice of different congestion under different standing space density

由以上分析可以看出,乘客选择不拥挤时的概率在立席密度 $4 \text{ 人} \cdot \text{m}^{-2}$ 时出现明显下降,因此,不拥挤时的立席密度取临界值 $3 \text{ 人} \cdot \text{m}^{-2}$ 。乘客选择拥挤的概率具有集中性和对称性,因此用 SPSS 软件对其频数图进行拟合分析,验证其分布形式服从正态分布,拥挤时的立席密度取其正态分布的均值 $6 \text{ 人} \cdot \text{m}^{-2}$ 。乘客选择非常拥挤时的概率在立席密度 $8 \text{ 人} \cdot \text{m}^{-2}$ 时出现明显的上升,因此,非常拥挤时的立席密度取临界值 $8 \text{ 人} \cdot \text{m}^{-2}$ 。由此得到评价标准如表 1 所示。

据上海地铁 1 号线的运营统计,近年来高峰小时列车满载率已达 1.06(按立席密度 $6 \text{ 人} \cdot \text{m}^{-2}$ 计)。在 $6 \text{ 人} \cdot \text{m}^{-2}$ 状态下乘客感到不太宽松,但可以挤进去、挤出来,因此有关拥挤度临界状态的分析是

表 1 拥挤度评价

Tab. 1 Congestion degree evaluation		
拥挤程度	立席密度/(人·m ⁻²)	乘客拥挤感受
不拥挤(舒适)	3	乘客能够自由移动,可以看书、看报,较为宽松
拥挤	6	稍可活动,几乎不能看书,不宽松,有些身体接触
非常拥挤	≥8	几乎无法移动,身体接触明显,有明显的被挤压感

合理的。

2 拥挤度影响的离散选择建模分析

2.1 调查方案设计

采用 RP 和 SP 相结合的调查方法获得拥挤度

改变对公共交通方式选择意愿的影响. SP 调查是指为了获得对假定条件下的多个方案所表现出来的主观偏好而进行的调查. SP 调查起源于经济学领域,于 20 世纪 70 年代被引入交通问题的研究,随后 30 多年在交通领域起到了广泛的应用, Hensher^[11], Hole^[12] 成功利用 SP 调查和离散选择模型对居民出行方式选择进行预测,建立了通勤出行方式选择模型.

调查结构分为 3 个部分,第 1 部分为 RP 调查,第 2 部分为 SP 调查,第 3 部分为受访者个人特征调查. RP 调查主要是选择调查对象及调查本次的出行目的,并对受访者过去通常的出行状况做一个简要的了解,并据此确定其在本次调查中的归类情况. SP 调查使受访者对所提供的调查情境做出符合本人意愿的选择,为参数估计提供有效的数据基础. 个人特征调查主要包括年龄、职业、年收入水平等,主要用于对出行者个人特性分析以及选择结果的比较分析. 本次 SP 调查问卷中包括了 4 个变量,分别为车内时间、车外时间、出行费用、拥挤度. 同时根据实际情况每个变量选取符合实际情况的 3 个水平. 根据正交试验设计的原理对变量和水平进行组合设计.

调查采用人工问询的方法,共回收问卷 350 份,其中有效问卷 327 份.

2.2 拥挤度影响的离散选择建模

建立拥挤度影响的出行方式的离散选择模型可以对个人交通行为进行系统化、全程化的了解. 多项 Logit 模型 (multinomial logit model, MNL) 是离散选择模型中最常用的模型之一,该模型是在假设效用的随机项 ϵ_{in} 和确定项 V_{in} 相互独立而且 ϵ_{in} 服从 Gumbel 分布的前提下推导出来的,其数学表达式为

$$P_{in} = \frac{\exp(V_{in})}{\sum_{j=1}^C \exp(V_{jn})} \quad (1)$$

式中: P_{in} 为个体出行者 n 选择第 i 个交通方式的概率; V_{in} 为个体出行者 n 选择的交通方式 i 的效用函数的固定项; j 为交通方式; C_n 为个体出行者 n 选择交通方式的集合.

效用函数 V_{in} 有多种表达形式,但是为了分析及系数标定上的方便,通常采用线性函数形式 $V_{in} = \sum_k \beta_k X_{ink}$, 式中, β_k 为自变量系数, X_{ink} 为出行者 n 选择的交通方式 i 中包含的第 k 个特征变量.

