

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2023.03.013

# 磷化工产业绿色发展背景下 地方政府和企业的演化博弈

——贵州省“以渣定产”政策经验

许秀川<sup>1</sup>, 吴朋雁<sup>2</sup>

1. 西南大学 经济管理学院, 重庆 400715; 2. 厦门大学 经济学院, 福建 厦门 361005

**摘要:** 针对磷化工绿色发展问题, 构建地方政府和磷化工企业双方的演化博弈模型, 分析双方策略选择的动态演化过程. 以贵州省“以渣定产”政策的实施情况为例, 对理论模型进行数值仿真, 探讨地方政府对企业采取不同激励模式、处罚力度、企业磷石膏综合处理成本、创造的社会效益等因素对演化过程的影响. 研究表明: 地方政府采取动态激励机制有利于推进企业积极进行磷石膏综合处理. 企业采取“高参与”策略的概率与磷石膏处理成本成反比, 与其创造的社会效益、地方政府对其的处罚力度成正比. 政策启示为: ① 地方政府应结合辖区内企业磷石膏堆积情况制订综合利用目标, 给予补贴支持; ② 从技术和市场入手, 助推先进处理技术规模化和工业产品市场化; ③ 严格处罚环保不达标企业, 淘汰落后产能.

**关键词:** 磷化工; 以渣定产; 演化博弈; 数值仿真

**中图分类号:** F260 **文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9868(2023)03-0152-12

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Evolutionary Game between Local Government and Enterprise under Green Development of Phosphorus Chemical Industry

——Experience from Guizhou “Determining the  
Production by Slag” Policy

XU Xiuchuan<sup>1</sup>, WU Pengyan<sup>2</sup>

1. School of Economics and Management, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. School of Economics, Xiamen University, Xiamen Fujian 361005, China

**Abstract:** In view of the green development of phosphorus chemical industry, this study constructed a model for evolutionary game between local government and phosphorus chemical enterprise, and analyzed the dynamic evolution process of strategic choice of both sides. Taking the implementation of the policy of

收稿日期: 2022-04-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(71903162); 重庆市社会科学规划项目(2022NDYB55); 中央高校基本科研业务专项资金项目(SWU1909203).

作者简介: 许秀川, 博士, 副教授, 主要从事农业经济研究.

“determining the production by slag” in Guizhou province as an example, the theoretical model is simulated numerically, and the influence of different incentive modes, punishment intensity, comprehensive treatment cost of phosphogypsum and social benefits created by local governments on the evolution process is discussed. The results show that dynamic incentive mechanism adopted by local government is beneficial to promote enterprises to actively carry out comprehensive phosphogypsum treatment. The probability of enterprises adopting “high participation” strategy is inversely proportional to the treatment cost of phosphogypsum, and is directly proportional to the social benefits created and the punishment of local government. The policy implications are as follows: ① Local governments should establish comprehensive utilization targets and provide subsidies according to the situation of phosphogypsum accumulation in the enterprises under their jurisdiction. ② Starting from technology and market to promote the scale of advanced processing technology and the marketization of industrial products. ③ Strictly punish enterprises that fail to meet environmental standards and eliminate the backward production capacity.

**Key words:** phosphorus chemical industry; determining the production by slag; evolutionary game; numerical simulation

2005年,我国磷肥产量超越美国成为世界第一,长期进口磷肥的历史就此终结,农作物增产有了保障。在制备磷肥时,需要使用硫酸分解磷矿来萃取磷酸,这个过程会产生工业副产品磷石膏<sup>[1]</sup>。随着我国磷肥产量猛增,副产品磷石膏的堆存量正在不断扩大。相关数据显示,制备1 t磷酸将产生约5 t磷石膏,截至2020年12月,我国磷石膏年均产生量为7 500万t,堆存量超6亿t<sup>[2]</sup>。目前尚未形成大宗利用磷石膏的成熟路径,大多数磷石膏只能堆存或填埋。磷石膏中主要杂质元素是磷和氟,在封闭或半封闭的湖泊、河湾地区,磷元素含量飙升使得水体富营养化,进而导致水藻类植物快速生长、水体含氧量急剧下降,鱼类及贝类等水族动物缺氧死亡。若堆存管理不当,磷石膏中的可溶性氟会流入水体及土壤,威胁人类饮水和食物安全。我国在长江流域和珠江流域分别有“开阳一息烽”“瓮安一福泉”两大磷化工产业集聚区,两大集聚区集中堆存大量磷石膏,不仅占用土地资源,还可能引发地表和地下水污染<sup>[3]</sup>。相关数据显示,长江流域7个省市共有97座磷石膏库,其中53.61%的磷石膏库由于堆存、管理等问题引发了环境污染。随着科学技术的发展和进步,磷石膏的处置途径增多,可通过水洗、高温煅烧改性后加工制作成建筑石膏粉、石膏条板、石膏砌块、防火门芯等新型建材。虽然此类建材具有优异的防火、隔热、降噪、防电磁辐射等性能,但应用市场尚处于初步发展阶段,大部分磷化工企业还未配置类似设施。

针对磷石膏问题,工业和信息化部2011年发布的《关于工业副产石膏综合利用的指导意见》,2015年发布的《关于推进化肥行业转型发展的指导意见》中均强调要提升磷石膏开发利用水平,大力发展新型肥料。2015年,财政部、国家税务总局印发了《资源综合利用产品和劳务增值税优惠目录》,对销售以磷石膏等废渣为原料产品的纳税人及企业执行70%增值税退税政策。2019年10月24日,财政部、国家税务总局联合发布《关于资源综合利用增值税政策的公告》,将水泥添加剂、建筑石膏、 $\alpha$ 型高强石膏、II型无水石膏等磷石膏综合利用产品纳入享受增值税即征即退70%优惠政策范畴。2021年,《关于深入打好污染防治攻坚战的意见》《“十四五”全国清洁生产推行方案》(发改环资〔2021〕1524号)等文件相继出台,对“十四五”期间绿色发展提出了新目标和高要求,而实现磷石膏综合处理、推进化肥产业、磷化工产业转型,是实现绿色发展重要的一环。

为解决磷石膏堆积问题,贵州省人民政府于2018年4月发布《关于加快磷石膏资源综合利用的意见》(黔府发〔2018〕10号),率先实施磷石膏“以渣定产”政策,以消化磷石膏存量、控制磷石膏增量为着重点,力求从根本上解决乌江磷污染问题,保护生态环境。目前,贵州省磷石膏总储量已超过1.2亿t。长江流域磷化工产业发展迅速,随之产生的化工污染问题也日益严重,除贵州省外,云南、四川、重庆等地均具有相似情况。以重庆为例,域内有98家规模以上磷化工企业,临江、临河地区生态环境风险突出<sup>[4]</sup>。贵州省政府积极处理磷石膏堆存问题,在全国范围内起到了模范带头作用,若该省能在磷污染治理上取得显著进展,将推动周边省份学习贵州模式并采取类似举措。

