

# 碳税再循环分配效应演化博弈研究

叶旭, 杨湘浩, 邓思远

(上海工程技术大学 管理学院, 上海 201620)

**摘要:** 促进企业低碳生产和消费者绿色消费,是在社会经济高质量发展条件下实现碳达峰、碳中和目标的充分保障。构建由地方政府、企业和居民多主体构成的碳税再循环系统,结合当前中国国民收入水平和低碳经济发展状况,利用三方演化博弈理论研究多主体策略选择的演化过程,并应用Python程序设计语言对整个演化过程进行数值仿真,探究地方政府不同的补贴策略、产品的收入需求弹性和需求价格弹性等变量对碳税再循环分配效应的影响。研究表明:在低碳补贴和收入补贴策略之间,地方政府实施前者更能够促进居民绿色消费和企业低碳生产,但实施后者有利于改善收入不平等问题,同时产品的收入需求弹性和需求价格弹性差异也会影响地方政府碳税返还政策的效果。

**关键词:** 碳税再循环; 分配效应; 演化博弈

**中图分类号:** F224.32    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1002—980X(2022)2—0155—12

## 一、引言

全球气候变暖引发了一系列环境问题,严重威胁了人类的生存与发展,为此各国政府都致力于制定公平、高效的宏观政策,并出台相应的温室气体减排的各项措施和对策,来减少温室气体的排放。尽管此前中国在降低排放的进程中取得了举世瞩目的成就(田云和陈池波,2019),但要在2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和,依然面临着重大的挑战(卓骏等,2018)。当前,企业生产活动仍然是碳排放的主要来源之一,推动企业减排是实现绿色发展的必然选择(孙丽文等,2020)。企业通过绿色研发投入可以加强低碳技术创新、提高能源效率、降低污染排放,进一步推动企业生产技术绿色转型升级(王珍愚等,2021)。然而,通常以经济利益最大化为目标的企业,发展低碳技术需要投入更多的资金,将明显增加了企业的运营成本,此外,中小型企业往往因为资金约束也难以实现低碳转型(商波等,2021)。低碳产品市场价格通常较高,高价格水平将抑制低碳产品的市场需求(Zheng et al, 2021),并且消费者一般会对新产品的风险存在担忧,新产品市场的不确定性加剧了企业低碳技术采用的经营风险(吴利娟和曹国华,2017)。因此,在绿色转型发展过程中,积极发挥政府的引导作用,对于促进企业选择低碳生产、消费者选择绿色消费具有重要意义。

碳税是针对化石燃料消耗产生的二氧化碳等温室气体排放征收的税,用于减缓碳排放和控制全球气候变暖的趋势,是将污染外部性内部化的有效工具(Wang et al, 2016)。众多学者基于已实施碳税政策的国家现实情况,对碳税减少碳排放的有效性展开研究。Sen和Vollebergh(2018)使用经济合作与发展组织成员国的能源税率数据集,证明了碳税可以减少各国碳排放,对能源消费具有长期的抑制作用。Mardones和Cabello(2019)以智利碳税政策为背景,使用经济优化模型模拟不同税收对多种空气污染物排放的影响,提出进一步扩大碳税适用范围,以增强碳税减排效果。何平林等(2019)基于环境税双重红利理论,实证分析多个经济合作与发展组织成员国实施能源税和交通税对环境和经济的影响,结果表明能源税对二氧化碳具有明显的减排作用。郭正权等(2018)分析了不同情景下能源价格波动对中国能源-环境-经济系统的影响,研究结果表明碳税政策对促进清洁电力发展和抑制化石能源消费、碳排放有明显作用。国内外众多研究表明碳

**收稿日期:** 2021-08-25

**基金项目:** 国家自然科学基金重点国际合作研究项目:“新兴产业全球创新网络形成机制、演进特征及对创新绩效的影响研究”(71810107004);国家重点研发计划项目重点专项“科技成果与数据资源产权交易技术”(2017YFB1401100)课题“科技成果知识产权育成与产权交易服务标准化研究”(2017YFB1401101)

**作者简介:** 叶旭,上海工程技术大学管理学院硕士研究生,研究方向:创新管理、可持续发展;(通讯作者)杨湘浩,上海工程技术大学管理学院副教授,硕士研究生导师,研究方向:知识管理、创新管理、信息管理;邓思远,上海工程技术大学管理学院硕士研究生,研究方向:创新管理、知识管理。

税可以有效降低碳排放,但是不完善的碳税政策也可能对国家经济、社会福利产生负面影响。王书平等(2016)基于碳税政策约束的动态随机一般均衡(DSGE)模型,分析了碳税对技术、能源价格、碳税税率三种外生经济的冲击,在短期内不利于经济发展。Khastar et al(2020)分析碳税对芬兰社会环境结构的影响,芬兰在实施碳税政策期间二氧化碳排放得到有效控制,但人民的社会福利受到了负面影响。Moz-Christofolletti 和 Pereda(2021)关于巴西碳税研究表明,补偿机制在高度复杂的税收制度背景下至关重要,能有效减轻低收入家庭的经济负担。

上述关于碳税的研究表明,碳税对于优化资源配置、降低碳排放强度具有较强的积极作用,但也会对国家经济和社会福利产生消极影响。公平、高效且有利于社会发展的碳税政策是各个致力于降低碳排放国家的共同目标,在我国实现碳排放峰值的关键期,实施和完善碳税制度是实现低碳可持续发展的重要措施。关于如何完善碳税政策,改善碳税累退性问题的研究,主要从政府将碳税返还给居民或企业的补贴策略角度展开论述。Johnson(2007)较早研究了碳税的返还问题,退还的税额可以创造稳定的投资环境,并在长期投资范围内持续激励减排。周艳菊等(2017)使用三阶段Stackelberg博弈模型,比较垄断或竞争的零售市场中,在市场参与者之间转移和再分配碳税对均衡决策和社会福利的积极影响。蔡栋梁等(2019)比较了碳排放补贴、碳税及两者混合政策对环境质量的影响,得出选择较高碳排放补贴率和较低碳税税率的混合政策可以兼顾改善环境质量及实现经济增长。海江涛和李旭(2021)在不同情境下对政府补贴方式、企业有关产品价格和销量的设计策略进行探讨,结果表明政府提供补贴可以激励消费者购买低碳产品。Bourgeois et al(2021)通过比较一次性现金转移和家庭能源改造补贴两种收入补贴方案的成本效益和分配效应,发现两种方案对化解税收的累退性有积极作用。

现有研究深入讨论了碳税政策减排的作用及完善碳税返还对改善碳税累退性问题的意义,但政府如何实施碳税返还政策来促进低碳经济发展与提高社会福利的研究不够全面。本文构建了基于居民、企业、地方政府三类主体构成的碳税再循环系统,结合当前中国国民收入水平和低碳经济发展状况,利用三方演化博弈理论研究三类主体行为策略选择演化过程,主要探究了以下问题:地方政府实施碳税返还政策如何影响不同收入水平居民的消费需求和企业生产技术选择;为充分发挥不同碳税返还政策的优势,怎样结合市场情况协调各种财政补贴的力度。

## 二、碳税再循环系统

我国高度重视全球气候变化问题,明确提出了碳达峰、碳中和的“双碳”目标,为实现这个目标需付出艰苦卓绝的努力,但也将大大促进我国产业结构调整 and 低碳经济发展。目前单一的碳排放交易政策难以实现“双碳”目标,实施多样化的碳税政策将有利于减缓国内生态压力,有利于经济发展方式的转变。然而,碳税立法可能会降低政策实施区域的产业竞争力,阻碍区域经济发展。关于碳税再循环或碳税返还效应,学术界已开展了相关研究,叶莉娜和王晓萌(2019)提议在我国环境保护税体系中引入收入再循环机制,即将来自环境税的全部收入或部分收入再循环到被征收的领域,以缓解税收造成的负面效应;任超和王洪宇(2021)从税收中性原则出发,提出碳税再循环机制的具体构想;Sun et al(2021)研究发现适当的碳税返还机制可以实现碳排放降低和经济增长双红利。本文主要从系统角度探讨碳税再循环效应及对我国低碳经济发展的影响。

