

# 不同奖惩机制下电商快递使用绿色包装的演化博弈分析

陈卓\*, 蒋君

武汉科技大学理学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2024年2月29日; 录用日期: 2024年3月19日; 发布日期: 2024年4月30日

## 摘要

随着电子商务和快递业的发展, 与之产生的包装垃圾也愈演愈烈, 加快电商快递的绿色包装十分必要。本文应用演化博弈理论研究了政府和电商快递企业在不同奖惩机制下的行为策略。首先, 构建了静态奖惩和三种动态奖惩机制下政府和电商快递企业两方演化博弈模型。其次, 讨论不同奖惩机制下的演化稳定策略。最后, 对各个模型进行数值仿真, 比较结果确定最优的奖惩机制, 并分析关键参数对政府和电商快递企业行为的影响。研究表明, 电商快递企业使用绿色包装概率与补贴上限值成反比, 与惩罚上限值成正比。本研究有利于优化政府的奖惩机制、促进电商快递包装的绿色发展。

## 关键词

电商快递绿色包装, 动态奖惩机制, 演化博弈

# An Evolutionary Game Analysis of Green Packaging Adoption in E-commerce Express Delivery under Varied Incentive and Sanction Mechanisms

Zhuo Chen\*, Jun Jiang

College of Science, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan Hubei

Received: Feb. 29<sup>th</sup>, 2024; accepted: Mar. 19<sup>th</sup>, 2024; published: Apr. 30<sup>th</sup>, 2024

\*通讯作者。

文章引用: 陈卓, 蒋君. 不同奖惩机制下电商快递使用绿色包装的演化博弈分析[J]. 运筹与模糊学, 2024, 14(2): 1406-1423. DOI: 10.12677/orf.2024.142236

## Abstract

With the advent of e-commerce and the burgeoning express delivery industry, the associated increase in packaging waste has become a significant concern, underscoring the urgency for accelerating the adoption of green packaging practices within this sector. This study leverages evolutionary game theory to examine the strategic behaviors of government bodies and e-commerce courier companies in the context of various incentive and penalty structures. Initially, the research constructs an evolutionary game model that encapsulates the interactions between government entities and e-commerce express firms under static as well as three dynamic incentive and disincentive mechanisms. Subsequently, it explores the evolutionary stable strategies emerging from these incentive and penalty frameworks. Through numerical simulations, the study assesses the efficacy of each model, identifies the most effective incentive and penalty mechanism, and elucidates the influence of critical parameters on the strategic choices of both the government and e-commerce courier services. The findings of the study demonstrate that the likelihood of e-commerce courier enterprises adopting green packaging is inversely related to the maximum subsidy threshold and directly correlated with the maximum penalty threshold. This research contributes valuable insights towards refining government incentive and penalty mechanisms, thereby fostering the sustainable development of e-commerce express packaging.

## Keywords

E-Commerce Express Green Packaging, Dynamic Reward and Punishment Mechanism, Evolutionary Game

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

根据艾瑞咨询 2021 年中国电商平台市场交易份额的相关数据, 如图 1 所示, 其中电商快递企业在对商品进行配送中占据主导地位。据国家统计局数据显示, 2022 年全国网上零售额 137,853 亿元, 比上年增长 4.0%。其中, 实物商品网上零售额 119,642 亿元, 增长 6.2%, 占社会消费品零售总额的比重为 27.2% [1]。据国家邮政局数据显示, 2022 年邮政行业寄递业务量累计完成 1391 亿件, 同比增长 2.7%。其中, 快递业务量累计完成 1106 亿件, 同比增长 2.1% [2]。随着电子商务行业的快速发展, 快递包装废弃物也与日俱增, 给环境带来了极大的负担。绿色包装是指包装材料可再生、可循环、容易降解, 从而延长商品的生命周期、保护环境和人类健康[3]。快递企业绿色包装总体上包括绿色包装材料的使用、包装设计的绿色性以及对于包装使用之后的回收等几个方面。其中包装材料使用不合理是造成环境污染的最主要原因, 企业在包装材料的选择上并未可考虑环境效益, 可回收循环使用的包装材料极少, 基本上为一次性消耗品[4]。

政府代表着国家的整体利益, 有责任对相关企业的决策行为进行监督, 需要通过制定相关的法律法规和政策来引导快递包装行业的绿色发展。政府可以实施奖惩政策促进快递包装绿色化, 以减少快递包装垃圾的治理成本。因而政府在快递绿色包装中扮演着引导者和监管者, 电商企业和电商快递企业是快递包装的直接使用者。

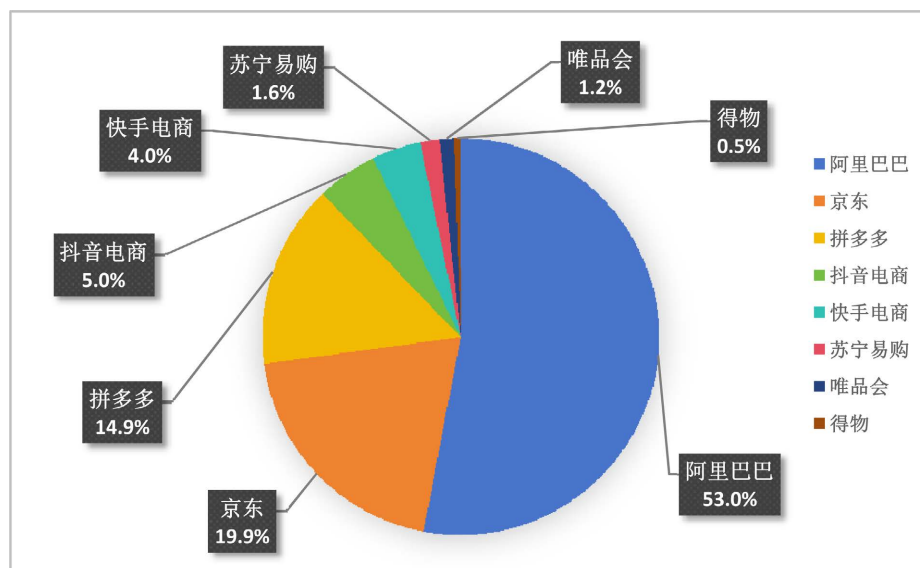


Figure 1. Market transaction share of e-commerce platforms in China, 2021

图 1. 2021 年中国电商平台市场交易份额

在碳达峰、碳中和的背景下，对于绿色包装的研究也越来越受到学界的重视。于光[5]分析了绿色包装的概念以及对物流企业发展的意义；缪亮[6]着重探究了循环经济视角下绿色包装的重要性；李刚[7]等提出了绿色包装应该遵循“3R 和 1D 原则”。另外，一些学者用演化博弈研究了快递企业包装中各方的策略选择。成灶平[8]等人分别研究政府静态补贴惩罚与动态补贴惩罚监管下的快递包装回收的演化博弈分析；张爽[9]等人研究了政府、企业和消费者三方的包装垃圾源头减量治理的演化博弈分析；苗秀杰[10]等人建立政府和快递包装供应商之间的演化博弈模型。

综上所述，国内外学者基于不同理论和模型围绕政府奖惩对快递绿色包装影响进行了广泛研究，大多围绕快递绿色包装的生产和回收阶段进行研究，具有一定的启发性和借鉴意义。本文对于快递绿色包装材料的推广和使用性不足的问题，围绕使用阶段展开深入探讨。本文旨在将快递包装材料的使用阶段作为切入点，研究电商快递绿色包装关于政府、电商快递企业的演化博弈分析，从政府和企业等主体角度提出相应的措施，减少快递垃圾的排放量，从而实现快递包装的绿色发展。本文的结构和框架安排如下：第一节，构建静态奖惩机制下政府和电商快递企业的演化博弈模型，研究该模型下的演化稳定策略分析；第二节，分别建立三种动态奖惩机制下政府和电商快递企业的演化博弈模型，并进行演化稳定策略分析；第三节，利用数值仿真比较不同奖惩机制下系统的演化结果，研究关键参数对政府和企业的行为影响；第四节，得出相关结论并提出展望。

## 2. 静态奖惩机制的演化博弈模型

### 2.1. 模型描述与假设

政府作为资源配置者，以环境效益、社会效益、经济效益等综合效益为最大化。企业追求的是其自身的社会效益和经济效益，对环境效益关注较少。企业作为快递绿色包装的直接使用者，为了追求自身利益的最大化，往往不会主动选择使用可降解的绿色包装材料。如果政府能够针对核心企业制定有效的激励约束政策，将提高企业实施快递包装绿色化的积极性。为此，构建电商快递使用绿色包装的演化博弈模型，作出进一步假设：

**假设 1:** 电商快递使用绿色包装主要涉及两个博弈主体：政府和快递企业，两者都是有限理性主体，

会受到随机性、信息不对称等因素的影响。

**假设 2:** 政府有选择“监管”和“不监管”两种策略, 比例分别为  $x$  和  $1-x$ ,  $x \in [0,1]$ 。同时, 快递企业选择使用“绿色包装”和“传统包装”两种策略的比例分别为  $y$  和  $1-y$ ,  $y \in [0,1]$ 。政府通过制定相关的法律法规和奖惩机制来引导和监督快递业包装的绿色化使用。

