

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2025.06.010

基于随机演化博弈的煤矿安全监管奖惩制度研究

刘泽功^{1,2}, 王倩婷¹, 乔国栋^{1,2}, 张鑫¹, 常帅¹, 杨帅¹

(1. 安徽理工大学 安全科学与工程学院, 安徽 淮南 232001;

2. 合肥综合性国家科学中心 能源研究院, 安徽 合肥 230031)

摘要: 为了预防矿山事故的发生, 完善煤矿企业安全监管, 围绕煤矿安全监管中奖惩机制的设置, 构建了政府、企业和矿工的三方随机演化博弈模型。借鉴Itô随机微分方程对博弈主体稳定性条件进行了分析, 运用Matlab对三方演化博弈模型进行动态仿真分析, 并与无随机干扰情况进行对比。研究表明, 在随机干扰下, 博弈参与者的选择策略呈现出明显的波动趋势, 随机干扰程度越大, 博弈参与者稳定速度越快; 企业策略选择受奖惩机制的影响较小, 而矿工对奖惩机制更加敏感, 奖励比惩罚对矿工更具激励作用。

关键词: 煤矿安全监管; 随机演化博弈; 随机干扰; 奖惩制度; 仿真模拟

中图分类号: TD79

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2025)06-0063-08

引文格式: 刘泽功, 王倩婷, 乔国栋, 等. 基于随机演化博弈的煤矿安全监管奖惩制度研究 [J]. 湖南工业大学学报, 2025, 39(6): 63-70.

Research on Reward and Punishment System of Coal Mine Safety Supervision Based on Stochastic Evolutionary Game

LIU Zegong^{1,2}, WANG Qianping¹, QIAO Guodong^{1,2}, ZHANG Xin¹, CHANG Shuai¹, YANG Shuai¹

(1. School of Safety Science and Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China;

2. Institute of Energy, Hefei Comprehensive National Science Center, Hefei 230031, China)

Abstract: In view of a prevention of mining accidents as well as an improvement of the safety supervision of coal mining enterprises, a three party stochastic evolutionary game model has thus been constructed among the government, enterprises, and miners, with a research focus on the establishment of reward and punishment mechanisms in coal mining safety supervision. An analysis is conducted on the stability conditions of game subjects by referring stochastic differential equations, followed by a dynamic simulation and analysis of the three party evolutionary game model by using Matlab, with a comparison with the situation without random interference. Research results reveal that under random interference, the selection strategies of game participants show a significant fluctuation trend. The greater the degree of random interference, the faster the stability speed of game participants will be. There is a relatively small influence of reward and punishment mechanisms on corporate strategy selection, while miners are more sensitive to reward and punishment mechanisms, with rewards exerting a more motivating effect on miners than punishments.

Keywords: coal mine safety supervision; stochastic evolutionary game; random disturbance; reward and punishment system; simulation

收稿日期: 2024-06-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52074013)

作者简介: 刘泽功, 男, 安徽理工大学教授, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为瓦斯灾害防治, E-mail: zgliu@aust.cn

煤炭是我国主要能源,煤矿安全关系着煤炭企业的发展和国家的能源安全,关系着煤矿工人的生命安全。虽然煤矿企业持续加大安全生产投入,但煤矿安全事故仍时有发生。煤矿井下作业环境恶劣,瓦斯、透水、火灾、顶板等事故威胁着每个煤矿工作者的生命安全。相关资料显示,仅在2023年我国发生了120起煤矿事故^[1]。矿山安全生产形势依然复杂严峻,安全生产问题依然突出。因此,积极探索煤矿安全治理的新方法,对于有效预防和应对煤矿安全事故、降低矿工工作的安全风险和企业经济损失有重要的现实意义。

在煤矿企业中,规范矿工工作行为是煤矿安全管理的重要环节,备受学者关注。学者们对企业安全监管中奖惩机制的作用存在不同的看法,一些观点肯定了惩罚机制对矿工安全生产的重要作用。杨雪等^[2]指出动态“连坐”惩罚制度能够有效规避矿工的违规行为。杨晓娟等^[3]认为矿工对处罚措施感知敏感,企业采取违规惩罚能够使煤矿工人和安检员更加重视生产安全。但一些学者认为过重的惩罚反而会降低矿工的积极性,不利于安全生产。如Liu Q. L.等^[4]指出,长期采取惩罚措施会加大煤矿企业违法行为的波动性,不利于安全监管的稳定。而采取发放补贴等激励措施可降低监管成本,有效鼓励煤矿工人加大安全生产投入^[5]。

煤矿企业安全事故频发,给社会造成了巨大的损失,安全管理在预防事故发生过程中起着关键作用。在以往的研究中,许多方法用于研究安全管理问题。博弈论能够解释安全管理中潜在的冲突与合作,为决策者提供理论支持和决策建议,因而被学者们广泛使

用于研究煤矿安全管理问题。Yu K.等^[6]对矿工和企业管理者进行演化博弈,得出动态激励行为可以减少矿工不安全行为的结论。Zhang Y.等^[7]构建了组织、管理者、矿工和群体之间的演化博弈,发现动态奖惩机制有利于煤炭行为管理系统的稳定。然而演化博弈模型研究的是确定性状态下博弈者的战略选择行为,外界环境的不确定性限制了演化博弈模型的使用,一些学者将随机系统引入博弈中,研究外界环境干扰对主体间的影响。Xu Y.等^[8]基于协调参数、惩罚效应提出随机演化博弈模型,引入高斯白噪声反映过程中的扰动。Shan S. N.等^[9]将随机演化博弈模型应用于城市公共危机协同治理上,分析不同奖惩机制对治理过程造成的影响。李军强等^[10]建立了随机演化博弈模型,分析了企业研发过程中政府补贴对操纵行为的作用。

