

2021年世界交通运输大会水运学部会议 水铁联运专线建设投资演化博弈分析

盛进路^{1,2}, 李小凤¹, 于敏¹, 龚毅¹, 杨忠振³

(1. 重庆交通大学交通运输学院, 重庆 400074; 2. 重庆市交通运输工程重点实验室, 重庆 400074;
3. 宁波大学海运学院, 浙江 宁波 315211)

摘要:针对谁来主导投资建设水铁联运专线问题,通过分析其中涉及的主要利益者之间的利益关系,建立三方演化博弈模型。通过演化博弈理论并结合 MATLAB 仿真,揭示在有限理性条件下,博弈各方进行决策的行为特征及其稳定状态。结果表明:在投资收益大于原有收益情形下,政府和港口部门将选择独立投资或合作投资建设水铁联运专线,铁路部门将选择合作投资建设水铁联运专线。

关键词: 综合交通运输; 交通运输经济; 投资策略; 水铁联运; 演化博弈

中图分类号: F512.3

文献标志码: A

Meeting of the Waterborne Transport Division, World Transport Convention 2021 (WTC 2021)

Analysis on investment evolutionary game of water-rail combined transport dedicated line construction

SHENG Jinlu^{1,2}, LI Xiaofeng¹, YU Min¹, GONG Yi¹, YANG Zhongzhen³

(1. College of Traffic & Transportation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
2. Chongqing Key Laboratory of Transportation Engineering, Chongqing 400074, China;
3. Faculty of Maritime and Transportation, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China)

Abstract: Aiming at the question of who will lead the investment in the construction of the water-rail combined transport dedicated line, a tripartite evolutionary game model is established by analyzing the interest relationships among the main stakeholders involved. Through the evolutionary game theory combined with MATLAB simulation, it reveals the behavioral characteristics and stable states of decision-making of all parties in the game under bounded rationality conditions. The results show that: when the investment profit is greater than the original profit, the government and the port department will choose to invest independently or cooperatively in the construction of the water-rail combined transport dedicated line, and the railway department will choose to invest cooperatively in the construction of the water-rail combined transport dedicated line.

Key words: integrated transportation; transportation economy; investment strategy; water-rail combined transport; evolutionary game

收稿日期: 2021-03-25 修回日期: 2021-06-30

基金项目: 铁路与海运协同的外贸集装箱运输系统优化研究(72072097)

作者简介: 盛进路(1976—),男,山东烟台人,教授,博士,研究方向为港航企业运行与管理, (E-mail) forwardlulu@163.com

0 引 言

水铁联运指铁路直达港口,中间不需要借助第三方运输的方式,水铁联运既能提高运输效率,降低物流成本,又能发挥“大批量、低污染”的绿色优势,是现代交通运输发展的必由之路。然而,目前我国水铁联运发展与发达国家相比仍较落后。近年来,国家出台了系列宏观政策以推动水铁联运发展,其中《交通强国建设纲要》提出要构建安全、便捷、高效、绿色、经济的现代化综合交通运输体系,强化铁路运输网络,并对加强港口与铁路衔接,解决铁路进港“最后一公里”问题提出了明确要求。因此,加强水陆口岸功能衔接,实现货物运输无缝衔接,能更好地发挥铁路、水路运输对国民经济和对外贸易的支撑保障作用。本文从利益关系和投资策略两方面探讨水铁联运专线建设投资问题。

近年来,国内外学者关于水铁联运的研究主要侧重于水铁联运的发展、水铁联运体系构建、水铁联运场站布局规划等。赵严等^[1]从水铁联运外部经济环境的角度,提出我国水铁联运的“一港一线多城市”和“一港多区域”两种发展模式;张国伍^[2]结合“一带一路”发展倡议探讨了我国多式联运存在的优势和劣势,并从体制机制、基础设施、宏观政策等层面提出多式联运发展建议;文献[3-5]从理论上研究水铁联运问题,分析影响我国水铁联运发展的重要因素;叶沅^[6]通过分析广西北部湾港区实施水铁联运的优势,提出完善该港区水铁联运发展的战略措施;黄起龙等^[7]通过构建水铁联运港政府服务系统动力学模型,得出地方交通运输主管部门对水铁联运港政府服务效率具有较大影响,交通运输部和地方人民政府的影响较小且影响方式存在区别;郭静妮等^[8]从设施布局、作业组织模式和组织衔接模式三方面,优化了水铁联运子体系布局及模式,并提出了基于集装箱运输的水铁联运全方位方案体系;邹涛^[9]从运输组织、土地使用和项目实施三方面研究了铁路港口站的规划与设计;YANG等^[10]提出了一种综合考虑进出口水铁联运集装箱装卸作业时间和能耗的双目标优化模型,以改善水铁联运集装箱码头的运营服务。