从现实意义出发, 本文通过分析“以渣定产”政策实施现状, 研究贵州省地方政府与辖区内磷化工企业的博弈机制, 分析两个群体之间博弈的复杂动力学特征, 进而得出能够促进地方政府和企业协同治理磷石膏堆积问题、共同推进绿色发展可推广的经验和建议, 为其他省、市、地区的磷污染防治提供参考。

## 1 文献综述

环境治理问题涉及多个主体, 而博弈论正是研究不同主体间合作与冲突问题的有效工具, 被广泛应用于酸雨问题、臭氧问题、水资源问题等环境治理相关领域, 很多学者以政府和企业作为博弈主体, 采用演化博弈的方法进行研究。Smith 等<sup>[5]</sup>首次提出演化博弈论并定义了演化稳定策略(Evolutionary Stable Strategy, ESS)、Taylor 等<sup>[6]</sup>提出的复制动态方程是演化博弈中应用最广泛的选择机制动态方程, 该方程假设博弈方的纯策略增长率与其适应性呈正相关关系, 并可通过微分方程求解。演化博弈论结合了博弈的理论分析和动态演化过程分析, 被广泛应用于不同领域, 其中环境治理和绿色发展是研究热点之一<sup>[7-9]</sup>。

“十三五”之后, 总磷成为长江经济带水体的首要污染成分, 磷污染治理的紧迫性和重要性越发凸显。在有关磷化工的研究中, 王辛龙等<sup>[10]</sup>综述了中国磷化工行业 60 年来的发展趋势。从政策角度出发, 吴琼慧等<sup>[11]</sup>研究了长江经济带磷化工行业的环境管理现状, 指出当前行业存在企业磷石膏库防渗不到位、企业排放控制不严、含磷农药母液处理回收难度大等问题, 提出了从政策层面推动磷石膏综合利用的建议。对于磷化工行业内的公司, 闫华飞等<sup>[12]</sup>评价了 27 家行业内上市公司的创新效率, 王守文等<sup>[13]</sup>从投入、产出和环境因素 3 个角度构建了磷化工产业技术研究院的绩效评价指标体系。冯兵等<sup>[14]</sup>采用主成分分析法评价了国内外主要磷化工企业的竞争力。为解决磷污染问题, 保护生态环境, 贵州省率先推出“以渣定产”政策。田蔚等<sup>[2]</sup>调研了贵州省内的磷化工企业发展现状, 探讨了“以渣定产”政策下企业技术革新、产业转型、产品结构优化等绿色发展路径。

学界现有研究多集中于分析磷化工行业的发展历程和区域内管理现状, 评价磷化工企业的效率、竞争力, 对于贵州省出台“以渣定产”政策的深入探讨较少, 鲜有学者将地方政府与磷化工企业双方置于同一个博弈分析框架内, 模拟政策实施情况并探究双方演化稳定均衡状态的实现路径。磷化工污染治理问题涉及多个主体间的合作与冲突, 传统博弈论主要用来预测单次博弈结果或短期均衡状态, 而演化博弈可用来研究在相对稳定的环境中博弈方之间关系的长期稳定趋势<sup>[15]</sup>。

本文构建地方政府和磷化工企业双方的演化博弈模型, 分析地方政府与企业磷石膏综合处理和污染共治的演化策略, 结合贵州省出台的“以渣定产”政策对模型进行仿真实验, 研究地方政府激励强度、企业磷石膏综合处理成本、产生的社会效益和受到的处罚力度几个因素对其策略演化路径的影响。模型将充分考虑地方政府与企业两方的地位、角色及利益诉求, 讨论磷污染治理过程中两大主体的演化博弈过程, 研究成果将对其他地区政府推进磷污染治理进程具有启示意义。

## 2 模型构建

### 2.1 模型假设

在磷污染防治和磷石膏综合利用问题中, 主要涉及地方政府和磷化工企业。地方政府是政策的实施方, 磷化工企业是政策的承受方。在演化博弈中, 博弈方受时间和能力限制, 不能获得可支持长期决策的完全信息, 要根据博弈的收益状况调整策略<sup>[16]</sup>。因此, 假设双方均为有限理性的“经济人”, 二者在不完全信息条件下进行动态博弈寻找最优策略。

鉴于企业的逐利性、环境的公共性和污染的负外部性, 企业在参与污染治理时存在逐利、参与动力不足以及逃避社会责任等问题<sup>[17]</sup>, 因此政府推出的环境保护政策是推动企业履行环保责任的重要力量。我国的环境监管和治理体系主要由中央统一领导, 各地方遵循“属地管理”原则, 实施区域内环境目标逐级分包制, 区域内上下级部门存在合作治理关系<sup>[18]</sup>。地方政府不仅要关注自身利益, 还要考虑公共利益。在推进磷石膏综合处理上, 政府可主动采取有效措施引导磷化工企业节能减排, 高效利用磷化工废料, 实现生态环境绿色发展和自身利益最大化。假设政府可选择的策略为“高激励”和“低激励”, “高激励”指政府出台并落实促进磷化工企业绿色发展、解决磷石膏综合处理问题的奖惩政策, 给予企业补贴、奖励、贴息、高额罚

金、停业整顿等奖惩激励;“低激励”指地方政府以宣传和鼓励的方式为主推进磷污染治理问题,在对企业的奖惩上仅响应中央政府号召给予企业一定的税收优惠,该优惠可能由于地方各级政府执政能力、条例规定等限制较难落实,并且地方政府对企业的污染或违规行为处罚较低,无实质效用<sup>[19]</sup>。假设地方政府采取“高激励”政策的概率(强度)为 $x(0 \leq x \leq 1)$ ,采取“低激励”政策的概率(强度)为 $(1-x)$ 。

对于磷化工企业,其最高目标是利润最大化,若其进行磷石膏综合处理,需要淘汰落后产能,引进或自行研发创新技术,必然会耗费一定的资金成本以及人力和物力资源,减少企业的当期收益。在受到外部地方政府的政策奖罚时,磷化工企业可能会取得额外收益或损失。因此,企业可采取“高参与”和“低参与”两种策略,“高参与”指企业积极升级改造设备,采取绿色生产方式并减少磷石膏堆存量;“低参与”指仍旧维持传统生产方式并直接堆放磷石膏,对于磷污染治理、生态环境修复、水资源保护等工作参与度较低。假设磷化工企业采取“高参与”策略的概率(强度)为 $y(0 \leq y \leq 1)$ ,“低参与”策略的概率(强度)为 $(1-y)$ 。

