

DOI: 10.3969/j.issn.2096-8248.2024.02.009

政府监管下港口合作减排的博弈分析*

周施敏, 黄泉雄

(上海海事大学 物流科学与工程学院, 上海 201306)

摘要: 减少碳排放是全球共同面临的挑战。港口是全球贸易的重要节点, 通过合作减排, 可以共同降低碳排放, 减缓气候变化的进程。然而, 在港口合作减排过程中, 经常会出现资源不匹配和港口之间缺乏协调等问题。为了鼓励自愿合作, 将相邻港口之间的竞争转化为产生更大效率的整体协同作用, 采用演化博弈的方法研究政府监管下港口企业合作减排演化过程, 探讨港口之间的合作关系以及政府在港口合作过程中的作用。结果表明, 适当的利润分配系数和奖惩政策可以促进三方博弈系统向稳定策略演化, 并为政府和港口提供了相关建议。

关键词: 碳减排; 政府监管; 演化博弈; 合作减排

中图分类号: U6

文献标志码: A

文章编号: 2096-8248(2024)02-0061-11

引用格式: 周施敏, 黄泉雄. 政府监管下港口合作减排的博弈分析[J]. 江苏海洋大学学报(自然科学版), 2024, 33(2): 61-71.

Game Analysis of Port Cooperation Emission Reduction under Government Regulation

ZHOU Shimin, HUANG Xiaoxiong

(School of Logistics Science and Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Carbon reduction is a global challenge. Ports are important nodes in global trade, and through cooperation in emission reduction, jointly reducing carbon emissions and slowing down the process of climate change can be achieved. However, in the process of port cooperation and emission reduction, there are often problems such as resource mismatch and lack of coordination between ports. Therefore, in order to encourage voluntary cooperation and transform competition between adjacent ports into a more efficient overall collaborative effect, this article adopts an evolutionary game method to study the evolution process of government regulated port enterprise cooperation in emission reduction, in order to explore the cooperative relationship between ports and the role of the government in the port cooperation process. The results indicate that appropriate profit distribution coefficients and reward and punishment policies can promote the evolution of the tripartite game system towards a stable strategy, and provide relevant suggestions for the government and ports.

Key words: carbon emission reduction; government regulation; evolutionary game; cooperative emission reduction

减少碳排放现已成为世界各国共同的责任。我国也出台了许多文件和标准, 包括《上海港-洛杉矶

* 收稿日期: 2023-12-05; 修订日期: 2024-02-24

作者简介: 周施敏(2000—), 女, 广东广州人, 硕士研究生, 研究方向为绿色港航供应链, (E-mail) sicily22895@163.com。

港绿色航运走廊实施计划纲要》和《绿色港口等级评价指南》(JTS/T 105-4—2020)等,用以推动海港的节能减排工作。而作为我国改革开放政策的最前沿和主要战场,海港在维护我国交通安全和推动外向型经济发展过程中起着举足轻重的作用。

基于对港口资源利用效率低下、港口市场竞争无序以及港口与城市发展不协调等问题的认识,中国港口工业一直在探索港口合作的路径。通过合作,港口旨在优化其资源配置,增强其整体竞争力,并与城市共同发展,从而促进相互间的协调进步。我国各级政府以及相关从业人员已经充分认识到港口合作的重要性,出台相关政策和措施,以加强港口规划和管理,引导港口与城市协调发展,积极推动港口合作。通过综合考虑港口发展的经济、环境和社会效益,中国港口工业朝着更加协调、高效和可持续发展的方向迈进^[1]。2015年,太仓港与上海港联合采纳了“沪太通”这一创新性的管理策略,意味着太仓港与上海港合作,成为上海港进一步扩展的一部分,并且引进宁波舟山港资金、政策、人才和服务等管理模式对太仓港进行投资开发。这一策略利用资本作为连接,促进港口资源的整合,形成了坚实的战略伙伴关系,有效地解决了多年来由于周边港口限制航运资源无法进入太仓港的难题,从而显著增强了太仓港的综合实力。上海港与洛杉矶港联合编制了《上海港-洛杉矶港绿色航运走廊实施计划纲要》。该纲要由上海港、洛杉矶港和城市气候领导联盟(C40)等主要发起方与各参与方共同协作,旨在通过最清洁、最低碳的方式,在上海港和洛杉矶港之间实现货物运输。对于港口合作的概念,根据裴晓培等^[2]指出,政府和港口管理者应按照从联盟到契约两阶段整合模式推动区域港口集团的合作。这样的模式能够发挥政府对合作过程的引导作用,在合作过程中容易平衡与主要港口的关系,同时也促进了区域港口群一体化程度的逐步深化。在这里,“联盟”是指区域内不同的港口实体在政府的指导下形成一个合作实体,其中每个港口在联盟制定的规则下独立运营。“契约”是指区域内不同港口主体联合起来,形成一个港口集团,共同地管理组织制定服务标准和发展战略,共享利益和风险,通过行政和企业管理实现港口的统一。

Meng等^[3]研究绿色港口转型的利益相关方,构建了一个关于绿色智能港口发展的“政府-港口-第三方组织”演化博弈模型,研究发现影响港口战略选择的主要因素是建设绿色智能港口的效益和政府

监管力度。相比之下,第三方机构对港口的影响较小。Dong等^[4]分析区域港口一体化效应,构建了一个三阶段非合作博弈模型。他们考虑了港口间的协同效应和竞争效应,发现较高程度的区域港口一体化可以降低装卸费用并增加集装箱吞吐量。Gao等^[4]研究了政府行为对区域港口群演化的影响,构建了一个演化博弈模型。研究发现,在多港口地区中,更具竞争力的港口形成联盟是港口整合成功的关键。此外,港口之间利润分配系数和港口选择一体化补偿费用也可以促进博弈系统内的优势发展。

亚洲清洁空气中心发布的《2020 蓝港先锋:中国典型港口空气和气候协同力评价》报告指出,随着水运业加速发展,该行业带来的污染物和二氧化碳排放非道路移动源中所占的比例也在逐渐上升。因此,在交通领域实施减排措施,港口和船舶具有巨大潜力。Chen等^[5]构建了区域优化与博弈相结合的合作减排模型,来研究参与区域间合作收益公平分配的机制,结果发现与应用该模型前相比,CER模型充分考虑了不同地区的二氧化碳减排能力和经济发展水平。这为每个地区和整个国家带来了双赢的局面。

综上所述,在港口之间,竞争和合作并存,并且每个港口的减排措施会对其他港口产生影响,港口之间存在博弈关系。因此,本文构建了政府监管下区域港口群演化博弈论模型,分析了合作与竞争减排过程中政府与港口主体的关系,最后为港口经营者、管理者及相关政府部门提出了建议。这里合作指的是港口之间的“联盟”,竞争指的是“契约”。

1 演化博弈分析

1.1 模型假设

(1) 选取政府和两个港口作为博弈的主体,研究三方策略的演化稳定性。根据演化博弈理论^[6],也就是博弈参与各方均有限理性,他们需要通过不断地学习、改进来接近最优策略,而不是在最开始就找到最优策略。

