

DOI: 10.11992/tis.201508012

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/23.1538.tp.20170217.0954.002.html>

企业、政府与公众公共健康提升激励机制演化分析

曲卫华^{1,2}, 颜志军³

(1. 太原学院 计算中心, 山西 太原 030032; 2. 山西大学 管理与决策研究中心, 山西 太原 030006; 3. 北京理工大学 管理与经济学院, 北京 100081)

摘要:我国能源消费导致的环境污染严重影响公众的公共健康水平。在考虑公众公共健康损失赔偿的情况下, 构建了企业、政府与公众的三方演化博弈模型以分析三方策略的选择机制及影响因素。演化博弈理论认为在三维空间区域内, 三方没有收敛于某一结果的演化稳定策略。研究发现, 在一定条件下, 在三维空间的某一区域内, 三方可收敛到理想的演化博弈稳定策略: {实行能源转型、企业监管、公众参与环境管理}。并用数值仿真展示了在理想演化博弈稳定策略情景下, 不同政策决策参数对演化结果的影响。研究结果表明, 在政府群体实行监管比例固定的条件下, 公众群体参与环境管理比例越大或公众公共健康损失赔偿越大, 企业群体演化与实行能源转型策略的速度越快。同时, 讨论了政府补贴、税收减免、政府罚款对演化结果的影响, 提出了相应的政策建议。

关键词:能源消费; 企业污染; 政府监管; 公众参与; 博弈

中图分类号: TP3; 062.2; C93 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4785(2017)02-0237-07

中文引用格式: 曲卫华, 颜志军. 企业、政府与公众公共健康提升激励机制演化分析[J]. 智能系统学报, 2017, 12(2): 237-249.

英文引用格式: QU Weihua, YAN Zhijun. Evolutionary analysis of incentive mechanisms for enterprises, governments, and the public to achieve environmental health improvements[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2017, 12(2): 237-249.

Evolutionary analysis of incentive mechanisms for enterprises, governments, and the public to achieve environmental health improvements

QU Weihua^{1,2}, YAN Zhijun³

(1. Computer Center, Taiyuan University, Taiyuan 030032, China; 2. Institute of Management and Decision, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 3. School of Management and Economics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The effects environmental pollution caused by energy consumption are having on public health in China are quickly becoming increasingly serious. In this paper, we establish an evolutionary game model for enterprises, governments, and the public to analyze selection mechanisms and impact factors of these three constituents, thus considering health damage compensation. From game theory, these three stakeholders fail to converge to an ideal evolutionary stable strategy in some domains of the given three-dimensional space; however, we have found that, under certain conditions, these three stakeholders can converge to an ideal evolutionary stable strategy in certain domains, i.e., implementing energy transformation, enterprise regulation, and public participation in environment control. We show the effects that the variety of decision-making parameters have on evolutionary results via numerical experiments. We found that when the proportion of influence that the government group exercises in terms of regulations remains fixed, the higher the proportion of public participation in environmental management (and therefore higher health damage compensation) and the faster the speed by which the enterprise group evolves and energy transformation is realized. We also discuss the effects that government subsidies, tax deductions and exemptions, and government fines have on the evolutionary results, making some suggestions for policymakers as part of our conclusions.

Keywords: energy consumption; enterprise pollution; government regulation; public participation; game theory

我国以煤炭为主的化石能源消费产生了大量危害公共健康的污染物, 包括二氧化硫、烟尘、粉尘、氮

氧化物、悬浮颗粒物(TSP)、颗粒物(PM₁₀)、细颗粒物(PM_{2.5})等, 这些污染物是引发雾霾天气的主要原因^[1], 对呼吸系统疾病、心脑血管疾病等公共健康水平有严重威胁。研究表明, 由 2013 年 1 月的雾霾天气导致的健康经济损失总额约为 226 亿元,

收稿日期: 2015-08-13. 网络出版日期: 2017-02-17.

基金项目: 北京市自然科学基金项目(9152015).

通信作者: 颜志军. E-mail: yanzhijun@bit.edu.cn.

相当于2011年平均月度卫生总费用的11.2%^[2]。

现有文献主要从健康经济损失、政府监管和公众参与等几个角度研究企业、政府和公众三方的能源消费、环境保护与公共健康问题。1)从健康经济损失角度来看,Xia等^[3]通过对我国30个省份环境污染导致的公众健康经济损失研究,使用投入产出方法表明,2007年,由环境污染造成的公众公共健康损失大约为3460亿元;Wang^[4]研究了我国不同地区企业能源消费产生的污染物对公共健康的影响,利用剂量效应与暴露响应原理分析表明,以化石能源消费为主的能源结构排放的污染物严重影响着公众的公共健康水平,其排放的SO₂与PM10在2020年导致的公共健康损失将达到4520~6150亿元,几乎占同期GDP的1.06%。之后,学者们结合能源消费、环境污染、经济增长和公共健康因素运用LEAP模型和计量方法研究企业能源消费对环境、经济以及公共健康的影响,如Zhang^[5]、曲卫华等^[6]。2)从政府监管角度出发,Dong、Li^[7]等运用静态博弈理论研究了中国电镀企业清洁生产的政策实施效果,认为政府的税收减免、生产设备补贴、清洁能源创新成本补贴以及企业排污监管力度等措施对高污染企业向清洁化生产方向转型有重要影响。近期学者通过最优化模型、信号博弈论的方法研究企业能源转型、技术创新、政府税收政策对环保的影响,如许士春等^[8]、郭丕斌等^[9]、Zheng等^[10]、Li等^[11]、张国兴等^[12]。3)从公众参与角度出发,学者们运用委托代理模型对企业的实证研究认为公众参与力度对企业向绿色方向发展有重要影响,如Gera等^[13]。朱庆华和窦一杰通过构建政府补贴的绿色供应链管理博弈模型,研究认为政府应努力培育消费者的环保意识,这一举措是使政府和消费者共赢的长远之计^[14],在此基础上,学者们对公众参与下的企业环境行为进行研究,结果得出公众参与环境管理对企业减少环境污染行为有重要作用,如Kaldellis等^[15-16]、杜建国等^[17]、郑思齐等^[18]。

上述研究对促进企业向绿色方向转型发展、提高公众公共健康水平政策具有借鉴意义。但是在研究内容、研究方法与参数选择方面存在不足,忽略了我国能源消费背景下,企业排污、政府监管与公众参与三方的相互制约机理。具体来说,1)在研究内容上,现有的博弈研究中仅涉及政府对公众参与环境管理行为方面的奖励,没有考虑企业排污对公众公共健康损失赔偿因素,然而,企业排污严重影响着公众公共健康水平的高低;现有研究仅涉及的是政府与企业、

企业与公众的两方博弈研究,对于政府、企业与公众三方博弈的相关研究比较少;2)在研究方法上,大多数研究主要采用暴露响应与剂量效应原理的解析法或仅研究企业排污与政府监控、企业排污与公众参与的两方博弈,未综合考虑企业能源转型、政府监管与公众参与环境三者的动态机理,而公众参与行为对政府监管力度与企业排污程度有重要影响;3)在数值仿真方面,现有研究很少有对企业能源转型、政府监管与公众参与环境管理三方博弈的算例分析,而数值仿真计算是科学技术探索研究的主要方法和手段之一,对于抽象且为动态及局部细节的研究问题,数值仿真具有直观、可行性高的优点。

为此,本文将排污企业、地方政府和公众3个主体一同纳入到模型中,考虑公众健康损失赔偿大小,综合研究三者间的相互机理;运用演化博弈论动态分析排污企业是否实行能源转型、政府是否监管以及公众是否参与环境管理行为的相互影响;最后用数值算例仿真了不同政策参数取值情况下各博弈方的演化行为,为企业能源转型与公共健康水平提升政策的制定提供有力支撑。

1 政府、企业和公众三方博弈模型

1.1 演化博弈模型假设

1.1.1 博弈主体

化石能源消费排放造成环境污染的直接利益相关者有:地方政府(简称“政府”)、排污企业和公众,3个博弈方均是有限理性。从地方政府角度来看,政府很可能会监管企业排污行为,对排污超标准的企业实行罚款、限制其生产(以下简称“监管”),也可能因为顾忌监管成本及影响本地区的国内生产总值下降而选择不监管(以下简称“不监管”);从企业角度来看,企业很可能因为利益的驱使和顾忌能源转型成本继续以传统化石能源消费生产致使污染物超标排放(以下简称“不实行能源转型”),也可能顾忌政府的惩罚和实行能源转型后政府的补贴而实行能源转型(以下简称“实行能源转型”);从公众角度来看,公众很可能由于对环保意识的淡薄不参与环境管理(以下简称“不参与环境管理”),也可能考虑企业排污带来的环境污染会使身体健康受损失而参与环境管理(以下简称“参与环境管理”)。由于3个参与博弈方都是学习能力有限的理性参与者,在信息不完全的情况下,三方在进行决策时往往不会一开始就找到最优策略,会在博弈过程中学习博弈,根据以往收益较大的策略不断调整自己的策略。

1.1.1.2 模型参数

为了研究各个博弈策略组合下,地方政府、排污企业与公众三者的成本、收益与损失情况,设定下列相关政策参数和输入参数,如表 1 所示。通过上述

的定义和假设,建立化石能源消费背景下企业-政府-公众的三方博弈模型,如图 1 所示。根据模型假设和图 1 得出相应的收益矩阵,8 种收益组合如表 2 所示,收益结果分别对应企业、政府和公众。