结合当前的磷污染治理状况,本文纳入影响各方策略选择的因素并进一步构建双方的收益矩阵。“高激励”策略以贵州省推出的“以渣定产”政策为例,2018年4月贵州省人民政府出台《关于加快磷石膏资源综合利用的意见》,明确省内将全面实施磷石膏“以渣定产”政策,推动磷化工产业转型升级。涉及促进磷石膏处理的措施包括:加大对磷化工生产企业绿色升级和磷石膏资源综合利用产业化项目的资金、贷款和参股支持;将磷石膏资源综合利用新产品纳入财政部、国家税务总局发布的《资源综合利用产品和劳务增值税优惠目录》,落实目录中有关磷石膏资源综合利用的增值税、所得税优惠政策。假设政府付出的资金支持和税收优惠额为 $S$ 。

“以渣定产”政策中提到地方政府将加强对企业在磷石膏资源综合利用产品开发和推广上的综合支持,假设政府需投入的人力、物力等成本为 $C_1$ 。在企业积极参与磷石膏治理时,磷石膏堆积量减少,政府可获得更多土地资源释放、水资源质量改善等生态效益为 $R$ 。若磷石膏引发的环境污染问题进一步恶化,政府需付出的环境治理成本为 $C_2$ 。

假设磷化工企业经营过程中获得的收入为 $W$ ,企业升级改造磷化肥生产工艺、引进先进磷石膏综合处理技术和设备所需成本为 $C_3$ ,企业若积极参与磷污染处理,产生的生态效益可使企业获得社会赞誉,此部分收益为 $B$ 。企业磷化工生产若未达到政府相关部门要求,将被按照《水污染防治法》等法律法规处罚为 $P$ <sup>[20]</sup>。模型参数设置如表1所示,政府和企业双方在不同策略下的收益矩阵如表2所示。

表1 模型参数设置

$S$	地方政府付出的(企业获得的)资金支持和税收优惠额
$C_1$	地方为推动企业进行磷石膏综合处理投入的人力、物力等成本
$C_2$	磷石膏污染问题进一步恶化,地方政府需付出的环境治理成本
$R$	地方政府可获得土地资源释放、水资源质量改善等生态效益
$W$	磷化工企业经营所得收入
$C_3$	磷化工企业升级改造磷化肥生产工艺、引进先进磷石膏综合处理技术和设备所需成本
$B$	磷化工企业参与磷污染处理产生的生态效益和所获得的社会赞誉
$P$	地方政府对违规生产的磷化工企业的处罚

表2 地方政府和磷化工企业博弈的支付矩阵

地方政府策略	磷化工企业策略	
	高参与	低参与
高激励	$R - S - C_1$	$P - C_1 - C_2$
	$S + W + B - C_3$	$W - P$
低激励	$R - C_1$	$-C_1 - C_2$
	$W + B - C_3$	$W$

## 2.2 企业的策略演化稳定性分析

企业的支付矩阵 $H$ 为:

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} S + W + B - C_3 & W - P \\ W + B - C_3 & W \end{pmatrix} \quad (1)$$

当企业选择“高参与”策略时,其期望收益为:

$$U_{F1} = eH^T x = (1 \ 0) \begin{pmatrix} S + W + B - C_3 & W - P \\ W + B - C_3 & W \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ 1 - x \end{pmatrix} \quad (2)$$

企业的平均期望收益为:

$$\bar{U}_F = y^T H^T x = (y \ 1 - y) \begin{pmatrix} S + W + B - C_3 & W - P \\ W + B - C_3 & W \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ 1 - x \end{pmatrix} \quad (3)$$

企业采取“高参与”策略的增长率等于选择该策略时的期望收益减去平均期望收益,由此可得企业的复制动态方程为:

$$F(y) = \frac{dy}{dt} = y(U_{F1} - \bar{U}_F) = y(1 - y)[(S + P)x + B - C_3] \quad (4)$$

$F(y)$  的一阶导数为:

$$\frac{dF(y)}{dy} = (1 - 2y)[(S + P)x + B - C_3] \quad (5)$$

由式(4)可得,  $y = 0$ ,  $y = 1$  和  $x = \frac{C_3 - B}{S + P}$  是  $F(y) = 0$  的根. 根据稳定性定理<sup>[21]</sup>, 当  $F(y) = 0$ ,  $F'(y) \leq 0$  时,  $y$  是演化稳定策略.

当  $x = \frac{C_3 - B}{S + P}$  时, 对于任意  $y$ ,  $F(y) = 0$ ,  $F'(y) = 0$ , 此时企业的任何策略都是稳定的.

当  $x \neq \frac{C_3 - B}{S + P}$  时, 需要分析  $C_3 - B$  的不同情况.

情形 1  $C_3 - B < 0$ , 对  $x > \frac{C_3 - B}{S + P}$ , 有  $F'(y)|_{y=0} > 0$ ,  $F'(y)|_{y=1} < 0$ , 此时  $y = 1$  是唯一的演化稳定策略. 企业会选择“高参与”磷污染综合治理问题.

情形 2  $0 < C_3 - B < S + P$ , 当  $x < \frac{C_3 - B}{S + P}$  时,  $F'(y)|_{y=0} < 0$ ,  $F'(y)|_{y=1} > 0$ , 此时  $y = 0$  是唯一的演化稳定策略, 企业会选择“低参与”磷污染综合治理问题.

当  $x > \frac{C_3 - B}{S + P}$  时, 有  $F'(y)|_{y=0} > 0$ ,  $F'(y)|_{y=1} < 0$ , 此时  $y = 1$  是唯一的演化稳定策略, 企业会选择“高参与”磷污染综合治理问题.

情形 3  $C_3 - B > S + P$ , 对  $x < \frac{C_3 - B}{S + P}$ , 有  $F'(y)|_{y=0} < 0$ ,  $F'(y)|_{y=1} > 0$ , 此时  $y = 0$  是唯一的演化稳定策略, 企业会选择“低参与”磷污染综合治理问题.

企业升级改造磷化肥生产工艺、引进先进磷石膏处理技术和设备所需成本与企业参与磷污染处理产生的生态效益和所获得的社会赞誉之差越大, 企业越倾向于采取“低参与”策略. 因此, 地方政府也需要提高“高激励”策略中给予企业的资金支持、补贴以及对企业的罚款, 来促进企业积极参与磷石膏的处置问题.