(2) 假设政府和港口采取以下策略:政府的行为策略集是{严格监管,放松监管};港口1的行为策略集是{合作减排,竞争减排};港口2的行为策略集也是{合作减排,竞争减排}。政府选择“严格监管”和“放松监管”策略的概率分别为 x 和 $1-x$;港口1选择“合作减排”和“竞争减排”策略的概率分别为 y 和 $1-y$;港口2选择“合作减排”和“竞争减

排”策略的概率分别为 z 和 $1-z$ 。

(3) 假设博弈中的三方在有限理性下运作,会反复博弈。因此,本研究忽略了政府与两个港口之间的博弈秩序。

(4) 基于以上假设,参考文献[4,7-8],相关参数和变量的符号说明和定义如表 1 所示。

表 1 三方演化博弈模型变量

Table 1 Variables of tripartite evolutionary game model

参数	参数解释
S_1	港口 1 选择竞争时的初始收益
S_2	港口 2 选择竞争时的初始收益
S_3	政府放松监管时的初始收益
S	港口 1 和港口 2 合作减排时的额外收益
θ	分配系数
W	港口合作减排带来的社会福利收益
R_1	政府严格监管时对港口 1 合作减排时的补贴
R_2	政府严格监管时对港口 2 合作减排时的补贴
R	政府放松监管时对举报对方竞争减排的奖励
F_1	政府严格监管时对港口 1 竞争减排时的罚款
F_2	政府严格监管时对港口 2 竞争减排时的罚款
F	政府放松监管时对港口被举报竞争减排的罚款
C_1	港口 1 选择合作减排的成本
C_2	港口 2 选择合作减排的成本
变量	变量解释
x	政府严格监管的概率 $0 < x < 1$
y	港口 1 的合作概率 $0 < y < 1$
z	港口 2 的合作概率 $0 < z < 1$

此外, $R > F, R_1 > F_1, R_2 > F_2$, 且 $R - R_2 > R - R_1 > F - F_2 > F - F_1$ 。

1.2 支付矩阵

基于以上模型参数,得出演化博弈模型中政府、港口 1、港口 2 支付矩阵,如表 2 所示。

表 2 三方演化博弈支付矩阵

Table 2 Payment matrix of tripartite evolutionary game

港口 1	港口 2	政府	
		严格监管 x	放松监管 $1-x$
港口 1	港口 2	$S_3 + W - R_1 - R_2$	S_3
	z	$S_1 + \theta S + R_1 - C_1$	$S_1 + \theta S - C_1$
y	港口 2	$S_2 + (1-\theta)S + R_2 - C_2$	$S_2 + (1-\theta)S - C_2$
	$1-z$	$S_3 + W - R_1 + F_2$	$S_3 - R + F$
港口 1	港口 2	$S_1 + R_1 - C_1$	$S_1 + R - C_1$
	z	$S_2 - F_2$	$S_2 - F$
$1-y$	港口 2	$S_3 + W - R_2 + F_1$	$S_3 - R + F$
	$1-z$	$S_1 - F_1$	$S_1 - F$
港口 1	港口 2	$S_2 + R_2 - C_2$	$S_2 + R - C_2$
	z	$S_3 + W + F_1 + F_2$	S_3
$1-y$	港口 2	$S_1 - F_1$	S_1
	$1-z$	$S_2 - F_2$	S_2

2 演化博弈分析

2.1 三方演化博弈分析

(1) 政府的稳定性分析。假设政府采取{严格监管}策略时的期望收益为 G_1 , 采取{放松监管}策略时的期望收益为 G_2 , 政府的平均期望为 \bar{G} , 则有

$$G_1 = y(z(S_3 + W - R_1 - R_2) +$$

$$(1-z)(S_3 + W - R_1 + F_2)) + (1-y)(z(S_3 + W - R_2 + F_1) + (1-z)(S_3 + W + F_1 + F_2)), \quad (1)$$

$$G_2 = y(zS_3 + (1-z)(S_3 - R + F)) +$$

$$(1-y)(z(S_3 - R + F) + (1-z)S_3), \quad (2)$$

$$\bar{G} = xG_1 + (1-x)G_2. \quad (3)$$

由政府的收益函数可知政府的复制动态方程为

$$F(x) = dx/dt = x(G_1 - \bar{G}) =$$

$$-x(1-x)(-W + F_1(-1+y) +$$

$$(F - R + R_1)y + F_2(-1+z) +$$

$$(F - R + R_2 - 2Fy + 2Ry)z). \quad (4)$$

参考复制动力学方程的稳定性定理, 当满足 $F(x) = 0$ 和 $F'(x) = dF(x)/dx < 0$ 两个条件时, x 为演化的稳定点。其中, 由政府复制动态方程可知

$$F'(x) = (1-2x)(-W + F_1(-1+y) +$$

$$(F - R + R_1)y + F_2(-1+z) +$$

$$(F - R + R_2 - 2Fy + 2Ry)z).$$

当 $y^* = F_1 + W - F_2(z-1) - z(F - R + R_2) / F_1 + F - R + R_1 - z(2F + 2R)$ 时, 则有 $F(x) \equiv 0$, x 取任何值都处于稳定状态, 即当港口 1 选择合作的概率等于稳定临界值时, 对于政府, 严格监管或放松监管之间没有差异, 其演化路径如图 1a 所示。当 $y^* \neq F_1 + W - F_2(z-1) - z(F - R + R_2) / F_1 + F - R + R_1 - z(2F + 2R)$ 时, 令 $F(x) = 0$, 可知 $x_1 = 0, x_2 = 1$ 为 x 稳定状态的两种可能。当 $y^* > F_1 + W - F_2(z-1) - z(F - R + R_2) / F_1 + F - R + R_1 - z(2F + 2R)$ 时, $dF(x)/dx|_{x=0} > 0, dF(x)/dx|_{x=1} < 0$ 。因此, $x=1$ 是此状态下的平衡点, 这表明, 当港口 1 选择合作的概率大于稳定的临界值时, 则政府最终会倾向于选择严格监管, 其演化路径如图 1b 所示。当 $y^* < F_1 + W - F_2(z-1) - z(F - R + R_2) / F_1 + F - R + R_1 - z(2F + 2R)$ 时, $dF(x)/d(x)|_{x=0} < 0, dF(x)/dx|_{x=1} > 0$ 。因此, $x=0$ 是此状态下的平衡点。当港口 1 选择合作的概率小于稳定的临界值时, 则政府最终会倾向于选择放松监管, 其演化路径如图 1c 所示。

