

基于客观测度与主观估算的出行疲劳研究

Analysis of Travel Energy Expenditure Based on Subjective Perception and Objective Measurement

安 健, 孙明正, 郭继孚

(北京交通发展研究中心, 北京 100073)

An Jian, Sun Mingzheng, Guo Jifu

(Beijing Transportation Research Center, Beijing 100073, China)

摘要: 出行舒适度是影响交通方式选择的要素之一,但由于缺少合理的量化方法,其评价长期停滞于定性描述,难以科学反映不同交通方式的服务水平差异。就典型出行环节进行疲劳测定实验,采集不同情况下出行者在单位时间内的客观体能消耗及其对出行疲劳的主观感受;采用自由模量幅度估计估算出行疲劳的主观感受,并与客观体能消耗进行对比。结果显示,车辆行进方式、乘车姿势、乘客负重、车内拥挤程度等均对体能消耗有显著影响,且客观体能消耗与主观感受之间存在显著差异。最后,利用实验结果以北京市和中山市为例进行案例分析,结果表明,在交通方式选择过程中,体能消耗对出行者产生的影响不亚于出行耗时。

Abstract: Comfort of trip is one of the contributing factors to travel mode choice. However, there lacks a reasonable quantitative evaluation approach in literature to properly and rigorously reflect the variation in different travel modes with respect to their level of service. This paper aims to gauge the travel fatigue using both objective monitoring and subjective estimation. For the objective part, an experiment is designed to measure travelers' energy expenditure rates using a heart rate monitor while walking on level ground, going up and down stairs, and taking bus and subway. For the subjective part, free modulus magnitude estimation is used to investigate travelers' subjective perceptions of fatigue while traveling. Results show that the energy expenditure rate is sensitive not only to travel mode but also to posture, load of personal belongings, and occupancy. Significant differences are found between the objectively measured energy expenditure and the travelers' subjective perception. Case studies in Zhongshan and Beijing show that the impact of travel fatigue on a traveler's mode choice behavior is as significant as that of travel time.

关键词: 交通工程; 出行疲劳; 体能消耗; 自由模量幅度估计

Keywords: traffic engineering; travel fatigue; energy expenditure; free modulus magnitude estimation

中图分类号: U491

文献标识码: A

收稿日期: 2012-10-25

基金项目: 国家自然科学基金委员会管理科学部主任基金2012年第1期应急研究项目“我国城市公共交通优先发展战略研究”(71241007)

作者简介: 安健(1982—), 男, 内蒙古呼和浩特人, 博士, 主要研究方向: 智能公共交通系统。E-mail: Marlin_tree@163.com

0 引言

城市客运交通系统是一个以人为主体的复杂、动态人一机一环境系统^[1]。系统中的人是根据社会活动需求进行空间位置转移的行为主体; 机包括城市基础设施、设备、交通工具、信息服务及这些要素的运用规则等; 环境则泛指除了人、机以外的物质环境、社会环境、气候环境等。该系统中, 人的行为由一系列反应动作和活动构成, 是个人与外界环境交互过程中为满足主体特定需要而引起的整个有机体生理与心理活动统一过程的具体表现^[2]。

出行者产生出行需求后会根据自身及外界环境条件选择一种具体的行为实现过程。该过程中出行者最基本的意愿是从可能借助的交通工具中选择一系列在空间上可接驳, 并在可接受的时间内到达目的地的方案。这一意愿也会随着人、机、环境自身特性的变化而发生转

移。人的选择的产生及其动态变化是人在人、机、环境三者特性不断变化和相互作用下,根据自身感知和期望对个人可控资源(如时间、体能等)进行的再分配过程。

舒适度是反映某种交通方式吸引力和服务水平的重要指标,目前已得到广泛重视,但由于受理论基础和技术手段的局限,致使该指标在相关研究中一直停滞于定性描述阶段,并未得到客观量化。研究出行过程中人的生理负荷有利于将这一问题量化,有助于研究者进一步理解不同交通方式间存在的本质差异。此外,结合人类工效学相关理论与研究成果,从一个崭新的视角探讨出行方式选择行为,科学解释公共交通出行与私人机动出行对出行者的心理阻抗差异,将有助于研究者更清晰地认知公共交通服务质量,并为公共交通服务质量改善措施的提出提供重要依据。

出行者在出行过程中需要不断消耗自身能量以维持基本的生理代谢并使活动持续进行。文献[1]将出行者为完成出行而需要付出的生理代价定义为“出行行为的生理负荷”。在城市客运交通系统中,天气状况、出行方式、出行时耗、出行目的、出行负重(携带物品)及出行个体状况的差异导致出行者需要消耗的体能也有所不同。当体能消耗达到一定程度时,出行者就会出现疲劳、局部不适等感受。对出行者而言,在具有多个出行方案的条件下,这一感受差异必然驱使其回避高体能消耗方案,而选择更为轻松、舒适的出行方案。多种方案的比选显然并不只针对车内环节,而是针对出行起讫点之间全部环节所构成的出行

链,见图1。通过试验方法获得出行各环节单位时间内产生的主、客观疲劳是科学量化整个出行链舒适度的必要前提。

1 体能消耗测定方法与研究综述

1.1 体能消耗测定方法综述

为了科学评估人体运动、测定体能消耗,几十年来众多学者采用了各种各样的方法,尝试从不同角度揭示运动量、运动强度与运动效率、人体健康的关系。具体方法可分为六大类:1)行为观察法;2)问卷调查法,包括饮食记录、回忆式问卷及面谈调查三种形式;3)心率监测法;4)间接卡路里计或呼吸热量计测定法;5)双标记水法;6)机械或电子运动传感器法(如三维加速度计)。其中,前两种方法具有主观性强、客观性差、准确率低等明显缺点,越来越难以适应科学、准确评估人体运动的需要,而后四种方法由于各自的优势与劣势,分别在医疗、体育等领域发挥作用。各种体能消耗测定方法的比较分析见表1。

