

基于演化博弈的政府、企业和居民三方环境治理机制分析

王琳, 李师煜*, 夏侯佐源, 高保轩

江西理工大学理学院, 江西 赣州

Email: 1298863004@qq.com, *lishiyu83@163.com, 1489659622@qq.com, 1181944481@qq.com

收稿日期: 2021年5月13日; 录用日期: 2021年5月27日; 发布日期: 2021年6月9日

摘要

实现绿色可持续发展, 离不开企业、政府、民众的共同努力。因此本研究基于演化博弈构建了政府、企业和居民的三方博弈模型, 通过运用复制动力学系统的相关原理分析纳什均衡, 并进行数值仿真验证结果, 得出结论: 在此三方博弈模型中, 对于企业进行的污染治理策略, 政府监管占据主导作用, 而民众监督作用仅起到辅助作用; 民众监督意愿受到多方因素的共同影响, 在对政府和企业的决策中也能起到一定的积极作用。同时提出建议: 建议政府加大对排污企业的监管力度, 并开设更多的监督举报渠道、完善相关民众举报奖励制度等, 提高民众监督的积极性, 促使企业执行环境治理策略。

关键词

演化博弈, 数值仿真, 环境治理

An Analysis of Environmental Governance Mechanism among Government, Enterprises and Residents Based on Evolutionary Game

Lin Wang, Shiyu Li*, Zuoyuan Xiahou, Yuxuan Gao

Faculty of Science, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou Jiangxi

Email: 1298863004@qq.com, *lishiyu83@163.com, 1489659622@qq.com, 1181944481@qq.com

Received: May 13th, 2021; accepted: May 27th, 2021; published: Jun. 9th, 2021

*通讯作者。

文章引用: 王琳, 李师煜, 夏侯佐源, 高保轩. 基于演化博弈的政府、企业和居民三方环境治理机制分析[J]. 世界经济探索, 2021, 10(2): 17-30. DOI: 10.12677/wer.2021.102003

Abstract

Achieving green and sustainable development is inseparable from the joint efforts of enterprises, governments, and people. Therefore, this study constructs a tripartite game model of government, enterprise, and residents based on evolutionary game. By using the relevant principles of the replication dynamics system to analyze the Nash equilibrium, and verifying the results of numerical simulation, it is concluded that in this tripartite game model, for enterprises to carry out pollution control strategy, government regulation plays a leading role, while the public supervision only plays a supporting role; the people's willingness to supervise is jointly affected by many factors, and it can also play a positive role in the decision-making of the government and enterprises. At the same time, suggestions are made: it is recommended that the government should increase the supervision of polluting enterprises, open more supervision and reporting channels, improve the relevant public reporting reward system, etc., so as to increase the enthusiasm of public supervision, and urge enterprises to implement environmental governance strategies.

Keywords

Evolutionary Game, Numerical Simulation, Environmental Governance

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

2021年《政府工作报告》中指出[1],我国的环境治理已取得初步成效,但环境污染治理问题依然不可小觑,仍要继续加强污染防治和生态建设工作,要持续改善环境问题,贯彻落实可持续发展战略,巩固前期绿水、青山、蓝天保卫战的成果,积极促进生产生活方式向可持续绿色发展转型。在国家政策的号召下,企业和政府也纷纷加入环境治理的行动中。但仅仅依靠企业的自主防治和政府的监管措施,都无法很好地维持绿色低碳可持续发展,因此要借助民众舆论监督力度辅助实施。

2. 文献综述

通过研读过往学者研究成果不难发现,大多数学者在研究环境治理问题时多采用博弈方法进行分析。潘峰等研究地方政府之间在环境治理管理规制中的演化博弈[2],提出了地方政府的环境规制策略不会受到政府间外部因素的影响,地方政府的环境规制成本等是影响地方政府环境规制策略的重要因素。张学刚和钟茂初通过对政府环境监管和企业污染间的博弈问题进行分析研究[3],提出了现有博弈分析中大多忽视了环境污染给地方政府和排污企业带来的声誉损失而带来的分析缺陷,并提出增加排污企业的声誉成本和地方政府消极治理的声誉损失有利于改善环境治理现状。魏莉、陈伟达等[4]引入环保第三方监督构建演化博弈模型研究环保第三方监督下钢铁企业的碳减排行为及其演化动态,分析地方政府资金支持、碳减排补贴和不定期监管对演化均衡策略的影响。陶建格、薛惠锋等[5]根据系统工程和环境经济学相关理论,运用演化博弈理论方法,建立了一个环境治理博弈的演化博弈均衡模型,分析了参与博弈主体的动态演变过程,并得出监管成本、处罚力度,以及企业的社会责任是影响环境治理状况演变的关键因素。郑君君、闫龙等[6]运用演化博弈理论研究环境污染引发群体性事件的博弈过程及相关的利益冲突,并考虑当群体间存在信

息交互时，监管部门采用舆情引导的情况下环境污染群体性事件的演化特征；其次，运用优化理论探讨了监管部门从长远的角度考虑整体利益时应如何解决环境污染事件。赖小君等运用演化博弈的方法构建了政府、煤炭企业、矿区居民的演化博弈模型[7]，通过求解混合策略纳什均衡，运用数值仿真研究其演化稳定策略。杨洋洋、谢雪梅构建网络谣言监管的博弈模型[8]，运用了系统动力学的方法对模型进行了仿真分析。

通过分析关于环境治理决策的论文，我们不难发现：现有关于环境治理决策互动分析的模型多使用两方博弈的方法分析，只有少数学者研究三方博弈过程，更鲜有学者将居民、政府与企业放在同一三方博弈过程中进行研究。

上述学者们对环境治理的相关主体之间的博弈分析研究中，理论扎实，逻辑严密，并对相应的结论进行仿真分析和实证分析，其方法和思想对本文的研究提供了极大地借鉴意义。但是，对于环境治理，仅仅研究政府和企业两大主体的博弈过程是不够的，环境治理与当地人民的生活息息相关，当地居民既会对政府监管措施是否落实进行监督，对企业的积极污染也会有一定的促进作用，这对政府和企业做出决策具有一定的影响。基于此，本研究在政府、企业的基础上引入居民作为第三个主体，运用演化博弈的理论，构建三方博弈模型，通过软件进行模型仿真分析，探究影响环境治理的关键因素，从而对环境治理提出建议。