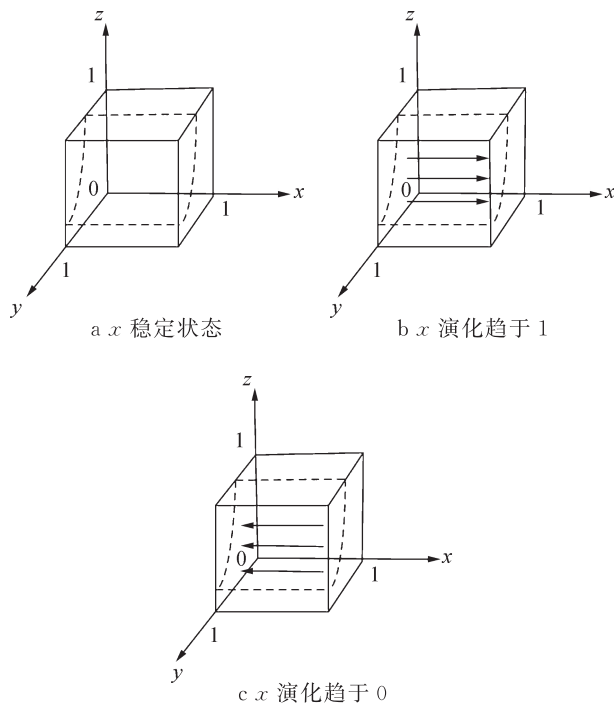


图1 政府决策演进的动态复制阶段图

Fig. 1 Dynamic replication phase diagram of government decision-making evolution

(2) 港口1的稳定性分析。港口1采取{合作减排}策略的期望收益为 P_1^1 , 采取{竞争减排}策略的期望收益为 P_1^2 , 港口1的平均期望为 \bar{P}_1 , 则有

$$P_1^1 = x(z(S_1 + \theta S + R_1 - C_1) + (1-z)(S_1 + R_1 - C_1)) + (1-x)(z(S_1 + \theta S - C_1) + (1-z)(S_1 + R - C_1)), \quad (5)$$

$$P_1^2 = x(z(S_1 - F_1) + (1-z)(S_1 - F_1)) + (1-x)(z(S_1 - F) + (1-z)S_1), \quad (6)$$

$$\bar{P}_1 = yP_1^1 + (1-y)P_1^2. \quad (7)$$

由港口1的收益函数知港口1复制动态方程为

$$F(y) = dy/dt = y(P_1^1 - \bar{P}_1) - y(1-y)(C_1 - (F_1 + R_1)x - (F + \theta S - Fx)z + R(-1 + x + z - xz)). \quad (8)$$

当满足 $F(y) = 0$ 和 $F'(y) = dF(y)/dy < 0$ 两个条件时, y 为演化的稳定点。其中, 由港口1的复制动态方程可知 $F'(y) = (1-2y)(C_1 - (F_1 + R_1)x - (F + \theta S - Fx)z + R(-1 + x + z - xz))$ 。当 $z^* = C_1 - x(F_1 + R_1) + R(x-1)/F - xF + \theta S + R(x-1)$ 时, 则有 $F(y) = 0$, y 取任何值都处于稳定状态, 即当港口2选择合作的概率等于稳定临界值时, 对于港口1而言, 合作或竞争之间没有差异, 其演化路径如图2a所示。当 $z^* \neq C_1 - x(F_1 + R_1) + R(x-1)/F - xF + \theta S + R(x-1)$ 时, 令 $F(y) = 0$, 可知

$y_1 = 0, y_2 = 1$ 为 y 的两种可能稳定状态。当 $z^* > C_1 - x(F_1 + R_1) + R(x-1)/F - xF + \theta S + R(x-1)$ 时, $dF(y)/dy|_{y=0} > 0, dF(y)/dy|_{y=1} < 0$ 。因此, $y = 1$ 是此状态下的平衡点, 这表明, 当港口2选择合作的概率大于稳定的临界值时, 则港口1最终也会倾向于选择合作, 其演化路径如图2b所示。当 $z^* < C_1 - x(F_1 + R_1) + R(x-1)/F - xF + \theta S + R(x-1)$ 时, $dF(y)/dy|_{y=0} < 0, dF(y)/dy|_{y=1} > 0$ 。因此, $y = 0$ 是此状态下的平衡点, 即当港口2选择合作的概率小于稳定的临界值时, 则港口1最终将倾向于选择竞争策略, 其演化路径如图2c所示。

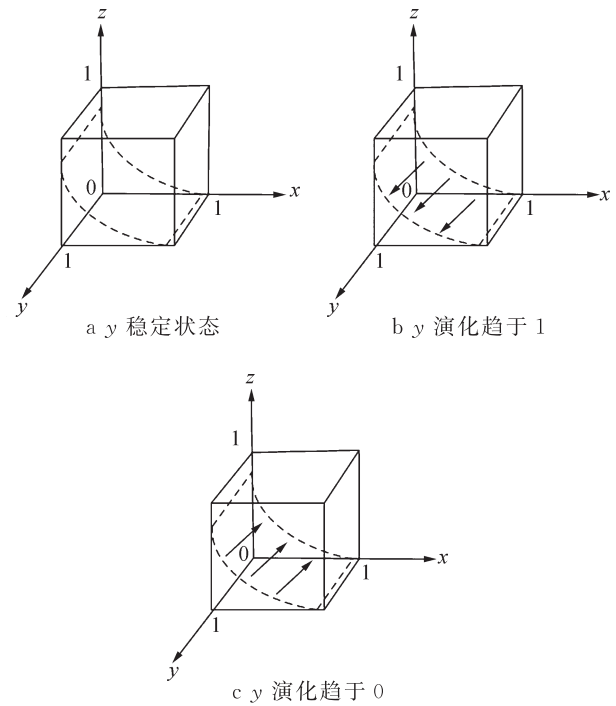


图2 港口1决策演进的动态复制阶段图

Fig. 2 Dynamic replication phase diagram of decision-making evolution in Port 1

(3) 港口2的稳定性分析。港口2采取{合作减排}策略的期望收益为 P_2^1 , 采取{竞争减排}策略的期望收益为 P_2^2 , 港口2的平均期望为 \bar{P}_2 , 则有

$$P_2^1 = x(y(S_2 + (1-\theta)S + R_2 - C_2) + (1-y)(S_2 + R_2 - C_2)) + (1-x)(y(S_2 + (1-\theta)S - C_2) + (1-y)(S_2 + R - C_2)), \quad (9)$$

$$P_2^2 = x(y(S_2 - F_2) + (1-y)(S_2 - F_2)) + (1-x)(y(S_2 - F_2) + (1-y)S_2), \quad (10)$$

$$\bar{P}_2 = zP_2^1 + (1-z)P_2^2. \quad (11)$$

由港口2的收益函数知港口2复制动态方程为

$$F(z) = dz/dt = z(P_2^1 - \bar{P}_2) =$$

$$-z(1-z)(C_2-x(F_2+R_2))+(\theta-1)S_y)+F(x-1)y+R(x-1+y-xy)。(12)$$

当满足 $F(z)=0$ 和 $F'(z)=dF(z)/dz<0$ 个条件时, z 为演化的稳定点。其中,由港口 2 的复制动态方程可知 $F'(z)=(1-2z)(C_2-x(F_2+R_2))+(\theta-1)S_y)+F(x-1)y+R(x-1+y-xy)$ 。当 $x^*=C_2-F_y+S_y(\theta-1)+R(y-1)/F_2+R_2-F_y+R(y-1)$ 时,则有 $F(z)\equiv 0$, z 取任何值都处于稳定状态,即当政府选择严格监管的概率等于稳定临界值时,那么港口 2 选择合作还是竞争就没有区别,其演化路径如图 3a 所示。当 $x^*\neq C_2-F_y+S_y(\theta-1)+R(y-1)/F_2+R_2-F_y+R(y-1)$ 时,令 $F(z)=0$,可知 $z_1=0, z_2=1$ 为 z 两种可能稳定状态。当 $x^*>C_2-F_y+S_y(\theta-1)+R(y-1)/F_2+R_2-F_y+R(y-1)$ 时, $dF(z)/dz|_{z=0}>0, dF(z)/dz|_{z=1}<0$ 。因此, $z=1$ 是此状态下的平衡点。即当政府选择严格监管的概率大于稳定的临界值时,那么港口 2 最终会倾向于选择合作,其演化路径如图 3b 所示。当 $x^*<C_2-F_y+S_y(\theta-1)+R(y-1)/F_2+R_2-F_y+R(y-1)$ 时, $dF(z)/dz|_{z=0}<0, dF(z)/dz|_{z=1}>0$ 。因此, $z=0$ 是此状态下的平衡点。即政府选择严格监管的概率小于稳定的临界值时,那么港口 2 最终会倾向于选择竞争减排的策略,其演化路径如图 3c 所示。