早在20世纪60年代,文献[3-4]就已尝试用线性模型(Linear Model)和对数线性模型(Log-linear Model)来描述心率与体能消耗之间的关系。随后,文献[5]对被试者的心率数据作线性回归分析后发现,心率与运动者的体能消耗具有较好的线性关系;文献[6]则认为,在少量体能消耗的情况下,两者间的曲线关系较为明显,随着体能消耗的增大,这一关系逐渐呈现线性。文献[7]采用对数线性回归拟合体能消耗与心率的关

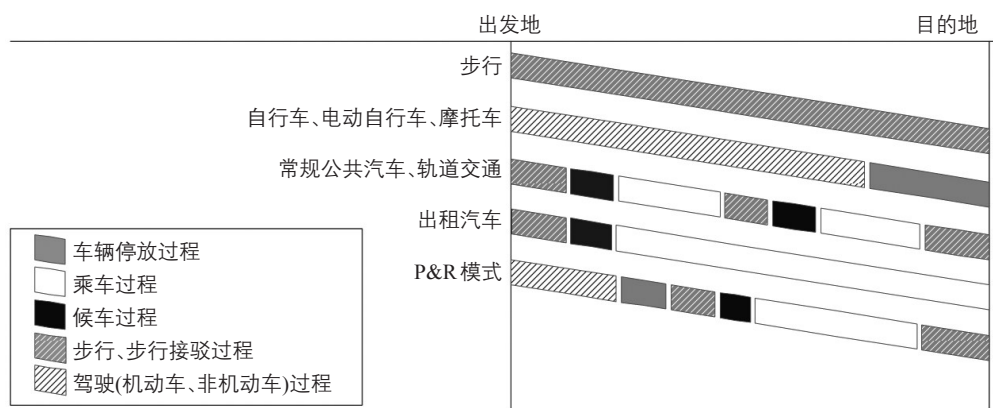


图1 起讫点出行方案比选

Fig.1 Comparison of travel plans between origins and destinations

系，认为线性回归方法存在低估体能消耗的隐患，而对数线性回归才最为理想。

心率与单位时间氧摄入量的线性关系也是心率监测法得到广泛应用的重要原因。文献[8]的实验表明，在运动强度增加时心率与单位时间氧摄入量的相关性达到0.95以上，文献[9]对被试者进行的稳定状态与非稳定状态下的步行实验也印证了这一结论。

芬兰Polar心率仪是近年较为流行的用于心率和运动体能消耗测定的一款产品，其体能消耗测定就是基于表1心率监测法的原理。由于能够较为准确、高频(最小步长1 s)地记录运动心率，并计算体能消耗，因此被广泛应用于运动计划及其相关研究。考虑到本文的实验需求，最终选用芬兰Polar心率检测仪作为客观体能消耗的采集装置。

1.2 相关研究成果

早在1995年文献[10]就归纳、总结了以往研究中测定的人类活动体能消耗率(Energy Expenditure Rate, EER)，涵盖静态坐姿、坐姿上肢作业、静态站姿、站姿上肢作业、步行、骑自行车以及车辆驾驶等活动。其中，对于步行的体能消耗，早期研究主要关注步行速度的影响；随后，体重、性别、年龄、负重、地面阻力及坡道状况的影响也受到了广泛关注。随着技术手段的不断更新和测定成本的下降，越来越多的人类活动体能消耗测定模型与测定值被补充到相应数据体系中，且测定值更为精准。虽然众多活动的体

能消耗率都有数据可以参照，但能够反映出行各环节活动特征的并不多见。文献[1]以性别及成年与否作为基本划分，给出中国城市居民采用步行、公共交通、自行车及小汽车方式出行时的平均体能消耗率，而在公共交通乘车过程中车内乘客密度特性和车辆行进过程中的震动加速特性对乘客疲劳的影响，该研究并未涉及。文献[11]在细节上对公共汽车内站立、步行及驾车出行进行了补充，对比了内外部环境下载三者的体能消耗率，结果显示，即使同为站立，放松站立与不安站立的体能消耗率也有显著差别，这一结论对研究出行站立环节的综合阻抗有一定的借鉴意义。文献[12]更倾向于从细节上区分上肢运动对体能消耗率的影响，研究结果显示，坐姿上肢运动与车辆驾驶存在相似特征，该结果对文献[11]中的车辆驾驶体能消耗也构成了相应的补充。

从上述研究可以看出，公共汽车内坐姿与站姿对体能消耗率的影响存在显著差异，且在站立过程中不同的心理状态也会导致不同的体能消耗率；同时，由上肢活动导致的体能消耗在整个出行中所占比例不容忽视。但已有研究仍存在一定的局限性：首先，未能全面覆盖当前中国城市普遍投入运行的交通方式，缺少对城市轨道交通的考虑，在进行多方式出行选择行为研究时，面临基础数据欠缺的局面。其次，广义公共交通出行中，步行过程与车内过程都伴随着出行负重，乘车过程中的体能消耗率既受乘车姿势(站、坐)的影响，也受乘车负重和车辆加速度(加减速、转弯