### 2.3 地方政府的策略演化稳定性分析

地方政府的支付矩阵  $\mathbf{B}$  为:

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} R - S - C_1 & P - C_1 - C_2 \\ R - C_1 & -C_1 - C_2 \end{pmatrix} \quad (6)$$

地方政府采取“高激励”策略的期望收益为:

$$U_{G1} = eBy = (1 \ 0) \begin{pmatrix} R - S - C_1 & P - C_1 - C_2 \\ R - C_1 & -C_1 - C_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y \\ 1 - y \end{pmatrix} \quad (7)$$

地方政府的平均期望收益为:

$$\bar{U}_G = (x \quad 1-x) \begin{pmatrix} R-S-C_1 & P-C_1-C_2 \\ R-C_1 & -C_1-C_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y \\ 1-y \end{pmatrix} \quad (8)$$

由式(7)、式(8)可得地方政府的复制动态方程为:

$$F(x) = \frac{dx}{dt} = x(U_{G1} - \bar{U}_G) = x(1-x)(-Sy - Py + P) \quad (9)$$

复制动态方程的一阶导数为:

$$F'(x) = \frac{dF(x)}{dx} = (1-2x)(-Sy - Py + P) \quad (10)$$

由式(9)可得,  $x=0$ ,  $x=1$  和  $y = \frac{P}{S+P}$  是  $F(x)=0$  的根. 根据稳定性定理<sup>[21]</sup>, 当  $F(x)=0$ ,  $F'(x) \leq 0$  时,  $x$  是演化稳定策略.

当  $y = \frac{P}{S+P}$  时, 对于任意  $x$ ,  $F(x)=0$ ,  $F'(x) \leq 0$ , 此时地方政府的任何策略都是稳定的.

当  $y \neq \frac{P}{S+P}$  时, 需要分析  $\frac{P}{S+P} < 1$  的不同情况.

情形1  $\frac{P}{S+P} < 1$ , 即  $S > 0$  时, 当  $y < \frac{P}{S+P}$ , 有  $F'(x)|_{x=0} > 0$ ,  $F'(x)|_{x=1} < 0$ , 此时  $x=1$  是唯一的演化稳定策略, 地方政府会选择“高激励”磷污染综合治理问题.

当  $y > \frac{P}{S+P}$  时,  $F'(x)|_{x=0} > 0$ ,  $F'(x)|_{x=1} < 0$ , 此时  $x=0$  是唯一的演化稳定策略, 地方政府会选择“低激励”磷污染综合治理问题.

情形2 当  $\frac{P}{S+P} > 1$  时, 即  $S < 0$ , 与  $S > 0$  的假设相冲突, 故该情形不存在.

若磷化工企业采取“高参与”策略的概率小于该博弈的均衡值, 地方政府更倾向于选择“高激励”策略. 若磷化工企业采取“高参与”策略的概率大于动态博弈的均衡值, 地方政府选择“低激励”策略的可能性更大.

## 2.4 企业和地方政府的策略演化均衡分析

根据上述分析, 地方政府和磷化工企业在不同初始状态下均有3种稳定的策略选择. 基于当下中国磷污染治理的现状, 磷化工企业加大研发投入、升级改造磷化肥生产工艺以及引进先进磷石膏处理设备所需付出的成本要大于其参与磷污染治理可获得的生态效益和社会赞誉. 地方政府也会采取为企业提供资金支持和补贴、对污染情况严重的企业进行罚款等激励措施避免极端情况发生. 本文仅讨论当  $0 < C_3 - B < S + P$  时, 地方政府和磷化工企业两个博弈方的演化均衡策略. 根据式(4)和式(9), 可得地方政府和企业的复制动态系统如式(11)所示:

$$\begin{cases} F(x) = x(1-x)(-Sy - Py + P) \\ F(y) = y(1-y)[(S+P)x + B - C_3] \end{cases} \quad (11)$$

经过对式(11)的稳定性分析, 可得出系统的5个纳什均衡点为  $(0, 0)$ ,  $(0, 1)$ ,  $(1, 0)$ ,  $(1, 1)$  和  $(\frac{C_3 - B}{S + P}, \frac{P}{S + P})$ . 地方政府和企业的复制动态系统式(11)的雅可比矩阵  $J$  为:

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial F(x)}{\partial x} & \frac{\partial F(x)}{\partial y} \\ \frac{\partial F(y)}{\partial x} & \frac{\partial F(y)}{\partial y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (1-2x)(-Sy - Py + P) & x(1-x)(-S - P) \\ y(1-y)(S + P) & (1-2y)[(S + P)x + B - C_3] \end{pmatrix} \quad (12)$$

Friedman<sup>[22]</sup> 提出可通过分析系统雅可比矩阵的局部稳定性, 来判断博弈方采取的策略是否为演化稳定策略. 当  $\det(J) < 0$ ,  $\text{tr}(J) < 0$  同时成立时 ( $\det(\cdot)$  代表求行列式,  $\text{tr}(\cdot)$  代表求矩阵的迹), 系统均衡点

会趋于局部稳定状态<sup>[23]</sup>. 据此, 可得系统式(11) 均衡点的稳定性分析结果如表 3 所示.

表 3 系统式(11) 均衡点的稳定性分析

均衡点	det(J) 符号	tr(J)	均衡点类型
(0, 0)	-	不确定	鞍点
(0, 1)	-	不确定	鞍点
(1, 0)	-	不确定	鞍点
(1, 1)	-	不确定	鞍点
$(\frac{C_3 - B}{S + P}, \frac{P}{S + P})$	+	0	中心点

由于点 $(\frac{C_3 - B}{S + P}, \frac{P}{S + P})$  对应 $\lambda_1, \lambda_2$  两个特征根均是纯虚根, 说明 $(\frac{C_3 - B}{S + P}, \frac{P}{S + P})$  不是渐进稳定的演化均衡点, 此时系统的演化轨迹为一闭环曲线.

### 2.5 动态激励机制下的双方演化博弈分析

在系统式(11) 中, 地方政府激励相关企业付出的资金支持和税收优惠为固定值, 我们将这种激励机制称为静态激励机制. 但结合现实情况, 地方政府(如贵州省) 会结合辖区内不同企业的磷石膏堆积情况及污染的严重程度制定激励标准和激励政策, 针对具体情况采取相应的激励措施, 我们将此种模式称为动态激励机制. 假设地方政府付出的资金支持和税收优惠  $S$  与磷化工企业采取“低参与”策略进行磷污染处理的行为成正比, 则关系式为:

$$S(y) = a(1 - y)$$

其中:  $a$  表示地方政府对磷化工企业的激励强度, 双方的演化博弈矩阵如表 4 所示.