上述研究主要关注水铁联运的发展趋势和发展体系,对实现水铁联运无缝衔接的研究却较少涉及。实现水铁联运无缝衔接是水铁联运发展的前提,对促进我国物流企业降本增效具有深远意义。因此,本文在前人理论研究的基础上,分析水铁联运专线建设投资中涉及的政府、港口部门和铁路部门等主

要利益者之间的利益关系,建立政府、港口部门和铁路部门三方演化博弈模型,利用 MATLAB 寻求均衡解,以期找到加快水铁联运专线建设的方案,促进水铁联运快速发展。

1 水铁联运专线建设投资中主要利益者关系分析

我国水铁联运实现无缝衔接仍面临着许多实际问题,最主要的问题是只有少数港口建设了水铁联运专线。由于水铁联运专线投资建设中涉及多种类型的利益相关者,而各个利益主体都不愿意主动投资建设水铁联运专线,所以水铁联运无法做到有效衔接。因此,通过分析各个利益者之间利益关系,探索优化现有规制策略的有效途径来协调利益相关者之间的利益冲突,以加快水铁联运专线建设,实现水铁联运无缝衔接。

1.1 利益主体

水铁联运专线建设投资涉及的主要利益者包括地方政府、港口部门和铁路部门。地方政府为了加快当地经济发展,有投资建设水铁联运专线的意愿;港口部门作为实现水铁联运无缝衔接后的直接受益者,希望水铁联运专线能够早日建成;水铁联运专线建成后将会增加铁路部门的货源量和货物种类,因此铁路部门从获益角度也有意愿投资水铁联运专线建设。这些利益相关者的决策行为共同影响水铁联运专线的投资建设(见图 1)。

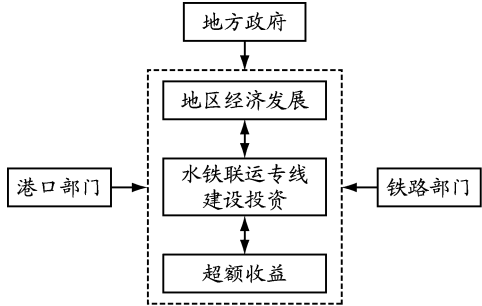


图 1 水铁联运专线建设投资涉及的主要利益者

1.2 利益关系

若港口部门投资水铁联运专线建设,则其建成后将会提高港口的货源量,在给港口带来较大收益的同时也能提升当地经济水平,给政府带来一定的收益;同理,若铁路部门投资水铁联运专线建设,则其建成后将提高铁路集疏运能力,降低物流成本,在带来较大收益的同时也能提升当地经济水平,使政府获得额外收益;若政府投资水铁联运专线建设,则其建成后将会给港口部门和铁路部门带来超额收

益,同时政府获得更多的税收。因此,政府、港口部门和铁路部门作为水铁联运专线建成后的受益方,其利益关系相互影响、相互促进。

2 模型构建

2.1 问题假设

假设1:假设水铁联运专线建成需要的投资成本为 C ,建成后带来的额外收入为 ΔE 。

假设2:假设政府(G)有两种策略可选择:投资建设水铁联运专线(G_j)和不投资建设水铁联运专线(G_i)。当政府选择策略 G_j 时,其付出的投资成本为 αC ,获得的额外收入为 $\alpha \Delta E$,其中 α 指政府在水铁联运专线建设项目上的投资、收入分配比例;当政府选择策略 G_i 时,依托原有的运作模式也能获得收益,此时成本为 C_1 ,收入为 E_1 。

假设3:假设港口部门(P)有两种策略可选择:投资建设水铁联运专线(P_j)和不投资建设水铁联运专线(P_i)。当港口部门选择策略 P_j 时,其付出的投资成本为 βC ,获得的额外收入为 $\beta \Delta E$,其中 β 为港口部门在水铁联运专线建设项目上的投资、收入分配比例;当港口部门选择策略 P_i 时,依托现有业务也能获得收益,此时成本为 C_2 ,收入为 E_2 。

假设4:假设铁路部门(R)有两种策略可选择:投资建设水铁联运专线(R_j)和不投资建设水铁联运专线(R_i)。当铁路部门选择策略 R_j 时,其付出的投资成本为 θC ,获得的额外收入为 $\theta \Delta E$,其中 θ 为铁路部门在水铁联运专线建设项目上的投资、收入分配比例;当铁路部门选择策略 R_i 时,依托现有业务也能获得收益,此时成本为 C_3 ,收入为 E_3 。

假设5:当政府、港口部门和铁路部门中的两方及以上选择投资建设水铁联运专线时,将出现合作投资,满足 $\alpha + \beta + \theta = 1$,其中 $0 \leq \alpha \leq 1, 0 \leq \beta \leq 1, 0 \leq \theta \leq 1$ 。

