

# 暴雨内涝下公交乘客的出行选择行为

薄 坤<sup>1,2,3</sup>, 滕 靖<sup>1,2</sup>, 俞 洁<sup>4</sup>, 韩大海<sup>4</sup>

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2 上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 上海 201804; 3. 上海海事大学 高等技术学院, 上海 201306; 4. 美国威斯康星大学密尔沃基分校工程学院, 美国 密尔沃基 53211)

**摘要:** 基于暴雨内涝天气对公交线路运行影响强弱的三种情形, 通过实际调查(RP)和意向调查(SP)的调查结果进行效用模型估计和决策变量的敏感性分析, 解析暴雨内涝下公交乘客的出行选择行为机理, 得到公交乘客出行选择行为的影响因素(由强至弱)是步行时间、票价、车内时间和车内拥挤程度, 以及所选出行方式的主要特点(由强至弱)是零换乘、低票价、中途易更改出行意愿和运行稳定. 最后根据上述结果, 从调度指挥、对信息服务、交管保障三个方面进行了暴雨内涝天气下公交应急预案的探讨.

**关键词:** 出行选择行为; 公交乘客; 多项 Logit 模型; 敏感性分析; 暴雨内涝天气

**中图分类号:** U121

**文献标志码:** A

## Travel Choice Behavior of Transit Passengers in the Storm Weather with Road Waterlogging

BO Kun<sup>1,2,3</sup>, TENG Jing<sup>1,2</sup>, YU Jie<sup>4</sup>, HAN Daha<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the State Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Rail Infrastructure Durability and System Safety, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. College of Higher Technical, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China; 4. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Wisconsin at Milwaukee, Milwaukee 53211, USA)

**Abstract:** Derived from revealed preference (RP) and stated preference (SP) survey results for the transit passengers, this paper developed the travel choice behavior model considering the effects on bus route operation under three types of storm waterlogging scenarios. Sensitivity analysis was also performed to evaluate the critical factors for transit passengers in choosing their travel modes, which include walk time, transit fare, in-bus congestion degree, and in-bus travel time (from high to low). And, the main features of the selected travel modes are zero transfer, low fare, easy to

change traveling intention and stable operation (from high to low). These finding could have implications for developing bus emergency management plan and serve as references for public transit agency regarding bus dispatching, information announcement and traffic safeguard.

**Key words:** travel choice behavior; transit passenger; multinomial model; sensitivity analysis; the storm weather with waterlogging

公共交通是城市交通系统的关键组成之一, 被视为解决通勤出行的最重要的途径<sup>[1]</sup>. 地面公共交通运行于道路之上, 其运行服务受到道路交通拥堵的影响. 天气是引起道路交通拥堵的主要原因之一<sup>[2]</sup>. 随着极端天气日数的增加<sup>[3]</sup>, 交通拥堵将比以往更为严重<sup>[4-5]</sup>.

近五年, 因天气状况导致出行行为发生变化的研究引起了高度关注<sup>[6-7]</sup>, 特别是降雨天气下出行目的<sup>[8]</sup>、职业<sup>[9]</sup>、年龄<sup>[10]</sup>、出发地点<sup>[11]</sup>、信息<sup>[12]</sup>和出行距离<sup>[13]</sup>等个人出行行为方面的研究. 交通需求、交通安全、交通流量、出行方式、出发时间和路线选择等因素都会影响降雨天气条件下的出行决策<sup>[14-16]</sup>.

然而, 降雨天气对公交乘客出行行为的影响受到的关注却较少. 已有研究较多的是从不同角度验证了雨天公交乘客数量的变化, 表明降雨天气对公交乘客的影响与出行目的、时间和地点有关<sup>[11]</sup>, 如公交通勤乘客的出行满意度<sup>[17]</sup>; 公交使用量和乘客人数减少<sup>[18]</sup>; 周末公交出行比工作日更易受天气的影响; 周末偶尔公交出行的乘客比频繁公交出行的乘客更易受影响<sup>[19]</sup>; 在公交专用道上, 雨量小时乘坐公交的乘客数会减少, 但雨量大时会增加<sup>[20]</sup>. 在不同观察期、不同地点、不同受访者和不同出行目的的研究背景下, 得出的影响因素和影响程度会有差

收稿日期: 2018-07-11

基金项目: 上海市科学技术委员会“科技创新行动计划”社会发展领域重点项目(17DZ1204409)