在中央政府的宏观指导下,碳税试点地区的地方政府将积极探索多样化的碳税政策,但是不同碳税政策的实施涉及多主体的利益协调。假设在碳税试点地区,地方政府统筹规划碳税政策实施方案,企业通过生产活动提供产品服务,居民通过购买企业生产的产品满足消费需求。本文重点考察碳税对企业生产和居民消费行为的影响,为简化研究,不考虑其他情况。在碳税政策的制定、实施、评价及后续政策的调整过程中,地方政府、企业和居民之间形成了一个多方博弈关系。据此,本文构建由地方政府、企业、居民三类主体构成的碳税再循环系统(图1)。在该系统中,企业可选择采用两种类型生产技术实现生产活动以满足居民物质生活需求,分别是资本投入较高、碳排放较低的低碳技术和资本投入较低、碳排放较高的传统技术,为将产品属性与生产技术属性统一化,传统技术和低碳技术生产的最终产品分别为传统产品和低碳产品;居民可依据消费需求选择购买企业制造的低碳产品或传统产品;地方政府对企业生产活动中碳排放征收碳税,然后通过补贴政策将所得碳税返还给其他主体,以实现碳税再循环。

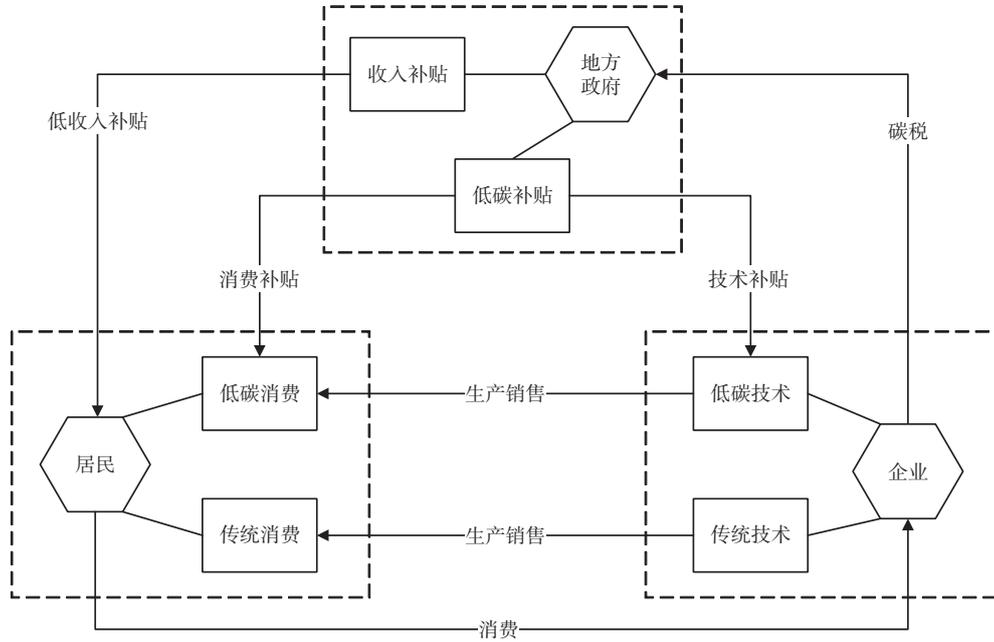


图1 碳税再循环系统

碳税返还的途径包括返还清洁能源部门、返还服务业、返还居民、减免企业所得税、减免居民所得税、减免生产税等多种补贴政策(许士春和张文文,2016),本文中碳税返还分为向低收入居民一次性转移支付的收入补贴、居民消费补贴和企业技术补贴组成的低碳补贴两种类型。在碳税再循环系统中,地方政府可以将企业缴纳的碳税通过收入补贴或低碳补贴的方式实现再循环,收入补贴即将所得碳税一次性转移给低收入居民,提高居民收入水平及增加低收入居民幸福感;低碳补贴即将所得碳税用于补贴居民消费低碳产品和企业应用低碳技术。

### 三、三方演化博弈模型

#### (一)模型假设及相关参数设定

为简化研究,并参考相关研究成果(李春发等,2021;Fan et al,2021;Liu 和 Dong, 2022),在碳税再循环系统中,本文重点考察地方政府、企业和居民三类主体之间的相互博弈,并假定博弈主体均是有限理性且具有学习模仿能力,同时以寻求自身利益或效用最大化为最终目标。地方政府基于地区发展需要选择碳税返还政策,假定其策略集为{收入补贴,低碳补贴};企业结合技术采用的期望收益选择生产技术类型,假定其策略集合为{低碳技术,传统技术};居民依据消费偏好选择消费类型,假定其策略集合为{低碳消费、传统消费}。据此,进一步做出如下假设。

**假设 1:**居民在消费产品  $O$  时,策略集合为{低碳消费、传统消费},选择低碳产品的概率为  $x$ ,选择传统产品的概率为  $(1 - x)$ ;企业在应用生产技术时,策略集合为{低碳技术、传统技术},采用低碳技术的概率为  $y$ ,采用传统技术的概率为  $(1 - y)$ ;地方政府在碳税再分配时,策略集合为{收入补贴、低碳补贴},选择收入补贴的概率为  $z$ ,选择低碳补贴的概率为  $(1 - z)$ ,其中, $0 \leq x, y, z \leq 1$ 。

**假设 2:**地方政府规划财政补贴总额度为  $S$ 。居民数量为  $n$ ,地方政府选择收入补贴时,将财政补贴无差异分配给低收入居民;地方政府选择低碳补贴策略时,将财政补贴中比例  $\eta$  的部分作为居民低碳消费的消费补贴,余下部分作为企业应用低碳技术的技术补贴。地方政府依据企业生产碳排放的危害程度征收单位碳排放税额为  $\tau_0$ ,采用传统技术的企业为碳排放支付碳税  $\tau_t = \tau_0 h_t D_t$ ,其中, $h_t$ 是生产每单位传统产品的碳排放污染量, $D_t$ 是传统产品的需求量;采用低碳技术的企业为碳排放支付碳税  $\tau_g = \tau_0 h_g D_g$ ,其中, $h_g (h_g < h_t)$ 是生产每单位低碳产品的碳排放污染量, $D_g$ 是低碳产品的需求量。

**假设 3:**设定居民收入( $I$ )满足对数正态分布  $K(I) = \frac{1}{I\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2}(\ln I - \mu)^2\right]$ (陈建东等,2017),即

$\ln I \sim N(\mu, \sigma)$ , 其中  $\mu \geq 0, \sigma \geq 0$ , 居民收入分布如图 2 所示, 依据收入水平界限 ( $I_0$ ) 将居民群体划分为低收入居民和高收入居民。不同收入水平的居民对产品  $O$  意愿消费存在差异, 低收入和高收入居民分别将收入中比例为  $\varphi_l$  和  $\varphi_h$  部分用于消费该产品, 其中,  $\varphi_l$  与  $\varphi_h$  的数值关系反映居民对产品消费的收入需求弹性。地方政府收入补贴可以增加低收入居民收入水平, 收入分配公平增加对居民主观幸福感有正向影响(苏钟萍和张应良, 2021), 低收入居民每单位收入增加可提升幸福感  $\delta$ 。

**假设 4:** 企业在进入市场时, 生产技术的采用需要投入相应的资本量  $a$ , 企业采用传统技术的资本要求为  $a_r$ , 采用低碳技术资本要求为  $a_g$ , 即企业需要为应用低碳技术支付额外的研发成本为  $(a_g - a_r)$ 。企业资本投入分布服从帕累托分布  $G(a) = [1 - (a_r/a)^k]$ , 其中,  $k$  为帕累托形状参数(Shapiro 和 Mandelman, 2021), 企业资本投入分布如图 3 所示。地方政府对企业技术补贴, 可以将企业采用低碳技术资本投入从  $a_g$  降低至  $a'_g$ 。

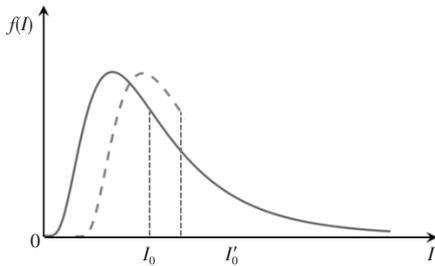


图 2 居民收入分布

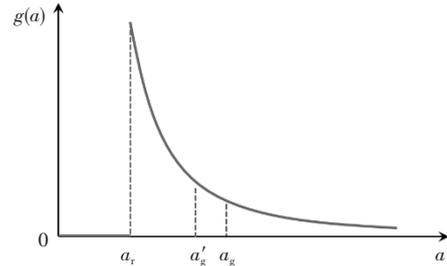


图 3 企业技术采用资本投入分布

**假设 5:** 产品  $O$  的生产成本和市场价格因为生产技术不同存在差异, 低碳产品的生产成本为  $C_g$ , 市场价格为  $P_g$ ; 传统产品的生产成本为  $C_r$ , 市场价格为  $P_r$ 。居民对同属性的产品  $O$  的需求价格弹性为  $\alpha$ 。居民消费策略和企业生产策略存在不平衡现象, 若企业生产的产品符合居民消费需求, 居民消费每单位低碳产品获得效用  $U_g$ , 消费每单位传统产品获得效用  $U_r$ ; 否则, 居民获得效用降低, 非意向消费效用系数为  $\rho$  ( $0 < \rho < 1$ )。

