

政府调控下居民绿色出行的演化及扩散

曾益, 李勤川*

华东交通大学交通运输工程学院, 江西 南昌 330013

摘要:为分析政府政策调控对居民绿色出行的作用机制,考虑政府政策调控和出行成本影响,构建政府调控下居民绿色出行和非绿色出行的演化博弈模型,探索居民向绿色出行转型的演化路径,并进行求解分析和仿真验证。采用 Lotka-Volterra 模型研究不同政府调控力度下绿色出行的扩散路径和趋势,证实政府调控是推动居民向绿色出行转型的重要因素。结果表明:分析政府和居民双方策略演化博弈模型,可得到不同条件下的 2 个稳定均衡点,设置的初始点不同时,最终都会向稳定均衡点演化;将演化路径与扩散模型平衡解进行匹配,可得到绿色出行扩散路径;政府调控能有效促进居民向绿色出行转型,不断调整调控力度,政府的补贴和税费政策对居民向绿色出行转型起重要推动作用。为鼓励更多居民选择绿色出行方式,政府应实行补贴为主,惩罚为辅的调控模式。

关键词:绿色出行;演化博弈模型;Lotka-Volterra 模型;政府调控

中图分类号:U491.1

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2024)03-0001-09

引用格式:曾益,李勤川.政府调控下居民绿色出行的演化及扩散[J].山东交通学院学报,2024,32(3):1-9.

ZENG Yi, LI Qinchuan. The evolution and diffusion of residents' green travel under government regulation [J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2024, 32(3): 1-9.

0 引言

近年来,随汽车保有量增大,交通拥堵、空气污染等问题日益严重。截至 2023 年,全国机动车保有量达 4.35 亿辆,其中汽车保有量达 3.36 亿辆,机动车驾驶人超 5.23 亿人,其中汽车驾驶人达 4.86 亿人^[1]。城市化和机动化导致城市地面交通供需不均衡,消耗大量能源^[2]。低碳发展已成为我国国民经济和社会发展的方向,绿色出行是缓解交通拥堵、减少空气污染的有效措施之一,也是城市规划的重要组成部分^[3]。绿色出行是指在出行中尽量减少对环境的负面影响,提倡人们尽可能选择步行、自行车、公共交通等对环境影响较小的交通出行方式,降低交通出行碳排放^[4]。为强化居民绿色出行理念,提高环保意识,各相关部门相继出台系列措施大力推动绿色出行理念转变。国家不断完善绿色交通运输制度体系建设,先后出台《绿色出行行动计划(2019—2022 年)》《绿色出行创建行动方案》等文件^[5]。

目前学者对城市居民出行现状和影响因素进行广泛研究,并提出相关政策建议^[6-10]:通过政府机构引导个人出行行为,倡导绿色出行理念^[11];出台相关资金优惠政策,推动群众养成低碳环保意识,实现低碳交通^[12-14];征收交通拥堵费^[15-16],调整税收政策^[17],对特定区域征收排放税等。马壮林等^[18]构建限行政策下城市居民低碳出行意向模型,证明政策态度、政策效果感知和问题感知对出行意向有直接的显著影响。部分学者采用博弈论方法研究政府政策对绿色出行的影响,Tu 等^[19]建立无政府补贴的纳什博

收稿日期:2023-09-23

基金项目:国家自然科学基金项目(72161011)

第一作者简介:曾益(1976—),男,江西宜春人,副教授,硕士研究生导师,工学硕士,主要研究方向为交通路网优化、运筹与系统优化、供应链网络可靠性等,E-mail:wapuz@163.com。

*通信作者简介:李勤川(1999—),男,江西吉安人,硕士研究生,主要研究方向为低碳交通、运筹与系统优化,E-mail:15170847971@163.com。

弈模型和有政府补贴的 Stackelberg-Nash 博弈模型,对均衡结果和政府补贴作用进行理论分析和数值分析,结果表明政府的成本分担系数足够大时,绿色出行需求高于非绿色出行需求;Zhang 等^[20]从碳排放角度分析公共交通补贴政策的实施机制,探讨三方博弈在不同情况下的演化稳定策略,认为政府有必要控制甚至降低公共交通票价,增加个人机动出行的经济成本。现有文献对政府政策促进绿色出行的重要性展开丰富讨论,但缺少政府政策调控对居民绿色出行作用机制的研究。当政府介入绿色出行的引导及调控时,对居民采用绿色出行方式产生积极影响,居民的出行行为观念会发生改变^[21-22]。研究在政策导向下的居民绿色出行行为演化及扩散机制,为政府提供多角度了解绿色出行政策对居民出行行为的作用机制,为实现低碳出行提供可行性策略。

Lotka-Volterra 模型最初用来模拟生物界种群捕食与被捕食关系,后来扩展应用到不同领域,如,Xia 等^[23]引入 Lotka-Volterra 模型探讨中国高技术产业技术创新的内部结构,分析技术创新间的生态关系及演化趋势;孟斌等^[24]采用 Lotka-Volterra 模型测度绿色智慧港口发展扩散趋势,通过模拟政府调控力度刻画绿色智慧港口与普通港口的扩散形势变化,印证政府调控对绿色智慧港口转型的推动机制。

本文采用演化博弈模型研究政府调控下居民由非绿色出行向绿色出行转型的决策问题,根据 Lotka-Volterra 模型建立居民绿色出行扩散模型,分析政府调控力度对绿色出行与非绿色出行的影响,考虑政府补贴、税费等方面,设定政府和居民在转型过程中的策略选择,通过复制动态方程和雅可比矩阵计算博弈中的稳定策略点,归纳政府调控下居民向绿色出行转型的演化路径,挖掘绿色出行转型的主要推动因素,为政府制定更科学有效的政策提供理论依据。

