

# 碳配额约束下港口企业绿色技术采纳补贴博弈

范瀚文,常征\*,付康

(大连海事大学 交通运输工程学院,辽宁 大连 116026)

**摘要:**为探究地方政府补贴政策对港口企业采纳绿色技术行为决策中的作用,运用演化博弈方法构建地方政府与港口企业之间的博弈模型,结合前景理论思想弥补了传统演化博弈理论中收益值为期望效用的缺陷,采用更加贴切的主观感知价值构建基于碳配额约束下博弈双方的损益矩阵。结果表明:当港口企业采纳绿色技术获得的主观感知收益与购买碳排放额的交易成本之和高于投入绿色技术的成本时,港口企业会自发地选择采纳绿色技术。为避免陷入政府补贴失效的状态,必须依靠补贴与碳配额的双重手段,才能形成港口企业自发采纳绿色技术的共赢局面。

**关键词:**碳配额;港口企业;绿色技术;政府补贴;演化博弈  
**中图分类号:**F202 **文献标志码:**A

## Green technology adoption subsidy game of port enterprises under carbon quota constraints

FAN Han-wen, CHANG Zheng\*, FU Kang

(Transportation Engineering College,  
Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

**Abstract:** In order to explore the role of local government subsidy policy in the decision-making of port enterprises' adoption of green technology, the game model between local government and port enterprises was constructed by using the evolutionary game method. Combined with the idea of prospect theory, it made up for the expected effect of income value in the traditional evolutionary game theory, and adopted more appropriate subjective perceived value to construct the profit and loss matrix of both sides of the game based on carbon quota constraints. The results show that when the sum of the sub-

jective perceived benefits of adopting green technology and the transaction cost of purchasing carbon emissions is higher than the cost of investing in green technology, port enterprises will spontaneously choose to adopt green technology. In order to avoid falling into a state of invalid government subsidies, it is necessary to rely on the dual means of subsidies and carbon quotas to form a win-win situation in which port enterprises spontaneously adopt green technology.

**Key words:** carbon quota; port enterprises; green technology; government subsidies; evolutionary game

## 0 引言

港口是实现海上贸易运输互联互通的重要节点,在经济和社会发展中发挥着至关重要的作用。交通运输部统计数据 displays, 2020年,全国港口完成货物吞吐量约146亿t。但港口企业每年主要消耗的化石燃料的碳排放量近亿t,船舶排放的有害气体仍然呈现逐年上涨的趋势,日益恶化的生态环境与经济增长之间的矛盾逐渐显现<sup>[1]</sup>。作为满足国家碳中和以及碳达峰的关键行为主体,绿色港口是港口发展的必由之路。因此,地方政府希望港口企业通过使用绿色清洁能源和采纳绿色技术的方式来改变现状,统筹好经济发展与减排之间的关系,最终达到兼顾港口可持续化发展和绿色化发展的双重目的。

近年来,绿色港口技术的发展为港口减排做出了巨大贡献。国内外相关学者从制约港口企业采纳绿色技术因素、绿色港口技术的布局规划和

收稿日期:2021-09-08;修回日期:2021-11-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71603036);中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(3132021347)

作者简介:范瀚文(1997-),男,博士生,常征\*(1986-),女,博士,副教授,E-mail:changzheng8712@163.com

改良绿色港口技术稳定性等角度挖掘绿色港口技术发展的瓶颈,推动地方港口采纳绿色技术展开研究<sup>[2]</sup>。也有相关学者从定量角度对港口企业采纳绿色技术获得的经济效益和环境效益进行分析,并对采纳绿色港口技术的技术优势和经济优势进行深入探讨<sup>[5]</sup>。相比之下,从定量角度对港口企业采纳绿色技术的行为决策方面的研究较少。因此,研究政府补贴对港口企业采纳绿色技术之间的博弈关系,有助于地方政府进一步调整和制定补贴策略,进而推动港口绿色化发展。

博弈论是分析地方政府和港口企业之间冲突与合作关系的有效工具:桑高峰等<sup>[8]</sup>建立了单方主导的 Stackelberg 博弈和双方同时主导的 Nash 博弈模型,分析了港航供应链中在集中决策和分散决策下对减排决策的行为策略选择;王日金等<sup>[9]</sup>利用 Nash 均衡博弈求解双寡头港口企业自身的减排策略以及定价;Fan 等<sup>[10]</sup>构建了动态演化博弈模型,分析博弈双方不同互动方式下激励效果的变化,并识别出主导者采取策略时所考虑的关键因素;徐艳等<sup>[11]</sup>构建了强制减排下考虑政府监管成本和企业寻租成本的减排演化博弈模型。然而,上述博弈模型不能充分反映博弈双方在不确定情况下的决策行为特点,刻画博弈双方在主观感知价值下的行为偏差。相关学者通过引入前景理论的方法构建演化博弈模型,进一步从主观心理感受的角度衡量有限理性的博弈双方的决策行为特点。目前,前景理论已经广泛应用于运营管理、决策分析、消费行为等诸多领域:闫妍等<sup>[12]</sup>构造改进前景理论的演化博弈模型,分析了不同外包比例下航空公司运输业务模式决策选择;刁姝杰等<sup>[13]</sup>分析了物流供应链中物流提供商与集成商之间的博弈关系,挖掘双方损失规避、竞争替代效应等因素对系统实现最优均衡的关系。