**假设 3:** 当政府选择“监管”策略时需要投入监管成本用  $C_1$  表示; 对于使用绿色包装的快递企业, 监管部门会给予直接补贴或优惠政策支持, 获得的奖励用  $B$  表示; 对于使用传统包装的快递企业, 则会受到监管部门的处罚, 比如罚款、暂停营业等, 用  $F$  表示。快递企业使用绿色包装时, 政府获得的综合效益用  $R_1$  表示; 快递企业使用传统包装时, 政府需要支付一定的治理成本, 用  $C_2$  表示。

**假设 4:** 快递企业选择使用“传统包装”的成本用  $C_3$  表示; 快递企业选择使用“绿色包装”的成本用  $C_4$  表示; 由于快递企业对电商产品进行绿色包装时对于包装的技术、设备以及人才有更高的要求, 因而快递绿色包装的成本高于传统包装的成本, 故假设  $C_4 > C_3$ 。快递企业为电商企业提供的包装服务所获得的基本收益用  $R_2$  表示; 若快递企业选择使用“绿色包装”获得的收益用  $R_3$  表示, 快递企业使用“绿色包装”获得的收益应大于使用“传统包装”的收益, 故假设  $R_3 > R_2$ 。

**假设 5:** 所有的参数都为正数, 模型参数及其符号如表 1 所示。

**Table 1.** Relevant parameter assumptions

**表 1.** 相关参数假定

博弈主体	参数	含义
政府	$C_1$	政府监管时投入的成本
	$R_1$	快递企业使用绿色包装, 政府获得的综合效益
	$F$	政府对未使用绿色包装的快递企业进行的处罚
	$B$	政府对使用绿色包装的快递企业给予的补贴
	$C_2$	快递企业进行传统包装造成环境污染, 政府需支付治理成本
快递企业	$C_3$	快递企业使用传统包装投入的成本
	$C_4$	快递企业使用绿色包装投入的成本( $C_4 > C_3$ )
	$R_2$	快递企业使用传统包装获得的收益
	$R_3$	快递企业使用绿色包装获得的收益( $R_3 > R_2$ )

根据上述对参与主体的描述和假设, 可以得到政府与快递企业战略选择博弈的收益矩阵, 如表 2 所示。

**Table 2.** Evolutionary game benefit matrix for e-commerce express use of green packaging

**表 2.** 电商快递使用绿色包装的演化博弈收益矩阵

政府	电商快递企业	
	使用 ( $y$ )	不使用 ( $1-y$ )
监管 ( $x$ )	$R_1 - C_1 - B$	$F - C_1 - C_2$
	$R_3 - C_4 + B$	$R_2 - C_3 - F$
不监管 ( $1-x$ )	$R_1$	$-C_2$
	$R_3 - C_4$	$R_2 - C_3$

## 2.2. 静态补贴静态惩罚模型建立

政府选择“监管”策略的期望收益:

$$U_{11} = y(R_1 - C_1 - B) + (1 - y)(F - C_1 - C_2)$$

政府选择“不监管”策略的期望收益:

$$U_{12} = yR_1 + (1 - y)(-C_2)$$

政府的平均期望收益:

$$\bar{U}_1 = xU_{11} + (1 - x)U_{12}$$

快递企业选择“使用”绿色包装策略的期望收益:

$$U_{21} = x(R_3 - C_4 + B) + (1 - x)(R_3 - C_4)$$

快递企业选择“不使用”绿色包装策略的期望收益:

$$U_{22} = x(R_2 - C_3 - F) + (1 - x)(R_2 - C_3)$$

快递企业的平均期望收益:

$$\bar{U}_2 = yU_{21} + (1 - y)U_{22}$$

综上所述, 得到政府、快递企业的复制动力系统(I)为:

$$\begin{cases} G(x) = \frac{dx}{dt} = x(1-x)(F - C_1 - yB - yF) \\ H(y) = \frac{dy}{dt} = y(1-y)(C_4 - C_3 + R_2 - R_3 + xB + xF) \end{cases}$$

## 2.3. SD 演化博弈模型

根据 2.2 所建立的博弈模型, 本文结合系统动力学软件 VensimPLE 建立了政府和电商快递企业演化博弈的 SD 模型, 如图 2 所示。该 SD 模型由四个流量变量、两个流速变量、八个中间变量和八个外部变量组成。用四个流量变量表示政府选择监管或不监管策略的概率、快递企业选择使用绿色包装策略或不选择绿色包装策略的概率, 用两个流速变量描述政府使用监管策略的概率和快递企业使用采用绿色包装策略的概率变化。

## 2.4. 静态奖惩下演化稳定策略分析

令静态奖惩下的系统  $G(x) = 0$ ,  $H(y) = 0$ , 得到系统各局部均衡点为  $(0, 0)$ ,  $(0, 1)$ ,  $(1, 0)$ ,  $(1, 1)$ ,  $(x^*, y^*)$ , 其中  $x^* = \frac{C_3 - C_4 + R_3 - R_2}{B + F} \in [0, 1]$ ,  $y^* = \frac{F - C_1}{B + F} \in [0, 1]$ 。根据 Friedman 的研究方法[11], 对系统 Jacobian 矩阵的局部稳定性进行如下分析。如果  $\text{Det}(J) > 0$  且  $\text{Tr}(J) < 0$  时, 系统将达到局部稳定。首先, 对系统(I)中的  $G(x)$ 、 $H(y)$  依次求关于  $x, y$  的偏导数, 可得该系统的 Jacobian 矩阵:

$$J = \begin{bmatrix} (1-2x)(F - C_1 - yB - yF) & -x(1-x)(B + F) \\ y(1-y)(B + F) & (1-2y)(C_4 - C_3 + R_2 - R_3 + xB + xF) \end{bmatrix}$$

求得前四个均衡点的  $\text{Det}(J)$  都为负数, 则前四个均衡点均为鞍点, 即系统(I)在  $(0, 0)$ ,  $(0, 1)$ ,  $(1, 0)$ ,  $(1, 1)$  处不具有稳定性。下面讨论中心点  $(x^*, y^*)$  的稳定性,  $(x^*, y^*)$  的 Jacobian 矩阵  $J^*$  为:

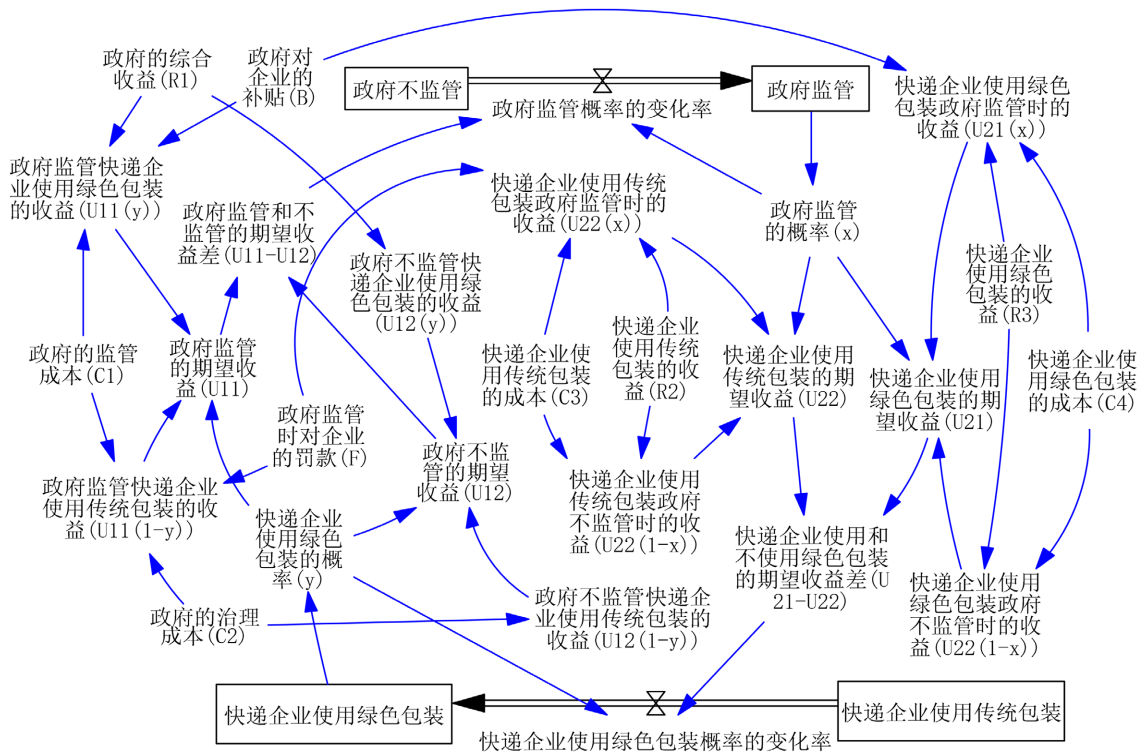


Figure 2. SD model of the evolutionary game between the government and courier firms

