

闭合通勤链中基于博弈的小汽车拥有者 出行方式选择研究

张思佳^{1a}, 贾顺平^{*1a,1b}, 麻存瑞^{1a}, 李 军^{1b,2}

(1. 北京交通大学 a. 城市交通复杂系统理论与技术教育部重点实验室; b. 交通运输学院, 北京 100044;
2. 中国交通通信信息中心, 北京 100011)

摘要: 从个体出行方式选择决策机理入手,以演化博弈理论为基础,基于出行链构建了考虑回程因素的闭环通勤出行选择决策模型.模型中考虑了个体对去程与回程两次出行感知程度的两类影响因素,模拟了回程过程的3种不同情境,研究回程加入不同活动情境下对整个闭合通勤链出行选择决策的影响,并将考虑回程因素的决策结果与仅考虑单次出行的结果进行对比,证明了考虑回程因素的必要性.最后,以北京市典型通勤OD为例,对模型进行实证分析.结果表明,仅考虑去程时,小汽车方式优势凸显;而考虑回程因素时,回程过程中加入的不同活动将影响个体闭环出行链出行选择决策结果,小汽车将不再成为人们出行的最优选择,定制公交的优势不容小视.

关键词: 城市交通;出行方式选择;闭合出行链;通勤;小汽车拥有者;演化博弈理论

Travel Mode Choice Behavior of Private Car Owners in Commuters' Closed Trip-chain Based on the Game Theory

ZHANG Si-jia^{1a}, JIA Shun-ping^{1a,1b}, MA Cun-rui^{1a}, LI Jun^{1b,2}

(1a. MOE Key Laboratory for Urban Transportation Complex Systems Theory and Technology; 1b. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. China Transport Telecommunication & Information Center, Beijing 100011, China)

Abstract: Analyzing the mechanism of travel mode choice of commuters, a new model to study the travel mode choice behavior based on the demand of closed trip chain is carried out. In this model, the influence factors of commuters' perceptions of go and return trips are considered. Meanwhile, three different situations of the return trips are simulated and the effects of activities in the return trips on travel mode choice behavior of private car owners in commuters' closed trip-chain are researched, and then the results of the decisions considering the return trips are compared with the results of single trip. The probabilities of the travel mode choice are gotten through the evolutionary game theory. Finally, it made an empirical analysis based on the typical OD of commuters in Beijing. The results show that if only half of the closed trip chain is considered, the car becomes the best choice and it has great advantage, and if the whole closed trip chain is considered, the results are different under different situations and the car may not be the best choice, and the advantages of the customized shuttle buses cannot be overlooked.

Keywords: urban traffic; travel mode choice; closed trip chain; commuting; private car owners; evolutionary game theory

收稿日期: 2016-08-11

修回日期: 2016-11-16

录用日期: 2016-11-21

基金项目: 国家自然科学基金/National Natural Science Foundation of China(71390332, 71621001-3); 国家重点基础研究发展计划项目/National Key Basic Research Program of China (2012CB725406).

作者简介: 张思佳(1991-), 女, 黑龙江人, 博士生.

*通信作者: shpjia@bjtu.edu.cn

0 引言

近年来我国大中城市拥堵问题日益严重,而通勤出行则是造成拥堵的根源所在,成为影响一个城市交通环境的重要因素.因此,改善通勤出行环境将成为缓解城市交通问题工作的重点.

既有研究中,学者对出行链结构的组成及其效用函数的计算进行了相关研究.国内方面,赵丹等^[1]通过构建基于出行链的概率型随机用户平衡模型,研究多方式诱导下组合出行方式选择、出行链费用和出行链结构的变化.陈坚等^[2]基于最大效用理论,对Logit模型的出行方式效用函数进行改进,构建了SEM-Logit整合模型.万霞等^[3]利用MNL模型建立考虑前、后两次出行方式选择间的相互影响和主、子链的出行方式选择间影响的动态出行方式选择模型.国外方面,Buliuling等^[4]分析个体一天多次出行选择之间的相互作用.X. Ye等^[5]分析了出行选择概率与出行链结构之间的关系.Miller等^[6]基于出行链的方式选择模型,模型中考虑了多种交通方式的组合出行.以上模型中对出行链效用的描述,大多仅将各部分效用进行简单的线性叠加,未能充分考虑影响个体对通勤闭合出行链中的去程与回程链出行效用感知程度的影响因素,并将其进行定量描述.