第一作者: 薄 坤(1982—), 女, 讲师, 博士生, 主要研究方向为公共交通运输规划与管理. E-mail: vipbo@126.com

通信作者: 滕 靖(1977—), 男, 副教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为运输管理工程. E-mail: tengjing@tongji.edu.cn

别。以往研究未提及降雨对公交运行的具体影响,欠缺对公交乘客出行行为影响因素微观研究,缺少对降雨天气下改进公交运营管理的可操作性指导。

本文研究暴雨内涝天气下公交乘客的出行选择行为,区分内涝对公交车运行的影响程度,探讨公交乘客出行行为改变及其影响因素对出行决策的作用机理。

## 1 数据分析

居住用地区域是交通出行的主要来源区域之一,本次调查区域选择在上海市中外环间的大型居住区,位于祁连山路、古浪路、武威东路和桃浦西路沿线及围合区域。该区域由于地势偏低,降雨天气下道路积水经常发生,阻断道路通行。同时,该区域内设有公交站点,但无接驳地铁站的公交接驳线路服务,出行者步行至地铁站距离约 1.5 km。因此,受访者在接受情景调查时,对问卷场景已有心理共识。调查针对工作日早高峰的出行者进行。

调查问卷面向由家出行的乘客,包括了个人社会经济特征属性、出行特征属性和情景假设问题。实际调查(revealed preference, RP)中涉及个人社会经济特征属性(性别、年龄、收入和职业)和出行特征属性(出行目的、出行主方式和出行时间组)。意向调查(stated preference, SP)设置了三个情景,每个情景对应 4 种不同的车内拥挤程度和 6 个备选项,每一个选择项具有一组出行方式特征值,受访者需评估备选方案并确定选择结果。由于在公交站台获知的实时车辆运行信息有助于乘客的出行选择<sup>[12]</sup>。因此,本次调查的前提是受访者已知有关公交车运行的实时信息,如路况、车内拥挤程度和下辆车到站时间。

情景假设方案基于暴雨内涝天气,公交行驶所经道路存在不同程度的积水现象:

情景 1: 因局部积水,个别路段无法通行;公交线路局部绕行。

情景 2: 因多处积水,多处路段无法通行,部分公交缩线运行。

情景 3: 部分路网严重积水,经行的公交线路停运。本次调查共发放 185 份问卷,其中有效问卷 162 份,得到 1 944 条数据。备选出行方式(图 1)有:

方式一(M1): 乘坐长距离公交线路(公交直达),其中公交指公共汽、电车交通。

方式二(M2): 先乘坐某一公交线路,然后换乘另一公交线路(公交+公交)

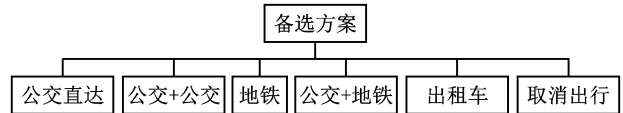


图 1 多项 Logit 模型备选方案

Fig.1 Multinomial Logit model choice set

方式三(M3): 步行至地铁站,乘地铁(地铁)

方式四(M4): 先乘坐一段公交车至地铁车站,然后换乘地铁(公交+地铁)

方式五(M5): 出租车

方式六(M6): 取消出行

根据 2017 年上海市统计年鉴和全市职工平均收入数据得知上海市通勤比例约为 57%,平均工资为 7 132 元。本次调查样本中通勤比例和收入特征基本符合上海市基本情况。

首先,本文对个人社会经济属性和出行特征进行初步的统计分类。样本的指标特征包括性别(男、女)、年龄(16 岁以下、16~24 岁、25~34 岁、35~44 岁、45~60 岁、60 岁以上)、月收入(2 000 元以下、2 000~5 000 元、5 000~10 000 元、10 000 元以上)、职业(政府事业单位工作人员、企业员工、学生、自由职业人员、其他)、出行目的(通勤、商务、休闲、看病、探访亲友、其他)、出行方式(公交、地铁、出租车、自行车、步行)、出行时长(30 min 以内、30~60 min、60~90 min、90 min 以上)、换乘(有换乘、无换乘)。样本特征如下:25 岁至 60 岁的受访人数达 61.73%;80%以上受访者的月收入在 2 000~10 000 元之间;约半数受访者的出行目的是通勤;公交和地铁是主要的出行方式;出行时间超过 60 min 的受访者人数达到近 80%;近半数受访者出行换乘。总体来说,受访者以通勤乘客和公共交通出行行为为主,大部分出行时间较长。