表1 体能消耗测定方法比较
Tab.1 Comparison of various energy expenditure methods

方法名称	基本假设与基本原理	优点	缺点	本文适用性
心率监测法	心率与体能消耗具有较好的线性关系；心率与氧气消耗量具有较高的相关性	携带方便	对低强度活动敏感性不强	适用
间接卡路里计或呼吸热量计测定法	被认为是一种测量体能消耗的客观方法。需要测定吸入的O ₂ 量和呼出的CO ₂ 量。根据呼吸时气体交换比率，用O ₂ 消耗量乘以非蛋白质的热当量得到体能消耗量	具有较强的客观性，测定结果真实可信	必须在每次测量前对仪器进行校准，实验条件要求苛刻，实验准备复杂，测定时会较大地影响被试者的运动	不适用
双标记水法	被试者喝入定量的双标记水，在一定时间内(8~15 d)连续收集尿样，通过测定尿样中稳定的双标记同位素和消失率，计算体能消耗量	客观、准确，通常被当作“黄金标准”	水同位素2H ₂ ¹⁸ O非常昂贵，获取不方便；需要复杂和昂贵的分析仪器；测定体能消耗时，须两周时间。	不适用
三维加速度计	加速度向量对时间的积分与体能消耗量呈线性关系	对低强度运动敏感性高，携带方便		适用

及车体震动等)的影响,这些影响在已有研究数据中并未得到合理体现。第三,由于不同人种在生理特征上存在一定差异,已有的体能消耗率数据并不适合直接作为出行选择行为机理的研究依据。

综上,已有的体能消耗率数据虽有较高的参考价值,但由于出行环节构成复杂,且各环节的体能消耗率受个体负重、姿势、车辆震动、车内乘客密度等多方面影响,加上已有数据未能全面涵盖出行过程中的所有行为类型,因此难以满足出行决策行为研究对基础数据的需求。本文希望借助现代技术手段,通过在城市公共交通系统典型环境下进行客观数据采集和相应的主观感受分析,为出行决策行为研究和感知服务质量研究奠定数据基础。

2 出行疲劳测度实验方法

首先使用Polar心率仪采集各种出行状态下出行者的体能消耗率,然后就出行者在试验中的感受和以往的出行经历分别填写两份调查问卷,完成实验数据采集。接下来进行如下工作:1)针对采集数据进行方差分析,识别各种出行状态是否存在显著差异(客观测度);2)采用自由模量幅度估计(Free Modulus Magnitude Estimation, FMME)方法分析被试者的感受,得到出行者对不同出行状态疲劳程度的认识(主观感知);3)通过对比分析,获得分别使用主客观方法测得的体能消耗差别,并得出相应结论。

2.1 实验目的与目标

实验目的是借助当前技术条件,测定主要出行环节的体能消耗率。此外,由于出行决策与服务感知来自个体对疲劳的主观感受,实验中希望能够将出行疲劳的客观测度与主观估算进行有效结合。

通过实验希望实现两个基本目标:1)量化不同情况下出行的体能消耗率,为后续研究提供基础数据;2)深入考察客观测度体能消耗率与主观感知疲劳程度的差异,进一步揭示出行疲劳对个体出行方式选择行为的影响机理。

2.2 实验过程设计

考虑实验开展的便利性及与国内城市公共交通系统的相似性,以日本京都市206路公共汽车(京都大学至JR京都站区段)和地铁乌丸线(竹田至国际会馆区段)作为开展实验的基本线路。

实验于2010年7月中旬进行,正值京都市旅游旺季。206路知恩院前至京都站区段沿线著名旅游景点(如清水寺)较多,客流量大,运能饱和情况频繁发生。地铁乌丸线在竹田与近铁接驳,在JR京都站与JR、新干线等诸多市内、城际轨道交通线路接驳,因此该区段内客流量较高,其他区段只有在早晚高峰才会出现阶段性的大客流状况。

实验于日本关西地区募集了30名亚洲被试者,多数为在校本科生、硕士及博士研究生(男性18人,女性12人),各项参数的平均值与标准差为:年龄 24.7 ± 2.2 岁,体重 64.6 ± 15.2 kg,身高 170.2 ± 8.6 cm。同时与被试者签订实验协议,协议要求被试者身体健康、无肌肉骨骼损伤和心脏病病史,并获得了地方相关部门的法律许可。实验采用客观测度与主观估算两种方法同时进行。

2.2.1 客观测度环节

在阐述实验方法前,引入“基本行为刺激”(Basic Activity Stimulus, BAS)的概念。BAS表示出行者在出行过程中的一种相对稳定状态,在该状态下,出行主体采用的交通方式、乘车姿势、行进方式与速度、所处环境的地面状况(如坡度)、出行负重等基本要素不随时间发生显著变化,见表2。同时,在实验协议中作如下要求:1)实验前一天和实验当天被试者严禁吸烟、饮酒,并在实验前一天保证充足睡眠;2)整个实验过程中被试者要减少不必要的交谈,且禁止听音乐、玩游戏、阅读等活动;3)步行环节中,被试者需按照个人日常出行的步行速度行进;4)乘车环节中,应尽量保持自然乘车状态,禁止主动的上半身剧烈运动;5)为降低由于实验顺序导致的结果偏差,每组实验都将12项BAS的顺序随机化;6)每两个相邻BAS之间,根据前项BAS的强度,安排被试者进行2~8 min的休息,以减少前项BAS对后项BAS数据的影响。

实验中,被试者需按照要求佩戴Polar心率仪的心率信号发生装置并填写数据记录表,且需严格

执行实验协议中的相关说明，在指定时间内完成表2中12种BAS的体能消耗测定。然后根据被试者在各状态的持续时间，计算得到客观体能消耗率。

2.2.2 主观估算环节

被试者对表2中12种BAS的主观感受进行描述，然后，采用FMME方法估算各种BAS的疲劳程度。幅度估计(Magnitude Estimation)^[13]是一种心理物理学方法，用以对给定的刺激强度进行量化评估。FMME是文献[14]在幅度估计方法基础上提出的，与之不同的是，FMME要求以被试者对一系列刺激中的第一个随意指定值为参照对其他刺激进行赋值。FMME方法的目的在于识别各种刺激强度的顺序，而且要通过主观值之间的距离揭示刺激的强度差异。主观估算实验包括下述三个环节：