3. 模型的构建与分析

由于排污企业、政府与当地居民的三方博弈过程中存在信息不对称的问题，且影响他们决策因素不同，导致各行为主体采取的行动和行动结果会不一致，排污企业、政府与当地居民的三方关系如下图1所示。

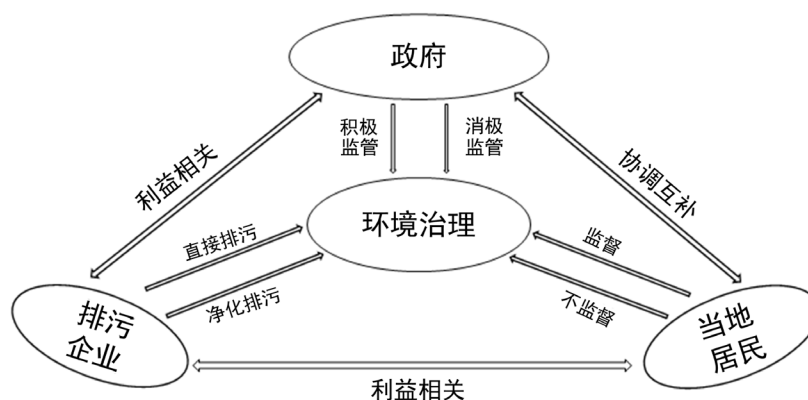


Figure 1. The tripartite relationship between the government, polluters and local residents
图1. 政府、排污企业与当地居民的三方关系

政府的作用在于监管企业排污行为，政府自身和排污企业存在着利益关系，排污企业不仅能给当地带来一定经济收益，而且给政府带来一定工作绩效上的影响；排污企业与当地居民之间也存在利益关系，企业的发展给当地居民带来了更多的就业机会，提高他们的家庭收入，但是污染排放会对居民身体状况造成不良影响；政府和当地居民之间虽不存在利益关系，但政府可以采取鼓励政策引导居民作为第三方监督污染企业，有效地降低政府监管的时间成本，而政府对待污染治理的态度也会影响在居民中的政府形象，同时居民也可以通过举报监督切实保障自己的生命健康。

3.1. 环境治理三方博弈模型假设

假设 1：政府 G 、排污企业 C 和当地居民 P 都符合“经济人”假设，参与博弈的三个主体，政府、企业、居民都追求自身利益最大化。

假设 2: 政府若对企业排污工作进行监管, 则需付出监管成本 G_0 , 而政府监管成本和政府与排污企业间的利益相关联, 当政府与排污企业间利益关联较大时, 执法难度增加, 所要付出的监管成本也会相应增加; 当排污企业净化排污是否达标会影响政府的治污环境绩效 G_1 ; 若政府发现排污企业排污不达标, 可向企业收取环境污染罚款 G_C ; 若政府积极参与监管, 但排污企业净化不达标, 会造成形象损失 G_2 。

假设 3: 排污企业进行净化排污, 需要支付净化排污成本 C_0 ; 若企业积极净化排污, 则政府会给予一定的政策奖励 C_1 ; 若企业直接排污, 按照环境治理条例企业需给予当地居民一定的损失补偿费用 P_C ; 如果被政府发现违规排污, 则企业需要支付污染罚款 G_C 、净化排污成本 C_0 、给当地居民的损失补偿费用 P_C 。

假设 4: 当地居民参与监督环境治理工作, 监督排污企业净化排污需要付出监督成本 P_0 , 当地居民监督成本和与企业间的利益关联相联系, 若当地居民与排污企业间利益关联较大, 居民监督难度加大, 所要付出的监督成本也相应增加; 当排污企业净化排污不达标的时候, 当地居民可获得一份企业补偿 P_C , 政府也会给予当地居民监督奖励 P_G ; 但排污企业也会对当地居民造成健康伤害, 使居民付出健康成本 P_1 。

3.2. 三方博弈模型的构建

本文通过构建三方博弈模型来分析政府 G 、排污企业 C 和当地居民 P 三个行为主体在环境治理问题中的行为决策即其结果, 三方博弈关系如下图 2 所示:

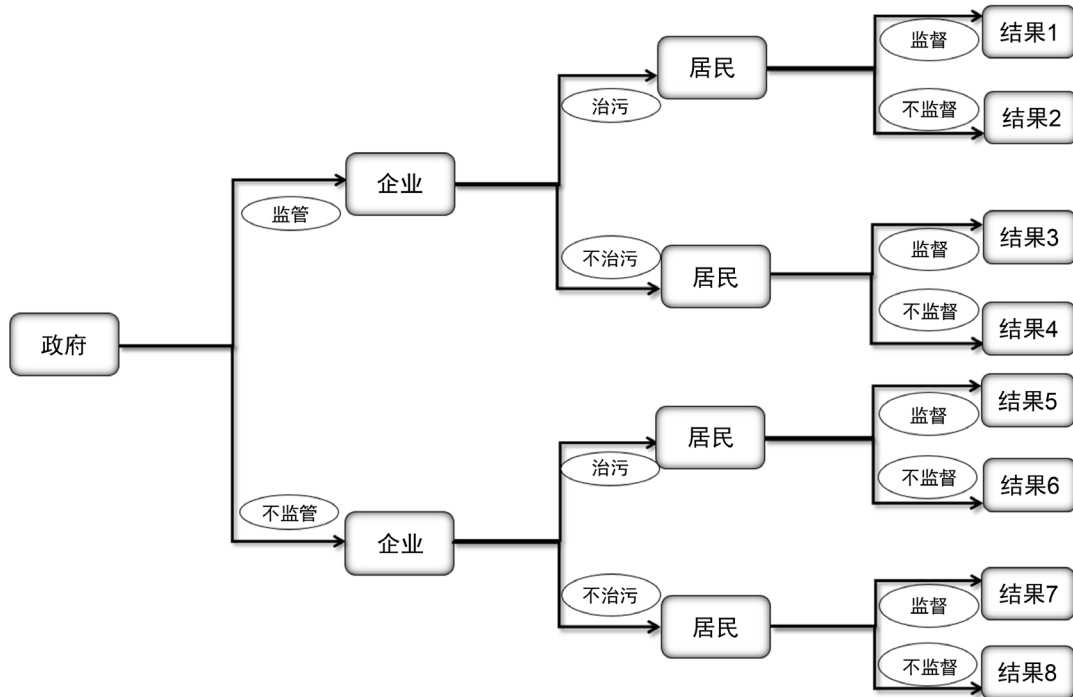


Figure 2. Tripartite game relationship among government, polluters and residents
图 2. 政府、企业、居民三方博弈关系