本文在既有研究的基础上,从不同的角度,考虑到通勤出行链中去程与回程之间存在较大的间隔时间,将导致个体对去程链与回程链费用的感知程度存在不同.通过分析影响此感知程度的两类影响因素,从而对其进行定量描述.同时,建立回程过程不同情境下的闭合出行链方式选择模型,分析回程过程对个体出行选择行为的影响.

1 出行方式选择决策机理分析

研究的出行链类型为通勤个体一天出行的闭合链.一方面,由于通勤个体的工作特性,去程链与回程链间存在较长的间隔时间,且在个体开始一天的出行前,并不一定能确定回程过程中是否会加入或加入何种类型的活动,相比回程链,个体往往更倾向于根据去程链来判断选择哪种出行方式.而研究的重点在于回程过程中加入各类活动后对闭合出行链出行选择决策的影响,因此,定义去程链为不加入任何外部活动的简单链,在排除去程链影响的前提下,分析回程加入各类活动后对整

个闭合出行链出行选择决策的影响.同时,研究对象为拥有小汽车的通勤个体,因此在个体平日的出行选择时不考虑出租车方式.

综上所述,在建立方式选择模型时,本研究基于以下假设:

假设 1 通勤个体一天的出行链是包括简单去程链和复杂回程链的闭合链,去程过程中不加入任何其他活动,回程过程中考虑加入3种不同活动的情境.

假设 2 个体出行时可选择的出行方式有小汽车、公共交通和定制公交3种.其中,公共交通方式包含地面常规公交和轨道交通中的一种或两种.同时,假定定制公交可提供随订随走的即时服务.

假设 3 在闭环出行链中,个体若去程采用小汽车出行,回程必须采用小汽车出行;若去程采用非小汽车出行,回程可采用任何形式的非小汽车出行.

假设 4 出行决策过程以效用函数值最优的交通方式作为出行的最优选择.以个体出行各方式广义出行费用为效用函数,广义出行费用越低,效用函数值越优.

研究的出行链类型如图1所示.去程过程均发生在早高峰期间,无其他外出活动.回程过程均发生在晚高峰期间,以工作单位为起点,以家为终点,考虑以下3种情境:

情境 1 回程过程中不加入其他外出活动.

情境 2 回程过程中加入接送人活动.

情境 3 回程过程中加入需饮酒的娱乐活动.

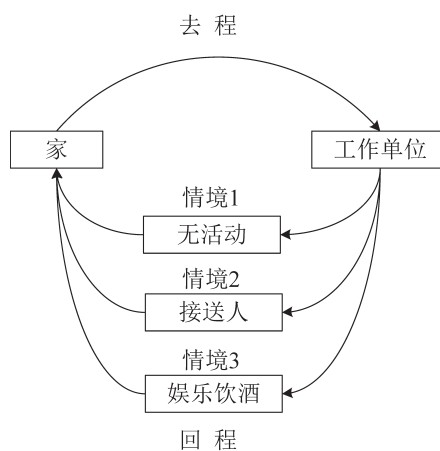


图1 闭合出行链范畴

Fig. 1 The closed trip chain

2 出行方式选择决策模型建立

2.1 早晚高峰无活动下的闭环出行广义费用模型

既有研究中,一方面,对通勤出行链广义费用的描述主要将去程与回程的费用简单加和,忽视了个体对去程与回程费用感知程度的不同;另一方面,当通勤出行链中加入其他外出活动时,往往将活动过程直接作为出行链的一部分,而当活动所涵盖的出行链长度较短时,活动对整个出行链出行选择的影响则容易被忽视^[7-8].因此,考虑个体对去程与回程过程感知程度的不同,并按回程过程活动性质的不同单独考虑其对整个闭合通勤出行链出行选择的影响十分必要,详细描述如图2、图3所示.