假设6:本文考虑水铁联运专线建成后所带来的收益是一个长远收益,即 $\Delta E - C > E_m - C_m$,其中 $m = 1, 2, 3$ 。为计算简便,令 $\hat{E} = \Delta E - C, \hat{E}_1 = E_1 - C_1, \hat{E}_2 = E_2 - C_2, \hat{E}_3 = E_3 - C_3$ 。

2.2 演化博弈模型构建

假设在博弈开始阶段:政府选择策略 G_j 的概率为 x ,选择策略 G_i 的概率为 $1 - x$;港口部门选择策略 P_j 概率为 y ,选择策略 P_i 的概率为 $1 - y$;铁路部门选择策略 R_j 的概率为 z ,选择策略 R_i 的概率为 $1 - z$ 。由演化博弈性质可知,在博弈过程中,每个参与者选择某个策略的概率是不断变化的,因此在博

弈的每个周期,政府、港口部门和铁路部门选择“投资建设水铁联运专线”策略的概率是在不断变化的,其支付矩阵见表1。

表1 政府、港口部门和铁路部门的三方支付矩阵

策略选择	政府收益	港口部门收益	铁路部门收益
(G_j, P_j, R_j)	$\alpha(\Delta E - C)$	$\beta(\Delta E - C)$	$\theta(\Delta E - C)$
(G_j, P_i, R_j)	$\alpha(\Delta E - C)$	$E_2 - C_2$	$\theta(\Delta E - C)$
(G_i, P_j, R_j)	$E_1 - C_1$	$\beta(\Delta E - C)$	$\theta(\Delta E - C)$
(G_j, P_j, R_i)	$\alpha(\Delta E - C)$	$\beta(\Delta E - C)$	$E_3 - C_3$
(G_i, P_i, R_j)	$E_1 - C_1$	$E_2 - C_2$	$\Delta E - C$
(G_j, P_i, R_i)	$\Delta E - C$	$E_2 - C_2$	$E_3 - C_3$
(G_i, P_j, R_i)	$E_1 - C_1$	$\Delta E - C$	$E_3 - C_3$
(G_i, P_i, R_i)	$E_1 - C_1$	$E_2 - C_2$	$E_3 - C_3$

2.2.1 政府决策策略稳定性分析

根据支付矩阵,可以得出政府选择策略 G_j 或 G_i 的期望收益为

$$E_x(G_j) = (y(1 - z)(\alpha - 1) + z\alpha - z + 1)\hat{E} \tag{1}$$

$$E_{1-x}(G_i) = E_1 - C_1 \tag{2}$$

则政府选择策略 G_j 的复制动态方程为

$$F(x) = \frac{dx}{dt} = x(1 - x)((y(1 - z)(\alpha - 1) + z\alpha - z + 1)\hat{E} - \hat{E}_1) \tag{3}$$

令 $A = \frac{\hat{E}_1 - \hat{E} + z\hat{E}(1 - \alpha)}{\hat{E}(\alpha + z - \alpha z - 1)}$,由复制动态方程稳

定性可知:(1)当 $y = A$ 时, $F(x) \equiv 0$,即 x 取任意值时,方程都处于稳定状态,代表此时政府可以选择策略 G_j ,也可以选择策略 G_i 。(2)当 $y \neq A, F(x) = 0$ 时,分两种情况进行讨论。①当 $0 < y < A$ 时, $F'(0) < 0, F'(1) > 0$,此时 $x = 0$ 为稳定策略,即当港口部门选择策略 P_j 的概率小于 A 时,政府将选择策略 G_i 。②当 $A < y < 1$ 时, $F'(0) > 0, F'(1) < 0$,此时 $x = 1$ 为稳定策略,即当港口部门选择策略 P_j 的概率大于 A 时,政府将选择策略 G_j 。政府的决策演化动态图如图2所示。

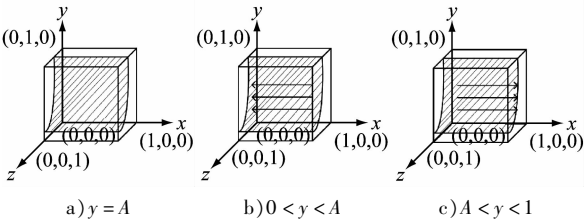


图2 政府的决策演化动态图

2.2.2 港口部门决策策略稳定性分析

同理,港口部门选择策略 P_j 或 P_i 的期望收益为

$$E_y(P_j) = (z(\beta - 1)(1 - x) + x(\beta - 1) + 1)\hat{E} \quad (4)$$

$$E_{1-y}(P_i) = E_2 - C_2 \quad (5)$$

则港口部门选择策略 P_j 的复制动态方程为

$$F(y) = \frac{dy}{dt} = y(1 - y)((\beta - 1)(z(1 - x) + x) + 1)\hat{E} - \hat{E}_2) \quad (6)$$

$$\text{令 } B = \frac{\hat{E}_2 - \hat{E} + x\hat{E}(1 - \beta)}{\hat{E}(\beta + x - \beta x - 1)}, \text{ 由复制动态方程稳}$$