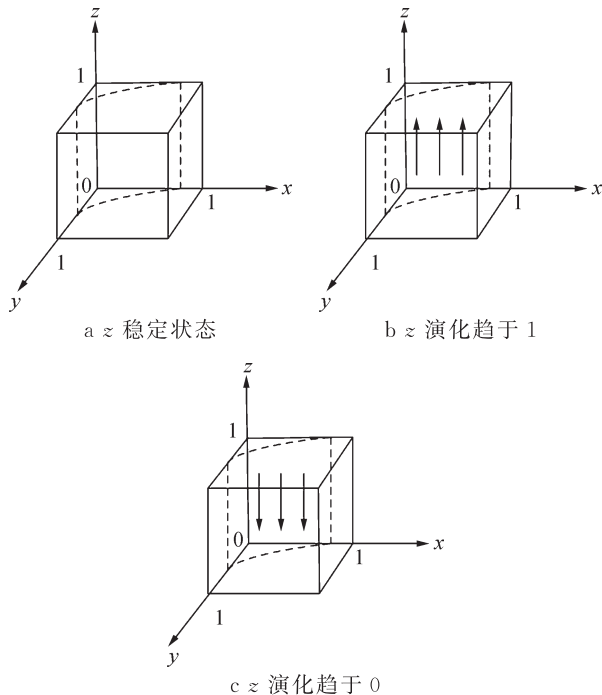


图 3 港口 2 决策演进的动态复制阶段图

Fig. 3 Dynamic replication phase diagram of decision-making evolution in Port 2

2.2 平衡点稳定性分析

由上述对 3 个主体演化博弈的复制动态方程可得雅可比矩阵 J , 即

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial G}{\partial x} & \frac{\partial G}{\partial y} & \frac{\partial G}{\partial z} \\ \frac{\partial S}{\partial x} & \frac{\partial S}{\partial y} & \frac{\partial S}{\partial z} \\ \frac{\partial M}{\partial x} & \frac{\partial M}{\partial y} & \frac{\partial M}{\partial z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} J_1 & J_2 & J_3 \\ J_4 & J_5 & J_6 \\ J_7 & J_8 & J_9 \end{pmatrix}, (13)$$

$$J_1 = x(z(F-R+R_2-2F_y+2R_y)-W+F_1(y-1)+F_2(z-1)+y(F-R+R_1))+(x-1)(z(F-R+R_2-2F_y+2R_y)-W+F_1(y-1)+F_2(z-1)+y(F-R+R_1)), (14)$$

$$J_2 = -y(y-1)(F_1+R_1-zF+R(z-1)), (15)$$

$$J_3 = -z(z-1)(F_2+R_2-F_y+F(y-1)), (16)$$

$$J_4 = x(x-1)(F+F_1-R+R_1-z(2F-2R)), (17)$$

$$J_5 = y(C_1-x(F_1+R_1)-z(F-F_x+\theta S)+R(x+z-xz-1))+(y-1)(C_1-x(F_1+R_1)-z(F-F_x+\theta S)+R(x+z-xz-1)), (18)$$

$$J_6 = -z(z-1)(F(x-1)+(\theta-1)S-R(x-1)), (19)$$

$$J_7 = x(x-1)(F+F_2-R+R_2-2F_y+2R_y), (20)$$

$$J_8 = -y(y-1)(F-xF+\theta S+R(x-1)), (21)$$

$$J_9 = z(C_2-x(F_2+R_2)+R(x+y-xy-1)+F_y(x-1)+S_y(\theta-1))+(z-1)(C_2-x(F_2+R_2)+R(x+y-xy-1)+F_y(x-1)+S_y(\theta-1)), (22)$$

$$\begin{cases} -W+F_1(y-1)+(F-R+R_1)y+F_2(z-1)+(F-R+R_2-2F_y+2R_y)z=0, \\ C_1-(F_1+R_1)x-(F+\theta S-F_x)z+R(-1+x+z-xz)=0, \\ C_2-x(F_2+R_2)+(\theta-1)S_y+F(x-1)y+R(x-1+y-xy)=0. \end{cases} (23)$$

对复制动态方程联立式(4),(8),(12)求解出 x, y, z 的值,可以得到 $E_1(0,0,0), E_2(1,0,0), E_3(0,1,0), E_4(0,0,1), E_5(1,1,0), E_6(1,0,1), E_7(0,1,1)$ 和 $E_8(1,1,1)$ 这 8 个特殊的均衡点,在每个均衡点上的所有利益相关者都是采取纯策略。当条

件(23)满足时,在均衡解域中也存在混合策略的平衡点,即 $E_9(x^*, y^*, z^*)$ 。

表3是各平衡点特征值及稳定性分析结果,通过分析微分方程雅可比矩阵 $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ 的局部稳定性,得到 ESS(演化稳定策略)。根据李亚普诺夫间接法可知,若平衡点的3个特征值均为负,则该平衡

点为稳定策略;若3个特征值均为正,则该平衡点为不稳定策略;若3个特征值仅部分为正,那么这个平衡点就是不稳定的策略;若3个特征值只有部分为正,那么这个平衡点就是鞍点。认为演化博弈平衡稳定解要求满足严格纳什均衡,因此不需要考虑平衡点 E_9 。

表3 均衡点对应的雅可比矩阵特征值

Table 3 Eigenvalues of Jacobi matrix corresponding to equilibrium points

平衡点	特征值 1	特征值 2	特征值 3
$E_1(0,0,0)$	$R-C_1$	$R-C_2$	F_1+F_2+W
$E_2(1,0,0)$	$-(F_1+F_2+W)$	$F_1-C_1+R_1$	$F_2-C_2+R_2$
$E_3(0,1,0)$	C_1-R	$F-C_2+(1-\theta)S$	$F_2-F+R-R_1+W$
$E_4(0,0,1)$	$F+\theta S-C_1$	C_2-R	$F_1-F+R-R_2+W$
$E_5(1,1,0)$	$C_1-F_1-R_1$	$F-F_2-R+R_1-W$	$F_2-C_2+R_2-(1-\theta)S$
$E_6(1,0,1)$	$C_2-F_2-R_2$	$F_1-C_1+R_1+\theta S$	$F-F_1-R+R_2-W$
$E_7(0,1,1)$	$W-R_1-R_2$	$C_1-F-\theta S$	$C_2-F-(1-\theta)S$
$E_8(1,1,1)$	$-(W-R_1-R_2)$	$C_1-F_1-R_1-\theta S$	$C_2-F_2-R_2-(1-\theta)S$

