

旅游交通出行方式选择的演化博弈研究

黄钰森, 董洁霜

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2024年10月26日; 录用日期: 2024年11月15日; 发布日期: 2024年11月22日

摘要

随着旅游市场的繁荣发展, 人们对旅游出行的需求持续增长, 高铁成为旅游出行不可或缺的出行方式。然而随着全域旅游的盛行, “高铁+”的组合出行方式和私家车逐渐演变为了人们最主要的出行方式, 为了响应国家低碳的政策以及缓解道路交通拥堵, 让更多人采用“高铁+”组合出行的方式, 本文通过构建政府管理部门与出行者策略选择的演化博弈模型, 在引入政府奖励机制以及私家车停车管理费的基础上, 对模型的演化路径及主要参数对演化结果的影响进行研究。同时, 在讨论过程中对各种演化条件下的稳定平衡点进行分析和解释, 并进行了参数敏感性分析, 展示了政府不同的管理策略对模型演化速率的影响。

关键词

出行方式选择, 演化博弈, 碳减排, 道路拥堵

Research on the Evolutionary Game Theory of Tourism Transportation Mode Selection

Zhengsen Huang, Jieshuang Dong

Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Oct. 26th, 2024; accepted: Nov. 15th, 2024; published: Nov. 22nd, 2024

Abstract

With the prosperous development of the tourism market, people's demand for tourism travel continues to grow, and high-speed rail has become an indispensable mode of travel for tourism. However, with the prevalence of global tourism, the combination of "high-speed rail+" and private cars has gradually evolved into the most important mode of transportation for people. In response to the national low-carbon policy and to alleviate road traffic congestion, and to encourage more people to adopt the combination of "high-speed rail+", this paper constructs an evolutionary game

model between government management departments and travelers' strategic choices. Based on the introduction of government reward mechanisms and private car parking management fees, the evolution path and the influence of the main parameters of the model on the evolution results are studied. Meanwhile, during the discussion, the stable equilibrium points under various evolutionary conditions were analyzed and explained, and parameter sensitivity analysis was conducted to demonstrate the impact of different government management strategies on the model's evolution rate.

Keywords

Travel Mode Selection, Evolutionary Game, Carbon Reduction, Congestion

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

旅游是一个重要的地理现象,其在空间上表现为游客从居住地到旅游目的地再返回居住地的完整迁移过程。交通作为连接旅游需求和旅游供给的纽带和桥梁,合理的交通方式选择能够满足游客方便的时空选择需求。在自驾出游需求增加、道路拥堵问题亟需解决以及国家“双碳”的政策背景下,一种“高铁+”的组合出行方式的意义重大。“高铁+”组合出行在解决个性化出行需求、减少污染方面的重要性越来越明显,在降低私家车保有量、缓解交通拥堵压力等方面也成为目前研究的重点。“高铁+”组合出行的发展使其与私家车之间的竞争将更加激烈,出行者的出行方式将面临新一轮的演化和抉择。传统的博弈理论假设参与者是“完全理性”的,具备掌握完整信息的能力,但这与现实不符,因为参与者难免会犯错。目前演化博弈论已经被广泛运用到多个学科领域内,而演化博弈理论近年来也广泛运用于交通出行方式选择行为方面。

Huawei Gong 等人对收益不平衡条件下演化博弈的均衡稳定性进行了模拟研究,发现在公共交通发展和交通拥堵压力下,一定比例的车主会选择转向公共交通出行。这一比例与城市交通发展政策密切相关[1]。Qiaoru Li 等人根据不同出行方式的特点,通过量化行人感知和出行成本构建了出行模式选择演化博弈模型,并结合模型演化结果发现,在系统达到稳定平衡状态时,出行方式的比例对出行成本的变化异常敏感[2]。肖海燕等采用演化博弈的方法研究公共交通、共享汽车以及私家车三者之间的博弈关系,模拟出行者的选择行为,分析博弈均衡点稳定性及参数条件。通过模型仿真实验,演化结果中各项比例大小取决于各项收益、补贴、损失以及额外收益,提出要增加公共交通的配套设施,增收拥堵费以及增加对共享汽车的补贴及配套服务的建议[3]。陈星光等假设用户是有限理性的,对交通出行方式的博弈和演化过程进行了分析,建立了单总体出行方式演化博弈模型,运用演化博弈理论导出出行方式选择的演化稳定策略,从而为交通政策的制定、交通管理策略效果的评价等提供决策支持[4]。闫康礼等人研究了不同供给模式下的共享汽车,分别考虑了定点式和浮动式共享汽车与私家车的博弈情形,并讨论了这两种情形下用户选择的演化路径,并进行了系统均衡稳定性分析和数值仿真。研究结果对政府和企业推广共享汽车具有指导性意义[5]。