定性可知:(1)当 $z = B$ 时, $F(y) \equiv 0$, 此时 y 取任意值, 方程都处于稳定状态, 港口部门既可以选择策略 P_j , 也可以选择策略 P_i 。(2)当 $z \neq B$ 时, $F(y) = 0$, 分两种情况进行讨论。①当 $0 < z < B$ 时, $F'(0) < 0, F'(1) > 0$, 此时 $y = 0$ 为稳定状态, 即当铁路部门选择策略 R_j 的概率小于 B 时, 港口部门将选择策略 P_i 。②当 $B < z < 1$ 时, $F'(0) > 0, F'(1) < 0$, 此时 $y = 1$ 为稳定状态, 即当铁路部门选择策略 R_j 的概率大于 B 时, 港口部门将选择策略 P_j 。港口部门的决策演化动态图如图 3 所示。

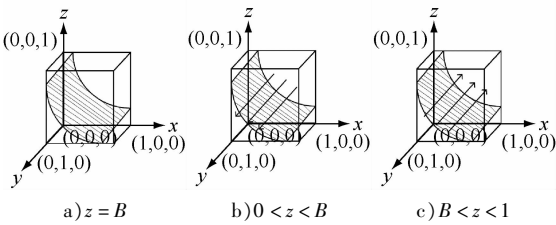


图 3 港口部门的决策演化动态图

2.2.3 铁路部门决策策略稳定分析

铁路部门选择策略 R_j 或 R_i 的期望收益为

$$E_z(R_j) = (x(1 - y)(\theta - 1) - y\theta - y + 1)\hat{E} \quad (7)$$

$$E_{1-z}(R_i) = E_3 - C_3 \quad (8)$$

则铁路部门选择策略 R_j 的复制动态方程为

$$F(z) = \frac{dz}{dt} = z(1 - z)((x(1 - y)(\theta - 1) - y\theta - y + 1)\hat{E} - \hat{E}_3) \quad (9)$$

$$\text{令 } C = \frac{\hat{E}_3 - \hat{E} - y\hat{E}(\theta - 1)}{\hat{E}(\theta + y - \theta y)}, \text{ 由复制动态方程稳}$$

定性可知:(1)当 $x = C$ 时, $F(z) \equiv 0$, 此时 z 取任意值, 方程都处于稳定状态, 铁路部门既可以选择策略 R_j , 也可以选择策略 R_i 。(2)当 $x \neq C$ 时, $F(z) = 0$, 分两种情况讨论。①当 $0 < x < C$ 时, $F'(0) < 0, F'(1) > 0$, 此时 $z = 0$ 为稳定状态, 即当政府选择策略 G_j 的概率小于 C 时, 铁路部门将选择策略 R_i 。②当 $C < x < 1$ 时, $F'(0) > 0, F'(1) < 0$, 此时 $z = 1$ 为稳定状态, 即当政府选择策略 G_j 的概率大于 C

时, 铁路部门将选择策略 R_j 。铁路部门的决策演化动态图如图 4 所示。

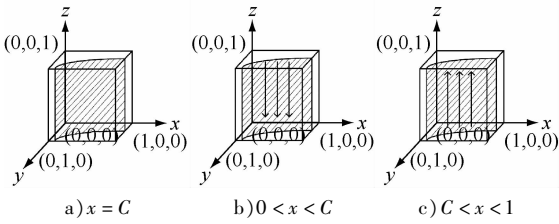


图 4 铁路部门的决策演化动态图

3 博弈稳定策略分析

由式(3)、(6)、(9)联立可得政府、港口部门、铁路部门三方的复制动态方程组。

该演化过程中存在 9 个均衡解: $E_1(0, 0, 0)$ 、 $E_2(0, 0, 1)$ 、 $E_3(0, 1, 0)$ 、 $E_4(1, 0, 0)$ 、 $E_5(1, 1, 0)$ 、 $E_6(1, 0, 1)$ 、 $E_7(0, 1, 1)$ 、 $E_8(1, 1, 1)$ 、 $E_9(x_0, y_0, z_0)$ 。由于演化博弈稳定解一定是严格的纳什均衡, 而 $E_9(x_0, y_0, z_0)$ 为非渐进稳定状态, 因此不予考虑。把其他 8 个均衡解分别代入雅可比矩阵, 求解各个均衡解的特征根(见表 2), 并判断其稳定性(见表 3)。