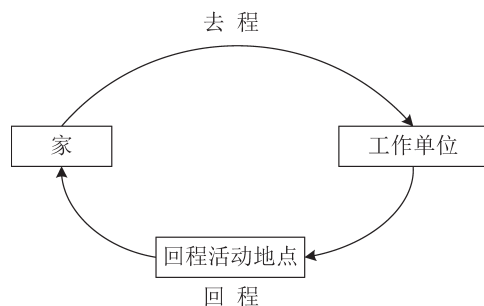


图2 既有研究对闭合通勤出行链中回程活动的描述

Fig. 2 The design of activities in return-trip in existing

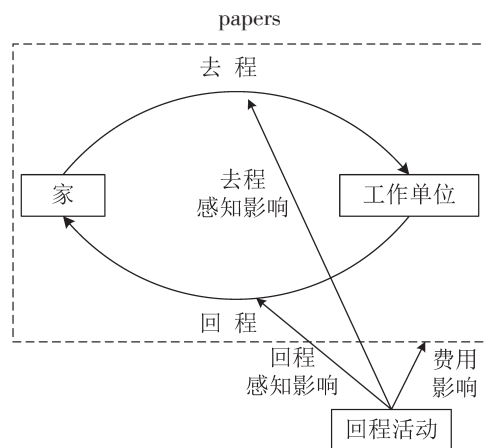


图3 本文闭合通勤出行链中对回程活动的描述

Fig. 3 The design of activities in return-trip in this paper

个体在实际选择过程中,决策结果将受到自身感知的影响.设 α 为个体对闭合出行链中的回程链广义出行费用的感知系数,则对通勤闭合出行链的广义费用定义为

$$\bar{P} = (1 - \alpha)P + \alpha P' \quad (1)$$

为了对 α 进行定量描述,考虑了影响个体感知

的两类影响因素:

(1) 个体在做出出行选择决策前,回程和去程两次选择中3种出行方式效用函数值的相对离散程度的比值大小会对决策结果产生影响.定义该比值为 τ ,则有

$$\tau = \frac{q'}{\bar{P}} / \frac{q}{\bar{P}} \quad (2)$$

式中: q' 、 q 分别为回程及去程各出行方式广义出行费用的标准差; \bar{P}' 、 \bar{P} 为回程及去程各出行方式广义费用平均值.

τ 越大,回程过程中3种出行方式的广义费用相比去程而言越离散,3种出行方式费用越离散,个体则会更确信的倾向于选择费用最小的出行方式,即个体对回程过程的方式选择结果的确信性越大,对回程过程的方式选择过程的感知程度越大,回程过程对整个闭合出行链的方式选择影响越大.

(2) 个体在出行前考虑一天的出行方式选择时,回程与去程最优出行方式效用函数值的比值大小会对个体的闭环出行选择决策产生影响.定义该比值为 σ ,则有

$$\sigma = \frac{P'_{\text{best}} - P_{\text{best}}}{P_{\text{best}}} \quad (3)$$

式中: P'_{best} 为回程最优出行方式广义出行费用; P_{best} 为去程最优出行方式广义出行费用.

在个体实际的出行选择过程中,个体对费用较高的那部分出行链的感知程度往往会更大,因此, σ 越大,回程过程的出行广义费用相对去程越大,回程因素对整个闭环出行选择决策的影响越明显.