## (二) 博弈收益矩阵

基于前述模型假设, 从地方政府策略选择视角出发, 居民和企业的状态如下。

### 1. 地方政府选择收入补贴返还碳税

地方政府选择收入补贴策略时, 低收入居民的收入水平得到增加, 居民整体消费能力提升。居民收入分布  $K(I) = \frac{1}{I\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2} (\ln I - \mu)^2\right]$ , 地方政府未实施收入补贴时, 低收入居民比例  $T_l = \int_0^{I_0} K(I) dI$ , 低收入居民收入  $I_l = \int_0^{I_0} IK(I) dI$ ; 高收入居民比例  $T_h = 1 - T_l$ , 高收入居民收入  $I_h = \int_{I_0}^{+\infty} IK(I) dI$ , 此时, 居民用于消费产品  $O$  的收入  $I_1 = n(\varphi_l T_l I_l + \varphi_h T_h I_h)$ 。地方政府实施收入补贴时, 低收入居民获得额外收入  $\Delta I = S/(nT_l)$ , 低收入居民比例  $T'_l = \int_0^{I_0 - \Delta I} K(I) dI$ , 低收入居民收入  $I'_l = \int_{\Delta I}^{I_0} K(I - \Delta I) dI$ ; 高收入居民比例  $T'_h = 1 - T'_l$ , 高收入居民收入  $I'_h = \int_{I_0}^{I_0 + \Delta I} K(I - \Delta I) dI + \int_{I_0}^{+\infty} IK(I) dI$ , 此时, 居民用于消费产品  $O$  的收入  $I_2 = n(\varphi_l T'_l I'_l + \varphi_h T'_h I'_h)$ 。

### 2. 地方政府选择低碳补贴返还碳税

地方政府选择低碳补贴时, 低碳产品的购买价格和企业生产技术应用发生变化。地方政府未实施低碳补贴时, 低碳产品价格为  $P_g$ , 企业采用低碳技术的资本投入为  $a_g$ 。地方政府实施低碳补贴时, 消费补贴总额为  $\eta S$ , 低碳产品购买价格为  $P'_g = P_g - (\eta S/D'_g)$ , 其中, 地方政府实施消费补贴后居民对低碳产品需求  $D'_g = \alpha D_g P_g / P'_g$ ; 企业应用低碳技术的资本投入  $a'_g$  满足等式  $\int_{a'_g}^{a_g} G(a) da = (1 - \eta) S$ 。

地方政府收益由财政收支、居民收益、企业利润组成; 企业收益由生产者剩余组成; 居民收益由消费效用、额外收入幸福增加值组成。三方博弈主体的收益矩阵见表 1。

表1 三方博弈主体的收益矩阵

博弈参与者			地方政府		
			收入补贴( $z$ )	低碳补贴( $1-z$ )	
居民	低碳消费( $x$ )	企业	低碳技术 ( $y$ )	$\begin{aligned} & U_g I_2 / P_g + \delta \Delta I, \\ & (P_g - C_g - \tau_0 h_g) I_2 / P_g - a_g, \\ & (U_g + P_g - C_g - \tau_0 h_g) I_2 / P_g - S + \delta \Delta I - a_g \end{aligned}$	$\begin{aligned} & U_g D'_g, \\ & (P_g - C_g - \tau_0 h_g) D'_g - a'_g, \\ & (U_g + P_g - C_g - \tau_0 h_g) D'_g - S - a'_g \end{aligned}$
		传统技术 ( $1-y$ )	$\begin{aligned} & \rho U_r I_2 / P_r + \delta \Delta I, \\ & (P_r - C_r - \tau_0 h_r) I_2 / P_r - a_r, \\ & (\rho U_r + P_r - C_r - \tau_0 h_r) I_2 / P_r - S + \delta \Delta I - a_r \end{aligned}$	$\begin{aligned} & \rho U_r D_r, \\ & (P_r - C_r - \tau_0 h_r) D_r - a_r, \\ & (\rho U_r + P_r - C_r - \tau_0 h_r) D_r - S - a_r \end{aligned}$	
	传统消费( $1-x$ )	企业	低碳技术 ( $y$ )	$\begin{aligned} & \rho U_g I_2 / P_g + \delta \Delta I, \\ & (P_g - C_g - \tau_0 h_g) I_2 / P_g - a_g, \\ & (\rho U_g + P_g - C_g - \tau_0 h_g) I_2 / P_g - S + \delta \Delta I - a_g \end{aligned}$	$\begin{aligned} & \rho U_g D'_g, \\ & (P_g - C_g - \tau_0 h_g) D'_g - a'_g, \\ & (\rho U_g + P_g - C_g - \tau_0 h_g) D'_g - S - a'_g \end{aligned}$
		传统技术 ( $1-y$ )	$\begin{aligned} & U_r I_2 / P_r + \delta \Delta I, \\ & (P_r - C_r - \tau_0 h_r) I_2 / P_r - a_r, \\ & (U_r + P_r - C_r - \tau_0 h_r) I_2 / P_r - S + \delta \Delta I - a_r \end{aligned}$	$\begin{aligned} & U_r D_r, \\ & (P_r - C_r - \tau_0 h_r) D_r - a_r, \\ & (U_r + P_r - C_r - \tau_0 h_r) D_r - S - a_r \end{aligned}$	

## 四、三方演化博弈均衡分析

### (一)复制动态方程

在三方演化博弈中,博弈主体在博弈过程中持续调整策略选择的概率值以达到稳定的混合策略,复制动态过程反映各个博弈主体策略选择的动态调整过程,概率值  $x$ 、 $y$ 、 $z$  关于演化时间  $t$  的微分方程即复制动态方程。居民、企业、地方政府三个博弈主体的复制动态方程构建如下:

居民选择“低碳消费”策略的期望收益为

$$E_{11} = yz(U_g I_2 / P_g + \delta \Delta I) + (1-y)z(\rho U_r I_2 / P_r + \delta \Delta I) + y(1-z)[U_g D'_g] + (1-y)(1-z)(\rho U_r D_r) \quad (1)$$

居民选择“传统消费”策略的期望收益为

$$E_{12} = yz(\rho U_g I_2 / P_g + \delta \Delta I) + (1-y)z(U_r I_2 / P_r + \delta \Delta I) + y(1-z)[\rho U_g D'_g] + (1-y)(1-z)(U_r D_r) \quad (2)$$

居民的平均期望收益为

$$\bar{E}_1 = xE_{11} + (1-x)E_{12} \quad (3)$$

那么居民的复制动态方程为

$$F_1(x) = \frac{dx}{dt} = x(E_{11} - \bar{E}_1) = x(1-x)(E_{11} - E_{12}) = x(1-x)(1-\rho)\{z[yU_g I_2 / P_g - (1-y)U_r I_2 / P_r] + (1-z)[yU_g D'_g - (1-y)U_r D_r]\} \quad (4)$$

企业选择“低碳技术”策略的期望收益为

$$E_{21} = xz[(P_g - C_g - \tau_0 h_g)I_2 / P_g - a_g] + (1-x)z[(P_g - C_g - \tau_0 h_g)I_2 / P_g - a_g] + x(1-z)[(P_g - C_g - \tau_0 h_g)D'_g - a'_g] + (1-x)(1-z)[(P_g - C_g - \tau_0 h_g)D'_g - a'_g] \quad (5)$$

企业选择“传统技术”策略的期望收益为

$$E_{22} = xz[(P_r - C_r - \tau_0 h_r)I_2 / P_r - a_r] + (1-x)z[(P_r - C_r - \tau_0 h_r)I_2 / P_r - a_r] + x(1-z)[(P_r - C_r - \tau_0 h_r)D_r - a_r] + (1-x)(1-z)[(P_r - C_r - \tau_0 h_r)D_r - a_r] \quad (6)$$

企业的平均期望收益为

$$\bar{E}_2 = yE_{21} + (1-y)E_{22} \quad (7)$$

那么企业的复制动态方程为

$$F_2(y) = \frac{dy}{dt} = y(E_{21} - \bar{E}_2) = y(1-y)(E_{21} - E_{22}) = y(1-y)\{(C_r + h_r \tau_0)[zI_2 / P_r + (1-z)D_r] - (C_g + h_g \tau_0)[zI_2 / P_g + (1-z)D'_g] + a_r - za_g - (1-z)a'_g + (1-z)(D'_g P_g - D_r P_r)\} \quad (8)$$