表 2 各均衡解的特征根

均衡解	特征根		
	λ_1	λ_2	λ_3
$E_1(0, 0, 0)$	$\hat{E} - \hat{E}_1$	$\hat{E} - \hat{E}_2$	$\hat{E} - \hat{E}_3$
$E_2(0, 0, 1)$	$\alpha\hat{E} - \hat{E}_1$	$\beta\hat{E} - \hat{E}_2$	$\hat{E} - \hat{E}_3$
$E_3(0, 1, 0)$	$\alpha\hat{E} - \hat{E}_1$	$\hat{E}_2 - \hat{E}$	$\theta\hat{E} - \hat{E}_3$
$E_4(1, 0, 0)$	$\hat{E}_1 - \hat{E}$	$\beta\hat{E} - \hat{E}_2$	$\theta\hat{E} - \hat{E}_3$
$E_5(1, 1, 0)$	$\hat{E}_1 - \alpha\hat{E}$	$\hat{E}_2 - \beta\hat{E}$	$\theta\hat{E} - \hat{E}_3$
$E_6(1, 0, 1)$	$\hat{E}_1 - \alpha\hat{E}$	$\beta(\hat{E} - \hat{E}_2)$	$(2 - \theta)\hat{E} - \hat{E}_3$
$E_7(0, 1, 1)$	$\alpha\hat{E} - \hat{E}_1$	$\hat{E}_2$	$\hat{E}_3 - \theta\hat{E}$
$E_8(1, 1, 1)$	$\hat{E}_1 - \alpha\hat{E}$	$\hat{E}_2 - \beta\hat{E}$	$\hat{E}_3 - \theta\hat{E}$

由李雅普诺夫间接法可知, 特征根均为负数时, 该均衡解存在局部稳定性, 因此根据表 2 特征根的取值假设存在 8 种情形, 分别讨论不同情形下各均衡解的稳定性, 如表 3 所示。

由表 3 可知: 在情形 1 下, 政府、港口部门和铁路部门合作投资建设水铁联运专线将获得更大收益, 此时系统存在演化稳定策略 $E_8(1, 1, 1)$; 在情形 2 下, 政府、港口部门和铁路部门依托原有业务将获得更大收益, 此时系统存在演化稳定策略 $E_1(0, 0, 0)$; 在情形 3 下, 政府将独立投资建设水铁联运专线, 发展当地经济从而获得更大收益, 此时系统存在演化稳定策略 $E_4(1, 0, 0)$; 在情形 4 下, 政府和港口

表3 不同情形下各均衡解的稳定性判断

情形		均衡解								稳定解
		$E_1(0,0,0)$	$E_2(0,0,1)$	$E_3(0,1,0)$	$E_4(1,0,0)$	$E_5(1,1,0)$	$E_6(1,0,1)$	$E_7(0,1,1)$	$E_8(1,1,1)$	
1	$\alpha(\Delta E - C) > E_1 - C_1$	+	+	+	-	-	-	+	-	$E_8(1,1,1)$
	$\beta(\Delta E - C) > E_2 - C_2$	+	+	-	+	-	+	未知	-	
	$\theta(\Delta E - C) > E_3 - C_3$	+	+	+	+	+	+	-	-	
2	$\alpha(\Delta E - C) < E_1 - C_1$	-	-	-	+	+	+	-	+	$E_1(0,0,0)$
	$\alpha(\Delta E - C) < E_2 - C_2$	-	-	+	-	+	-	未知	+	
	$\theta(\Delta E - C) < E_3 - C_3$	-	+	-	-	-	-	+	+	
3	$\alpha(\Delta E - C) > E_1 - C_1$	+	+	+	-	-	-	+	-	$E_4(1,0,0)$
	$\beta(\Delta E - C) < E_2 - C_2$	-	-	+	-	+	未知	未知	+	
	$\theta(\Delta E - C) < E_3 - C_3$	-	未知	-	-	-	未知	+	+	
4	$\alpha(\Delta E - C) > E_1 - C_1$	+	+	+	-	-	-	+	-	$E_5(1,1,0)$
	$\beta(\Delta E - C) > E_2 - C_2$	+	+	-	+	-	+	未知	-	
	$\theta(\Delta E - C) < E_3 - C_3$	-	-	+	-	-	未知	+	+	
5	$\alpha(\Delta E - C) < E_1 - C_1$	-	-	-	+	+	+	-	+	
	$\beta(\Delta E - C) > E_2 - C_2$	+	+	-	+	-	+	未知	-	
	$\theta(\Delta E - C) > E_3 - C_3$	+	+	+	+	+	+	-	-	
6	$\alpha(\Delta E - C) > E_1 - C_1$	+	+	+	-	-	-	+	-	
	$\beta(\Delta E - C) < E_2 - C_2$	-	-	+	-	+	未知	未知	+	
	$\theta(\Delta E - C) > E_3 - C_3$	+	+	+	+	+	+	-	-	
7	$\alpha(\Delta E - C) < E_1 - C_1$	-	-	-	+	+	+	-	+	
	$\beta(\Delta E - C) < E_2 - C_2$	-	-	+	-	+	未知	未知	+	
	$\theta(\Delta E - C) > E_3 - C_3$	+	+	+	+	+	+	-	-	
8	$\alpha(\Delta E - C) < E_1 - C_1$	未知	-	-	+	+	+	-	+	$E_3(0,1,0)$
	$\beta(\Delta E - C) > E_2 - C_2$	+	+	-	+	-	+	未知	-	
	$\theta(\Delta E - C) < E_3 - C_3$	未知	未知	-	-	-	未知	+	+	