- 1) 校准实验：校准实验的目的是让被试者熟悉比例判断的方法，并筛选出不适合的被试者^[15-16]。实验时随机给出10条线段，要求被试者对这些线段的长度进行主观估计。经过对数变换后发现实际值与回答值呈线性关系，即两个变换变量的回归系数为1.0(显著性水平 $\alpha=0.05$)；30位被试者均通过了测试。
- 2) 主实验：完成客观测度实验后，要求被试者根据自身感受填写问卷，对每一项BAS给出一个0~100的值来代表其强度，给定的两个参照标准为：“在家中最舒适的状态”为0，“客观测度实

验中单位时间内最疲劳的BAS”为100。由于很难采用通用的标准量化车内拥挤程度，且就拥挤而言，个体感受的差异较大，因此将BAS[2-2]，[2-3]，[3-2]，[3-3]分解为[2-2]*，[2-2]**，[2-3]*，[2-3]**，[3-2]*，[3-2]**，[3-3]*，[3-3]**，(*)和(**)分别表示车内不拥挤和拥挤状况下的主观感受。

3) 数据的标准化：得到的数据首先应通过FMME方法进行标准化。根据Max-Min原则，进行标准化的公式为

$$P_{ij} = \frac{X_{ij} - \min\{X_{ij}\}}{\max\{X_{ij}\} - \min\{X_{ij}\}}, \tag{1}$$

式中： P_{ij} 为被试者*i*对BAS *j*的标准化感知疲劳率(Perceived Fatigue Rate, PFR)，且 $PFR \in [0, 100]$ ，*i*为被试者编号($i = 1, 2, 3, \dots, 30$)，*j*为BAS代码的序号($j = 1, 2, 3, \dots, 12$)； X_{ij} 是被试者*i*为BAS *j*指定的值，即被试者*i*对BAS *j*强度的主观感受值； $\max\{X_{ij}\}$ 和 $\min\{X_{ij}\}$ 为被试者*i*对上述12种BAS的主观感受值中的最大与最小值。

2.3 实验结果分析

首先对EER、PFR进行方差分析，并采用邓肯多重范围检验对BAS进行体能消耗率分组。方差分析结果(见表3)表明，12种BAS的EER与PFR差异显著($p\text{-value} < 0.05$)。下面分别从客观测度、主观估算及两者的差异性出发，对12种BAS

表2 基于基本行为刺激(BAS)的实验方案
Tab.2 BAS-based energy expenditure experiment design

BAS代码	交通方式	姿势	负重/kg	坡度	地点	持续时间/min
[1-1]	步行		0	平地	I ²⁾	15
[1-2]	步行		3.8 ¹⁾	平地	I	15
[1-3]	步行		0	上楼梯	II ³⁾	
[1-4]	步行		0	下楼梯	II	
[1-5]	步行		3.8	上楼梯	II	
[1-6]	步行		3.8	下楼梯	II	
[2-1]	常规公共汽车	坐姿			III ⁴⁾	30
[2-2]	常规公共汽车	站姿	0		III	30
[2-3]	常规公共汽车	站姿	3.8		III	30
[3-1]	地铁	坐姿			IV ⁵⁾	27
[3-2]	地铁	站姿	0		IV	27
[3-3]	地铁	站姿	3.8		IV	27

1)研究显示日常通勤出行中3.8 kg的负重较具代表性;2)I为日本京都大学吉田校区;3)II为日本JR京都站;4)III为206路公共汽车(JR京都站至百万遍交叉口);5)IV为地铁乌丸线(竹田至国际会馆)。

刺激下可能导致的疲劳程度进行分析。

如图2所示,上楼梯([1-3]、[1-5])的体能消耗率显著高于其他BAS(显著性水平 $\alpha=0.05$, 双边检验), 30位被试者无负重和有负重(负重 3.8 kg)的平均体能消耗率分别为 7.80 千卡 $\cdot\text{min}^{-1}$ 和 8.28 千卡 $\cdot\text{min}^{-1}$, 约为平地步行([1-1]、[1-2])和下楼梯([1-4]、[1-6])的2~3倍。可见,出行过程中通行环境显著影响出行者的体能消耗。

由于体能消耗率呈非正态分布,因此采用秩和检验法进行假设检验。结果显示,负重会在平地步行([1-1]和[1-2], $p\text{-value}=0.001$)、上楼梯([1-3]和[1-5], $p\text{-value}=0.022$)、下楼梯([1-4]和[1-6], $p\text{-value}=0.007$)及常规公共汽车站姿乘车([2-2]和[2-3], $p\text{-value}=0.024$)中显著增加被试者的体能消耗率,但在地铁站姿乘车中,无负重与有负重的体能消耗率并无显著差异。

在常规公共汽车和地铁乘车中,坐姿与站姿的体能消耗率有显著差异,站姿明显高于坐姿。公共汽车-站姿-无负重、公共汽车-站姿-负

重、地铁-站姿-无负重、地铁-站姿-负重这四种情况的体能消耗率分别比坐姿高出 40.1%, 64.1%, 30.9%和 31.7%。相比地铁中坐姿与站姿的体能消耗率,常规公共汽车实验中两者的差异更为显著;在负重相同的情况下,站姿乘坐常规公共汽车比乘坐地铁更容易疲劳。即使保持同样的乘车姿势与负重,乘客在常规公共汽车与地铁中的体能消耗率依然存在显著差异:坐姿、站姿无负重和站姿负重的 $p\text{-value}$ 分别为 0.004, 0.003 和 0.002。对客观测度和主观估算的数据按照刺激强度进行分组,通过邓肯多重比较发现,被试者对各环节疲劳程度的感受仍然能够有效支持上述这些结论,但是对各刺激强度的主观感受排序与客观实验结果却差异显著。

