

文章编号:1672-3961(2024)04-0150-09 DOI:10.6040/j.issn.1672-3961.0.2023.106

地方政府和高速公路经营者低碳行为的演化博弈分析

高艳艳¹,周童¹,王旭^{1*},高洁²,戴荣健¹

(1.山东大学齐鲁交通学院,山东 济南 250002; 2.上海海事大学交通运输学院,上海 201306)

摘要:为促进高速公路低碳运营,基于演化博弈理论研究地方政府和高速公路经营者在碳排放配额政策和奖惩机制下的低碳行为变化,通过主体行为影响因素选取构建、求解和分析双方演化博弈模型,并借助 MATLAB 软件开展仿真分析,研究不同奖惩机制和合作程度对演化结果的影响以及博弈主体行为选择初始概率、奖惩系数分别对演化过程的影响。结果表明:地方政府对高速公路经营者实施碳排放配额政策和运行奖惩机制能够促进政企双方共同参与高速公路运营降碳,且奖惩机制根据政企合作程度动态调整的效果直观有效;地方政府实施碳配额政策且经营者合法排放的初始概率越接近1,双方合作推动高速公路低碳运营的速度越快;碳配额政策实施初期运行高奖惩系数($\theta_1=0.15, \theta_2=0.15$)机制会加速高速公路低碳运营。

关键词:低碳交通;博弈理论;数值仿真;碳配额政策;奖惩机制

中图分类号:U4-9 **文献标志码:**A

引用格式:高艳艳,周童,王旭,等. 地方政府和高速公路经营者低碳行为的演化博弈分析[J].山东大学学报(工学版),2024,54(4):150-158.

GAO Yanyan, ZHOU Tong, WANG Xu, et al. Evolutionary game analysis of low-carbon behavior between local government and expressway operator[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2024, 54(4):150-158.

Evolutionary game analysis of low-carbon behavior between local government and expressway operator

GAO Yanyan¹, ZHOU Tong¹, WANG Xu^{1*}, GAO Jie², DAI Rongjian¹

(1. School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan 250002, Shandong, China; 2. College of Transport & Communications, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: In order to promote the low-carbon operation of expressway, the low-carbon behavior changes of local government and expressway operator under carbon emission quota policy and reward-punishment mechanism based on the evolutionary game theory were studied, the two sides' evolutionary game model was constructed, solved and analyzed through the selection of influencing factors of the agent behavior, and the simulation analysis was carried out with MATLAB to explore the influence of different reward-punishment mechanisms and cooperation degrees on the evolutionary results, as well as the influence of the initial probabilities of the game agent behavior selection and reward and punishment coefficients on the evolutionary process respectively. The results showed that the implementation of carbon emission quota policy and the operation of reward-penalty mechanism for expressway operator by local government could promote the joint participation of government and enterprise in reducing carbon in highway operation, and the dynamic adjustment of reward-punishment mechanism according to the degree of cooperation between government and enterprise was intuitive and effective; the closer the initial probabilities of local government implementing carbon quota policy and operator legally emitting emission were to 1, the faster the two sides cooperated to promote low-carbon operation of expressway; and the high reward-punishment coefficient ($\theta_1=0.15, \theta_2=0.15$) mechanism in the early stage of the implementation of the carbon quota policy could accelerate the low-carbon operation of expressway.

收稿日期:2023-05-26

基金项目:山东省重点研发计划资助项目(2020CXGC010117);山东省交通科技计划资助项目(2021B60)

第一作者简介:高艳艳(1996—),女,河南滑县人,助理研究员,硕士,主要研究方向为智能交通系统、绿色低碳交通体系。E-mail:gaoyanyan@sdu.edu.cn

* 通信作者简介:王旭(1987—),女,山东济南人,副教授,博士生导师,博士,主要研究方向为智能交通系统、主动交通控制管理、道路交通安全、车路协同/车联网、交通大数据。E-mail:xuwang@sdu.edu.cn

Keywords: low-carbon transport; game theory; numerical simulation; carbon emission quota policy; reward-punishment mechanism

0 引言

随着经济全球化进程的不断加快,能源短缺和环境污染问题给全球经济可持续发展带来严峻挑战,低碳经济成为促进全球经济可持续发展的关键因素。在国际上,《京都议定书》建立三种国际减排合作机制催生全球碳市场^[1];《欧洲绿色协议》提出2050年应率先实现“碳中和”目标^[2]。在国内,政府陆续出台《绿色交通“十四五”发展规划》等政策推动绿色交通发展^[3],生态环境部出台并实施碳排放配额政策(以下简称碳配额政策)^[4],坚持基于“总量确定,价格不定”的原则限制温室气体排放总量控制碳排放,本质上是政府首先设定一个碳排放许可总量,并按照免费、拍卖或两者结合的方式初始分配给减排企业,若该企业实际碳排放量超出给定的初始碳排放配额,必须经过碳交易购买剩余碳排放配额,否则不得进行碳排放。高速公路作为客、货流的主要运输通道,一方面承担客货运输的基本功能,另一方面成为交通行业碳排放的主要源头之一^[5]。

高速公路经营者作为公路运营的重要服务方,在通过基础设施运营满足出行者需求的同时,不可避免地产生了能源消耗和碳排放。高速公路运营的碳减排不仅需要政策引导和法规约束,还需要运行奖惩机制以适当调控减排成本,提高地方政府和经营者的减排积极性^[6-8]。因此,梳理碳配额政策和奖惩机制的研究对交通参与主体未来减排行为的引领是有必要的。目前的研究主要集中在碳交易机制对政府或企业的决策、经济或减排的效果两方面。在政企决策方面,文献[9]认为配额制和交易制不仅是政府设定碳排放限额的标准,也是借助碳交易市场降低整个国家或地区碳排放总量的机制;文献[10-11]认为碳交易不同于强制性监管,而是一种以市场为基础灵活控制排放的机制,比单一碳税政策更有利于企业的经济发展;文献[12-13]提出纳入交通排放的碳交易机制会降低监管成本,增强二氧化碳减排计划实施的有效性。在经济和减排效果方面,文献[14]利用非线性规划模型分析了中国省际减排配额交易方案的经济效益,得出省际减排配额交易机制可