图 2. 政府和快递企业演化博弈的 SD 模型

$$J^* = \begin{bmatrix} 0 & \frac{(R_3 - R_2 + C_3 - C_4)(B + F + R_3 - R_2 + C_3 - C_4)}{B + F} \\ \frac{(F - C_1)(C_1 + B)}{B + F} & 0 \end{bmatrix}$$

可知  $J^*$  的特征根是两个纯虚根。根据 Taylor 和 Jonker [12] 的研究,  $(x^*, y^*)$  是系统的稳定平衡点, 但不是渐近稳定点。系统只具有稳定极限环, 没有演化稳定策略, 系统(I)各均衡点的稳定性分析如表 3 所示。政府和快递企业组成的系统的演化轨迹是一个围绕点  $(x^*, y^*)$  周期性运动的闭环曲线, 该点接近均衡点  $(x^*, y^*)$ , 但无法在此点稳定。

Table 3. Stability analysis of the equilibrium points of system (I)

表 3. 系统(I)各均衡点的稳定性分析

均衡点	Det( $J$ )	Tr( $J$ )	结果
(0,0)	-	$N$	鞍点
(0,1)	-	$N$	鞍点
(1,0)	-	$N$	鞍点
(1,1)	-	$N$	鞍点
$(x^*, y^*)$	+	0	中心点

### 3. 动态补贴惩罚监管下的演化博弈分析

政府对电商快递企业的奖惩力度, 不仅会影响到自身的策略, 还会在一定程度上决定电商快递企业的行为选择。在上述模型中, 政府对电商快递企业的奖励和惩罚的设置都为常量, 本节分别研究政府对电商快递企业实施动态监管下的三种情况。

#### 3.1. 动态补贴静态惩罚的演化博弈分析

##### 3.1.1. 动态补贴静态惩罚的演化博弈模型

为进一步提高政府在电商快递绿色包装方面措施的有效性和合理性, 假设政府对电商快递企业的补贴政策与电商快递企业的行为有关[13][14][15]。用  $B(y)$  替换原模型中的固定值  $B$ , 即  $B(y) = B(1-y)$ ,  $B$  为补贴上限值。这一表达式旨在说明若电商快递企业使用绿色包装的概率较低时, 政府为了引导和激励企业使用绿色包装, 政府会加大补贴力度。反之, 若电商快递企业使用绿色包装的概率较高时, 政府的补贴力度会适当降低。惩罚值仍然为  $F$ 。则此时政府、电商快递企业的复制动态方程为:

$$\begin{cases} G(x) = \frac{dx}{dt} = x(1-x)(F - C_1 - yB(y) - yF) \\ H(y) = \frac{dy}{dt} = y(1-y)(R_3 - R_2 + C_3 - C_4 + xB(y) + xF) \end{cases}$$

令方程组  $G(x) = 0$ ,  $H(y) = 0$ , 系统存在  $(0,0)$ 、 $(0,1)$ 、 $(1,0)$ 、 $(1,1)$  四个均衡点。当  $0 \leq \frac{C_4 - C_3 + R_2 - R_3}{B(y_1^*) + F} \leq 1$ ,  $0 \leq \frac{F - C_1}{B(y_1^*) + F} \leq 1$  时, 系统的另一均衡点为  $x_1^* = \frac{C_4 - C_3 + R_2 - R_3}{B(y_1^*) + F}$ ,  $y_1^* = \frac{F - C_1}{B(y_1^*) + F}$ 。

此时的 Jacobian 矩阵  $J_1$  为:

$$J_1 = \begin{bmatrix} (1-2x)[F - C_1 - yB(y) - yF] & x(1-x)[-B(y) - yB'(y) - F] \\ y(1-y)[B(y) + F] & (1-2y)[R_3 - R_2 + C_3 - C_4 + xB(y) + xF] + y(1-y)xB'(y) \end{bmatrix}$$

同理可得到  $(0,0)$ 、 $(0,1)$ 、 $(1,0)$ 、 $(1,1)$  四个均衡点的  $\text{Det}(J_1)$  都为负数, 则各个均衡点均为鞍点。将  $x_1^* = \frac{C_4 - C_3 + R_2 - R_3}{B(y_1^*) + F}$ ,  $y_1^* = \frac{F - C_1}{B(y_1^*) + F}$  代入 Jacobian 矩阵  $J_1$ , 得到  $J_1^*$ :

$$J_1^* = \begin{bmatrix} 0 & \frac{C_4 - C_3 + R_2 - R_3}{B(y_1^*) + F} \left[ 1 - \frac{C_4 - C_3 + R_2 - R_3}{B(y_1^*) + F} \right] \left[ -B(y_1^*) + \frac{(F - C_1)B}{B(y_1^*) + F} - F \right] \\ \frac{(F - C_1)[B(y_1^*) + C_1]}{B(y_1^*) + F} & \frac{B(C_1 - F)[B(y_1^*) + C_1](C_4 - C_3 + R_2 - R_3)}{[B(y_1^*) + F]^3} \end{bmatrix}$$

可知  $J_1^*$  的特征根是两个有负实部的特征复根, 此时系统具有渐进稳定性, 说明政府和电商快递企业之间存在演化稳定策略  $(x_1^*, y_1^*)$  是演化稳定点[16], 演化路径是一条趋向于稳定点的螺旋曲线。

##### 3.1.2. 动态补贴静态惩罚演化稳定策略分析

由  $x_1^* = \frac{C_4 - C_3 + R_2 - R_3}{B(y_1^*) + F}$ ,  $y_1^* = \frac{F - C_1}{B(y_1^*) + F}$ , 解得:

$$\begin{cases} x_1^* = \frac{2(C_4 - C_3 + R_2 - R_3)}{B + F + \sqrt{(B + F)^2 - 4B(F - C_1)}} \\ y_1^* = \frac{B + F - \sqrt{(B + F)^2 - 4B(F - C_1)}}{2B} \end{cases}$$

对  $x_1^*$ ,  $y_1^*$  各自的参数求偏导数得:

$$(1) \frac{\partial x_1^*}{\partial F} < 0, \frac{\partial x_1^*}{\partial B} < 0, \frac{\partial x_1^*}{\partial C_1} < 0, \frac{\partial x_1^*}{\partial C_4} > 0, \frac{\partial x_1^*}{\partial C_3} < 0, \frac{\partial x_1^*}{\partial R_2} > 0, \frac{\partial x_1^*}{\partial R_3} < 0$$

$$(2) \frac{\partial y_1^*}{\partial F} > 0, \frac{\partial y_1^*}{\partial B} < 0, \frac{\partial y_1^*}{\partial C_1} < 0$$

由上述(1)和(2)可知, 政府的惩罚力度  $F$ 、补贴最大力度  $B$  和监管成本  $C_1$  同时影响政府和快递企业的决策行为。当  $F$  增大时, 则  $x_1^*$  减小,  $y_1^*$  增大, 表示惩罚力度越大, 则会促使更多的快递企业选择使用绿色包装, 那么快递企业使用绿色包装的概率就会上升, 从而政府对企业的监管概率就会降低。当  $B$  增大时, 则  $x_1^*$  减小,  $y_1^*$  减小, 表示政府补贴的最大力度越高, 则政府的财政支出就越大, 那么政府采取引导和激励企业使用绿色包装的概率就会降低; 而快递企业使用绿色包装的概率会随着补贴力度的增大而降低。当  $C_1$  增大时, 则  $x_1^*$  减小,  $y_1^*$  减小, 表示政府投入的监管成本越多, 其实施监管策略的概率就越低, 那么快递企业使用绿色包装的概率就越低。与此同时, 当  $C_4$  增大时, 则  $x_1^*$  增大; 当  $R_3$  减小时, 则  $x_1^*$  增加。这表示随着快递企业使用绿色包装成本的增加和相应收益的减少, 快递企业为了自身利益的最大化, 不会主动选择使用绿色包装, 此时就需要政府发挥其自身的监督职责, 引导快递企业包装的绿色发展。当  $C_3$  减小时, 则  $x_1^*$  增加; 当  $R_2$  增大时, 则  $x_1^*$  增加。这表示随着快递企业使用传统包装成本的减小和相应收益的增加, 快递企业使用传统包装会使自己的利益增加, 所以快递企业选择使用传统包装的概率会增加, 那么政府为了改善由于企业使用传统包装所带来的环境问题, 政府监管的概率会相应的增加。