根据三方的博弈关系及问题的基本假设, 我们可以得出以下 8 种收益函数, 其中 1~8 分别对应博弈树中的 8 种可能结果, Q_{Gi} 、 Q_{Ci} 、 Q_{Pi} 分别表示第 i 种情况下政府 G 、排污企业 C 和当地居民 P 的期望收益函数, 如下表 1 所示。

Table 1. Expected revenue function of government, polluters and local residents
表 1. 政府、排污企业和当地居民的期望收益函数

结果	政府 G	排污企业 C	当地居民 P
1	$Q_{G1} = G_1 - G_0$	$Q_{C1} = C_1 - C_0$	$Q_{P1} = -P_0$
2	$Q_{G2} = G_1 - G_0$	$Q_{C2} = C_1 - C_0$	$Q_{P2} = 0$
3	$Q_{G3} = G_1 - G_0 + G_C - P_G$	$Q_{C3} = -G_C - P_C - C_0$	$Q_{P3} = P_G + P_C - P_0$
4	$Q_{G4} = G_1 - G_0 + G_C$	$Q_{C4} = -G_C - P_C - C_0$	$Q_{P4} = P_C$
5	$Q_{G5} = G_1$	$Q_{C5} = -C_0$	$Q_{P5} = -P_0$
6	$Q_{G6} = G_1$	$Q_{C6} = -C_0$	$Q_{P6} = 0$
7	$Q_{G7} = -G_2$	$Q_{C7} = -P_C$	$Q_{P7} = P_C - P_1 - P_0$
8	$Q_{G8} = -G_2$	$Q_{C8} = -P_C$	$Q_{P8} = P_C - P_1$

运用演化博弈论的相关知识，分析参与博弈的三方的策略空间及其占优策略。对于政府而言，根据政府是否参与监督企业净化排污，其策略空间为监管和不监管，如排污企业进行净化排污，则其占优策略为不监管；若排污企业直接排污，则其占优策略为监管。对于排污企业而言，根据企业是否排污达标，其策略空间为排污达标和排污不达标，若政府和当地居民至少一方参与监管，则企业的占优策略为排污达标；若政府和当地居民都不参与监管，则企业的占有策略为排污不达标。对于当地居民而言，根据居民是否主动参与监督，其策略空间为监督和不监督，若企业净化排污达标，则居民的占优策略为不监督；若企业净化排污不达标，则居民的占优策略为监督。

3.3. 三方博弈的复制动态方程求解

在既定假设条件下，通过分析可得出政府、排污企业、当地居民三方的期望收益函数，进而采用混合策略纳什均衡对本模型进行分析求解。假设政府对排污企业实施监管的概率为 x ，不对排污企业实施监管的概率为 $1-x$ ；假设排污企业净化排污的概率为 y ，排污企业直接排污的概率为 $1-y$ ；假设当地居民对排污企业进行监督的概率为 z ，不对排污企业进行监督的概率为 $1-z$ 。

对于政府而言，政府对排污企业实施监督的期望收益为 U_1 ，政府不对排污企业实施监督的期望收益为 U_2 ，政府的复制动态方程为 $F_G(x)$ 。其中：

$$U_1 = yzQ_{G1} + y(1-z)Q_{G2} + (1-y)zQ_{G3} + (1-y)(1-z)Q_{G4} \quad (1)$$

$$U_2 = yzQ_{G5} + y(1-z)Q_{G6} + (1-y)zQ_{G7} + (1-y)(1-z)Q_{G8} \quad (2)$$

$$F_G(x) = \frac{dx}{dt} = x(1-x)(U_1 - U_2) \quad (3)$$

对于排污企业而言，企业排污达标的期望收益为 V_1 ，企业排污不达标的期望收益为 V_2 ，排污企业的复制动态方程为 $F_C(y)$ 。其中：

$$V_1 = xzQ_{C1} + x(1-z)Q_{C2} + (1-x)zQ_{C5} + (1-x)(1-z)Q_{C6} \quad (6)$$

$$V_2 = xzQ_{C3} + x(1-z)Q_{C4} + (1-x)zQ_{C7} + (1-x)(1-z)Q_{C8} \quad (7)$$

$$F_C(y) = \frac{dy}{dt} = y(1-y)(V_1 - V_2) \tag{8}$$

对于当地居民而言，居民对排污企业进行监督的期望收益为 W_1 ，居民没有对排污企业进行监督的期望收益为 W_2 ，当地居民的复制动态方程为 $F_p(z)$ 。其中：

$$W_1 = xyQ_{p1} + x(1-y)Q_{p3} + (1-x)yQ_{p5} + (1-x)(1-y)Q_{p7} \tag{9}$$

$$W_2 = xyQ_{p2} + x(1-y)Q_{p4} + (1-x)yQ_{p6} + (1-x)(1-y)Q_{p8} \tag{10}$$

$$F_p(z) = \frac{dz}{dt} = z(1-z)(W_1 - W_2) \tag{11}$$

通过联立以上政府、排污企业、当地居民的复制动态方程(3)、(8)、(11)，可得到复制动力学系统：

$$\begin{cases} F_G(x) = x(1-x)[(1-y)(G_C - P_Gz + G_2 + G_1) - G_0] \\ F_C(y) = y(1-y)[x(C_1 - G_C + C_0) - C_0 + P_C] \\ F_p(z) = z(1-z)[(x-xy)P_G - P_0] \end{cases} \tag{12}$$

3.4. 演化博弈均衡解分析

通过上述分析可以看出，政府、排污企业和当地居民的决策选择受到多种因素的共同作用，对混合策略纳什均衡的结果进行分析。令 $F_G(x) = 0$ ， $F_C(y) = 0$ ， $F_p(z) = 0$ ，则复制动态方程可得到如下 8 个特殊的平衡点 $(0,0,0)$ ， $(0,0,1)$ ， $(0,1,0)$ ， $(0,1,1)$ ， $(1,0,0)$ ， $(1,0,1)$ ， $(1,1,0)$ ， $(1,1,1)$ 。由于演化博弈模型具有稳定性可得，当 $0 < x < 1$ ， $0 < y < 1$ ， $0 < z < 1$ 时，满足条件 $F_G(x) = 0$ ， $F_C(y) = 0$ ， $F_p(z) = 0$ ， $\frac{dF_G(x)}{dx} < 0$ ， $\frac{dF_C(y)}{dy} < 0$ ， $\frac{dF_p(z)}{dz} < 0$ 时，为三方博弈的稳定点。