考虑到实际中的随机情况,对复制动态方程进行改进,引入高斯白噪声模拟现实世界中的随机性和不确定性因素^[11],从而使博弈参与者的决策变得更加随机和多样化。但是在煤矿安全行为的研究中,使用多方随机演化博弈的研究较少。基于此,构建了政府、企业和矿工三方演化博弈模型,通过仿真模拟,分析环境扰动和奖惩变化对煤矿安全生产的影响并提出建议,为煤矿安全管理提供参考。

1 模型假设

参与安全监管的主体包括政府、企业和矿工,根据国家矿山安全监察局公布的2021年典型矿山事故案例^[12],包括瓦斯爆炸、透水、煤与瓦斯突出等事故,设置如表1所示模拟变量。

表1 2021 矿山事故及模拟变量
Table 1 Mine accidents and simulation variables in 2021

变量	“1·10”重大爆炸事故	“4·10”重大透水事故	“6·10”重大透水事故	“8·14”溃砂溃泥重大事故	“2·24”较大顶板事故	“3·25”较大煤与瓦斯突出事故	“4·9”较大煤与瓦斯突出事故	“6·4”较大煤与瓦斯突出事故	“7·15”较大水害事故	“11·10”较大顶板事故
C_1			√	√		√	√	√	√	√
C_2	√	√	√				√			√
C_3								√		
L_1	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
L_2	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
P_1	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
P_2	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
P_3	√	√	√	√	√	√	√		√	√
α	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
θ								√		
s			√	√		√			√	√

对表 1 中典型煤矿安全事故进行系统分析, 归纳总结政府、企业和矿工三方主体博弈过程中所涉及的变量。在煤矿管理模式上, 分析了事故发生主体、事故原因以及造成的事故损失, 通过主体之间的关系做出以下假设:

假设 1 矿工可以选择是否安全生产, 他们有两种策略选择 (安全生产、违规生产), 概率分别为 z 、 $1-z$ 。要保证安全生产就意味着矿工需要定期进行安全培训, 提高风险判断能力, 严格执行企业指令。而矿工不进行安全培训, 工作时不按规章制度要求, 抢工期、赶进度可视为矿工的违规生产。企业是否贯彻安全生产法律法规的要求、进行安全管理, 他们可采取的策略有 (管理、不管理), 概率分别为 y 、 $1-y$ 。企业安全管理指的是积极采取安全管理措施, 包括对矿工安全生产进行奖励, 对违规生产进行处罚, 组织矿工安全培训等。企业不管理则是不对矿工安全培训, 对安全生产情况置之不理。根据政府是否监督企业安全管理, 确定其博弈策略选择为 (监督、不监督), 概率分别为 x 、 $1-x$ 。三方主体在博弈过程中均是有限理性, 参与主体在博弈过程中不断学习

和调整, 最终策略选择趋于最优。

假设 2 政府总效益为 W_1 , 监督煤矿企业的成本为 C_1 。当发生安全事故时, 对政府造成的损失为 L_1 。

假设 3 企业的收入为 W_2 , 安全管理的成本为 C_2 , 政府对企业安全补贴, 企业所获得的安全补贴为 sC_1 , 其中 s 为政府的安全成本补贴力度 ($0 < s < 1$)。当企业参与安全管理的情况下, 获得的政府奖励为 r_1 , 若政府发现企业管理不到位, 处以企业行政处罚 P_1 。由于企业安全管理不力而发生安全事故产生的处罚为 P_2 。

假设 4 矿工的生产收入为 W_3 , 矿工生产的基本成本为 C_3 。假设矿工在选择安全生产策略后, 需要花费一些时间和精力安全培训, 花费的成本与其复杂度 θ 成正比 ($\theta > 0$), 因此 θC_3 表示采用安全生产时的额外成本。当矿工违规生产时, 则企业施加的惩罚为 P_3 , 事故发生的概率为 α , 造成的事故损失为 L_2 。

基于所提出的三方博弈假设和收益矩阵 (见表 2), 可得出政府、企业和矿工的期望收益和平均收益。

表 2 政府 - 企业 - 矿工三方支付矩阵

Table 2 Government-company-miner tripartite payment matrix

博弈参与者		矿 工				
		安全生产 z	违规生产 $(1-z)$			
政府	监督 x	企业	管理 y	$W_1 - C_1 - sC_2 - r_1$	$W_1 - C_1 - sC_2 - \alpha L_1 - (1-\alpha)r_1$	
			不管理 $(1-y)$	$W_2 - C_2 + r_1 + sC_2 - \theta C_3 - r_2$	$W_2 + (s-1)C_2 + (1-\alpha)r_1 - \theta C_3 - \alpha P_2 + P_3$	
			不监督 $(1-x)$	企业	$W_3 - C_3 + r_2$	$W_3 + (\theta-1)C_3 - P_3 - \alpha L_2$
	不监督 $(1-x)$	企业	管理 y	$W_1 - C_1 - sC_2 + r_1$	$W_1 - C_1 - sC_2 + P_1 + \alpha(P_2 - L_1)$	
			不管理 $(1-y)$	$W_2 + sC_2 + P_1$	$W_2 + sC_2 - P_1 + \alpha(P_3 - L_2)$	
			不管理 $(1-y)$	$W_3 - (\theta+1)C_3$	$W_3 - C_3 - \alpha(L_2 + P_3)$	
			管理 y	W_1	$W_1 + \alpha(P_2 - L_1)$	
			不管理 $(1-y)$	$W_2 - C_2 - sC_3 - r_2$	$W_2 - C_2 - \theta C_3 + P_3 - \alpha P_2$	
			不监督 $(1-x)$	企业	$W_3 - C_3 + r_2$	$W_3 + \theta C_3 - P_3 - \alpha L_2$
			不管理 $(1-y)$	$W_1 + P_1$	$W_1 + \alpha(P_2 - L_1)$	
			不管理 $(1-y)$	$W_2 - P_1$	$W_2 + \alpha(P_3 - L_2) - P_1$	
				$W_3 - (\theta+1)C_3$	$W_3 - C_3 - (P_3 + L_2)$	