根据行进方式将BAS[1-1]至[3-3]主观划分为三组:[1-1]至[1-6]为组1,[2-1]至[2-3]为组2,[3-1]至[3-3]为组3,分别代表步行、乘坐常规公共汽车和乘坐地铁。当进行组内比较时,各BAS的 PFR 排序与 EER 排序完全一致;而跨组比较结果则显示, PFR 和 EER 在测度疲劳上有显著差异,见表4, EER 分组和 PFR 分组是采用SPSS对数据进行邓肯多重比较时,系统根据数据的相似性进行的自动聚类分组。在客观测度结果中,乘车BAS(包括[2-1],[2-2],[2-3],[3-1],[3-2]和[3-3])的 EER 远远低于步行BAS([1-1]至[1-6])(见图2和表4);在主观估算结果中,常规公共汽车站姿乘车([2-2]和[2-3])与地铁站姿负重乘车([3-3])三种BAS的 PFR 显著高于平地步行与下楼梯([1-1],[1-2],[1-4]和[1-6])。[1-3]与[2-3]的 PFR 均值分别为 69.6 和 69.7,而其对应的 EER ([1-3]: 7.8 千卡 $\cdot\text{min}^{-1}$, [2-3]: 2.8 千卡 $\cdot\text{min}^{-1}$)顺序却恰恰相反,与 EER 相比, PFR 的差值并不十分显著。

尽管从客观测度结论看,步行比站立的 EER 高,但从主观实验结果看,站立乘车给乘客带来的不舒适和主观疲劳更为强烈。因此在特定情况下, EER 并不能合理解释出行疲劳对出行方式选择和服务质量感知产生的影响。

为了更加清晰地发现客观体能消耗和主观感受之间的差别,对 EER 进行标准化转换,即假定 EER 为主观给定值,采用式(1)进行转换。标准化的 EER 与对应的 PFR 相减后得到的差值分布见

表3 12种BAS的 EER 和 PFR 方差分析结果
Tab.3 ANOVA of EER and PFR of 12 BASs

类别	平方和	自由度	均方	F值	Sig.
组间比较	1 552.008 ^a , 203 452.400 ^b	11 ^{ab}	141.092 ^a , 59.110 ^a , 18 495.672 ^b	41.859 ^{ab}	0.000 ^{ab}
组内比较	829.517 ^a , 153 767.500 ^b	348 ^{ab}	2.384 ^a , 441.861 ^b		
整体	2 381.525 ^a , 367 219.900 ^b	359 ^{ab}			

注:显著性水平 $\alpha=0.05$; a表示由Polar客观记录的体能消耗率 EER ; b表示标准化感知疲劳率 PFR

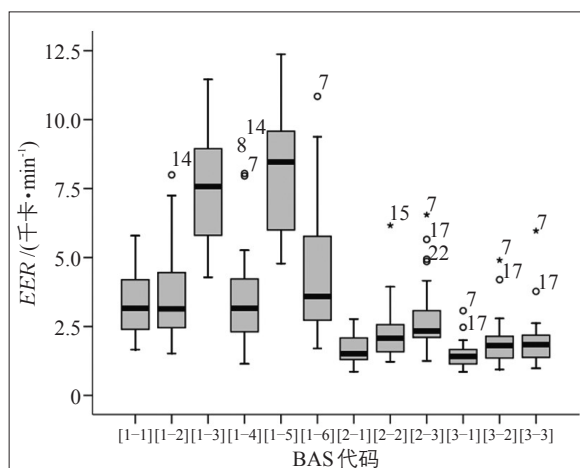


图2 12种BAS的 EER 分布

Fig.2 Energy expenditure rates of the 12 BASs in the experiment

图3。除地铁—坐姿外，乘车体能消耗均被过高估计([2-1], [2-2], [2-3], [3-2]及[3-3])，站姿乘车([2-2], [2-3], [3-2], [3-3])环节客观体能消耗与主观感受之间的差异尤为显著，也就是说，站姿乘车导致的不舒适最容易被出行者主观放大，进而成为阻碍出行者主动选择公共交通出行的重要原因之一。

事实上，车内拥挤的出现和持续时间具有一定的随机性，且个体对拥挤状态的理解及心理可接受的程度也有很大差异，实验中很难进行有效控制。为了揭示乘客对车内拥挤和不拥挤两种状况下乘车舒适度感受的差异，要求被试者在实验过程中结合当时的感受和个人以往的乘车经历，综合回答拥挤和不拥挤乘车环境下的主观感受，见图4。不论是常规公共汽车还是地铁，拥挤对于

出行疲劳的影响均相当显著；与不拥挤相比，拥挤条件下的 *PFR* 平均提升 30.79，相当于在原基础上分别上升 120.2% ([2-2])，65.9% ([2-3])，178.8%([3-2])和 109.6%([3-3])。由拥挤导致的额外体能消耗比负重导致的额外体能消耗略高，从乘客感知角度看，高密度乘车环境导致的疲劳比负重更加严重。

2.4 实验小结

实验测定了出行各环节的体能消耗率，为后续的出行选择行为研究及服务质量的测度与评价研究奠定了良好的数据基础，并得出如下结论：

- 1) 无论交通方式、行进方式、坡度如何，负重对出行者的体能消耗具有显著影响；

表 4 各 BAS 的 EER 和 PFR 的均值、标准差、95% 置信区间及邓肯多重比较结果

Tab.4 Comparison results of means, standard deviations, 95% confidence intervals, and Duncan's multiple range tests of EER and PFR for each BAS