使中国总减排成本降低40%以上的结论;文献[15]从政企等多主体角度、文献[16-17]从碳交易机制设计的角度分别分析,发现碳交易机制会加强减排降碳和经济抑制的效果;文献[18]采用三级补贴率的方式模拟碳排放政策推进,发现提高碳排放补贴率能使生态和经济均得到良好发展。伴随着碳交易市场试点的成立,碳排放权交易不仅激发了企业活力,初始碳排放配额也成为碳排放权交易的重要组成部分。文献[19-20]探究发现免费分配的基准线法更能促进企业和社会的持续减排。但现有研究没有将碳配额政策和奖惩机制共同引入高速公路运营期减排,也未过多考虑参与主体减排行为的影响因素和行为结果,考虑现实中人们的决策行为往往受到情绪、认知限制和信息不全等影响,即博弈参与方都是有限理性的,利用演化博弈论更适合解决高速公路低碳运营的协同管理问题^[21-25]。本研究将碳配额政策创新性地引入高速公路运营期低碳研究(包含子公司、服务区、经营者的交通运输工具和能源等其他服务产业板块),地方政府利用基准线法和履约年经营者化石能源、电力消耗等运营期生命活动相关数据计算和免费分配给经营者相应的初始碳配额,同时监管并保障碳市场的健康有序性,考虑自身利益最大化使得地方政府和经营者长期处于博弈状态,可能导致碳配额政策无法有效实施和发挥碳排放约束作用,进一步运行奖惩机制以促进碳配额政策落实。综上,首先,选取节能减排可支配能力、成本系数、合作程度^[26-27]、额外收益、奖惩系数作为影响地方政府和经营者行为的因素,构建双方演化博弈模型^[28];其次,求解分析博弈主体决策和均衡点稳定性;最后,利用MATLAB软件开展不同奖惩机制和合作程度对演化结果影响、博弈主体行为选择初始概率和奖惩系数分别对演化过程影响三个角度的仿真分析,并提出结论与建议。

1 模型构建

1.1 基本假设

地方政府和经营者都是有限理性的,低碳高速运营系统的演化博弈关系如图1所示。

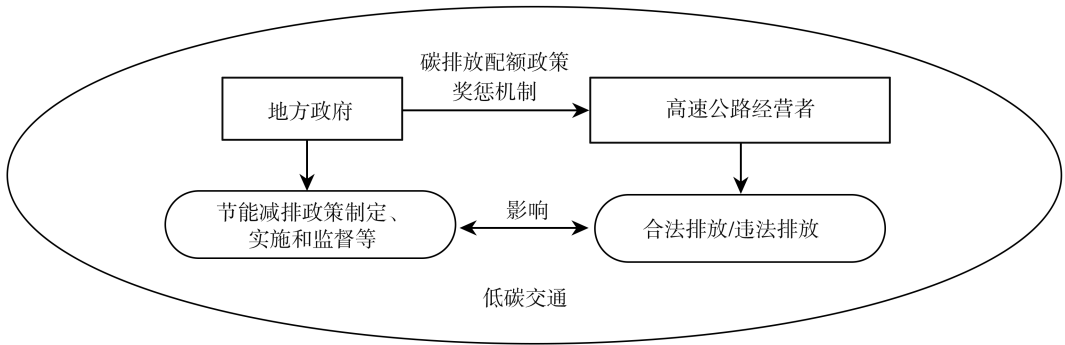


图1 低碳交通背景下地方政府和高速公路经营者演化博弈关系

Fig.1 Evolutionary game relationship between local government and expressway operator under the background of low-carbon transport

基于演化博弈理论构建地方政府和经营者演化博弈模型^[23],基本假设如下。

(1) 地方政府指省、市级别的生态环境局、交通运输委员会、财政局等与交通运输环境保护相关的政府群体,经营者指地方政府管理下的高速公路运营企业群体。

(2) 在实际生活中地方政府和经营者都是有限理性的,面对经济、环境利益的衡量,博弈主体倾向自身综合收益^[29]。以节能减排为发展目标,地方政府和经营者节能减排可支配能力仅考虑减排类预算。

(3) 博弈主体的减排投入力度取决于行为选择和自身属性,资金或经验不足等会影响其参与低碳高速运营的行为,双方反复开展非对称博弈。地方政府和经营者的行为选择均有2种,分别对应实施和不实施、合法排放和违法排放。

(4) 地方政府对经营者实施碳排放配额政策,需投入人员开展初始碳配额核算分配(免费基准线法)^[19-20]、监督管理碳市场等工作;经营者实际碳排放量超出所得初始碳排放配额,需要通过碳交易购买额外碳排放配额,碳配额政策影响博弈主体的价值收益和行为选择。

(5) 地方政府结合碳配额政策和社会经济发展水平等对经营者运行奖惩机制。经营者合法排放获取奖励,反之受到惩罚。

1.2 模型构建

节能减排背景下,地方政府积极制定和实施碳配额政策以约束碳排放,经营者适当更新或升级排污设施、引入降碳技术等提高服务水平以增加经济效益。记地方政府实施碳配额政策的成本投入为 C_1T_1 ,经营者合法排放成本为 C_2T_2 ,其中: C_1 为地方政府成本系数,即碳配额政策成本投入程度(包括政策实施与监督、降碳技术引进和培训等)^[30-31]; C_2 为经营者成本系数,即合法排放的成本投入程度(包括排放设施设备安装升级、技术培训等),实际