然后,本文对个人社会经济属性与出行特征的相关性进行了分析(表 1),研究发现:换乘行为影响出行时间,换乘次数的增加会降低出行效用;收入是影响出行决策的重要因素;受访者出行目的主要是通勤和商务;受访者倾向于选择出行时间长而换乘次数少的出行方式。

综上所述,在常态天气下,出行时间、收入和换乘次数是影响出行行为的主要因素,这些因素将作为决策变量应用于后续出行选择行为模型的构建。

## 2 建模

个人出行者的出行选择行为通常是离散问题。

表 1 个人社会经济属性与和出行特性相关性

Tab. 1 Correlations of individual socioeconomic and travel characteristics

	性别	年龄	月收入	职业	出行目的	主要出行方式	出行时间	换乘
性别		-0.674	0.001**	0.487	0.559	0.466	0.095	0.844
年龄	0.674		0.010*	0**	0**	0.375	0.633	0.368
月收入	0.001**	0.010*		0**	0**	0.669	0.752	0.006**
职业	0.487	0**	0**		0**	0.051	0.565	0.106
出行目的	0.559	0**	0**	0**		0.797	0.277	0.541
出行方式	0.466	0.375	0.669	0.051	0.797		0.774	0.936
出行时间	0.095	0.633	0.752	0.565	0.277	0.774		0**
换乘	0.844	0.368	0.006**	0.106	0.541	0.936	0**	

注:“\*\*”表示显著水平 0.01;“\*”表示显著水平 0.05.

研究框架包括数据来源和数据分析.通常,研究者从 RP 和 SP 调查中获得数据,并使用离散选择模型<sup>[13]</sup>(discrete choice models, DCM)和结构方程模型<sup>[21]</sup>(structural equation modeling, SEM)来估计选择概率.由于 RP 和 SP 调查的数据各自有优缺点,便有学者提出了 RP 和 SP 数据结合的应用<sup>[21]</sup>.本文数据来自于 RP 和 SP 调查结果,首先采用统计学方法对 RP 数据进行分析,得出影响常态天气下公交乘客出行选择行为的主要因素,再通过 SP 数据估计出暴雨内涝天气下影响出行行为的关键因素.采用 RP 和 SP 数据结合式的数据分析,既涵盖了数据的绝对存在属性,又包含了数据的偏好属性,使数据的鲁棒性更强.

本文从 RP 调查数据统计分析结果得知出行时间、收入和换乘次数是出行方式选择中的主要因素.收入因素与个人社会经济属性有关,出行时间和换乘次数与公交服务质量有关.因此,模型的决策变量围绕这三个主要因素来确定.其中,出行时间因素通过步行时间、站台等候时间和车内时间三个指标来量度,收入因素由票价来量度.换乘次数由具体的换乘行为发生次数来量度.当暴雨内涝天气发生时,通常会延长乘客的等车时间,从而使站台汇聚更多的乘客,加剧车内拥挤,该表征由车内拥挤程度来量度.

多项 Logit 模型已被证明适用于混合交通环境下的出行方式选择建模<sup>[22]</sup>.本文应用多项 Logit 模型的理论,通过车内拥挤程度、步行时间、站台等候时间、车内时间、票价和换乘次数 6 个决策变量构建模型.决策变量解释如下:

(1) 车内拥挤程度指乘客在所乘坐的车(公交车、地铁或出租车)中拥挤程度的感受.

(2) 步行时间指从出发点 to 车站(站台或上车点)的步行时间.

(3) 站台等候时间指乘客在站台(或上车点)等车的时间.

(4) 车内时间指乘客在车内花费的时间.

(5) 票价指公交车票价、地铁票价和出租车车费.

(6) 换乘次数指公交乘客从一个交通工具换到另一个交通工具的次数.

建立模型为:

$$U_i = a_i + b_1 C_{di} + b_2 W_{ti} + b_3 t_{wi} + b_4 t_{li} + b_5 T_{fi} + b_6 N_{ci}$$

其中:下标  $i$  是指可选的出行方式; $a_i$  是固定哑元,假设  $a_1=0$ ;  $b_j, j \in (1, 2, 3, 4, 5, 6)$  指各变量的权重;  $C_{di}$  指第  $i$  种出行方式的站内拥挤程度;  $W_{ti}$  指第  $i$  种出行方式所需的步行时间;  $t_{wi}$  指第  $i$  种出行方式所需的站台等候时间;  $t_{li}$  指第  $i$  种出行方式车内所需时间;  $T_{fi}$  指第  $i$  种出行方式的票价;  $N_{ci}$  指第  $i$  种出行方式的换乘次数.