部门合作投资建设水铁联运专线将获得更大收益,此时系统存在演化稳定策略 $E_5(1,1,0)$;在情形5、6、7下,系统不存在演化稳定策略;在情形8下,港口部门将独立投资建设水铁联运专线,扩大港口运输范围,提高港口集疏运能力,从而获得更大收益,此时系统存在演化稳定策略 $E_3(0,1,0)$ 。

4 算例分析

经过前文对政府、港口部门和铁路部门三方演化博弈行为以及演化稳定解的分析,得出 $E_1(0,0,0)$ 、 $E_3(0,1,0)$ 、 $E_4(1,0,0)$ 、 $E_5(1,1,0)$ 、 $E_8(1,1,1)$ 这5个解在不同条件下能够成为演化稳定策略。下文运用 MATLAB 进行数值仿真分析,进一步验证系统的演化稳定策略。

(1)均衡解 $E_1(0,0,0)$ 数值仿真分析。由前文可知,均衡解 $E_1(0,0,0)$ 在情形1下将成为演化稳定策略,因此假设 $\alpha = 0, \beta = 0, \theta = 0, \Delta E = 2, C = 1,$

$E_1 = 7, C_1 = 5, E_2 = 5, C_2 = 3, E_3 = 5, C_3 = 3$ 。数值仿真见图5,其中:纵轴 p 表示投资概率;横轴 t 表示迭代次数,用来表征政府、港口部门和铁路部门达到稳定策略的时间。由图5可知,无论 $x、y、z$ 在 $(0,1)$ 上最终取何值,当投资收益小于原有收益时,政府、港口部门和铁路部门最终将选择不投资建设水铁联运专线,验证了在该条件下 $E_1(0,0,0)$ 为演化稳定策略。

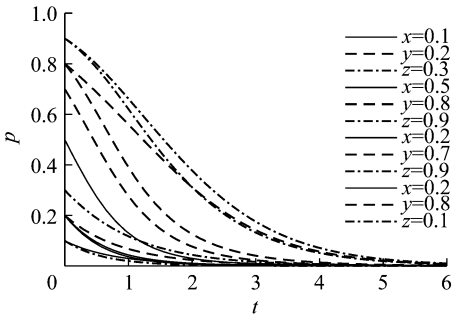


图5 情形1下 $x、y、z$ 的演化趋势

(2)均衡解 $E_3(0,1,0)$ 数值仿真分析。由前文可知均衡解 $E_3(0,1,0)$ 在情形 8 下将成为演化稳定策略,因此假设 $\alpha = 0, \beta = 1, \theta = 0, \Delta E = 4, C = 1, E_1 = 7, C_1 = 5, E_2 = 5, C_2 = 3, E_3 = 7, C_3 = 3$ 。数值仿真结果见图 6。由图 6 可知,无论 $x、y、z$ 在 $(0,1)$ 上取何值,当港口部门的投资收益大于原有收益时,港口部门愿意独立投资建设水铁联运专线,水铁联运专线建成后将给港口部门带来巨大收益,验证了在此条件下 $E_3(0,1,0)$ 为演化稳定策略。

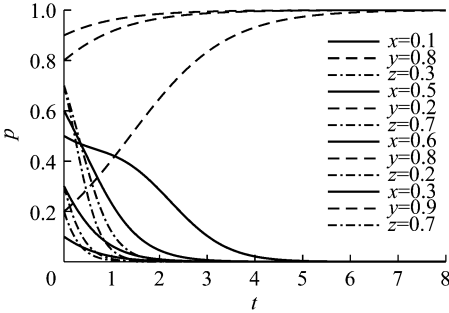


图 6 情形 8 下 $x、y、z$ 的演化趋势

(3)均衡解 $E_4(1,0,0)$ 数值仿真分析。由前文可知,均衡解在情形 3 下将成为演化稳定策略,因此假设 $\alpha = 1, \beta = 0, \theta = 0, \Delta E = 4, C = 1, E_1 = 7, C_1 = 5, E_2 = 6, C_2 = 3, E_3 = 7, C_3 = 4$ 。数值仿真结果见图 7。由图 7 可知,无论 $x、y、z$ 在 $(0,1)$ 上取何值,当政府的投资收益大于原有收益时,政府愿意独立投资建设水铁联运专线,水铁联运专线建成后将带动当地经济发展,从而给政府带来巨大收益,验证了在此情形下 $E_4(1,0,0)$ 为演化稳定策略。