表 1 主要参数及其含义

Table 1 Main parameters and its meanings

参数	含义
政策参数	
α	企业实行能源转型后,政府对其减免税收的比率
β	政府给予实行能源转型企业成本的补贴比例
E_1	不实行能源转型的企业对公众公共健康损失的赔偿(即公众要求的赔偿)
F	企业不实行能源转型、政府对企业的罚金
输入参数	
A	政府对参与环境管理的公众的奖励
C_1	企业实行能源转型所增加的技术、原材料与人力等成本
C_2	企业继续排污、不实行能源转型的机会成本(包括企业形象破坏、公众抵制企业产品等)
C_3	公众参与环境管理的成本
C_4	政府监管排污企业的成本
τ	企业实行能源转型前,政府对其的税率
π_F	实行能源转型前,企业的净收益
π_0	实行能源转型企业增加的收益
θ_1	不实行能源转型的企业被政府发现的概率
π_1	企业实行能源转型、环境质量改善后,公众所获得的公共健康水平收益
R_1	企业不实行能源转型导致的环境污染对居民的公共健康损失
R_2	当政府对排污企业不监管,被公众发现后,政府形象、声誉的损失
E_2	政府不监管企业的行为被公众发现后,政府由于工作失职,应对环境污染导致的公共健康损失向公众支付额外的赔偿
θ_2	政府不监管排污企业的行为被公众发现的概率
π_2	公众参与环境管理过程中,对实行能源转型的企业产生了好感,企业因此得到的收益
π_3	政府监管环境排污行为有效,导致环境污染减少,公众参与环境管理对政府产生了好感,政府因名声提高等而得到的收益

表 2 企业-政府-公众收益矩阵

Table 2 Pay off matrix of enterprises, governments and the public

博弈策略	收益结果
(实行,监管,参与)	$\{ (1 - \alpha\tau)[\pi_F - (1 - \beta)C_1 + \pi_0] + \pi_2, \alpha\tau[\pi_F - (1 - \beta)C_1 + \pi_0] - \beta C_1 - C_4 + \pi_3, \pi_1 - C_3 + A \}$
(实行,监管,不参与)	$\{ (1 - \alpha\tau)[\pi_F - (1 - \beta)C_1 + \pi_0], \alpha\tau[\pi_F - (1 - \beta)C_1 + \pi_0] - \beta C_1 - C_4, \pi_1 \}$
(实行,不监管,参与)	$\{ (1 - \tau)(\pi_F - C_1 + \pi_0) + \pi_2, \tau(\pi_F - C_1 + \pi_0) - \theta_2 R_2, \pi_1 - C_3 + A \}$
(实行,不监管,不参与)	$\{ (1 - \tau)(\pi_F - C_1 + \pi_0), \tau(\pi_F - C_1 + \pi_0), \pi_1 \}$
(不实行,监管,参与)	$\{ (1 - \tau)\pi_F - \theta_1 F - E_1 - C_2, \tau\pi_F + \theta_1 F - C_4 + \pi_3, \pi_1 - C_3 + A - R_1 + E_1 \}$
(不实行,监管,不参与)	$\{ (1 - \tau)\pi_F - \theta_1 F - C_2, \tau\pi_F + \theta_1 F - C_4, -R_1 \}$
(不实行,不监管,参与)	$\{ (1 - \tau)\pi_F - E_1 - C_2, t\pi_F - \theta_2 E_2, \pi_1 - C_3 + A + E_1 - R_1 + \theta_2 E_2 \}$
(不实行,不监管,不参与)	$\{ (1 - \tau)\pi_F - C_2, t\pi_F, -R_1 \}$

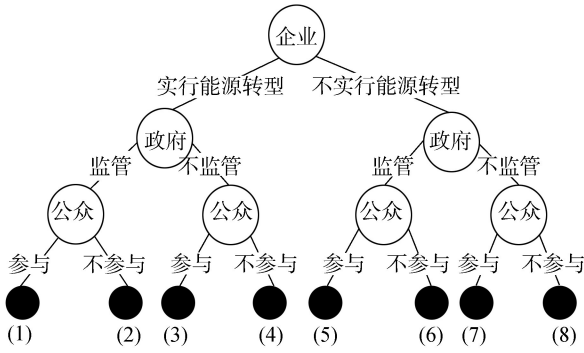


图1 企业-政府-公众三方博弈模型

Fig.1 Tripartite game model among enterprises, governments and the public

1.2 演化博弈模型建立

假设企业群体选择“实行能源转型”的比例为 x ($0 \leq x \leq 1$), 选择“不实行能源转型”的比例为 $1-x$; 政府群体选择“监管”的比例为 y ($0 \leq y \leq 1$), 选择“不监管”的比例为 $1-y$; 公众群体选择“参与环境管理”的比例为 z , 选择“不参与环境管理”的比例为 $1-z$ ($0 \leq z \leq 1$)。设企业“实行能源转型”与“不实行能源转型”的期望收益及总的平均收益分别为 U_{1Y} 、 U_{1N} 和 \bar{U}_1 ; 政府“监管”与“不监管”的期望收益及总的平均收益分别为 U_{2Y} 、 U_{2N} 和 \bar{U}_2 ; 公众选择“参与环境管理”与“不参与环境管理的期望收益及总的平均收益分别为 U_{3Y} 、 U_{3N} 和 \bar{U}_3 。

根据以上分析,可以构建各博弈方的收益期望,其中:

1) 企业的期望收益为

$$\begin{aligned}
 U_{1Y} &= yz\{(1-\alpha\tau)[\pi_F - (1-\beta)C_1 + \pi_0] + \pi_2\} + \\
 &\quad y(1-z)\{(1-\alpha\tau)[\pi_F - (1-\beta)C_1 + \pi_0]\} + \\
 &\quad (1-y)z[(1-\tau)(\pi_F - C_1 + \pi_0) + \pi_2] + \\
 &\quad (1-y)(1-z)[(1-\tau)(\pi_F - C_1 + \pi_0)] \\
 U_{1N} &= yz[(1-t)\pi_F - \theta_1 F - E_1 - C_2] + y(1-z) \\
 &\quad [(1-t)\pi_F - \theta_1 F - C_2] + (1-y)z[(1-t)\pi_F - \\
 &\quad E_1 - C_2] + (1-y)(1-z)[(1-t)\pi_F - C_2] \\
 \bar{U}_1 &= xU_{1Y} + (1-x)U_{1N} = xyz\{(1-\alpha\tau)[\pi_F - \\
 &\quad (1-\beta)C_1 + \pi_0] + \pi_2\} + xy(1-z)\{(1-\alpha\tau)[\pi_F - \\
 &\quad (1-\beta)C_1 + \pi_0]\} + x(1-y)z[(1- \\
 &\quad \tau)(\pi_F - C_1 + \pi_0) + \pi_2] + x(1-y)(1-z)[(1- \\
 &\quad \tau)(\pi_F - C_1 + \pi_0)] + (1-x)yz[(1-\tau)\pi_F - \theta_1 F - \\
 &\quad E_1 - C_2] + (1-x)y(1-z)[(1-\tau)\pi_F - \theta_1 F - \\
 &\quad C_2] + (1-x)(1-y)z[(1-\tau)\pi_F - E_1 - C_2] + \\
 &\quad (1-x)(1-y)(1-z)[(1-\tau)\pi_F - C_2]
 \end{aligned}$$

2) 政府的期望收益为

$$U_{2Y} = xz\{\alpha\tau[\pi_F - (1-\beta)C_1 + \pi_0] - \beta C_1 - C_4 +$$

$$\begin{aligned}
 &\pi_3\} + x(1-z)\{\alpha\tau[\pi_F - (1-\beta)C_1 + \pi_0] - \beta C_1 - \\
 &\quad C_4\} + (1-x)z(\tau\pi_F + \theta_1 F - C_4 + \pi_3) + (1-x) \\
 &\quad (1-z)(\tau\pi_F + \theta_1 F - C_4)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 U_{2N} &= xz[\tau(\pi_F - C_1 + \pi_0) - \theta_2 R_2] + x(1- \\
 &\quad z)[\tau(\pi_F - C_1 + \pi_0)] + (1-x)z(t\pi_F - \\
 &\quad \theta_2 E_2) + (1-x)(1-z)(t\pi_F)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \bar{U}_2 &= yU_{2Y} + (1-y)U_{2N} = y\{xz\{\alpha\tau[\pi_F - (1- \\
 &\quad \beta)C_1 + \pi_0] - \beta C_1 - C_4 + \pi_3\} + x(1-z)\{\alpha\tau[\pi_F - \\
 &\quad (1-\beta)C_1 + \pi_0] - \beta C_1 - C_4\} + (1-x)z(\tau\pi_F + \theta_1 F - \\
 &\quad C_4 + \pi_3) + (1-x)(1-z)(\tau\pi_F + \theta_1 F - C_4)\} + (1- \\
 &\quad y)\{xz[\tau(\pi_F - C_1 + \pi_0) - \theta_2 R_2] + x(1-z)[\tau(\pi_F - \\
 &\quad C_1 + \pi_0)] + (1-x)z(t\pi_F - \theta_2 E_2) + \\
 &\quad (1-x)(1-z)(t\pi_F)\}
 \end{aligned}$$