表 4 动态激励下地方政府和磷化工企业博弈的支付矩阵

地方政府策略	磷化工企业策略	
	高参与 $y$	低参与 $1 - y$
高激励 $x$	$R - S(1 - y) - C_1$ $S(1 - y) + W + B - C_3$	$P - C_1 - C_2$ $W - P$
低激励 $1 - x$	$R - C_1$ $W + B - C_3$	$-C_1 - C_2$ $W$

将  $S(y) = a(1 - y)$  代入式(11) 中, 可得新的复制动态系统式(13) 为:

$$\begin{cases} F(x) = x(1 - x)[-S(y)y - Py + P] \\ F(y) = y(1 - y)[(S(y) + P)x + B - C_3] \end{cases} \quad (13)$$

经过对系统式(13) 的分析, 可得如下 5 个复制动态均衡点:

$$(0, 0), (0, 1), (1, 0), (1, 1), (x^*, y^*)$$

其中:

$$x^* = \frac{C_3 - B}{S(y) + P} \quad y^* = \frac{P}{S(y) + P}$$

系统式(13) 的雅可比矩阵  $J$  为:

$$J = \begin{pmatrix} (1 - 2x)[-S(y)y - Py + P] & x(1 - x)[-S(y) - P] \\ y(1 - y)[S(y) + P] & (1 - 2y)[(S(y) + P)x + B - C_3] \end{pmatrix} \quad (14)$$

对系统式(13) 各个均衡点进行稳定性分析, 可得(0, 0), (0, 1) 为鞍点, (1, 0), (1, 1) 为不稳定点. 将

$(\frac{C_3 - B}{S(y) + P}, \frac{P}{S(y) + P})$  代入雅可比矩阵, 可得

$$J(E^*) = \begin{pmatrix} 0 & -x^*(1 - x^*)[S(y^*) + P - ay^*] \\ y^*(1 - y^*)[S(y^*) + P] & -x^*y^*S(y^*) \end{pmatrix} \quad (15)$$

该雅可比矩阵的特征根为  $\lambda_{1,2} = -\frac{x^* y^* a(1-y^*) \pm \sqrt{\Delta}}{2}$ , 其中  $\Delta < 0$ , 所以  $J(E^*)$  的特征根为两个具有负实部的复根, 此时系统式(13)的演化轨迹会趋向于稳定点.

### 3 模型仿真

参考贵州省推出的“以渣定产”政策措施和省内磷化工企业的相关数据<sup>[1]</sup>, 在满足  $0 < C_3 - B < S + P$  的条件下对参数进行赋值, 假设  $S=0.5$ ,  $C_1=0.4$ ,  $C_2=1.1$ ,  $R=1.2$ ,  $W=2.9$ ,  $B=1$ ,  $C_3=1.6$ ,  $a=3$ , 在静态激励机制下(系统式(11)), 地方政府采取“高激励”政策的初始概率  $x=0.5$ , 磷化工企业采取“高参与”策略的初始概率  $y=0.3$ , 可得系统式(11)的仿真轨迹如图1(a)所示. 在动态激励机制下(系统式(13)), 同样设地方政府和磷化工企业采取积极策略的概率分别为  $x=0.5$ ,  $y=0.3$ , 假设  $a=3$ , 可得系统式(13)的仿真轨迹如图1(b)所示.

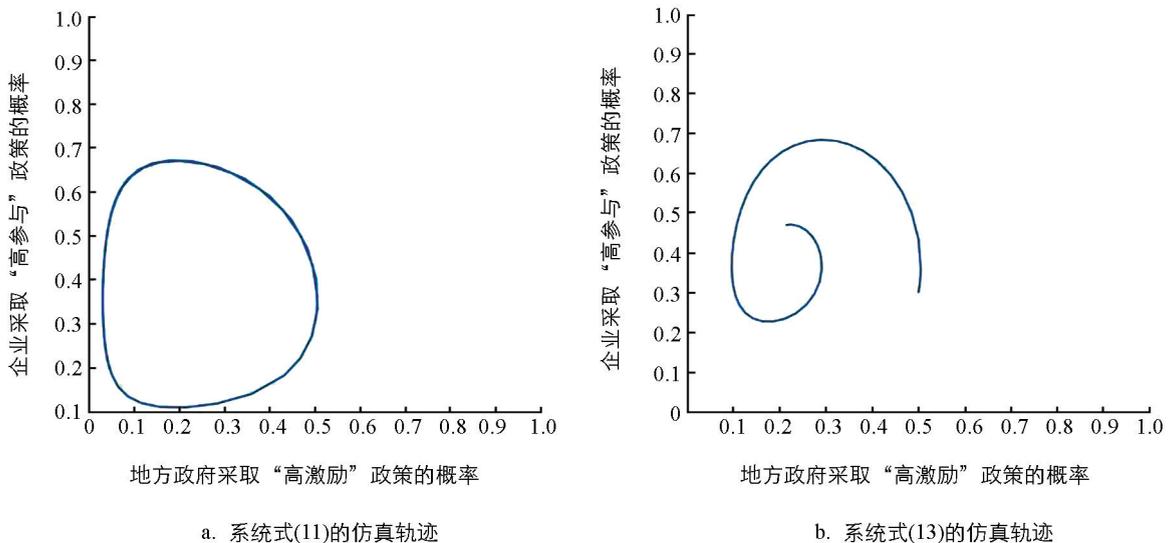


图1 地方政府和磷化工企业的演化仿真轨迹

从图1(a)中可以看出, 在静态激励下地方政府和磷化工企业复制动态系统式(11)的仿真轨迹是一个闭环曲线, 系统中的双方均不存在渐进的演化稳定策略. 在这种情形下, 地方政府和磷化工企业在博弈过程中不断调整策略, 两个群体的策略选择均呈不稳定的周期性变化. 从图1(b)中则可发现, 在动态激励机制下, 复制动态系统式(13)的仿真轨迹展现出螺旋收敛的特性, 系统存在纳什均衡. 系统式(11)中地方政府和磷化工企业双方的策略概率一直在不停波动相比, 系统式(13)最终趋向于稳定状态, 表明企业能在稳定条件下参与磷污染治理工作. 由此可得, 政府采取动态激励机制有利于加速磷石膏综合利用进程, 推动更多磷化工企业采取“高参与”策略. 贵州省出台的“以渣定产”政策也具有明显的动态激励特征, 比如提到“对当年认定的国家级、省级企业技术中心, 分别给予100万元、50万元的一次性奖励”; “对磷石膏产生企业实施的重大转型升级工艺改造项目, 可按规定给予贴息或补贴支持”. 可见, 政府给予企业的资金支持并不固定, 而是结合企业具体情况采取对应的激励措施.