成本投入程度还受到成本支出、收益及减排意识水平等影响,为简化计算,设 $0 < C_1 < 1, 0 < C_2 < 1$ ^[29]; T_1 和 T_2 分别为地方政府和经营者的节能减排可支配能力,包括交通运输类、节能减排类支出,设 $0 < T_1, 0 < T_2$ 。

经营者合法排放减少了地方政府交通污染治理成本,记地方政府获得转化收益为 $\alpha_1C_2T_2$;地方政府组织经营者进行减排经验分享等活动,提高了高速公路服务水平,对应经营者获得转化收益为 $\alpha_2C_1T_1$ 。 α_1 和 α_2 分别代表地方政府和经营者的转化收益系数,设 $0 < \alpha_1 < 1, 0 < \alpha_2 < 1$ ^[29]。

地方政府和经营者合作会产生一部分额外收益,合理分配额外收益、协调合作成本分摊比例能够促进系统稳定可持续发展。设政企双方通过信息共享等合作产生一部分额外收益 $R(0 < R)$,且额外收益与双方合作程度 β 正相关,由于政企合作程度受工作性质、主观意愿等影响,设 $0 < \beta < 1$,考虑额外收益来源于政企双方,引入修正系数计算额外收益,计算公式为:

$$R = 2\beta(C_1T_1 + C_2T_2). \quad (1)$$

基于多劳多得的分配原则和地方政府服务性质,地方政府和经营者的额外收益分别为 γ_1R 和 γ_2R , γ_1 和 γ_2 分别为地方政府和经营者的额外收益分配系数,根据实际收益分配占比,则 $0 < \gamma_1 < 1, 0 < \gamma_2 < 1$ ^[29],额外收益分配系数计算公式为:

$$\gamma_1 = C_1T_1 / (C_1T_1 + C_2T_2), \quad (2)$$

$$\gamma_2 = 1 - \gamma_1. \quad (3)$$

奖惩机制运行下,经营者合法排放获得奖励为 θ_1T_2 ,而该部分污染治理成本由地方政府承担;反之,经营者违法排放受到惩罚为 θ_2T_2 ,归入地方政府收益。 θ_1 和 θ_2 分别为奖励系数和惩罚系数,且 $0 < \theta_1 < 1, 0 < \theta_2 < 1$ ^[18]。演化博弈理论下地方政府和高速公路经营者收益函数如表1所示。

表1 地方政府和高速公路经营者演化博弈收益函数
Table 1 Evolutionary game income function of local government and expressway operator

博弈主体行为	地方政府收益函数	高速公路经营者收益函数
地方政府实施+经营者合法排放	$\alpha_1 C_2 T_2 + \gamma_1 R - C_1 T_1 - \theta_1 T_2$	$\alpha_2 C_1 T_1 + \gamma_2 R + \theta_1 T_2 - C_2 T_2$
地方政府实施+经营者违法排放	$\theta_2 T_2 - C_1 T_1$	$\alpha_2 C_1 T_1 - \theta_2 T_2$
地方政府不实施+经营者合法排放	$\alpha_1 C_2 T_2 - \theta_1 T_2$	$\theta_1 T_2 - C_2 T_2$
地方政府不实施+经营者违法排放	$\theta_2 T_2$	$-\theta_2 T_2$

2 模型求解与分析

2.1 均衡点求解

设地方政府实施碳配额政策的概率为 x , $0 \leq x \leq 1$, 则不实施碳配额政策的概率为 $1-x$; 经营者合法排放的概率为 y , $0 \leq y \leq 1$, 则违法排放的概率为 $1-y$ 。

地方政府实施、不实施碳配额政策 2 种策略下的期望收益 E_1, E'_1 分别为:

$$E_1 = y(\alpha_1 C_2 T_2 + \gamma_1 R - C_1 T_1 - \theta_1 T_2) + (1-y)(\theta_2 T_2 - C_1 T_1), \quad (4)$$

$$E'_1 = y(\alpha_1 C_2 T_2 - \theta_1 T_2) + (1-y)\theta_2 T_2. \quad (5)$$

经营者合法排放和违法排放 2 种策略下的期望收益 E_2, E'_2 分别为:

$$E_2 = x(\alpha_2 C_1 T_1 + \gamma_2 R + \theta_1 T_2 - C_2 T_2) + (1-x)(\theta_1 T_2 - C_2 T_2), \quad (6)$$

$$E'_2 = x(\alpha_2 C_1 T_1 - \theta_2 T_2) + (1-x)(-\theta_2 T_2). \quad (7)$$

地方政府实施碳配额政策、经营者合法排放对应的复制动态方程 $F(x), F(y)$ 分别为:

$$F(x) = \frac{dx}{dt} = x(1-x)(E_1 - E'_1) = x(1-x)(\gamma_1 R - C_1 T_1), \quad (8)$$

$$F(y) = \frac{dy}{dt} = y(1-y)(E_2 - E'_2) = y(1-y)(x\gamma_2 R - C_2 T_2 + \theta_1 T_2 + \theta_2 T_2). \quad (9)$$

令 $F(x) = 0$, 求得 $x_1 = 0, x_2 = 1, y^* = \frac{C_1 T_1}{\gamma_1 R}$; 令

$F(y) = 0$, 求得 $y_1 = 0, y_2 = 1, x^* = \frac{C_2 T_2 - \theta_1 T_2 - \theta_2 T_2}{\gamma_2 R}$ 。

因此, 得到 5 个均衡点^[23]: $A(0, 0), B(0, 1), C(1, 0), D(1, 1), O^*(x^*, y^*)$ 。为保证均衡点 O^* 实际可行, 设 $0 < x^* < 1, 0 < y^* < 1$ 。