以上对出行方式的研究一般都是考虑私家车与公共交通以及共享汽车之间,但对于“高铁 + 打车”组合出行参与博弈的研究仍然较少。因此,本文在“高铁+”这一出行方式背景下,考虑政府的推广作用,建立政府和游客的两方博弈模型,探究博弈主体的动态适应过程和竞争演化的主要影响因素,基于各方的收益和成本构建了非对称收益矩阵,通过对模型求解分析了达到不同稳定状态下的条件,利用 MATLAB 进行参数赋值下的演化仿真以及敏感性分析。

2. 博弈模型建立

本文所构建博弈系统内的参与主体主要是政府管理部门和旅游出行者两方主体。因为旅游交通出行方式中“高铁+”组合出行与私家车出行的部分特征具有相似性,且组合出行的发展会对私家车出行方式的改变产生较大影响,所以本章建立的模型还是主要考虑这两种出行方式:政府的策略选择为{积极推广“高铁+”组合出行,消极推广“高铁+”组合出行},游客的策略选择为{“高铁+”组合出行,私家车出行}。

用户对出行方式的选择,受到多方面因素的影响。不同出行方式的发展和演变,从根本上说是由出行者的选择决定的,而出行决策就是在不同出行方式所带来的效用和成本之间进行权衡的过程。出行收益模型是一般性的,而用户不同出行方式间进行选择时,考虑的核心决策变量不尽相同。因此,在后续演化博弈模型构建时,具体问题具体分析[6]。

文构建租赁汽车和私家车的博弈矩阵见表 1:

Table 1. Profit matrix of the game between the government and tourists (travelers)

表 1. 政府和游客(出行者)两方博弈收益矩阵

政府/出行者	“高铁+”组合出行 y	私家车 $1-y$
积极推广“高铁+”组合出行 x	$U_g + U_e - C_p - S$ $P_m + S - L_d$	$U_g + F_p - C_p - E_c$ $P_n - F_p$
消极推广“高铁+”组合出行 $1-x$	$U_e - L_g$ $P_m - L_d$	$-E_c - L_g$ $P_n - L_p - F_p$

其中,主要核心决策变量汇总见表 2:

Table 2. Basic assumptions of benefits and costs

表 2. 收益和成本基本假设

变量	变量含义
政府	
U_e	如果出行者旅游时选择“高铁+”组合出行,组合出行属于绿色出行,可以减少区域道路拥堵、停车场占有率以及所增加的社会福利收益
U_g	政府大力推广“高铁+”组合出行时,社会发展较为稳定,用户将给予政府较高的评价,强有力的提高了政府的公信力水平,政府自身形象提高
S	政府对选择“高铁+”组合出行方式的出行者给予的补贴,如政府相关管理部门发布一系列旅游时段优惠措施从而增加游客的出行收益
C_p	政府在大力推广“高铁+”组合出行这一模式时的宣传成本
F_p	出行者选择私家车出行时为政府缴纳的停车管理费、交通拥堵费等
E_c	由于出行者选择私家车出行而导致的道路拥堵、环境污染等所给政府带来的总收入上的损失
L_g	政府不推广“高铁+”组合出行时,社会存在较多不良现象,影响了出行者游玩的体验,此时政府的公信力降低
游客	
P_m	游客选择“高铁+”组合出行时的出行效用
P_n	游客选择私家车出行时的出行效用
L_d	游客选择“高铁+”组合出行时,由于换乘其他交通工具所付出的接驳成本
L_p	游客选择私家车出行时,政府若处于不推广的状态,道路的拥堵会更加严重,此时出行者会遭受一定的损失