3.4.1. 演化博弈稳定性分析

根据如下博弈稳定性计算公式，可分析出政府、排污企业、当地居民的三方演化稳定策略。

$$\begin{cases} F'_G(x) = (1-2x)[(1-y)(G_C - P_Gz + G_2 + G_1) - G_0] \\ F'_C(y) = (1-2y)[x(C_1 + G_C + C_0) - C_0 + P_C] \\ F'_p(z) = (1-2z)[(x-xy)P_G - P_0] \end{cases} \tag{13}$$

1) 政府演化稳定策略。

当 $(1-y)(G_C - P_Gz + G_2 + G_1) - G_0 = 0$ 时，对任意 x 都处于稳定状态。

当 $(1-y)(G_C - P_Gz + G_2 + G_1) - G_0 > 0$ 时，即

$$\begin{cases} y < 1 - \frac{G_0}{G_C - P_Gz + G_2 + G_1} \\ z < \frac{(1-y)(G_C + G_2 + G_1) - G_0}{(1-y)P_G} \end{cases} \tag{14}$$

使得 $F'_G(x)_{x \rightarrow 0} > 0$ ， $F'_G(x)_{x \rightarrow 1} < 0$ 达到稳定状态，此时满足 $x = 1$ ，即政府对排污企业进行监管是此时政府的稳定策略。当 $(1-y)(G_C - P_Gz + G_2 + G_1) - G_0 < 0$ 时，即

$$\begin{cases} y > 1 - \frac{G_0}{G_C - P_G z + G_2 + G_1} \\ z < \frac{(1-y)(G_C + G_2 + G_1) - G_0}{(1-y)P_G} \end{cases} \quad (15)$$

有 $F'_G(x)_{x \rightarrow 0} < 0$, $F'_G(x)_{x \rightarrow 1} > 0$ 达到稳定状态, 此时满足 $x = 0$, 即政府不对排污企业进行监管是此时政府的稳定策略。

2) 排污企业的演化稳定策略。

当 $x(C_1 + G_C + C_0) - C_0 + P_C = 0$ 时, 对任意 y 都处于稳定状态。当 $x(C_1 + G_C + C_0) - C_0 + P_C > 0$ 时, 即

$$x > \frac{C_0 - P_C}{C_1 + G_C + C_0} \quad (16)$$

有 $F'_C(y)_{y \rightarrow 0} > 0$, $F'_C(y)_{y \rightarrow 1} < 0$ 可以达到稳定状态, 此时满足 $y = 1$, 即排污企业进行净化排污是此时排污企业的稳定策略。当 $x(C_1 + G_C + C_0) - C_0 + P_C < 0$ 时, 即

$$x < \frac{C_0 - P_C}{C_1 + G_C + C_0} \quad (17)$$

有 $F'_C(y)_{y \rightarrow 0} < 0$, $F'_C(y)_{y \rightarrow 1} > 0$ 可以达到稳定状态, 此时满足 $y = 0$, 即排污企业不进行净化排污是此时排污企业的稳定策略。

3) 当地居民的演化稳定策略。

当 $(x - xy)P_G - P_0 = 0$ 时, 对任意 z 都处于稳定状态。当 $(x - xy)P_G - P_0 > 0$ 时, 即

$$\begin{cases} x > \frac{P_0}{(1-y)P_G} \\ y < 1 - \frac{P_0}{P_G x} \end{cases} \quad (18)$$

有 $F'_P(z)_{z \rightarrow 0} > 0$, $F'_P(z)_{z \rightarrow 1} < 0$ 可以达到稳定状态, 此时满足 $z = 1$, 即当地居民对排污企业进行监督是此时当地居民的稳定策略。当 $(x - xy)P_G - P_0 < 0$ 时, 即

$$\begin{cases} x < \frac{P_0}{(1-y)P_G} \\ y > 1 - \frac{P_0}{P_G x} \end{cases} \quad (19)$$

有 $F'_P(z)_{z \rightarrow 0} < 0$, $F'_P(z)_{z \rightarrow 1} > 0$ 可以达到稳定状态, 此时满足 $z = 0$, 即当地居民不对排污企业进行监督是此时当地居民的稳定策略。

3.4.2. 均衡影响因素分析

由于演化博弈模型具有稳定性可得, 当 $0 < x < 1$, $0 < y < 1$, $0 < z < 1$ 时, 满足条件 $F_G(x) = 0$, $F_C(y) = 0$, $F_P(z) = 0$, $\frac{dF_G(x)}{dx} < 0$, $\frac{dF_C(y)}{dy} < 0$, $\frac{dF_P(z)}{dz} < 0$ 时, 为三方博弈的稳定点。

$$\begin{cases} (1-y)(G_C - P_G z + G_2 + G_1) - G_0 = 0 \\ x(C_1 + G_C + C_0) - C_0 + P_C = 0 \\ (x - xy)P_G - P_0 = 0 \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{cases} x = \frac{C_0 - P_C}{C_1 + G_C + C_0} \\ y = 1 - \frac{P_0 (C_1 + G_C + C_0)}{P_G (C_0 - P_C)} \\ z = \frac{G_C + G_2 + G_1}{P_G} - \frac{G_0 (C_0 - P_C)}{(C_1 + G_C + C_0) P_0} \end{cases} \quad (21)$$

当博弈三方处于稳定模式时，政府会以 $x = \frac{C_0 - P_C}{C_1 + G_C + C_0}$ 的概率对排污企业进行监管，排污企业会以

$y = 1 - \frac{P_0 (C_1 + G_C + C_0)}{P_G (C_0 - P_C)}$ 的概率对污染进行净化处理并达到净化标准，当地居民会以

$z = \frac{G_C + G_2 + G_1}{P_G} - \frac{G_0 (C_0 - P_C)}{(C_1 + G_C + C_0) P_0}$ 的概率对排污企业进行监督。