地方政府选择“收入补贴”策略的期望收益为

$$\begin{aligned}
 E_{31} = & xy [(U_g + P_g - C_g - \tau_0 h_g)I_2/P_g - S + \delta\Delta I - a_g] + \\
 & (1-x)y [(\rho U_g + P_g - C_g - \tau_0 h_g)I_2/P_g - S + \delta\Delta I - a_g] + \\
 & x(1-y) [(\rho U_r + P_r - C_r - \tau_0 h_r)I_2/P_r - S + \delta\Delta I - a_r] + \\
 & (1-x)(1-y) [(U_r + P_r - C_r - \tau_0 h_r)I_2/P_r - S + \delta\Delta I - a_r]
 \end{aligned} \tag{9}$$

地方政府选择“低碳补贴”策略的期望收益为

$$\begin{aligned}
 E_{32} = & xy [(U_g + P_g - C_g - \tau_0 h_g)D'_g - S - a'_g] \\
 & (1-x)y [(\rho U_g + P_g - C_g - \tau_0 h_g)D'_g - S - a'_g] + \\
 & x(1-y) [(\rho U_r + P_r - C_r - \tau_0 h_r)D'_r - S - a'_r] + \\
 & (1-x)(1-y) [(U_r + P_r - C_r - \tau_0 h_r)D'_r - S - a'_r]
 \end{aligned} \tag{10}$$

地方政府的平均期望收益为

$$\bar{E}_3 = zE_{31} + (1-z)E_{32} \tag{11}$$

那么地方政府的复制动态方程为

$$\begin{aligned}
 F_3(z) = & \frac{dz}{dt} = z(E_{31} - \bar{E}_3) = z(1-z)(E_{31} - E_{32}) = \\
 & z(1-z) \{ y(I_2/P_g - D'_g)[xU_g + (1-x)\rho U_g - h_g\tau_0 - C_g] + \\
 & (1-y)(I_2/P_r - D'_r)[(1-x)U_r + x\rho U_r - h_r\tau_0 - C_r] + \\
 & I_2 - yD'_g P_g - (1-y)D'_r P_r - y(a_g - a'_g) + \delta\Delta I \}
 \end{aligned} \tag{12}$$

### (二)演化博弈模型的稳定性分析

令上述复制动态方程  $F_1(x) = F_2(y) = F_3(z) = 0$ , 联立得到 8 个纯策略均衡点及 1 个混合策略均衡点如下:  $\zeta_1 = (0, 0, 0)^T$ ,  $\zeta_2 = (1, 0, 0)^T$ ,  $\zeta_3 = (0, 1, 0)^T$ ,  $\zeta_4 = (0, 0, 1)^T$ ,  $\zeta_5 = (0, 1, 1)^T$ ,  $\zeta_6 = (1, 0, 1)^T$ ,  $\zeta_7 = (1, 1, 0)^T$ ,  $\zeta_8 = (1, 1, 1)^T$ ,  $\zeta_9 = (x^*, y^*, z^*)^T$ 。博弈均衡策略的研究 (Ritzberger 和 Weibull, 1995) 建议, 非对称博弈只需讨论纯策略均衡的渐进稳定性, 其他解呈非渐进稳定状态。演化博弈稳定性的研究 (Friedman, 1991) 表明 Jacobian 矩阵的局部稳定性可以用来求解演化博弈均衡点的稳定性, 模型的 Jacobian 矩阵为

$$J = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1(x)}{\partial x} & \frac{\partial F_1(x)}{\partial y} & \frac{\partial F_1(x)}{\partial z} \\ \frac{\partial F_2(y)}{\partial x} & \frac{\partial F_2(y)}{\partial y} & \frac{\partial F_2(y)}{\partial z} \\ \frac{\partial F_3(z)}{\partial x} & \frac{\partial F_3(z)}{\partial y} & \frac{\partial F_3(z)}{\partial z} \end{bmatrix} \tag{13}$$

其中:

$$\begin{aligned}
 J_{11} = & \frac{\partial F_1(x)}{\partial x} = (1-2x)(1-\rho) \{ z[yU_g I_2/P_g - (1-y)U_r I_2/P_r] + (1-z)[yU_g D'_g - (1-y)U_r D'_r] \}; \\
 J_{12} = & \frac{\partial F_1(x)}{\partial y} = x(1-x)(1-\rho) [z(U_g I_2/P_g + U_r I_2/P_r) + (1-z)(U_g D'_g + U_r D'_r)]; \\
 J_{13} = & \frac{\partial F_1(x)}{\partial z} = x(1-x)(1-\rho) \{ [yU_g I_2/P_g - (1-y)U_r I_2/P_r] - [yU_g D'_g - (1-y)U_r D'_r] \}; \\
 J_{21} = & \frac{\partial F_2(y)}{\partial x} = 0; \\
 J_{22} = & \frac{\partial F_2(y)}{\partial y} = (1-2y) \{ (C_r + h_r\tau_0)[zI_2/P_r + (1-z)D'_r] - (C_g + h_g\tau_0)[zI_2/P_g + (1-z)D'_g] + a_r - za_g - \\
 & (1-z)a'_g + (1-z)(D'_g P_g - D'_r P_r) \}; \\
 J_{23} = & \frac{\partial F_2(y)}{\partial z} = y(1-y) \{ (C_r + h_r\tau_0)[I_2/P_r - D'_r] - (C_g + h_g\tau_0)[I_2/P_g - D'_g] - a_g + a'_g - (D'_g P_g - D'_r P_r) \};
 \end{aligned}$$

$$J_{31} = \frac{\partial F_3(z)}{\partial x} = z(1-z) [y(I_2/P_g - D'_g)(U_g - \rho U_g) + (1-y)(I_2/P_r - D_r)(-U_r + -\rho U_r)];$$

$$J_{32} = \frac{\partial F_3(z)}{\partial y} = z(1-z) \{ (I_2/P_g - D'_g)[xU_g + (1-x)\rho U_g - h_g\tau_0 - C_g] - (I_2/P_r - D_r) [ (1-x)U_r + x\rho U_r - h_r\tau_0 - C_r ] - D'_g P_g + D_r P_r - (a_g - a'_g) \};$$

$$J_{33} = \frac{\partial F_3(z)}{\partial z} = (1-2z) \{ y(I_2/P_g - D'_g)[xU_g + (1-x)\rho U_g - h_g\tau_0 - C_g] + (1-y)(I_2/P_r - D_r) [ (1-x)U_r + x\rho U_r - h_r\tau_0 - C_r ] + I_2 - yD'_g P_g - (1-y)D_r P_r - y(a_g - a'_g) + \delta\Delta I \}.$$

基于Lyapunov稳定性定理,均衡点的稳定性可以通过分析Jacobian矩阵的特征值得到:当均衡点特征值λ全为负时,为渐近稳定点;此外,均衡点特征值存在正、负混合的,为不稳定点或鞍点。对均衡点ζ<sub>1</sub>~ζ<sub>8</sub>的特征值分析,见表2。