2.2 博弈主体决策分析

根据微分方程定理, 演化稳定策略 (evolutionarily stable strategy, ESS) 需要满足复制动态方程等于 0 且一阶导数小于 0^[22]。从博弈主体出发, 若博弈主体一方行为选择的初始值发生变

化, 则另一方将趋向不同的演化稳定策略。

2.2.1 地方政府的演化稳定策略

对式(8)中的 x 求一阶导:

$$F'(x) = (1-2x)(\gamma_1 R - C_1 T_1). \quad (10)$$

根据经营者合法排放概率 y 的取值范围, 得到以下 3 种地方政府演化行为变化的情况^[22]。

(1) 当 $y < y^*$ 时, $F'(0) < 0, F'(1) > 0, x_1 = 0$ 是系统唯一的演化稳定策略, 说明当经营者选择合法排放策略的概率低于 y^* 时, 地方政府由实施转向不实施, 即不实施碳配额政策为演化稳定策略。尽管高速公路的低碳运营会为社会带来一定的环境效益和社会福利等, 但地方政府考虑到政策实施的成本投入远超出经济收益, 将不愿继续实施碳配额政策。

(2) 当 $y > y^*$ 时, $F'(0) > 0, F'(1) < 0, x_2 = 1$ 为唯一的演化稳定策略, 说明当经营者选择合法排放策略的概率高于 y^* 时, 地方政府由不实施转向实施, 即实施碳配额政策为演化稳定策略。当经营者积极进行合法排放时, 地方政府因此节约了一定的环境治理成本, 会通过碳配额政策等手段激励企业合法进行碳排放。

(3) 当 $y = y^*$ 时, 对于所有的 x 均满足 $F'(x) = 0$, 说明当经营者选择合法排放策略的概率等于 y^* 时, 地方政府 2 种策略下的收益没有差异。但是, 若地方政府选择不实施策略, 经营者行为将不受制约, 这从长期发展上将不利于高速公路的低碳运营。

2.2.2 经营者的演化稳定策略

对式(9)中的 y 求一阶导:

$$F'(y) = (1-2y)(x\gamma_2 R - C_2 T_2 + \theta_1 T_2 + \theta_2 T_2). \quad (11)$$

根据地方政府实施碳配额政策概率 x 的取值范围, 得到以下 3 种经营者演化行为变化的情况^[22]。

(1) 当 $x < x^*$ 时, $F'(0) < 0, F'(1) > 0, y_1 = 0$ 是系统唯一的演化稳定策略, 说明当地方政府选择实施策略的概率低于 x^* 时, 经营者由合法排放转向违法排放, 即经营者违法排放为演化稳定策略。高速公路低碳运营初期需要投入大量的技术、设备及人员成本, 若政府扶持力度不足以抵消经营者合法排

放成本投入时,长期的经济负担使得经营者将不会进行低碳运营,甚至进行违法排放。

(2) 当 $x > x^*$ 时, $F'(0) > 0$, $F'(1) < 0$, $y_2 = 1$ 是唯一的演化稳定策略,即当地方政府选择实施策略的概率高于 x^* 时,经营者由违法排放转向合法排放,即经营者合法排放为演化稳定策略。地方政府实施碳配额政策为经营者带来经济和技术收益,减轻经营者运营负担,促进其主动履行节能减排义务。

(3) 当 $x = x^*$ 时,对于所有的 y 均满足 $F'(y) = 0$,即当地方政府选择实施策略的概率等于 x^* 时,经营者 2 种策略下的收益没有差异。但是,高速公路作为污染物排放大户,该情况不利于低碳交通运营,因为只有经营者主动降碳,才能快速实现低碳高速公路运营。

2.3 均衡点稳定性分析

通过雅可比矩阵局部稳定性可判断出系统的均衡点稳定性^[21]。对式(8)(9)求 x 和 y 的偏导,得到系统的雅可比矩阵

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial F(x)}{\partial x} & \frac{\partial F(x)}{\partial y} \\ \frac{\partial F(y)}{\partial x} & \frac{\partial F(y)}{\partial y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (1-2x)(y\gamma_1 R - C_1 T_1) & x(1-x)\gamma_1 R \\ y(1-y)\gamma_2 R & (1-2y) \begin{pmatrix} x\gamma_2 R - C_2 T_2 + \\ \theta_1 T_2 + \theta_2 T_2 \end{pmatrix} \end{pmatrix} \quad (12)$$

将 5 个均衡点分别代入式(12),计算雅可比矩阵对应的行列式 ($a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}$) 和迹 ($a_{11} + a_{22}$)^[21-22],如表 2 所示。

表 2 均衡点的行列式和迹
Table 2 Determinant and trace of equilibrium points

均衡点	行列式	迹
$A(0,0)$	$C_1 T_1 T_2 (C_2 - \theta_1 - \theta_2)$	$-C_1 T_1 - T_2 (C_2 - \theta_1 - \theta_2)$
$B(0,1)$	$T_2 (\gamma_1 R - C_1 T_1) (C_2 - \theta_1 - \theta_2)$	$\gamma_1 R - C_1 T_1 + T_2 (C_2 - \theta_1 - \theta_2)$
$C(1,0)$	$C_1 T_1 (\gamma_2 R - C_2 T_2 + \theta_1 T_2 + \theta_2 T_2)$	$C_1 T_1 + \gamma_2 R - T_2 (C_2 - \theta_1 - \theta_2)$
$D(1,1)$	$(\gamma_1 R - C_1 T_1) (\gamma_2 R - C_2 T_2 + \theta_1 T_2 + \theta_2 T_2)$	$-(\gamma_1 R - C_1 T_1) - (\gamma_2 R - C_2 T_2 + \theta_1 T_2 + \theta_2 T_2)$
$O^*(x^*, y^*)$	$-C_1 T_1 T_2 (1-x)(1-y)(C_2 - \theta_1 - \theta_2)$	0