### 3.2. 动态惩罚静态补贴建模与分析

#### 3.2.1. 动态惩罚静态补贴演化博弈模型

假设政府对电商快递企业的惩罚政策与电商快递企业的行为有关。将政府对未使用绿色包装的电商快递企业处以的惩罚, 用  $F(y)$  替换原模型中的固定值  $F$ , 即  $F(y) = F(1 - y)$ ,  $F$  为惩罚上限值, 表示政府的惩罚力度与电商快递企业使用绿色包装的概率成反比。若电商快递企业使用绿色包装的概率较低时, 政府会加大惩罚力度[17][18][19]。反之, 政府会适当降低惩罚力度适当降低, 补贴仍然为  $B$ 。则此时政府、电商快递企业的复制动态方程为:

$$\begin{cases} G(x) = \frac{dx}{dt} = x(1-x)[F(y) - C_1 - yB - yF(y)] \\ H(y) = \frac{dy}{dt} = y(1-y)[R_3 - R_2 + C_3 - C_4 + xB + xF(y)] \end{cases}$$

令方程组  $G(x) = 0$ ,  $H(y) = 0$ 。系统存在  $(0,0)$ 、 $(0,1)$ 、 $(1,0)$ 、 $(1,1)$  四个均衡点。当  $0 \leq \frac{C_4 - C_3 + R_2 - R_3}{B + F(y_2^*)} \leq 1$ ,  $0 \leq \frac{F(y_2^*) - C_1}{B + F(y_2^*)} \leq 1$  时, 有  $x_2^* = \frac{C_4 - C_3 + R_2 - R_3}{B + F(y_2^*)}$ ,  $y_2^* = \frac{F(y_2^*) - C_1}{B + F(y_2^*)}$ 。Jacobian 矩阵  $J_2$  为:



$$J_2 = \begin{bmatrix} (1-2x)[F(y)-C_1-yB-yF(y)] & x(1-x)[-B-F(y)-yF'(y)+F'(y)] \\ y(1-y)[B+F(y)] & (1-2y)[R_3-R_2+C_3-C_4+xB+xF(y)]+y(1-y)xF'(y) \end{bmatrix}$$

同理可得(0,0)、(0,1)、(1,0)、(1,1)四个均衡点的  $\text{Det}(J_2)$  都为负数, 则各个均衡点均为鞍点。点

$$x_2^* = \frac{C_4-C_3+R_2-R_3}{B+F(y_2^*)}, \quad y_2^* = \frac{F(y_2^*)-C_1}{B+F(y_2^*)}$$

的 Jacobian 矩阵  $J_2^*$ :

$$J_2^* = \begin{bmatrix} 0 & \frac{C_4-C_3+R_2-R_3}{B+F(y_2^*)} \left[ 1 - \frac{C_4-C_3+R_2-R_3}{B+F(y_2^*)} \right] \left[ -B-F(y_2^*) + \frac{(F(y_2^*)-C_1)F}{B+F(y_2^*)} - F \right] \\ \frac{(F(y_2^*)-C_1)(B+C_1)}{B+F(y_2^*)} & \frac{F(C_1-F(y_2^*))(B+C_1)(C_4-C_3+R_2-R_3)}{[B+F(y_2^*)]^3} \end{bmatrix}$$

可知  $J_2^*$  的特征根是两个有负实部的特征复根, 此时系统具有渐进稳定性, 说明政府和电商快递企业之间存在演化稳定策略  $(x_2^*, y_2^*)$ , 演化路径是一条趋向于稳定点  $(x_2^*, y_2^*)$  的螺旋曲线。

### 3.2.2. 静态补贴动态惩罚演化稳定策略分析

$$\text{由 } x_2^* = \frac{C_4-C_3+R_2-R_3}{B+F(y_2^*)}, \quad y_2^* = \frac{F(y_2^*)-C_1}{B+F(y_2^*)}, \text{ 解得:}$$

$$\begin{cases} x_2^* = \frac{2(C_4-C_3+R_2-R_3)}{B+\sqrt{B^2+4F(B+C_1)}} \\ y_2^* = \frac{2F+B-\sqrt{B^2+4F(B+C_1)}}{2F} \end{cases}$$

对  $x_2^*, y_2^*$  各自的参数求偏导数:

$$(3) \quad \frac{\partial x_2^*}{\partial F} < 0, \quad \frac{\partial x_2^*}{\partial B} < 0, \quad \frac{\partial x_2^*}{\partial C_1} < 0, \quad \frac{\partial x_2^*}{\partial C_4} > 0, \quad \frac{\partial x_2^*}{\partial C_3} < 0, \quad \frac{\partial x_2^*}{\partial R_2} > 0, \quad \frac{\partial x_2^*}{\partial R_3} < 0$$

$$(4) \quad \frac{\partial y_2^*}{\partial F} > 0, \quad \frac{\partial y_2^*}{\partial B} < 0, \quad \frac{\partial y_2^*}{\partial C_1} < 0$$

由上述(3)和(4)可知, 政府的惩罚最大力度  $F$ 、补贴  $M$  和监管成本  $C_1$  同时影响政府和快递企业的决策行为。(3)表示政府对快递企业的监管概率与其最大惩罚力度、补贴、监管成本、快递企业使用传统包装的成本、使用绿色包装获得的收益都成反比, 与快递企业使用绿色包装的成本和使用传统包装获得的收益成正比。(4)表示快递企业使用绿色包装的概率与政府的补贴、监管成本均成反比, 与政府的最大惩罚力度成正比。

### 3.3. 动态补贴动态惩罚建模与分析

#### 3.3.1. 动态补贴动态惩罚演化博弈模型

假设政府对快递企业的奖惩措施与快递企业使用绿色包装的概率有关。将政府给使用绿色包装的快递企业给予的补贴, 用  $B(y)$  替换原模型中的固定值  $B$ , 即  $B(y) = B(1-y)$ ,  $B$  为补贴上限值。将政府对未使用绿色包装的快递企业处以的罚款, 用  $F(y)$  替换原模型中的固定值  $F$ , 即  $F(y) = F(1-y)$ ,  $F$  为惩罚上限值, 则此时政府、快递企业的复制动态方程为:

$$\begin{cases} G(x) = \frac{dx}{dt} = x(1-x)[F(y) - C_1 - yB(y) - yF(y)] \\ H(y) = \frac{dy}{dt} = y(1-y)[R_3 - R_2 + C_3 - C_4 + xB(y) + xF(y)] \end{cases}$$

令方程组  $G(x)=0$ ,  $H(y)=0$ 。系统存在  $(0,0)$ 、 $(0,1)$ 、 $(1,0)$ 、 $(1,1)$  四个均衡点。当  $0 \leq \frac{C_4 - C_3 + R_2 - R_3}{B(y_3^*) + F(y_3^*)} \leq 1$ ,  $0 \leq \frac{F(y_3^*) - C_1}{B(y_3^*) + F(y_3^*)} \leq 1$  时, 有  $x_3^* = \frac{C_4 - C_3 + R_2 - R_3}{B(y_3^*) + F(y_3^*)}$ ,  $y_3^* = \frac{F(y_3^*) - C_1}{B(y_3^*) + F(y_3^*)}$ 。

Jacobian 矩阵  $J_3$  为:

$$J_3 = \begin{bmatrix} (1-2x)[F(y) - C_1 - yB(y) - yF(y)] & x(1-x)[F'(y) - B(y) - F(y) - yF'(y)] \\ y(1-y)[B(y) + F(y)] & (1-2y)[R_3 - R_2 + C_3 - C_4 + xB(y) + xF(y)] \\ & + y(1-y)[xB'(y) + xF'(y)] \end{bmatrix}$$

同理可得  $(0,0)$ 、 $(0,1)$ 、 $(1,0)$ 、 $(1,1)$  四个均衡点的  $\text{Det}(J_3)$  都为负数, 则其均为鞍点。将  $x_3^* = \frac{C_4 - C_3 + R_2 - R_3}{B(y_3^*) + F(y_3^*)}$ ,  $y_3^* = \frac{F(y_3^*) - C_1}{B(y_3^*) + F(y_3^*)}$  代入 Jacobian 矩阵  $J_3$ , 得到  $(x_3^*, y_3^*)$  的 Jacobian 矩阵  $J_3^*$ :

$$J_3^* = \begin{bmatrix} 0 & \frac{C_4 - C_3 + R_2 - R_3}{B(y_3^*) + F(y_3^*)} \left[ 1 - \frac{C_4 - C_3 + R_2 - R_3}{B(y_3^*) + F(y_3^*)} \right] [-B - B(y_3^*) - F(y_3^*) - C_1] \\ \frac{(F(y_3^*) - C_1)[B(y_3^*) + C_1]}{B(y_3^*) + F(y_3^*)} & \frac{(F + B)(C_1 - F(y_3^*)) [B(y_3^*) + C_1] (C_4 - C_3 + R_2 - R_3)}{[B(y_3^*) + F(y_3^*)]^3} \end{bmatrix}$$

可知  $J_3^*$  的特征根是两个有负实部的特征复根, 此时系统具有渐进稳定性, 说明政府和快递企业之间存在演化稳定策略  $(x_3^*, y_3^*)$ , 演化路径是一条趋向于稳定点  $(x_3^*, y_3^*)$  的螺旋曲线。