令政府监管的期望收益为 U_{11} , 不监管的期望收益为 U_{12} , 平均收益为 U_1 , 由表 2 可得:

$$U_{11} = yz(W_1 - C_1 - sC_2 - r_1) + y(1-z)[W_1 - C_1 - sC_2 - \alpha L_1 - (1-\alpha)r_1] + z(1-y)(W_1 - C_1 - sC_2 + P_1) + (1-y)(1-z) \cdot [W_1 - C_1 - sC_2 + \alpha(P_2 - L_1) + P_1], \quad (1)$$

$$U_{12} = yzW_1 + y(1-z)[W_1 + \alpha(P_2 - L_1)] + z(1-y) \cdot (W_1 + P_1) + (1-y)(1-z)[W_1 + \alpha(P_2 - L_1)], \quad (2)$$

$$U_1 = xU_{11} + (1-x)U_{12} =$$

$$(x-1)[y(z-1)(W_1 - \alpha(L_1 - P_2)) - yzW_1 + z(y-1)(P_1 + W_1) - (y-1)(z-1)(W_1 - \alpha(L_1 - P_2))] - x[yz(C_1 - W_1 + r_1 + sC_2) + (y-1)(z-1)(C_1 - P_1 - W_1 + sC_2 + \alpha(L_1 - P_2)) - y(z-1)(C_1 - W_1 + \alpha L_1 + sC_2 - (\alpha-1)r_1) - z(y-1)(C_1 - P_1 - W_1 + sC_2)] \quad (3)$$

令企业安全管理的期望收益为 U_{21} , 不管理的期

望收益为 U_{22} , 平均收益为 U_2 , 由表 2 可得:

$$U_{21} = xz(W_2 - C_2 + r_1 + sC_2 - \theta C_3 - r_2) + x(1-z) \cdot [W_2 + (s-1)C_2 + (1-\alpha)r_1 - \theta C_3 - \alpha P_2 + P_3] + (1-x)z(W_2 - C_2 - \theta C_3 - r_2) + (1-x)(1-z) \cdot (W_2 - C_2 - \alpha P_2 - \theta C_3 + P_3), \quad (4)$$

$$U_{22} = xz(W_2 - P_1 + sC_2) + x(1-z) \cdot (W_2 + sC_2 - P_1 - \alpha P_2 + \alpha P_3) + (1-x)z \cdot (W_2 - P_1) + (1-x)(1-z)(W_2 - \alpha P_2 + \alpha P_3 - P_1), \quad (5)$$

$$U_2 = yU_{21} + (1-y)U_{22} = -y[xz \cdot (C_2 - W_2 - r_1 + r_2 - sC_2 + \theta C_3) + (x-1)(z-1)(C_2 - P_3 - W_2 + \alpha P_2 + \theta C_3) - z(x-1)(C_2 - W_2 + r_2 + \theta C_3) + x(z-1) \cdot (P_3 + W_2 - \alpha P_2 - \theta C_3 + (s-1)C_2 - (\alpha-1)r_1)] - (x-1)(y-1)[z(P_1 - W_2) - x(z-1) \cdot (W_2 - P_1 - \alpha P_2 + \alpha P_3 + sC_2) + xz(W_2 - P_1 + sC_2) - (x-1)(z-1)(P_1 - W_2 + \alpha P_2 - \alpha P_3)]. \quad (6)$$

令矿工安全生产的期望收益为 U_{31} , 违规生产的期望收益为 U_{32} , 平均收益为 U_3 , 由表 2 可得:

$$U_{31} = xy(W_3 + r_2 - C_3) + x(1-y)[W_3 - (1+\theta)C_3] + (1-x)y(W_3 - C_3 + r_2) + (1-x)(1-y)[W_3 - (1+\theta)C_3], \quad (7)$$

$$U_{32} = xy(W_3 + (\theta-1)C_3 - \alpha L_2 - P_3) + x(1-y)[W_3 - C_3 - \alpha(L_2 + P_3)] + (1-x)y(W_3 + \theta C_3 - \alpha L_2 - P_3) + (1-x)(1-y)[W_3 - C_3 - \alpha(P_3 + L_2)], \quad (8)$$

$$U_3 = zU_{31} + (1-z)U_{32} = z\{xy(W_3 - C_3 + r_2) + x(y-1) \cdot (C_3 - W_3 + \theta C_3) + (x-1)(y-1)[W_3 - (\theta+1)C_3] - y(x-1)(W_3 - C_3 + r_2)\} + (z-1)[(x-1)(y-1) \cdot (C_3 - W_3 + \alpha(L_2 + P_3)) + xy(P_3 - W_3 + \alpha L_2 - (\theta-1)C_3) - y(x-1)(P_3 - W_3 + \alpha L_2 - \theta C_3) - x(y-1)(C_3 - W_3 + \alpha(L_2 + P_3))]. \quad (9)$$

继而推出三方的复制动态方程分别为 $F_1(x)$ 、 $F_2(y)$ 、 $F_3(z)$:

$$F_1(x) = \frac{dx}{dt} = x(x-1)[(1-z)((y-1)P_1 + yr_1 + C_1 - P_1 + \alpha y(P_2 - r_1))], \quad (10)$$

$$F_2(y) = \frac{dy}{dt} = y(y-1)[C_2 - P_1 + \theta C_3 + z(r_2 - \alpha x r_1) + (\alpha-1)((1-z)P_3 + x r_1)], \quad (11)$$

$$F_3(z) = \frac{dz}{dt} = z(z-1)[\alpha(L_2 + P_3) - \theta C_3 +$$

$$y((1-\alpha)P_3 + (x-1)C_3 + r_2)]. \quad (12)$$

由于 $x, y, z \in [0, 1]$, $1-x, 1-y, 1-z$ 均为非负数, 不影响策略演化的均衡, 因此可以将式 (10) ~ (12) 简化为

$$F_1(x) = \frac{dx}{dt} = x[(1-z)((y-1)P_1 + yr_1 + C_1 - P_1 + \alpha y(P_2 - r_1))], \quad (13)$$

$$F_2(y) = \frac{dy}{dt} = y[C_2 - P_1 + \theta C_3 + z(r_2 - \alpha x r_1) + (\alpha-1)((1-z)P_3 + x r_1)], \quad (14)$$

$$F_3(z) = \frac{dz}{dt} = z[\alpha(L_2 + P_3) - \theta C_3 + y((1-\alpha)P_3 + (x-1)C_3 + r_2)]. \quad (15)$$