行列式大于 0 且迹小于 0 的均衡点为系统演化稳定策略^[22]。根据参数阈值得到均衡点稳定性结果,如表 3 所示。

表 3 均衡点稳定性结果

Table 3 Stability results of equilibrium points

均衡点	行列式	迹	稳定性
$A(0,0)$	+	-	演化稳定
$B(0,1)$	+	+	不稳定
$C(1,0)$	+	+	不稳定
$D(1,1)$	+	-	演化稳定
$O^*(x^*, y^*)$	-	0	鞍点 ^[22]

注: + 表示正值, - 表示负值。

2.4 演化相图和参数影响

在二维平面 $S = \{(x, y) | 0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1\}$ 上绘制博弈主体动态演化博弈过程, x 轴、 y 轴分别代表地方政府实施碳配额政策、经营者合法排放的概率,演化相位图如图 2 所示。

地方政府和经营者的演化稳定策略不仅依赖于系统的最初状态,还取决于系统的鞍点位置^[22]。

地方政府实施碳配额政策和经营者合法排放的初始概率均越接近 1,越有利于双方合作推动低碳高速运营。

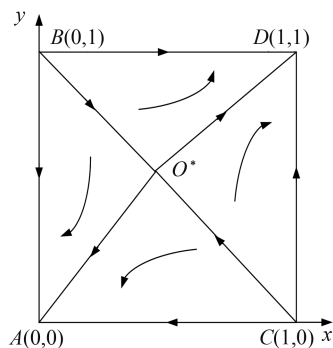


图 2 地方政府和高速公路经营者演化相位图

Fig.2 Evolutionary phase diagram of local government and expressway operator

由图 2 可知,折线 BO^*C 是系统收敛于不同演化稳定策略的分界线。地方政府和经营者的演化博弈过程分布在 ABO^*CA 和 DBO^*CD 两部分,而鞍点 O^* 的位置决定了两部分如何划分,若博弈双方初始行为落在 ABO^*CA 内,系统最终收敛于均衡点 $A(0,0)$,得到地方政府不实施碳配额政策且经营者违法排放的结果;若落在 DBO^*CD 部分,系统将收敛于 $D(1,1)$,得到地方政府实施碳配额政策且经营者合法排放的结果。

地方政府通过碳配额政策、奖惩机制等措施会

激励经营者低碳运营,进而影响系统最终的演化稳定策略。理论分析表明:碳排放配额政策和奖惩机制的组合应用能促进地方政府和经营者合作减排,加快高速公路的低碳运营。

3 仿真分析

3.1 参数取值

以东部某省和该省高速公路经营者为例,查询该省财政局年度预算执行情况和预算草案相关文

件,根据节能环保支出、交通运输支出、政府性基金(交通运输)数据得到该地方政府节能减排可支配能力,查询该省管辖下高速公路经营者年度审计报告中销售、管理、研发和财务费用相关数据,得到经营者节能减排可支配能力,并按2022年增长率推算得到2023年政企可支配能力结果。由式(1)~(3)计算额外收益及分配系数,假设政企双方有意寻求合作以推动绿色高速公路发展,则本研究中合作程度取值下限设为0.6。并结合已有研究为其他参数赋值,如表4所示。

表4 东部某省政府和高速公路经营者参数取值

Table 4 Parameter values of government and expressway operator in an eastern province

参数	节能减排可支配能力/10亿元		成本系数 ^[29]		额外收益分配系数		奖惩系数 ^[18]	合作程度	额外收益/10亿元
	地方政府	经营者	地方政府	经营者	地方政府	经营者			
取值	65	31	0.05	0.05	0.68	0.32	0.05(低),0.10(中),0.15(高)	0.6,0.8,1.0	5.7,7.6,9.5

注:数据来源于东部某省2021年预算执行情况和2022年预算草案、该省高速公路经营单位2022年度审计报告。

3.2 数值仿真与分析

利用MATLAB进行仿真分析,分别探究不同奖惩机制和合作程度对系统演化结果的影响,以及博弈主体行为选择初始概率、奖惩系数分别对演化

过程的影响。

3.2.1 不同奖惩机制和合作程度对演化结果的影响

根据复制动态方程(8)(9),改变奖惩系数和合作程度,并保证其他参数不变。仿真结果如图3所示。

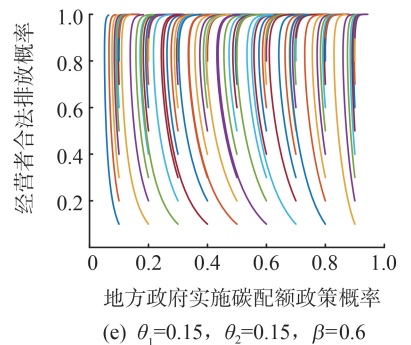
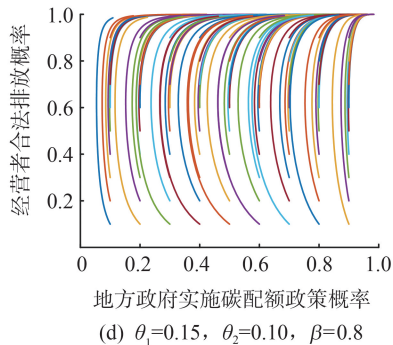
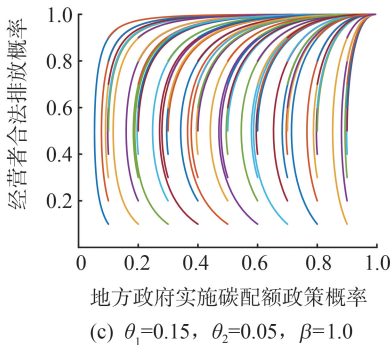
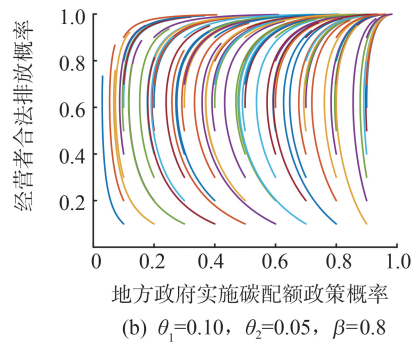
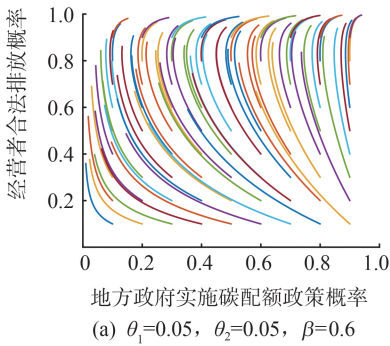