### 3.3.2. 动态惩罚与动态补贴演化稳定策略分析

由  $x_3^* = \frac{C_4 - C_3 + R_2 - R_3}{B(y_3^*) + F(y_3^*)}$ ,  $y_3^* = \frac{F(y_3^*) - C_1}{B(y_3^*) + F(y_3^*)}$ , 解得:

$$\begin{cases} x_3^* = \frac{2(C_4 - C_3 + R_2 - R_3)}{B + \sqrt{B^2 + 4(B+F)C_1}} \\ y_3^* = \frac{B + 2F - \sqrt{B^2 + 4(B+F)C_1}}{2(B+F)} \end{cases}$$

对  $x_3^*$ ,  $y_3^*$  各自的参数求偏导数:

$$(5) \quad \frac{\partial x_3^*}{\partial F} < 0, \quad \frac{\partial x_3^*}{\partial B} < 0, \quad \frac{\partial x_3^*}{\partial C_1} < 0, \quad \frac{\partial x_3^*}{\partial C_4} > 0, \quad \frac{\partial x_3^*}{\partial C_3} < 0, \quad \frac{\partial x_3^*}{\partial R_2} > 0, \quad \frac{\partial x_3^*}{\partial R_3} < 0$$

$$(6) \quad \frac{\partial y_3^*}{\partial F} > 0, \quad \frac{\partial y_3^*}{\partial B} < 0, \quad \frac{\partial y_3^*}{\partial C_1} < 0$$

由上述(5)和(6)可知, 政府的惩罚最大力度  $F$ 、补贴最大力度  $M$  和监管成本  $C_1$  同时影响政府和快递

企业的决策行为。(5)表示政府对快递企业的监管概率与其最大惩罚力度、最大补贴力度、监管成本、快递企业使用传统包装的成本和快递企业使用绿色包装获得的收益都成反比,与快递企业使用绿色包装的成本和快递企业使用传统包装获得的收益成正比。(6)表示快递企业使用绿色包装的概率与政府的最大补贴力度、监管成本均成反比,与政府的最大惩罚力度成正比。

### 4. 仿真分析

根据模型需满足  $0 < C_4 - C_3 + R_2 - R_3 < B(y) + F(y)$ ,  $F(y) - C_1 > 0$ ,  $C_4 > C_3$ ,  $R_3 > R_2$ , 设置各参数的初始值分别为:  $C_1 = 1, C_3 = 2, C_4 = 8, R_2 = 5, R_3 = 6, F = 9, B = 6, x^* = \frac{C_4 - C_3 + R_2 - R_3}{B + F} = \frac{1}{3} \approx 0.33, y^* = \frac{F - C_1}{B + F} = \frac{7}{15} \approx 0.47$ 。运用 MATLAB R2021a 软件对演化博弈模型进行数值仿真。

#### 4.1. 静态奖惩机制参与主体演化路径

若政府采取静态补贴静态惩罚措施,此时整个系统的演化过程如图所示。由图 3 可见,政府和快递企业组成的系统的演化轨迹是围绕点  $(x^*, y^*)$  周期性的闭环运动,显示在静态奖惩下不存在演化稳定策略,验证了前面分析的结论。

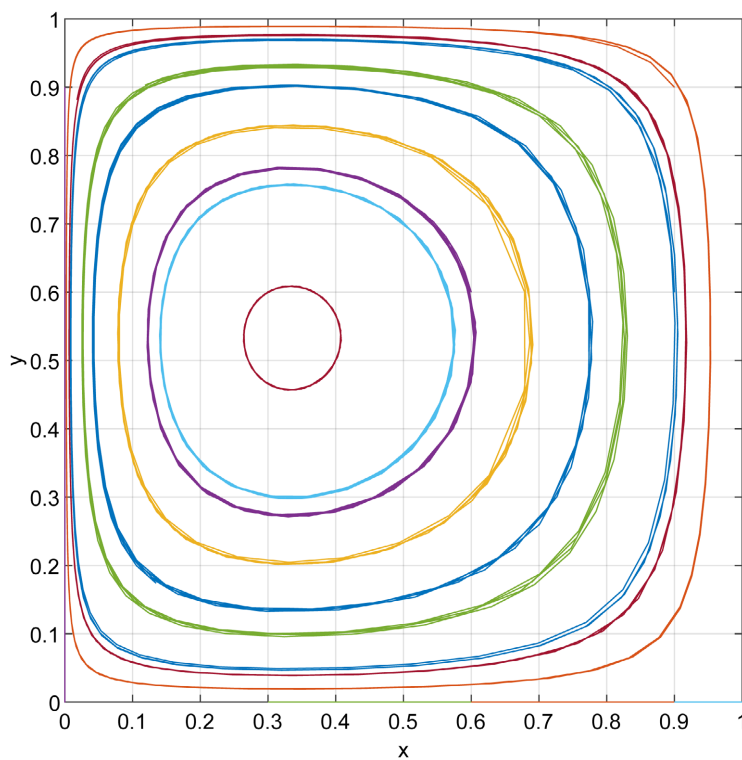
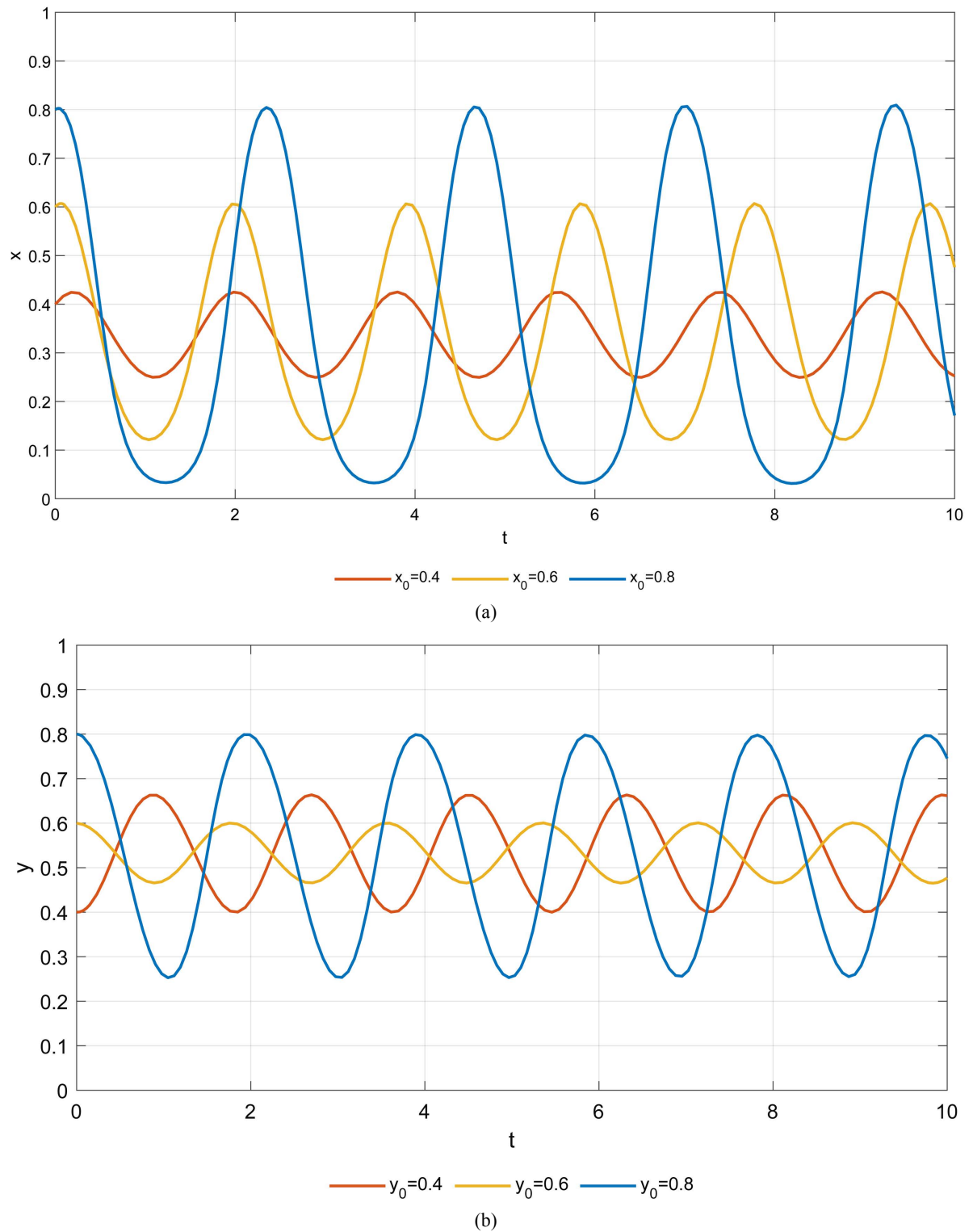


Figure 3. Evolutionary paths of the government and courier companies under static reward and punishment mechanisms