由于参数众多和场景的复杂性,很难确定某些特征值的迹象。根据已知条件 $R > F, R_1 > F_1, R_2 > F_2$,进行初步分析可知,主要有3种情形。

情形1:当 $F_1-C_1+R_1 < 0, F_2-C_2+R_2 < 0$ 时,此状态下 $E_2(1,0,0)$ 的特征值都小于零。港口合作时的收益小于港口竞争时的收益。因此,港口1和港口2选择竞争而不是合作。作为监管方,政府不愿意看到这样的事情发生,因此政府选择严格监管,考虑到该地区的整体利益,目的是为未来的港口合作奠定基础。此时系统的稳定策略为{严格监管,竞争减排,竞争减排}。

情形2:当 $W-R_1-R_2 < 0, C_1-F-\theta S < 0, C_2-F-(1-\theta)S < 0$ 时,此状态下 $E_7(0,1,1)$ 的特征值都小于零。区域港口合作带来的大量福利收益激励港口1和港口2选择合作减排策略。此外,在这种情况下,严格监管对政府的好处低于放松监管时的好处,因此政府倾向于采取更不干涉的政策方法。最终,这在三方博弈系统中产生了演化上稳定的平衡状态系统。此时的稳定策略为{放松监管,合作减排,合作减排}。

情形3:当 $W-R_1-R_2 > 0, C_1-F_1-R_1-\theta S < 0, C_2-F_2-R_2-(1-\theta)S < 0$ 时,此状态下 $E_8(1,1,1)$ 的特征值都小于零。当两个港口都采用合作策略时,每个港口的收益相对较高。政府还从严格监管的策略中获得较高回报。因此,为了在政府的严格监管下实现自身利益最大化,港口1和港口2将各自决定结成联盟。系统此时的稳定策略为

{放松监管,合作减排,合作减排}。

3 模型实证分析

通过分析上述内容,本文将开发一套动态复制方程,涉及政府与两个港口。此任务将通过 MATLAB 软件完成。该软件支持数值仿真,能够通过图形展示向量和矩阵,并进行相关标注和打印。其强大之处还体现在二维和三维图形展示能力、图像处理技术、动画创作和表达式的图形映射功能。因此,通过数据模拟可以更直观地获得三方演化博弈的过程和整个系统的最终稳定状态。分析相关参数对三大利益相关者策略选择的影响,为供应链转型为绿色供应链提供理论参考。

3.1 ESSs 的演化轨迹

在模型假设和稳定条件下,对参数赋值,并对 ESSs 的演化轨迹进行了三方博弈平衡点的数值模拟。由于交通运输的流动性强,运输过程中碳排放的收集和划分范围难以统一,因此,必须将排放数据与现有研究相结合进行模糊处理。参考文献[4,7-8]经过数值模糊处理,最终整理出参数值。该值仅代表一般比例,主要用于验证模型及相关参数。

在情形1中,参数的初始值设置为 $C_1=35, C_2=29, W=28, S=60, \theta=0.6, R_1=4, R_2=3, R=8, F_1=2, F_2=1, F=5$ 时(单位:万元),数值模拟结果如图4和图5所示。

为了保证仿真结果的稳定性,采用3个初始概

率值(0.3,0.5,0.8)进行演化博弈分析。如图 4 所示,无论三方系统设置的初始概率如何,在情形 1 中,最终都会选择平衡状态 $E_2(1,0,0)$ 。这一结果表明,当港口合作减排奖励小于港口合作减排的成本减去罚款时,港口倾向于选择竞争减排,政府会进行严格监管。当初始概率调整为 0.3 和 0.5 时,政府倾向于进行严格监管。然而,实际上,情形 1 的这种结果不太可能发生。在严格监管的策略下,政府将社会责任转移到港口,从而激励港口分配沿海资源以促进腹地的经济发展,而不是仅仅追求自身利益的最大化。在这种情况下,政府可以调整监管方式,努力为两个港口之间的合作和未来的整合创造空间。图 5 列出了 50 次演化博弈的结果,表明港口 1 和港口 2 选择合作概率趋于 0。同时,政府选择严格监管策略的可能性趋于 1。图 5 中显示的结果与图 4 中列出的结果一致,后者验证的是情形 1 的渐近稳定演化平衡状态。

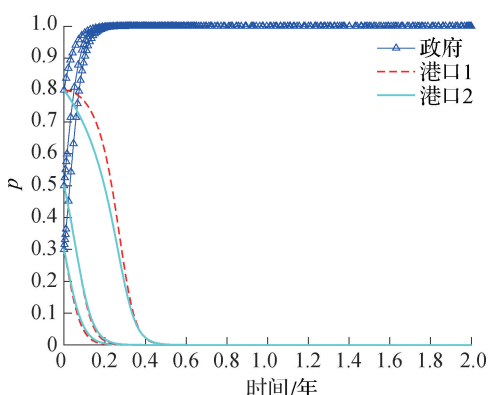


图 4 情形 1 不同初始概率演化博弈结果

Fig. 4 Evolutionary game results with different initial probabilities of Scenario 1

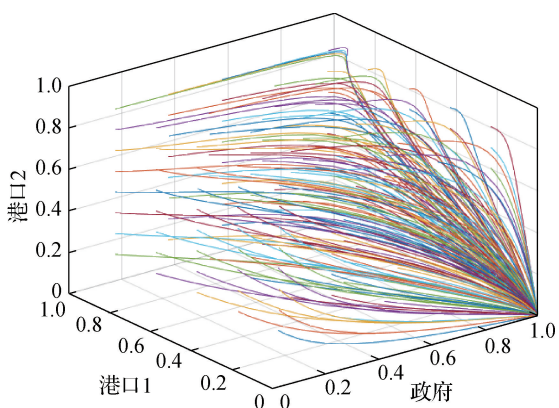


图 5 情形 1 的 50 次演化博弈结果

Fig. 5 50 evolutionary game results for Scenario 1

在情形 2 中,参数的初始值设置为 $C_1=15$, $C_2=12$, $W=8$, $S=120$, $\theta=0.6$ 时(单位:万元),数值模拟结果如图 6 和图 7 所示。如图 6 所示,无论三方系统设置的初始概率如何,在情形 2 中,最终都会选择平衡状态 $E_7(0,1,1)$ 。这一结果表明,当港口合作减排给政府带来的社会评价收益小于政府给合作减排港口的补偿时,港口合作减排的总效益大于港口竞争时的总效益,港口 1 和港口 2 倾向于选择合作,但对于政府来说严格监管效益低,政府逐步放松监管。图 7 列出了 50 次演化博弈的结果,表明港口 1 和港口 2 选择合作概率趋于 1。同时,政府选择严格监管策略的可能性趋于 0。图 7 中显示的结果与图 6 中列出的结果一致,后者验证的是情形 2 的渐近稳定演化平衡状态。