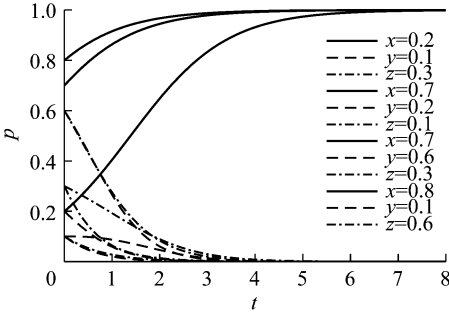


图 7 情形 3 下 $x、y、z$ 的演化趋势

(4)均衡解 $E_5(1,1,0)$ 数值仿真分析。由前文可知,均衡解 $E_5(1,1,0)$ 在情形 4 下将成为演化稳定策略,因此假设 $\alpha = 0.5, \beta = 0.5, \theta = 0, \Delta E = 4, C = 1, E_1 = 6, C_1 = 5, E_2 = 6, C_2 = 5, E_3 = 7, C_3 = 4$ 。数值仿真结果见图 8。由图 8 可知,无论 $x、y、z$ 在 $(0,1)$ 上取何值,在政府和港口部门的投资收益都大于原有收益时,政府与港口部门合作能减少各自的投资成本,政府与港口部门合作投资建设水铁联

运专线将会获得更大收益,验证了在此情形下 $E_5(1,1,0)$ 为演化稳定策略。

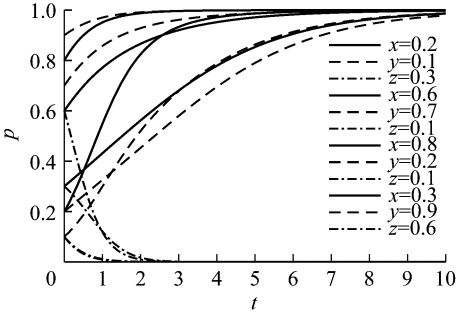


图 8 情形 4 下 $x、y、z$ 的演化趋势

(5)均衡解 $E_8(1,1,1)$ 数值仿真分析。由前文可知,均衡解 $E_8(1,1,1)$ 在情形 1 下将成为演化稳定策略,因此假设 $\alpha = 0.3, \beta = 0.4, \theta = 0.3, \Delta E = 6, C = 1, E_1 = 6, C_1 = 5, E_2 = 6, C_2 = 5, E_3 = 7, C_3 = 6.5$ 。数值仿真结果见图 9。由图 9 可知,无论 $x、y、z$ 在 $(0,1)$ 上取何值,在各主体的投资收益都大于原有收益时,政府、港口部门和铁路部门合作能减少各自的投资成本,政府、港口部门和铁路部门合作投资建设水铁联运专线将获得更大收益,验证了在此情形下 $E_8(1,1,1)$ 为演化稳定策略。

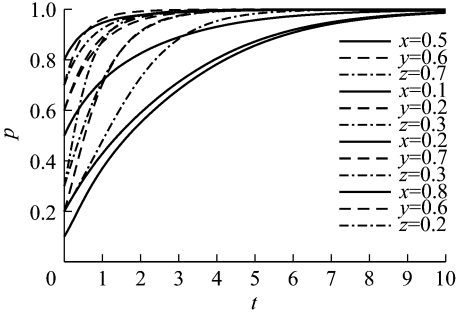


图 9 情形 1 下 $x、y、z$ 的演化趋势

5 结 论

本文基于水铁联运涉及的主要利益者,建立了政府、港口部门和铁路部门三方水铁联运专线建设投资演化博弈模型,并通过理论证明结合数值仿真,分析了在有限理性条件下政府、港口部门和铁路部门的最终演化稳定策略。得到的主要研究结论包括:(1)在政府的投资收益大于原有收益时,政府选择独立投资或合作投资水铁联运专线建设策略都能获得更大收益。(2)在港口部门的投资收益大于原有收益时,港口部门选择独立投资或合作投资水铁联运专线建设策略都能获得更大收益。(3)在铁路部门的投资收益大于原有收益时,铁路部门只能选择合作投资水铁联运专线建设策略才能获得更大收益。

(下转第 126 页)