2 随机演化博弈模型构建

2.1 三方扰动影响

现实中, 政府、企业和矿工在博弈过程中具有不确定性。三方主体追求自身利益, 他们的行为不可避免地受到许多具有随机性外部因素的影响。矿工在井下恶劣环境下, 情绪等心理因素对安全生产造成的影响会被放大^[13]。为此, 本文将高斯白噪声引入三方演化博弈的复制动态方程 (式 (16) ~ (18)) 中, 具体如下:

$$dx(t) = [\alpha y(P_2 - r_1) + yr_1 + C_1 - P_1 + (1-z) \cdot ((y-1)P_1)]x(t)dt + \sigma x(t)d\omega(t), \quad (16)$$

$$dy(t) = [C_2 - P_1 + \theta C_3 + z(r_2 - \alpha x r_1) + (\alpha-1)((1-z)P_3 + x r_1)]y(t)dt + \sigma y(t)d\omega(t), \quad (17)$$

$$dz(t) = [\alpha(L_2 + P_3) - \theta C_3 + y((1-\alpha)P_3 + (x-1)C_3 + r_2)]z(t)dt + \sigma z(t)d\omega(t). \quad (18)$$

式 (16) ~ (18) 中: $\omega(t)$ 为一维的标准 Brown 运动, Brown 运动描述了随机干扰在演化过程中对参与主体的影响^[14]; $d\omega(t)$ 为高斯白噪声; σ 为随机扰动强度, 其增量: $\Delta\omega(t) = \omega(t+h) - \omega(t)$ 服从正态分布 $N(0, \sqrt{h})$ 。

式 (16) ~ (18) 表示一维的随机微分方程^[15], 分别表示政府、煤矿企业和矿工受到随机扰动的演化动态方程。

2.2 均衡解稳定性分析

假设 $t=0$ 为三方演化策略的初始时刻, 此时 $x(0)=0, y(0)=0, z(0)=0$, 即有

$$[(1-z)((y-1)P_1 + yr_1 + C_1 - P_1 + \alpha y(P_2 - r_1))] \cdot 0 + \sigma x(t)d\omega(t) = 0, \quad (19)$$

$$\begin{aligned} & [C_2 - P_1 + \theta C_3 + z(r_2 - \alpha x r_1) + (\alpha - 1) \cdot \\ & ((1-z)P_3 + x r_1)] \cdot 0 + \sigma y(t) d\omega(t) = 0, \quad (20) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & [\alpha(L_2 + P_3) - \theta C_3 + y((1-\alpha)P_3 + \\ & (x-1)C_3 + r_2)] \cdot 0 + \sigma z(t) d\omega(t) = 0. \quad (21) \end{aligned}$$

由式(19)~(21)知, $d\omega(t)|_{t=0} = \omega'(t)dt|_{t=0} = 0$ 方程存在零解。在没有外界环境随机干扰下, 零解是方程的均衡解。判定式(16)~(18)稳定性的方法为随机微分方程稳定性判别定理。首先给定一个随机微分方程^[16]:

$$dx(t) = f(t, x(t))dt + g(t, x(t))d\omega(t), x(t_0) = x_0.$$

假设 $x(t) = x(t, x_0)$ 为 $dx(t)$ 的解, 并且 $x(t)$ 、 $f(t, x)$ 、 $g(t, x)$ 为标量。假设存在一个正的连续函数 $V(t, x)$ 和正常数 c_1 、 c_2 , 使得

$$c_1|x|^p \leq V(t, x) \leq c_2|x|^p, t \geq 0. \quad (22)$$

当存在正常数 γ , 使得 $LV(t, x) \leq -\gamma V(t, x), t \geq 0$, 则方程(12)的零解 p 阶矩的指数稳定且

$$E|x(t, x_0)|^p < (c_2/c_1)|x_0|^p e^{-\gamma t}, t \geq 0. \quad (23)$$

在式(16)~(18)中, 令 $V(t, x) = x(t)$, $V(t, y) = y(t)$, $V(t, z) = z(t)$, $x, y, z \in [0, 1]$, $c_1 = c_2 = 1, p = 1, \gamma = 0$, 可得:

$$\begin{aligned} LV(t, x) = f(t, x) = & x[\alpha y(P_2 - r_1) + \\ & y r_1 + C_1 - P_1 + (1-z)((y-1)P_1)], \quad (24) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} LV(t, y) = f(t, y) = & y[C_2 - P_1 + \theta C_3 + \\ & z(r_2 - \alpha x r_1) + (\alpha - 1)((1-z)P_3 + x r_1)], \quad (25) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} LV(t, z) = f(t, z) = & z[\alpha(L_2 + P_3) - \theta C_3 + \\ & y((1-\alpha)P_3 + (x-1)C_3 + r_2)]. \quad (26) \end{aligned}$$

若零解矩指数稳定, 则须满足

$$\begin{aligned} & x\{\alpha y(P_2 - r_1) + y r_1 + C_1 - P_1 + \\ & (1-z)[(y-1)P_1]\} \leq -x, \quad (27) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & y\{C_2 - P_1 + \theta C_3 + z(r_2 - \alpha x r_1) + \\ & (\alpha - 1)[(1-z)P_3 + x r_1]\} \leq -y, \quad (28) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & z[\alpha(L_2 + P_3) - \theta C_3 + y((1-\alpha)P_3 + \\ & (x-1)C_3 + r_2)] \leq -z. \quad (29) \end{aligned}$$