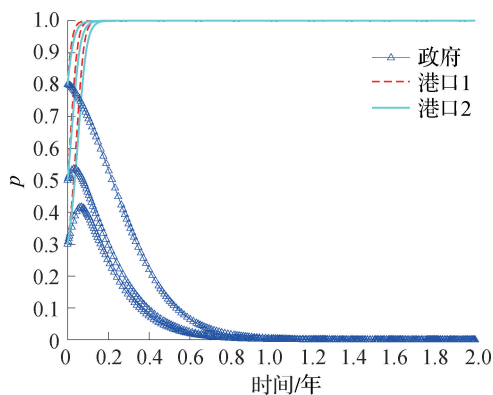


图 6 情形 2 不同初始概率演化博弈结果

Fig. 6 Evolutionary game results with different initial probabilities of Scenario 2

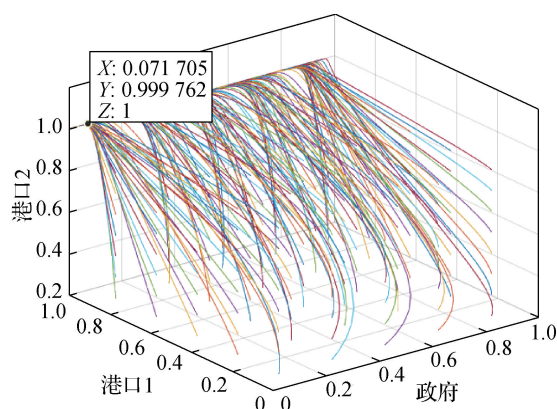


图 7 情形 2 的 50 次演化博弈结果

Fig. 7 50 evolutionary game results for Scenario 2

在情形 3 中,参数的初始值设置为 $C_1=15$, $C_2=12$, $W=28$, $S=60$, $\theta=0.6$ 时(单位:万元),数值模拟结果如图 8 和图 9 所示。与情形 1 的模拟检

验分析一样,在情形3中,选择了演化博弈分析的3个初始概率值(0.3,0.5,0.8)。如图8所示,无论三方系统的初始概率如何,在情形3下,稳定平衡状态最终演变为 $E_8(1,1,1)$ 。结果表明,当港口合作减排给政府带来的社会评价收益大于政府给合作减排港口的补偿时,港口合作减排的总效益大于港口竞争时的总效益,港口1和港口2倾向于选择合作,政府倾向于选择严格监管。图9记录了50次演化博弈的结果。结果表明,港口1和港口2选择合作减排的可能性随时间推移趋于1。在这种情况下,政府选择严格监管策略的概率也趋于1。图8中可视化的结果与图9中绘制的概率一致,后者验证的是情形3的渐近稳定演化平衡状态。

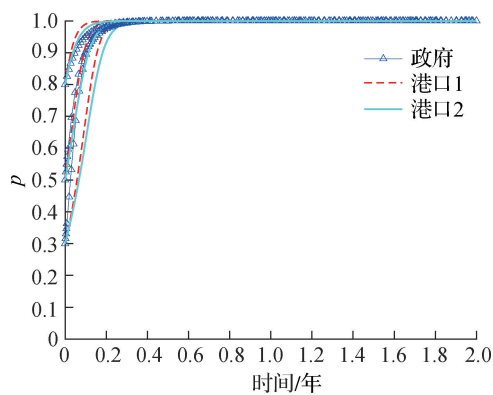


图8 情形3不同初始概率演化博弈结果

Fig. 8 Evolutionary game results with different initial probabilities of Scenario 3

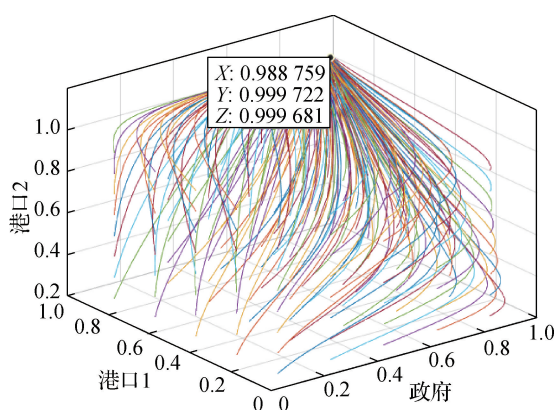


图9 情形3的50次演化博弈结果

Fig. 9 50 evolutionary game results for Scenario 3

3.2 数值分析

港口合作是减少碳排放的重要方式。碳减排在全球层面上具有重要意义,因为海运业是全球贸易的主要推动力之一,也是一个潜在的高碳排放行业。

为了降低碳足迹,减少海上交通对气候变化的负面影响,各个港口和利益相关者开始采取行动。但由于港口过剩和资源浪费问题日益突出,港口资源与运营一体化成为全球港口管理领域讨论的重点问题。一些地方政府通过行政措施或国有资产重组等方式整合港口资源,通过港口融合实现共同发展^[4]。通过建立响应政府行为的区域港口群演化博弈模型,可以模拟各参与者选择的路径演化和敏感性分析。除了这个模拟之外,下文还将讨论分配系数、补偿费用、罚款和合作成本对演化均衡的影响。设置初始参数,满足 $E_8(1,1,1)$ 条件:初始条件 $x=0.5$, $y=0.5$, $z=0.5$,其他参数 $C_1=15$, $C_2=12$, $W=28$, $S=60$, $\theta=0.6$, $R_1=8$, $R_2=7$, $R=20$, $F_1=6$, $F_2=5$, $F=15$ (单位:万元)。

(1) 分配系数。利润分配系数在港口合作碳减排中起到激励、促进合作与共享以及优化资源配置的作用,有助于推动港口行业向更加可持续和低碳的方向发展。但是,由于每个港口都会追求自身利益最大化,这种分配可能会受到主观因素的影响。因此,为了保证港口合作减排利润分配的公平性与相对合理性,应给予最有可能选择竞争的港口较高的预期利润比例,即 $0.5 < \theta < 1$ 。在保持其他参数不变,令 $\theta=0.5, 0.7, 0.9$ 的情况下,复制动态方程系统随时间演化20次的仿真结果如图10所示。由图10可知,利润分配系数在一定范围内时才能加速系统的演化,近似值可以在0.5到0.7之间计算出来。在此范围内,两个港口的合作更加积极,整个系统更高效地达到稳定状态。分配系数的进一步调整可以由政府进行,然后根据整个系统的发展状况进行动态调整。