上述仿真结果体现了我国磷石膏综合处理问题波动发展的特点, 与我国当前的实际情况相符. 通过比较两种机制下双方的仿真轨迹, 可发现磷化工企业在动态激励机制下参与磷污染的积极性相对更高.

### 4 敏感性分析

本文聚焦于通过优化参数设置来提高磷化工企业参与磷石膏综合处理的积极性, 并根据不同参数对演化结果的影响程度为地方政府推进磷污染治理提供可参考的决策依据, 启示地方政府未来的努力方向.

#### 4.1 地方政府对磷化工企业的激励强度

让地方政府对磷化工企业的激励强度在 $[1, 6]$ 范围内以1为增量变化, 仿真分析结果(图2)体现了不同激励强度对应的博弈演化速度和均衡点.

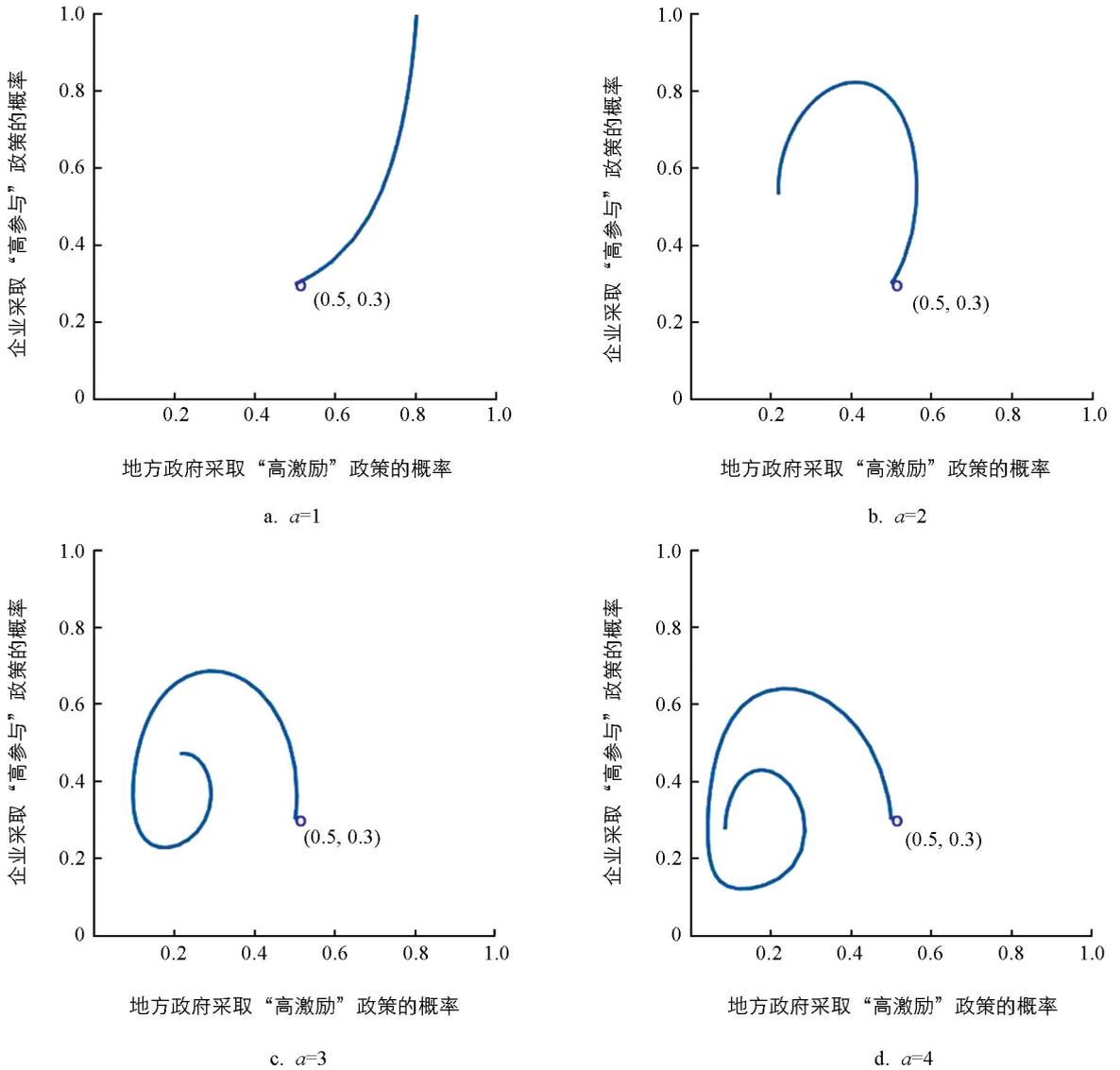


图 2 在不同激励程度  $a$  下地方政府和磷化工企业的行为表现

从图 2 可以看出, 当  $a$  较小时, 地方政府对磷化工企业进行一定程度的资金补贴和税收优惠来促进企业参与到磷污染治理的行动中来(图 2a)。随着  $a$  增大, 地方政府的财政压力增大, 其对补贴相关企业的积极性下降(图 2b—d)。由于地方政府越发不愿支付高额的补贴成本, 磷化工企业进行磷石膏综合处理的意愿也在不断降低, 博弈朝着不理想的发展状态演进。同时, 激励强度增大使得双方的博弈速度减慢, 博弈演化到均衡状态需要耗费更多的时间。由此可得, 地方政府对企业进行过度激励并不一定能促进双方协同治理磷污染问题。 $a$  的值越小(如  $a=1$  时), 博弈的纳什均衡越理想, 系统能更快地达到稳定的均衡状态。对比静态激励机制, 地方政府的动态激励措施使得磷化工企业的绿色生产积极性更高, 且能在一定时间后达到稳定状态。因此, 地方政府若想达到较好的磷污染治理效果, 需要选择恰当的激励程度而不能一味加大对企业的补贴力度。

#### 4.2 磷石膏综合处理成本、企业社会效益和处罚力度

地方政府选择激励程度  $a=1$  时, 博弈的演化均衡状态较为理想。接下来本文将观察在此条件下, 不同设备升级成本、罚金和企业社会效益 3 个参数对于磷化工企业选择“高参与”策略的概率的影响(图 3), 并结合贵州省“以渣定产”政策下企业实例进行讨论。

从图 3a 的仿真结果可知, 如果改变生产方式所耗费资金  $C_3$  过高, 企业难以承受如此高昂的成本, 则企业采取“高参与”策略的概率将会稳定在较低水平。伴随着生产方式转型成本的下降, 企业参与磷污染治