综上所述,一方面, α 与 τ 有关, τ 越大, α 越大;另一方面, α 与 σ 有关, σ 越大, α 越大.定义 $\alpha = f(\tau, \sigma)$.当 τ 与 σ 对 α 均不产生额外影响时, $\alpha = 0.5$; τ 与 σ 最大均可对 α 产生0.1的影响.即

$$\alpha = 0.5 + 0.1 \cdot f_1(\tau) + 0.1 \cdot f_2(\sigma) \quad (4)$$

式中: $\alpha \in [0.3, 0.7]$; $f_1(\tau)$ 、 $f_2(\sigma)$ 分别为 σ 和 τ 的函数, $f_1(\tau) \in [-1, 1]$, $f_2(\sigma) \in [-1, 1]$.

对于函数 $f_1(\tau)$ 、 $f_2(\sigma)$,应满足如下性质:

(1) 当 $\tau = 1$ 时,回程与去程各出行方式广义费用离散程度相等, $f_1(\tau) = 0$.

(2) 随着 τ 不断远离点 $\tau = 1$, $f_1(\tau)$ 上升(或下降)

的速度呈现先小后大的趋势,直到分别达到最大值 $f_1(\tau) = 1$ 及最小值 $f_1(\tau) = -1$.

(3) 当 $\sigma = 0$ 时,回程与去程最优出行方式广义费用值相等, $f_2(\sigma) = 0$.

(4) 随着 σ 不断远离原点, $f_2(\sigma)$ 上升(或下降)的速度呈现先小后大的趋势,直到分别达到最大值 $f_2(\sigma) = 1$ 及最小值 $f_2(\sigma) = -1$.

(5) 由于人们对去程和回程出行链最优出行方式效用比值的感知程度比单次出行各方式效用函数值离散程度比值的感知程度更大,因此函数 $f_2(\sigma)$ 相对 $f_1(\tau)$ 的斜率较大.

假设 $\alpha = f(\tau, \sigma)$ 服从式(5)、式(6)及图4分布.

$$f_1(\tau) = a + b\tau + c\tau^2 + d\tau^3 \quad (5)$$

$$f_2(\sigma) = r\sigma + s\sigma^2 + t\sigma^3 \quad (6)$$

式中: a, b, c, d, r, s, t 均为常数.

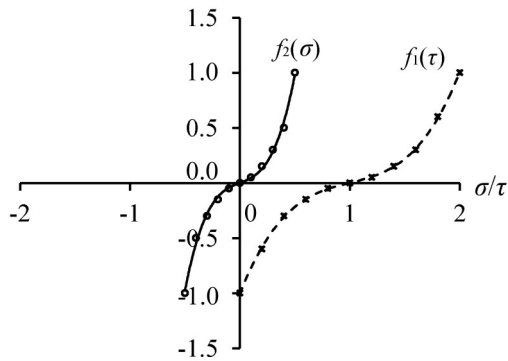


图4 $f_1(\tau)$ 、 $f_2(\sigma)$ 拟合曲线图

Fig. 4 The matching graph of $f_1(\tau)$ and $f_2(\sigma)$

2.2 回程加入其他活动的闭环出行广义费用模型

当个体回程过程加入如接送人、含饮酒的娱乐活动等其他外出活动时,相比无活动的情况,个体出行广义费用将会产生一定程度的增加.同时,当回程过程中加入其他活动时,在个体出行前,个体对去程出行链的广义费用的感知也将产生一定程度的变化.因此,当回程加入其他活动,假定此类活动对整个闭环广义出行费用的影响体现在对去程广义出行费用影响因子上,定义为

$$\bar{P} = (1 - \alpha)(1 + m_1 n_1 + m_2 n_2)P + \alpha P' \quad (7)$$

式中: m_1 和 m_2 为0-1变量,表示回程不同情境对去程广义出行费用是否产生额外影响,产生影响则取1,否则取0; n_1 和 n_2 描述回程不同情境对去程广义出行费用产生额外影响程度,取值范围均为0~1.

为了对 n_1 和 n_2 进行合理取值,定义小汽车—小汽车、公共交通—公共交通、公共交通—定制公交、定制公交—公共交通、定制公交—定制公交5种交通方式分别为 s_1, s_2, \dots, s_5 ,当 n_1, n_2 在0~0.5之间变化时,各出行方式选择概率的变化情况如图5和图6所示.