表2 均衡点的稳定性分析

均衡点	Jacobian特征值		条件	稳定性
	λ	符号		
ζ <sub>1</sub> (0,0,0)	λ <sub>1</sub> = -(1-ρ)U <sub>r</sub> D <sub>r</sub> λ <sub>2</sub> = (C <sub>r</sub> + h <sub>r</sub> τ <sub>0</sub> )D <sub>r</sub> - (C <sub>g</sub> + h <sub>g</sub> τ <sub>0</sub> )D' <sub>g</sub> + a <sub>r</sub> - a' <sub>g</sub> + D' <sub>g</sub> P <sub>g</sub> - D <sub>r</sub> P <sub>r</sub> λ <sub>3</sub> = (I <sub>2</sub> /P <sub>r</sub> - D <sub>r</sub> )[U <sub>r</sub> - h <sub>r</sub> τ <sub>0</sub> - C <sub>r</sub> ] + I <sub>2</sub> - D <sub>r</sub> P <sub>r</sub> + δΔI	(-, ×, +)	\	鞍点
ζ <sub>2</sub> (1,0,0)	λ <sub>1</sub> = (1-ρ)U <sub>r</sub> D <sub>r</sub> λ <sub>2</sub> = (C <sub>r</sub> + h <sub>r</sub> τ <sub>0</sub> )D <sub>r</sub> - (C <sub>g</sub> + h <sub>g</sub> τ <sub>0</sub> )D' <sub>g</sub> + a <sub>r</sub> - a' <sub>g</sub> + D' <sub>g</sub> P <sub>g</sub> - D <sub>r</sub> P <sub>r</sub> λ <sub>3</sub> = (I <sub>2</sub> /P <sub>r</sub> - D <sub>r</sub> )(ρU <sub>r</sub> - h <sub>r</sub> τ <sub>0</sub> - C <sub>r</sub> ) + I <sub>2</sub> - D <sub>r</sub> P <sub>r</sub> + δΔI	(+, ×, ×)	\	非稳定点或鞍点
ζ <sub>3</sub> (0,1,0)	λ <sub>1</sub> = (1-ρ)U <sub>g</sub> D' <sub>g</sub> λ <sub>2</sub> = -(C <sub>r</sub> + h <sub>r</sub> τ <sub>0</sub> )D <sub>r</sub> + (C <sub>g</sub> + h <sub>g</sub> τ <sub>0</sub> )D' <sub>g</sub> - a <sub>r</sub> + a' <sub>g</sub> - D' <sub>g</sub> P <sub>g</sub> + D <sub>r</sub> P <sub>r</sub> λ <sub>3</sub> = (I <sub>2</sub> /P <sub>g</sub> - D' <sub>g</sub> )(ρU <sub>g</sub> - h <sub>g</sub> τ <sub>0</sub> - C <sub>g</sub> ) + I <sub>2</sub> - D' <sub>g</sub> P <sub>g</sub> - a <sub>g</sub> + a' <sub>g</sub> + δΔI	(+, ×, ×)	\	非稳定点或鞍点
ζ <sub>4</sub> (0,0,1)	λ <sub>1</sub> = -(1-ρ)U <sub>r</sub> I <sub>2</sub> /P <sub>r</sub> λ <sub>2</sub> = (C <sub>r</sub> + h <sub>r</sub> τ <sub>0</sub> )I <sub>2</sub> /P <sub>r</sub> - (C <sub>g</sub> + h <sub>g</sub> τ <sub>0</sub> )I <sub>2</sub> /P <sub>g</sub> + a <sub>r</sub> - a <sub>g</sub> λ <sub>3</sub> = -(I <sub>2</sub> /P <sub>r</sub> - D <sub>r</sub> )(U <sub>r</sub> - h <sub>r</sub> τ <sub>0</sub> - C <sub>r</sub> ) - I <sub>2</sub> + D <sub>r</sub> P <sub>r</sub> - δΔI	(-, ×, -)	λ <sub>2</sub> < 0	稳定点
ζ <sub>5</sub> (1,1,0)	λ <sub>1</sub> = -(1-ρ)U <sub>g</sub> D' <sub>g</sub> λ <sub>2</sub> = -(C <sub>r</sub> + h <sub>r</sub> τ <sub>0</sub> )D <sub>r</sub> + (C <sub>g</sub> + h <sub>g</sub> τ <sub>0</sub> )D' <sub>g</sub> - a <sub>r</sub> + a' <sub>g</sub> - D' <sub>g</sub> P <sub>g</sub> + D <sub>r</sub> P <sub>r</sub> λ <sub>3</sub> = (I <sub>2</sub> /P <sub>g</sub> - D' <sub>g</sub> )(U <sub>g</sub> - h <sub>g</sub> τ <sub>0</sub> - C <sub>g</sub> ) + I <sub>2</sub> - D' <sub>g</sub> P <sub>g</sub> - a <sub>g</sub> + a' <sub>g</sub> + δΔI	(-, ×, ×)	λ <sub>2</sub> < 0 λ <sub>3</sub> < 0	稳定点
ζ <sub>6</sub> (1,0,1)	λ <sub>1</sub> = (1-ρ)U <sub>r</sub> I <sub>2</sub> /P <sub>r</sub> λ <sub>2</sub> = (C <sub>r</sub> + h <sub>r</sub> τ <sub>0</sub> )I <sub>2</sub> /P <sub>r</sub> - (C <sub>g</sub> + h <sub>g</sub> τ <sub>0</sub> )I <sub>2</sub> /P <sub>g</sub> + a <sub>r</sub> - a <sub>g</sub> λ <sub>3</sub> = -(I <sub>2</sub> /P <sub>r</sub> - D <sub>r</sub> )(ρU <sub>r</sub> - h <sub>r</sub> τ <sub>0</sub> - C <sub>r</sub> ) - I <sub>2</sub> + D <sub>r</sub> P <sub>r</sub> - δΔI	(+, ×, ×)	\	非稳定点或鞍点
ζ <sub>7</sub> (0,1,1)	λ <sub>1</sub> = (1-ρ)U <sub>g</sub> I <sub>2</sub> /P <sub>g</sub> λ <sub>2</sub> = -(C <sub>r</sub> + h <sub>r</sub> τ <sub>0</sub> )I <sub>2</sub> /P <sub>r</sub> + (C <sub>g</sub> + h <sub>g</sub> τ <sub>0</sub> )I <sub>2</sub> /P <sub>g</sub> - a <sub>r</sub> + a <sub>g</sub> λ <sub>3</sub> = -(I <sub>2</sub> /P <sub>g</sub> - D' <sub>g</sub> )(ρU <sub>g</sub> - h <sub>g</sub> τ <sub>0</sub> - C <sub>g</sub> ) - I <sub>2</sub> + D' <sub>g</sub> P <sub>g</sub> + a <sub>g</sub> - a' <sub>g</sub> - δΔI	(+, ×, ×)	\	非稳定点或鞍点
ζ <sub>8</sub> (1,1,1)	λ <sub>1</sub> = -(1-ρ)U <sub>g</sub> I <sub>2</sub> /P <sub>g</sub> λ <sub>2</sub> = -(C <sub>r</sub> + h <sub>r</sub> τ <sub>0</sub> )I <sub>2</sub> /P <sub>r</sub> + (C <sub>g</sub> + h <sub>g</sub> τ <sub>0</sub> )I <sub>2</sub> /P <sub>g</sub> - a <sub>r</sub> + a <sub>g</sub> λ <sub>3</sub> = -(I <sub>2</sub> /P <sub>g</sub> - D' <sub>g</sub> )(U <sub>g</sub> - h <sub>g</sub> τ <sub>0</sub> - C <sub>g</sub> ) - I <sub>2</sub> + D' <sub>g</sub> P <sub>g</sub> + a <sub>g</sub> - a' <sub>g</sub> - δΔI	(-, ×, ×)	λ <sub>2</sub> < 0 λ <sub>3</sub> < 0	稳定点

注：“Jacobian特征值”-“符号”表示特征值的正负属性,其中,“-”指特征值小于0;“+”指特征值大于0;“×”指特征值正负属性不确定。

由表2关于均衡点的稳定性分析可知,ζ<sub>1</sub>(0,0,0)、ζ<sub>2</sub>(1,0,0)、ζ<sub>3</sub>(0,1,0)、ζ<sub>6</sub>(1,0,1)、ζ<sub>7</sub>(0,1,1)等均衡点特征值存在正值,为非稳定点或鞍点;ζ<sub>4</sub>(0,0,1)、ζ<sub>5</sub>(1,1,0)、ζ<sub>8</sub>(1,1,1)等在相应条件下,所有特征值可同时取负值,为稳定均衡点。

### (三)演化稳定策略分析

在上述地方政府、企业、居民三方复制动态系统中,三个博弈主体行为策略的演化博弈均衡受到主体间策略交互影响,对均衡点的稳定性分析如下:

(1) 当  $\lambda_2 = (C_r + h_r \tau_0)I_2/P_r - (C_g + h_g \tau_0)I_2/P_g + a_r - a_g < 0$  时, 均衡点  $\zeta_4(0, 0, 1)$  为稳定均衡点, 此时, 居民倾向于消费传统产品, 企业采用传统技术生产, 地方政府对低收入居民发放补贴。不等式  $\lambda_2 < 0$  可以转化为  $(C_r + h_r \tau_0)I_2/P_r + a_r < (C_g + h_g \tau_0)I_2/P_g + a_g$ , 不等式两边分别表示企业采用传统技术、低碳技术生产的生产成本和固定资本投入, 该均衡点在企业采用传统技术生产总投入较低时, 满足稳定性条件。地方政府从社会整体利益出发, 当居民消费效用和因收入补贴获得幸福感增加值比企业生产成本高时, 地方政府愿意选择收入补贴策略, 尽管碳税政策未能有效促进低碳转型, 但地方政府所征碳税作为收入补贴发放给低收入居民, 有利于提高居民福利。