- [3] 孙昊, 张帅, 韩伟, 等. 纳秒脉冲火花放电高效转化甲烷的实验研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(4): 880-888. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.180032.
- [4] 董冰岩, 张鹏, 聂亚林, 等. 针-板式高压脉冲气液两相放电电解废水中的苯酚[J]. 化工进展, 2016, 35(1): 314-319. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2016.01.043.
- [5] LI Yongdong, HE Feng, LIU Chunliang. A volume-weighting cloud-in-cell model for particle simulation of axially symmetric plasmas[J]. Plasma Science and Technology, 2005, 7(1): 2653-2656. DOI: 10.1088/1009-0630/7/1/012.
- [6] JOSHI A A, LOCKE B R, ARCE P, *et al.* Formation of hydroxyl radicals, hydrogen peroxide and aqueous electrons by pulsed streamer corona discharge in aqueous solution[J]. Journal of Hazardous Materials, 1995, 41: 3-30. DOI: 10.1016/0304-3894(94)00099-3.
- [7] SUN Bing, SATO M, CLEMENTS J S. Optical study of active species produced by a pulsed streamer corona discharge in water[J]. Journal of Electrostatics, 1997, 39: 189-202. DOI: 10.1016/s0304-3886(97)00002-8.
- [8] LOCKE B R, SATO M, SUNK A P, *et al.* Electrohydraulic discharge and nonthermal plasma for water treatment[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2006, 45: 882-905. DOI: 10.1021/ie050981u.
- [9] WANG Sen, WANG Wenchun, YANG Dezheng, *et al.* Optical and application study of gas-liquid discharge excited by bipolar nanosecond pulse in atmospheric air[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2014, 131: 571-576. DOI: 10.1016/j.saa.2014.04.061.
- [10] LI Jie, SATO M, OHSHIMA T. Degradation of phenol in water using a gas-liquid phase pulsed discharge plasma reactor[J]. Thin Solid Films, 2007, 515: 4283-4288. DOI: 10.1007/s11270-018-3968-x.
- [11] WANG Tiecheng, QU Guangzhou, YAN Qiuhe, *et al.* Optimization of gas-liquid hybrid pulsed discharge plasma for *p*-nitrophenol contaminated dredged sediment remediation[J]. Journal of Electrostatics, 2015, 77: 166-173. DOI: 10.1016/j.elstat.2015.08.011.
- [12] 孙明, 郝夏桐, 鲁晓辉, 等. 气液两相脉冲放电反应器的设计及其对酸性橙 II 的降解效果[J]. 高电压技术, 2015, 41(2): 498-503. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.2015.02.021.
- [13] 孙明, 杨颜颜, 金宏力, 等. 气液两相纳秒脉冲放电反应器放电特性及其对藻类的灭活效果[J]. 高电压技术, 2015, 41(10): 3499-3504. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.2015.10.043.
- [14] 王东, 孙明, 陶瞻. 一种新型单喷嘴-板-筒式高压脉冲等离子体灭菌反应器: 201910043719.6[P]. 2019-04-12.

(编辑 贾裙平)

(上接第46页)

参考文献:

- [1] 赵严, 何世伟, 黎浩东. 水铁联运发展模式及其运输组织研究[J]. 铁道运输与经济, 2010, 32(6): 23-26.
- [2] 张国伍. “一带一路”的多式联运服务体系研究: “交通7+1论坛”第四十四次会议纪实[J]. 交通运输系统工程与信息, 2016, 16(5): 1-13.
- [3] 张滨, 黄波, 樊婷. “一带一路”背景下我国海陆联运建设与发展[J]. 中国流通经济, 2015(6): 96-102.
- [4] 武慧荣, 朱晓宁. 基于SD的集装箱海铁联运系统发展研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2013, 32(3): 529-533.
- [5] 吴庚. 海铁联运是物流业快速发展的必由之路: 对港口物流发展方式转变的思考[J]. 港口经济, 2010(7): 33-35.
- [6] 叶泮跖. 浅谈北部湾港海铁联运对国际贸易的积极作用[J]. 特区经济, 2019(3): 104-106.
- [7] 黄起龙, 崔彦博, 刘晓雷, 等. 基于系统动力学的铁水联运港政府服务体系研究[J]. 铁道运输与经济, 2019, 41(4): 57-62, 75.
- [8] 郭静妮, 贺政纲. 基于集装箱运输的水铁联运体系构建[J]. 交通运输工程与信息学报, 2018, 16(4): 41-49.
- [9] 邹涛. 集装箱水铁联运港口站平面布置探讨[J]. 工程建设与设计, 2019(12): 146-148.
- [10] YANG Yijia, ZHU Xiaoning, HAGHANI A. Multiple equipment integrated scheduling and storage space allocation in rail-water intermodal container terminals considering energy efficiency [J]. Transportation Research Record, 2019, 2673(3): 199-209. DOI: 10.1177/0361198118825474.

(编辑 赵勉)