由于政府以 $x = \frac{C_0 - P_C}{C_1 + G_C + C_0}$ 的概率对排污企业进行监管可知，政府进行监管的概率与排污企业的净化成本、企业的排污达标收益、政府收取罚款、民众获得企业污染补偿款有关。假定 $C_0 < P_C$ ，则

$$\frac{\partial x}{\partial C_0} = \frac{P_C + C_1 + G_C}{(C_1 + G_C + C_0)^2} > 0, \quad \frac{\partial x}{\partial P_C} = -\frac{1}{C_1 + G_C + C_0} < 0, \quad \frac{\partial x}{\partial C_1} = -\frac{C_0 - P_C}{(C_1 + G_C + C_0)^2} > 0,$$

$\frac{\partial x}{\partial G_C} = -\frac{C_0 - P_C}{(C_1 + G_C + C_0)^2} > 0$ ，即政府进行监管的概率与企业的净化成本呈正相关，与民众获得企业污染

补偿款呈负相关，与企业的净化排污收益呈正相关，与政府对企业的直接排污收取罚款数额呈正相关。当企业净化排污成本越高时，企业为降低运营成本，净化排污的意愿便越低，故企业净化排污的概率越低，此时需要提高政府监管力度促进企业净化排污。当民众获得企业污染补偿款越高时，表明企业排污造成污染状况越严重，此时需要提高政府监管力度以节约监管成本。当企业排污达标收益越高，政府监管概率越大。当政府收取罚款数额越大时，表明企业积极治污的概率更低，此时需要提高政府监管力度促进企业净化排污。

由于排污企业以 $y = 1 - \frac{P_0 (C_1 + G_C + C_0)}{P_G (C_0 - P_C)}$ 的概率积极净化排污可得，企业积极治污的概率与民众监督

成本、政府给予民众监督鼓励、企业给予民众补偿、政府收取企业罚款、企业进化成本、企业排污达标

收益有关。假定 $C_0 < P_C$ ，则 $\frac{\partial y}{\partial C_0} = \frac{P_0 (C_1 + P_C + G_C)}{P_G (C_0 - P_C)^2} > 0$ 、 $\frac{\partial y}{\partial P_0} = -\frac{C_1 + G_C + C_0}{P_G (C_0 - P_C)} > 0$ 、 $\frac{\partial y}{\partial C_1} = -\frac{P_0}{P_G (C_0 - P_C)} > 0$ 、

$$\frac{\partial y}{\partial G_C} = -\frac{P_0}{P_G (C_0 - P_C)} > 0, \quad \frac{\partial y}{\partial P_C} = -\frac{P_0 P_G (C_1 + G_C + C_0)}{[(P_C - C_0) P_G]^2} < 0, \quad \frac{\partial y}{\partial P_G} = -\frac{P_0 P_C (C_1 + G_C + C_0)}{[(P_C - C_0) P_G]^2} < 0,$$

即企业积极治污的概率与企业净化成本呈正相关，与民众监督成本呈正相关，与企业排污达标收益呈正相关，与政府收取企业罚款呈正相关，与企业给予民众补偿呈负相关，与政府给予民众监督鼓励呈负相关。企业净化成本越高，积极治污效果越差，政府会加强监管促进其积极治污。当民众投入监督成本越高，对排污企业造成的社会压力越大，企业积极治污的可能性越大。企业排污达标收益越高，表明其积极治污概率越大。政府收取企业罚款越多，表明企业治污效果越差，政府会加强监管促进其积极治污。企业给居民补偿越少，表明其治污效果越好。政府给予居民监督鼓励越多，表明企业积极治污效果越差。

由于当地居民以 $z = \frac{G_c + G_2 + G_1}{P_G} - \frac{G_0(C_0 - P_c)}{(C_1 + G_c + C_0)P_0}$ 的概率积极参与监督可知, 当地居民参与监督的概率与企业给居民的补偿、居民监督成本、政府给居民的监督奖励、政府监管成本、政府环境绩效、政府收取企业罚款、政府形象、企业净化成本、企业治理收益相关。假定 $C_0 < P_c$, 则 $\frac{\partial z}{\partial G_2} = \frac{1}{P_G} > 0$ 、 $\frac{\partial z}{\partial G_1} = \frac{1}{P_G} > 0$ 、 $\frac{\partial z}{\partial P_c} = \frac{G_0}{(C_1 + G_c + C_0)P_0} > 0$ 、 $\frac{\partial z}{\partial G_0} = -\frac{C_0 - P_c}{P_0(C_1 + G_c + C_0)} > 0$ 、 $\frac{\partial z}{\partial P_G} = -\frac{G_c + G_2 + G_1}{P_G^2} < 0$ 、 $\frac{\partial z}{\partial C_0} = -\frac{G_0 P_0 (C_1 + G_c + P_c)}{[(C_1 + G_c + C_0)P_0]^2} < 0$ 、 $\frac{\partial z}{\partial C_1} = \frac{G_0 P_0 (C_0 - P_c)}{[(C_1 + G_c + C_0)P_0]^2} < 0$ 、 $\frac{\partial z}{\partial P_0} = \frac{G_0 (C_1 + G_c + C_0)(C_0 - P_c)}{[(C_1 + G_c + C_0)P_0]^2} < 0$,

即当地居民参与监督的概率与企业给居民的污染补偿呈正相关, 与居民监督成本呈负相关, 与政府给居民的监督奖励呈负相关, 与政府监管成本呈正相关, 与政府环境绩效呈正相关, 与政府形象呈正相关, 与企业净化成本呈负相关, 与企业治理收益呈负相关。当企业给居民污染补偿越多, 则企业污染越严重, 居民参与监督的概率越高。当居民监督成本越高, 居民参与监督的积极性越低。政府给居民的监督奖励越多, 居民监督积极性越大, 企业治污效果好转后居民监督积极性下降。政府监管投入成本越高, 居民积极性越高。政府环境绩效越好, 形象越好, 居民对政府的信心提升, 参与监督的积极性越高。企业净化成本越高, 企业治污的积极性越低, 居民会参与监督促进企业积极治污。企业治理的收益越高, 治污效果越好, 居民参与监督的积极性降低。

