

中文引用格式:任利鹏,佟瑞鹏. 智能化煤矿安全风险多主体动态治理演化博弈研究[J]. 中国安全科学学报,2026,36(2):253-261.

英文引用格式:REN Lipeng, TONG Ruipeng. Evolutionary game research on multi-body dynamic governance of intelligent coal mine safety risks [J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(2): 253-261.

智能化煤矿安全风险多主体动态治理 演化博弈研究*

任利鹏¹, 佟瑞鹏^{**2}教授

(1 中国矿业大学(北京)文法学院, 北京 100083;

2 中国矿业大学(北京)应急管理与安全工程学院, 北京 100083)

中图分类号:X936

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.02.0247

基金项目:国家自然科学基金资助(52074302)。

【摘要】 为改善煤矿灾害事故多发的现状,分析智能化煤矿安全风险动态治理中各方主体的博弈行为,构建以政府、煤矿企业与矿工为主体的三方演化博弈模型,分析三方主体之间的演化博弈稳定性,利用演化博弈情境仿真模拟智能化煤矿安全风险治理情境,揭示政府监管力度、收益分摊比例系数等因素对博弈主体策略的影响过程。结果表明:政府部门在监管企业安全风险治理过程中,适当地运用奖惩机制提升企业对安全风险治理的重视程度,有助于节约政府监管成本,扩大政企协同收益;高治理成本会降低企业治理积极性、催生企业的投机行为,需采取激励机制与成本共担策略,减轻企业安全风险治理负担;激励矿工参与治理,降低其参与成本,有助于企业快速识别潜在安全风险,防止灾害事故的发生。

【关键词】 智能化煤矿; 煤矿安全风险; 动态治理; 演化博弈; 情境仿真

Evolutionary game research on multi-body dynamic governance of intelligent coal mine safety risks

REN Lipeng¹, TONG Ruipeng²

(1 School of Law and Humanities, China University of Mining and Technology-Beijing,

Beijing 100083, China; 2 School of Emergency Management and Safety Engineering,

China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: To improve the current situation of frequent disasters and accidents in coal mines, the game behaviors among various stakeholders in the dynamic governance of intelligent coal mine safety risks were investigated. A tripartite evolutionary game model was constructed involving the government, coal mine enterprises, and miners, to analyze the evolutionary stability among the three parties. Additionally, evolutionary game scenario simulations were employed to mimic the actual context of intelligent coal mine safety risk governance. Through this, the influence processes of factors such as governmental regulatory

* 文章编号:1003-3033(2026)02-0253-09; 收稿日期:2025-09-05; 修稿日期:2025-12-08

** 通信作者:佟瑞鹏(1977—),男,黑龙江穆棱人,博士,教授,主要从事行为安全管理、职业心理健康、环境风险评估等方面的研究。
E-mail: tongrp@cumt.edu.cn.

intensity and benefit-sharing ratio on the strategies of the gaming participants were revealed. The results indicate that governments should appropriately apply reward and punishment mechanisms during the regulation of enterprise safety governance. This approach can enhance corporate attention to safety risk management, reduce regulatory costs, and promote synergistic benefits between government and enterprises. High governance costs tend to reduce corporate enthusiasm for compliance and may encourage opportunistic behavior; therefore, incentive mechanisms and cost-sharing strategies are necessary to alleviate the burden on enterprises. Encouraging miner participation and reducing their involvement costs contribute to faster identification of potential safety risks and help prevent accidents.

Keywords: intelligent coal mine; coal mine safety risk; dynamic governance; evolutionary game; scenario simulation

0 引言

煤矿安全风险防控不足易引发安全事故,进而制约煤矿行业的可持续发展,威胁我国能源安全。党的二十大以来,我国政府高度重视智能化煤矿安全生产工作,先后发布《煤矿智能化标准体系建设指南》《关于进一步加快煤矿智能化建设促进煤炭高质量发展的通知》等^[1-2],形成新时代中国特色智能化煤矿安全风险治理模式。相较于传统治理中存在的经验识别、响应滞后、缺乏精准管控等问题,智能化煤矿安全风险治理则具有智能驱动、主动防御、全局协同等显著特征。通过构建立体化智能风险感知网络,对瓦斯浓度、地应力等风险进行动态感知,同时,基于数据融合分析平台,多维度仿真推演煤矿灾害等重大风险,可实现对煤矿安全风险的动态治理。由此可见:智能化煤矿不仅能够提升煤矿安全风险防控效能,更通过智能化、无人化的作业模式降低高危场景下的人员暴露风险,为煤矿行业安全注入“智慧基因”。