图3 不同奖惩机制和合作程度对演化结果的影响

Fig.3 Influence of different reward-punishment mechanisms and cooperation degree on evolutionary results

由图3可知,碳配额政策和奖惩机制的引入使得地方政府和经营者行为最终演化稳定到合作降碳的结果,保持地方政府和经营者的成本投入、额外收益分配系数保持不变时,奖惩机制的奖励系数

和惩罚系数分别与政企合作程度呈正相关、负相关,且奖励机制带来的合作降碳效果更为直接有效。对于地方政府,经营者的积极配合将有力推动碳配额政策落实,正向促进合法排放。对于经营

者,遵循政策法规进行合法排放,获得政府和公众认可,从而提高运营经济效益。因此,东部某省政府要注重扩大政企双方合作领域、提升合作程度,为奖惩机制的合理制定提供参考依据,进而促进碳配额政策的有效实施。

3.2.2 博弈主体行为选择初始概率对演化过程的影响

设 x_0 和 y_0 分别为东部某省政府实施碳配额政策和高速公路经营者合法排放的初始概率,此处 x_0 取 0.2、0.7, y_0 取 0.1、0.4、0.7 和 0.9^[29]。考虑碳配额政策实施初期政企双方处于探索阶段,取 $\beta=0.6$, θ_1 和 θ_2 均取 0.05, 保证其他变量不变, 得到数值仿真结果, 如图 4 所示。

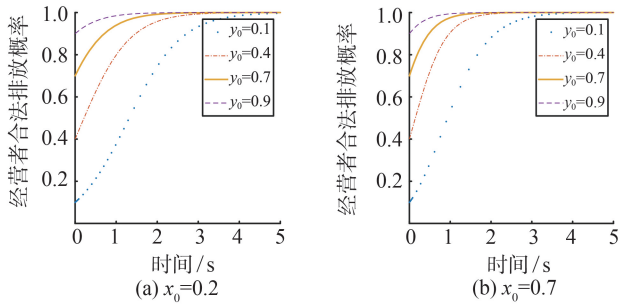


图4 博弈主体行为选择的初始概率对演化结果的影响
Fig.4 Influence of initial probabilities of the game agent's behavior selection on evolutionary results

由图 3、4 可知,基于碳配额政策和奖惩机制下经营者行为最终演化稳定到合法排放的前提,政策利好激活低碳高速运营。对于地方政府,实施碳配额政策的初始概率越大即倾向性越高,经营者演化稳定到合法排放的速度越快。对于经营者,选择合法排放的初始概率越大,演化稳定速度越快。因此,东部某省政府在推动低碳交通发展时,可通过碳配额政策、奖惩机制和宣传等手段提高经营者低碳运营意识,实现合作共赢。

3.2.3 奖惩系数对演化过程的影响

基于 3.2.2 节,取 $x_0 = 0.7, \beta = 0.6$, 其他参数不变。仿真得到奖惩系数对演化过程的影响,如图 5 所示。

由图 4(b) 与图 5 可知,奖惩系数任一方增大,经营者演化稳定到合法排放的速度加快。对于地方政府,通过经济手段影响经营者的价值收益,奖惩系数增大意味着奖惩力度增强,从长期发展的角度,经营者的最优选择为合法排放。对于经营者,奖惩机制运行关系着高速公路运营规划,合法排放为其可持续发展提供支持。因此,东部某省政府在实施碳配额政策的初期,运行奖惩系数均为 0.15 时的机制会兼顾经营者的经济与生态效益,从而有效激励其更加坚定低碳运营。

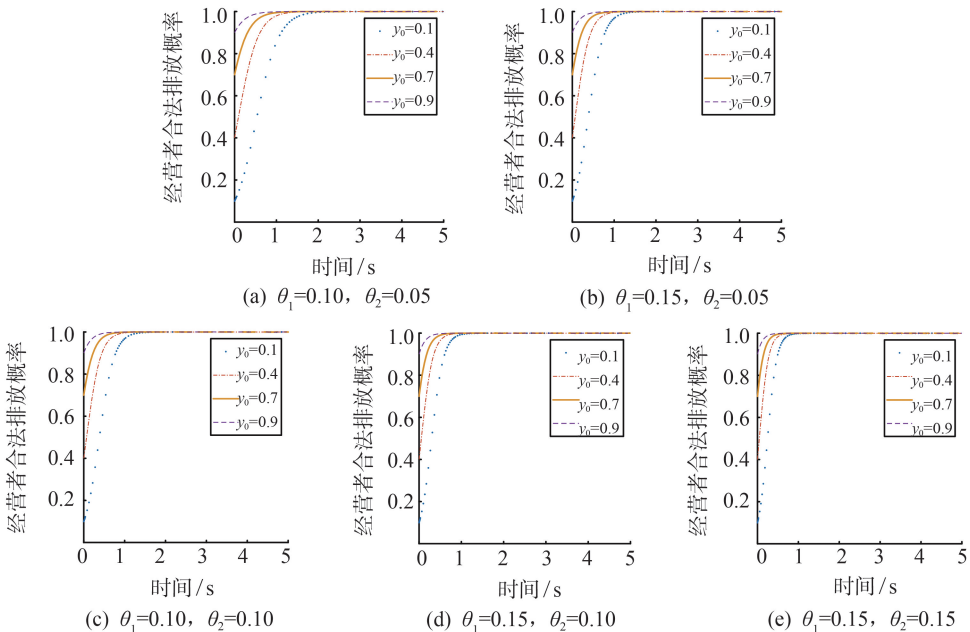


图5 奖惩系数对演化结果的影响
Fig.5 Influence of reward-punishment coefficients on evolutionary results