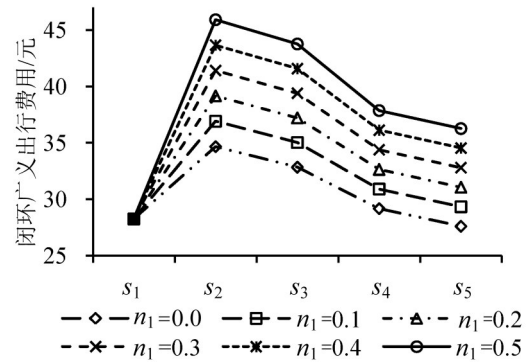


图5 n_1 对闭环出行选择决策的影响

Fig. 5 The influence of n_1 on travel mode choice

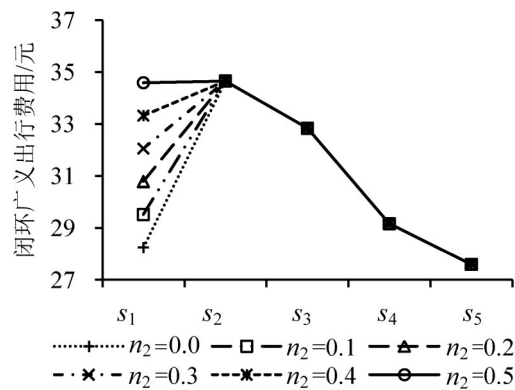


图6 n_2 对闭环出行选择决策的影响

Fig. 6 The influence of n_2 on travel mode choice

从图5中可以看到,当 $n_1 = 0$ 时,表示回程接送人对闭环出行广义费用无影响,定制公交将成为人们出行的最优选择.而当 $n_1 = 0.1$ 时,小汽车优势突出,成为人们出行的最优选择.随着 n_1 的逐渐增大,回程接送人活动将引起小汽车的竞争优势越加凸显,而其他各交通方式闭环出行广义费用均逐渐增大,竞争力逐渐降低.因此,考虑现实合理性,取 $n_1 = 0.2$.

从图6中可以看到,当 $n_2 = 0$ 时,表示回程娱乐饮酒对闭环广义出行费用无影响,小汽车出行费用相比公共交通方式较小,竞争优势较为明显.随着 n_2 的逐渐增加,回程娱乐饮酒对小汽车出行方式的影响逐渐凸显,小汽车闭环出行链出行费用逐

渐增加,竞争优势数据减弱.当 $n_2 = 0.5$ 时,小汽车方式与公共交通及定制公交方式相比已无竞争力,人们将放弃小汽车方式,选择其他方式出行.因此,考虑现实合理性,取 $n_2 = 0.2$.

综上所述,回程中加入接送人及需饮酒的娱乐活动时,各交通方式下 m_1, m_2, n_1, n_2 的取值如表1所示.

表1 回程不同情境下各出行方式影响因子取值

Table 1 The value of influence factors under different situations in return trip

出行方式	回程接送人				回程娱乐饮酒			
	m_1	m_2	n_1	n_2	m_1	m_2	n_1	n_2
s_1	0	1	0.0	0	0	1	0	0.2
s_2	1	0	0.2	0	1	0	0	0.0
s_2	1	0	0.2	0	1	0	0	0.0
s_3	1	0	0.2	0	1	0	0	0.0
s_5	1	0	0.2	0	1	0	0	0.0

2.3 基于演化博弈理论的纳什均衡混合策略求解

利用演化博弈理论分析个体出行方式选择决策过程,仅考虑去程出行时和考虑回程因素的闭环出行时个体出行演化博弈过程如图7和图8所示.仅考虑去程时,定义 P_i 为各出行方式效用函数值, ε_i 为个体选择各出行方式的选择概率, $i = 1, 2, 3$;考虑回程因素时,定义 P_j 为各出行方式效用函数值, ε_j 为个体选择各出行方式的选择概率, $j = 4, 5, 6, 7, 8$.