国内外学者针对煤矿安全风险多主体动态治理展开了深入研究。在智能化治理方面,现有研究利用物联网和深度学习模型收集和预测隐患信息^[3],在此基础上,从人、机、环、管这4个方面建立起一个系统完备的安全管理信息系统,实现对煤矿安全风险隐患的闭环管理^[4]。在动态治理模式方面,基于灾害成因理论与全生命周期理论,将煤矿安全风险治理划分为风险形成、风险发展和风险衰退3个环节,并根据各环节的风险性质采用相应的治理手段,从而构建数据的“感知-分析-服务”一体化煤矿安全风险动态治理框架^[5]。在治理主体方面,煤矿企业是煤矿安全风险治理的责任主体,应当承担煤矿安全风险治理的主体责任。同时,在动态惩罚机制下,政府监管的强度决定煤矿企业的安全行为策

略^[6]。此外,煤矿企业的行为策略在一定程度上影响矿工的安全行为选择策略^[7]。由此可见:在风险治理过程中,政府、煤矿企业、矿工各主体的行为策略互相影响,最终达到稳定状态,而演化博弈则是分析多方主体在博弈对抗过程中不断调整策略以达到稳定状态的有效方法。目前,已有学者将演化博弈运用到煤矿安全风险治理问题中,研究政府、煤矿企业、矿工在安全生产中的监管策略^[8]、决策行为^[9]。可以看出,现有研究主要分析传统煤矿中的安全风险治理问题以及各主体的安全风险治理行为演化策略。然而,较少研究智能化煤矿中多主体安全风险治理问题,忽视了各主体在不同风险发展阶段的动态演化博弈行为策略。

鉴于此,笔者拟构建政府、煤矿企业、矿工三方演化博弈模型,并通过仿真分析智能化煤矿在不同的安全风险发展阶段下治理主体的稳定策略,以及影响安全风险治理效果的关键因素,进而提出煤矿安全风险动态治理策略,以期提升智能化煤矿安全风险治理水平。

1 安全风险治理三方演化博弈模型

1.1 演化博弈关系描述

智能化煤矿安全风险治理是一个动态的演化过程,不同风险发展阶段的治理方式也不同^[10]。要从根本上降低煤矿安全风险,预防和控制煤矿安全事故的发生,需要改变传统的煤矿安全风险治理模式,充分利用智能化技术进行煤矿安全风险治理,通过建立智能化煤矿安全风险管控系统,利用大数据捕捉风险信息,深入分析煤矿安全风险在各发展阶段的具体特征,据此探寻出治理煤矿安全风险的有效路径^[11]。基于生命周期理论及智能化煤矿安全风险隐蔽性、动态性、复杂性等特征阶段划分风险,并采取合适的风险治理手段。基于此,将智能化煤矿

安全风险划分为风险潜伏期、风险发展期、风险消退期 3 个阶段,并根据煤矿事故发生机理及智能化煤矿智能监测、智能预测、智能决策等功能属性,将煤矿安全风险治理分为风险识别与评估、风险应对、风险监控与防范 3 个阶段,推动煤矿安全风险动态治理。

在智能化煤矿安全风险动态治理中,主要存在政府、煤矿企业、矿工三方主体,政府部门可以通过智能化监管手段引导企业进行积极治理,激励矿工举报安全风险行为。然而,煤矿企业为了追求经济效益则会降低对智能化煤矿安全风险治理的投入,转而采用投入成本最低的消极治理策略,而矿工在安全风险治理中由于个人利益和外部压力等因素存在违规操作等消极参与的现象。因此,需要建立一个相对完善的安全风险动态治理机制,确保各主体在不同的风险发展阶段相互监督、合作,从而推动实现煤矿安全风险动态治理。图 1 为煤矿安全风险多元主体动态治理相关关系。