综上所述,本文提出考虑政府补贴行为与港口企业采纳绿色技术决策的博弈模型,基于前景理论和演化博弈理论从博弈双方主观心理感知价值构建收益矩阵,弥补了博弈双方的收益值为客观期望值的缺陷。进一步的,通过关键参数数值模拟解释博弈双方风险态度、损失规避、政府补贴比率等参数对博弈双方决策的影响,尤其考虑碳配额约束的限制对港口企业的约束作用,从多角度阐述博弈双方的演变规律。

## 1 演化博弈模型

### 1.1 基本假设

港口企业考虑是否采纳绿色技术的博弈涉及中央政府、地方政府、港口企业管理者、班轮公司、当地居民以及第三方监管机构等多个主体,本质上是一个复杂的非合作多方博弈网络。为便于本文分析以及研究,假设如下:(1)博弈分析过程只考虑地方政府以及港口企业两类行为主体。鉴于碳配额等约束性政策是由中央政府出台指导,地方政府进行落实和执行,本文仅从地方政府与中央政府保持利益一致的情形下进行分析,假定地方政府具备良好的监管水平。(2)港口企业在追求利益最大化的过程中会采取投机、寻租等不当行为,本文假定港口企业放弃采纳不当行为获得的机会成本。(3)地方政府和港口企业采纳行为策略的标准是通过主观感知价值进行决策,并且博弈双方的主观感知价值可以通过前景理论进行转化。(4)地方政府和港口企业均为有限理性的群体,在博弈过程中不具有完全信息,双方相互影响的过程是动态反复的。双方均可以根据策略的变化不断调整更替自身的行为策略,直至达到演化博弈的均衡状态。

### 1.2 模型建立

演化博弈模型的构建涉及两类决策主体:地方政府与港口企业。地方政府的行为策略集合为采取补贴,不采取补贴;港口企业的行为策略集合为采纳绿色技术,不采纳绿色技术。

地方政府免费发放给港口企业一个碳排放量额度  $e$ ,假定港口企业当前排放量为  $oe(e < oe)$ ,则港口企业需要减少的目标排放量  $\Delta e$  为碳排放额度与当前排放量的差额。当港口企业不采纳绿色技术时,为满足地方政府碳配额的约束条件,需要通过碳排放市场购买碳排放权进行交易,碳交易价格  $p$  由碳交易市场决定。

港口企业作为绿色技术的采纳者,存在两种可供选择的策略:不采纳绿色技术可以获得港口运营的基本收益  $W$ ,此时地方政府享受港口企业产生的总收益  $H_2$ ;采纳绿色技术需要投入一定的原始成本  $I$ ,绿色技术的市场采纳率为  $a$ ,绿色技术的市场期望收益为  $R$ ,此时地方政府享受港口企业采纳绿色技术带来的环境收益  $H_1$ (包括进一

步减缓环境污染,提高生态环保节约的投入成本,节约的环境处理成本等)。为便于分析,假设港口采纳绿色技术后的碳排量低于政府所发放的碳排放额度,不需要额外购买碳交易额即可满足地方政府的碳配额约束。

基于港口企业的两种行为策略,地方政府同样也有两种应对策略:当地方政府采纳补贴政策时,需要给予港口企业一定的投入补贴,假设补贴率为  $b$ ;如果港口企业并未采纳绿色技术,地方政府需要收取港口企业一定的惩罚成本  $F$ ,地方政府监督检查港口企业是否将补贴成本投入绿色技术的监管率为  $m$ 。综上,本文构建地方政府和港口企业之间的损益矩阵见表 1,文章涉及的参数和变量见表 2。

表 1 地方政府与港口企业博弈得益矩阵

Tab. 1 Game benefit matrix between local government and port enterprises

策略组合	港口企业收益	地方政府收益
补贴, 采纳绿色技术	$W + aR + bI - I$	$H_1 - bI$
补贴, 不采纳绿色技术	$W + bI - mF - p\Delta e$	$H_2 - bI + mF$
不补贴, 采纳绿色技术	$W + aR - I$	$H_1$
不补贴, 不采纳绿色技术	$W - p\Delta e$	$H_2$