1 模型构建

1.1 演化博弈模型

构建政府调控下居民绿色出行和非绿色出行演化博弈模型时,提出 4 个假设:1) 整个博弈市场只存在政府和居民 2 个博弈主体,双方均为有限理性;2) 政府策略集 $G = \{ \text{积极管理策略 } P_M, \text{消极管理策略 } N_M \}$,政府采取积极管理和消极管理的概率分别为 $q(0 \leq q \leq 1)$ 、 $1-q$;3) 居民策略集 $P = \{ \text{绿色出行 } G_T, \text{非绿色出行 } N_T \}$,居民选用绿色出行和非绿色出行的概率分别为 $p(0 \leq p \leq 1)$ 、 $1-p$;4) 政府进行积极管理时,会采取一系列措施引导居民选择绿色出行方式,如加大宣传力度、完善交通基础设施、提供公交补贴等;居民出行必定会有出行成本及相关税费等。

政府调控下居民绿色出行和非绿色出行演化博弈模型的参数释义如表 1 所示。

表 1 政府调控下居民绿色出行和非绿色出行演化博弈模型的参数释义

主体	参数	详细释义
政府	积极管理成本 C_0	推动绿色出行时,政府需承担基础设施投资、绿色技术研发成本、管理监督成本等多方面的成本
	绿色收益 C_1	推动绿色出行时,政府承担的成本通常获得长期收益,包括减少环境污染、改善空气质量、减少对有限资源的依赖,及推动可持续发展等方面的回报
	消极管理成本 C_2	推动绿色出行时,政府采取消极管理意味着政府相对较少地介入市场和社会事务,逐渐减少对购车和使用绿色交通工具的补贴,鼓励市场自行实现可持续发展,在基础设施投资方面,通常依赖私营部门的合作和投资,不依赖于政府的财政支持
	补贴 A	在推动绿色出行时,政府采取一系列的补贴政策,如:给予购买电动车或其他绿色交通工具的消费者一定的购车补贴、搭乘公共交通补贴等
	其他费用 B	因居民采用非绿色出行对环境造成破坏,政府需支付的治理成本等
居民	绿色出行成本 M_1	居民选择自行车、公共交通等绿色出行方式时的成本
	非绿色出行成本 M_2	居民选择非绿色出行产生的燃油费用、车辆维护费用、停车费用等其他费用
	税费 E	车辆购置附加税、燃油税等

根据假设条件计算政府调控下居民绿色出行和非绿色出行演化博弈模型中政府和居民双方的期望收益,结果如表2所示。

表2 演化博弈模型中政府和居民双方的期望收益

策略	政府期望收益		居民期望收益	
	绿色出行	非绿色出行	绿色出行	非绿色出行
积极管理	$-C_0 + C_1 - A$	$-C_0 - A - B$	$-M_1 + A$	$-M_2 + A - E$
消极管理	$-C_2 + C_1$	$-C_2 - B$	$-M_1$	$-M_2 - E$

政府积极管理的期望收益函数 $G_1 = p(-C_0 + C_1 - A) - (1-p)(C_0 + A + B)$, 政府消极管理的期望收益函数 $G_2 = p(-C_2 - C_1) - (1-p)(C_2 + B)$, 政府平均期望收益函数 $\bar{G} = qG_1 + (1-q)G_2$ 。

政府选取策略的复制动态方程为:

$$F(q) = dq/dt = q(G_1 - \bar{G}) = q[G_1 - qG_1 - (1-q)G_2] = q(1-q)(C_2 - C_0 - A),$$

式中: $F(q)$ 为 q 的变化率, t 为时间。

达到政府策略稳定均衡点时, $F(q) = 0$ 且 $F'(q) < 0$ 。

令 $F(q) = 0$, 可得 $q = 0$ 或 $q = 1$, $F'(q) = (1-2q)(C_2 - C_0 - A)$ 。

居民选择绿色出行的期望收益函数 $P_1 = q(-M_1 + A) - (1-q)M_1$, 居民选择非绿色出行的期望收益函数 $P_2 = q(-M_2 + A - E) - (1-q)(M_2 + E)$, 居民平均收益函数 $\bar{P} = pP_1 + (1-p)P_2$ 。

居民选取策略的复制动态方程为:

$$F(p) = dp/dt = p(P_1 - \bar{P}) = p[P_1 - pP_1 - (1-p)P_2] = p(1-p)(-M_1 + M_2 + E),$$

式中 $F(p)$ 为 p 的变化率。

达到居民策略稳定均衡点时, $F(p) = 0$ 且 $F'(p) < 0$ 。

令 $F(p) = 0$, 可得 $p = 0$ 或 $p = 1$, $F'(p) = (1-2p)(-M_1 + M_2 + E)$ 。

由 $q=0$ 或 $q=1$, $p=0$ 或 $p=1$ 组合得到4个均衡点分别为 $H_1(0,0)$ 、 $H_2(0,1)$ 、 $H_3(1,0)$ 、 $H_4(1,1)$ 。构建复制动态方程组为:

$$\begin{cases} F(q) = dq/dt = q(1-q)(C_2 - C_0 - A) \\ F(p) = dp/dt = p(1-p)(-M_1 + M_2 + E) \end{cases}^{\circ}$$

由复制动态方程组构建雅可比矩阵

$$J = \begin{pmatrix} \partial F(q)/\partial q & \partial F(q)/\partial p \\ \partial F(p)/\partial q & \partial F(p)/\partial p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (1-2q)(C_2 - C_0 - A) & q(1-q)(C_2 - C_0 - A) \\ p(1-p)(-M_1 + M_2 + E) & (1-2p)(-M_1 + M_2 + E) \end{pmatrix}^{\circ}$$

当 J 同时满足以下2个条件: 1) $\det J = \begin{vmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{vmatrix} = c_{11}c_{22} - c_{12}c_{21} > 0$; 2) $\text{tr } J = c_{11} + c_{22} < 0$, 该均衡点为演化稳定策略点 (evolutionarily stable strategy, ESS)^[25]。分析判断 $H_1(0,0)$ 、 $H_2(0,1)$ 、 $H_3(1,0)$ 、 $H_4(1,1)$ 的稳定性, 计算 $\det J$ 和 $\text{tr } J$ 的表达式, 如表3所示。