3) 公众的期望收益为

$$\begin{aligned}
 U_{3Y} &= xy(\pi_1 - C_3 + A) + x(1-y)((\pi_1 - C_3 + A) + \\
 &\quad (1-x)y(\pi_1 - C_3 + A - R_1 + E_1) + (1-x)(1- \\
 &\quad y)(\pi_1 - C_3 + A + E_1 - R_1 + \theta_2 E_2)) \\
 U_{3N} &= xy\pi_1 + x(1-y)\pi_1 + (1-x)y(-R_1) + \\
 &\quad (1-x)(1-y)(-R_1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \bar{U}_3 &= zU_{3Y} - (1-z)U_{3N} = z\{xy(\pi_1 - C_3 + A) + \\
 &\quad x(1-y)(\pi_1 - C_3 + A) + (1-x)y(\pi_1 - C_3 + A - \\
 &\quad R_1 + E_1) + (1-x)(1-y)(\pi_1 - C_3 + A + E_1 - \\
 &\quad R_1 + \theta_2 E_2)\} - (1-z)\{xy\pi_1 + x(1-y)\pi_1 + (1- \\
 &\quad x)y(-R_1) + (1-x)(1-y)(-R_1)\}
 \end{aligned}$$

1.3 基于复制动态方程的稳定策略

根据演化博弈理论原理可知,当某一种策略的支付或适应度比种群的平均适应度高时,这种策略在种群中就会演化发展,具体表现是种群中使用某种策略的个体在种群中所在比例增长率大于零,这一过程称为复制动态方程。实际上,复制动态方程是某种特定策略在某一种群中被采用的频率或频度的动态微分方程^[19]。

1) 基于复制动态方程原理,可构造企业策略的复制动态方程为

$$\begin{aligned}
 F(x) &= \frac{dx}{dt} = x(U_{1Y} - \bar{U}_1) = \\
 &\quad x(1-x)(C_1 - \pi_0 - \tau C_1 - zE_1 + \tau\pi_0 - z\pi_2 - \\
 &\quad \beta y C_1 + \tau y C_1 - \theta_1 y F - \tau y \pi_F - \tau y \pi_0 - \alpha \tau y C_1 + \\
 &\quad \alpha \tau y \pi_F + \tau \alpha \beta y C_1 + \alpha \tau y z \pi_0) = \\
 &\quad x(1-x)[z(C_2 - E_1 - \pi_2 - y C_2 + y \alpha \tau \pi_0) + \\
 &\quad y(C_2 + \tau C_1 - \beta C_1 - \theta_1 F - \tau \pi_F - \\
 &\quad \tau \pi_0 - \alpha \tau C_1 + \alpha \tau \pi_F + \tau \alpha \beta C_1) + C_1 - C_2 - \\
 &\quad \pi_0 - \tau C_1 + \tau \pi_0]
 \end{aligned}$$

①若

$$z = [y(C_2 + \tau C_1 - \beta C_1 - \theta_1 F - \tau \pi_F - \tau \pi_0 -$$

$\alpha\tau C_1 + \alpha\tau\pi_F + \tau\alpha\beta C_1) + C_1 - C_2 - \pi_0 - \tau C_1 + \tau\pi_0]/(E_1 + \pi_2 + yC_2 - C_2 - y\alpha\tau\pi_0)$
时,则 $F(x) \equiv 0$,这意味着所有水平都是稳定状态。

②若
 $z \neq [y(C_2 + \tau C_1 - \beta C_1 - \theta_1 F - \tau\pi_F - \tau\pi_0 - \alpha\tau C_1 + \alpha\tau\pi_F + \tau\alpha\beta C_1) + C_1 - C_2 - \pi_0 - \tau C_1 + \tau\pi_0]/(E_1 + \pi_2 + yC_2 - C_2 - y\alpha\tau\pi_0)$
时,令 $F(x) = 0$,得 $x = 0, x = 1$ 是 x 的两个稳定点。
对 $F(x)$ 求导得:

$$\frac{dF(x)}{dx} = (1 - 2x)[z(C_2 - E_1 - \pi_2 - yC_2 + y\alpha\tau\pi_0) + y(C_2 + \tau C_1 - \beta C_1 - \theta_1 F - \tau\pi_F - \tau\pi_0 - \alpha\tau C_1 + \alpha\tau\pi_F + \tau\alpha\beta C_1) + C_1 - C_2 - \pi_0 - \tau C_1 + \tau\pi_0]$$

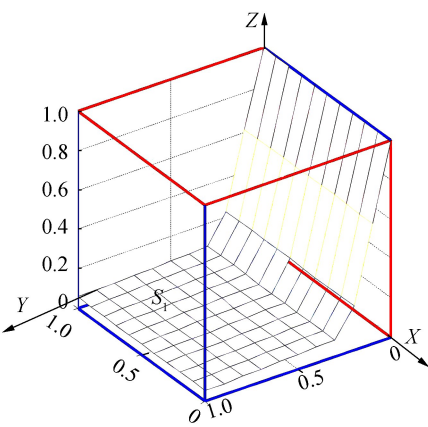
当 $C_2 - E_1 - \pi_2 - yC_2 + y\alpha\tau\pi_0 < 0$,又分两种情况:

a) 当
 $z > [y(C_2 + \tau C_1 - \beta C_1 - \theta_1 F - \tau\pi_F - \tau\pi_0 - \alpha\tau C_1 + \alpha\tau\pi_F + \tau\alpha\beta C_1) + C_1 - C_2 - \pi_0 - \tau C_1 + \tau\pi_0]/(E_1 + \pi_2 + yC_2 - C_2 - y\alpha\tau\pi_0)$
时, $\frac{dF(x)}{dx}|_{x=1} > 0, \frac{dF(x)}{dx}|_{x=0} < 0$,此时 $x = 0$ 为全局唯一的演化稳定策略;当公众参与环境管理达到一定程度并呈增大趋势时,污染企业实行能源转型的可能性逐步减小,最终不实行能源转型策略是其最优选择,显然此种状态不符合现实情况,是一种无效状态。

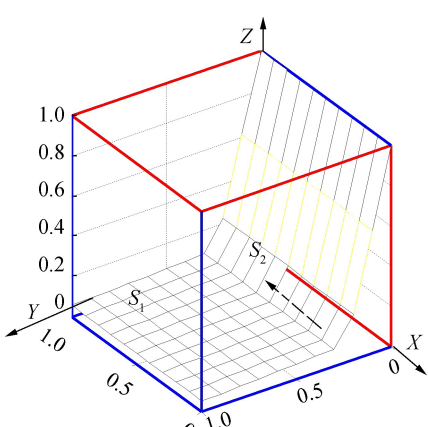
b) 当
 $z < [y(C_2 + \tau C_1 - \beta C_1 - \theta_1 F - \tau\pi_F - \tau\pi_0 - \alpha\tau C_1 + \alpha\tau\pi_F + \tau\alpha\beta C_1) + C_1 - C_2 - \pi_0 - \tau C_1 + \tau\pi_0]/(E_1 + \pi_2 + yC_2 - C_2 - y\alpha\tau\pi_0)$
时, $\frac{dF(x)}{dx}|_{x=1} < 0, \frac{dF(x)}{dx}|_{x=0} > 0$,此时 $x = 1$ 为全局唯一的演化稳定策略;当公众参与环境管理达不到一定程度并呈下降趋势时,污染企业实行能源转型的可能性逐步增大,实行能源转型策略是企业的最优选择,显然此种状态也不符合现实情况,是一种无效状态。

当 $C_2 - E_1 - \pi_2 - yC_2 + y\alpha\tau\pi_0 > 0$,又分两种情况:
a) 当
 $z > [y(C_2 + \tau C_1 - \beta C_1 - \theta_1 F - \tau\pi_F - \tau\pi_0 - \alpha\tau C_1 + \alpha\tau\pi_F + \tau\alpha\beta C_1) + C_1 - C_2 - \pi_0 - \tau C_1 + \tau\pi_0]/(E_1 + \pi_2 + yC_2 - C_2 - y\alpha\tau\pi_0)$
时, $\frac{dF(x)}{dx}|_{x=1} < 0, \frac{dF(x)}{dx}|_{x=0} > 0$,此时 $x = 1$ 为全局唯一的演化稳定策略;当公众参与环境管理达到一定程度并呈增大趋势时,污染企业实行能源转型的可能性逐步加大,最终实行能源转型策略是其最优选择。

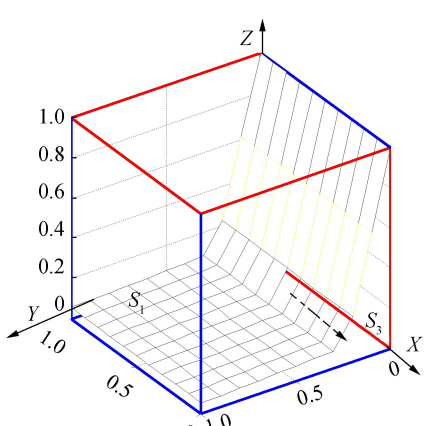
b) 当
 $z < [y(C_2 + \tau C_1 - \beta C_1 - \theta_1 F - \tau\pi_F - \tau\pi_0 - \alpha\tau C_1 + \alpha\tau\pi_F + \tau\alpha\beta C_1) + C_1 - C_2 - \pi_0 - \tau C_1 + \tau\pi_0]/(E_1 + \pi_2 + yC_2 - C_2 - y\alpha\tau\pi_0)$
时, $\frac{dF(x)}{dx}|_{x=1} > 0, \frac{dF(x)}{dx}|_{x=0} < 0$,此时 $x = 0$ 为全局唯一的演化稳定策略;当公众参与环境管理达到一定程度并呈下降趋势时,污染企业实行能源转型的可能性逐步减小,最终不实行能源转型策略是其最优选择。企业群体3种情况下的动态趋势及稳定性如图2所示。