本文使用 BIOGEME 软件来估计多项 Logit 模型.从估计的结果看,地铁出行方式、站台等候时间和换乘次数的 T 检验不显著.由于调查区域距离最近的地铁站需步行约 30 min;站台等候时间和换乘次数两项会降低乘客出行效用,对于出行目的为通勤的乘客,能乘上车才是最关键的.故地铁出行方式和两个决策变量在原模型中被剔除.车内拥挤程度变量的检验为不显著,但由于其在模型中体现为正效用,因此保留.调整后的效用函数模型为式(1),模型可接受(表 2).

$$U_i = a_i + b_1 C_{di} + b_2 W_{ti} + b_4 t_{li} + b_5 T_{fi} \quad (1)$$

### 3 敏感性分析

在多项 Logit 模型中,变量之间互相影响,导致对变量的估计不能直接反映给定变量对整体的影响.由于将一个变量与其他变量组合的方法有很多,导致无法确定给定变量的“严格影响”程度.敏感度分析是使模型的变量数值在某特定范围内变动,以观察模型行为或变化情形的一种分析方式.在变量

表 2 估计结果

Tab.2 Estimation results

变量	值	T 检验	变量	值	T 检验
$a_1$	0		$a_5$	-9.258	-5.135
$a_2$	-0.190	-2.224	$a_6$	-6.029	-2.933
$a_4$	-1.093	-5.888	$b_4$	-0.025	-2.926
$b_1$	1.038	0.984*	$b_5$	0.063	3.875
$b_2$	-3.532	-3.097			
估计参数个数 8			似然比检验 915.221		
观察数 1 210			$\rho^2=0.252$		
对数似然值-1 356.37			$\bar{\rho}^2=0.248$		
注：“*”指 T 检验不显著					

数值变化时,计算乘客在各出行方式下的敏感度式(2)和乘客选择的概率式(3)<sup>[10]</sup>,从而理解给定变量的变化对出行方式选择结果概率的影响。

$$S_i = \frac{P_m^* - P_m}{P_m} \quad (2)$$

$$P_m = \frac{1}{\sum_{j \in C_m} e^{V_{jn} - V_{in}}} \quad (3)$$

式(2)~(3)中: $S_i$ 为乘客 $n$ 的出行方式 $i$ 的敏感度分析结果; $P_m^*$ 为在假设变量变化时乘客 $n$ 选择出行方式 $i$ 的估计概率; $P_m$ 为假设变量下乘客 $n$ 选择出行方式 $i$ 的估计概率; $V_{in}$ 为乘客 $n$ 选择出行方式 $i$ 的效用函数中的固定项; $V_{jn}$ 为乘客 $n$ 选择出行方式 $j$ 的效用函数中的固定项; $C_m$ 为出行方式备选方案集.本文使用模型(式(1))进行敏感性分析检验。

车内拥挤程度、步行时间、车内时间和票价是反映公交服务质量的指标,在暴雨内涝天气下,指标的量化值能够反映出当时公交服务质量水平,同时可以间接体现天气的严重程度.与之相对应的是车内乘客数量的增加、步行路况的恶劣程度、交通拥堵的加剧和打车难等现象。