表 2 符号说明

Tab. 2 Symbol description

参数/变量	含义
$e$	政府发放给港口企业的碳配额
$oe$	目前港口企业的碳排放量
$\Delta e$	港口企业的碳排放减少目标量
$p$	碳交易价格
$I$	港口企业绿色技术投入成本
$W$	港口企业不采纳绿色技术的收益
$R$	港口企业采纳绿色技术的收益
$F$	地方政府补贴下对港口企业未采纳绿色技术收取的罚金
$a$	绿色技术采纳率
$b$	地方政府对港口企业采纳绿色技术的投入成本补贴率
$m$	地方政府对港口企业绿色技术采纳监管比率

2 演化博弈模型求解

根据演化博弈的相关理论,可以求得港口企业采纳绿色技术策略的期望收益值为:

$$E_x = y(W + aR - I + bI) + (1 - y)(W + aR - I) \quad (1)$$

港口企业不采纳绿色技术策略的期望收益值为:

$$E_{1-x} = y(W + bI - mF - p\Delta e) + (1 - y)(W - p\Delta e) \quad (2)$$

港口企业混合策略的平均期望收益为:

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

港口企业策略的复制动态方程为:

$$\frac{dx}{dt} = x(E_x - \bar{E}_1) = x(1 - x)(mFy + aR + p\Delta e - I) \quad (4)$$

同理,可得地方政府策略的复制动态方程为:

$$\frac{dy}{dt} = y(E_y - \bar{E}_2) = y(1 - y)(-mFx + mF - bI) \quad (5)$$

基于前景理论中的假设条件,博弈双方对客观确定的收益和损失不存在感知价值和实际价值的偏差。然而,当博弈双方面对的复杂和不确定的决策环境时,有限理性的博弈主体往往根据自身的风险态度和损失规避考虑自身的决策行为,从而制定自身的决策选择。考虑到港口企业面对绿色技术采纳的决策过程中受到外部风险不确定性和收益不确定性的影响,以及在现实中局中人面对“失”会因为不甘心从而更愿意追求风险;面对“得”会更加谨慎小心,不愿意承担更多的风险的决策行为特点<sup>[14]</sup>,本文从博弈双方主观心理感知角度构造博弈双方的损益值矩阵,挖掘心理主观感知角度下博弈双方的决策行为倾向以及演化趋势规律。当博弈双方对收益或损失值不确定时,博弈双方产生的感知价值( $\Delta u$ )如下所示:

$$v(\Delta u) = \begin{cases} \Delta u^\alpha, & \Delta u \geq 0 \\ -\lambda(-\Delta u)^\alpha, & \Delta u < 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\alpha$ 为决策者对收益的边际敏感程度,随着 $\alpha$ 取值增大,决策者越偏好于冒风险; $\lambda$ ( $\lambda \geq 1$ )为决策者对损失的规避程度,随着 $\lambda$ 取值增大,决策者越偏好于损失规避; $\Delta u$ 为决策者实际收益与自身决策参考点之间的差额。为便于研究,参考相关研究对于决策者自身的决策参考点的处理方式<sup>[15]</sup>,本文假设决策者自身的决策参考点的价值为 0,此时, $\Delta u$ 为决策者的实际收益在现实中对决

策者带来的主观感知价值,  $\Delta u \geq 0$  表示决策者对该策略的主观感知为收益,  $\Delta u < 0$  表示决策者对该策略的主观感知为损失。

由此, 将港口企业与地方政府的复制动态方程进行转化, 可得以下二维动力系统:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = x(1-x)[(mF)^\alpha y + (aR)^\alpha + p\Delta e - I] \\ \frac{dy}{dt} = y(1-y)[- \lambda(mF)^\alpha x + (mF)^\alpha - \lambda(bI)^\alpha] \end{cases} \quad (7)$$

由上述二维系统可以求得系统中的 5 个平衡点, 分别为  $E_1 = (0, 0)$ ;  $E_2 = (1, 0)$ ;  $E_3 = (0, 1)$ ;

$$G = \begin{bmatrix} (1-2x)[(mF)^\alpha y + (aR)^\alpha + p\Delta e - I] \\ y(1-y)(- \lambda(mF)^\alpha) \end{bmatrix}$$

根据雅可比矩阵的局部稳定性判断准则, 当满足 ①  $tr(G) = a_{11} + a_{22} < 0$ ; ②  $\det(G) = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} > 0$  时; 复制动态方程的均衡点是稳定的, 为演化稳定策略 ESS。

表 3 平衡点对应的雅可比矩阵行列式和迹的取值表达式

Tab. 3 The value expression of the determinant and trace of Jacobian matrix corresponding to the equilibrium point