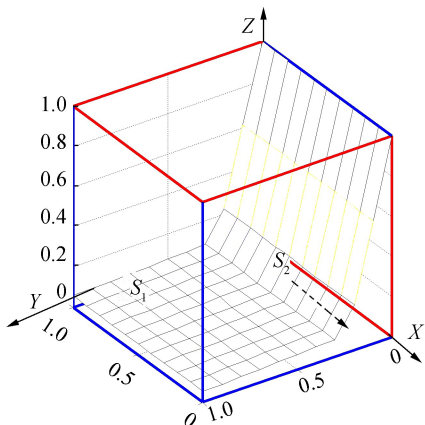
(a) 公共健康损失赔偿较大时,企业行为演化图



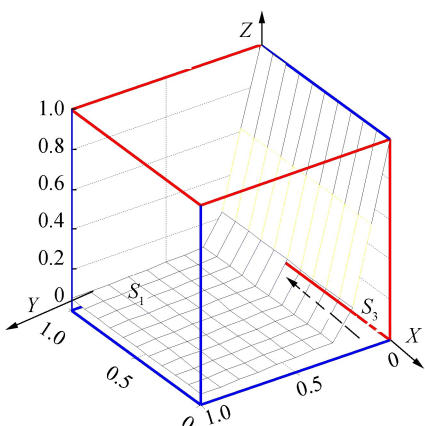
(b) 公众参与环境管理程度较高时,企业行为演化图



(c) 公众参与环境管理程度较低时,企业行为演化图



(d) 企业不实行能源转型成本较大且公众参与环境管理行为较强时,企业行为演化图



(e) 企业不实行能源转型成本较小且公众参与环境管理行为较弱时,企业行为演化图

图2 企业群体的复制动态相位图

Fig.2 Phase diagram of replicator dynamics for enterprises group

2) 基于复制动态方程原理,可构造政府策略的复制动态方程为

$$F(y) = \frac{dy}{dt} = y(U_{2Y} - \bar{U}_2) = y(1-y)[z(-\pi_3 - \theta_2 E_2 + x\theta_2 E_2 - x\theta_2 R_2) + x(\beta C_1 - \tau C_1 + \theta_1 F + \tau \pi_F + \tau \pi_0 + \alpha \tau C_1 - \alpha \tau \pi_F - \alpha \tau \pi_0 - \alpha \beta \tau C_1) + C_4 - \theta_1 F]$$

①若 $z = [x(\beta C_1 - \tau C_1 + \theta_1 F + \tau \pi_F + \tau \pi_0 + \alpha \tau C_1 - \alpha \tau \pi_F - \alpha \tau \pi_0 - \alpha \beta \tau C_1) + C_4 - \theta_1 F]/\pi_3 + \theta_2 E_2 - x\theta_2 E_2 + x\theta_2 R_2$ 时,则 $F(y) \equiv 0$,这意味着所有水平都是稳定状态。

②若

$$z \neq [x(\beta C_1 - \tau C_1 + \theta_1 F + \tau \pi_F + \tau \pi_0 + \alpha \tau C_1 - \alpha \tau \pi_F - \alpha \tau \pi_0 - \alpha \beta \tau C_1) + C_4 - \theta_1 F]/\pi_3 + \theta_2 E_2 - x\theta_2 E_2 + x\theta_2 R_2$$

时,令 $F(y) = 0$,得 $y = 0$, $y = 1$ 是 y 的两个稳定点,对 $F(y)$ 求得:

$$\frac{dy}{dy} = (1-2y)[z(-\pi_3 - \theta_2 E_2 + x\theta_2 E_2 - \theta_2 R_2 x) +$$

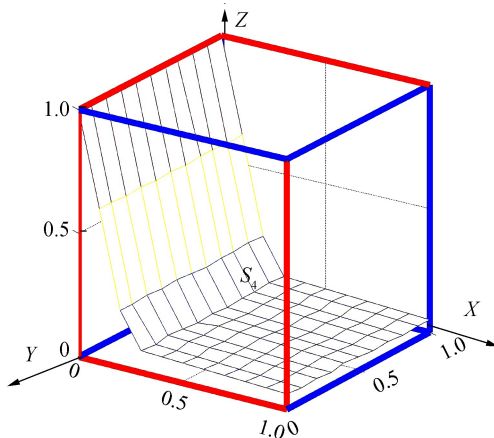
$$x(\beta C_1 - \tau C_1 + \theta_1 F + \tau \pi_F + \tau \pi_0 + \alpha \tau C_1 - \alpha \tau \pi_F - \alpha \tau \pi_0 - \alpha \beta \tau C_1) + C_4 - \theta_1 F]$$

显然, $-\pi_3 - \theta_2 E_2 + x\theta_2 E_2 - x\theta_2 R_2 < 0$,此时又分两种情况:

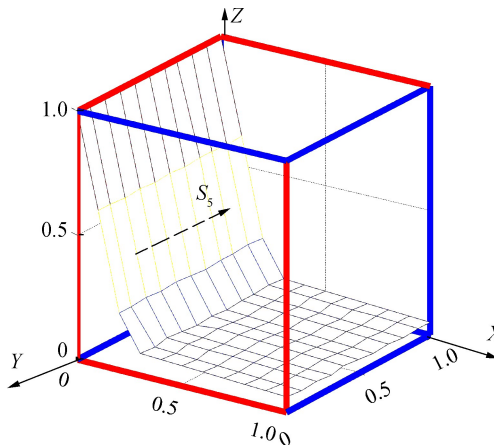
a) 当 $z > [x(\beta C_1 - \tau C_1 + \theta_1 F + \tau \pi_F + \tau \pi_0 + \alpha \tau C_1 - \alpha \tau \pi_F - \alpha \tau \pi_0 - \alpha \beta \tau C_1) + C_4 - \theta_1 F]/\pi_3 + \theta_2 E_2 - x\theta_2 E_2 + x\theta_2 R_2$ 时, $\frac{dF(z)}{dz}|_{y=0} < 0$, $\frac{dF(z)}{dz}|_{y=1} > 0$,此时 $y = 0$ 是全局唯一的演化稳定策略;

当公众参与环境管理的可能性足够大并呈增大趋势时,地方政府对企业排污监管的力度会越来越小,此时不监管或监管不严是地方政府的最优选择。

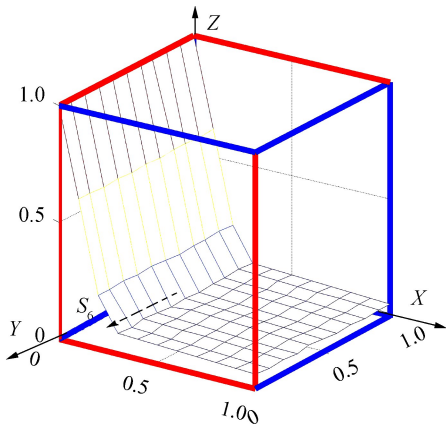
b) 当 $z < [x(\beta C_1 - \tau C_1 + \theta_1 F + \tau \pi_F + \tau \pi_0 + \alpha \tau C_1 - \alpha \tau \pi_F - \alpha \tau \pi_0 - \alpha \beta \tau C_1) + C_4 - \theta_1 F]/\pi_3 + \theta_2 E_2 - x\theta_2 E_2 + x\theta_2 R_2$ 时, $\frac{dF(z)}{dz}|_{y=0} > 0$, $\frac{dF(z)}{dz}|_{y=1} < 0$,此时 $y = 1$ 是全局唯一的演化稳定策略;当公众参与环境管理的可能性足够小并呈减小趋势时,地方政府对企业排污监管的力度会越来越大,此时监管或严格监管是地方政府的最优选择。政府群体3种情况下的动态趋势及稳定性如图3。



(a) 政府监管收益较高时,政府行为演化图



(b) 公众参与环境管理程度较高时,政府行为演化图



(c) 公众参与环境管理程度较小时,政府行为演化图
图3 政府群体的动态相位图

Fig.3 Phase diagram of replicator dynamics for governments group

3) 基于复制动态方程原理,可构造公众策略的复制

$$F(z) = \frac{dz}{dt} = z(U_{3Y} - \bar{U}_3) = z(1-z)[y(xE_2\theta_2 - E_2\theta_2) + x(2R_1 - E_1 + \pi_1 - E_2\theta_2) + A - C_3 + E_1 - 2R_1 + \pi_1 + E_2\theta_2]$$

① $y = x(2R_1 - E_1 + \pi_1 - E_2\theta_2) + A - C_3 + E_1 - 2R_1 + \pi_1 + E_2\theta_2 / (E_2\theta_2 - xE_2\theta_2)$ 时,则 $F(z) \equiv 0$,这意味着所有水平都是稳定状态。

② 若 $y \neq x(2R_1 - E_1 + \pi_1 - E_2\theta_2) + A - C_3 + E_1 - 2R_1 + \pi_1 + E_2\theta_2 / (E_2\theta_2 - xE_2\theta_2)$ 时,令 $F(z) = 0$,得 $z = 0, z = 1$ 是 z 的两个稳定点,对

$F(z)$ 求导得:

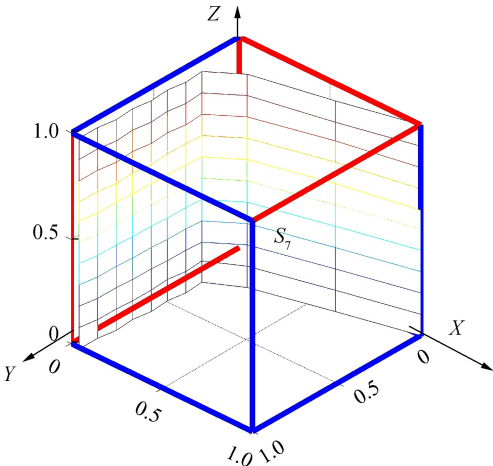
$$\frac{dF(z)}{dz} = (1-2z)[y(xE_2\theta_2 - E_2\theta_2) + x(2R_1 - E_1 + \pi_1 - E_2\theta_2) + A - C_3 + E_1 - 2R_1 + \pi_1 + E_2\theta_2]$$

显然, $xE_2\theta_2 - E_2\theta_2 < 0$,此时又分两种情况:

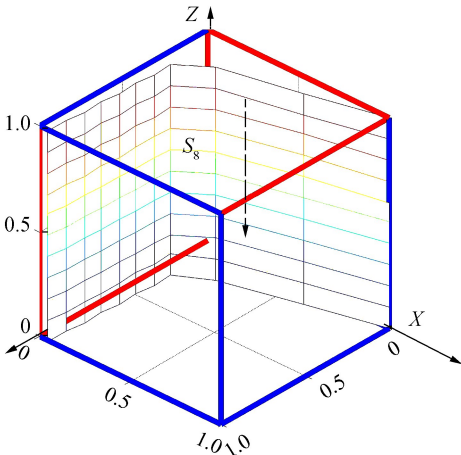
a) $y > x(2R_1 - E_1 + \pi_1 - E_2\theta_2) + A - C_3 + E_1 - 2R_1 + \pi_1 + E_2\theta_2 / (E_2\theta_2 - xE_2\theta_2)$ 时, $\frac{dF(z)}{dz} \Big|_{z=0} < 0, \frac{dF(z)}{dz} \Big|_{z=1} > 0$,此时 $z = 0$ 为全局唯一的演化稳定策略;当政府监管的力度达到一定程度并呈增大趋势时,公众参与环境管理的可能性逐步减小,最终不参与环境管理是其最优选择。

b) $y < x(2R_1 - E_1 + \pi_1 - E_2\theta_2) + A - C_3 + E_1 - 2R_1 + \pi_1 + E_2\theta_2 / (E_2\theta_2 - xE_2\theta_2)$ 时, $\frac{dF(z)}{dz} \Big|_{z=0} > 0, \frac{dF(z)}{dz} \Big|_{z=1} < 0$,此时 $z = 1$ 为全局唯一的演化稳定策略;当政府监管的力度足够小并呈减小趋势时,公众参与环境管理的可能性逐步加大,此

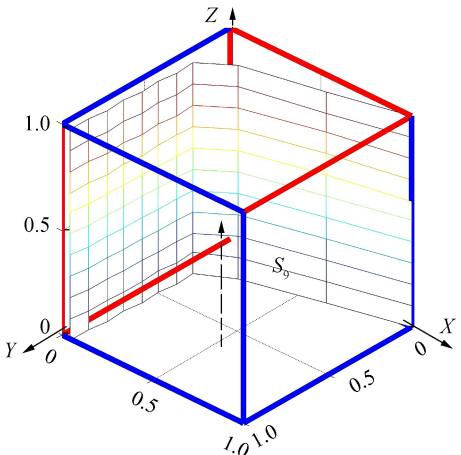
时,最终参与环境管理是公众的最优选择。公众群体3种情况下的动态趋势及稳定性如图4。



(a) 政府不监管被公众发现的概率较高时,公众行为演化图



(b) 政府监管行为较高时,公众行为演化图



(c) 政府监管行为较小时,公众行为演化图
图4 公众群体的动态相位图

Fig.4 Phase diagram of replicator dynamics for the public group

1.4 模型稳定性分析

由图2可知,平面 S_1 把三维区域分为 S_2 与 S_3 两部分;由图3可知,平面 S_4 把三维区域分为 S_5 与 S_6

两部分;由图4可知,平面 S_7 把三维区域分为 S_8 与 S_9 两部分。综合该非对称三方参与主体的演化博弈可以得到不同的均衡状态,讨论分析如下:

由前面分析可知,在 $C_2 - E_1 - \pi_2 - yC_2 + y\alpha\tau\pi_0 < 0$ 、 $-\pi_3 - \theta_2 E_2 + x\theta_2 E_2 - \theta_2 R_2 < 0$ 与 $x E_2 \theta_2 - E_2 \theta_2 < 0$ 的条件下,系统状态与现实不符,是一种无效状态。

在 $C_2 - E_1 - \pi_2 - yC_2 + y\alpha\tau\pi_0 > 0$ 、 $-\pi_3 - \theta_2 E_2 + x\theta_2 E_2 - \theta_2 R_2 < 0$ 与 $x E_2 \theta_2 - E_2 \theta_2 < 0$ 的条件下:

1) 当初始状态落在 S_2 、 S_5 与 S_8 区域的交集空间时,该博弈收敛于平衡点 $(1, 0, 0)$,即(实行能源转型、不监管、不参与环境管理)是企业、政府与公众的三方博弈群体中所有参与者的必然选择。通过1.3小节企业策略的复制动态方程可知,当企业对公众公共健康损失赔偿增大、企业不实行能源转型的机会成本增大、公众对企业能源转型好感增强时, $\frac{dF(x)}{dx}|_{x=1} < 0$,企业实行能源转型的策略 $x \rightarrow 1$;当公众参与环境管理的概率极大时,政府监管策略会减小;当政府监管污染企业的概率增加、公众参与环境管理所得收益较小时,公众不参与环境管理。

2) 当初始状态落在 S_2 、 S_5 与 S_9 区域的交集空间时,该博弈收敛于平衡点 $(1, 0, 1)$,即(实行能源转型、不监管、参与环境管理)是企业、政府与公民的三方博弈群体中所有参与者的必然选择。根据复制动态方程可知,当政府监管环境管理成本稍增加、监管策略概率减下时,公众参与环境管理的策略概率 $z \rightarrow 1$,而政府监管企业的策略概率 $y \rightarrow 0$ 。通过对比状态①和②可知,只要影响企业、政府、公众三方博弈因素参数稍作变化,三方博弈策略的收敛路径就会变化。

3) 当初始状态落在 S_2 、 S_6 与 S_8 区域的交集空间时,该博弈收敛于平衡点 $(1, 1, 0)$,即(实行能源转型、监管、不参与环境管理)是企业、政府与公民的三方博弈群体中所有参与者的必然选择。基于1.3复制动态方程中的参数可知,当政府对公众奖励 A 较小、政府不监管被公众发现的概率 θ_2 以及政府向公众支付的额外损失赔偿 E_2 较小时,公众参与环境管理的概率 $z \rightarrow 0$;当政府对排污企业不监管被公众发现的声誉损失 R_2 与公共健康损失赔偿 E_2 之差减小时,即政府不监管排污企业的声誉损失全部用于公共健康损失赔偿时,政府监管企业的概率 $y \rightarrow 1$ 。

4) 当初始状态落在 S_2 、 S_6 与 S_9 区域的交集空间时,该博弈收敛于平衡点 $(1, 1, 1)$,即(实行能源转型、监管、参与环境管理)是企业、政府与公民的三方博弈群体中所有参与者的必然选择。由1.3复制动态方程可知,当政府对公众奖励 A 较大、政府不监管被公众发现的概率 θ_2 以及政府向公众支付的额外损失赔偿 E_2 较大时,公众参与环境管理的概率 $z \rightarrow 0$ 。下列5)~8)4种状态跟上述1)~4)4种状态政

府、公众策略的演化路径分别一致,企业策略的演化路径相反。由此,也可得出,在整个三维空间策略内,该三方博弈不会收敛于某一稳定策略。

5) 当初始状态落在 S_3 、 S_5 与 S_8 区域的交集空间时,该博弈收敛于平衡点 $(0, 0, 0)$,即(不实行能源转型、不监管、不参与环境管理)是企业、政府与公民的三方博弈群体中所有参与者的必然选择。根据三方复制动态方程可知,公众公共健康损失赔偿 E_1 较小、企业能源转型的声誉收益 π_3 较少、政府对企业的罚金 F 较少时,三方群体的演化博弈路径为 $\{x \rightarrow 0, y \rightarrow 0, z \rightarrow 0\}$ 。

6) 当初始状态落在 S_3 、 S_5 与 S_9 区域的交集空间时,该博弈收敛于平衡点 $(0, 0, 1)$,即(不实行能源转型、不监管、参与环境管理)是企业、政府与公民的三方博弈群体中所有参与者的必然选择。根据三方复制动态方程分析可知,公众公共健康水平获得收益 π_1 增加、公众参与环境管理成本 C_3 较小、政府对企业的罚金 F 较大时,三方群体的演化博弈路径为 $\{x \rightarrow 0, y \rightarrow 0, z \rightarrow 1\}$ 。