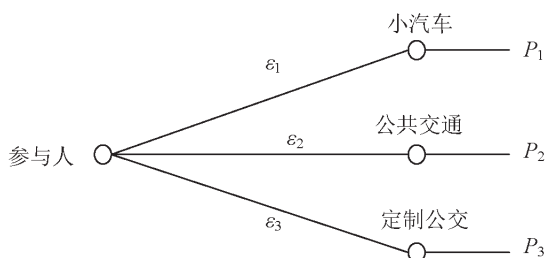


图7 仅考虑去程的个体出行选择演化博弈过程

Fig. 7 The evolutionary game process of individual travel mode choice in single trip

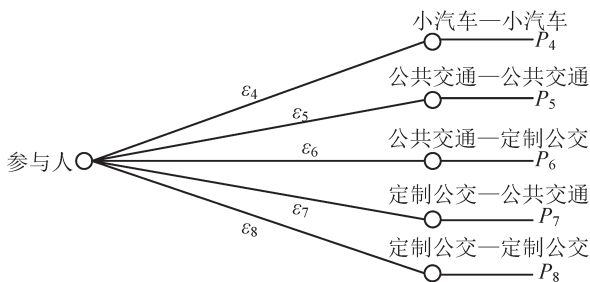


图8 闭环出行需求下个体出行选择演化博弈过程

Fig. 8 The evolutionary game process of individual travel mode choice in closed trip chain

以仅考虑去程时的出行选择演化博弈过程为例,根据混合策略纳什均衡理论可知,当个体出行

达到均衡时,个体选择每一纯策略的期望支付值相等.因此,个体出行选择每一种出行方式下的效用函数与出行选择概率的乘积相等^[9].即

$$P_1\varepsilon_1 = P_2\varepsilon_2 = P_3\varepsilon_3 \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^3 \varepsilon_i = 1 \quad (9)$$

求解 ε_i ,得

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{1 + (P_1/P_2) + (P_1/P_3)} \quad (10)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{1 + (P_2/P_1) + (P_2/P_3)} \quad (11)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{1}{1 + (P_3/P_1) + (P_3/P_2)} \quad (12)$$

定义

$$M = \frac{1}{(1/P_1) + (1/P_2) + (1/P_3)} \quad (13)$$

得到

$$\varepsilon_1 = M \frac{1}{P_1} \quad (14)$$

$$\varepsilon_2 = M \frac{1}{P_2} \quad (15)$$

$$\varepsilon_3 = M \frac{1}{P_3} \quad (16)$$

3 案例分析

3.1 案例背景

本文数据来源于北京市典型通勤OD(O点为天通苑西区53号楼,D点为国贸大厦三期)间的调查数据.主要研究对象为早晚高峰通勤客流,经过大量的实地调查和资料搜集,此闭环出行链详细