3. 博弈模型分析

3.1. 均衡点分析

1) 政府部门的期望收益及平均收益 U_{11} 为政府采取大力推广时的期望收益, U_{12} 为政府采取不推广时的期望收益, 则:

$$U_{11} = y(U_g + U_e - C_p - S) + (1-y)(U_g + F_p - C_p - E_c)$$

$$U_{12} = y(U_e - L_g) + (1-y)(-E_c - L_g)$$

政府进行策略选择时的平均收益为:

$$U_1 = xU_{11} + (1-x)U_{12}$$

综上, 政府进行策略选择时的复制动态方程为:

$$U_1 = F(x) = dx/dt = x(1-x)[y(-S - F_p) + U_g + F_p - C_p + L_g]$$

2) 出行者的期望收益及平均收益

U_{21} 为出行者采取“高铁+”组合出行时的期望收益, U_{22} 为出行者采取私家车时的期望收益, 则:

$$U_{21} = x(P_m + S - L_d) + (1-x)(P_m - L_d)$$

$$U_{22} = x(P_n - F_p) + (1-x)(P_n - L_p - F_p)$$

企业进行策略选择时的平均收益为:

$$U_2 = yU_{21} + (1-y)U_{22}$$

综上, 企业进行策略选择时的复制动态方程为:

$$U_2 = dy/dt = y(1-y)[x(S - L_p) + P_m - L_d - P_n + L_p + F_p]$$

通过复制动态方程组得到雅可比矩阵为:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{dF(x)}{dx} & \frac{dF(x)}{dy} \\ \frac{dF(y)}{dx} & \frac{dF(y)}{dy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-2x)[y(-S - F_p) + U_g + F_p - C_p + L_g] & x(1-x)(-S - F_p) \\ y(1-y)(S - L_p) & (1-2y)[x(S - L_p) + P_m - L_d - P_n + L_p + F_p] \end{bmatrix}$$

均衡点的雅可比矩阵的行列式和迹如表 3:

Table 3. The determinant and trace of the equilibrium point Jacobian matrix

表 3. 均衡点雅可比矩阵的行列式和迹

均衡点	$Det(J)$	$Tr(J)$
$E_1(0,0)$	$(U_g + F_p - C_p + L_g)(P_m - L_d - P_n + L_p + F_p)$	$U_g + 2F_p - C_p + L_g + P_m - L_d - P_n + L_p$
$E_2(1,0)$	$(-U_g - F_p + C_p - L_g)(S + P_m - L_d - P_n + F_p)$	$-U_g + C_p - L_g + S + P_m - L_d - P_n$
$E_3(0,1)$	$(-S + U_g - C_p + L_g)(-P_m + L_d + P_n - L_p - F_p)$	$-S + U_g - C_p + L_g - P_m + L_d + P_n - L_p - F_p$
$E_4(1,1)$	$(U_g - C_p + L_g - S)(P_m - L_d - P_n + F_p + S)$	$-U_g + C_p - L_g - P_m + L_d + P_n - F_p$
$E_5(x^*, y^*)$		0

3.2. 稳定性分析

$$\text{令} \begin{cases} \alpha_1 = U_g + F_p - C_p + L_g \\ \alpha_2 = P_m - L_d - P_n + L_p + F_p \\ \alpha_3 = U_g + L_g - C_p - S \\ \alpha_4 = P_m - L_d - P_n + L_p + S \end{cases},$$

在演化博弈中, 可以基于不同条件下的均衡点类型分析演化博弈结果的稳定性及演化趋势。不同的均衡点类型代表着不同的策略组合与结果分配方式, 分别对应不同的演化稳定状态和动态演化路径。为了对不同稳定状态进行深入分析, 通过上述计算能够得到局部均衡点满足演化均衡点的判断条件, 由于篇幅限制本研究只讨论演化系统最常见的两种情景。