7) 当初始状态落在 S_3 、 S_6 与 S_8 区域的交集空间时,该博弈收敛于平衡点 $(0, 1, 0)$,即(不实行能源转型、监管、不参与环境管理)是企业、政府与公民的三方博弈群体中所有参与者的必然选择。根据三方复制动态方程分析可知,政府监管企业的成本 C_4 减小、政府对企业的罚金 F 较大时、补贴成本 β 增大时,三方群体的演化博弈路径为 $\{x \rightarrow 0, y \rightarrow 1, z \rightarrow 0\}$ 。

8) 当初始状态落在 S_3 、 S_6 与 S_9 区域的交集空间时,该博弈收敛于平衡点 $(0, 1, 1)$,即(不实行能源转型、监管、参与环境管理)是企业、政府与公民的三方博弈群体中所有参与者的必然选择。根据三方复制动态方程分析可知,政府对企业的罚金 F 较小、公众公共健康损失赔偿 E_1 较小、能源转系成本 C_1 较小、补贴成本 β 减小、税收减免比率 α 增大时,三方群体的演化博弈路径为 $\{x \rightarrow 0, y \rightarrow 1, z \rightarrow 1\}$ 。

通过对模型分析可知,尽管该三方博弈在某一局部范围内会收敛于各自的稳定策略(平衡点),但该三方博弈过程不会固定地演化为某一个固定策略的集合,这是因为,在能源消费背景下,影响企业能源消费转型、政府监管与公众参与环境管理的因素有多种,结合1.3小节复制动态方程、对上述八种策略的局部稳定性分析可知,当某一个随机因素发生改变,将促使其中一方也会改变选择策略,且这三方的行为决策又是相互影响,相互作用的,这将促使三方的策略选择不断调整。从而使该模型没有演化稳定策略。然而在环境污染日益恶化的今天,公众参与的环境行为必不可少,本文的第4)种情形与现实情况比较吻合,是理想的博弈结果。由于本文涉及参数较多,在没有具体值的情况下,参数间相互影响的分析比较不容易,针对这种情况,本文通过算例来

研究第 4) 种情形。

2 数值实验

由于所列式子的复杂性,针对企业实行能源转型后,政府对其减免税收的比率 α 、政府给予实行能源转型企业成本的补贴 β ,以及公众公共健康损失赔偿 E_1 、政府对不实行能源转型企业的罚金 F 等政策参数采用 Matlab 软件(版本:R2012b)对第 4) 中情形做数值模拟,以期得到有益的结论为政府监管相关部门及公共卫生部门的决策提供参考。

2.1 选择某种策略初始情况变化对演化结果影响

数值实验结果如图 5,其中 x 、 y 和 z 分别表示污染企业选择实行能源转型的初始比例、政府选择监管的比例以及公众选择参与环境管理的比例。基于山西省某发电企业和专家咨询,满足上文系统博弈收敛于平衡点(1,1,1)的第 4) 种情形下参数值如下(单位:万元): $\alpha = 0.2, \beta = 0.3, A = 150, F = 100, C_1 = 520, C_2 = 420, C_3 = 5, C_4 = 8, E_1 = 6, \tau = 0.3, \pi_F = 1000, \pi_0 = 40, \pi_2 = 8, \pi_3 = 3, \pi_1 = 2, R_1 = 1.5, E_2 = 1, \theta_1 = 0.8, \theta_2 = 0.75, R_2 = 2$ 。从图 5 中得知排污企业群体、政府监管机构与公众群体之间策略交往行为演化的路径依赖性。

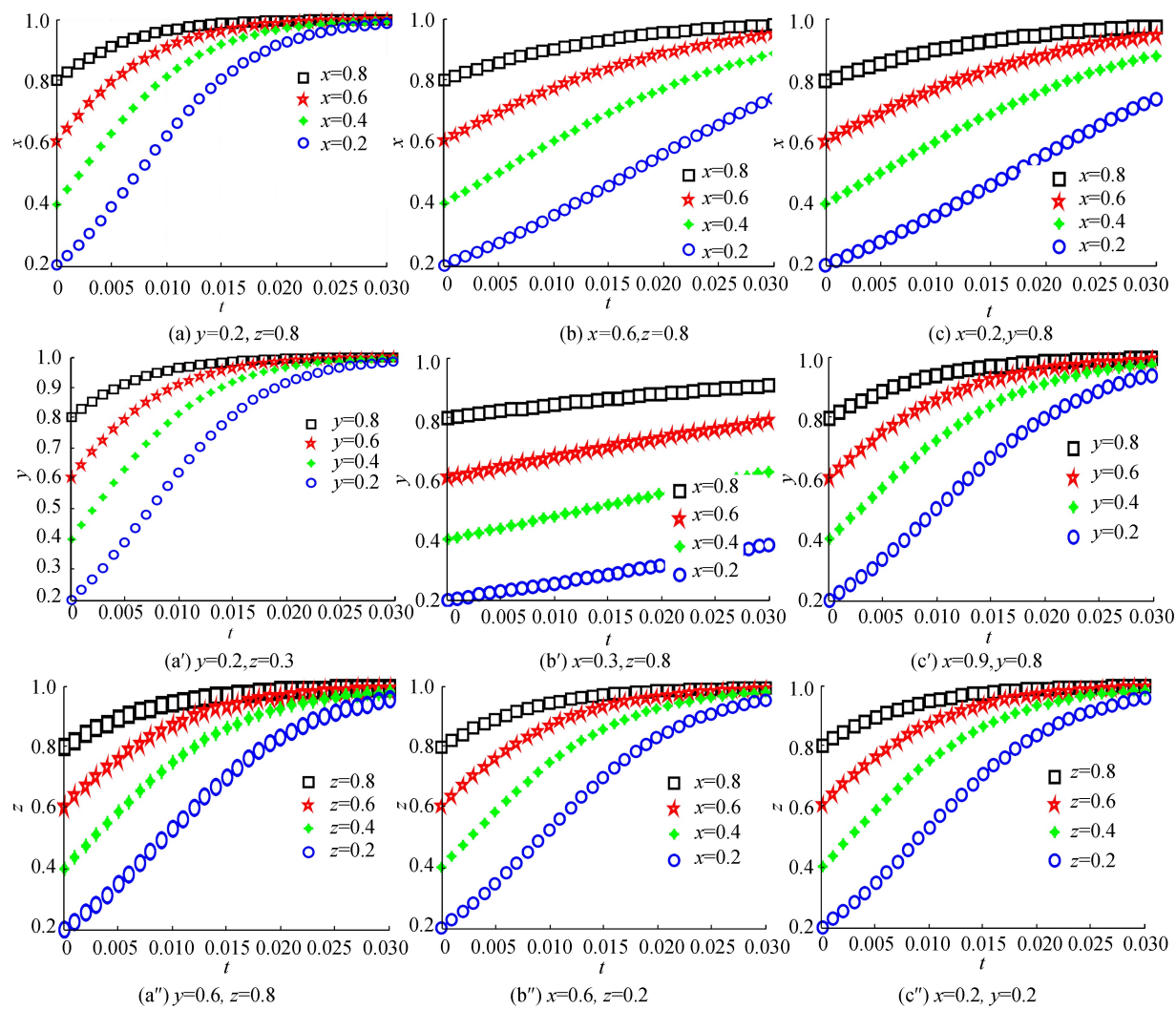


图 5 选择某一策略的不同初始情况对演化结果的影响

Fig.5 The effect of various initial conditions choosing a policy on evolution results

从图 5 中的(a)、(b)和(c)看出, x 的收敛方向与速度和 y 、 z 有关,在 y 固定的条件下, z 越大, x 收敛速度越快,可以很快收敛于理想的稳定状态;但在 z 值较高且固定的条件下,如 $z = 0.8$,从(a)、(c)可知, y 越大, x 收敛于稳定状态的速度越慢。从图 5 中的(a)、(b)和(c)看出, y 的收敛方向和速度与 x 、 z 有关,在 z 固定的条件下, x 越大, y 很快收敛于理想的稳定状态。

在 x 固定的条件下, z 值越大, y 收敛于平衡状态的速度也越快。从图 5 中的(a)、(b)和(c)看出,在 y 固定的条件下, x 取值越大, z 收敛于平衡状态的速度要稍慢;在 x 固定的条件下, y 取值越大, z 收敛于平衡状态的速度也稍慢。从图 5 中的 9 个子图可看出:污染企业、政府与公众群体各自行为的演化结果和收敛时间不仅受本群体中选择“能源转型”、“实行监管”与“参与

环境管理”各自初始比例的影响,其中一方还受另外两方选择平衡状态策略的初始概率影响。相比污染企业、政府博弈方来说,公众参与环境管理行为的策略较少受本群体初始比例与另两方初始比例的影响。

2.2 税率改变对演化结果的影响

在企业实行能源转型后,政府监管机构通常在原有税率的基础上继续减少税率。分析了税率改变对演化结果的影响。数值实验结果如图6,除参数 α 外,其他参数取值如图5。对比图5(a)和图6(a)可以看出,增大参数 α (税收减免减小),企业选择实行能源转型的演化博弈方向不会改变,但从演化博弈实验仿真数值看,增大参数 α ,企业会加快收敛速度。对比图5(b)和图6(b)可以看出,增大参数 α ,会影响政府收敛于平衡状态的方向,甚至会使演化博弈结果偏离平衡状态。对比图5(c)和图6(c)可以看出,增大参数 α ,不会改变公众参与环境管理的演化博弈方向和速度。