平衡点	雅可比矩阵行列式的取值	雅可比矩阵迹的取值
(0, 0)	$[(aR)^\alpha + p\Delta e - I][(mF)^\alpha - \lambda(bI)^\alpha]$	$(aR)^\alpha + p\Delta e - I + (mF)^\alpha - \lambda(bI)^\alpha$
(1, 0)	$-[(aR)^\alpha + p\Delta e - I][ - \lambda(mF)^\alpha + (mF)^\alpha - \lambda(bI)^\alpha]$	$-[(aR)^\alpha + p\Delta e - I] - \lambda(mF)^\alpha + (mF)^\alpha - \lambda(bI)^\alpha$
(0, 1)	$-[(mF)^\alpha + (aR)^\alpha + p\Delta e - I][(mF)^\alpha - \lambda(bI)^\alpha]$	$(aR)^\alpha + p\Delta e - I + \lambda(bI)^\alpha$

经过系统 ESS 的行列式取值和迹的取值结果分析, 得出以下结论:

**结论 1** 若  $(aR)^\alpha + p\Delta e - I < 0$  且  $(mF)^\alpha - \lambda(bI)^\alpha < 0$  时, 该系统的演化博弈稳定策略 ESS 为  $E_1 = (0, 0)$ 。该种稳定状态下, 港口企业选择不采纳绿色技术, 政府选择不采纳补贴政策。

结论 1 说明: ①当港口企业采纳绿色技术的感知收益与不采纳绿色技术时所购买的碳交易成本之和低于采纳绿色技术时所支付的投入成本; ②地方政府感知由于自身支付绿色技术补贴而港口企业未采取绿色技术所支付的罚金小于自身投入的绿色补贴时, 港口企业趋向于不采纳绿色技术策略, 地方政府趋向于采取不补贴策略。现实中, 绿色技术市场采纳率低、绿色技术成本高、采纳绿色技术回收期长是制约港口企业采纳绿色技术的瓶颈。该种状态下, 博弈双方陷入了均不采

$E_4 = (1, 1)$ ;  $E_5 = (g, h)$ , 其中,  $g = \frac{(mF)^\alpha - \lambda(bI)^\alpha}{\lambda(mF)^\alpha}$ ,  $h = \frac{I - (aR)^\alpha - p\Delta e}{(mF)^\alpha}$ , 当且仅当  $g, h \in [0, 1]$  时成立。

系统的雅可比 (Jacobian) 矩阵求解方式如下:

$$G = \begin{bmatrix} \frac{\partial x^*}{\partial x} & \frac{\partial x^*}{\partial y} \\ \frac{\partial y^*}{\partial x} & \frac{\partial y^*}{\partial y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \quad (8)$$

带入式 (8), 求解该系统的雅可比矩阵结果为:

$$\begin{bmatrix} x(1-x)(mF)^\alpha \\ (1-2y)(- \lambda(mF)^\alpha x + (mF)^\alpha - \lambda(bI)^\alpha) \end{bmatrix} \quad (9)$$

经过计算后判定, 在  $E_4 = (1, 1)$ ;  $E_5 = (g, h)$  两点处不满足判定条件, 所以  $E_4 = (1, 1)$ ;  $E_5 = (g, h)$  两局部均衡点不可能为 ESS。系统的三个 ESS 点行列式和迹取值如表 3 所示。

取任何行动的“囚徒困境”, 整个港口环境将处于污染排放与日俱增的恶化状态, 不利于港口企业绿色化发展。

**结论 2** 若  $(aR)^\alpha + p\Delta e - I > 0$  且  $\lambda(mF)^\alpha - (mF)^\alpha + \lambda(bI)^\alpha > 0$  时, 该系统的演化博弈稳定策略 ESS 为  $E_2 = (1, 0)$ 。该种稳定状态下, 港口企业选择采纳绿色技术, 地方政府选择不采纳补贴政策。

结论 2 说明: 当港口企业采纳绿色技术的感知收益值与不采纳绿色技术时所需要购买的碳交易成本之和高于采纳绿色技术的投入成本时, 港口企业趋向于采取绿色技术策略, 地方政府趋向于不采取补贴政策。随着碳交易市场的不断放开以及建设绿色港口的稳步推进, 港口企业越来越认识到采纳绿色技术对于港口企业自身发展以及环境改善的重要性, 进而选择采纳绿色技术实现



自身的绿色化发展。该种稳定状态是地方政府希望看到的理想状态,此时,较高的期望收益和碳交易成本是激发港口企业主动采取绿色技术的重要因素。与此同时,政府应该将精力从监督管理投入到绿色技术的推广研发上,保证绿色技术的市场采纳率和预期收益维持在较高水平,并适当鼓励港口企业采纳绿色技术的信心。

**结论 3** 若  $(mF)^\alpha + (aR)^\alpha + p\Delta e - I < 0$  且  $(mF)^\alpha - \lambda(bI)^\alpha > 0$  时,该系统的演化博弈稳定策略 ESS 为  $E_3 = (0, 1)$ 。该种稳定状态下,港口企业选择不采纳绿色技术,地方政府选择采纳补贴政策。