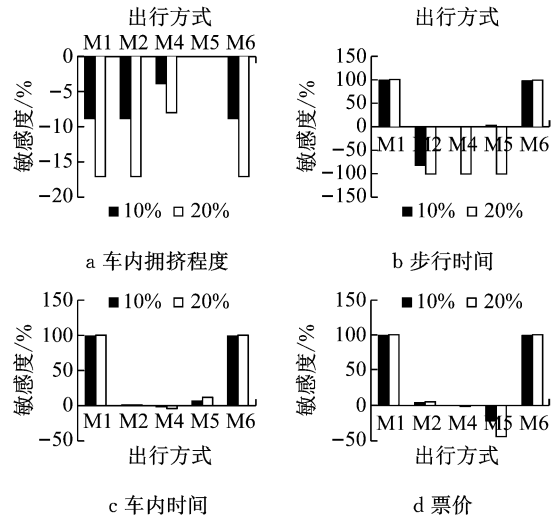
下面,从横向和纵向两个角度解释敏感性分析结果(图 2)。

### (1) 横向敏感性分析结果

即,基于各决策变量变化的备选出行方式的敏感性分析.其中,最直观的结果是乘客在步行时间、车内时间和票价三个变量增加时,选择公交直达和取消出行方式的选择概率表现为绝对增加(即变化程度为 100%).公交直达是备选方案中出行花费最低并无需换乘的方式,取消出行无出行花费支出.这说明,天气情况越恶劣,乘客的选择零或低票价、零换乘出行.除此之外的分析结果如下:

#### ① 车内拥挤程度

车内拥挤程度的增加,除了对出租车方式没有影响外,对公交换乘地铁的出行方式影响最小.随着变量增加幅度的提升,影响继续扩大.变化幅度增加



注:M1—公交直达;M2—公交换乘公交;M4—公交换乘地铁;M5—出租车;M6—取消出行

图 2 关键变量的敏感度图示

Fig.2 Sensitivities with respect to simultaneous changes

20%产生的影响是增加 10%的近 2 倍.说明,乘客选择公共交通出行方式(公交直达、公交换乘公交和公交换乘地铁)的概率随着车内拥挤程度的增加而减少,这一点与常态天气下的乘客出行行为一致<sup>[23]</sup>.其中,由于地铁的准时性高于公交,通常情况下其运营稳定性高于地面公交,因此选择公交换乘地铁出行方式概率减少的幅度是其他方式的一半。

#### ② 步行时间

步行时间增加,间接反映了道路通行环境进一步恶化.在常态天气下,从案例中心区域到最近地铁站的步行时间约 20 min,乘坐公交需花费约 35 min,对于该区域的乘客而言,公交换乘地铁的出行方式并不便利。

当步行时间增加 10%时,乘客选择出租车出行的概率有所增加,选择公交换乘地铁的概率表现为略有减少,选择公交换乘公交的概率大幅下降.说明,影响乘客的选择的因素最大的是步行环境,其次是公共交通服务的稳定性.而当变量幅度增加到 20%时,这三种出行方式的选择概率则会绝对减少(即变化程度为-100%).说明,随着路况的进一步恶化,乘客不再选择高票价和需要换乘才能完成的出行方式。

#### ③ 车内时间

当车内时间变量增加时,选择公交换乘地铁出行方式的概率会小幅减少,这一点与与常态天气下乘车出行行为相反<sup>[24]</sup>,选择公交换乘公交和出租车方式的概率则小幅增加.而选择出租车出行方式的

概率增加的幅度相对较大.这三种出行方式中,出租车的运行线路最灵活;一旦途中遇严重拥堵路况,乘客选择公交换乘公交的方式相比公交换乘地铁的方式更易临时改变出行方式或出行意愿.这说明,在恶劣天气下,只要地铁运行无故障,则对出行时间影响不大.公交换乘地铁出行方式下车内时间的增加,除可能地面公交行驶缓慢外,也可能由地铁运行故障和地铁大客流事件导致,因此选择概率会减少.一旦地铁拥堵发生,乘客二次选择出行方式的难度大于地面交通,因此公交换乘公交和出租车的出行方式的选择概率表现为增加.其中,出租车运行的路线比公交线路灵活,故随着车内时间的增加,选择出租车出行方式的概率增加明显.

#### ④ 票价

备选出行方式中,出租车方式车费最高,其次是公交换乘地铁.当票价上涨时,这两种出行方式的选择概率在减少.当票价增加幅度达到20%时,乘客放弃选择出租车出行方式的可能性达到近一半.说明,票价与出行方式选择概率呈反比,票价越高,选择概率越低.

#### (2) 纵向敏感性分析结果

即,基于备选出行方式的各变量的影响程度.

① 基于公交直达和取消出行的出行方式.步行时间、车内时间和票价三个变量增加时对选择该出行方式为绝对正影响,车内拥挤程度变量引起负影响.

② 基于公交换乘公交出行方式.当各变量值增加时,步行时间变量对选择该方式的影响最大,车内时间变量对其影响最小.

③ 基于公交换乘地铁出行方式.当各变量值增加10%时,车内拥挤程度变量对选择该方式的影响最大.当各变量值增加20%时,步行时间变量对其影响最大.