当 $z \geq \frac{y r_1 + C_1 - P_1 + 1}{(y-1)P_1 + \alpha y(P_2 - r_1)} + 1$, 且 $(y-1)P_1 + \alpha y(P_2 - r_1) \neq 0$ 时, 方程(16)的零解矩指数稳定。

$$\text{当 } x \leq \frac{P_3(\alpha - 1)(1 - z) - (1 + \theta)C_3 + P_1 - z r_2 - 1}{r_1[\alpha(1 - z) - 1]}, \text{ 且}$$

$r_1[\alpha(1 - z) - 1] > 0$ 时, 方程(17)的零解矩指数稳定。

当 $y \leq \frac{\alpha(L_2 + P_3) - \theta C_3 - 1}{(x-1)C_3 + (1-\alpha)P_3 + r_2}$, 且 $(x-1)C_3 + (1-\alpha)P_3 + r_2 < 0$ 时, 方程(18)的零解矩指数稳定。

由于式(16)~(18)表示一维的随机微分方程不能直接求解, 结合最新的差分方法计算来提高预测精度的方法, 提供了理论支撑^[17]。参考 Zhu C. P. 等^[18]的做法, 现采用 Milstein 方法对方程进行求解, 将随机微分方程用泰勒展开式展开。令 $t \in [t_0, T]$, $h = (T - t_0)/N$, $t_n = t_0 + nh$, 则式(16)的随机泰勒展开式为

$$\begin{aligned} x(t_{n+1}) = & x(t_n) + I_0 f(x(t_n)) + I_1 g(x(t_n)) + \\ & I_2 L^1 g(x(t_n)) + I_3 L^1 f(x(t_n)) + R. \quad (30) \end{aligned}$$

式中: R 为剩余项; $I_0 = h$; $I_1 = \Delta\omega_n$; $I_2 = \frac{1}{2}[(\Delta\omega_n)^2 - h]$;

$$I_3 = \frac{1}{2}h^2; L^1 = g(x) \frac{\partial}{\partial x}; L^1 = f(x) \frac{\partial}{\partial x} + \frac{1}{2}g^2(x) \frac{\partial^2}{\partial x^2}.$$

继而推出:

$$\begin{aligned} x(t_{n+1}) = & x(t_n) + hf(x(t_n)) + \Delta\omega_n g(x(t_n)) + \frac{1}{2}[(\Delta\omega_n)^2 - h] \cdot \\ & g'(x(t_n))g(x(t_n)) + \frac{1}{2}h^2[f(x(t_n))f'(x(t_n)) + \\ & \frac{1}{2}g^2(x(t_n))f''(x(t_n))] + R. \quad (31) \end{aligned}$$

因此, 政府、企业和矿工的泰勒展开式为

$$\begin{aligned} x(t_{n+1}) = & x(t_n) + h[(1-z)((y-1)P_1 + y r_1 + C_1 - P_1 + \alpha y \cdot \\ & (P_2 - r_1))]x(t_n) + \Delta\omega_n \sigma x(t_n) + \frac{1}{2}[(\Delta\omega_n)^2 - h] \cdot \\ & \sigma^2 x(t_n) + \frac{1}{2}h^2[(1-z)((y-1)P_1 + y r_1 + C_1 - \\ & P_1 + \alpha y(P_2 - r_1))]^2 x(t_n) + R. \quad (32) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y(t_{n+1}) = & y(t_n) + h[C_2 - P_1 + \theta C_3 + z(r_2 - \alpha x r_1) + (\alpha - 1) \cdot \\ & ((1-z)P_3 + x r_1)]y(t_n) + \Delta\omega_n \sigma y(t_n) + \frac{1}{2}[(\Delta\omega_n)^2 - h] \cdot \\ & \sigma^2 y(t_n) + \frac{1}{2}h^2[C_2 - P_1 + \theta C_3 + z(r_2 - \alpha x r_1) + \\ & (\alpha - 1)((1-z)P_3 + x r_1)]^2 y(t_n) + R. \quad (33) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} z(t_{n+1}) = & z(t_n) + h[\alpha(L_2 + P_3) - \theta C_3 + y((1-\alpha)P_3 + \\ & (x-1)C_3 + r_2)]z(t_n) + \Delta\omega_n \sigma z(t_n) + \frac{1}{2}[(\Delta\omega_n)^2 - \\ & h] \sigma^2 z(t_n) + \frac{1}{2}h^2[\alpha(L_2 + P_3) - \theta C_3 + y((1-\alpha)P_3 + \\ & (x-1)C_3 + r_2)]^2 z(t_n) + R. \quad (34) \end{aligned}$$

式(16)~(18)基于 Milstein 方法可以表示为式(32)~(34)。

3 数值模拟

对式(16)~(18)运用 Matlab 进行仿真模拟,分析了相关参数对演化过程的影响,通过数据分析确定了各参数的初始值: $x=y=z=0.5$, $C_1=0.6$, $C_2=0.3$, $C_3=0.2$, $L_2=0.3$, $P_1=0.3$, $P_2=0.25$, $P_3=0.1$, $r_1=0.2$, $r_2=0.1$, $s=0.3$, $\alpha=0.05$, $\theta=0.2$, $\sigma=0.5$ 。

3.1 扰动强度影响分析

将随机扰动强度设置为 $\sigma=0, 0.5, 1.0, 2.0$, 分别为无干扰、低随机干扰、中间随机干扰和高随机干扰, 所得结果如图 1 所示, 可知在不同的随机扰动情况下, 三方博弈主体的演化策略行为呈现出明显差异。当随机扰动从零到非零时, 政府和矿工系统稳定策略发生改变, 在无干扰情况下, 三方参与者趋向于(监管、