**结论 3 说明:**①当政府采取补贴时,港口企业选择采纳绿色技术与不采纳绿色技术的收益差值  $(mF)^\alpha + (aR)^\alpha + p\Delta e - I$  小于 0,此时,港口企业宁愿支付一定的罚金也不采纳绿色技术;②地方政府感知由于自身支付绿色技术补贴而港口企业未采取绿色技术所支付的罚金大于自身投入的绿色补贴,在该种稳定状态下,港口企业趋向于不采取绿色技术策略,地方政府趋向于采取补贴策略。该种状态即使有部分港口企业选择采纳绿色技术,但是在经历市场竞争以及自身对于利益最大化的追求后,最终会放弃采纳绿色技术。对于地方政府而言,其支出的补贴成本通过征收企业未采纳绿色技术的罚金予以回收,此时为地方政府补贴失效的状态。

### 3 数值仿真分析

参数变动分析是阐述微分方程稳定解经济意义的有效手段。为验证本文分析结果,并展现博弈双方的演化路径,本文借助 Python 软件进行数值仿真,进一步分析关键参数变动对博弈双方决策的影响。

以南京龙潭港口绿色岸电技术投资应用案例作为数值仿真研究对象,按照项目 10 年运营期进行分析计算<sup>[16]</sup>。港口企业决定采纳绿色技术需要初期投资额为  $I = 300$ ,企业采纳绿色技术可以获得累计收益  $R = 1000$ 。企业将政府补贴未进行绿色技术投资而挪用的罚金为  $F = 200$ 。根据 Tversky 等<sup>[17]</sup>研究,设定收益和损失函数的风险态度系数  $\alpha$  的取值为 0.88,设定损失规避系数  $\lambda$  的取值为 2.25。借鉴相关研究<sup>[18]</sup>,设定初始碳排

放配额  $e = 100$ 、碳交易市场碳排放单位价格  $p = 1$ 。分别考虑各个参数的变化对地方政府和港口企业之间决策概率的影响关系,取初始决策概率为  $(0.50, 0.50)$ 。

(1) 决策者感知“收益”价值函数的风险态度系数  $\alpha$  的灵敏度分析。将  $\alpha$  分别取值为 0.2、0.4、0.6、0.88、1.00,表示决策者对待风险态度的不同强度系统的演化情况,如图 1 所示(图中,横坐标描述港口企业策略选择的演变过程,纵坐标描述地方政府策略选择的演变过程,下同)。

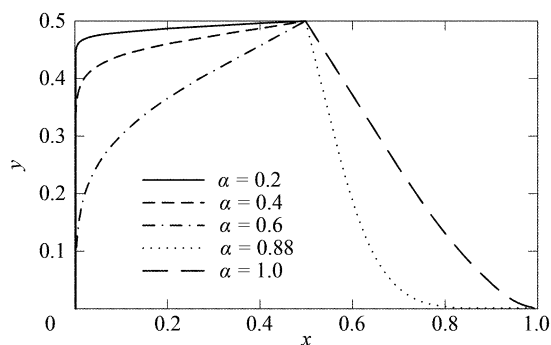


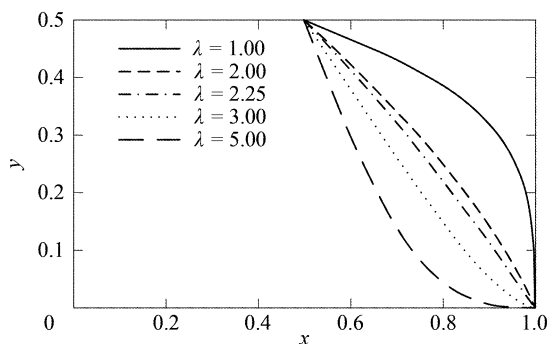
图 1 系统对  $\alpha$  的灵敏度分析

Fig. 1 Sensitivity analysis of the system to  $\alpha$

观察图 1 可知,地方政府与港口企业对待感知价值的风险系数  $\alpha$  较为敏感。当港口企业对于采纳绿色技术的期望感知价值的风险系数较小时,港口企业倾向于规避风险,此时港口企业决定采纳不采取绿色技术的策略,而风险系数的强度变化影响主要体现在演化速率的快慢。随着  $\alpha$  的取值不断增大,港口企业敢于承担更多的风险,选择采纳绿色技术的演化速度变快;  $\alpha$  取值为 0.88 时,港口企业转变为采纳绿色技术策略;若  $\alpha$  取值继续增加,港口企业向采纳绿色技术演化的速度会更快。