理的积极性提高. 因此,降低企业采取新技术的成本,有利于推进区域内的磷化工绿色发展进程. 相关资料显示,磷石膏的综合利用面临技术和市场两大难题. 在技术上,磷石膏的杂质含量高且多样化,预处理过程复杂,成本较高. 若进行高标准处理,成品价格高,不具有市场竞争力;若只简单处理,劣质产品不仅伤害企业形象,对环境的危害性也更大. 在市场上,如果产品不被市场接受,企业无利可图,便不愿投入资金进行产能改造,只会继续堆存磷石膏而非对其进行综合处置. 由此可知,为解决磷石膏消纳处置费用大、产品产业化不充分的问题,地方政府可从技术和市场两方面入手. 在技术上坚持创新驱动发展,完善科技创新制度体系,推动关键核心技术实现规模化和工业化以降低企业磷石膏处理成本,提高产品竞争力;在市场上可帮助企业进行产品宣传推介,为新产品开拓市场,积极搭建磷石膏产用企业联合发展平台,促进产业链内相关企业合作对接等工作.

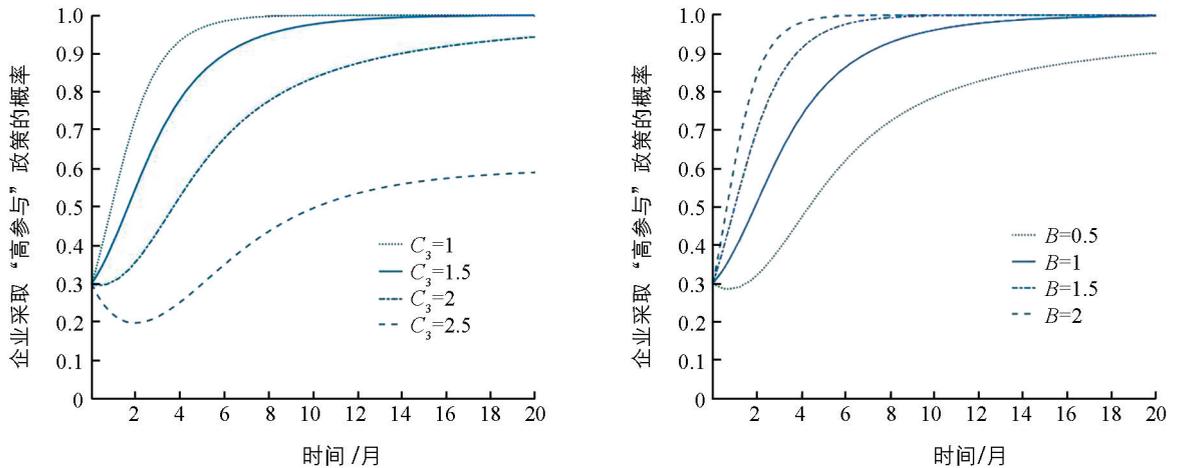
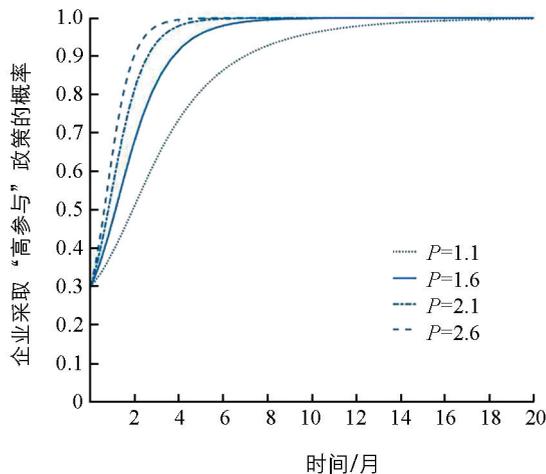
a. 不同磷石膏处理成本 $C_3$ 参数下磷化工企业的策略演化轨迹b. 不同社会效益 $B$ 参数下磷化工企业的策略演化轨迹c. 不同处罚力度 $P$ 参数下磷化工企业的策略演化轨迹

图3 磷化工企业的策略演化轨迹

从图 3b 中可知,当企业采取绿色方式生产磷化工产品产生的社会效益  $B$  不高时,企业选择“高参与”的概率也偏低. 如果企业能够创造的社会效益提高,企业升级改造设备、进行绿色生产的积极性增加,其行为也能稳定在“高参与”的策略选择中. 具体而言,企业可以通过加快技术突破和成果转化来提高社会效益并获得公众赞誉. 例如,2020年7月,贵州磷化集团联手清华大学共同研发出湿法磷酸高值化和清洁化生产的微化工技术,该技术突破了复杂工艺、高含固极端工况等对微化工技术使用的限制,采用这项技术生产的湿法净化酸可达全国产能的95%,推动了湿法磷酸高值化与清洁生产微化工体系的形成. 此项技术不仅获得国家技术进步二等奖,也带来了巨大的经济效益和社会效益. 截至2020年底,贵州磷化集团累计获得授权专利1900余件,其中发明专利超过550件,已在某些细分领域与关键技术上实现领跑. 从该案例

中可看出,以技术创新驱动企业创造更高社会效益,并激励更多企业积极参与磷化工综合治理,能够有力支撑全产业链的转型升级和可持续发展。

从图 3c 中可知,地方政府对违规企业的处罚力度较小时,企业演化至均衡状态所需时间较长,而地方政府处罚力度加大可使企业行为稳定在采取“高参与”策略状态时,所需的时间缩短。同时,我们也发现处罚措施对于企业策略的影响存在边际递减效应,处罚力度  $P$  从 1.1 增至 1.6,企业的演化速度明显增快,但当  $P$  从 1.6 增至 2.1,2.6 时,企业的演化速度变化并不显著。贵州省人民政府《关于加快磷石膏资源综合利用的意见》中指出,要严格落实国家和贵州省的相关法律法规及政策标准,淘汰能耗、环保、质量、安全达不到标准和生产不合格产品的磷肥产能。在该政策下,企业如果不改善生产结构,积极创新技术并参与到磷石膏综合处理中来,可能会面临被淘汰的风险。因此,较重的处罚力度有助于企业加速科研进程和设备的升级改造,进而转变为低污染生产模式。

上述仿真结果体现了在磷化工产业绿色发展的博弈中,重要参数的变化对企业策略演化的影响。对比 3 项参数的敏感性分析结果,我们可知更低的磷石膏处理成本、更高的社会效益和地方政府更大的处罚力度能够加速企业策略稳定在“高参与”状态。同时,本文发现在政府激励程度固定的条件下,磷石膏处理成本  $C_3$  对企业策略选择的影响最大,其次为社会效益  $B$ ,影响程度最小的为政府对企业的惩处力度  $P$ 。