不管理、安全生产)。由图 1a 可知, 当 $\sigma=0$ 时, 政府最终倾向选择监管策略, 当加入随机扰动后政府的策略选择为不监管, 环境干扰降低主体安全生产的积极性。随机干扰从低到高时, 系统的收敛速度要快得多。当无随机干扰时, 系统较快达到安全监管的稳定状态。随机干扰较低时, 参与者需要较长时间才能达到平衡状态。随着干扰增加, 所有参与者随之呈现明显波动。当随机干扰增大时, 演化博弈系统稳定加快, 最终三方参与者趋向于(不监管、不管理、违规生产)。在高干扰下, 各方行为易偏离安全生产。为应对煤矿环境复杂与不确定, 政府、企业、矿工三方应聚焦安全。政府需强化导向与监管, 在随机干扰产生消极影响时, 引导监督企业和矿工安全生产, 削弱干扰对决策的影响。

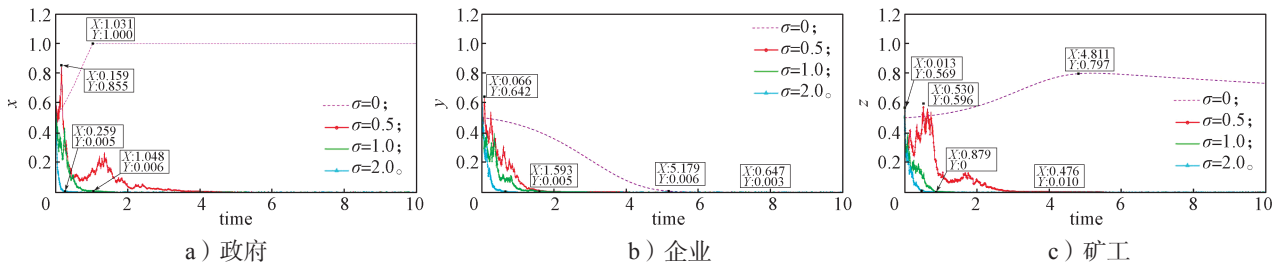


图 1 随机扰动强度对三方主体演化影响仿真图

Fig. 1 Stochastic disturbance intensity tripartite subject evolutionary effects

3.2 政府奖惩影响分析

为分析政府奖惩机制对企业和矿工在演化过程的影响, 在参与者初始意愿模糊 ($x(0)=0.5$, $y(0)=0.5$, $z(0)=0.5$) 的情况下, 分别对 P_1 、 r_1 赋值, 对系统进行有随机干扰、无随机干扰模拟, 系统演化路径图如图 2、图 3 所示, 左图为无干扰, 右图为有干扰。

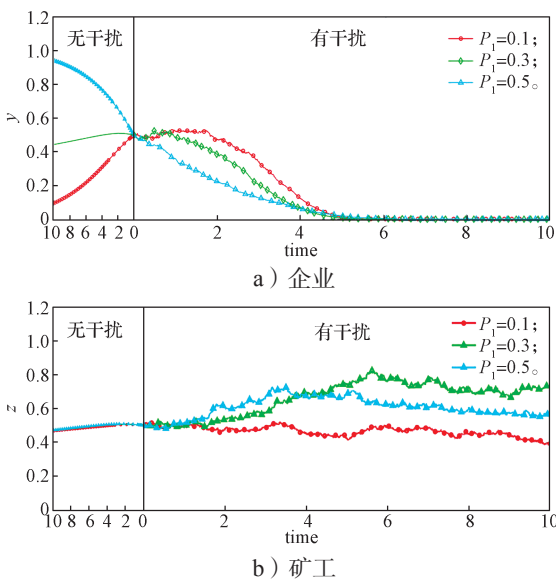


图 2 政府惩罚演化仿真图

Fig. 2 Simulation diagram of government punishment policy evolution

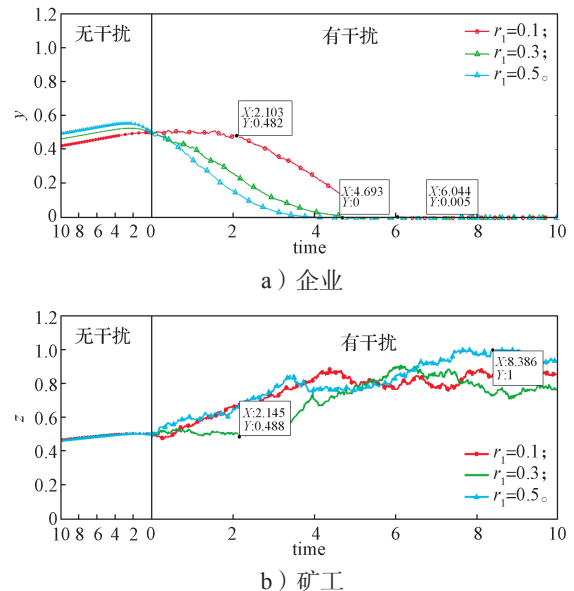


图 3 政府奖励演化仿真图

Fig. 3 Evolutionary impact of government incentives

如图 2a 所示, 在右图中, 当 $P_1=0.1$ 时, 企业安全管理概率 (y) 达最高值 0.53, 随后曲线缓慢下降至 0; 当 $P_1=0.5$ 时, 在 $t=5.31$ 时刻首先降为 0 并达到稳定。在惩罚措施影响下, 企业最终趋向于不管理, 且惩罚程度加速, 企业演化曲线趋于稳定。高惩罚关乎企业经营损益, 促使企业为降低成本更倾向于不进行