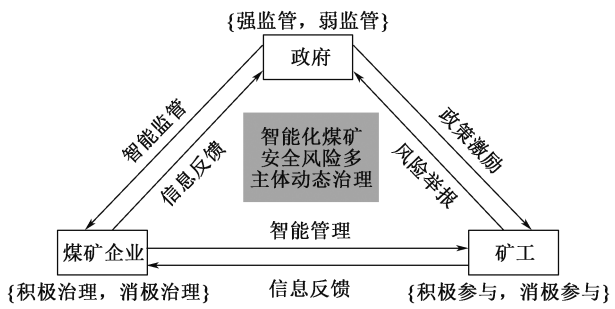


图 1 智能化煤矿安全风险多主体动态治理相关关系
Fig. 1 Dynamic multi-agent governance relationships of safety risks in intelligent coal mines

1.2 安全风险治理演化模型假设

假设①:智能化煤矿安全风险隐蔽性、动态性、复杂性等特征决定了智能化煤矿安全风险治理的博弈主体不仅是政府 G 的责任,还需要煤矿企业 E 、矿工 M 这些利益主体的共同参与,三方主体均为有限理性者,且三者信息并不完全对称,为实现主体利益最大化而进行策略选择。

假设②:在智能化煤矿安全风险治理的过程中,政府的策略集为(强监管,弱监管),其选择策略概率为 x , $(1-x)$ 且 $x \in [0,1]$;煤矿企业的策略集为(积极治理,消极治理),其选择策略概率为 y , $(1-y)$ 且 $y \in [0,1]$;矿工的策略集为(积极参与,消极参与),其选择策略概率为 z , $(1-z)$ 且 $z \in [0,1]$ 。

假设③:政府监管主体实现了由国家监管部门到各级地方监管部门垂直管理,为便于模型构建则

将其统一为“政府”博弈主体。政府为实现智能化监管,在实行强监管时建立和维护智能化煤矿安全监管平台所需付出的成本 G_3 。与此同时,政府提供智能化煤矿安全宣传教育所需付出成本 G_1 ,以及政府对使用智能化煤矿进行安全风险治理提供的优惠政策及其执行成本 G_2 ,然而政府在强监管智能化煤矿时也能获得相应收益 C_1 。政企协同下政府与企业双方的额外收益 C_2 ,其中政府的额外收益 bC_2 , b 为政企协同收益的分摊比例系数,以及政府对煤矿企业收取的罚金及补贴分别为 P 、 S , a 为煤矿企业受到政府强监管的概率。当政府选择弱监管时,其所获得的收益为 cC_1 , c 为政府选择弱监管时所获收益占强监管策略收益的比值。

假设④:煤矿企业采用大数据、人工智能技术进行智能化生产和监管,在治理过程中的日常经营成本为 E_1 ,煤矿企业在积极治理时购置智能设备并进行维护和系统升级等成本为 E_2 ,积极治理获得的收益主要包括:煤矿企业使用智能化技术进行安全风险治理带来的收益 D_2 ,且使用智能化设备获得的经济和安全收益远高于投入成本即 $D_2 > E_2$,日常经营收益 D_1 ,政企协同下企业的额外收益为 $(1-b)C_2$,获得优惠政策收益 eG_2 ,获得优惠政策的概率为 e 。煤矿企业消极使用智能设备而引发安全事故,其所付出的成本为 E_3 。

假设⑤:矿工身处生产一线,一旦发现安全隐患则会向煤矿企业安全监管部门汇报情况。矿工在积极参与学习智能设备操作与维护及新型安全知识技能需要付出的成本为 M_1 ,消极参与煤矿安全风险治理的参与成本为 M_2 ,且煤矿企业消极参与将面临更高的潜在损失即 $M_2 > M_1$ 。当政府进行强监管时,政府严格检查企业安全风险治理情况,矿工则需要投入更多的精力学习智能技术和安全技能,此时矿工的参与成本为 hM_1 ,其中, h 为矿工积极参与成本分摊比例系数。当政府进行弱监管时,矿工的参与成本随之降低为 $(1-h)M_1$ 。同时,矿工因积极参与保障智能化煤矿安全而获得安全绩效、奖金和职位晋升机会得到的收益为 F_1 。

1.3 博弈主体支付矩阵构建

根据上述关于智能化煤矿安全风险治理的理论分析和研究假设,可得出各博弈主体在煤矿安全风险治理中的策略选择支付矩阵,其中各列主体在不同情况下的博弈策略均按照政府、煤矿企业、矿工三方主体的收益顺序排列呈现,见表 1。