## 5 结论与政策启示

本文使用演化博弈理论、模型仿真和敏感性分析研究了贵州省磷化工污染治理中地方政府和企业的动态博弈过程,对比了静态和动态博弈机制对双方策略演化路径的影响。通过分析贵州省的情况,得出具有普适性、其他磷化工污染严重地区可借鉴的结论与建议如下:

1) 在静态激励机制下,博弈方的策略具有周期性特征,系统不能达到演化稳定状态。在动态激励机制下,系统呈现出螺旋收敛并稳定的轨迹。该发现表明地方政府采取动态激励机制有利于推进企业积极进行磷石膏综合处理,减少磷化工污染。

2) 为实现更理想的博弈结果,地方政府需选择恰当的激励程度,给企业的资金支持和税收补贴过多可能导致政府财政压力过大,以致于在此后的博弈中采取“高激励”策略的概率降低。

3) 在激励程度确定的情况下,企业采取“高参与”策略的概率与磷石膏处理成本成反比,与社会效益、地方政府对其的惩处力度成正比。相关参数可以进一步优化,根据参数对企业策略演化的影响程度,本文将优化措施分为 3 个优先级,从高到低依次排列为:磷石膏处理成本、社会效益、惩处力度。

基于以上结论和贵州省“以渣定产”政策的实施方略,本文为磷化工产业绿色发展提出如下建议:

1) 地方政府应对磷化工企业采取动态激励措施,结合相关辖区内企业的磷石膏堆积情况、造成的污染严重程度为企业制订磷石膏处置目标,并给予相应的补贴支持。在此基础上,践行绩效目标承诺和绩效评价机制,确保财政资金的使用效果。

2) 在降低企业磷石膏处置成本方面,地方政府可从技术和市场两方面入手,加大招商引资力度,推动磷石膏建材生产项目建设,助推先进技术的规模化和工业产品的市场化,提高磷石膏综合利用能力。

3) 在提高企业创造的社会效益方面,地方政府可为企业与高校的合作牵线搭桥,多方合力共同实现技术研发与突破,以先进技术支撑磷化工产业的转型升级。与此同时,加强技术施工人员培训,为磷石膏建材推广应用做好人才储备。

4) 支持企业对传统磷化工生产工艺和设备进行绿化改造升级,对于能耗、环保、质量、安全不达标企业,地方政府应当严格处罚,适当淘汰落后产能,严格审查传统磷肥新建、技改项目,保证磷化工产业的高质量发展。

## 参考文献:

- [1] 张健,郑西来,董慧,等. 河口表层沉积物中磷酸盐释放的动力学特征 [J]. 海洋地质前沿, 2012, 28(3): 1-6.
- [2] 田蔚,李骏宇,康明远. 贵州省磷石膏“以渣定产”促进磷化工产业绿色发展的研究与对策 [J]. 现代工业经济和信息化, 2020, 10(5): 21-23, 80.

- [3] 袁寿奇,谭昭旭,黄琴,等. 贵州磷化工绿色循环经济产业链发展现状与趋势 [J]. 山东化工, 2021, 50(17): 100-102.
- [4] 罗胤晨,文传浩,滕祥河. 破除长江上游“重化工围江”困境 [N]. 北京: 中国环境报社, 2019-02-01(3).
- [5] SMITH J M, PRICE G R. The Logic of Animal Conflict [J]. Nature, 1973, 246(5427): 15-18.
- [6] TAYLOR P D, JONKER L B. Evolutionary Stable Strategies and Game Dynamics [J]. Mathematical Biosciences, 1978, 40(1/2): 145-156.
- [7] 肖忠东,曹全焘,郎庆喜,等. 环境规制下的地方政府与工业共生链上下游企业间三方演化博弈和实证分析 [J]. 系统工程, 2020, 38(1): 1-13.
- [8] 杨志清. 河南省能源、经济与环境(3E)系统绿色发展评价与分析 [J]. 河南农业大学学报, 2021, 55(1): 180-190.
- [9] 许华,洪宏,黄一鸣. 企业环境责任、媒体关注对企业价值影响研究 [J]. 河南农业大学学报, 2021, 55(1): 191-198.
- [10] 王辛龙,许德华,钟艳君,等. 中国磷化工行业60年发展历程及未来发展趋势 [J]. 无机盐工业, 2020, 52(10): 9-17.
- [11] 吴琼慧,刘志学,陈业阳,等. 长江经济带“三磷”行业环境管理现状及对策建议 [J]. 环境科学研究, 2020, 33(5): 1233-1240.
- [12] 闫华飞,肖静,冯兵. 磷化工企业技术创新效率评价——基于27家上市公司的数据 [J]. 无机盐工业, 2020, 52(9): 9-14.
- [13] 王守文,黄刚,颜鹏. 基于行业的磷化工产业技术研究院绩效评价研究——以湖北省磷化工产业技术研究院为例 [J]. 科技管理研究, 2016, 36(22): 82-86.
- [14] 冯兵,张文博,任光辉. 中外磷化工上市企业竞争力评价研究 [J]. 磷肥与复肥, 2018, 33(1): 7-9.
- [15] 崔萌. 协同治理背景下环保信用监管的三方演化博弈分析 [J]. 系统工程理论与实践, 2021, 41(3): 713-726.
- [16] SIMON H A. A Behavioral Model of Rational Choice [J]. The Quarterly Journal of Economics, 1955, 69(1): 99-118.
- [17] 张伟. 资源型产业链知识创造影响因素研究——基于贵州中部磷化工产业链的分析 [J]. 管理学报, 2016, 13(6): 871-879, 888.
- [18] 宋妍,陈赛,张明. 地方政府异质性与区域环境合作治理——基于中国式分权的演化博弈分析 [J]. 中国管理科学, 2020, 28(1): 201-211.
- [19] 潘峰,王琳. 环境规制中地方规制部门与排污企业的演化博弈分析 [J]. 西安交通大学学报(社会科学版), 2018, 38(1): 71-81.
- [20] 时瑶,秦延文,马迎群,等. 长江流域上游地区“三磷”污染现状及对策研究 [J]. 环境科学研究, 2020, 33(10): 2283-2289.
- [21] FRIEDMAN D. Evolutionary Games in Economics [J]. Econometrica, 1991, 59(3): 637.
- [22] FRIEDMAN D. On Economic Applications of Evolutionary Game Theory [J]. Journal of Evolutionary Economics, 1998, 8(1): 15-43.
- [23] ROY GARDNER. Games Business and Economics [M]. Hoboken: John Wiley & Sons Inc, 1995.

责任编辑 夏娟