④ 基于出租车出行方式.当各变量值增加10%时,票价变量对选择该方式的影响最大.当各变量值增加20%时,步行时间变量对其影响最大.

综上所述,5个备选出行方式的敏感性反映了乘客倾向于选择具有零换乘、低票价、中途易更改出行意愿和运行稳定的出行方式(影响度依次为:零换乘>低票价>中途易更改出行意愿>运行稳定).4个变量的灵敏度由强到弱依次是步行时间、票价、车内时间和车内拥挤程度,其中步行时间、车内时间和车内拥挤程度三个变量与公交服务质量直接相关.

## 4 对应用的支持

### 4.1 效用分析

本文三个假设情景的暴雨内涝天气对公交运行的影响强度呈现三个等级,本文采用平均效用值来估算不同情景下出行方式选择的趋势(表3).

表3 平均效用值

	公交直达	公交+公交	公交+地铁	出租车	取消出行
情景一	-14.56	-15.38	-34.57	-25.54	-1 054.07
情景二	-32.48	-32.41	-34.26	-25.17	-1 403.58
情景三	-67.43	-31.41	-33.57	-25.05	-1 753.08

情景一(局部积水,局部绕行):乘客选择公交直达出行方式的效用最大,其次是公交换乘公交的出行方式.当暴雨内涝天气下公交局部绕行时,乘客首选公交直达出行方式,其次选择公交换乘公交的出行方式.建议首末站不受影响且绕行段不超过1/3的情况下,既有线路维持运行.因绕行无法服务的乘客需要及时得到信息预告.

情景二(多处积水,缩线运行):乘客选择出租车出行方式的效用值最大.当公交线路缩线运行时,乘客主要选择公交换乘公交的方式继续出行.虽然出租车是首选出行方式,但在暴雨内涝天气下,打车会十分困难.因此,有效的公交换乘信息服务十分必要.

情景三(局部路网积水,经行线路停运):乘客选择出租车出行方式的效用值最大.受限于出租车运输能力,公交线路停运后,大量需要继续出行的乘客还将选择公交换乘公交和公交换乘地铁方式出行.根据积水情况,利用可通行路网开行接驳地铁的临时公交线路服务是必要的.

可见,不同天气恶劣强度下,公共交通服务的侧重方向不同.

### 4.2 应用对策

当暴雨内涝发生时,公交运营部门可通过气象部门和路政部门上传的数据,实时了解公交线路路况状态,决定是否启动多部门联动应急预案.根据本研究结论,应急预案需解决的问题有:

#### (1) 调度方案

当车速降低和线路绕行后,车辆周转时间变长、服务频率下降,需要决定是否通过投入机动车辆来降低车内拥挤程度.在公交绕行、缩线或停运的情况下,需要提出滞留乘客的接驳地铁公交线路服务方

案,包括临时线路走向、停站及配车方案.对于公交换乘地铁不便的区域或不满足 10 min 步行至地铁站点的区域增加公交线路.

### (2) 信息服务

向受影响区域居民发送未来时间段内(如 30 min)的公交运行预报信息,包括线路调整、时刻表变化、车程时间、车内拥挤程度等.此外,还需要给受天气延误影响的乘客提供出行引导建议信息,乘客根据接收的公交运行预报信息调整出行方案,并帮助缓解路网的进一步拥堵恶化.

### (3) 交管保障

公交运营企业需要联合气象部门和路政部门开展天气变化下公交运行风险分析工作.同时需要交管部门对公交通行权给与保障,尽量缩减乘客车内时间和候车时间.

## 5 对下一步研究的思考

在今后的研究中,可以从三个方面继续深入.一是,扩大调查范围.样本研究区域可扩展为城市中心城区易内涝区域.从而更全面地发现暴雨内涝天气下影响公交乘客出行选择行为的因素.此外,面向地铁网络密度低的城市中心区域展开调查,且可与国外城市调查数据进行比较研究.二是,考虑更多效用影响因素,如出行时间可靠度效用因素,分析其对出行选择的影响.三是,对出行群体进行分类,如按照不同年龄、出行距离、出行目的等,估计不同分类下模型变量的显著性.