表 1 政府、煤矿企业与矿工的博弈支付矩阵

Table 1 Game payment matrix of government, coal mining enterprises and miners

矿工	煤矿企业	政府	
		强监管	弱监管
积极参与	积极治理	$C_1 + bC_2 - G_1 - G_2 - G_3 - aS$	cC_1
		$D_1 + D_2 + (1 - b)C_2 + aS - E_1 - E_2 + eG_2$	$D_1 + D_2 - E_1 - E_2$
		$F_1 - hM_1$	$F_1 - (1 - h)M_1$
	消极治理	$C_1 + bC_2 + aP - G_1 - G_2 - G_3$	cC_1
		$D_1 + D_2 - aP - E_1 - E_3$	$D_1 - E_1 - E_3$
		$- hM_1$	$- (1 - h)M_1$
消极参与	积极治理	$C_1 + bC_2 - G_1 - G_2 - G_3 - aS$	cC_1
		$D_1 + D_2 + (1 - b)C_2 + aS - E_1 - E_2 + eG_2$	$D_1 + D_2 - E_1 - E_2$
		$F_1 - M_2$	$F_1 - M_2$
	消极治理	$C_1 + bC_2 + aP - G_1 - G_2 - G_3$	cC_1
		$D_1 + D_2 - aP - E_1 - E_3$	$D_1 - E_1 - E_3$
		$- M_2$	$- M_2$

2 安全风险治理演化稳定策略分析

2.1 安全风险治理演化稳定策略分析

由表 1 可知:政府选择“强监管”策略的期望收益 V_{11} 和选择“弱监管”策略的期望收益 V_{12} 及平均期望收益 $\bar{V}_1$ 分别为:

$$\begin{aligned} V_{11} = & yz(C_1 + bC_2 - G_1 - G_2 - G_3 - aS) + \\ & z(1 - y)(C_1 + bC_2 + aP - G_1 - G_2 - G_3) + \\ & y(1 - z)(C_1 + bC_2 - G_1 - G_2 - G_3 - aS) + \\ & (1 - y)(1 - z)(C_1 + bC_2 + aP - G_1 - G_2 - G_3) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} V_{12} = & yzcC_1 + z(1 - y)cC_1 + y(1 - z)cC_1 + (1 - y) \\ & (1 - z)cC_1 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \bar{V}_1 = & xV_{11} + (1 - x)V_{12} = C_1c + C_1x - G_1x - G_2x \\ & - G_3x + C_2bx - C_1cx + Pax - Paxz - Saxz \end{aligned} \quad (3)$$

煤矿企业选择“积极治理”策略的期望收益 V_{21} 和选择“消极治理”策略的期望收益 V_{22} 及平均期望收益 $\bar{V}_2$ 分别为:

$$\begin{aligned} V_{21} = & xz(D_1 + D_2 + (1 - b)C_2 + aS - E_1 - E_2 + \\ & eG_2) + z(1 - x)(D_1 + D_2 - E_1 - E_2) + x(1 - z) \\ & (D_1 + D_2 + (1 - b)C_2 + aS - E_1 - E_2 + eG_2) + \\ & (1 - x)(1 - z)(D_1 + D_2 - E_1 - E_2) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} V_{22} = & xz(D_1 + D_2 - aP - E_1 - E_3) + z(1 - x) \\ & (D_1 - E_1 - E_3) + x(1 - z)(D_1 + D_2 - aP - \\ & E_1 - E_3) + (1 - x)(1 - z)(D_1 - E_1 - E_3) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \bar{V}_2 = & yV_{21} + (1 - y)V_{22} = D_1 - E_1 - E_3 + D_2x + \\ & D_2y - E_2y + E_3y - Pax + C_2xz - D_2xy + \end{aligned}$$

$$Paxy + Saxy - C_2bxy + G_2exy \quad (6)$$

矿工选择“积极参与”策略的期望收益 V_{31} 和选择“消极参与”策略的期望收益 V_{32} 及平均期望收益 $\bar{V}_3$ 分别为:

$$\begin{aligned} V_{31} = & xy(F_1 - hM_1) - x(1 - y)(hM_1) + y(1 - x) \\ & (F_1 - (1 - h)M_1) - (1 - x)(1 - y)(1 - h)M_1 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} V_{32} = & xy(F_1 - M_2) - x(1 - y)M_2 + y(1 - x) \\ & (F_1 - M_2) - (1 - x)(1 - y)M_2 \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \bar{V}_3 = & zV_{31} + (1 - z)V_{32} = F_1y - M_2 - M_1z + M_2z \\ & + M_1hz + M_1xz - 2M_1hxz \end{aligned} \quad (9)$$