3.3 讨论

本节分别从碳配额政策背景下不同奖惩机制和合作程度以及博弈主体行为选择初始概率、奖惩系数的角度展开博弈主体行为对高速公路运营降碳效果

的影响。分析发现:一个有效的碳配额政策需要奖惩机制和合作程度的动态配合,而地方政府作为引导者,要通过宣传、技术培训等方式逐渐提高经营者低碳运营意识,完善和运行奖惩机制。

4 结束语

本研究主要基于演化博弈理论探讨碳配额政策和奖惩机制促进高速公路低碳运营,通过数值模拟分析关键参数对演化结果和进程的影响。根据研究结果,提出以下结论与建议。

(1)碳配额政策和奖惩机制的综合应用有利于实现高速公路低碳运营,且政企合作会进一步增强降碳效果。因此,地方政府应积极承担碳交易市场监管和奖惩机制运行等责任,借助政企、政民互动平台,鼓励公民出谋献策,充分挖掘政企合作的潜在工作领域,寻求与经营者低碳运营的最大合作面,从而完善奖惩机制和碳配额政策。

(2)高速公路低碳运营系统中,博弈主体的决策行为相互影响,双方降碳意愿的程度影响了低碳高速运营的发展速度。根据仿真结果发现博弈主体行为选择的初始概率 x_0 和 y_0 越接近 1,系统收敛稳定的速度越快,则地方政府作为引导者,应积极制定和实施碳配额政策,通过降碳技术指导、监管机制完善和宣传等方式激励经营者积极进行合法排放,促使其将环境效益目标引入企业长期发展规划中。

(3)合理有效的奖惩机制有利于创造良好的社会效益,促进碳配额政策的落实。碳配额政策实施初期,运行高奖惩系数 ($\theta_1 = 0.15, \theta_2 = 0.15$) 的机制可促进政企双方积极参与高速公路低碳运营,加速碳配额政策落实和提升降碳效果,而从长远来看,地方政府应结合城市发展规划、高速公路经营能力和碳交易等构建奖惩力度较大的机制体系,发挥碳配额政策对低碳高速运营的促进作用。

本研究在高速公路低碳运营研究中同时引入碳配额政策和奖惩机制,分析了地方政府和经营者的演化博弈过程,并为低碳高速运营提出一些建议。但是,道路使用者等其他利益相关者的行为也在一定程度上影响了经营者的策略选择,后续还需进一步考虑其他利益相关者的影响及演化博弈过程。

参考文献:

[1] 魏琦,潘雨,李林静. 碳配额与补贴政策下企业减排和社会福利的比较研究[J]. 南方金融, 2021, 1(2): 137-150.
WEI Qi, PAN Yu, LI Linjing. A comparative study of corporate emission reduction and social welfare under carbon quota and carbon subsidy policies[J]. South China Finance, 2021, 1(2): 137-150.

[2] 庄贵阳,朱仙丽.《欧洲绿色协议》:内涵、影响与借鉴意义[J]. 国际经济评论, 2021(1): 116-133.
ZHUANG Guiyang, ZHU Xianli. European Green Deal: contents, influences and implications for China[J]. International Economic Review, 2021(1): 116-133.

[3] 中华人民共和国交通运输部. 交通运输部关于印发《绿色交通“十四五”发展规划》的通知:交规划发〔2021〕104号[EB/OL]. (2021-10-29)[2023-03-29]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01/21/content_5669662.htm.

[4] 翁智雄. 中国实现碳中和远景目标的市场化减排机制研究[J]. 环境保护, 2021, 49(增刊1): 66-69.
WENG Zhixiong. Research on China's market-oriented emission reduction mechanism to achieve carbon neutral long-term goals[J]. Environmental Protection, 2021, 49 (Suppl.1): 66-69.

[5] 朱嘉,杨林,陈灵均. 高速公路低碳运营综合效益评价指标体系研究[J]. 公路, 2016, 61(12): 231-235.
ZHU Jia, YANG Lin, CHEN Lingjun. Research on evaluation system of low-carbon expressway in service period [J]. Highway, 2016, 61(12): 231-235.

[6] CHOI J, BAKSHI B R, HUBACEK K, et al. A sequential input-output framework to analyze the economic and environmental implications of energy policies: gas taxes and fuel subsidies[J]. Applied Energy, 2016, 184 (5): 830-839.

[7] COHEN M C, LOBEL R, PERAKIS G. The impact of demand uncertainty on consumer subsidies for green technology adoption[J]. Management Science, 2016, 62 (5): 1235-1258.

[8] KATSOULACOS Y, XEPAPADEAS A. Environmental policy under oligopoly with endogenous market structure [J]. Scandinavian Journal of Economics, 1995, 97(4): 411-420.

[9] 淳伟德,张业霞,陈威. 碳限额与碳交易机制研究现状及趋势展望[J]. 电子科技大学学报(社科版), 2022, 24(1): 92-104.
CHUN Weide, ZHANG Yexia, CHEN Wei. Current status and outlook of carbon cap-and-trade mechanism research[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China (Social Science Edition), 2022, 24 (1): 92-104.

[10] GONG X, ZHOU S X. Optimal production planning with emissions trading[J]. Operations Research, 2013, 61(4): 908-924.