(2) 当  $\lambda_2 = -(C_r + h_r \tau_0)D_r + (C_g + h_g \tau_0)D'_g - a_r + a'_g - D'_g P_g + D_r P_r < 0$  和  $\lambda_3 = (I_2/P_g - D'_g)(U_g - h_g \tau_0 - C_g) + I_2 - D'_g P_g - a_g + a'_g + \delta \Delta I < 0$  时, 均衡点  $\zeta_5(1, 1, 0)$  为稳定均衡点, 此时, 居民倾向于消费低碳产品, 企业采用低碳技术生产, 地方政府对居民消费、企业生产分别实施价格补贴、技术补贴。不等式  $\lambda_2 < 0$  可以转化为  $D'_g P_g - [(C_g + h_g \tau_0)D'_g + a'_g] < D_r P_r - [(C_r + h_r \tau_0)D_r + a_r]$ , 此时由于技术补贴、碳税因素影响, 企业采用低碳技术生产所支出总成本相对传统生产较低, 故企业倾向选择低碳技术。不等式  $\lambda_3 < 0$  可以转化为  $(U_g - h_g \tau_0 - C_g)I_2/P_g + I_2 - a_g + \delta \Delta I < (U_1 + h_g \tau_0 - C_g)D'_g + D'_g P_g - a'_g$ , 地方政府对居民发放低收入补贴产生的社会总效益比对企业低碳技术生产、居民低碳消费实施补贴产生的社会总效益较低, 此时地方政府选择低碳补贴有利于促进低碳经济发展。

(3) 当  $\lambda_2 = -(C_r + h_r \tau_0)I_2/P_r + (C_g + h_g \tau_0)I_2/P_g - a_r + a_g < 0$  和  $\lambda_3 = -(I_2/P_g - D'_g)(U_g - h_g \tau_0 - C_g) - I_2 + D'_g P_g + a_g - a'_g - \delta \Delta I < 0$  时, 均衡点  $\zeta_8(1, 1, 1)$  为稳定均衡点, 此时, 居民倾向消费低碳产品, 企业采用低碳技术生产, 地方政府对低收入居民实施收入补贴。不等式  $\lambda_2 < 0$  可以转化为  $(U_g - h_g \tau_0 - C_g)I_2/P_g + I_2 - a_g + \delta \Delta I < (U_1 + h_g \tau_0 - C_g)D'_g + D'_g P_g - a'_g$ , 由于碳税因素影响, 企业选择低碳技术生产总成本相对传统技术更低, 对传统技术征收较高的碳税有效促使企业采用低碳技术生产。不等式  $\lambda_3 < 0$  可以转化为  $(U_g - h_g \tau_0 - C_g)D'_g + D'_g P_g - a'_g < (U_g - h_g \tau_0 - C_g)I_2/P_g + I_2 - a_g + \delta \Delta I$ , 地方政府对居民发放低收入补贴产生的社会总效益比对企业低碳技术生产、居民低碳消费实施补贴产生的社会总效益较高, 此时地方政府选择收入补贴有利于提升社会整体福利。

## 五、数值模拟与仿真分析

为研究构建演化博弈模型的动态演化过程, 进一步分析关键性变量对博弈演化结果的影响, 利用 Python 3.8.5 程序设计语言进行数值模拟。将中国中央人民政府公布的 2020 年全国居民人均可支配收入<sup>①</sup>作为仿真系统的输入数据, 旨在拟合中国多数地区居民收入分布状况, 以万元为数值单位, 得到对数正态分布  $K(I)$  的参数  $\mu = 0.9244, \sigma = 0.6995$ 。企业进入市场资本投入的帕累托分布形状参数参考研究 (Shapiro 和 Mandelman, 2021), 取  $k = 4$ 。依据中国低碳经济发展现状 (师帅等, 2021), 设定初始值  $x_0 = 0.3, y_0 = 0.3, z_0 = 0.5$ 。基于前文关于碳税再循环系统中主体策略选择的理论推导, 对基础变量设定为:  $I_0 = 1.2, n = 1000, S = 50, \eta = 0.5, \varphi_1 = 0.12, \varphi_h = 0.15, a_g = 100, a_r = 40, C_g = 0.3, P_g = 0.7, C_r = 0.15, P_r = 0.4, U_g = 0.35, U_r = 0.2, \alpha = 1.08, \rho = 0.8$ 。在研究变量对主体策略选择演化影响时, 只将目标变量重新赋值, 其他变量均按基础变量设定进行数值模拟。

### (一) 低碳补贴分配比例对主体策略选择演化的影响

地方政府的碳税再分配策略影响企业生产技术采用及居民消费选择, 对地方政府实施收入补贴和低碳补贴策略选择进行数值模拟。为研究地方政府实施收入补贴与低碳补贴两种财政补贴方式, 尤其是低碳补贴中消费补贴与技术补贴比例关系对三方博弈主体的影响, 低碳补贴分配比例系数  $\eta$  取  $\{0.00, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00\}$ , 得到如图 4 所示演化结果。

结合前述演化稳定策略分析, 可知: 当消费补贴水平较低 ( $\eta = 0.00$ ) 时, 居民消费需求由于低碳产品价格原因处于低水平; 当消费补贴水平较高 ( $\eta = 0.75$  和  $\eta = 1.00$ ) 时, 企业应用低碳技术成本较高。在这两种情况下, 如果发展低碳经济, 居民消费效用、企业生产者剩余、地方政府社会总效益均会受到损失, 所以居民

① 2020 年全国居民人均可支配收入: [http://www.gov.cn/guoqing/2021-04/09/content\\_5598662.htm](http://www.gov.cn/guoqing/2021-04/09/content_5598662.htm)。

选择传统消费、企业选择传统技术生产、地方政府选择收入补贴。在  $\eta = 0.25$  和  $\eta = 0.5$  两种情况下,企业采用低碳技术实现生产活动,居民选择低碳消费,地方政府通过低碳补贴将碳税再分配给企业和居民。地方政府实施低碳补贴情况下,消费补贴对居民消费效用有正向影响,如图 4(d)所示,技术补贴对企业生产者剩余有正向影响,如图 4(e)所示。

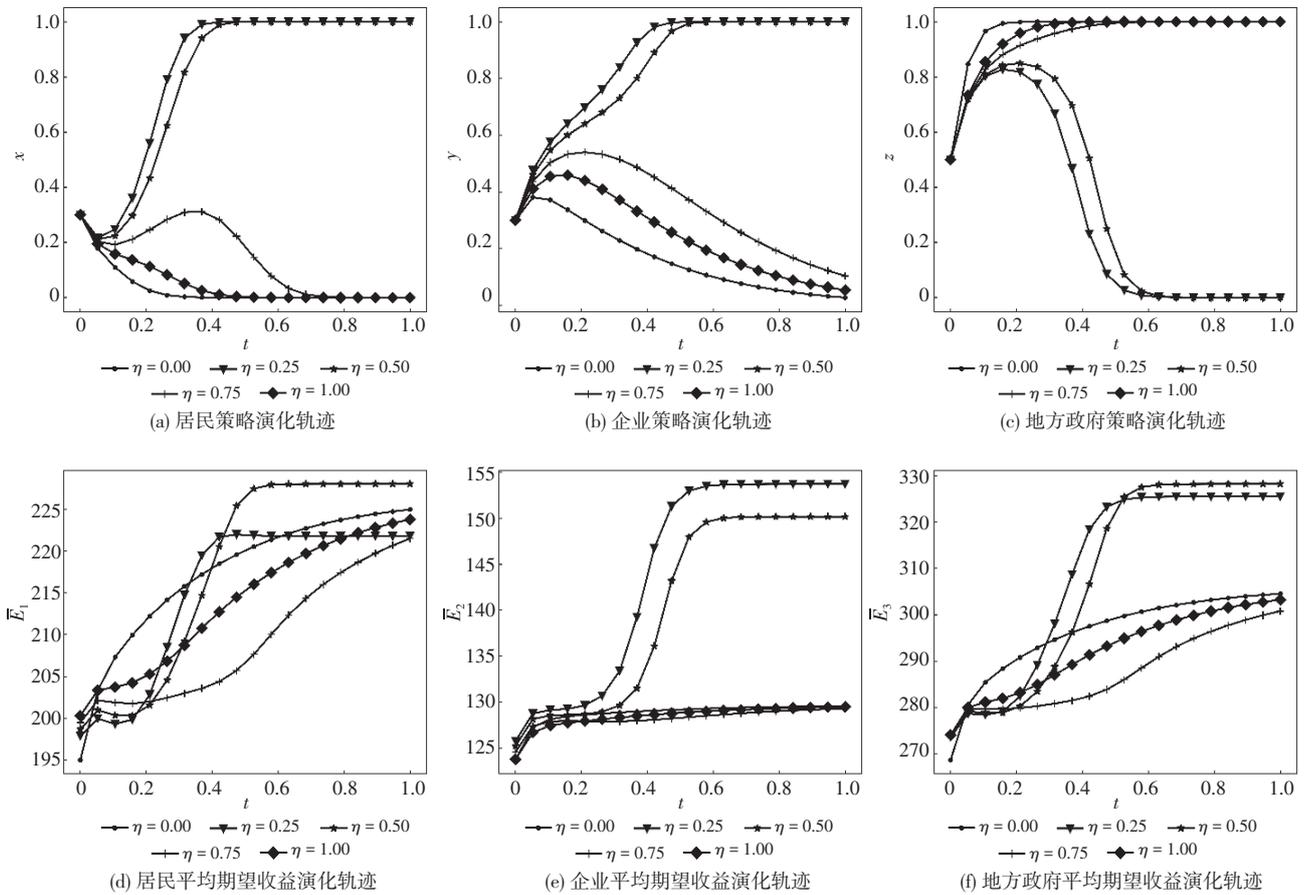


图 4 低碳补贴比例系数的博弈演化结果

## (二)收入需求弹性和需求价格弹性对主体策略选择演化的影响

居民对产品  $O$  的收入需求弹性和需求价格弹性影响居民消费需求。低收入居民和高收入居民用于消费产品  $O$  的收入比例  $\varphi_1$  和  $\varphi_h$  取值集合为  $\{[0.10, 0.15], [0.10, 0.20], [0.15, 0.20], [0.15, 0.10], [0.20, 0.10], [0.20, 0.15], [0.10, 0.10], [0.15, 0.15], [0.20, 0.20]\}$ , 得到如图 5 所示演化结果。居民对产品  $O$  的需求价格弹性  $\alpha$  取值集合为  $\{0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2\}$ , 得到如图 6 所示演化结果。