图 3. 静态奖惩机制下政府和快递企业的演化路径

上述条件保持不变,分析不同初始值对演化博弈曲线的影响。若快递企业的初始值固定不变取 0.47,改变政府的初始值分别取 0.4, 0.6, 0.8,如图 4(a)所示。若政府的初始值固定不变取 0.33,改变快递企业的初始值分别取 0.4, 0.6, 0.8,如图 4(b)所示。由图可知:快递企业选择使用“绿色包装”策略的概率呈现上下振荡的波动趋势,无论政府和快递企业的初始值如何变动,都没有稳定点。政府的波动频率

随着其选择监管概率的变大而变小, 快递企业的波动频率随着其选择使用绿色包装概率的变大而变小。

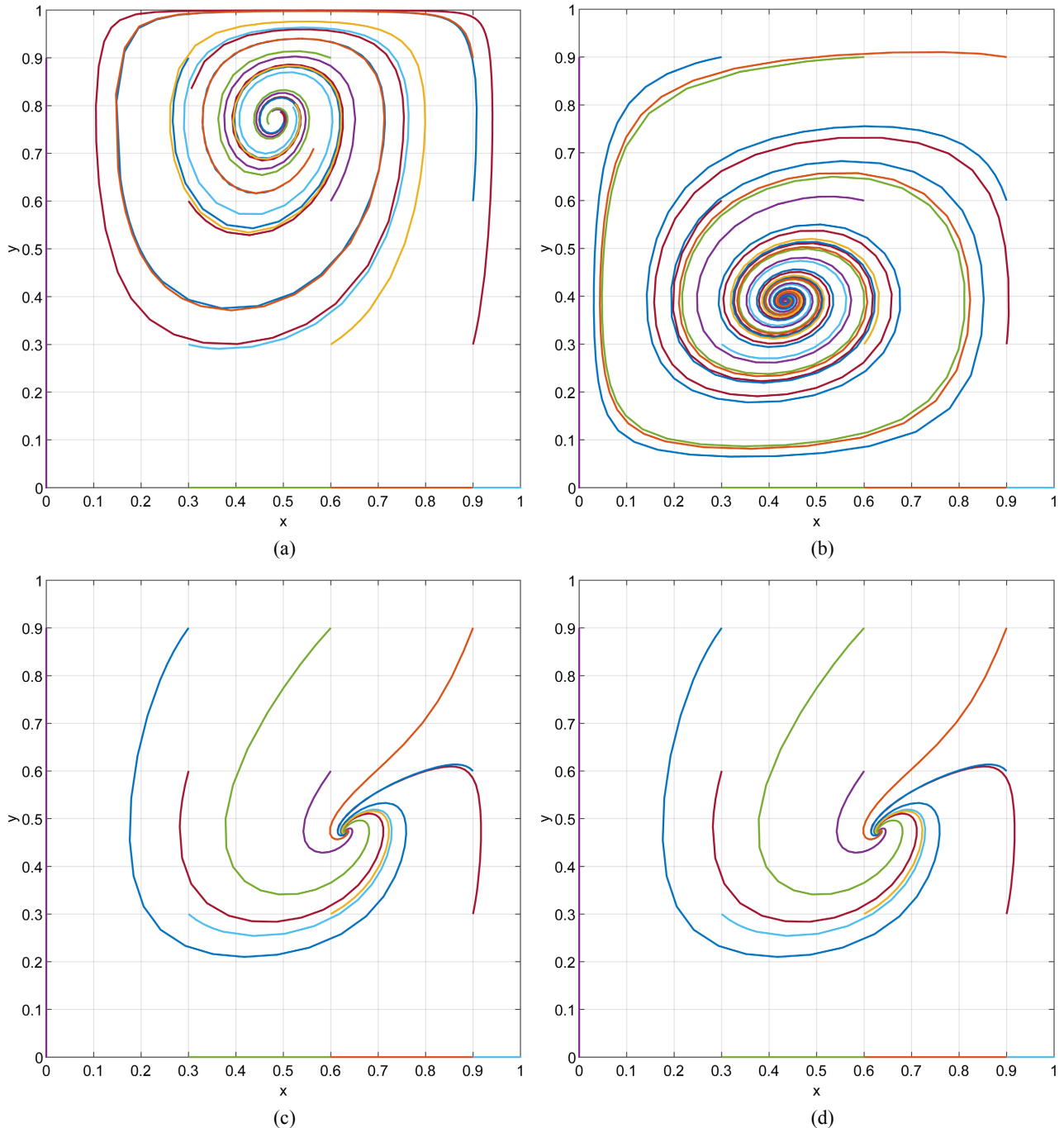


**Figure 4.** Effect of different initial values on evolutionary paths under static reward and punishment mechanisms. (a) Evolutionary path of government; (b) Evolutionary path of express delivery companies

**图 4.** 静态奖惩机制下不同初始值对演化路径的影响。(a) 政府的演化路径; (b) 快递企业的演化路径

### 4.2. 动态奖惩机制参与主体演化路径

若政府采取动态奖惩措施, 可分为动态补贴静态惩罚、动态惩罚静态补贴和动态补贴动态惩罚三种情况, 它们各自的政府和企业双方混合策略的演化过程分别如图 5(a)~5(c)所示。随着演化时间的增长, 在动态奖惩机制下系统演化轨迹都呈现螺旋式收敛, 最终分别稳定在均衡点  $(x_1^*, y_1^*)$ ,  $(x_2^*, y_2^*)$  和  $(x_3^*, y_3^*)$ 。这说明在动态奖惩的措施下的系统都具有稳定性, 验证了前面的结论。



**Figure 5.** Evolutionary paths of mixed strategies of both government and firms under dynamic reward and punishment mechanisms  
**图 5.** 动态奖惩机制下政府和企业双方混合策略的演化路径

事实上, 由于市场环境复杂多变, 政府在采取措施时会考虑其适用性和有效性。因此, 与静态奖惩机制相比, 建立动态奖惩机制更符合实际生活。为了比较三种不同动态奖机制的激励效果, 现将动态奖惩下三种情况的政府和企业双方混合策略的演化过程绘制在同一幅图中如图 5(d)所示, 其中政府的初始值取 0.2, 快递企业的初始值取 0.9。观察不同情况下均衡点的位置, 在动态补贴静态惩罚政策下政府监管的概率最大, 但动态奖惩下三种情况的政府监管的概率相差不大, 而在动态补贴静态惩罚政策下电商快递企业使用绿色包装的概率最大且激励效果显著。因此, 动态补贴静态惩罚措施最优, 其次是动态补贴动态惩罚措施, 最后是动态惩罚静态补贴措施。

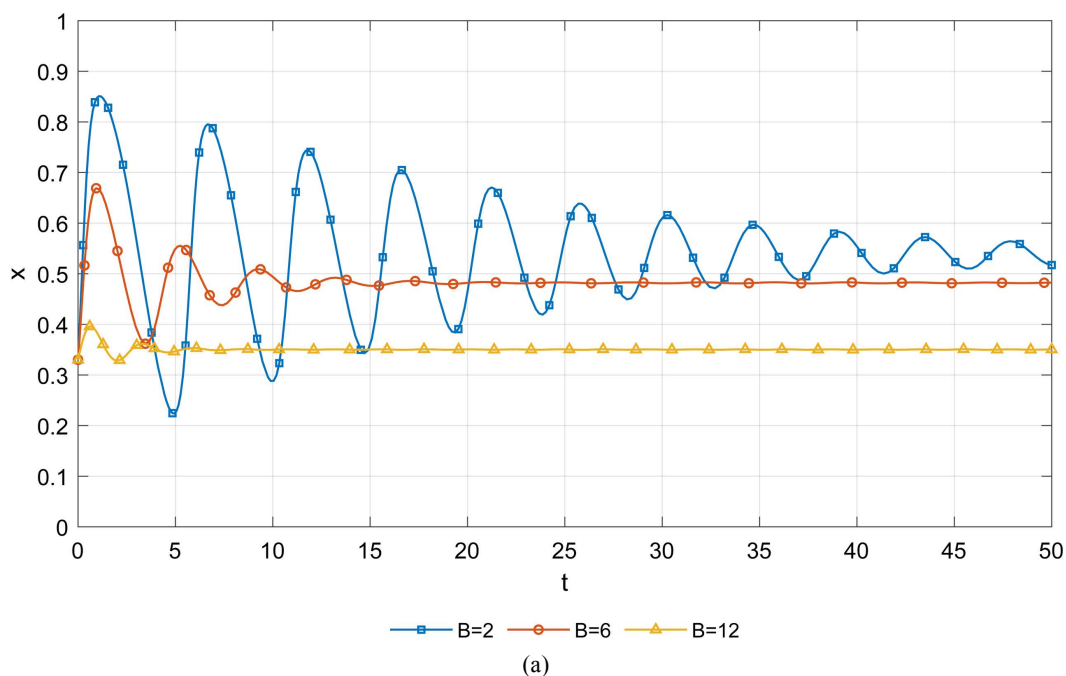
由以上分析可知, 刚性的奖惩制度并不能促进电商快递包装的绿色发展, 采用静态奖惩机制很可能造成双方决策呈现不断波动的局面。因此, 推动电商快递包装绿色发展的可持续性, 就需要在波动中保持稳定。因此, 灵活的奖惩机制对于促进决策的稳定性十分重要。政府采取动态奖惩机制时, 要根据快递企业使用绿色包装的情况来确定补贴和处罚的上限, 并根据快递企业使用绿色包装的情况动态进行及时调整, 以提高动态奖惩机制的适用性和准确性。