3.5. 数值仿真分析

假定 $P_c > C_0$, 即企业直接排污对当地居民损失补偿费用 P_c 大于排污企业支付净化排污成本 C_0 时, 对政府、排污企业及当地居民三方演化博弈模型做数值仿真, 记政府进行监管的概率为 i , 企业净化排污的概率为 j , 当地居民进行监督的概率为 k ; 假定数值仿真的初值为: $G_c = 15$ 、 $G_1 = 2$ 、 $G_2 = 5$ 、 $P_G = 1$ 、 $G_0 = 1$ 、 $P_0 = 2$ 、 $C_0 = 10$ 、 $C_1 = 20$ 。仿真分析结果如下:

1) 政府进行监管的概率对三方博弈模型的影响。

政府进行监管的概率对政府、排污企业、当地居民的三方演化博弈行为产生的影响如图 3 所示。通过分析仿真结果可得, 当排污企业净化排污和当地居民对企业进行监督的初始概率保持不变, 假定为 $j_0 = 0.1$ 、 $k_0 = 0.1$, 而政府进行监管的初始概率分别为 $i_0 = 0$ 、 $i_0 = 0.5$ 、 $i_0 = 1$ 。当在政府监管概率不同时, 对比排污企业、当地居民演化博弈结果可知政府监管概率的改变会对企业进行净化排污的概率产生影响, 政府进行监管的概率越大, 企业越倾向于净化排污, 且其演化速率越高; 但对居民是否进行监督的影响较小。

2) 当地居民监督的概率对三方博弈模型的影响。

当地居民进行监督的概率对政府、排污企业、当地居民的三方演化博弈行为产生的影响如图 4 所示。通过分析仿真结果可得, 当排污企业净化排污和政府对企业进行监管的初始概率保持不变, 假定为 $j_0 = 0.1$ 、 $i_0 = 0.1$, 而当地居民进行监督的初始概率分别为 $k_0 = 0$ 、 $k_0 = 0.5$ 、 $k_0 = 1$ 。当地居民参与监督的概率不同时, 对比排污企业、政府监管的演化博弈结果可知当地居民进行监督的概率对政府是否进行监督、企业是否净化排污的概率影响较小。

通过上述分析可知, 在政府、排污企业、当地居民共同参与的环境治理演化博弈模型中, 不管政府和排污企业的初始概率是多少, 对当地居民是否进行监督的概率并没有产生较大影响, 说明在本次博弈模型中, 政府监管占据主导地位, 而居民监督作用占据次要地位, 其原因在于: 当地居民是否参与监督的决定因素较为多样, 单一因素无法对居民决策产生较大影响。在实际情况中, 最主要的影响因素是企业与居民之间复杂的利益关系。

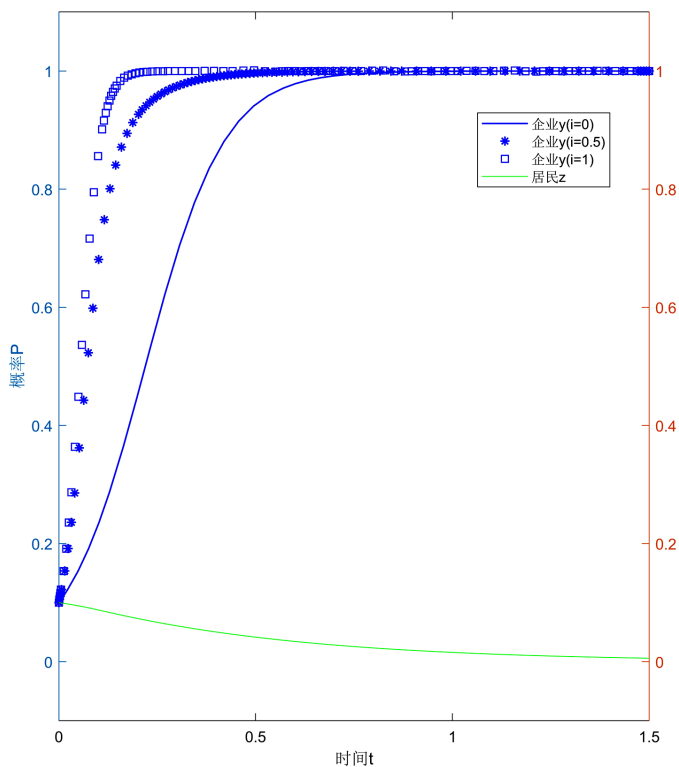


Figure 3. The impact of the probability of government supervision on the behavior of the three-party evolutionary game
图 3. 政府进行监管的概率对三方演化博弈行为产生的影响

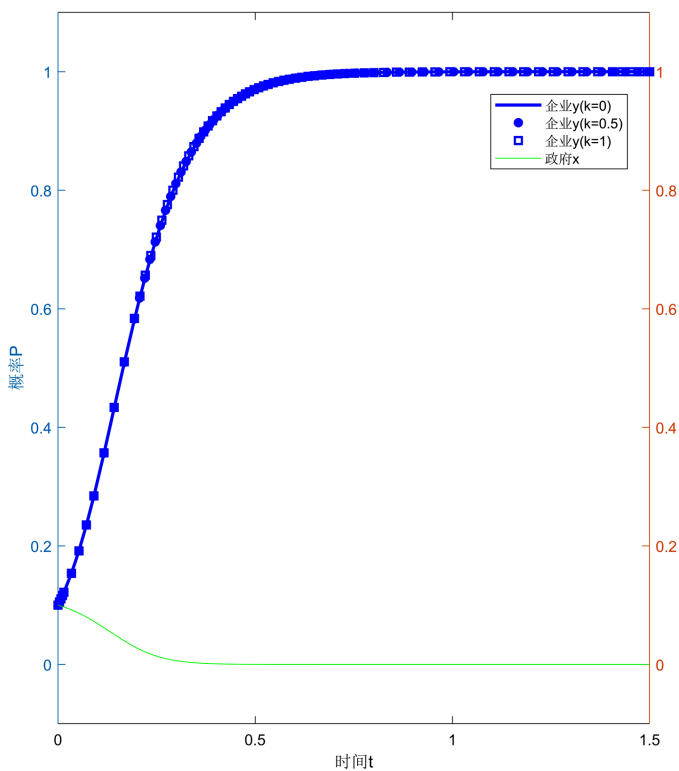


Figure 4. The impact of the probability of local residents' supervision on the behavior of the three-party evolutionary game
图 4. 企业进行监管的概率对三方演化博弈行为产生的影响