表3 4个均衡点的 $\det J$ 和 $\text{tr } J$ 表达式

均衡点	$\det J$	$\text{tr } J$
$H_1(0,0)$	$(C_2 - C_0 - A)(-M_1 + M_2 + E)$	$(C_2 - C_0 - A) + (-M_1 + M_2 + E)$
$H_2(0,1)$	$(C_2 - C_0 - A)(M_1 - M_2 - E)$	$(C_2 - C_0 - A) - (-M_1 + M_2 + E)$
$H_3(1,0)$	$-(C_2 - C_0 - A)(-M_1 + M_2 + E)$	$-(C_2 - C_0 - A) + (-M_1 + M_2 + E)$
$H_4(1,1)$	$-(C_2 - C_0 - A)(M_1 - M_2 - E)$	$-(C_2 - C_0 - A) - (-M_1 + M_2 + E)$

分析 4 个均衡点的稳定条件,已知 $-M_1+M_2+E>0$,若 $H_1(0,0)$ 是系统的 ESS,满足 $\det J>0$ 时,需满足 $C_2-C_0-A>0$;满足 $\text{tr } J<0$ 时,需 $C_2-C_0-A<0$,2 个不等式矛盾,任何情况下 $H_1(0,0)$ 都不是系统的 ESS。

若 $H_2(0,1)$ 是系统的 ESS,满足 $\det J>0$ 时,需 $C_2-C_0-A<0$,此时, $\text{tr } J<0$ 也成立。因此只要满足 $C_2-C_0-A<0$,系统逐渐稳定。

若 $H_3(1,0)$ 是系统的 ESS,满足 $\det J>0$ 时,需 $C_2-C_0-A<0$,此时, $\text{tr } J<0$ 不成立,因此在任何情况下 $H_3(1,0)$ 都不是系统的 ESS。

若 $H_4(1,1)$ 是系统的 ESS,满足 $\det J>0$ 时,需 $C_2-C_0-A>0$,此时 $\text{tr } J<0$ 也成立。因此只要满足 $C_2-C_0-A>0$ 时,系统逐渐稳定。

1.2 Lotka-Volterra 扩散模型

Lotka-Volterra 模型原始状态为^[26-27]:

$$\begin{cases} dh_1(t)/dt = \gamma_1 h_1 (1 - \beta_1 h_1/N_1 - \alpha_{12} h_2/N_1) \\ dh_2(t)/dt = \gamma_2 h_2 (1 - \beta_2 h_2/N_2 - \alpha_{21} h_1/N_2) \end{cases},$$

式中: $h_1(t)$ 、 $h_2(t)$ 分别为 2 个种群在 t 时刻的种群数, γ_1 、 γ_2 分别为 2 个种群的自身增长率, N_1 、 N_2 分别为 2 个种群的环境最大容纳量, β_1 、 β_2 分别为 2 个种群内部的竞争系数, α_{12} 、 α_{21} 分别为 2 个种群间的互相影响作用系数。

通过 Lotka-Volterra 模型构建居民绿色出行扩散模型,以绿色出行居民和非绿色出行居民为 2 个种群,提出 5 方面假设。

假设 1: γ_1 为补贴系数,即居民选择绿色出行得到的补贴费用在居民绿色出行费用中的占比; γ_2 为惩罚系数,即税费在居民非绿色出行费用中的占比。

假设 2: $h_1(t)$ 为 t 时刻选择绿色出行的居民数, $h_2(t)$ 为 t 时刻仍保持原状,选择非绿色出行的居民数。

假设 3: N_1 为选择绿色出行的居民最大容纳量, N_2 为选择非绿色出行的居民最大容纳量,2 种出行方式均未达到最大容纳量,可认为 2 种出行方式的最大容纳量相等,即 $N_1=N_2$ 。

假设 4: $\beta_1=\beta_2=1$,即不考虑 2 种出行方式内部竞争关系对结果的影响。

假设 5: α_{12} 为抑制系数,表示非绿色出行方式对绿色出行方式的抑制作用,主要取决于居民在出行舒适度和出行时间等方面的需求; α_{21} 为转换系数,表示绿色出行对非绿色出行的替代作用,取决于居民对绿色出行理念的接受程度、出行成本方面的考虑等。

根据上述假设建立居民绿色出行扩散模型为:

$$\begin{cases} dh_1(t)/dt = \gamma_1 h_1 (1 - h_1/N_1 - \alpha_{12} h_2/N_1) \\ dh_2(t)/dt = \gamma_2 h_2 (1 - h_2/N_2 - \alpha_{21} h_1/N_2) \end{cases}^{\circ}$$

通过分析居民绿色出行扩散模型的平衡点稳定性,研究政府调控对绿色出行转型的影响。当 $dh_1(t)/dt = dh_2(t)/dt = 0$ 时,求得居民绿色出行扩散模型的平衡点为: $L_1(0,0)$ 、 $L_2(N_1,0)$ 、 $L_3(0,N_2)$ 、 $L_4((N_1 - \alpha_{12}N_2)/(1 - \alpha_{12}\alpha_{21}), (N_2 - \alpha_{21}N_1)/(1 - \alpha_{12}\alpha_{21}))$ 。

对 $dh_1(t)/dt = dh_2(t)/dt = 0$ 求导,得到雅克比矩阵

$$D = \begin{pmatrix} \partial h_1(t)/\partial h_1 & \partial h_1(t)/\partial h_2 \\ \partial h_2(t)/\partial h_1 & \partial h_2(t)/\partial h_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma_1 [1 - (2h_1 + \alpha_{12}h_2)/N_1] & -\alpha_{12}\gamma_1 h_1/N_1 \\ -\alpha_{21}\gamma_2 h_2/N_2 & \gamma_2 [1 - (2h_2 + \alpha_{21}h_1)/N_2] \end{pmatrix}^{\circ}$$