### 参考文献:

- [1] CATS O, JENELIUS E. Dynamic vulnerability analysis of public transport networks: mitigation effects of real-time information[J]. *Networks and Spatial Economics*, 2014, 14(3-4): 435. DOI: 10.1007/s11067-014-9237-7.
- [2] SYSTEMATICS C. Traffic congestion and reliability: trends and advanced strategies for congestion mitigation [R]. Washington D C: Federal Highway Administration, 2005.
- [3] PACHAURI R K, ALLEN M R, BARROS V R, *et al.* IPCC 2014: Climate change 2014: Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [R]. Geneva: The Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014.
- [4] SINGH P, SINHA V S P, VIJHANI A, *et al.* Vulnerability assessment of urban road network from urban flood [J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2018, 28: 237. DOI: 10.1016/j.ijdr.2018.03.017.
- [5] 孙洪运,杨金顺,吴兵.暴雨对快速路速度-密度关系影响的实证分析[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2016, 16(3): 221. DOI:10.3969/j.issn.1009-6744.2016.03.033.
- [6] SUN Hongyun, YANG Jinsun, WU Bing. E-mpirical analysis of speed-density relationships for urban expressway under rainstorm condition [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2016, 16(3): 221. DOI:10.3969/j.issn.1009-6744.2016.03.033.
- [7] CHEN R B, MAHMASSANI H S. Let it rain: weather effects on activity stress and scheduling behavior [J]. *Travel Behaviour and Society*, 2015, 2(1): 55. DOI: 10.1016/j.tbs.2014.08.001.
- [8] MADRE J L, AXHAUSEN K W, BRÖG W. Immobility in travel diary surveys [J]. *Transportation*, 2007, 34(1): 107. DOI: 10.1007/s11116-006-9105-5.
- [9] VIJ A, CARREL A, WALKER J L. Incorporating the influence of latent modal preferences on travel mode choice behavior[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2013, 54: 164. DOI:10.1016/j.tra.2013.07.008.
- [10] CHAKRABARTI S. How can public transit get people out of their cars? An analysis of transit mode choice for commute trips in Los Angeles[J]. *Transport Policy*, 2017, 54: 80. DOI: 10.1016/j.tranpol.2016.11.005.
- [11] MA L, XIONG H, WANG Z, *et al.* Impact of weather conditions on middle school students' commute mode choices: Empirical findings from Beijing, China [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2018, 68: 39. DOI:10.1016/j.trd.2018.05.008.
- [12] SINGHAL A, KAMGA C, YAZICI A. Impact of weather on urban transit ridership[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2014, 69(9): 379. DOI: 10.1016/j.tra.2014.09.008.
- [13] DZIEKAN K, KOTTENHOFF K. Dynamic at-stop real-time information displays for public transport: effects on customers [J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2007, 41(6): 489. DOI:10.1016/j.tra.2006.11.006.
- [14] ZANNI A M, RYLEY T J. The impact of extreme weather conditions on long distance travel behavior[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2015, 77: 305. DOI: 10.1016/j.tra.2015.04.025.
- [15] KHATTAK A J, PALMA, A. D. The impact of adverse weather conditions on the propensity to change travel decisions: a survey of Brussels commuters [J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 1997, 31(3): 181. DOI: 10.1016/S0965-8564(96)00025-0.
- [16] MAZE T H, AGARWAL M, BURCHETT G. Whether weather matters to traffic demand, traffic safety, and traffic operations and flow [J]. *Transportation Research Record*, 2006, 1948(1): 170. DOI: 10.1177/0361198106194800119.
- [17] 张凡,韩志玲,陈艳艳,等.降雨天气下公路出行者出行方式转移模型[J]. *公路交通科技*, 2018(6): 105. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2018.06.015.
- [18] ZHANG Fan, HAN Zhiling, CHEN Yanyan, *et al.* A model of highway travelers' travel mode shift under rainy weather [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2018(6): 105. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2018.06.015.
- [19] CANTWELL M, CAULFIELD B, O'MAHONY M. Examining