情景一 $\alpha_1 > 0, \alpha_2 > 0, \alpha_3 > 0, \alpha_4 > 0$

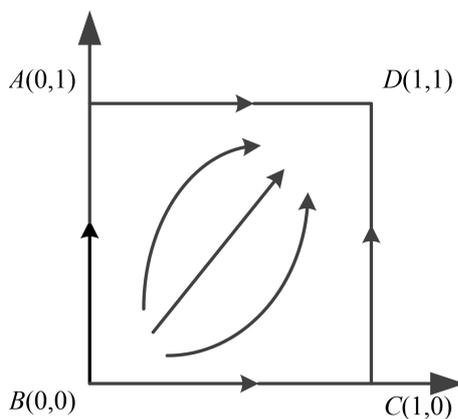


Figure 1. Evolutionary game phase diagram under (1, 1)

图 1. 均衡稳定策略为(1, 1)演化博弈相位图

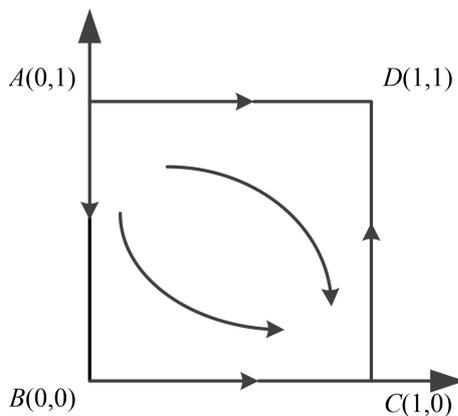


Figure 2. Evolutionary game phase diagram under (1, 0)

图 2. 均衡稳定策略为(1, 0)演化博弈相位图

相位图如图 1 所示, 表明出行者普遍对“高铁+”组合出行持正面价值感知, 政府无论如何都会积极推行公交优先管理。但受多种现实因素影响, 未能实现最优状态。具体而言, 政府面临财政补贴、宣传成本以及管理等的挑战; 出行者则因自由性低、接驳等待的时间成本高等问题而难以总是选择“高铁+”

组合出行。相对地, 私家车出行在停车费、燃油费和拥堵费用方面的损失较小。这表明, 尽管政府大力宣传同时积极补贴, 游客对的出行效用未达预期, 一定程度上限制了向最优状态的演化。因此, 现行政府管控措施未能满足游客出行的需求, 亟需优化改进。

情景二 $\alpha_1 > 0, \alpha_2 < 0, \alpha_3 > 0, \alpha_4 < 0$

此时系统演化趋势稳定收敛于(1, 0), 此状态为不理想的状态, 演化博弈相位图如图 2 所示。

为了更具象展示两种情景下系统的动态演化波动情况, 后文将进行数值仿真模拟。

4. 博弈模型分析

4.1. 数值仿真 L_d

本文采用 Matlab 进行演化博弈的仿真分析, 为了更直观地反映动态调整演化机制, 分情景对模型中的部分参数进行赋值, 进而揭示其初始状态演化过程及其关键因素的敏感性, 假定初始状态下政府和游客选择各策略的概率均为 0.5, 按照表 4 对相关变量进行赋值, 即满足情景一的假设:

Table 4. Partial parameter assignment (1)

表 4. 部分参数赋值(1)

U_g	F_p	C_p	L_g	P_m	P_n	L_d	L_p	S
9	5	12	10	11	9	8	3	4

该初始状态下政府和出行者的两方演化仿真结果如图 3 所示:

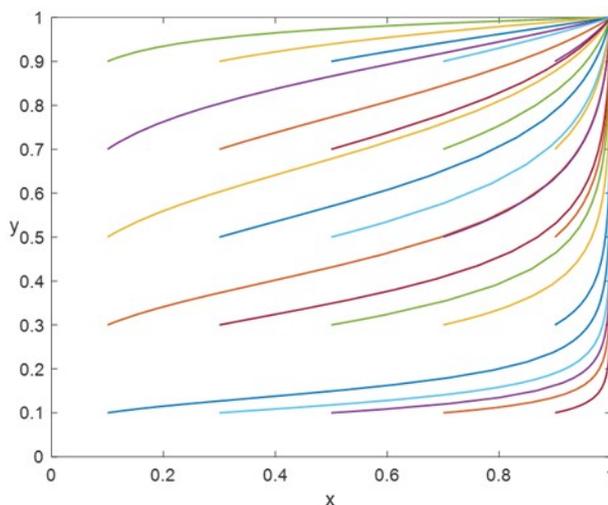


Figure 3. The evolutionary path of equilibrium stable point (1, 1)