假设 $\gamma_1>0$, $\gamma_2>0$,分析居民绿色出行扩散模型各平衡点的稳定条件,结果如表 4 所示。

平衡点的稳定性受 γ_1 、 γ_2 、 α_{12} 、 α_{21} 影响,2 种出行方式发展演化存在 4 种情形:1) 当 $N_1 > N_2/\alpha_{21}$, $N_2 < N_1/\alpha_{12}$ 时, $L_2(N_1,0)$ 是稳定点,随时间的推移,市场中只存在 h_1 , h_2 退出市场;2) 当 $N_2 > N_1/\alpha_{12}$, $N_1 < N_2/\alpha_{21}$ 时, $L_3(0,N_2)$ 是稳定点,随时间的推移,市场中只存在 h_2 , h_1 退出市场;3) 当 $N_2 < N_1/\alpha_{12}$, $N_1 < N_2/\alpha_{21}$ 时, $L_4((N_1 - \alpha_{12}N_2)/(1 - \alpha_{12}\alpha_{21}), (N_2 - \alpha_{21}N_1)/(1 - \alpha_{12}\alpha_{21}))$ 是稳定点,2 种出行方式并存;4) 当 $N_2 > N_1/\alpha_{12}$, $N_1 > N_2/\alpha_{21}$ 时, $L_2(N_1,0)$ 和 $L_3(0,N_2)$ 是局部稳定点,随时间推移,市场中只存在 h_1 或 h_2 。

表4 居民绿色出行扩散模型各平衡点的稳定条件

平衡点	$\det D$	$\text{tr } D$	稳定条件
$L_1(0,0)$	$\gamma_1 \gamma_2$	$\gamma_1 + \gamma_2$	不稳定点
$L_2(N_1,0)$	$-\gamma_1 \gamma_2 (1 - \alpha_{21} N_1 / N_2)$	$\gamma_2 (1 - \alpha_{21} N_1 / N_2) - \gamma_1$	$N_1 > N_2 / \alpha_{21}, N_2 < N_1 / \alpha_{12}$
$L_3(0, N_2)$	$-\gamma_1 \gamma_2 (1 - \alpha_{12} N_2 / N_1)$	$\gamma_1 (1 - \alpha_{12} N_2 / N_1) - \gamma_2$	$N_1 < N_2 / \alpha_{21}, N_2 > N_1 / \alpha_{12}$
$L_4\left(\frac{N_1 - \alpha_{12} N_2}{1 - \alpha_{12} \alpha_{21}}, \frac{N_2 - \alpha_{21} N_1}{1 - \alpha_{12} \alpha_{21}}\right)$	$-\gamma_1 \frac{1 - \alpha_{12} N_2 / N_1}{1 - \alpha_{12} \alpha_{21}} - \gamma_2 \frac{1 - \alpha_{21} N_1 / N_2}{1 - \alpha_{12} \alpha_{21}}$	$\frac{\gamma_1 \gamma_2 (1 - \alpha_{12} N_2 / N_1) (1 - \alpha_{21} N_1 / N_2)}{1 - \alpha_{12} \alpha_{21}}$	$N_1 < N_2 / \alpha_{21}, N_2 < N_1 / \alpha_{12}$

政府和居民的出行策略根据情况改变,2类出行者存在竞争、合作或抑制关系。假设政府和居民在整个演化过程中分为初始阶段、演化阶段和理想阶段3个阶段性发展,居民绿色出行扩散模型如图1所示。

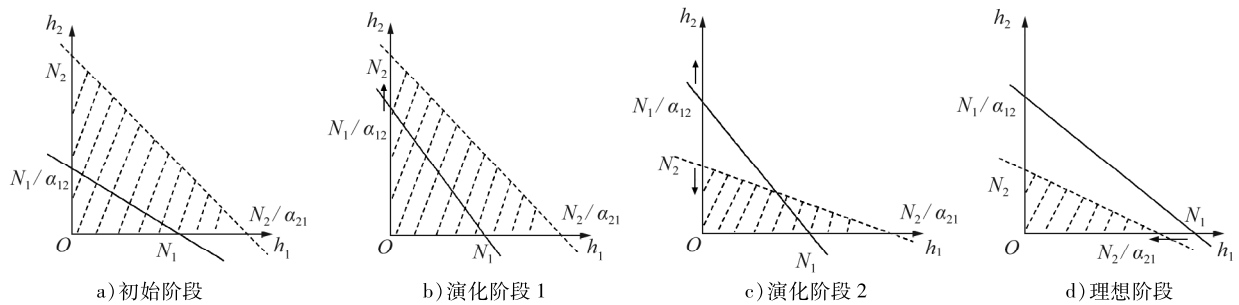


图1 居民绿色出行扩散模型

1) 初始阶段。居民的绿色出行理念薄弱,政府处于消极管理状态,未介入调控, γ_1 和 γ_2 较小,在整个出行规模中,采用非绿色出行的人数多于采用绿色出行的人数,大部分居民缺乏绿色出行意识,此时, $N_2 > N_1 / \alpha_{12}, N_1 < N_2 / \alpha_{21}, \alpha_{12} > \alpha_{21}$,初始阶段的居民绿色出行扩散模型如图1a)所示。

2) 演化阶段。政府开始通过提高补贴、增加购置税、完善绿色出行基础设施等措施,推广绿色出行的理念,受政府调控影响, γ_1 和 γ_2 逐渐增大,居民有一定的绿色出行环保理念,一部分城市居民开始转型,摒弃原有出行方式,采用成本更低、更环保的绿色出行方式,演化阶段1的居民绿色出行扩散模型如图1b)所示,此时选择绿色出行的人数开始逐渐增大,扩散趋势发生改变;演化阶段2的居民绿色出行扩散模型如图1c)所示,此时, $N_2 < N_1 / \alpha_{12}, N_1 < N_2 / \alpha_{21}, \alpha_{12} < \alpha_{21}$,增大,在政府调控下,绿色出行成本不断压缩,居民更偏向于采用绿色出行方式,二者出行方式形成互补型扩散。