以往研究表明,出行时间和出行费用是影响交通方式优劣的直接原因. 在出行方式研究中,出行时间不仅包括车内时间,而且包括步行时间、候车时间、换乘时间等. 进行出行方式选择时,在考虑总的

出行时间的同时也会权衡各个细化时间之间的关系. 并且注意到拥挤度在进行出行方式选择时是一个很重要的考虑因素. 无论轨道交通是多么的准时高效,但是由于车厢内的拥挤,有些人宁可选择花费更多的费用和时间但不拥挤的交通方式. 因此,本文尝试对拥挤度进行量化分析,将其作为变量在模型中体现出来.

根据以上分析,选择拥挤程度、出行费用、车内时间、车外时间为特性变量,确定离散选择模型的选择效用函数为

$$V_{in} = A_i + \beta_1 R_{in} + \beta_2 C_{in} + \beta_3 I_{in} + \beta_4 O_{in} \quad (2)$$

式中: A_i 为方式选择常量, $A_1 = 0$; C_{in} 为出行费用; I_{in} 为车内时间; O_{in} 为车外时间; R_{in} 为拥挤程度, $i=1$ 对应公交车, $i=2$ 对应轨道交通.

根据调查回收的 327 份有效问卷获得的 $327 \times 9 = 2943$ 个样本的方式选择数据,利用 BIOGEME 软件完成模型的参数标定,初始优度为 -935.749,最大优度为 -642.995, Mcfadden 系数为 0.313,修正 Mcfadden 系数为 0.308,其他标定结果见表 2,其中 * * 表示 99% 置信水平.

表 2 模型参数

Tab.2 Model parameters

模型变量	系数值	T 检验值	
固定哑元	常规公交	0	
	轨道交通	1.050	6.1**
特性变量	拥挤度	-0.347	-11.3**
	出行费用	-0.558	-8.1**
	车内时间	-0.121	-14.7**
	车外时间	-0.101	-10.8**

根据标定结果可以看出,各变量的系数值均小于零,这是符合常理的. 模型中的各个变量的 T 检验值均大于 1.96,即标定结果均满足 95% 的置信水平的要求. 模型的拟合度指标 Mcfadden 系数和修正 Mcfadden 系数均大于 0.2,说明模型有较高的精度且所选择的变量对选择行为产生影响.

从模型的标定结果可见,车内时间的系数大于车外时间的系数. 说明在同时考虑拥挤度、出行费用和出行时间时车内时间的效用大于车外时间的效用. 出行者更希望减少在拥挤的车厢内的停留时间,而不在乎更长的候车时间和步行时间. 由于拥挤度的系数值较大,因此拥挤度显著影响出行方式的选择.

2.3 拥挤度的弹性分析

弹性的概念源于微观经济学中的价格理论,在价格理论中弹性的概念是指需求量或供给量变动对价格或其他因素变动的敏感程度. 由于在交通中供需关系很大程度上类似于经济学中的供需关系,所

以可以借用弹性的概念来分析交通需求.

根据 Logit 模型的假设有

$$P_{in} = \frac{\exp(\sum_k \beta_k X_{ink})}{\sum_j \exp(\sum_k \beta_k X_{jnk})} \quad (3)$$

于是有

$$\begin{aligned} dP_{in}/dX_{ink} = & [\beta_k e^{\sum_k \beta_k X_{ink}} (\sum_j \exp(\sum_k \beta_k X_{jnk})) - \\ & \exp(\sum_k \beta_k X_{ink}) - \exp(\sum_k \beta_k X_{ink}) \cdot \beta_k \cdot \\ & \exp(\sum_k \beta_k X_{ink})] / [\sum_j \exp(\sum_k \beta_k X_{jnk})]^2 \quad (4) \end{aligned}$$

因此,点弹性值计算如下:

$$E_{X_{ink}, P_{in}} = \frac{X_{ink}}{P_{in}} \cdot \frac{dP_{in}}{dX_{ink}} = \beta_k X_{ink} [1 - P_{in}] \quad (5)$$

同理可知,交叉弹性值计算如下:

$$E_{X_{ink}, P_{jn}} = \frac{X_{ink}}{P_{jn}} \cdot \frac{dP_{jn}}{dX_{ink}} = -\beta_k X_{ink} P_{in} \quad (6)$$

假设一种在 RP 调查中最为常见的通勤出行,即需要从中环附近的住址出发到位于市中心区域的公司上下班,有常规公交和轨道交通可供选择,两者拥有相同的直达性.常规公交的可靠性不如轨道交通,但由于可靠性指标较难量化分析,故在出行时间指标中反应可靠性,因此常规公交的出行时间增加.利用“上海地铁”网站查询轨道交通的时间和费用,常规公交的费用为 2 元,时间以实际运行时间为准.2 种公共交通的情况如表 3 所示,根据表中假设,由式(5)、式(6)的点弹性和交叉弹性结果见表 3.