图 3. 均衡稳定点为(1, 1)的演化路径

仿真结果可以看出, 不同初始概率组合下的策略选择最终稳定收敛于(1, 1), 即政府部门参与管控, 出行者选择“高铁+”组合出行。在现实情况中, 此种状态为想要达到的最优结果。

接下来按照表 5 对相关变量进行赋值, 即满足情景二的假设。

该初始状态下政府和出行者的两方演化仿真结果如图 4 所示。

在“双碳”目标指引下, 旅游交通正向低碳化转型。尽管各地积极实施公交优先战略以缓解拥堵和降低碳排放, 但由于现行管控措施未能显著提升公交吸引力, 居民仍偏向使用私家车等交通方式。因此, 给予“高铁+”组合出行合理的补贴, 提升游客对组合出行的价值感知, 是实现区域降堵减排的必要措施。

Table 5. Partial parameter assignment (2)
表 5. 部分参数赋值(2)

U_g	F_p	C_p	L_g	P_m	P_n	L_d	L_p	S
9	5	12	10	11	9	12	3	4

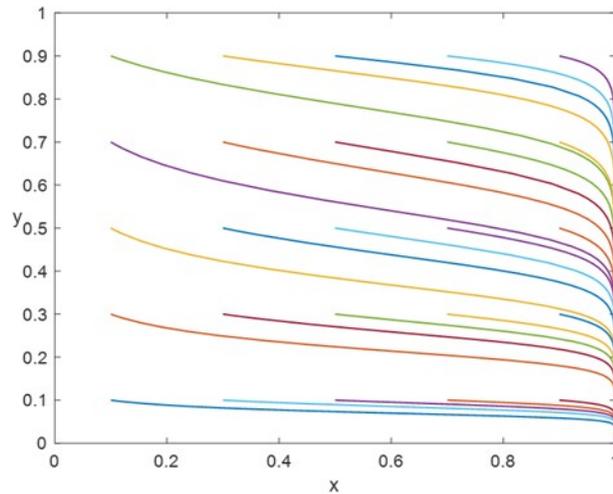


Figure 4. The evolutionary path of equilibrium stable point (1, 0)
图 4. 均衡稳定点为(1, 0)的演化路径

4.2. 敏感性分析

为了探究政府管控措施的优化方向与落脚点, 根据上节演化仿真模拟结果, 以出行者公交出行概率 $x = 0.33$ 为初始值, 对关键因素进行影响敏感性分析。在符合实际情况的范围内, 以演化路径更加清晰直观从而利于分析比较为目的, 设置模拟仿真的初始值及数值间隔, 以管理者期望的系统最优状态, 即稳定策略为(1, 1)为基础演化趋势, 进行敏感性仿真分析。

1) 政府补贴力度设政府补贴 $S = \{2, 4, 6, 8, 10\}$, 收益观察数值变化对出行者群体出行策略选择的影响, 演化过程如图 5 所示。

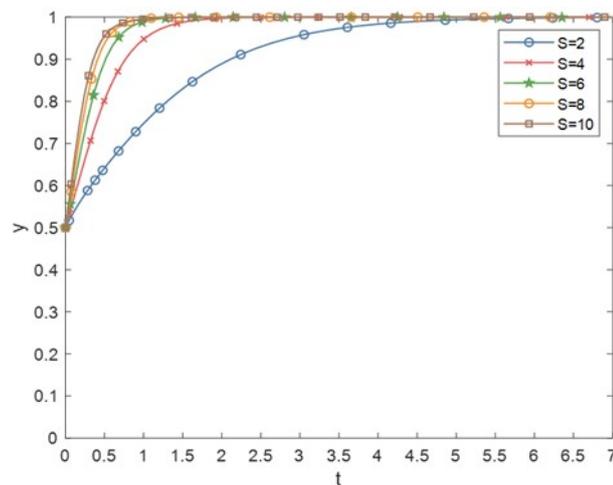


Figure 5. The impact of government subsidies on the evolution of travelers' strategies
图 5. 政府补贴力度对出行者策略演化的影响