3) 理想阶段。在政府积极管理状态下,出行政策不断优化,出行基础设施不断完善,优惠福利政策落实到位,城市居民绿色出行意识较强,绿色出行可节约出行成本,居民自主向绿色出行行为转化,政府逐渐降低调控力度, $\gamma_1 > \gamma_2$ 。理想阶段居民绿色出行扩散模型如图1d)所示,此时 $N_1 > N_2 / \alpha_{21}, N_2 < N_1 / \alpha_{12}, \alpha_{12} < \alpha_{21}$,随政府不断调整调控力度,绿色出行扩散速率增大,扩散规模超过非绿色出行。

2 仿真分析

2.1 演化博弈模型仿真

采用软件 MATLAB 对政府和居民双方策略演化进行仿真模拟,并进行验证。设置基础参数为:博弈起始时间为0,结束时间为10,政府采取积极管理策略的 q 和居民采取绿色出行策略的 p 均从0.1增至1.0,间隔为0.1。

2.1.1 $H_2(0,1)$ 数值仿真分析

$C_2 - C_0 - A < 0$ 时, $H_2(0,1)$ 为 ESS,基于该条件分别设置3个数值组进行仿真。数值组1为: $C_0 = 18$,

$C_2=10, A=12, M_1=15, M_2=30, E=5$ 。数值组 2 为: $C_0=18, C_2=16, A=8, M_1=15, M_2=30, E=5$ 。数值组 3 为: $C_0=18, C_2=18, A=8, M_1=15, M_2=30, E=5$ 。3 个数值组下, $H_2(0,1)$ 的政府和居民双方策略演化博弈模型仿真结果如图 2 所示, 政府和居民双方策略的演化稳定性仿真结果如图 3 所示。

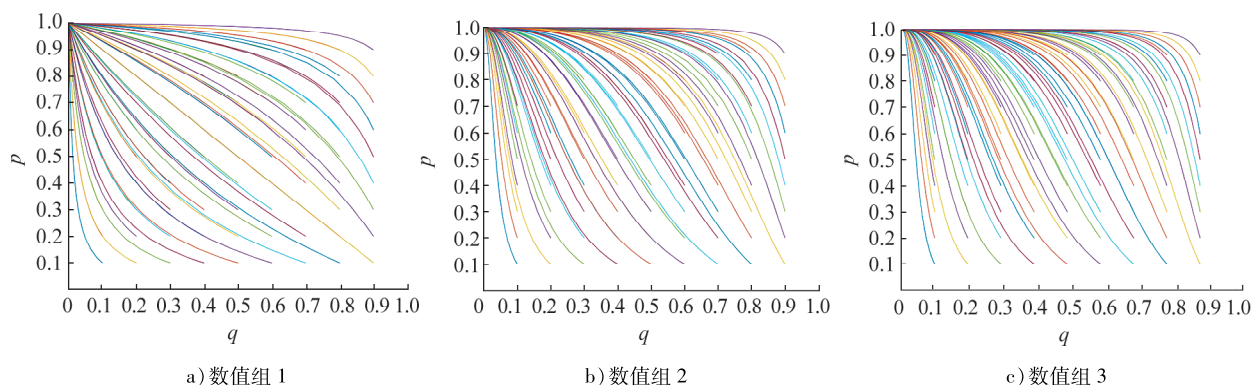


图 2 $H_2(0,1)$ 的政府和居民双方策略演化博弈模型仿真结果

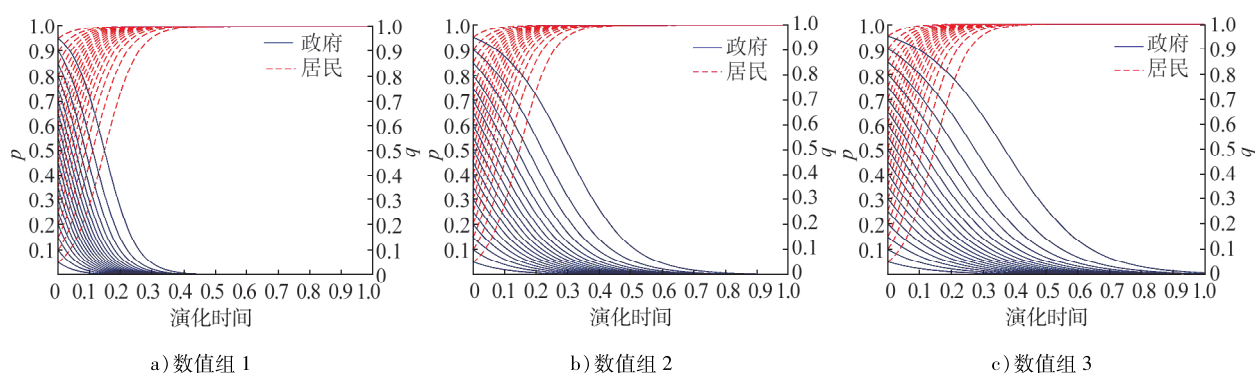


图 3 $H_2(0,1)$ 的政府和居民双方策略演化稳定性仿真结果

由图 2、3 可知: 设置不同的初始点, 满足 $C_2-C_0-A<0$ 时, 政府和居民双方策略均向 $H_2(0,1)$ 演化, 并达到稳定状态。 $H_2(0,1)$ 对政府是最优稳定策略, 政府只需支付一定的管理费用, 还可得到居民绿色出行的相应收益。