BAS 代码	EER 分组	EER /(千卡·min ⁻¹)			PFR 分组	PFR		
		均值	标准差	95%置信区间		均值	标准差	95%置信区间
[1-1]	3, 4	3.391 1	1.215 0	[2.911 1, 3.872 4]	2	21.8	21.7	[13.7, 29.9]
[1-2]	4, 5	3.837 3	1.683 0	[3.171 5, 4.503 1]	3, 4	33.9	23.2	[25.3, 42.6]
[1-3]	6	7.801 0	1.970 4	[7.021 5, 8.580 4]	6	69.6	26.8	[59.6, 79.6]
[1-4]	4, 5	3.901 4	2.243 0	[3.014 1, 4.788 7]	2, 3	25.5	16.4	[19.3, 31.6]
[1-5]	6	8.280 4	2.054 9	[7.471 1, 9.096 8]	7	91.4	20.3	[83.8, 98.9]
[1-6]	5	4.729 6	2.510 9	[3.736 3, 5.722 9]	3, 4	36.9	17.3	[30.4, 43.3]
[2-1]	1	1.668 7	0.516 5	[1.464 4, 1.870 3]	1, 2	16.4	19.2	[09.2, 23.6]
[2-2]	1, 2	2.366 1	1.014 3	[1.964 8, 2.767 3]	4, 5	44.8	23.5	[36.0, 53.6]
[2-3]	2, 3	2.807 8	1.326 2	[2.283 2, 3.332 4]	6	69.7	23.9	[60.8, 78.6]
[3-1]	1	1.491 3	0.511 0	[1.289 2, 1.693 5]	1	7.6	12.7	[02.8, 12.3]
[3-2]	1, 2	1.981 5	0.874 4	[1.635 6, 2.327 4]	3, 4	33.5	19.7	[26.1, 40.9]
[3-3]	1, 2	2.026 4	0.983 8	[1.637 2, 2.415 5]	5	53.2	23.4	[44.4, 61.9]

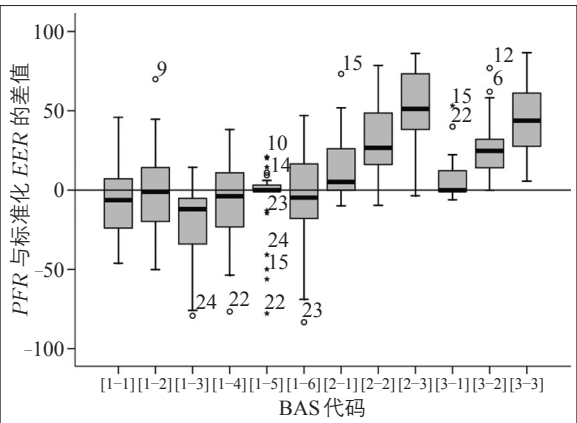


图 3 12 种 BAS 的 *PFR* 与标准化 *EER* 的差值
Fig.3 Discrepancies between the *PFR* and *EER* of the 12 BASs

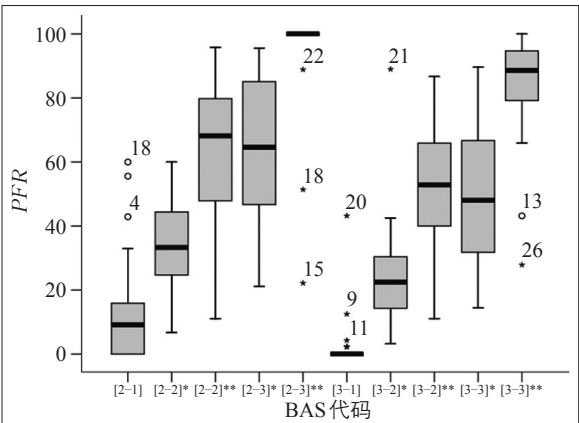


图 4 车内拥挤与不拥挤状况下的 *PFR* 对比
Fig.4 Comparison of *PFR* under crowded and non-crowded occupancy conditions

2) 无论采用何种交通方式, 坐姿体能消耗显著低于站姿;

3) 无论乘车姿势、负重如何, 常规公共汽车体能消耗与地铁有显著差异, 后者在舒适度上显著优于前者;

4) 由于出行过程中外界要素对舒适度产生影响的方式存在差异, 因此很难单纯使用客观的体能消耗率来解释舒适程度, 相比而言, *PFR* 在反映出行舒适度方面更为科学合理;

5) 高密度的车内环境是公共交通服务质量的杀手之一, 尽管由拥挤产生的客观体能消耗不一定很高, 但由拥挤导致的主观疲劳却往往十分严重。

3 案例分析

为初步证实本文的部分研究结论, 选定中山市和北京市的出行调查数据开展相关案例分析。

3.1 中山市

中山市大多数市民偏爱私人机动交通方式而非公共交通的主要原因包括车内拥挤(30%)、准点率低(12%)和候车时间长(32%)。接受调查的出行者中, 56%认为车内拥挤十分严重。因此, 在估算出行体能消耗时, 以“乐观假设”和“悲观假设”分别代表乘车环境密度的两种极端情况: “多数情况下上车就有座位”和“多数情况下都很拥挤”。

中山市全程出行体能消耗估算结果见表5, 摩托车和电动自行车是最受欢迎的交通方式, 而采用常规公共汽车出行的乘客在通勤群体和非通勤群体中仅占4.29%和5.67%, 出行时耗较长是原因之一。常规公共汽车出行体能消耗与其他方式存在显著差异, 这一差异与交通方式分担率的关系在相关性上并不输于出行时耗。因此, 相比出行时耗, 基于悲观假设的出行体能消耗能更合理地解释各种交通方式的出行分担率, 见图5。

3.2 北京市

根据2011年北京市第四次交通综合调查, 工作日六环内全方式平均出行时耗为38 min(除去步行方式, 平均出行时耗为48 min)。把实验采集的平均体能消耗率与相应的出行时耗相乘, 能粗略估算不同交通方式的出行体能消耗, 见图6, 其中, 地铁和公共汽(电)车的悲观体能消耗和乐观体能消耗分别表示拥挤和不拥挤情况下的体能消耗, 自行车的悲观体能消耗和乐观体能消耗分别为文献[1]中提到的最大值和最小值。集约化出行方式(地铁和公共汽(电)车)与私人机动化方式(小汽车和出租汽车)在出行时耗和舒适度方面均存在显著差异, 后者差异更大: 公共汽(电)车出行时耗为小汽车的1.68倍, 但是体能消耗则是小汽车的2.67倍; 若考虑步行环节, 两者在出行体能消耗上的差异远不止如此。