信息如图9所示。

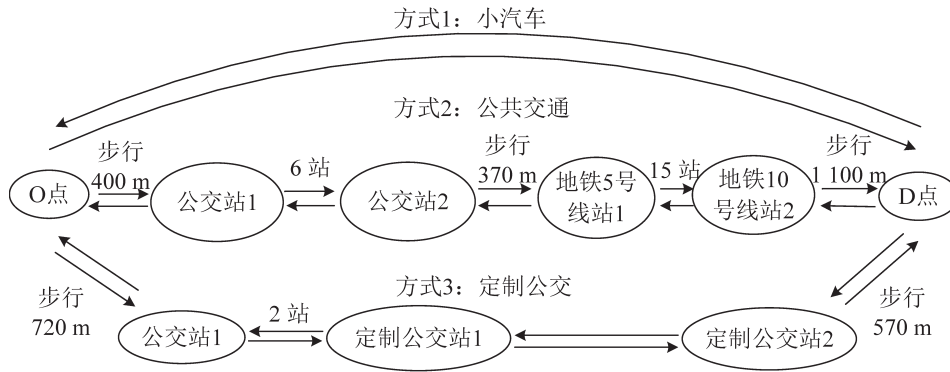


图9 通勤OD间闭环出行链示意图

Fig. 9 The closed trip chain of a commuting OD

3.2 考虑闭环出行需求的出行方式选择决策及对比分析

根据文献[10],出行链广义费用主要由出行票价费用、出行时间费用、舒适度指标及可靠性指标等构成。即

$$p = \theta_1 p_p + \theta_2 p_t + \theta_3 p_a + \theta_4 p_r \quad (17)$$

式中： p 为出行链广义费用； p_p 为出行价格费用； p_t 为出行时间费用； p_a 为出行拥挤费用； p_r 为出行可靠性费用； θ_1 、 θ_2 、 θ_3 、 θ_4 分别是出行广

义费用中4种费用的权重系数，且 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4 > 0$ ， $\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 = 1$ 。

文献[10]通过对通勤客流采集调查问卷的方式，得到广义费用各部分组成的权重系数，由于其客流特征与本文相似，因此，本文采用文献[10]中得到的权重系数，计算各方式下的去程与回程链的广义出行费用，并将基于演化博弈理论求解得到的仅考虑去程和考虑回程因素的出行选择概率进行对比，对比结果如表2和图10所示。

表2 仅考虑去程及考虑闭环出行链的出行方式选择概率分布对比

Table 2 The travel mode choice of the closed trip chain under different situations

仅考虑去程		考虑回程因素			
出行方式	纳什均衡混合策略/%	出行方式	纳什均衡混合策略		
			情境1早晚高峰正常出行/%	情境2回程接送人/%	情境3回程娱乐饮酒/%
小汽车	39.45	s_1	21.43	23.50	20.01
		s_2	17.46	16.95	17.79
公共交通	26.09	s_3	18.43	17.84	18.76
		s_4	20.75	20.34	21.12
定制公交	34.46	s_5	21.93	21.37	22.32

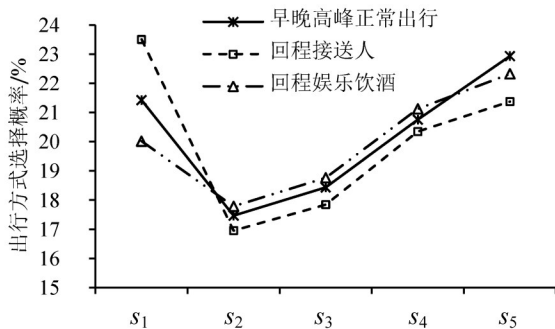


图10 不同情境下各出行方式混合策略

Fig. 10 The mixed strategies of the closed trip chain under different situations

情境1 早晚高峰正常出行。

仅考虑去程时，小汽车选择概率最大，为39.45%，定制公交和公共交通选择概率分别低于小汽车4.99%和13.36%。计算结果体现了在早晚高峰出行时小汽车竞争优势明显，人们乘坐小汽车出行的欲望较为强烈，公共交通方式竞争力相对较弱。

当考虑回程因素时，回程未加入其他外出活动，定制公交的优势体现的相对突出，选择概率最大，虽然仅仅比小汽车选择概率大0.5%，但随着定

制公交的快速发展,有希望成为未来公共交通领域较为重要的一种交通方式,发展前景不容小视。同时,考虑回程因素后,小汽车与公共交通方式选择概率之间的差距明显减小。

情境 2 回程加入接送人活动。

回程加入接送人活动后,居民出行最佳选择不再是定制公交,小汽车选择概率最大,为 23.5%;公共交通方式选择概率相比回程无活动时均有下降,两次出行均选择公共交通方式的概率最低,相比小汽车低 6.55%,两次出行均选择定制公交方式的概率相比小汽车低 2.13%。因此,回程加入接送人活动会降低公共交通方式的出行选择概率,使得小汽车方式的优势更突出,竞争力更大。