2.1.2 $H_4(1,1)$ 数值仿真分析

$C_2-C_0-A>0$ 时, $H_4(1,1)$ 为 ESS, 基于该条件分别设置 3 个数值组进行仿真。数值组 1 为: $C_0=10, C_2=25, A=8, M_1=15, M_2=30, E=5$ 。数值组 2 为: $C_0=8, C_2=20, A=8, M_1=15, M_2=30, E=5$ 。数值组 3 为: $C_0=12, C_2=30, A=8, M_1=15, M_2=30, E=5$ 。3 个数值组下 $H_4(1,1)$, 政府和居民双方策略演化博弈模型的仿真结果如图 4 所示, 政府和居民双方策略的演化稳定性仿真结果如图 5 所示。

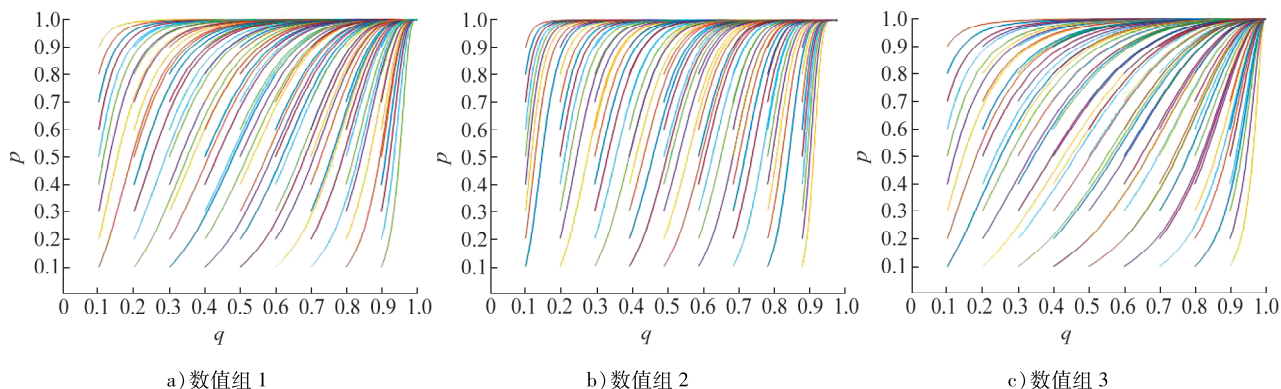
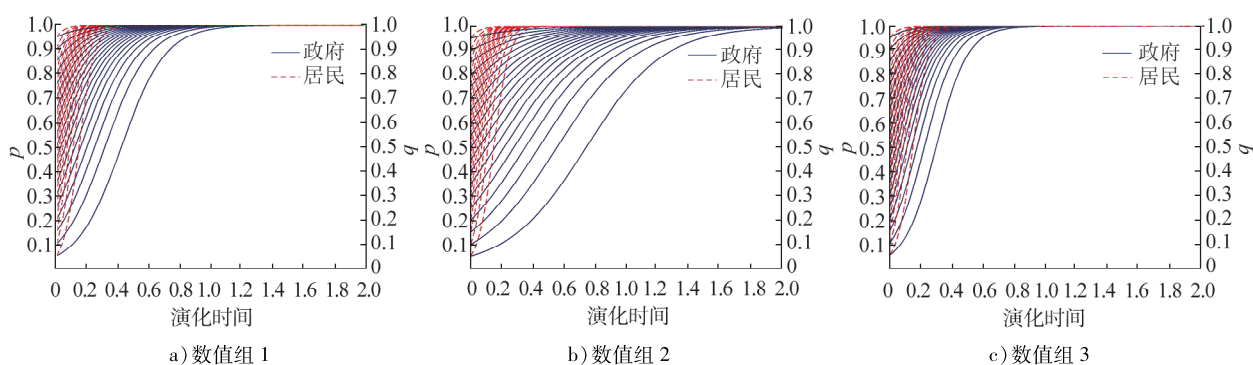


图 4 $H_4(1,1)$ 的政府和居民双方策略演化博弈模型仿真结果

图5 $H_4(1,1)$ 的政府和居民双方策略演化稳定略仿真结果

由图4、5可知:满足 $C_2 - C_0 - A > 0$ 时,政府和居民的博弈策略向 $H_4(1,1)$ 演化,并达到稳定状态。 $H_4(1,1)$ 对居民来说是最优稳定策略,此时居民能节省出行费用,获得出行补贴,还能绿色出行,减少对环境的破坏。

2.2 扩散模型仿真

设置初始参数 $N_1 = N_2 = 1\,000$ 人, $h_1(0) = 400$ 人, $h_2(0) = 600$ 人,演化时间为 $[0, 50]$ 。初始阶段,设置 $\gamma_1 = \gamma_2 = 0.4$, $\alpha_{12} = 0.7$, $\alpha_{21} = 0.5$,即初始阶段补贴系数和惩罚系数相同,居民采用非绿色出行方式对居民转化成绿色出行方式的抑制作用系数大于绿色出行对非绿色出行的转换作用系数,初始阶段的扩散模型仿真结果如图6所示。由图6可知:初始阶段政府未介入调控或调控力度较小,大部分城市居民绿色出行理念薄弱,非绿色出行扩散强于绿色出行扩散,并随模拟次数的增大趋于稳定。

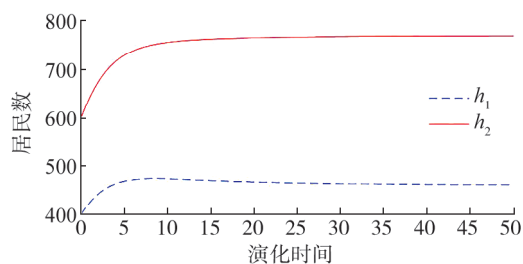


图6 初始阶段扩散模型仿真结果

随政府加大调控力度,逐步提高补贴力度和惩罚力度,相互作用系数随之改变。通过对非绿色出行方式征收税费,促使居民选择绿色出行方式,如,对高污染的燃油车征收高额的购置税或燃油税,购车成本增大,居民购买燃油车的意愿减少,非绿色出行方式的需求减少,居民选择绿色出行的抑制系数降低。政府加大对绿色出行方式的补贴力度,促使人们多采用绿色出行方式,如,给予购买电动车或混合动力车的消费者一定的补贴金额,降低购车成本,提高人们选择绿色出行方式的动力,补贴政策可促使非绿色出行方式向绿色出行方式转换。