表5 中山市全程出行体能消耗估算(2009年)

Tab.5 Estimation of total travel energy expenditure in Zhongshan (2009)

出行目的	交通方式	出行分担率/%	出行时耗/min			体能消耗/千卡					
						乐观假设			悲观假设		
			均值	标准差	95%置信区间	均值	标准差	95%置信区间	均值	标准差	95%置信区间
通勤出行	①	4.29	34.0	21.3	[32.6, 35.3]	56.7	38.4	[43.3, 70.1]	90.5	56.0	[70.9, 110.0]
	②	0.79	23.3	13.5	[22.4, 24.2]	51.7	25.7	[42.7, 60.6]	54.3	27.0	[44.8, 63.7]
	③	9.37	18.9	13.3	[18.0, 19.7]	50.1	30.6	[39.4, 60.7]	34.2	27.4	[24.7, 43.8]
	④	53.10	16.0	9.40	[15.4, 16.6]	32.5	12.2	[28.2, 36.8]	33.0	13.1	[28.4, 37.6]
	⑤	12.50	16.0	9.60	[15.5, 16.7]	73.6	37.6	[60.5, 86.7]	73.6	37.6	[60.5, 86.7]
	⑥	19.45	13.3	9.50	[12.7, 13.0]	54.1	28.1	[44.3, 63.9]	61.2	31.8	[50.1, 72.3]
非通勤出行	①	5.67	45.6	27.5	[36.0, 55.2]	82.0	54.2	[63.1, 100.9]	126.4	77.5	[99.4, 153.5]
	②	0.52	27.2	16.7	[21.4, 33.0]	50.1	30.6	[39.4, 60.7]	52.4	34.8	[40.3, 64.6]
	③	13.77	15.4	10.8	[11.6, 19.2]	29.2	19.4	[22.4, 36.0]	29.6	20.3	[22.5, 36.6]
	④	56.93	12.4	3.9	[10.3, 14.4]	22.5	11.2	[18.6, 26.4]	23.0	11.8	[18.9, 27.1]
	⑤	7.39	14.5	7.2	[12.0, 17.0]	58.3	29.0	[48.2, 68.4]	58.4	29.0	[48.3, 68.5]
	⑥	16.18	11.5	13.8	[06.7, 16.3]	39.1	46.8	[22.8, 55.4]	44.2	53.0	[25.8, 62.7]

①常规公共汽车;②班车、校车;③私人小汽车、出租汽车;④摩托车、电动自行车;⑤自行车;⑥步行。

从地铁、公共汽(电)车、小汽车和出租汽车的平均体能消耗和出行时耗均值看，二者具有相似的变化趋势。因此，出行时耗和出行体能消耗对出行链阻抗的影响会形成一定的叠加态势，从而进一步加大不同交通方式之间的服务质量落差。

4 结论

本文引入实验手段，采用客观测度与主观估算相结合的方法，对公共交通出行各环节中乘客的体能消耗率及其对疲劳的主观感知进行量化研究和对比分析，为解释交通服务舒适度问题给出了测度与分析方法，并为公共交通出行与私人机动化出行之间存在的本质差异提供研究依据。实验结果显示，负重、乘车姿势、车内乘客密度等均对乘客出行疲劳产生显著影响，且站姿乘车的体能消耗易被乘客的主观感受进一步放大。通过对中国典型城市出行特征分析发现，以体能消耗为代表的舒适度是影响出行方式选择的重要因素之一。

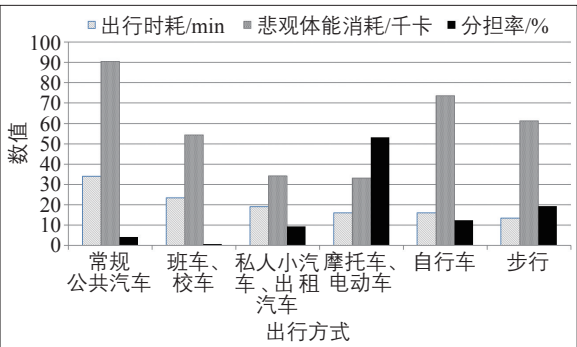


图5 中山市交通方式分担率与出行时耗和悲观体能消耗的趋势对比

Fig.5 Relationship between travel mode split and travel time/pessimistically estimated travel energy expenditure in Zhongshan

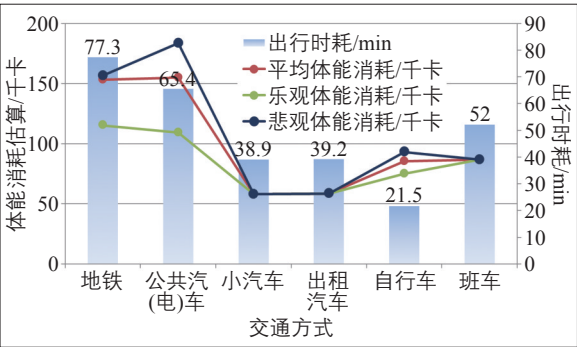


图6 北京市出行体能消耗与出行时耗对比

Fig.6 Energy expenditure and time consumption of different travel modes in Beijing

舒适度作为出行服务的重要特性之一是出行者评价服务质量的重要方面。随着生活水平的提高，人们对出行舒适度的期望和要求也日益提高。本研究旨在从更为本质的层面揭示出行行为规律，从而在交通系统规划、设计与需求管理政策制定中充分考虑“出行者会尽可能趋于低生理损耗”这一特征，以便使城市综合交通系统更具人文关怀。

参考文献：

References:

[1] 郭寒英. 基于出行者生理心理的城市客运交通出行行为研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
Guo Hanying. Study on Travelers' Behavior Based on Their Physiology and Psychology in Urban Passenger Transportation[D]. Chendu: Southwest Jiaotong University, 2007.