3) 影响企业净化排污决策的相关因素影响分析。

排污企业是否进行净化排污的决策主要受到民众补偿、政府补贴、净化成本和政府罚款的影响，其影响结果分析如下：

假设其他影响因素不变时，只改变企业对民众的补偿力度。研究企业对民众的补偿力度改变对排污企业净化排污的概率影响如下图 5 所示。由民众补偿力度对企业净化排污概率影响结果图分析可知：当民众补偿力度越大，企业进行净化排污的演化速率越大，即企业达到净化排污稳定策略的用时越少。企业给居民补偿越少，表明其治污效果越好。政府收取企业罚款越多，表明企业治污效果越差，政府会加强监管促进其积极治污。

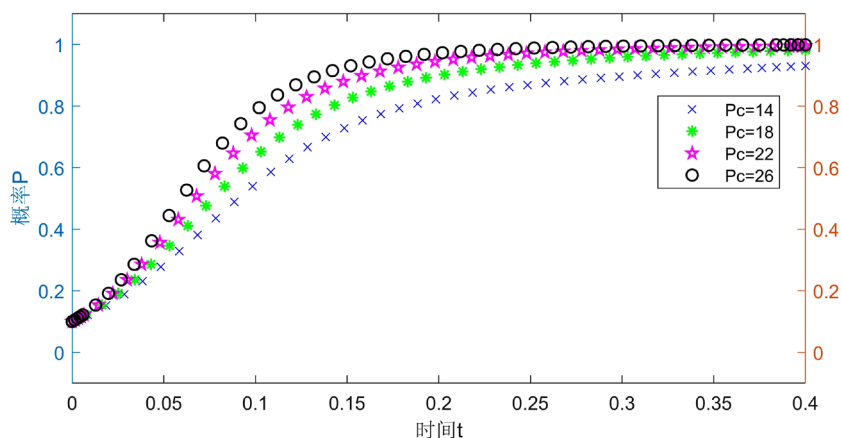


Figure 5. The impact of changes in the compensation of enterprises to the people on the probability of pollutant-discharging enterprises

图 5. 企业对民众的补偿力度改变对排污企业净化排污的概率影响

假设其他影响因素不变时，只改变政府对企业净化排污的政策补贴。研究政府对企业净化排污的政策补贴力度改变对排污企业净化排污的概率影响如下图 6 所示，由政府对企业净化排污的补贴力度对企业净化排污概率影响结果图分析可知：当政府对企业净化排污的补贴力度越大，企业进行净化排污的演化速率越大，即企业达到净化排污稳定策略的用时越少。提高政府对企业净化排污的补贴力度能够有效促进企业进行净化排污。

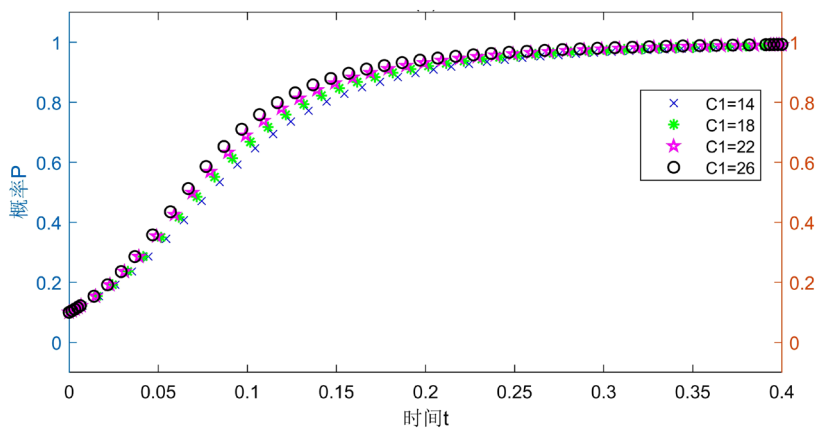


Figure 6. The impact of changes in government policy subsidies on the probability of pollutant emission companies purifying pollution

图 6. 政府政策补贴改变对排污企业净化排污的概率影响

假设其他影响因素不变时，只改变政府对企业直接排污的罚款力度。研究政府对企业直接排污的罚款力度改变对排污企业净化排污的概率影响如下图 7 所示，由政府对企业直接排污的罚款力度对企业净化排污概率影响结果图分析可知：当政府对企业直接排污的罚款力度越大，企业进行净化排污的演化速率越大，即企业达到净化排污稳定策略的用时越少。政府收取企业罚款越多，表明企业治污效果越差，政府会加强监管促进其积极治污。

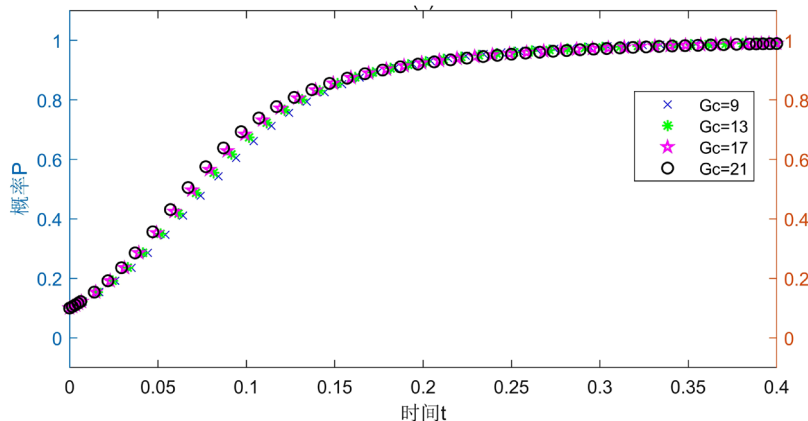


Figure 7. The impact of government fines changes on the probability of pollutant companies purifying pollutants
图 7. 政府罚款力度改变对排污企业净化排污的概率影响

假设其他影响因素不变时，只改变企业净化成本。研究企业净化成本改变对排污企业净化排污的概率影响如下图 8 所示，由企业净化成本对企业净化排污概率影响结果图分析可知：当企业净化成本越大，企业进行净化排污的演化速率越小，即企业达到净化排污稳定策略的用时越多。企业净化成本越高，积极治污效果越差，政府会加强监管促进其积极治污。