当政府加大惩罚力度时,设置 $\gamma_1 = 0.4$, $\gamma_2 = 0.6$, $\alpha_{12} = 0.6$, $\alpha_{21} = 0.5$;当政府加大补贴力度时,设置 $\gamma_1 = \gamma_2 = 0.6$, $\alpha_{12} = \alpha_{21} = 0.6$,得到演化阶段的扩散模型仿真结果如图7所示。由图7可知:曲线出现拐点,当政府调控力度不断加强,选择绿色出行的城市居民数逐渐超过非绿色出行的居民数,随模拟次数的增大,2种出行方式的扩散趋势持平。

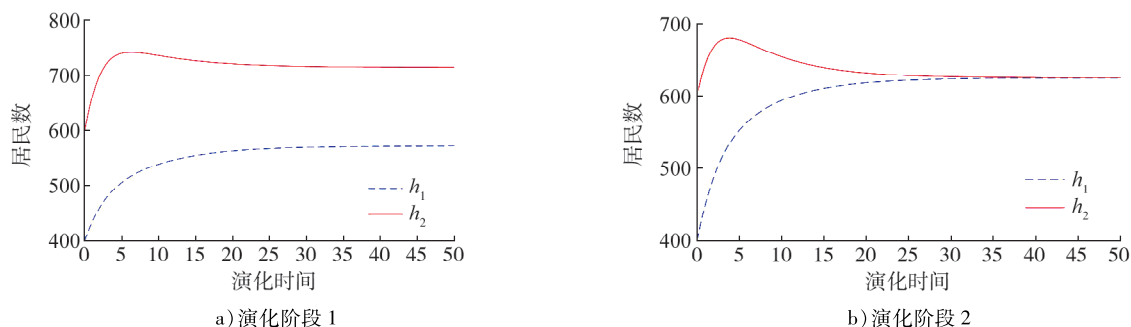


图7 演化阶段扩散模型仿真结果

理想阶段扩散模型仿真结果如图 8 所示。

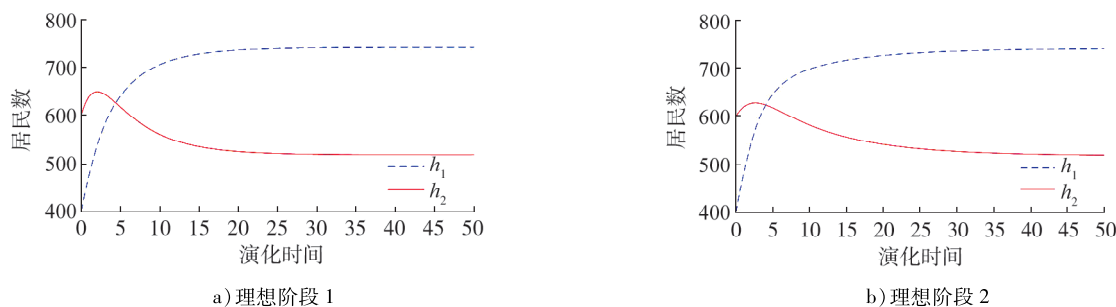


图 8 理想阶段扩散模型仿真结果

设置 $\gamma_1 = \gamma_2 = 0.70, \alpha_{12} = 0.50, \alpha_{21} = 0.65$, 得到理想阶段 1 的扩散模型仿真结果如图 8a) 所示。由图 8a) 可知: 理想阶段选择绿色出行的城市居民数超过选择非绿色出行的城市居民数。当政府在此基础上降低惩罚系数时, 设置 $\gamma_1 = 0.70, \gamma_2 = 0.30, \alpha_{12} = 0.50, \alpha_{21} = 0.65$, 得到理想阶段 2 的扩散模型仿真结果如图 8b) 所示。由图 8b) 可知: 此时选择绿色出行的居民数仍多于选择非绿色出行的居民数, 即在政府通过降低惩罚系数后, 居民环保意识增强, 更多居民自发地选择绿色出行。

3 结论

本文采用演化博弈模型分析政府调控下居民出行行为决策, 计算双方稳定策略点, 讨论稳定条件。通过 Lotka-Volterra 模型建立绿色出行扩散模型, 由微分方程组平衡点稳定定理确定扩散模型各平衡点的稳定条件, 并将演化路径与扩散模型平衡解匹配, 得到绿色出行扩散路径。

1) 当满足 $C_2 - C_0 - A < 0$ 时, 政府选择消极管理策略, 居民选择绿色出行策略, 系统向稳定均衡点 $H_2(0,1)$ 演化; 当满足 $C_2 - C_0 - A > 0$ 时, 政府选择积极管理策略, 居民选择绿色出行策略, 系统向稳定均衡点 $H_4(1,1)$ 演化。无论政府是否监管, 居民都更倾向选择绿色出行方式。原因是绿色出行不仅可节省居民的交通费用, 还有可能获得政府在监管时提供的补贴。政府能从推动绿色出行中获得收益, 同时减少治理环境污染所需成本, 实现利益最大化, 符合可持续发展的理念。

2) 在演化过程中, 即便政府支持, 居民向绿色出行方式转型的节奏仍缓慢, 原因是一般的绿色出行方式达不到一定的时效性, 无法满足大众需求。因此, 政府应深入挖掘影响城市居民实践绿色出行的关键因素, 制定针对性的政策。

3) Lotka-Volterra 扩散模型可研究不同调控力度下居民出行方式的扩散过程, 分析绿色出行的发展趋势, 并为制定更有效的政策提供参考依据。调整扩散模型中的补贴系数和惩罚系数, 对居民选择绿色出行方式有较强的促进作用。若居民在繁重的税费下被迫向绿色出行转型, 会严重影响转型积极性, 因此, 政府应实行补贴为主, 惩罚为辅的调控模式。