由图 5 可知, 随着政府补贴力度的增加, 出行者选择“高铁+”组合出行概率趋向于 1 的速率显著提升。从仿真图中还可以看出尽管政府相关管理部门给予的优惠政策无法对游客产生较大的吸引力, 也并不影响系统朝着理想状态进行演化。由此可知, 合理增加“高铁+”组合出行的优惠补贴力度, 能够切实提高出行者选择“高铁+”的速率。

2) 停车管理费 设选择私家车出行的停车费用 $F_p = \{1, 3, 5, 7, 9\}$, 收益观察数值变化对出行者群体出行策略选择的影响, 演化过程如图 6 所示。

由图 6 可知, 随着私家车出行的停车管理费的增加, 出行者选择“高铁+”出行概率向 1 演化的速率显著提升, 当停车管理费在现有基础上降低 80% 时, 出行者选择“高铁+”组合出行向 0 演化, 出行者更倾向于选择私家车, 说明停车管理费、交通拥堵费等一系列政策极大地影响了出行者的价值感知。结合仿真图的演化趋势, 当收费价格降低 40% 的时候, 出行者选择“高铁+”组合出行的速率显著降低, 演化曲线的拐点显著后移, 但是并不会影响“高铁+”组合出行向 1 的演化, 而在此基础上增加停车管理费

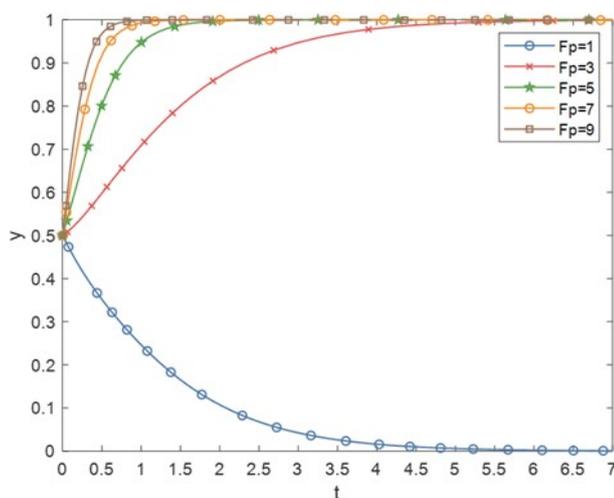


Figure 6. The impact of parking management fees on the evolution of travelers' strategies

图 6. 停车管理费对出行者策略演化的影响

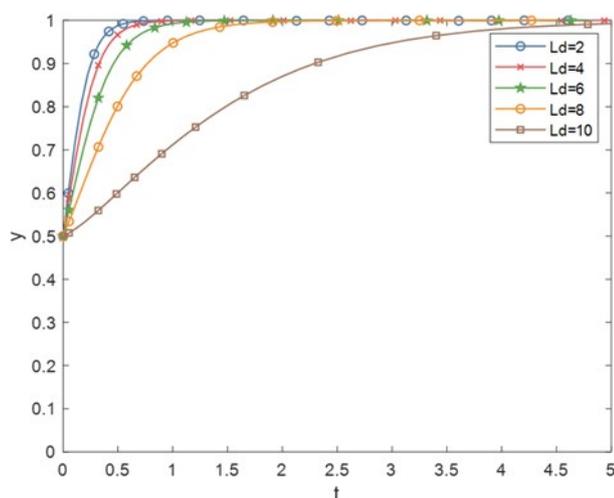


Figure 7. The impact of shuttle fees on the evolution of travelers' strategies

图 7. 接驳费用对出行者策略演化的影响

并不会显著影响拐点出现的速率。

由此可知, 通过适度增加私家车出行的费用成本, 是提升出行者组合出行意愿的有效途径。除停车费用、燃油费用、日常养护费用外, 可以借鉴伦敦、斯德哥尔摩等国际城市的拥堵收费以及低排放区政策, 有效地治理了城市拥堵和空气污染问题[7]。

3) 接驳费用 设选择私家车出行的停车费用 $L_d = \{2, 4, 6, 8, 10\}$, 收益观察数值变化对出行者群体出行策略选择的影响, 演化过程如图 7 所示。