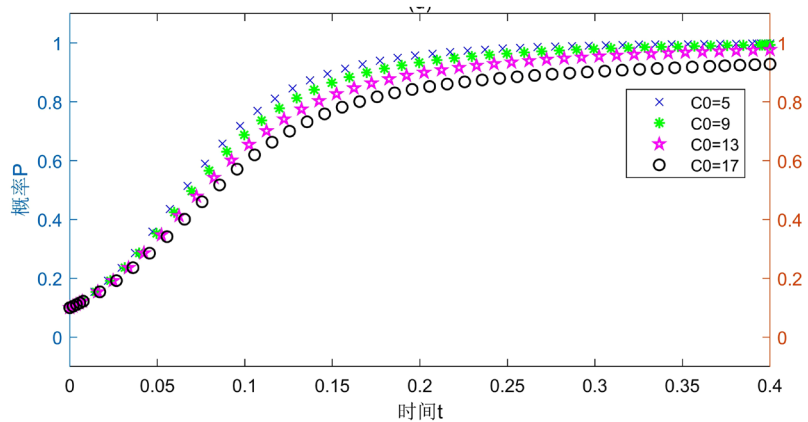


Figure 8. The impact of changes in enterprise purification costs on the probability of pollution discharge enterprises
图 8. 企业净化成本改变对排污企业净化排污的概率影响

4. 结论与建议

通过上述对演化博弈模型的分析我们可以得到以下结论：

- 1) 从演化均衡影响因素分析，政府进行监管的概率与企业的净化成本、企业的净化排污收益及政府对企业的直接排污收取罚款数额呈正相关，与民众获得企业污染补偿款呈负相关；企业积极治污的概率

与企业净化成本、企业排污达标收益、民众监督成本及政府收取企业罚款呈正相关，与企业给予民众补偿及政府给予民众监督鼓励呈负相关；当地居民参与监督的概率与企业给居民的污染补偿、政府监管成本、政府环境绩效及政府形象呈正相关，与居民监督成本、政府给居民的监督奖励、企业净化成本及企业治理收益呈负相关。

2) 从仿真数值模拟分析，政府对排污企业进行监管的概率和排污企业净化排污概率会互相影响彼此演化行为的稳定性。首先，在政府监管概率和当地居民监督概率对企业净化排污的影响分析中，我们发现政府进行监管的概率越大，企业越倾向于净化排污；同时，当地居民的监督概率对企业是否净化排污的概率并没有产生较大影响，因此说明在本次博弈模型中，政府监管占据主导地位，而居民监督作用占据次要地位。其次，在影响企业净化排污决策的相关因素影响分析中，我们不难发现当企业对民众补偿力度、政府对企业净化排污的补贴力度和对企业直接排污的罚款力度，这三个因素影响越大时，企业达到净化排污稳定策略的用时越少；当企业净化成本越大，企业达到净化排污稳定策略的用时越多。

通过上述三方博弈模型分析我们不难得出，既要实现政府、排污企业和当地居民三方利益最大化，又要坚持绿色可持续发展，政府监管是解决绿色发展问题的关键，民众监督是解决绿色发展问题的重要辅助。对此我们提出以下建议：

对于政府而言，政府应该从社会舆论宣传入手，提高全民环保意识，为此要尊重维护公众的知情权，鼓励民众积极参与对企业排污的监督行动中。政府应加大执法力度，落实执法主体的责任制，对于排污超标企业要加大处罚力度。政府自身还应将环境治理、企业净化排污纳入政府的政绩考核之中，促进政府积极监管。

对于企业而言，企业不仅要具备环保意识、绿色发展意识，而且要在行动上履行绿色发展，保护生态环境的责任。对此，企业要加强环保宣传和培训教育，提高员工环保意识，环境保护意识是做好环保工作的关键。好的环境保护意识，可以让各个岗位的人员在不同的岗位上发挥积极的作用。企业可建立健全环保责任制，结合政府环保部门核定的排污总量、企业生产装置技术水平和环保装置的处理能力，合理确定自己的环境保护指标目标，并将环保目标层层分解，逐级签订环境保护责任书。环保责任书应指标化，并每月考核，考核结果与考核单位负责人及员工工资、奖金挂钩，将环保责任落到实处。

对于居民而言，居民监督意愿虽受到多方因素共同影响，但在对政府和企业的决策中也能起到一定的积极作用，政府应该对民众监督行为予以奖励，并开设更多的监督举报渠道、完善相关民众举报奖励制度等，提高民众监督的积极性。

当前，在国家绿色发展政策的号召下，民众对美好生态环境的渴望越发迫切，在全面推进绿色可持续发展和新能源生产革命的高质量经济发展模式下，企业必须坚定不移地走绿色可持续发展道路才是新的生存之道。

基金项目

国家级大学生创新创业训练计划项目(202010407038)；国家自然科学基金项目(11801238)；江西理工大学本科教学工程项目(XZG-16-01-05)。

参考文献

- [1] 李克强. 政府工作报告[EB/OL], <http://www.gov.cn/guowuyuan/zfgzbg.htm>, 2021-05-14.
- [2] 潘峰, 西宝, 王琳. 地方政府间环境规制策略的演化博弈分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(6): 97-102.
- [3] 张学刚, 钟茂初. 政府环境监管与企业污染的博弈分析及对策研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(2): 31-35.
- [4] 魏莉, 陈伟达, 杨焯. 环保第三方监督下钢铁企业碳减排行为及其演化动态[J]. 工业工程与管理, 2019, 24(1):

72-79.

- [5] 陶建格, 薛惠锋, 韩建新, 张朝阳, 刘春江. 环境治理博弈复杂性与演化均衡稳定性分析[J]. 环境科学与技术, 2009, 32(7): 89-93.
- [6] 郑君君, 闫龙, 张好雨, 何鸿勇. 基于演化博弈和优化理论的环境污染群体性事件处置机制[J]. 中国管理科学, 2015, 23(8): 168-176.
- [7] 赖小君, 胡振琪, 郭家新, 张雪, 王晓彤. 基于演化博弈的煤矿区土地复垦监管策略分析[J]. 中国矿业, 2021, 30(2): 57-66.
- [8] 杨洋洋, 谢雪梅. 三元主体交互视角下网络谣言监管的博弈演化研究[J]. 现代情报, 2021, 41(5): 167-177.