情境 3 回程加入需饮酒的娱乐活动。

当回程过程中存在需饮酒的娱乐活动时,小汽车出行的广义费用增加,定制公交方式优势相对突显。两次出行均选择定制公交方式的选择概率为 22.32%,比小汽车大 2.31%;两次出行分别选择定制公交和公共交通方式的选择概率为 21.12%,比小汽车大 1.11%。即此种情境下,定制公交和公共交通方式的公共属性优势将更加凸显,而小汽车的私人属性劣势将导致原本选择小汽车出行的部分居民此时转移至公共交通或定制公交方式。

4 结 论

本文从不同的角度,基于闭合出行链构建了考虑回程因素的闭环出行选择决策模型。模型中考虑了影响个体对去程与回程链感知的两类因素,并将考虑回程因素的决策结果与仅考虑单次出行的结果进行对比,最后将模型应用于实例中。结果表明,仅考虑单程时,小汽车出行方式是早高峰通勤客流出行的最优选择,且相比公共交通及定制公交优势较大。考虑回程因素时,3 种不同情境下各出行方式选择概率变化明显,定制公交选择概率在回程娱乐饮酒情境下将超越小汽车成为最优选择,但公共交通方式竞争力仍然较小。

参考文献:

[1] 赵丹,邵春福,岳昊,等. 多方式诱导下基于出行链的随机用户平衡模型[J]. 吉林大学学报(工学版),

2015, 45(1): 82-88. [ZHAO D, SHAO C F, YUE H, et al. Stochastic user equilibrium model based on trip chain analysis under multi-modal guidance[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2015, 45(1): 82-88.]

- [2] 陈坚,晏启鹏,杨飞,等. 出行方式选择行为的 SEM-Logit 整合模型[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2013, 41(2): 51-57. [CHEN J, YAN Q P, YANG F, et al. SEM-Logit integration model of travel mode choice behaviors[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2013, 41(2): 51-57.]
- [3] 万霞,王炜,陈峻. 居民全日出行方式选择动态模型研究[J]. 中国公路学报, 2012, 25(2): 121-126. [WAN X, WANG W, CHEN J. Research on dynamic model of within-day travel mode choice of residents[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(2): 121-126.]
- [4] BULIUNG R N, KANAROGLOU P S. Activity travel behavior research: Conceptual issues, state of the art, and emerging perspectives on behavioral analysis and simulation modeling[J]. Transport Reviews, 2007, 27(2): 151-187.
- [5] YE X, PENDYALA R M, GOTTARDI G. An exploration of the relationship between mode choice and complexity of trip chaining patterns[J]. Transportation Research Part B Methodological, 2007, 41(1): 96-113.
- [6] MILLER E J, ROORDA M J, CARRASCO J A. A tour-based model of travel mode choice[J]. Transportation, 2005, 32(4): 399-422.
- [7] 王孝坤,饶秋丽,唐春艳,等. 通勤者出行链类型与出行方式选择的相互影响[J]. 交通运输系统工程与信息, 2014, 14(2): 144-149. [WANG X K, RAO Q L, TANG C Y, et al. Commuters' trip-chain and mode choice relationship[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2014, 14(2): 144-149.]
- [8] 杨敏,王炜,陈学武,等. 工作者通勤出行活动模式的选择行为[J]. 西南交通大学学报, 2009, 44(2): 274-279. [YANG M, WANG W, CHEN X W, et al. Activity pattern choice of work commuting trip by workers[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2009, 44(2): 274-279.]
- [9] WU C Q, PEI Y L, GAO J P. Evolution game model of travel mode choice in metropolitan[J]. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2015, 2015(1): 1-11.
- [10] 白惠涛. 基于多种交通方式的都市快捷客运系统出行路径选择模型及优化方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2007. [BAI H T. Study on path optimization model and methods of urban multimode rapid transit system[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2007.]