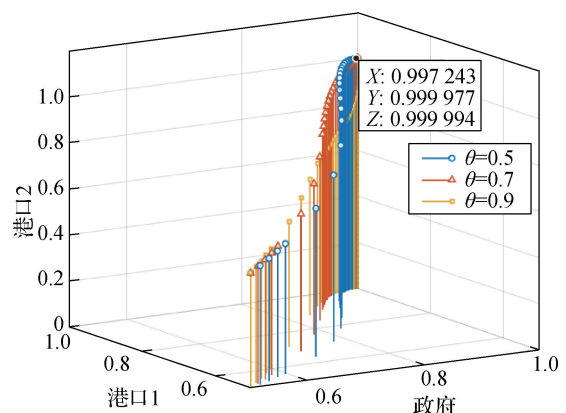


图10 不同分配系数下三方演化博弈

Fig. 10 Tripartite evolutionary games with different distribution

(2) 补偿费用。政府对港口合作减排进行补偿,可以推动低碳转型,实现国家碳减排目标,营造良好的政策环境及提升国际竞争力。这些意义都有助于推动港口行业向低碳、可持续发展的方向转型。保持其他参数不变,令 $R_1=4, R_2=2, R=15$; $R_1=15, R_2=13, R=30$; $R_1=30, R_2=28, R=40$, 复制动态方程系统随时间演化 20 次的仿真结果如图 11 所示。由图 11 可知,补偿并非越高越好,当补偿过高时会影响系统的演化速度。根据第一组数据和第二组数据可知,补偿费用增加,会提高港口合作的积极性,加快港口演化趋势。然而,随着补偿费用持续增加,港口向稳定状态演化的速度反而会减缓。这是因为补偿费用过高会导致港口减少改善环境的投资和资源,因为它们将面临更高的成本压力。如果港口没有足够的资源来满足补偿费用的要求,就会降低人员数量和服务质量,导致业务损失。此时,政府在面对巨额补偿费用时,也可能产生放松监管的想法,以帮助港口应对财务压力。因此,政府在实行港口补偿政策时,需要平衡好切实可行的费用标准和潜在风险,确保合理的资源分配和监管质量;需要通过综合考虑港口的实际情况,制定有针对性的措施,确保港口可持续发展。

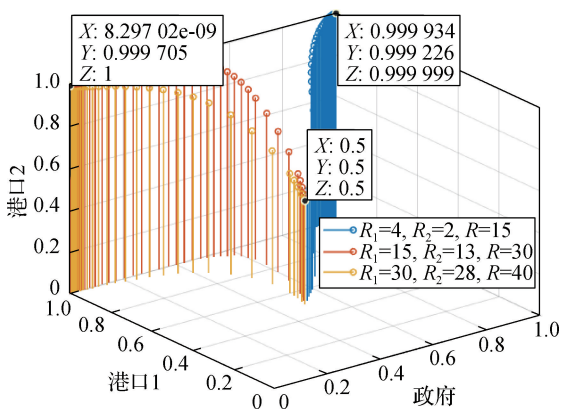


图 11 不同补偿费用下三方演化博弈

Fig. 11 Tripartite evolutionary game under different compensation

(3) 罚款。罚款措施可以作为一种经济激励机制,促使港口加入区域合作减排行动,推动港口行业整体减排效果的提升。通过罚款对不合作减排的港口进行经济处罚,可以促使其重视合作减排并提高积极性。区域港口合作减排是为了实现全区域的减排目标,如果某些港口不配合减排,将导致其他港口承担更大的减排责任和成本。为了维护公平竞争的

原则,政府可能会对不合作减排的港口进行罚款,以确保减排责任分担公平合理。保持其他参数不变,令 $F_1=2, F_2=1, F=10$; $F_1=12, F_2=11, F=15$; $F_1=24, F_2=23, F=35$ 。图 12 展示了模拟复制动态方程系统在时间上演化 20 次的结果。从图 13 和图 14 中可以看出,罚款对竞争力较弱的港口可能会产生更大的影响。竞争力较弱的港口通常面临资金流动困难以及缺乏适应环境要求和政府政策变化的能力。尽管这些影响可能存在,但政府在制定罚款政策时应该全面考虑,确保罚款力度适度,不对竞争力较弱的港口造成过大负担。同时,政府也应提供支持和帮助,推动港口的可持续发展,提高其竞争力和减排能力。

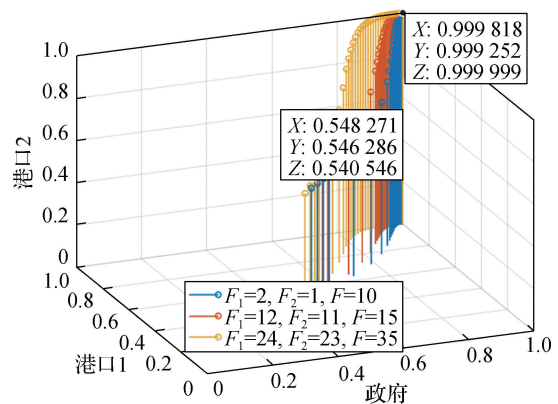


图 12 不同罚款的三方演化博弈

Fig. 12 Tripartite evolutionary game with different fines

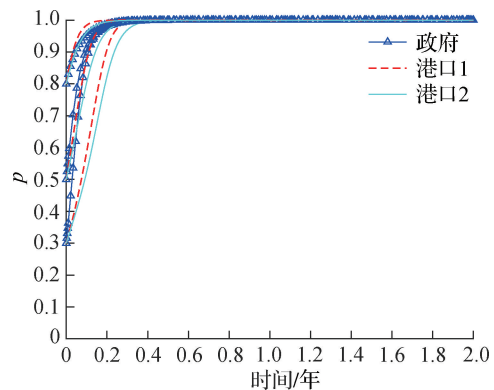


图 13 不同初始概率下第一组罚款的三方演化博弈

Fig. 13 Tripartite evolutionary game with different initial probabilities for the first group of fines

(4) 合作成本。保持其他参数不变,令 $C_1=8, C_2=6$; $C_1=20, C_2=15$; $C_1=40, C_2=35$, 复制动态方程系统随时间演化 20 次的仿真结果如图 15 所示。成本增加会减缓系统的演化速度。当成本增加

到第三组数据时,合作的成本过高,港口会选择竞争而不是合作。这是因为高成本合作将增加港口的经济负担。港口经营需要考虑盈利能力和经营效率,如果合作的成本过高,港口可能无法承受或难以获得所需的回报。其次,港口行业竞争激烈,港口之间存在竞争关系。当某个港口面临高成本的合作要求时,其他港口可能会视此为机会,在竞争中获得优势。因此,港口可能会选择避免高成本合作,以保持竞争力。此时,政府可能会采取严格监管策略,因为政府面临来自公众和环保组织的压力。此外,如果某些港口不愿意合作减排,可能导致其他港口承担更大的减排责任和成本。政府可能会采取严格监管策略,以确保港口行业的公平竞争,避免减排责任不均情况发生。

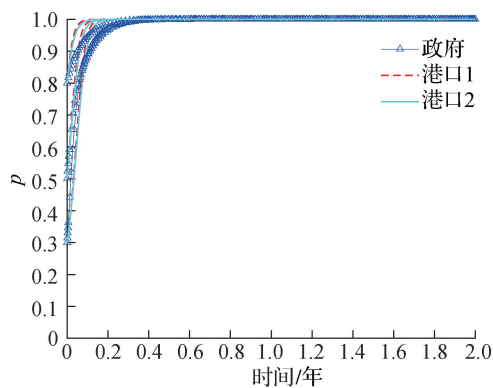


图 14 不同初始概率下第三组罚款的三方演化博弈

Fig. 14 Tripartite evolutionary game with different initial probabilities for the third group of fines