由图 7 可知, 随着接驳费用的降低, 出行者选择“高铁+”组合出行的概率向 1 演化的速率显著提升。由此可知, 通过合理设置接驳用具的补贴, 鼓励游客选择“高铁+”组合出行不仅可以缓解道路拥堵, 同时由于私家车出行比例降低, 当地的碳排放量也可以得以降低, 政府部门可以增加交通枢纽接驳车的优惠政策、与相关的网约车打车平台进行合作从而更好地补贴选择组合出行的游客能够有效提升“高铁+”组合出行吸引力, 提高游客选择组合出行的意愿。

5. 结论

本研究结合演化博弈理论, 构建政府与出行者之间的演化博弈模型。通过求解复制动态方程并得到决策主体的策略动态演化状态及不同情况的稳定性条件, 进而分析了目前政府部门管控措施存在的主要问题。通过仿真模拟, 对模型进行优化, 得到稳定状态下政府推广的概率与出行者选择“高铁+”组合出行的概率, 并分析其中主要参数变化对出行者决策结果的影响情况。

1) 根据复制动态方程计算, 得到不同约束条件下的演化稳定策略, 并通过数值模拟仿真验证了系统理想状态下的演化路径。从政府部门的收益与出行者收益两方面剖析了政府宣传成本、“高铁+”组合出行的接驳成本以及私家车出行费用等原因, 阐明了当前未达到管理者期望的最优状态的原因。从仿真图可以看出政府的补贴就算低于游客的价值感知预期, 仍然有将近 30%左右的游客选择“高铁+”组合出行, 说明出行者对“高铁+”组合出行的价值感知大部分是正向的, 这也符合现实情况。

2) 因素敏感性分析结果表明, 相较于政府部门给予的一系列优惠补贴, 出行者对于停车管理费、拥堵收费等具有更高的敏感性, 当停车管理费过低时, 游客更倾向于选择私家车出行, 打破了情景一的稳定情况, 从而让系统往另外一个方向进行演化, 因为私家车出行具有高度的自由性, 这让“高铁+”组合出行受到了挑战, 而当进一步加大管理力度, 当停车管理费等在原有的基础上降低时, 系统中出行者向选择“高铁+”组合出行演化的速率显著降低, 而政府管理部门在原有的基础上增加出行者的停车管理费等出行成本, 系统中出行者向选择“高铁+”组合出行演化的速率增长缓慢。

3) 同时如果政府管理部门增加停车管理费用, 也许会导致旅游吸引力降低, 因此政府管理部门可以设置停车分区域分时段的收费模式, 在旅游高峰时段实行较高的停车收费标准可以有效的让政府部门的推广宣传得到积极的反馈, 进而最终达到减少全域旅游的交通拥堵, 降低区域的碳排放量, 最大化社会效益。

参考文献

- [1] Gong, H. and Jin, W. (2015) Analysis of Urban Car Owners Commute Mode Choice Based on Evolutionary Game Model. *Journal of Control Science and Engineering*, **2015**, Article ID: 291363. <https://doi.org/10.1155/2015/291363>
- [2] Li, Q., Wang, Y., Li, K., Chen, L. and Wei, Z. (2019) Evolutionary Dynamics of the Last Mile Travel Choice. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, **536**, Article ID: 122555. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.122555>
- [3] 肖海燕. 基于演化博弈的公共交通、共享汽车与私家车的博弈分析[J]. 运筹与管理, 2019, 28(8): 35-40.
- [4] 陈星光, 周晶, 朱振涛. 城市交通出行方式选择的演化博弈分析[J]. 管理工程学报, 2009, 23(2): 140-142, 130.
- [5] 闫康礼, 申栋夫, 汪寒冰, 牟振华. 共享汽车供给模式下私家车用户出行方式选择演化研究[J]. 交通运输工

程与信息学报, 2022, 20(1): 63-72.

- [6] 于跃. 基于乘客选择的网约出行方式演化博弈及发展对策研究[D]: [博士学位论文]. 东营: 中国石油大学(华东), 2021.
- [7] 王颖, 鹿璐, 邱诗永, 等. 低排放区和拥堵收费国际经验[J]. 城市交通, 2016, 14(6): 23-29.