在 Malthusian 方程及上述分析的基础上,用系统动力学方程表示博弈主体策略选择的复制动态变化^[12]。可以得出,政府演化博弈的复制动态方程为 $F(x)$;煤矿企业演化博弈的复制动态方程为 $F(y)$;矿工演化博弈的复制动态方程为 $F(z)$ 。分别为:

$$\begin{aligned} F(x) = & x(V_{11} - \bar{V}_1) = x(x - 1) \\ & (G_1 - C_1 + G_2 + G_3 - C_2b + \\ & C_1c - Pa + Pay + Say) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} F(y) = & y(V_{21} - \bar{V}_2) = y(1 - y) \\ & (D_2 - E_2 + E_3 + C_2x - D_2x - \\ & C_2bx + G_2ex + Pax + Sax) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} F(z) = & z(V_{31} - \bar{V}_3) = z(1 - z) \\ & (M_2 - M_1 + M_1h + M_1x - 2M_1hx) \end{aligned} \quad (12)$$

2.2 演化主体策略稳定性分析

2.2.1 政府策略稳定性分析

根据微分方程稳定性定理,政府选择强监管策

略的概率处于稳定状态时必须满足: $F(x) = 0$ 且

$\frac{dF(x)}{dx} < 0$ 。根据式(10)求导数可得:

$$\frac{dF(x)}{dx} = (2x - 1)(G_1 - C_1 + G_2 + G_3 - C_2b + C_1c - Pa + Pay + Say) \quad (13)$$

令式(13)中关于 y 的表达式为 $G(y)$, 即:

$G(y) = G_1 - C_1 + G_2 + G_3 - C_2b + C_1c - Pa + y(Pa + Sa)$, 由于 $\frac{\partial G(y)}{\partial y} = Pa + Sa > 0$, 因此, 当 $y = y^*$ 时政府不能确定稳定策略; 当 $y > y^*$ 时, $x = 0$ 时稳定, 即政府选择弱监管策略; 当 $y < y^*$ 时 $x = 1$ 时稳定, 即政府选择强监管策略。

2.2.2 煤矿企业策略稳定性分析

根据微分方程稳定性定理, 煤矿企业选择采用积极治理的概率处于稳定状态时必须满足以下条件:

$F(y) = 0$ 且 $\frac{dF(y)}{dy} < 0$ 。根据式(11)求导数可得:

$$\frac{dF(y)}{dy} = (1 - 2y)(D_2 - E_2 + E_3 + C_2x - D_2x - C_2bx + G_2ex + Pax + Sax) \quad (14)$$

令式(14)中关于 x 的表达式为 $H(x)$, 即:

$$H(x) = D_2 - E_2 + E_3 + C_2x - D_2x - C_2bx + G_2ex + Pax + Sax$$

由于 $\frac{\partial H(x)}{\partial x} = C_2 - D_2 - C_2b + G_2e + Pa + Sa$, 无

法确定该式正负, 因此对其分类讨论。若 $\frac{\partial H(x)}{\partial x} =$

$C_2 - D_2 - C_2b + G_2e + Pa + Sa > 0$, 当 $x = x^*$ 时, 无法确定稳定性策略; 当 $x > x^*$ 时 $y = 1$ 为稳定策略, 即煤矿企业使用智能化煤矿技术进行积极的安全风险治理; 当 $x < x^*$ 时 $y = 0$ 为稳定策略, 即煤矿企业

消极进行安全风险治理。若 $\frac{\partial H(x)}{\partial x} = C_2 - D_2 - C_2b + G_2e + Pa + Sa < 0$, 当 $x = x^*$ 时, 无法确定稳定性策略; 当 $x > x^*$ 时, $y = 0$ 为稳定策略, 即煤矿企业使用消极安全风险治理方式; 当 $x < x^*$ 时, $y = 1$ 为演化策略, 即煤矿企业支持使用智能化煤矿技术进行积极的安全风险治理。