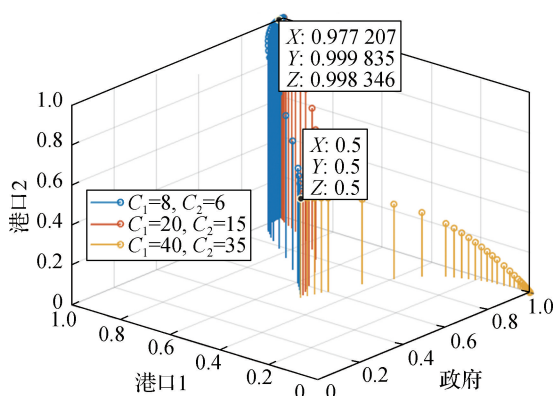


图 15 不同合作成本的三方演化博弈

Fig. 15 Tripartite evolutionary games with different costs

4 结论及建议

碳减排是应对全球气候变化的关键措施之一。

港口作为供应链和物流的重要节点,其排放的温室气体在全球总排放中所占比例较大。通过研究和推动港口一体化的碳减排措施,可以有效降低港口对气候变化的贡献,促进低碳经济的发展。为此,本文构建了政府监管下港口合作减排和竞争减排下的演化博弈分析,得到以下结论。

(1) 分析得到了 3 种可能的稳定策略,分别为 {严格监管,竞争减排,竞争减排}、{放松监管,合作减排,合作减排} 和 {严格监管,合作减排,合作减排},最终能达到最优策略 {严格监管,合作减排,合作减排}。

(2) 利润分配系数在维护利益平衡、激励管理层和员工、保障企业发展、彰显社会责任等方面起到重要作用。在确定港口利润分配系数时,应设置在 0.5~0.7 之间,以促进港口更好地合作减排。

(3) 政府的奖惩政策在促进港口合作减排中起着至关重要的作用。政府的奖励应该在一定范围内。当补贴大于预期的整合成本时,港口将倾向于合作减排;当补贴低于预期成本时,港口的合作减排意愿将相应保持较低水平。说明政府采取积极措施增加对港口的补贴或惩罚,有助于整个系统向最佳稳定策略演变。

(4) 对于合作减排的成本,应该控制在一定范围内,这样港口合作减排的意愿较高,会加速整个系统向稳定状态演化。

结合以上结论,给出以下建议。

(1) 对于政府来说,首先要把更具竞争力的港口在整合过程中不可避免地承担的风险降至最低。因为更具竞争力的港口在合作减排中起着决定性作用。为了解决这一问题,可以设置适当的利益分配系数,确保利益分配系数偏向更具竞争力的港口。其次,应当设置适当的奖惩政策。政府采取奖惩政策能有效干预港口企业的决策,引导港口合作减排,以提高环保水平,促进环保行业的发展。

(2) 对于港口来说,两种策略的成本效益决定策略的选择。港口会考虑自身在减排方面的竞争优势。一些港口可能拥有更先进的低碳技术和设施,可以通过竞争减排来展示自己的领先地位,吸引更多的船舶和运输交流。而其他港口可能更倾向于合作减排,以弥补自身技术和设施的不足,共同促进行业的减排进程。竞争性强的港口将具有在合作减排过程中发挥主导作用的优势。然而,加入了政府监管,将激励竞争性较强的港口调查与竞争力较弱的港口的商业优势差异,从而使港口和腹地产业链的

福利最大化。对于竞争性较弱的港口,合作减排成本和预期回报是影响港口选择减排方式的两个重要因素。当竞争力较强的港口承担了更多的减排成本时,若政府提供有吸引力的激励措施,则这些港口更倾向于选择合作减排。虽然这些港口可能对合作减排的整体成功影响较小,但它们仍然可能具备相对于大型港口的关键竞争优势。并且这些港口可以从积极与该地区更发达港口的合作减排中获益。政府的政策环境、经济利益、竞争优势、航运需求和供应链要求等因素也会对决策产生影响。总体来看,港口选择合作减排或竞争减排,需要考虑以上这些复杂的因素,并在决策中进行权衡。

参考文献:

- [1] DONG Gang, ZHENG Shiyuan, LEE P T W. The effects of regional port integration: the case of Ningbo-Zhoushan Port[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2018, 120: 1-15.
- [2] 裴晓培,韩增林. 辽宁港口分区域整合道路探索[J]. *资源开发与市场*, 2011, 27(2): 138-140.
- [3] MENG Bin, KUANG Haibo, NIU Erxuan, et al. Research on the transformation path of the green intelligent port: outlining the perspective of the evolutionary game "Government - Port - Third - Party Organization"[J]. *Sustainability*, 2020, 12(19): 8072.
- [4] GAO Weichen, GUO Weiyou, ZHOU Shuang, et al. The evolution of the relationship among stakeholders in port integration: evidence from tripartite evolutionary game analysis[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2023, 240: 106628.
- [5] CHEN Liang, WANG Yuan, ZUO Jian, et al. Promoting inter-regional cooperation to reduce CO₂ abatement cost in China[J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2023, 42: 23-32.
- [6] YASUKAWA K. *Game Theory* [M]//CHOE J C. *Encyclopedia of Animal Behavior* (Second Edition). Oxford: Academic Press, 2019: 45-50.
- [7] 李晓东,匡海波,何鸿宇. 政府环境规制下港航系统减排演化博弈研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2023, 23(1): 17-29.
- [8] XU Lang, DI Zhongjie, CHEN Jihong. Evolutionary game of inland shipping pollution control under government co-supervision[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2021, 171: 112730.
- [9] MENG Lingpeng, LIU Kemeng, HE Junliang, et al. Carbon emission reduction behavior strategies in the shipping industry under government regulation: a tripartite evolutionary game analysis [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 378: 134556.
- [10] WANG Xiping, ZHANG Ziming, GUO Zhenghao, et al. Energy structure transformation in the context of carbon neutralization: evolutionary game analysis based on inclusive development of coal and clean energy[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 398: 136626.
- [11] SU Meng, CHENG Kai, KONG Hao, et al. Tripartite evolutionary game and simulation analysis of fishermen participating in cooperative management under government supervision[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2023, 236: 106491.
- [12] ZHANG Lu, SONG Yan, ZHANG Ming, et al. Evolutionary game analysis of strategic interaction of environmental regulation among local governments[J]. *Environmental Development*, 2023, 45: 100793.
- [13] SUN Xinran, WANG Wenwen, PANG Jingru, et al. Study on the evolutionary game of central government and local governments under central environmental supervision system[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 296: 126574.
- [14] SHENG Jinlu, TANG Liu, YANG Zhongzhen, et al. Strategies of stakeholders' selection of shore-to-ship power in China [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2023, 119: 103729.
- [15] 王征,刘瑛,彭传圣,等. 船舶排放监管演化博弈分析与监管对策研究[J]. *中国航海*, 2023, 46(1): 127-135.
- [16] 陈颖聪. 港口整合案例分析及对川渝港口合作发展的启示[J]. *中国储运*, 2023(9): 67-68.
- [17] 刘青辰,高秀丽. 基于共生理论的南海次区域港口物流合作研究[J]. *科技和产业*, 2023, 23(4): 116-122.
- [18] XU Lang, XIE Fengjue, WANG Chuanxu. Passive or proactive capacity sharing? a perspective of cooperation and competition between two regional ports [J]. *Maritime Policy & Management*, 2022, 49(4): 492-509.

(责任编辑:褚金红 实习编辑:张昌保)