安全管理。政府采用适中的惩罚措施, 可提升企业安全管理意愿。在左图中, 当没有环境因素影响时, 企业安全管理概率与惩罚程度成正比。由图 3a 左图可知, 在无随机干扰下, 企业安全管理受奖励影响较小。对比右图可知, 当 $r_1=0.1$ 时, 企业安全管理概率达最高值 0.48, 随后曲线下降至 0。当 $r_1=0.5$ 时, 在 $t=4.69$ 时首先降至 0, 并达到稳定。在随机干扰下, 政府奖励对企业和矿工策略选择影响不同。企业总体趋向于不开展安全管理, 奖励强度不改变企业策略, 仅影响稳定速率。奖励提高会削弱企业安全管理意愿, 高强度奖励易致企业懈怠、管理不到位。

由图 2b 左图可知, 矿工几乎不受政府惩罚的影响, 在没有随机干扰下, 政府奖惩制度并不直接作用于矿工主体。对比之下, 右图, 当 $P_1=0.1$ 时, 矿工安全生产概率 (z) 降至最低值, 为 0.42; $P_1=0.3$ 时, 在 $t=5.61$ 时 z 达最高值, 为 0.83。如图 3b 右图, 曲线整体不稳定, 当 $r_1=0.3$ 时, 矿工安全生产概率降至最低值, 为 0.49, 此时矿工选择不明确; 当 $r_1=0.5$ 时, 在 $t=8.39$ 时, $z=1$, 此时矿工安全生产。对于矿工, 政府对企业的奖惩使其策略选择长期波动, 难以稳定, 且奖励激励效果优于惩罚。矿工决策受自身利益主导, 企业会将政府奖惩压力转嫁至矿工。

3.3 企业奖惩影响分析

为分析企业奖惩机制对企业和矿工在演化过程的影响, 分别对 P_3 、 r_3 赋值, 对系统进行有无随机干扰模拟, 系统演化路径如图 4 和 5 所示, 左图为无干扰, 右图为有干扰。

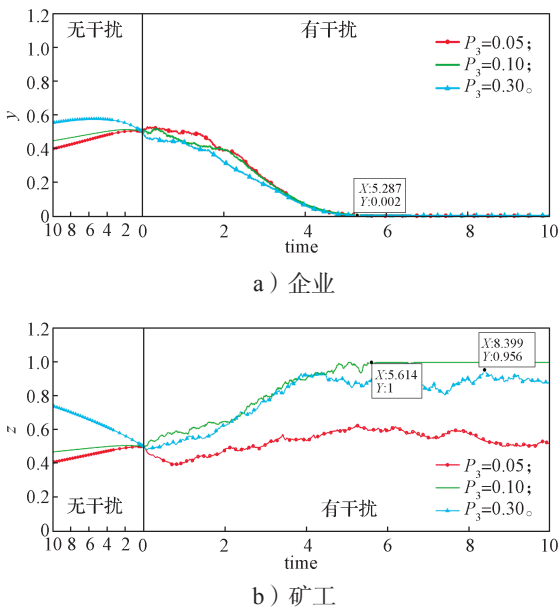


图 4 企业惩罚演化仿真图

Fig. 4 Simulation diagram of corporate punishment system evolution

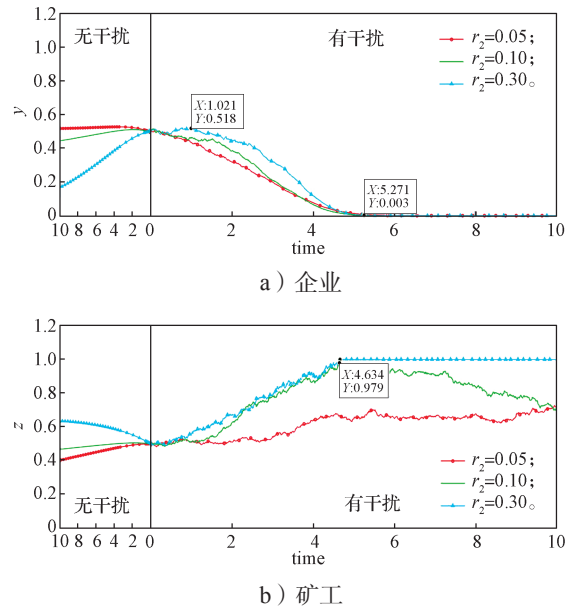


图 5 企业奖励演化仿真图

Fig. 5 Simulation diagram of enterprise reward system evolution

由图 4a 左图可知, 无干扰下, 企业管理程度与惩罚正相关, 与奖励负相关。由图 4a 右图可知, 曲线整体波动较小, 在 $t=5.28$ 时达到稳定, 此时企业不进行安全管理。如图 5a 右, 当 $r_3=0.30$ 时, y 值达到最高点, 为 0.48, 此时企业的策略选择是模糊的。煤矿企业虽为矿工奖惩发起人和受益人, 但其自身策略选择不受奖惩程度显著影响。因逐利性, 企业将矿工奖惩与收支挂钩, 高奖励或高惩罚下, 企业都会降低安全管理概率。企业层面需强化责任, 健全机构, 落实安全原则, 加强设施建设管理, 提升矿工安全意识并开展定期培训。

由图 5b 左图可知, 无随机干扰下, 矿工安全水平随奖励和惩罚的增加而提高。由右图可知当 $r_2=0.10$ 时, z 值在 $t=4.63$ 时刻后达到最高值; 当 $r_2=0.3$ 时, z 值在 $t=4.65$ 时刻后达到稳定, 矿工倾向于选择安全生产。在低奖励下 ($r_2=0.05$), 矿工安全生产概率约为 0.5, 说明此时矿工的选择是模糊的。当奖励增加到 0.1 时, 矿工较快达到安全生产的稳定状态, 但短时间后又会产生波动。当奖励增至 0.3 时, 矿工达到安全生产的概率较慢, 但稳定状态的时间较长。随着奖励增加, 矿工倾向于安全生产, 在实际生产时, 应适当提高矿工奖励力度, 使其转化为矿工安全生产的内驱动力。