居民对产品  $O$  的收入需求弹性反映该主体的商品需求量与其收入水平之间的关系, 由图 5 中博弈演化结果知: 当居民对目标产品收入需求弹性大于 1 ( $\varphi_1 = 0.10, \varphi_h = 0.15; \varphi_1 = 0.10, \varphi_h = 0.20; \varphi_1 = 0.15, \varphi_h = 0.20$ ), 即居民因为收入水平增加而需求增加幅度更大时, 地方政府选择低碳补贴提高居民对产品的消费需求的效果最明显; 当居民对目标产品收入需求弹性等于 1 ( $\varphi_1 = 0.15, \varphi_h = 0.15; \varphi_1 = 0.20, \varphi_h = 0.20$ ), 即居民对目标产品需求增长比例等于收入增长比例时, 地方政府选择低碳补贴提高居民对产品的消费需求效果一般; 当居民对目标产品收入需求弹性小于 1 ( $\varphi_1 = 0.20, \varphi_h = 0.10$ ), 即居民对目标产品需求增长比例小于收入增长比例时, 地方政府选择低碳补贴提高居民对产品的消费需求效果较差。

居民对产品  $O$  的需求价格弹性反映该主体对商品价格的敏感程度, 由图 6 中博弈演化结果知: 当居民对目标产品需求价格弹性大于 1 ( $\alpha = 1.1, \alpha = 1.2$ ) 时, 地方政府实施低碳补贴, 其中消费补贴有效降低了低碳产品的购买价格, 对居民的产品消费需求效果提高明显; 当居民对目标产品需求价格弹性小于等于 1 ( $\alpha = 1.0, \alpha = 0.9, \alpha = 0.8$ ) 时, 低碳补贴对居民的产品消费需求促进效果不显著, 收入补贴更有利于整体利益。

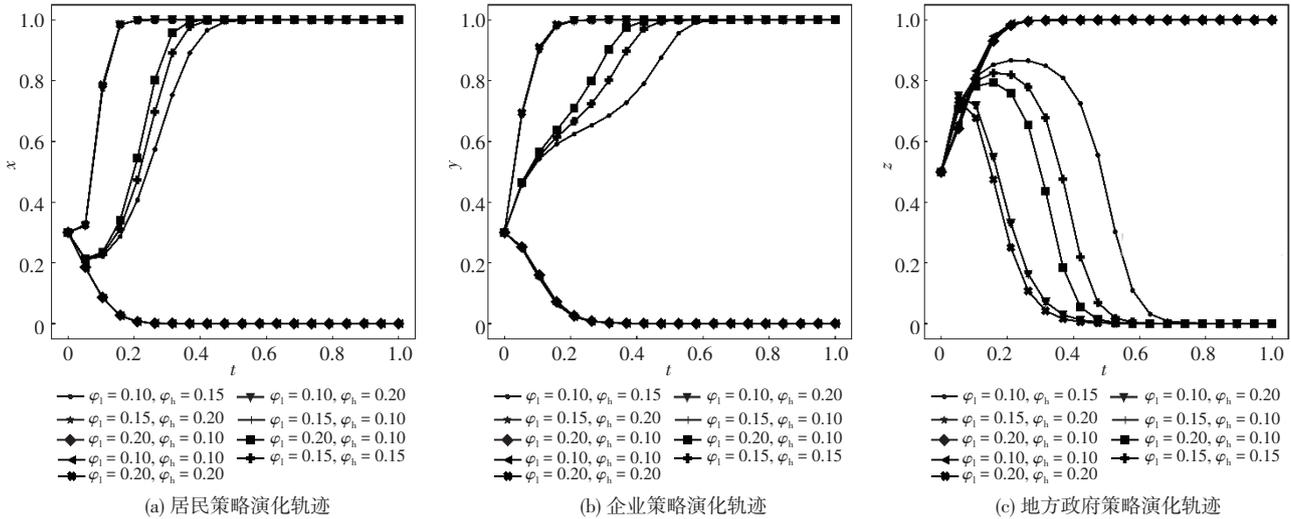


图 5 收入需求弹性的博弈演化结果

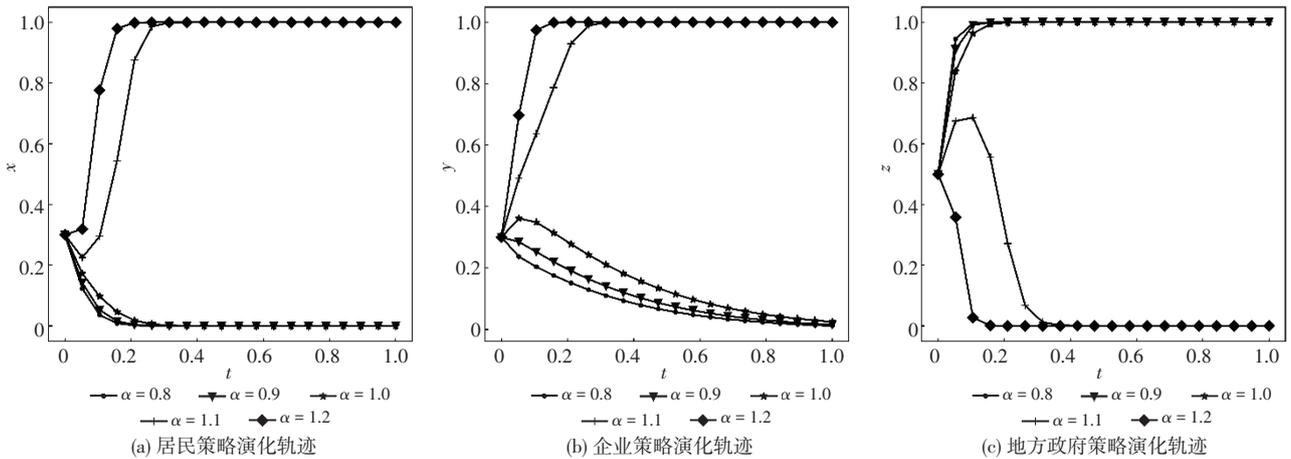


图 6 需求价格弹性的博弈演化结果

## 六、结论与建议

本文阐述了地方政府对企业生产活动碳排放征收碳税,并将碳税再分配给居民或企业的碳税再循环系统。基于演化博弈理论,研究了地方政府、企业和居民的策略选择演化过程,并通过数值模拟与仿真分析发现:①地方政府实施收入补贴有利于改善收入不平等问题,但对低碳经济发展促进效果有限;地方政府实施低碳补贴有助于促进居民绿色消费和企业低碳生产,并且地方政府对居民低碳消费和企业低碳技术应用实施的低碳补贴分配比例会影响该政策的实施效果;②居民消费者对市场中产品的收入需求弹性和需求价格弹性差异会影响地方政府碳税返还政策的实施效果,其中,地方政府低碳补贴对收入需求弹性较大和需求价格弹性较大的商品效果更明显。基于上述结论,提出如下建议:

第一,地方政府依据特定行业低碳技术发展状况选择补贴方式。对于低碳技术尚在发展初期的行业,通过由消费补贴和技术补贴组成的低碳补贴,激励消费者对低碳产品的消费需求,降低企业应用低碳技术的门槛,其中,结合消费者消费需求强度和企企业低碳技术应用门槛高低程度,权衡低碳补贴分配比例。对于低碳技术较成熟的行业,通过对低收入居民转移支付的收入补贴,改善由碳税引起的累退性问题。