[2] 陈信, 袁修干. 人-机-环境系统工程总论[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2000.
Chen Xin, Yuan Xiugan. Man-Machine-Environment System Engineering[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2000.

[3] Booyens J, Hervey GR. The Pulse Rate as a Means of Measuring Metabolic Rate in Man[J]. Canadian Journal of Physiology and Pharmacology, 1960(38): 1301-1309.

[4] Malhotra MS, Gupta J Sen, Rai RM. Pulse Count as a Measure of Energy Expenditure[J]. Journal of Applied Physiology, 1963(18): 994-996.

[5] Meijer GA, Westerterp KR, Koper H, ten Hoor F. Assessment of Energy Expenditure by Recording Heart Rate and Body Acceleration[J]. Medicine & Science in Sports & Exercise, 1989, 21(3): 343-347.

[6] Viteri FE, Torun B, Galicia JC, Herrera E. Determining Energy Costs of Agricultural Activities by Respirometer and Energy Balance Techniques[J]. American Journal of Clinical Nutrition, 1980(24): 1418-1430.

[7] Acheson KJ, Campbell IT, Edholm OG, Miller DS, Stock MJ. The Measurement of Daily Energy Expenditure: An Evaluation of some Techniques[J]. American Journal of Clinical Nutrition, 1980(24): 1155-1164.

[8] Sana M Ceesay, Andrew M Prentice, Kenneth C

- Day, Peter R Murgatroyd, Gail R Goldberg, Wendy Scott. The Use of Heart Rate Monitoring in the Estimation of Energy Expenditure: A Validation Study Using Indirect Whole-body Calorimetry[J]. British Journal of Nutrition, 1989(61): 175-186.
- [9] Victoria L Hood, Malcolm H Granat, Douglas J Maxwell, John P Hasler. A New Method of Using Heart Rate to Represent Energy Expenditure: The Total Heart Beat Index[J]. Archives of Physical Medicine and Rehabilitation, 2002, 83(9): 1266-1273.
- [10] Passmore R, Durnin J V G A. Human Energy Expenditure[J]. Physiological Reviews, 1955(35): 801-840.
- [11] Spitzer H, Hettinger T, Kaminsky G. Tafeln für den Energieumsatz bei körperlicher Arbeit (6th ed.)[M]. Berlin: Beuth Verlag GmbH, Berlin-Köln, 1982.
- [12] Shivayogi V Hiremath, Dan Ding. Evaluation of Activity Monitors to Estimate Energy Expenditure in Manual Wheelchair Users[EB/OL]. 2010[2012-10-25]. http://web.resna.org/library/conference_2010/PDF%20Versions/Mobility/Student%20Scientific/Part%201/HiremathS.pdf.
- [13] Stevens S S. The Direct Estimation of Sensory Magnitude-loudness[J]. American Journal of Psychology, 1956(69):1-25.
- [14] Stevens S S. Psychophysics: Introduction to Its Perceptual, Neural and Social Prospects[M]. New York: John Wiley and Sons, 1975.
- [15] Gescheider G A. Psychophysics: Method, Theory, and Application (2nd ed.)[M]. Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates, 1985.
- [16] Han SH, Song M, Kwahk J. A Systematic Method for Analyzing Magnitude Estimation Data[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 1999(23): 513-524.

(上接第32页)

参考文献:

References:

- [1] 中国市长协会,《中国城市发展报告》编辑委员会. 中国城市发展报告(2002—2003)[M]. 北京: 中国商务出版社, 2004.
- [2] 汪光焘. 树立和落实科学发展观 促进城市公共交通优先发展: 在全国城市公共交通工作会议上的讲话[Z]. 北京: 中华人民共和国建设部, 2004.
- [3] 中华人民共和国建设部. 关于优先发展城市公共交通的意见(建城[2004]38号)[Z]. 北京: 中华人民共和国建设部, 2004.
- [4] 中华人民共和国国务院办公厅. 国务院办公厅转发建设部等部门关于优先发展城市公共交通意见的通知(国办发[2005]46号)[Z]. 北京: 中华人民共和国国务院办公厅, 2005.
- [5] 中华人民共和国国务院. 国务院关于城市优先发展公共交通的指导意见(国发[2012]64号)[Z]. 北京: 中华人民共和国国务院, 2012.
- [6] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴(2012)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2012.
- [7] 中华人民共和国建设部. 中国城市建设统计年鉴(2004)[M]. 北京: 中国计划出版社, 2005.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中国城市建设统计年鉴(2010)[M]. 北京: 中国计划出版社, 2011.
- [9] 汪光焘, 陆原, 郭继孚, 等. 我国城市交通公交优先发展战略研究[R]. 北京: 北京交通发展研究中心, 北京工业大学; 广州: 广州市建设委员会; 上海: 同济大学, 等, 2012.
- [10] 汪光焘. 全面落实优先发展公共交通战略 促进城市科学发展和社会和谐[J]. 城市交通, 2007, 5(1): 6-10.
- Wang Guangtao. Promoting Advances in Urban Science and Harmony in Society through Transit Priority Strategies[J]. Urban Transport of China, 2007, 5(1): 6-10.
- [11] 张东华. 论公交优先中的地方政府作用[D]. 济南: 山东大学, 2009.
- Zhang Donghua. A Study on Local Government's Effects in Public Transport Priority[D]. Ji'nan: Shandong University, 2009.