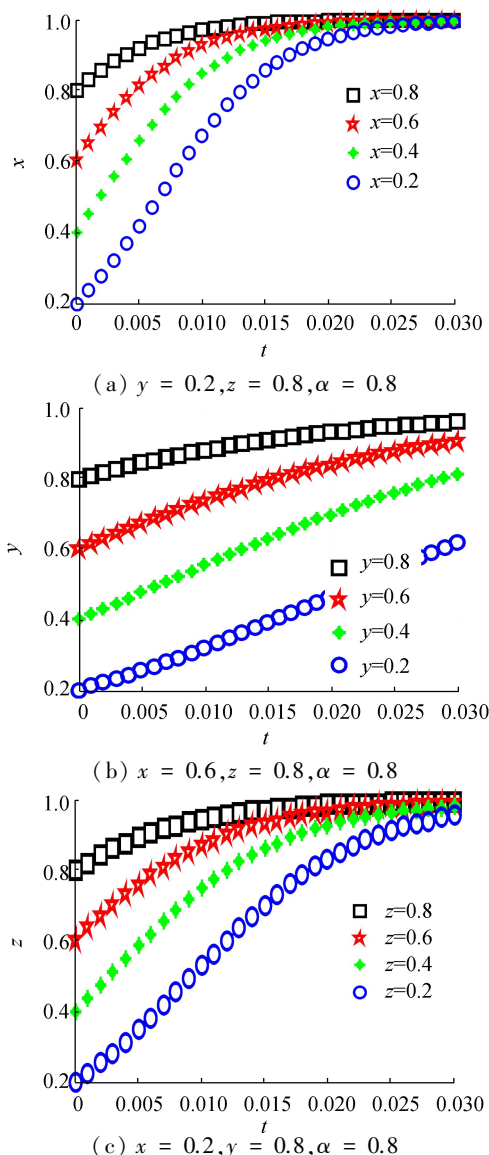


图6 政府给予能源转型的企业税率改变对演化结果的影响

Fig.6 The effect of enterprise tax changes for energy transformation given governments on evolution results

2.3 成本补贴对演化结果的影响

政府对企业实行能源转型成本的补贴对三方博弈演化结果的影响如图7(a)、(b)与(c)。分别对比图5(a)、(b)与(c)和图7(a)、(b)与(c)可知,政府对企业成本补贴的加大不会改变企业收敛于平衡状态的方向,但从实验数值观察,增加成本补贴后,企业群体演化与实行能源转型策略速度变慢;而政府群体演化于监管策略的速度会加快。

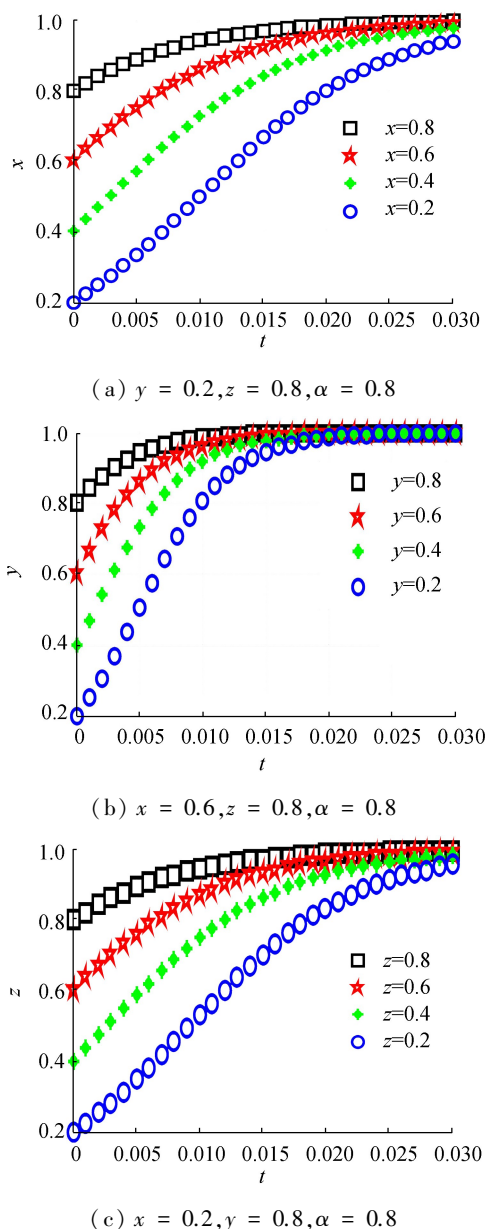


图7 实行能源转型企业成本的补贴对演化结果的影响

Fig.7 The effect of enterprise cost subsidies for energy transformation given government on evolution results

2.4 公共健康损失赔偿对演化结果的影响

公众要求不实行能源转型的企业健康损失赔偿对演化结果的影响如图8(a)、(b)与(c),除参数 E_1 外,其他参数取值同图5。分别对比图5与图8中的(a)、(b)与(c)可以看出,增加不实行能源转型的

企业对公共健康损失的赔偿不会改变各博弈方的演化方向,但对比图 5(a)与图 8(a)仿真实验数值发现,增加企业的公共健康损失赔偿可加快企业收敛到稳定状态;对比图 5(b)与图 8(b)仿真实验数值发现,增加企业的公共健康损失赔偿对政府监管不受影响;对比图 5(c)与图 8(c)的实验数据发现,增加公共健康损失赔偿,有助于加快公众参与环境管理收敛于理想的稳定状态策略。

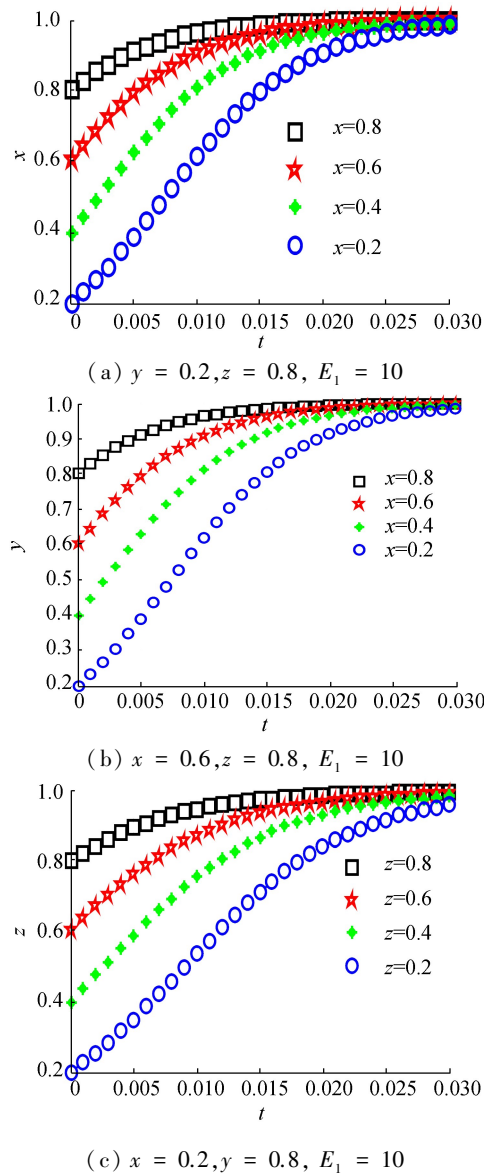


图 8 企业健康损失赔偿对演化结果的影响

Fig.8 The effect of compensation for health loss not impleting energy transformation on evolution results

2.5 政府的罚金对演化结果的影响

不实行能源转型的企业政府罚金对演化结果的影响如图 9。除参数 F 外,其他参数取值同图 5。对比图 5(a)与图 9(a)的仿真实验数值发现,适当增加罚金 F 不会改变企业实行能源转型的演化结果,但会导致演化于平衡状态的速度变慢;政府由于增

加罚金也会导致演化于平衡状态的速度变慢。

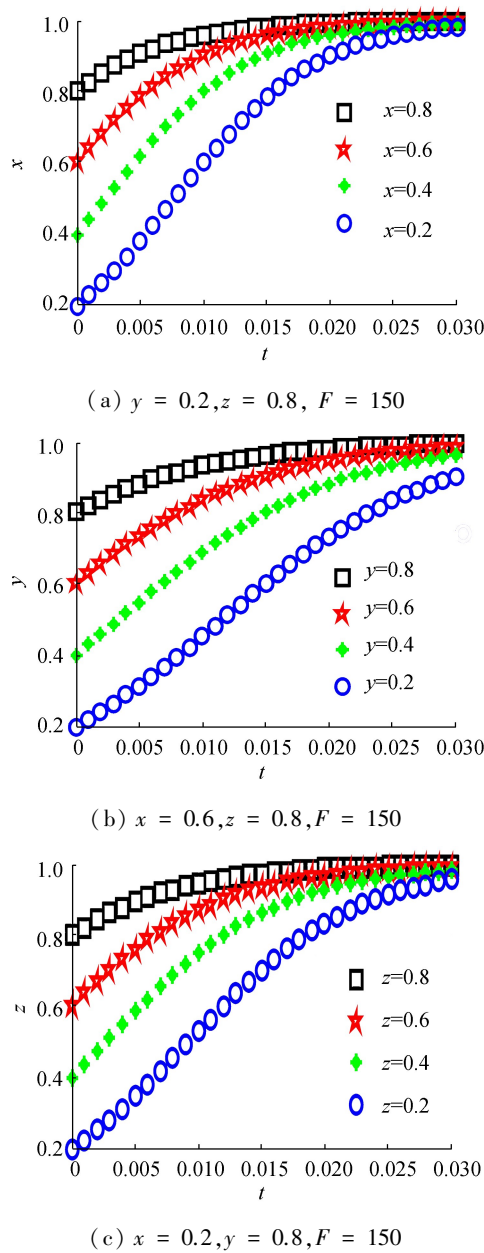


图 9 不实行能源转型企业的政府罚金对演化结果的影响

Fig.9 The effect of government's fund for enterprise not impleting energy transformation on evolution results