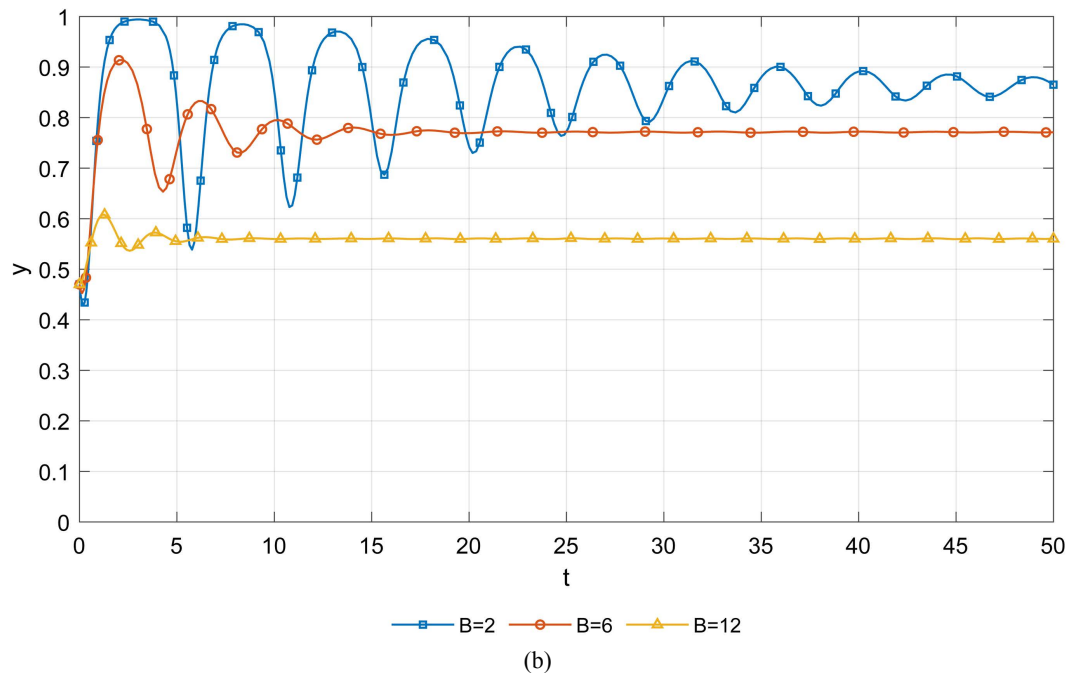
### 4.3. 奖惩力度对动态补贴静态惩罚下系统演化路径的影响

接下来, 本小节将继续讨论动态补贴静态惩罚中关键参数值  $F$ 、 $B$ 、 $C_1$  对地方政府和企业战略选择概率的演化路径的影响。在最优奖惩机制下, 政府的初始值取 0.33, 快递企业的初始值取 0.47。模拟结果如下所示。

#### 4.3.1. 补贴 $B$ 对政府和电商快递企业策略的影响

考虑补贴上限  $B$  对政府和快递企业行为策略的影响, 保持其他参数不变, 取  $B=2$ ,  $B=6$ ,  $B=12$ 。随着政府补贴上限的提高,  $x$ 、 $y$  在经历短期的震荡之后, 系统逐渐趋于稳定, 政府监管的概率  $x$  和快递企业使用绿色包装的概率  $y$  均相应下降, 但  $x$  下降的幅度小于  $y$  下降的幅度, 如图 6 所示。因此, 适当的激励、补贴、优惠政策可以促进快递企业包装的绿色发展, 提高快递业包装的绿色度和环保性。但长期来看, 过度的激励政策使得快递企业使用绿色包装的可能性降低。





**Figure 6.** Impact of subsidy caps on participants' strategies. (a) Impact of subsidy caps on government strategies; (b) Impact of the subsidy cap on the strategies of express delivery companies

**图 6.** 补贴上限对参与者策略的影响。(a) 补贴上限对政府策略的影响; (b) 补贴上限对快递企业策略的影响

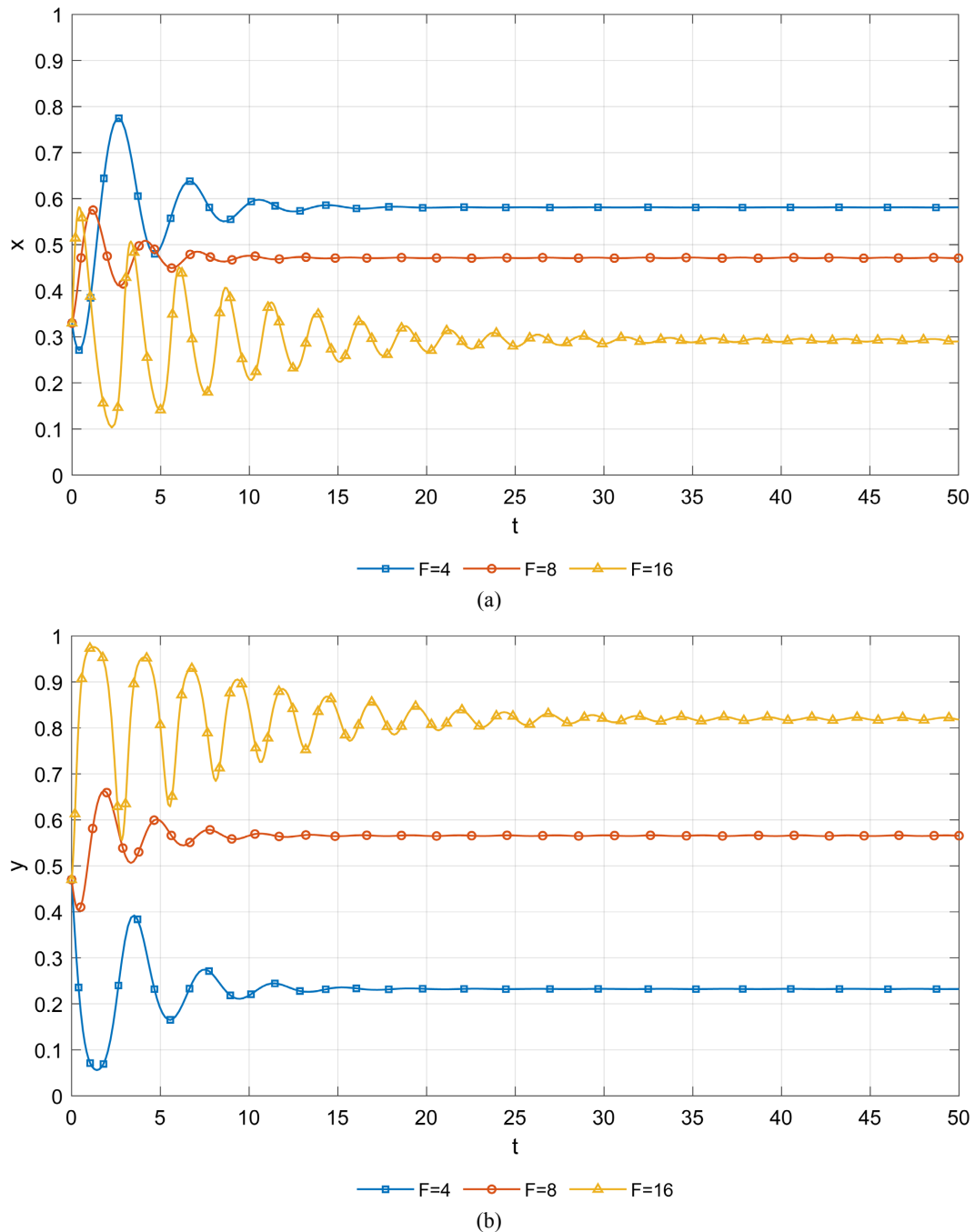
导致该现象的原因, 可能是激励性补贴金额过高, 加重了政府的财政负担, 无形中增加了政府监督的投入, 政府可能会选择降低监管概率策略。同时, 政府监管的概率变小, 那么快递企业获得奖励补贴的概率也会变小, 因此企业选择绿色包装的概率也会降低。此外, 由于信息不对称, 过度的激励政策往往会给企业带来套利空间, 增加企业的投机行为。快递企业可以伪造包装材料相关的环保证明等, 将激励性补贴用于与绿色包装无关的其他经营环节以获取更多的收益, 从而导致补贴失效。