- the factors that impact public transport commuting satisfaction [J]. *Journal of Public Transportation*, 2009, 12(2): 1. DOI: 10.5038/2375-0901.12.2.1.
- [18] ARANA P, CABEZUDO S, PEÑALBA M. Influence of weather conditions on transit ridership: a statistical study using data from Smartcards[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2014, 59:1. DOI: 10.1016/j.tra.2013.10.019.
- [19] BÖCKER L, DIJST M, PRILLWITZ J. Impact of everyday weather on individual daily travel behaviours in perspective: a literature review[J]. *Transport Reviews*, 2013, 33(1): 71. DOI:10.1080/01441647.2012.747114.
- [20] TAO S, CORCORAN J, HICKMAN M, *et al.* The influence of weather on local geographical patterns of bus usage[J]. *Journal of Transport Geography*, 2016, 54: 66. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2016.05.009.
- [21] LIU C, SUSILO Y O, KARLSTRÖM A. Investigating the impacts of weather variability on individual's daily activity - travel patterns: a comparison between commuters and non-commuters in Sweden[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2015, 82: 47. DOI: 10.1016/j.tra.2015.09.005.
- [22] ASHALATHA R, MANJU V S, ZACHARIA A B. Mode choice behavior of commuters in Thiruvananthapuram city[J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2012, 139(5): 494. DOI:10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000533.
- [23] 邵敏华,李田野,孙立军. 常规公交乘客对车内拥挤感知阻抗调查与建模[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(7): 1031. DOI:10.3969/j.issn.0253-374x.2012.07.012. SHAO Minhua, LI Tianye, SUN Lijun. Survey method and model of passengers' cost perception of crowding level in bus [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2012, 40(7):1031. DOI:10.3969/j.issn.0253-374x.2012.07.012.
- [24] 高坤,涂辉招,李浩,等. 出行者对不同交通方式行程时间可靠度和车内拥挤度的感知差异性[J]. *中国公路学报*, 2017, 30(7): 126. DOI:10.3969/j.issn.1001-7372.2017.07.016. GAO Kun, TU Huizhao, LI Hao, *et al.* Travelers' perception differences in travel time reliability and crowding of mode-choice in multimodal networks[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2017, 30(7): 126. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7372.2017.07.016.

(上接第 746 页)

- construction of two cable domes for the Korean Olympics[C] // Shells, Membranes and Space Frame, Proceedings IASS Symposium. Madrid: IASS, 1986; 265-272.
- [2] LEVY M P. The georgia dome and beyond: achieving lightweight-long span structures [C] // Proceedings of IASS-ASCE International Symposium. Madrid: IASS, 1994; 560-562.
- [3] 陈联盟,袁行飞,董石麟. Kiewitt 型索穹顶结构自应力模态分析及优化设计[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2006, 40(1):73. CHEN Lian meng, YUAN Xing fei, DONG Shi lin. Selfstress mode analysis and optimal design of Kiewitt domes[J]. *Journal of Zhejiang University(Engineering Science)*, 2006, 40(1):73.
- [4] 董石麟,包红泽,袁行飞. 鸟巢型索穹顶几何构形及其初始预应力分布确定[C]//第五届全国现代结构工程学术研讨会. 广州 [s. n.], 2005:115-120. DONG Shi lin, BAO Hong ze, YUAN Xing fei. Geometry configuration and initial distribution of bird-nest cable dome [C]// Proceeding of 5th Chinese National Modern Structure Engineering. Guang Zhou:[s. n.], 2005; 115-120.
- [5] 卓新,王苗夫,董石麟. 逐层双环肋型索穹顶结构与施工成形方法:中国, 200910153530[P]. 2009-09-30. ZHUO Xin, WANG Miao fu, DONG Shi lin. Double-ring levy cable dome structure and construction forming method; China, 200910153530[P]. 2009-09-30.
- [6] 董石麟,梁昊庆. 肋环人字型索穹顶受力特性及其预应力态的分析法[J]. *建筑结构学报*, 2014, 35(6), 102. DONG Shi lin, LIANG Hao qing. Mechanical characteristics and analysis of prestressing force distribution of herringbone ribbed cable dome [J]. *Journal of Building Structures*, 2014, 35(6), 102.
- [7] 陈志华,楼舒阳,闫翔宇. 天津理工大学体育馆新型复合式索穹顶结构风振效应分析[J]. *空间结构*, 2017, 23(3):21. CHEN Zhi hua, LOU Shu yang, YAN Xiang yu. Time-history analysis of wind vibration response for the cable dome of gymnasium at Tianjin University of Technology [J]. *Spatial Structures*, 2017, 23(3):21.
- [8] FULLER R B. Tensile-integrity structures; US, 3063521 [P]. 1962-11-13.
- [9] 董石麟,涂源. 索穹顶结构体系创新研究[J]. *建筑结构学报*, 2018, 39(10), 1. DONG Shi lin, TU Yuan. Structural system innovation of cable dome structures [J]. *Journal of Building Structures*, 2018, 39(10), 1.