[11] LEE C F, LIN S J, LEWIS C. Analysis of the impacts of combining carbon taxation and emission trading on different industry sectors[J]. Energy Policy, 2008, 36 (2), 722-729.

[12] ABRELL J. Regulating CO₂ emissions of transportation in Europe: a CGE-analysis using market-based instruments[J]. Transportation Research Part D, 2010,

- 15(4): 235-239.
- [13] LI Y P, HUANG G H, LI M W. An integrated optimization modeling approach for planning emission trading and clean-energy development under uncertainty[J]. *Renewable Energy*, 2014, 62: 31-46.
- [14] ZHOU P, ZHANG L, ZHOU D Q, et al. Modeling economic performance of interprovincial CO₂ emission reduction quota trading in China[J]. *Applied Energy*, 2013, 112(Suppl.1): 1518-1528.
- [15] TANG L, WU J Q, YU L, et al. Carbon emissions trading scheme exploration in China: a multi-agent-based model[J]. *Energy Policy*, 2015, 81: 152-169.
- [16] 汤铃, 武佳倩, 戴伟, 等. 碳交易机制对中国经济与环境的影响[J]. *系统工程学报*, 2014, 29(5): 701-712.
TANG Ling, WU Jiaqian, DAI Wei, et al. Impacts of carbon emission trading on China's economy and environment[J]. *Journal of Systems Engineering*, 2014, 29(5): 701-712.
- [17] 张俊荣, 王孜丹, 汤铃, 等. 基于系统动力学的京津冀碳排放交易政策影响研究[J]. *中国管理科学*, 2016, 24(3): 1-8.
ZHANG Junrong, WANG Zidan, TANG Ling, et al. The simulation of carbon emission trading system in Beijing-Tianjin-Hebei region: an analysis based on system dynamics[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2016, 24(3): 1-8.
- [18] 蔡栋梁, 闫懿, 程树磊. 碳排放补贴、碳税对环境质量的影响研究[J]. *中国人口资源与环境*, 2019, 29(11): 59-70.
CAI Dongliang, YAN Yi, CHENG Shulei. Research on the impact of carbon emission subsidies and carbon taxes on environmental quality[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2019, 29(11): 59-70.
- [19] 宋德勇, 朱文博, 王班班. 中国碳交易试点覆盖企业的微观实证: 碳排放权交易、配额分配方法与企业绿色创新[J]. *中国人口资源与环境*, 2021, 31(1): 37-47.
SONG Deyong, ZHU Wenbo, WANG Banban. Micro-empirical evidence based on China's carbon trading companies: carbon emissions trading, quota allocation methods and corporate green innovation[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2021, 31(1): 37-47.
- [20] JI J, ZHANG Z Y, YANG L. Comparisons of initial carbon allowance allocation rules in an O2O retail supply chain with the cap-and-trade regulation[J]. *International Journal of Production Economics*, 2017, 187(2): 68-84.
- [21] FRIEDMAN D. Evolutionary games in economics[J]. *Source: Econometrica*, 1991, 59(3): 637-666.
- [22] 杨晓冬, 张家玉. 既有建筑绿色改造的 PPP 模式研究: 演化博弈视角[J]. *中国软科学*, 2019, 1(3): 183-192.
YANG Xiaodong, ZHANG Jiayu. PPP for existing building green retrofit: perspective of evolutionary game[J]. *China Soft Science*, 2019, 1(3): 183-192.
- [23] 郑月龙. 企业共性技术合作研发形成机制研究: 基于演化博弈视角[M]. 北京: 经济管理出版社, 2017.
- [24] EDVARDSSON B, TRONVOLL B, GRUBER T. Expanding understanding of service exchange and value co-creation: a social construction approach[J]. *Journal of the Academy of Marketing Science*, 2011, 39(2): 327-339.
- [25] VARGO S L, LUSCH R F. Institutions and axioms: an extension and update of service-dominant logic[J]. *Journal of the Academy of Marketing Science*, 2016, 44(1): 5-23.
- [26] BENJAAFAR S, LI Y Z, DASKIN M. Carbon footprint and the management of supply chains: insights from simple models[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2013, 10(1): 99-116.
- [27] YANG L, ZHANG Q, JI J N. Pricing and carbon emission reduction decisions in supply chains with vertical and horizontal cooperation[J]. *International Journal of Production Economics*, 2017, 191(6): 286-297.
- [28] 焦建玲, 陈洁, 李兰兰, 等. 碳减排奖惩机制下地方政府和企业行为演化博弈分析[J]. *中国管理科学*, 2017, 25(10): 140-150.
JIAO Jianling, CHEN Jie, LI Lanlan, et al. A study of local governments' and enterprises' actions in the carbon emission mechanism of subsidy or punishment based on the evolutionary game[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2017, 25(10): 140-150.
- [29] 王玖河, 刘琳, 王勇. 顾客参与价值共创影响因素研究: 基于演化博弈的视角[J]. *数学的实践与认识*, 2018, 48(9): 60-69.
WANG Jiuhe, LIU Lin, WANG Yong. A study on the factors affecting customer's participation in value co-creation: based on evolutionary game[J]. *Journal of Mathematics in Practice and Theory*, 2018, 48(9): 60-69.
- [30] XING J, LU X, WANG S X, et al. The quest for improved air quality may push China to continue its CO₂ reduction beyond the Paris Commitment[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117(47): 29535-29542.
- [31] 郑逸璇, 宋晓晖, 周佳, 等. 减污降碳协同增效的关键路径与政策研究[J]. *中国环境管理*, 2021, 13(5): 45-51.
ZHENG Yixuan, SONG Xiaohui, ZHOU Jia, et al. Synergetic control of environmental pollution and carbon emissions: pathway and policy[J]. *Chinese Journal of Environmental Management*, 2021, 13(5): 45-51.