第二,地方政府依据消费者对商品的收入需求弹性和需求价格弹性差异调整补贴的比例。对于消费者收入需求弹性较大的商品,提高收入补贴组成比例,使部分低收入水平的居民转化为该商品低碳偏好的消费者,并增强低收入居民幸福感;对于需求价格弹性较大的商品,较高比例的低碳补贴政策更加有利于低碳经

济发展。

第三,地方政府应综合考虑居民消费者和企业利益,完善碳排放相关的法律和制度。规范的法律监督低碳产品认证、企业碳排放、碳税征收、碳税返还,保障碳税再循环系统有序运行。健全企业生产排放披露制度和居民低碳消费法律体系,引导企业塑造绿色企业形象,培养居民低碳消费的责任意识。

本文建立由地方政府、企业、居民三类主体组成的碳税再循环系统,探究在碳税试点实施阶段,地方政府如何基于本地居民消费需求和企业生产能力选择合适的返还政策,以更有利于地区低碳经济发展。研究内容为推进实施碳税政策提供了一定的理论基础,但仍存在一些不足之处:一方面,政策实施需要全面结合地方市场环境特征,本文仅选取了部分重要的特征因素,在未来研究中可以进一步完善;另一方面,由于国内碳税政策尚处于设计规划阶段,适合国情的研究资料十分有限,本文的研究模型仍存在改进空间;此外,本文的博弈问题表述主要围绕本文研究展开的,可能存在一定的局限性,今后需要进一步完善。

### 参考文献

- [ 1 ] 蔡栋梁, 闫懿, 程树磊, 2019. 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, 29(11): 59-70.
- [ 2 ] 陈建东, 程树磊, 蒲明, 2017. 如何准确地拟合居民的收入分布[J]. 北京工商大学学报(社会科学版), 32(2): 10-20.
- [ 3 ] 郭正权, 张兴平, 郑宇花, 2018. 能源价格波动对能源-环境-经济系统的影响研究[J]. 中国管理科学, 26(11): 22-30.
- [ 4 ] 海江涛, 李旭, 2021. 需求不确定情况下绿色产品消费过程中政府的最优补贴[J]. 中国管理科学, 29(5): 180-189.
- [ 5 ] 何平林, 乔雅, 宁静, 等, 2019. 环境税双重红利效应研究——基于 OECD 国家能源和交通税的实证分析[J]. 中国软科学, (4): 33-49.
- [ 6 ] 李春发, 卢娜娜, 李冬冬, 等, 2021. 企业绿色创新: 政府规制、信息披露及投资策略演化[J]. 科学学研究, 39(1): 180-192.
- [ 7 ] 任超, 王洪宇, 2021. 从税收中性原则探究碳税再循环机制的构建[J]. 财会月刊, (4): 155-160.
- [ 8 ] 商波, 杜星宇, 黄涛珍, 2021. 基于市场激励型的环境规制与企业绿色技术创新模式选择[J]. 软科学, 35(5): 78-84, 92.
- [ 9 ] 师帅, 臧发霞, 池佳, 2021. 新时期我国低碳经济发展面临的机遇与挑战[J]. 理论探讨, (2): 115-119.
- [ 10 ] 苏钟萍, 张应良, 2021. 收入水平、社会公平认知与农村居民主观幸福感[J]. 统计与决策, 37(9): 71-74.
- [ 11 ] 孙丽文, 李翼凡, 任相伟, 2020. 产业结构升级、技术创新与碳排放——一个有调节的中介模型[J]. 技术经济, 39(6): 1-9.
- [ 12 ] 田云, 陈池波, 2019. 中国碳减排成效评估、后进地区识别与路径优化[J]. 经济管理, 41(6): 22-37.
- [ 13 ] 王书平, 戚超, 李立委, 2016. 碳税政策、环境质量与经济发展——基于 DSGE 模型的数值模拟研究[J]. 中国管理科学, 24(S1): 938-941.
- [ 14 ] 王珍愚, 曹瑜, 林善浪, 2021. 环境规制对企业绿色技术创新的影响特征与异质性——基于中国上市公司绿色专利数据[J]. 科学学研究, 39(5): 909-919, 929.
- [ 15 ] 吴利娟, 曹国华, 2017. 技术和价格不确定下企业研发投入投资决策研究[J]. 系统工程理论与实践, 37(7): 1720-1726.
- [ 16 ] 许士春, 张文文, 2016. 不同返还情景下碳税对中国经济影响及减排效果——基于动态 CGE 的模拟分析[J]. 中国人口·资源与环境, 26(12): 46-54.
- [ 17 ] 叶莉娜, 王晓萌, 2019. 环境税收入再循环机制: 原理、借鉴与启示[J]. 税务研究, (3): 96-100.
- [ 18 ] 周艳菊, 胡凤英, 周正龙, 等, 2017. 最优碳税税率对供应链结构和社会福利的影响[J]. 系统工程理论与实践, 37(4): 886-900.
- [ 19 ] 卓骏, 刘伟东, 丁文均, 2018. 碳排放约束对我国经济的影响——基于动态 CGE 模型[J]. 技术经济, 37(11): 102-109.
- [ 20 ] BOURGEOIS C, GIRAUDET L G, QUIRION P, 2021. Lump-sum vs. energy-efficiency subsidy recycling of carbon tax revenue in the residential sector: A French assessment[J]. Ecological Economics, 184: 107006.
- [ 21 ] FAN W, WANG S, GU X, et al, 2021. Evolutionary game analysis on industrial pollution control of local government in China[J]. Journal of Environmental Management, 298: 113499.
- [ 22 ] FRIEDMAN D, 1991. Evolutionary Game in Economics[J]. Economy Erica, 59(3): 637-666.
- [ 23 ] JOHNSON K C, 2007. Refunded emission taxes: A resolution to the cap-versus-tax dilemma for greenhouse gas regulation [J]. Energy Policy, 35(5): 3115-3118.
- [ 24 ] KHASTAR M, ASLANI A, NEJATI M, 2020. How does carbon tax affect social welfare and emission reduction in Finland? [J]. Energy Reports, 6: 736-744.
- [ 25 ] LIU Y, DONG F, 2022. What are the roles of consumers, automobile production enterprises, and the government in the process of banning gasoline vehicles? Evidence from a tripartite evolutionary game model[J]. Energy, 238: 122004.
- [ 26 ] MARDONES C, CABELLO M, 2019. Effectiveness of local air pollution and GHG taxes: The case of Chilean industrial

- sources[J]. *Energy Economics*, 83: 491-500.
- [27] MOZ-CHRISTOFOLETTI M A, PEREDA P C, 2021. Winners and losers: The distributional impacts of a carbon tax in Brazil[J]. *Ecological Economics*, 183: 106945.
- [28] RITZBERGER K, WEIBULL J, 1995. Evolutionary selection in normal-form games[J]. *Econometrica*, 63(6): 1371-1399.
- [29] SEN S, VOLLEBERGH H, 2018. The effectiveness of taxing the carbon content of energy consumption [J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 92: 74-99.
- [30] SHAPIRO A F, MANDELMAN F S, 2021. Digital adoption, automation, and labor markets in developing countries [J]. *Journal of Development Economics*, 151: 102656.
- [31] SUN Y Y, MAO X Q, YIN Y A, et al, 2021. Optimizing carbon tax rates and revenue recycling schemes: Model development, and a case study for the Bohai Bay area, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 296: 126519.
- [32] WANG Q, HUBACEK K, FENG K S, et al, 2016. Distributional effects of carbon taxation [J]. *Applied Energy*, 184: 1123-1131.
- [33] ZHENG X M, LI C, FANG X M, et al, 2021. Price sensitivity and consumers' support for renewable energy in China[J]. *Energy*, 222: 119862.

## Research on the Distribution Effect of Carbon Tax Recirculation Based on Evolutionary Game Theory

Ye Xu, Yang Xianghao, Deng Siyuan

(School of Management, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**Abstract:** Promoting low-carbon production of enterprises and green consumption of consumers is a sufficient guarantee to achieve the goal of carbon peak and carbon neutralization under the condition of high-quality social and economic development. A carbon tax recycling system composed of local governments, enterprises, and residents was constructed. Combined with the current level of national income and the development of the low-carbon economy in China, the evolution process of multi-agent strategy selection was studied by tripartite evolutionary game theory, and the whole evolution process was simulated by Python programming language. The influence of local government's different subsidy strategies, product income demand elasticity, and demand price elasticity on the distribution effect of carbon tax recycling were explored. The results show that between low-carbon subsidy and income subsidy strategy, the former can promote residents' green consumption and enterprises' low-carbon production, but the latter can improve income inequality. At the same time, the differences in income demand elasticity and demand price elasticity will also affect the effect of local government carbon tax recycling policy.

**Keywords:** carbon tax recycling; distribution effect; evolutionary game