#### 4.3.2. $F$ 对政府和电商快递企业策略的影响

分别取  $F = 4$ ,  $F = 8$ ,  $F = 16$ , 其他参数保持不变,  $F$  对政府策略的影响如图 7(a)所示,  $F$  对电商快递企业策略的影响如图 7(b)所示。由图可知政府的惩罚力度在  $F = 8$  时,  $x$ 、 $y$  在经历短期的震荡之后, 系统趋于稳定的速度最快。这说明政府的惩罚力度既不能太大也不能太小, 需保持在一个合理的范围内。随着惩罚力度的增加, 电商快递企业为了避免缴纳更多的罚款, 会倾向于使用绿色包装。电商快递企业使用绿色包装的概率会随着惩罚力度的增加而有所提高。当发展到一定阶段, 即使没有政府的监管电商快递企业也会自觉使用绿色包装, 政府为了避免支付更多的监管成本其监管的概率会有所下降。由此可知, 当惩罚力度发展到一定阶段, 政府和电商快递企业的策略最终会趋于稳定。

## 5. 结论

在静态补贴静态惩罚模型中, 考虑不同约束条件, 政府和快递企业之间的演化行为是不同的。在各种演化行为策略中, 最理想的状态是政府选择“不监管”, 快递企业选择“使用”绿色包装。政府不监管快递包装的绿色使用, 快递企业都将使用绿色包装。然而, 在符合我们实际情况的给定假设下, 他们的行为策略并不具备 ESS。这一现象可以用演化博弈模型来研究。在一定程度上, 政府应调整现有机制, 为快递企业进一步使用绿色包装提供最佳激励。本文用演化博弈方法建立了政府和快递企业的博弈模型,



**Figure 7.** Impact of penalty caps on participants' strategies. (a) Impact of the penalty cap on government strategy; (b) Impact of penalty caps on the strategies of express delivery companies

**图 7.** 惩罚上限对参与者策略的影响。(a) 惩罚上限对政府策略的影响；(b) 惩罚上限对快递企业策略的影响

分析了在不同奖励和惩罚机制下系统演化博弈及其平衡点稳定性，并讨论了奖励和惩罚力度对政府和电商快递企业演化稳定策略的影响。得出以下结论和建议：

当政府采取静态奖惩措施时，政府和电商快递企业组成的系统演化轨迹围绕中心点周期波动。无论初始值如何变动，都无法达到快递企业选择使用绿色包装的局面。分析表明，在静态奖惩机制下，政府监管部门和快递企业的博弈不存在稳定点。造成这种局面的根本原因在于双方都是有限理性的，是双方



权衡利益和成本后的理性选择。所以, 政府监管部门需要调整奖惩政策引导和激励电商快递企业使用绿色包装的行为, 提高快递业包装的环保性。

政府可以通过实施动态税收和静态补贴、静态税收和动态补贴或双边动态税收和补贴获得好处, 其中任何一种都比使用完全静态税收和补贴机制更好。快递企业使用绿色包装的概率与政府补贴成反比, 这意味着随着政府补贴的增加, 快递企业使用绿色包装的意愿降低, 此现象可以用雪球效应来解释。雪球开始时可能很小, 但外力会使它增大。当雪球足够大时, 它就能靠自己的惯性向前移动。类似地, 政府可以从慷慨的补贴开始鼓励快递企业使用绿色包装。当快递企业的绿色包装成熟发展到规模效应时可以间接地降低使用绿色包装的成本, 政府可以逐步减少补贴。最终, 快递企业仍会继续选择使用绿色包装。

在动态奖励静态惩罚机制、静态奖励动态惩罚、动态奖励动态惩罚机制下, 系统的演化轨迹是螺旋收敛于一个稳定点。在几种不同的奖惩机制中, 动态奖励静态惩罚机制提供了更多的激励, 电商快递企业使用绿色包装概率更高, 所以这种激励机制更有效。在最优奖惩机制下, 政府选择监管策略的概率与其最大惩罚力度、补贴、监管成本、快递企业使用传统包装的成本、使用绿色包装获得的收益成负相关, 与快递企业使用绿色包装的成本和使用传统包装获得的收益成正相关。快递企业使用绿色包装的概率与政府的补贴、监管成本均成负相关, 与政府最大惩罚力度的增加成正相关。

结合仿真结果, 对快递绿色包装提出了建议。政府建立奖惩机制激发快递企业使用绿色包装, 但要实行科学合理的奖惩措施。快递绿色包装监管体系的完善往往滞后于市场发展, 显示当前的监管机制缺乏活力和及时性。研究表明, 在对电商快递绿色包装监管过程中, 动态奖惩机制为政府和企业提供了更多的激励, 增加了博弈双方采取积极策略的概率, 因此政府在对快递企业实施监管时应采取动态奖惩机制。在奖励方面, 持续的补贴激励措施可能会带来巨大的财政负担对政府不利。对快递企业来说, 并不是补贴越高越利于快递企业使用绿色包装。过多的激励性补贴有时会适得其反, 因此在实际监管过程中要采取灵活性补贴的措施。在惩罚方面, 处罚过低对企业的约束作用不大, 对未使用绿色包装的快递企业应加大处罚力度, 同时对已获得补贴的快递企业采取追回措施并进行处罚。较大的处罚力度可以具有较高的激励效果, 促使快递企业采取较高概率的绿色包装策略, 间接缓解政府的监管压力, 降低监管成本。

## 参考文献

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 2022年12月社会消费品零售总额下降1.8% [EB/OL]. [https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202302/t20230203\\_1901713.html](https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202302/t20230203_1901713.html), 2023-04-03.
- [2] 中华人民共和国国家邮政局. 国家邮政局公布2022年邮政行业运行情况 [EB/OL]. <https://www.spb.gov.cn/gjyzj/c100015/c100016/202301/c910dd57e739490ea60bda58174ef826.shtml>, 2023-05-10.
- [3] 刘嘉欣. 绿色包装在快递行业的发展现状分析 [J]. 太原学院学报(社会科学版), 2017, 18(6): 18-22.
- [4] 于含, 张昶, 张蕾. 电商包装存在问题及对策 [J]. 包装工程, 2017, 38(7): 228-232.
- [5] 于光. 物流企业发展绿色包装面临的问题及其对策 [J]. 湖南包装, 2021, 36(4): 104-106.
- [6] 缪亮. 基于循环经济视角下绿色物流包装研究 [J]. 中国储运, 2021(8): 137-138.
- [7] 李刚. 我国快递业发展趋势分析 [J]. 物流工程与管理, 2010, 32(4): 5-7.
- [8] 成灶平, 马良, 从培栋. 基于演化博弈的快递包装回收动态监管与仿真 [J]. 工业工程与管理, 2023, 28(3): 27-35.
- [9] 张爽, 孙绍荣, 马慧民. 包装垃圾源头减量治理的三群体演化博弈分析 [J]. 包装工程, 2018, 39(13): 129-137.
- [10] 苗秀杰, 纪凤旗. 政府和快递包装供应商在绿色技术创新中的演化博弈分析 [J]. 物流技术, 2022, 41(2): 30-37.
- [11] Friedman, D. (1998) On Economic Applications of Evolutionary Game Theory. *Journal of Evolutionary Economics*, 8, 15-43. <https://doi.org/10.1007/s001910050054>

- 
- [12] Taylor, P.D. and Jonker, L. (1978) Evolutionarily Stable Strategies and Game Dynamics. *Mathematical Biosciences*, **40**, 145-156. [https://doi.org/10.1016/0025-5564\(78\)90077-9](https://doi.org/10.1016/0025-5564(78)90077-9)
- [13] 何燕子, 阳萍. 基于演化博弈的包装绿色化模型研究与仿真[J]. 湖南人文科技学院学报, 2023, 40(1): 63-71.
- [14] 谢彩虹, 邹筱. 基于演化博弈的我国电商绿色包装稳定策略分析[J]. 包装学报, 2023, 15(3): 9-16.
- [15] You, Z.L. and Hou, G.S. (2023) Research on the Evolution of Express Packaging Recycling Strategy Considering Virtual Incentives and Heterogeneous Subsidies. *Scientific Reports*, **13**, Article No. 8478. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-35543-4>
- [16] 王众托. 系统工程引论[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [17] Ji, S., Zhao, D. and Luo, R. (2019) Evolutionary Game Analysis on Local Governments and Manufacturers' Behavioral Strategies: Impact of Phasing out Subsidies for New Energy Vehicles. *Energy*, **189**, Article ID: 116064. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116064>
- [18] Zhang, S., Wang, C. and Yu, C. (2019) The Evolutionary Game Analysis and Simulation with System Dynamics of Manufacturer's Emissions Abatement Behavior under Cap-and-Trade Regulation. *Applied Mathematics and Computation*, **355**, 343-355. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2019.02.080>
- [19] Chen, W. and Hu, Z.H. (2018) Using Evolutionary Game Theory to Study Governments and Manufacturers' Behavioral Strategies under Various Carbon Taxes and Subsidies. *Journal of Cleaner Production*, **201**, 123-141. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.007>