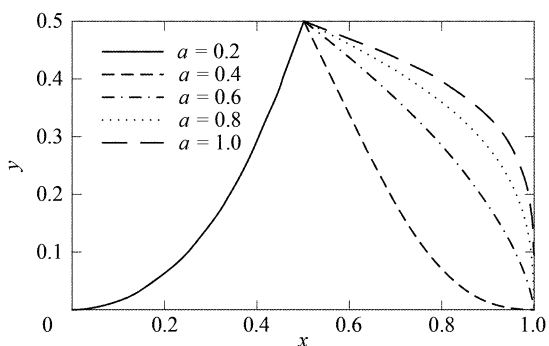
(2) 决策者感知“损失”规避系数  $\lambda$  的灵敏度分析。将  $\lambda$  分别取值为 1、2、2.25、3、4,表示决策者对待损失规避的不同强度,系统演化情况如图 2 所示。

纵向比较图 1 和图 2 可知,港口企业对损失规避系数的变动相对不敏感,且港口企业对待感知价值的“损失”规避系数  $\lambda$  的变动呈现负相关性。港口企业采纳绿色技术的敏感强度体现在损失规避系数变动的趋势,随着港口企业损失规避敏感程度的逐步增强,系统向采纳绿色技术演变

图 2 系统对  $\lambda$  的灵敏度分析Fig. 2 Sensitivity analysis of the system to  $\lambda$ 

的速率越慢。因此,为促进港口企业向采纳绿色技术的平稳发展演化,地方政府需要适当降低港口企业对采纳绿色技术的损失规避心理。

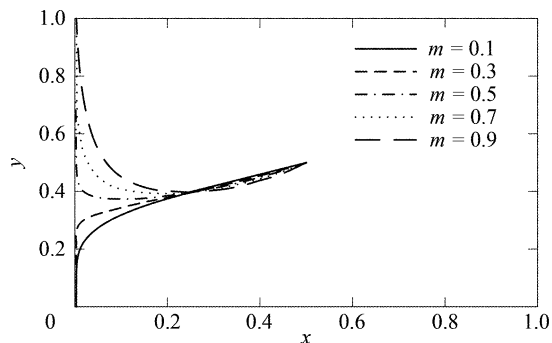
(3) 系统对绿色技术市场采纳率  $a$  的灵敏度分析。 $a$  的取值分别为 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 时,系统演化情况如图 3 所示。

图 3 系统对  $a$  的灵敏度分析Fig. 3 Sensitivity analysis of the system to  $a$ 

观察图 3 可知,当绿色技术的市场采纳率处于较低水平 ( $a = 0.2$ ) 时,此时,港口企业采纳绿色技术的感知收益值过低。尽管绿色技术具有清洁、低碳等技术优势,但港口企业的行为策略仍然向不采纳绿色技术的方向演化。随着绿色技术的市场采纳率逐渐增大,港口企业感知收益值的取值逐步增高,且市场采纳率越高,港口企业向采纳绿色技术的演变速率越快,此时,即便没有地方政府的补贴,港口企业也会自发地选择采纳绿色技术。由此可知,地方政府可以优先鼓励港口企业采纳市场采纳率较高的绿色技术,引导港口企业向采纳绿色技术的方向演化。

(4) 地方政府对港口企业绿色技术采纳监管比率  $m$  的灵敏度分析。 $m$  的取值分别为 0.1、0.3、

0.5、0.7、0.9,表示地方政府对港口企业采纳的监管比率的强度变化,系统演化情况如图 4 所示。

图 4 系统对  $m$  的灵敏度分析Fig. 4 Sensitivity analysis of the system to  $m$ 

观察图 4 可知,系统对于地方政府采取的绿色技术监管比率较为敏感,存在最优外部监管比率抑制港口企业陷入“地方政府补贴,港口企业反而不采纳绿色技术”的困境。当政府监管处于较低水平 ( $m = 0.1$ ) 时,系统向不采纳绿色技术的方向演变。当政府的监管力度超过一定阈值后,地方政府可以通过加大惩罚的手段回收自身投入的港口补贴。随着政府监管比率的不断加大,系统向地方政府补贴,港口企业不采纳绿色技术的均衡状态演变的速率越快。因此,地方政府需要设定合理的监管力度,避免过度向港口企业施压,陷入补贴失效的消极状态。

(5) 碳交易价格  $p$  与地方政府设定的减排力度  $\Delta e$  的灵敏度分析。固定地方政府设定的港口企业减排量,将碳交易价格分别取值为 0.5、1.0、1.5、2.0、5.0 时,系统演化情况如图 5 所示。