由图 4b 右图可知, 当 $P_3=0.1$ 时, z 值在 $t=5.61$ 时达到稳定, 在这段时间内矿工选择安全生产; 当 $P_3=0.3$ 时, z 值在 $t=8.40$ 时刻达到最高值, 为 0.96, 此时矿工安全生产概率较高。在合理范围内, 惩罚

越高,矿工越不会选择违规生产。但是过高的惩罚反而使矿工策略选择产生波动,无法达到稳定状态。在低惩罚时($P_3=0.05$),矿工选择安全生产的概率始终在0.5左右波动。矿工对自身收支更为敏感,奖惩均可促使其参与安全生产。企业应优化奖惩机制,提升矿工违法成本以增加安全生产概率。政府需加强对煤矿企业信息掌握,保障煤矿安全博弈的稳定与持续。要完善矿工奖惩机制,企业需提高安全生产奖励、提高违法成本,降低违规概率。找准合适奖惩比例,将外力转化为矿工安全生产内驱力,激发企业安全管理积极性并强化其违规敬畏心。

4 结论

本文通过引入高斯白噪声,构建了政府、企业和矿工参与安全监管随机演化博弈模型,并使用Matlab对该模型进行仿真模拟。研究发现:

1) 随机干扰降低了参与者的积极性,不利于主体安全生产。通过有无干扰对比,随机干扰并不总是对系统演化产生负面影响,在该模型中干扰促进了演化博弈系统的演进,使系统更快达到稳定状态。

2) 各参与者的策略选择对不同的奖惩激励不同,奖惩机制的改变对企业策略选择的影响并不明显。

3) 矿工的策略选择对奖惩机制更为敏感,在设计 and 实施奖罚政策时,要更多考虑矿工,才能更大激发奖罚的效果。

参考文献:

- [1] 煤矿安全网. 2023年煤矿全年事故汇总 [EB/OL]. (2023-12-27). <https://www.mkaq.org/html/2023/12/27/676496.shtml>.
Coal Mine Safety Net. Summary of Coal Mine Accidents Throughout the Year 2023 [EB/OL]. (2023-12-27). <https://www.mkaq.org/html/2023/12/27/676496.shtml>.
- [2] 杨雪, 田阳, 柴瑞瑞, 等. 基于Moran过程的矿工违章行为惩罚机制分析 [J]. 系统工程学报, 2023, 38(4): 474-486.
YANG Xue, TIAN Yang, CHAI Ruirui, et al. Punishment Mechanism for Miners' Violation Behaviors Based on Moran Process [J]. Journal of Systems Engineering, 2023, 38(4): 474-486.
- [3] 杨晓娟, 何耀宇. 基于前景理论的煤矿工人安全行为演化博弈 [J]. 华北科技学院学报, 2023, 20(6): 61-68.
YANG Xiaojuan, HE Yaoyu. Evolutionary Game of Coal Miners' Safety Behavior Based on Prospect Theory [J]. Journal of North China Institute of Science and Technology, 2023, 20(6): 61-68.
- [4] LIU Q L, LI X C, MENG X F. Effectiveness Research on the Multi-Player Evolutionary Game of Coal-Mine Safety Regulation in China Based on System Dynamics [J]. Safety Science, 2019, 111: 224-233.
- [5] 王莉, 杨帅, 张诚刚, 等. 激励策略对矿工群体主动安全行为的影响 SD 仿真研究 [J]. 煤矿安全, 2023, 54(6): 255-259.
WANG Li, YANG Shuai, ZHANG Chenggang, et al. SD Simulation Study on Influence of Incentive Strategy on Active Safety Behavior of Miner Groups [J]. Safety in Coal Mines, 2023, 54(6): 255-259.
- [6] YU K, ZHOU L J, CAO Q G, et al. Evolutionary Game Research on Symmetry of Workers' Behavior in Coal Mine Enterprises [J]. Symmetry, 2019, 11(2): 156.
- [7] ZHANG Y, WANG S X, YAO J T, et al. The Impact of Behavior Safety Management System on Coal Mine Work Safety: A System Dynamics Model of Quadripartite Evolutionary Game [J]. Resources Policy, 2023, 82: 103497.
- [8] XU Y, YU B H, WANG Y T, et al. A Stochastic Evolutionary Game Perspective on the Stability of Strategic Alliances Against External Opportunism [J]. Journal of Systems Science and Complexity, 2015, 28(4): 978-996.
- [9] SHAN S N, ZHANG Z C, JI W Y, et al. Analysis of Collaborative Urban Public Crisis Governance in Complex System: A Multi-Agent Stochastic Evolutionary Game Approach [J]. Sustainable Cities and Society, 2023, 91: 104418.
- [10] 李军强, 任浩, 甄杰. 基于随机演化博弈的企业研发操纵多重监管路径研究 [J]. 中国管理科学, 2021, 29(10): 191-201.
LI Junqiang, REN Hao, ZHEN Jie. Stochastic Evolutionary Game Analysis of Multiple Supervision Paths of Enterprise R & D Manipulation [J]. Chinese Journal of Management Science, 2021, 29(10): 191-201.
- [11] SÎRGIHI N, NEAMȚU M. Dynamics of Deterministic and Stochastic Evolutionary Games with Multiple Delays [J]. International Journal of Bifurcation and Chaos, 2013, 23(7): 1350122.
- [12] 事故调查和统计司. 国家矿山安全监察局公布2021年全国矿山事故十大典型案例 [EB/OL]. (2022-01-20). https://www.chinamine-safety.gov.cn/xw/mkaqjcxw/202201/t20220120_407003.shtml.
Accident Investigation and Statistics Division. State Mine Safety Supervision Bureau Announced the Top 10 Typical Cases of National Mine Accidents in 2021 [EB/OL]. (2022-01-20). https://www.chinamine-safety.gov.cn/xw/mkaqjcxw/202201/t20220120_407003.shtml.