表 3 第 1 种情景初始假设及其点弹性与交叉弹性

Tab.3 Initial situations and point elasticity and cross elasticity in Scene 1

交通方式	初始情况假设				点弹性				交叉弹性			
	拥挤程度	费用/元	车内时间/min	车外时间/min	拥挤度	费用	车内时间	车外时间	拥挤度	费用	车内时间	车外时间
轨道交通	拥挤	4	25	20	-2.477	-0.885	-4.319	-0.801	0.431	0.231	1.126	0.209
常规公交	拥挤	2	45	10	-0.646	-0.462	-0.626	-0.418	1.651	1.77	2.399	1.602

不同交通方式拥挤度、时间、费用等特性变量的点弹性说明不同特征变量变化导致相应交通方式所占比例的影响的差别,即某种交通方式需求量对于该交通方式服务水平的敏感程度.对比表 3 中各项点弹性值可见,选择常规公交的出行者对拥挤度、费用、车内时间、车外时间的点弹性值均大于选择轨道交通的出行者.拥挤度弹性值、车内时间弹性值对于常规公交远大于轨道交通,说明选择常规公交的出行者对拥挤度十分敏感.在这种情况下,影响出行方式选择的主要因素是拥挤度和车内时间.

交叉弹性反映的是一种交通方式服务水平的变化对另一种交通方式需求量变动的的影响程度.当交叉弹性值为负值时,2 种交通方式为互相补充的关系,互补作用越明显时交叉弹性值的绝对值越大.当交叉弹性值为正值时,2 种交通方式为互相替代的关系,当替代作用越明显时交叉弹性值越大.对比表 3 中各项交叉弹性值可以看出,轨道交通的拥挤度、费用、车内时间、车外时间的交叉弹性值均大于常规公

交,说明轨道交通服务水平变化对常规公交的需求量造成的影响大于常规公交服务水平变化对轨道交通需求量的影响.这种影响表现在轨道交通服务水平越高常规公交需求量越小,即常规公交需求被轨道交通替代.

假设常规公交的拥挤程度改善为不拥挤,而时间和费用均不发生改变时为情景 2,见表 4.

对比各项点弹性值可见,常规公交拥挤度下降后其拥挤度弹性值也明显下降,并且费用弹性和时间弹性都下降,说明在达到一定的舒适程度后出行者对出行时间和出行费用的敏感性都会下降.

对比各项交叉弹性值可见,由于常规公交的拥挤度下降,轨道交通的拥挤度、费用、车内时间、车外时间的交叉弹性值均下降,而常规公交的各项交叉弹性值均上升,同时,常规公交车内时间的交叉弹性值大于轨道交通.说明虽然常规公交服务水平的提升对轨道交通的需求量影响较小,但由于常规公交车内拥挤度的下降,常规公交车内时间的减少对轨

表 4 第 2 种情景初始假设及其点弹性与交叉弹性

Tab.4 Initial situations and point elasticity and cross elasticity in Scene 2

交通方式	初始情况假设				点弹性				交叉弹性			
	拥挤程度	费用/元	车内时间/min	车外时间/min	拥挤度	费用	车内时间	车外时间	拥挤度	费用	车内时间	车外时间
轨道交通	拥挤	4	25	20	-0.599	-0.642	-3.132	-0.581	0.442	0.474	2.313	0.429
常规公交	不拥挤	2	45	10	-0.884	-0.948	-1.285	-0.858	1.198	1.284	1.740	1.162

道交通的需求造成更显著的影响。

3 实例分析

由分析可见,拥挤度改变对居民出行选择产生巨大影响,是在构建常规公交和轨道交通方式的效用函数和方式竞争选择模型的不可缺少的因素.通过分析 2 种情景下常规公交和轨道交通的分担率说明拥挤度改变对出行选择的影响.由式(3)计算得到情景 1 常规公交的分担率为 20.7%,轨道交通的为 79.3%,可以看出选择轨道交通的比例远大于选择常规公交的比例,这与实际情况较为符合.