当地方政府规定的减排量不变时,随着碳交易价格逐步增大,港口企业逐渐向采纳绿色技术的方向演化以弥补购买碳排放所支出的高昂成本。港口企业对碳排放交易的市场价格与地方政府规定的减排量具有较高的敏感性,存在最优外部碳配额约束可以促使港口企业改变自身的行为策略。增大碳交易价格以及加强港口企业的减排负担对港口企业采纳绿色技术存在较强的刺激作用。以碳交易价格为例,当碳交易价格超过一定阈值后,随着碳交易价格的增长,港口企业采纳绿色技术的演变速率呈现由慢转快的演化趋势。此时,进一步提高碳交易价格有助于港口企业更快地向着采纳绿色技术的方向演变。

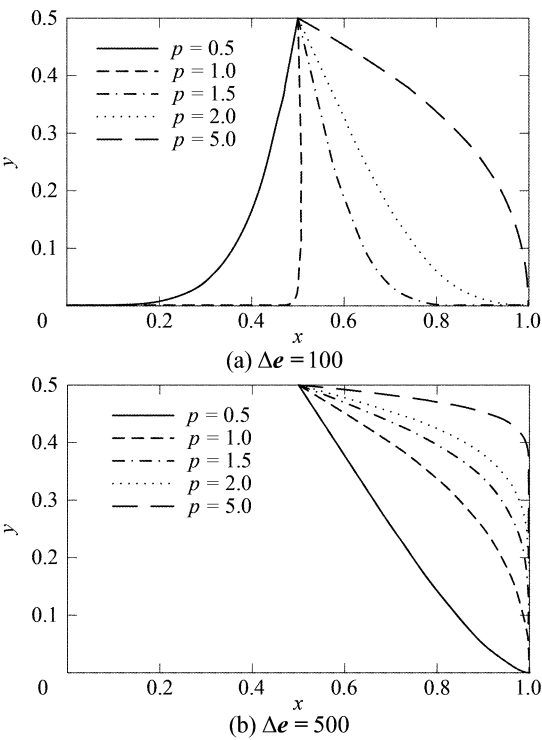


图 5 系统对  $p$  的灵敏度分析

Fig. 5 Sensitivity analysis of the system to  $p$

4 结论及建议

本文利用演化博弈工具对地方政府采取补贴和港口企业采纳绿色技术之间的博弈行为进行研究,讨论了碳排放交易价格、减排力度、政府补贴比率与监管比率、成员风险态度与损失规避等变量变动对博弈双方演化稳定策略的影响。通过理论分析以及数值仿真,得出以下结论:

(1) 提高港口企业采纳绿色技术的感知收益,加大港口企业减排负担是促进港口企业向采纳绿色技术演变的有效手段。前者基于港口企业自身的风险感知,后者多基于碳配额约束强度。同时,地方政府与港口企业对感知收益的风险态度以及损失规避的敏感性不同。针对风险态度较为保守的港口企业,地方政府可以增强其采纳绿色技术的信心从而逐渐引导港口企业采纳绿色技术。对于风险态度较为冒险的港口企业,地方政府可以通过财政补贴以及优先采取市场采纳率较高的绿色技术两个方面促进港口采纳绿色技术的积极性。

(2) 风险系数、损失规避、市场采纳率、监管比率、碳交易价格变动对于系统的演化结果存在

不同的影响路径:风险系数越高,港口企业越敢于承担风险,系统倾向于采取绿色技术。提高绿色技术市场采纳率,加强港口企业面临的减排负担,发挥碳配额约束的外部作用,是促使港口企业采纳绿色技术的有效手段。地方政府无需过度强调监管的重要性,存在最优的外部监管比率,避免陷入补贴失效的消极状态。

基于本文的分析与讨论,对港口企业和地方政府提出以下政策建议:

(1) 港口企业采纳绿色技术的关键因素是要鼓励潜在港口企业敢于“冒风险”。地方政府可以通过加强港口企业对采纳绿色技术的信心、设定绿色港口示范点等方式,鼓励潜在港口企业迈出采纳绿色技术的第一步,最终实现港口企业向采纳绿色技术的方向进行演化。

(2) 地方政府适当对港口企业施加一定的减排压力,在一定程度上有助于激励港口企业采纳绿色技术的积极性。地方政府也需要发挥碳交易市场中“看得见的手”的调控作用,合理平衡碳排放市场中的供需关系,制定合理的碳交易价格与减排力度。为此,在初始的碳配额过程中需要着眼于我国目前的经济发展水平、港口自身的经营效率、港口企业采纳绿色技术的信心等角度综合考虑配置方案,最大限度地激发港口企业采纳绿色技术的动力。最后,地方政府需要拓展多元化的渠道,宣传绿色技术的优势,进而培育港口企业以及班轮公司的绿色意识,促进绿色港口的发展与实现。

参考文献(References):

[1] 马冬,丁焰,尹航,等. 我国船舶港口空气污染防治现状及展望[J]. 环境与可持续发展, 2014, 39(6): 40-44.