综上,在化石能源消费背景下,企业实行能源消费转型、政府监管与公众参与环境管理会在一定条件下收敛到理想的博弈结果,即企业实行能源转型、政府监管、公众参与环境管理;那么三方群体如何尽可能收敛于理想的博弈结果而远离“企业不实行能源转型”的策略呢?从本文图 5 可知,在政府群体监管策略一定的条件下,公众群体参与环境管理的力度越大,企业收敛于“实行能源转型”的速度越快,可见,对企业实行能源转型监管的机制,除了政府外,公众参与环境管理必不可少。因此,为使公共健康水平得以提升,首先要完善企业的社会责任机制,为企业履行社会责任提供充分的激励与约束条件。

3 结束语

化石能源消费导致的环境污染严重影响着公众的公共健康水平。为了克服政府监管不力和遏制环境污染继续恶化,提升公共健康水平,建立一种新的环境监管均衡机制,使公众有效合法全方位的参与环境管理,本文从企业自身角度出发、政府监管政策与公众参与环境管理的角度,提出如下建议:

1) 企业社会责任建设

由前文模型稳定性分析可知,为使污染企业收敛于实行能源转型策略(x 收敛于一)的理想结果,一方面,可适当增加公共健康损失赔偿 E_1 、公众对实行能源转型企业好感 π_2 ,让企业承担社会责任;另一方面,政府应给予企业激励措施,减少企业不实行能源转型策略的成本收益 C_2 (如新能源的技术成本等)。政府应注重法律政策的制定和企业道德的水平宣传,从法律规范和道德水平以及公众美誉的潜在价值上促使企业实行能源转型。

2) 政府监管与激励

短期内,政府应加强监管力度。在我国的经济、行政体制下,地方政府既有保护生态环境的责任,又有加快地方经济发展的重任。严肃查处环境污染领域的官商勾结、权钱交易行为,提高不进行清洁生产,不进行能源转型的成本。着眼长远,从法制立法的高度约束企业排污。建立法治能源市场,只要市场中的煤炭消费需求下降了,煤炭资源型经济就可以实现经济转型。从市场的角度探索环境污染交易,结合排污税和排放许可证等多种手段,处罚、激励与市场交易相结合,充分发挥市场机制的导向和政府的监管行为,实现环境污染“外部负效应成本”的“内部正效应化”。

3) 完善公众参与制度

从立法的角度建立公众参与环境管理、监管的事前、事中参与机制,把环境污染引发的公共健康损失纳入到具体的法律条款中。提高公众参与环境保护的主动意识,构建公众、政府与企业三方相互共同监管的机制。借鉴发达国家公众参与环境保护的政策,加强我国公众对环境保护的认知度,结合相应的法律体系提高国人对环保的责任感和认同感。

此外,本研究对企业、政府与公众三者策略选择的影响因素还不够全面,且没考虑三方信息不对称问题;尽管本研究给出了三方博弈各种情况下的平衡点,但没给出各种策略平衡点的规律。未来的研究可对企业、政府与公众三方群体的信息不对称问题展开分析,借助复杂网络,进一步研究总结各种情况下平衡点的规律。

参考文献:

[1] KAN Haidong, CHEN Renjie, TONG Shilu. Ambient air

pollution, climate change, and population health in China [J]. *Environment international*, 2012, 42: 10-19.

[2] 穆泉, 张世秋. 2013年1月中国大面积雾霾事件直接社会经济损失评估[J]. *中国环境科学*, 2013, 33(11): 2087-2094.

MU Quan, ZHANG Shiqu. An evaluation of the economic loss due to the heavy haze during January 2013 in China [J]. *China environmental science*, 2013, 33(11): 2087-2094.

[3] XIA Yang, GUAN Dabo, JIANG Xujia, et al. Assessment of socioeconomic costs to China's air pollution[J]. *Atmospheric environment*, 2016, 139: 147-156.

[4] WANG Yu. The analysis of the impacts of energy consumption on environment and public health in China[J]. *Energy*, 2010, 35(11): 4473-4479.

[5] ZHANG Xiaohong, ZHANG Rong, WU Liqian, et al. The interactions among China's economic growth and its energy consumption and emissions during 1978-2007[J]. *Ecological indicators*, 2013, 24: 83-95.

[6] 曲卫华, 颜志军. 能源消费对环境与公共健康的影响——基于山西省的实证分析[J]. *北京理工大学学报(社会科学版)*, 2014, 16(4): 33-41.

QU Weihua, YAN Zhijun. Impact of energy consumption on environment and public health: empirical evidence from Shanxi province[J]. *Journal of Beijing institute of technology (social sciences edition)*, 2014, 16(4): 33-41.

[7] DONG Xiaoqing, LI Chaolin, LI Ji, et al. A game-theoretic analysis of implementation of cleaner production policies in the Chinese electroplating industry[J]. *Resources, conservation and recycling*, 2010, 54(12): 1442-1448.

[8] 许士春, 何正霞, 龙如银. 环境政策工具比较: 基于企业减排的视角[J]. *系统工程理论与实践*, 2012, 32(11): 2351-2362.

XU Shichun, HE Zhengxia, LONG Ruyin. Comparative research on environmental policy instruments: enterprise emission abatement perspective[J]. *Systems engineering - theory & practice*, 2012, 32(11): 2351-2362.

[9] 郭丕斌, 周喜君, 李丹, 等. 煤炭资源型经济转型的困境与出路: 基于能源技术创新视角的分析[J]. *中国软科学*, 2013(7): 39-46.

GUO Pibin, ZHOU Xijun, LI Dan, et al. Predicament and its solution in the transformation of coal resource based economy: a perspective of energy technology innovation[J]. *China soft science*, 2013(7): 39-46.

[10] ZHENG Siqi, KAHN M E, SUN Weizeng, et al. Incentives for China's urban mayors to mitigate pollution externalities: the role of the central government and public environmentalism[J]. *Regional science and urban economics*, 2014, 47: 61-71.

[11] LI Li, WANG Jianjun, TAN Zhongfu, et al. Policies for eliminating low-efficiency production capacities and improving energy efficiency of energy-intensive industries in China [J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2014, 39: 312-326.

[12] 张国兴, 张绪涛, 汪应洛, 等. 节能减排政府补贴的最优边界问题研究 [J]. 管理科学学报, 2014, 17(11): 129-138.

ZHANG Guoxing, ZHANG Xutao, WANG Yingluo, et al. Analysis of optimal boundary of government subsidies for energy conservation and emission reduction [J]. Journal of management sciences in China, 2014, 17(11): 129-138.

[13] GERA W. Public participation in environmental governance in the Philippines: the challenge of consolidation in engaging the state [J]. Land use policy, 2016, 52: 501-510.

[14] 朱庆华, 窦一杰. 基于政府补贴分析的绿色供应链管理博弈模型 [J]. 管理科学学报, 2011, 14(6): 86-95.

ZHU Qinghua, DOU Yijie. A game model for green supply chain management based on government subsidies [J]. Journal of management sciences in China, 2011, 14(6): 86-95.

[15] KALDELLIS J K, KAPSALI M, KATSANOUE. Renewable energy applications in Greece—What is the public attitude? [J]. Energy policy, 2012, 42: 37-48.

[16] KALDELLIS J K, KAPSALI M, KALDELLI E, et al. Comparing recent views of public attitude on wind energy, photovoltaic and small hydro applications [J]. Renewable energy, 2013, 52: 197-208.

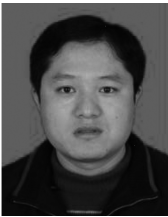
[17] 杜建国, 王敏, 陈晓燕, 等. 公众参与下的企业环境行为演化研究 [J]. 运筹与管理, 2013, 22(1): 244-251.

DU Jianguo, WANG Min, CHEN Xiaoyan, et al. Study on evolution of enterprise's environmental behavior under public participation [J]. Operations research and management science, 2013, 22(1): 244-251.

[18] 郑思齐, 万广华, 孙伟增, 等. 公众诉求与城市环境治理 [J]. 管理世界, 2013(6): 72-84.

[19] SCATÀ M, DI STEFANO A, LA CORTE A, et al. Combining evolutionary game theory and network theory to analyze human cooperation patterns [J]. Chaos, solitons & fractals, 2016, 91: 17-24.

作者简介:



曲卫华,男,1982 年生,副教授,博士。主要研究方向为能源环境经济、健康经济、健康大数据分析与复杂系统建模。发表学术论文 15 篇。被 SCI/SSCI 论文检索 2 篇,被 EI 检索 1 篇,被 CSSCI、CSCD 检索 5 篇。



颜志军,男,1974 年生,教授,博导,博士,主要研究方向为电子商务、健康管理、医疗大数据分析、社会网络分析。先后主持和参与国家自然科学基金、科技部、“973”课题、“863”课题、“十五”科技攻关专题、国防科工委“十一五”基础科研”等重要科研课题 20 余项。发表学术论文 70 余篇,其中被 SCI/SSCI/EI 检索论文 20 余篇。