对于公交的拥挤程度为不拥挤,而时间和费用均不发生改变的情景 2.由式(3)计算得常规公交的分担率为 42.5%,轨道交通的为 57.5%.常规公交的分担率上升十分明显,说明拥挤程度的变化会极大影响出行者的选择行为.这也与文中对拥挤度的弹性分析结果一致.

4 结论

(1)提出利用调查中受访者接受程度较高的立席密度概念对拥挤程度进行描述,并根据调查结果建立以立席密度为标准的拥挤程度分级体系.

(2)在拥挤度影响的离散建模分析中,通过对各变量的分析确定车内时间、车外时间、出行费用、拥挤度作为离散选择模型的变量;通过检验可知该模型具有较高的精度.从模型的标定结果可以看出,在同时考虑拥挤度、出行费用和出行时间时出行者对车内时间更为敏感,同时拥挤度的改变会显著影响出行者的出行方式选择.

(3)根据 Logit 模型推导出点弹性和交叉弹性的计算公式.通过对点弹性的分析可见,选择常规公交的出行者对拥挤度十分敏感,并且在拥挤度下降后对出行时间和出行费用的敏感性都下降.根据交叉弹性的分析可见,轨道交通服务水平变化对常规公交的需求量的影响大于常规公交服务水平变化对轨道交通需求量的影响,即轨道交通服务水平的提高造成常规公交需求量的减少.

参考文献:

[1] Agostino Nuzzolo, Umberto Crisalli, Francesca Gangemi. A

behavioural choice model for the evaluation of railway supply and pricing policies[J]. *Transportation Research Part A* 34, 2000,34(5): 395.

- [2] YANG Hai, KONG Hoiyan, MENG Qiang. Value-of-time distributions and competitive bus service[J]. *Transportation Research Part E* 37,2004,37(6): 441.
- [3] 马超群,王玉萍,陈宽民.城市轨道交通与常规公交之竞争模型[J]. *交通运输系统工程与信息*,2007,7(3):140.
MA Chaoqun, WANG Yuping, CHEN Kuanmin. Competition model between urban rail and bus transit [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*,2007,7(3):140.
- [4] 梁丽娟,吴娇蓉,王昊.道路公交与轨道交通竞争选择模型研究——基于上海轨道交通 6 号线客运走廊[J]. *城市轨道交通研究*,2009(9):30.
LIANG Lijuan, WU Jiaorong, WANG Hao. Competition model between rapid and bus transit—a case study of Metro Line 6 in Shanghai[J]. *Urban Mass Transit*, 2009(9):30.
- [5] 张浩然,任刚,王炜.非集计模型在交通方式结构预测中的应用[J]. *交通运输系统工程与信息*,2008(10): 44.
ZHANG Haoran, REN Gang, WANG Wei. Application of discrete choice model in trip mode structure forecasting [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2008(10): 44.
- [6] 杜豫川,蒋盛川,朱迪,等.上海世博会出行方式选择意愿的建模与场景分析[J]. *同济大学学报:自然科学版*,2010(4):515.
DU Yuchuan, JIANG Shengchuan, ZHU Di, et al. Discrete choice model and scenario analysis on trip mode choice behavior for Expo 2010 Shanghai [J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2010(4):515.
- [7] 曾曦,王慈光.Logit 模型的改进及其在客流分担率预测中的应用——以成渝城际铁路为例[J]. *长沙交通学院学报*,2007(12):50.
ZENG Xi, WANG Ciguang. Improvement of Logit model and its application in forecasting the distribution ratios of passenger flows on Cheng-Yu intercity railroad [J]. *Journal of Changsha Communications University*, 2007(12):50.
- [8] Kumar C V P, Basu D, Maitra B. Modeling generalized cost of travel for rural bus users; A case study. [J]. *Journal of Public Transportation*, 2004, 7(2) :59.
- [9] Helbing D, Farkas I, Vicsek T. Simulating dynamical features of escape panic [J]. *Nature*, 2000, 407: 487.
- [10] 沈景炎.关于车辆定员与拥挤度的探析[J]. *都市轨道交通*, 2007,20(5):14.
SHEN Jingyan. On the carriage passenger capacity and the crowdedness involved [J]. *Urban Rail Transit*, 2007,20(5):14.
- [11] Hensher D A. Stated preference analysis of travel choices; the state of the practice [J]. *Transportation*, 1994, 21(2): 107.
- [12] Hole A R. Modelling commuters mode choice in Scotland [D]. Scotland: Department of Economics of University of St Andrews, 2003.