MA D, DING Y, YIN H, et al. Outlook and status of ships and ports emission control in China[J]. Environment and Sustainable Development, 2014, 39(6): 40-44. (in Chinese)

[2] RADWAN M E, CHEN J H, WAN Z, et al. Critical barriers to the introduction of shore power supply for green port development: case of Djibouti container terminals[J]. Clean Technologies and Environmental Policy, 2019, 21(6): 1293-1306.

[3] CAO W, LIU K L, XU S, et al. Stabilization control

- strategy for shore power system with surge loads based on virtual synchronous generator[J]. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 2019, 14(3):1045-1054.
- [4] 宋艳琼, 陈灵超, 高海波, 等. 岸电对接靠港船舶无缝供电控制方法的改进[J]. *船海工程*, 2020, 49(3):101-105.
- SONG Y Q, CHEN L C, GAO H B, et al. Improvement of the control method of seamless shore power supply for berthing ships in port[J]. *Ship & Ocean Engineering*, 2020, 49(3):101-105. (in Chinese)
- [5] ZIS T P V. Prospects of cold ironing as an emissions reduction option [J]. *Transportation Research Part A*, 2019, 119:82-95.
- [6] KOTRIKLA A M, LILAS T, NIKITAKOS N. Abatement of air pollution at an Aegean island port utilizing shore side electricity and renewable energy[J]. *Marine Policy*, 2017, 75:238-248.
- [7] SCIBERRAS E A, ZAHAWI B, ATKINSON D J. Electrical characteristics of cold ironing energy supply for berthed ships [J]. *Transportation Research Part D*, 2015, 39:31-43.
- [8] 桑高峰, 孟燕萍. 碳税政策下港口与船舶减排决策的博弈分析[J]. *科技管理研究*, 2019, 39(21):227-235.
- SANG G F, MENG Y P. Game analysis of port and ship decisions on emission reduction under carbon tax policy [J]. *Science and Technology Management Research*, 2019, 39(21):227-235. (in Chinese)
- [9] 王日金, 孟燕萍. 考虑低碳偏好和碳交易的港口减排策略[J]. *上海海事大学学报*, 2020, 41(2):33-38.
- WANG R J, MENG Y P. Port emission reduction strategies considering low carbon preference and carbon trading [J]. *Journal of Shanghai Maritime University*, 2020, 41(2):33-38. (in Chinese)
- [10] FAN K, HUI E C M. Evolutionary game theory analysis for understanding the decision-making mechanisms of governments and developers on green building incentives [J]. *Building and Environment*, 2020, 179:76-90.
- [11] 徐艳, 孟燕萍. 强制减排下政府与港口企业的演化博弈[J]. *中国科学技术大学学报*, 2019, 49(9):762-772.
- XU Y, MENG Y P. Evolution game between government and port enterprises under mandatory emission reduction[J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2019, 49(9):762-772. (in Chinese)
- [12] 闫妍, 张锦, 唐秋宇. 基于改进前景理论的航空货运联盟博弈分析[J]. *北京航空航天大学学报*, 2020, 46(7):1247-1257.
- YAN Y, ZHANG J, TANG Q Y. Game analysis of air-line freight alliance based on improved prospect theory [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2020, 46(7):1247-1257. (in Chinese)
- [13] 刁姝杰, 匡海波, 孟斌, 等. 基于前景理论的 LSSC 服务质量管控策略的演化博弈分析[J]. *中国管理科学*, 2021, 29(7):33-45.
- DIAO S J, KUANG H B, MENG B, et al. Evolutionary game analysis of LSSC service quality control strategy based on prospect theory[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2021, 29(7):33-45. (in Chinese)
- [14] NELSON R, WINTER S. An evolutionary theory of economics change[M]. Cambridge: The Belknap Press of Harvard University Press, 1982:75.
- [15] 吴斌, 程晶, 宋琰. 心理账户视角下电商平台“杀熟”现象演化博弈分析[J]. *运筹与管理*, 2020, 29(11):37-44.
- WU B, CHENG J, SONG Y. Evolutionary game analysis of the phenomenon of deceiving acquaintances in e-commerce platform from the perspective of mental account[J]. *Operations Research and Management Science*, 2020, 29(11):37-44. (in Chinese)
- [16] 王军. 港口岸电应用案例分析[J]. *中国设备工程*, 2021(14):254-255.
- WANG J. Port shore power application case analysis [J]. *China Plant Engineering*, 2021(14):254-255. (in Chinese)
- [17] KAHNEMAN D, TVERSKY A. Prospect theory: an analysis of decision under risk [J]. *Econometrica*, 1979, 47(2):263-292.
- [18] 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(2):25-37.
- WEI Q, PAN Y, LI L J. A comparative study of corporate emission reduction and social welfare under carbon quota and carbon subsidy policies[J]. *South China Finance*, 2021(2):25-37. (in Chinese)