4) 政府的补贴和税费政策对居民向绿色出行转型起重要的推动作用。政府的补贴政策可降低绿色出行成本, 政府通过提供购买绿色交通工具的财政支持及补贴绿色出行服务和设施的建设, 减少居民的经济压力, 提高绿色出行的便利性和舒适度, 鼓励更多人选择绿色出行方式。政府的税费政策也可起到引导居民向绿色出行转型的作用, 对非绿色出行方式征收高额税费, 减少绿色出行的税费负担, 提高非绿色出行的成本, 进一步鼓励居民选择绿色出行方式。

本文对博弈模型中 2 个博弈主体具体策略的复杂性缺乏讨论, 如对政府为绿色出行采取的措施和成本进行更详细的划分, 未来可通过收集实际的样本数据进一步完善模型。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国中央人民政府. 全国机动车保有量达 4.35 亿辆驾驶人达 5.23 亿人 新能源汽车保有量超过 2 000

- 万辆[EB/OL]. (2024-01-11)[2024-05-07]. https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202401/content_6925362.htm.
- [2] 韦敬楠. 我国城市交通拥堵程度及影响因素分析:基于道路交通供需平衡的视角[J]. 辽宁工业大学学报(社会科学版), 2023, 25(2): 36-40.
- [3] YUAN Y F, ZHANG Q P, MAO A, et al. A study on the current situation and countermeasures of green travel for college students[C]//Proceedings of 2020 3rd International Conference of Green Buildings and Environmental Management. Qindao: IOP, 2020, 531(1): 012053.
- [4] 陆欢, 干宏程, 王馨玉, 等. 基于扩展计划行为理论的城市居民绿色出行影响因素研究[J]. 交通运输研究, 2022, 8(6): 63-71.
- [5] 商强, 李凌雨, 谢天. 城市居民绿色出行方式选择行为影响因素建模[J]. 山东理工大学学报(自然科学版), 2022, 36(6): 39-45.
- [6] 吕远, 葛浩菁, 焦朋朋. 基于信令数据的中等城市绿色出行政策建议[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2023, 63(11): 1719-1728.
- [7] 罗崴, 张静芬, 马鑫俊. 现代化都市圈背景下中小城市绿色交通发展之路研讨[J]. 交通与港航, 2022, 9(2): 29-34.
- [8] 何小洲, 安子贞, 刘鹏, 等. 碳达峰背景下城市低碳出行体系发展策略研究[J]. 交通与港航, 2021, 8(6): 8-12.
- [9] 余柳. 国际视角下城市交通碳中和策略与路径研究[J]. 城市交通, 2021, 19(5): 19-25.
- [10] 卢冠乔, 谭晨曦, 冯雨云. 成都市城市居民低碳出行影响因素及其政策导向[J]. 管理观察, 2019(10): 48-49.
- [11] ZHENG J P, XU M Y, LI R F, et al. Research on group choice behavior in green travel based on planned behavior theory and complex network[J]. Sustainability, 2019, 11(14): 3765.
- [12] 齐志刚, 孔德楠, 鄢丽娟, 等. 以低碳发展为核心的公路交通政策与发展探讨[J]. 交通节能与环保, 2023, 19(1): 8-11.
- [13] 吕楠, 滕爱, 张彬. “双碳”背景下深圳市公交票价优惠政策优化思路研究[J]. 城市公共交通, 2022(10): 43-48.
- [14] KHOO H L, ONG G P. A mode shift Bayesian network model for active travel demand management policies[J]. Travel Behaviour and Society, 2023, 33: 100635.
- [15] WANG H H, SHI W Y, HE W L, et al. Simulation of urban transport carbon dioxide emission reduction environment economic policy in China: an integrated approach using agent-based modelling and system dynamics[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 392: 136221.
- [16] MACEA L F, MÁRQUEZ L, SOTO J J. How do the affective and symbolic factors of private car driving influence car users' travel behavior in a car restriction policy scenario? [J]. Transport Policy, 2023, 140: 100-113.
- [17] 贺子年, 彭月兰. 英国支持低碳交通的税收政策及经验借鉴[J]. 山西财税, 2021(8): 56-57.
- [18] 马壮林, 崔姗姗, 胡大伟. 限行政策下城市居民低碳出行意向[J]. 吉林大学学报(工学版), 2022, 52(11): 2607-2617.
- [19] TU J, DU J, HUANG M. Competition between green and non-green travel companies: the role of governmental subsidies in green travel[J]. Sustainability, 2023, 15(9): 7712.
- [20] ZHANG L L, LONG R Y, HUANG Z, et al. Evolutionary game analysis on the implementation of subsidy policy for sustainable transportation development[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 267: 122159.
- [21] YANG D F, SUN S H. Research on the impact of social propaganda and guidance policies on public green travel intention: evidence from China[J]. Frontiers in Sustainability, 2022(3): 927584.
- [22] YANG R R, LI L L, WANG C C, et al. Influence of internal and external pressure sensing on green travel intention: based on a theoretical model of the theory of planned behavior and pressure-state-response model[J]. Transportation Research Record, 2023, 2677(2): 958-972.
- [23] XIA M, HE X W, LIN H, et al. Analyzing the ecological relations of technology innovation of the Chinese high-tech industry based on the Lotka-Volterra model[J]. PloS One, 2022, 17(5): e0267033.
- [24] 孟斌, 张欣, 匡海波, 等. 基于政府调控的绿色智慧港口转型演化及扩散研究[J]. 中国管理科学, 2022, 30(8): 21-35.
- [25] 宋美慧, 王维才. 能源安全背景下企业与政府间双方演化博弈行为研究[J]. 中国软科学, 2022(9): 152-160.
- [26] 雷渝, 帅斌. 基于 Lotka-Volterra 模型的高铁与航空快递运输竞合关系研究[J]. 铁道运输与经济, 2022, 44(3): 73-78.