2.2.3 矿工策略稳定性分析

根据微分方程稳定性定理, 矿工选择参与策略的概率处于稳定状态时必须满足: $F(z) = 0$ 且

$\frac{dF(z)}{dz} < 0$ 。根据式(12)求导数可得:

$$\frac{dF(z)}{dz} = (1 - 2z)(M_2 - M_1 + M_1h + M_1x - 2M_1hx) \quad (15)$$

令式(15)中关于 x 的表达式为 $Q(x)$, 即:

$Q(x) = M_2 - M_1 + M_1h + M_1x - 2M_1hx$, 由于

$\frac{\partial Q(x)}{\partial x} = M_1 - 2M_1h > 0$, 因此, 当 $x = x^*$ 时, 矿工不能确定稳定策略; 当 $x > x^*$ 时, $z = 1$ 时稳定, 即矿工选择积极参与策略; 当 $x < x^*$ 时, $z = 0$ 时稳定, 即矿工选择消极参与策略。

2.3 多主体演化博弈模型稳定性分析

在三方演化博弈的复制动态系统中, 令 $F(x) = 0, F(y) = 0, F(z) = 0$, 可得到 10 个系统均衡点见表 2。三方演化博弈的雅可比矩阵 J 为:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial F(x)}{\partial x} & \frac{\partial F(x)}{\partial y} & \frac{\partial F(x)}{\partial z} \\ \frac{\partial F(y)}{\partial x} & \frac{\partial F(y)}{\partial y} & \frac{\partial F(y)}{\partial z} \\ \frac{\partial F(z)}{\partial x} & \frac{\partial F(z)}{\partial y} & \frac{\partial F(z)}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (16)$$

其中,

$$\frac{\partial F(x)}{\partial x} = (2x - 1)(G_1 - C_1 + G_2 + G_3 - C_2b + C_1c - Pa + Pay + Say);$$

$$\frac{\partial F(x)}{\partial y} = ax(P + S)(x - 1); \quad \frac{\partial F(x)}{\partial z} = 0;$$

$$\frac{\partial F(y)}{\partial x} = y(1 - y)(C_2 - D_2 - C_2b + G_2e + Pa + Sa);$$

$$\frac{\partial F(y)}{\partial y} = (1 - 2y)(D_2 - E_2 + E_3 + C_2x - D_2x - C_2bx + G_2ex + Pax + Sax);$$

$$\frac{\partial F(y)}{\partial z} = 0; \quad \frac{\partial F(z)}{\partial x} =$$

$$M_1z(2h - 1)(z - 1); \quad \frac{\partial F(z)}{\partial y} = 0;$$

$$\frac{\partial F(z)}{\partial z} = (1 - 2z)(M_2 - M_1 +$$

$$M_1h + M_1x - 2M_1hx)$$

根据李雅普诺夫 (Lyapunov) 第一法则, 雅可比矩阵中的特征值均为负实部, 则演化策略稳定, 即三方主体的稳定策略 (Evolutionarily Stable Strategy, ESS)。将系统 J 的 8 个均衡点 $T_1 \sim T_8$ 代入式(16)

表 2 系统均衡点及特征值稳定性分析

Table 2 Stability analysis of system equilibrium points and eigenvalues

均衡点	雅可比矩阵特征值	正负	稳定条件	状态
$T_1(0,0,0)$	$C_1 - G_1 - G_2 - G_3 + C_2b - C_1c + Pa$	$(\pm, +, +)$	—	鞍点
	$D_2 - E_2 + E_3$			
	$M_2 - M_1 + M_1h$			
$T_2(1,0,0)$	$G_1 - C_1 + G_2 + G_3 - C_2b + C_1c - Pa$	$(\pm, \pm, +)$	—	鞍点
	$C_2 - E_2 + E_3 - C_2b + G_2e + Pa + Sa$			
	$M_2 - M_1h$			
$T_3(0,1,0)$	$C_1 - G_1 - G_2 - G_3 + C_2b - C_1c - Sa$	$(\pm, -, +)$	—	鞍点
	$E_2 - D_2 - E_3$			
	$M_2 - M_1 + M_1h$			
$T_4(0,0,1)$	$C_1 - G_1 - G_2 - G_3 + C_2b - C_1c + Pa$	$(\pm, +, -)$	—	鞍点
	$D_2 - E_2 + E_3$			
	$M_1 - M_2 - M_1h$			
$T_5(1,1,0)$	$G_1 - C_1 + G_2 + G_3 - C_2b + C_1c + Sa$	$(\pm, \pm, +)$	—	鞍点
	$E_2 - C_2 - E_3 + C_2b - G_2e - Pa - Sa$			
	$M_2 - M_1h$			
$T_6(1,0,1)$	$G_1 - C_1 + G_2 + G_3 - C_2b + C_1c - Pa$	$(\pm, \pm, -)$	$C_1 + C_2b + Pa > G_1 + G_2 + G_3 + C_1c$ $E_2 - C_2 - E_3 > G_2e + Pa + Sa - C_2b$ $M_2 > M_1$	ESS
	$C_2 - E_2 + E_3 - C_2b + G_2e + Pa + Sa$			
	$M_1h - M_2$			
$T_7(0,1,1)$	$C_1 - G_1 - G_2 - G_3 + C_2b - C_1c - Sa$	$(\pm, -, -)$	$G_1 + G_2 + G_3 + C_1c + Sa > C_1 + C_2b$ $D_2 > E_2 - E_3$ $M_2 > M_1$	ESS
	$E_2 - D_2 - E_3$			
	$M_1 - M_2 - M_1h$			
$T_8(1,1,1)$	$G_1 - C_1 + G_2 + G_3 - C_2b + C_1c + Sa$	$(\pm, \pm, -)$	$C_1 + C_2b > G_1 + G_2 + G_3 + C_1c + Sa$ $G_2e + Pa + Sa - C_2b > E_2 - C_2 - E_3$ $M_2 > M_1$	ESS
	$E_2 - C_2 - E_3 + C_2b - G_2e - Pa - Sa$			
	$M_1h - M_2$			

中,得到雅可比矩阵特征值(表 2),可知:系统 J 存在 3 个可能的稳定均衡点,即 $T_6(1,0,1)$, $T_7(0,1,1)$, $T_8(1,1,1)$ 。下面对均衡点展开讨论。

情况①:当 $C_1 + C_2b + Pa > G_1 + G_2 + G_3 + C_1c$, $E_2 - C_2 - E_3 > G_2e + Pa + Sa - C_2b$, $M_2 > M_1$ 时,复制动态系统在均衡点 $T_6(1,0,1)$ 处稳定,博弈组合策略为政府强监管,煤矿企业消极治理,矿工积极参与,其表示政府选择强监管策略所获得的效益远高于其成本,煤矿企业使用智能化煤矿技术进行积极安全风险治理的成本大于积极治理获得的收益,矿工消极参与煤矿安全风险治理而面临的潜在损失大于矿工积极参与成本。

情况②:当 $G_1 + G_2 + G_3 + C_1c + Sa > C_1 + C_2b$, $D_2 > E_2 - E_3$, $M_2 > M_1$ 时,复制动态系统在均衡点 $T_7(0,1,1)$ 处稳定,博弈组合策略为政府弱监管,煤矿企业积极治理,矿工积极参与。在这种情况下,政府强监管的成本大于其所获得的收益,煤矿企业使用智能化煤矿技术进行安全风险治理带来的安全收益大于煤矿企业积极投入安全风险治理的成本,矿工因选择消极参与策略面临的潜在损失远大于矿工积极参

与成本,所以即使在政府弱监管的情况下,矿工在煤矿企业安全风险治理的推动下,仍有较高的参与意愿。

情况③:当 $C_1 + C_2b > G_1 + G_2 + G_3 + C_1c + Sa$, $G_2e + Pa + Sa - C_2b > E_2 - C_2 - E_3$, $M_2 > M_1$ 时,复制动态系统在均衡点 $T_8(1,1,1)$ 处稳定,博弈组合策略为政府强监管,煤矿企业积极治理,矿工积极参与。政府强监管带来的安全收益和政企协同收益超过了政府监管的成本。煤矿企业在综合考虑政府智能化煤矿建设的相关政策、政企协同收益以及企业安全生产成本和智能化煤矿投资成本后,发现积极进行安全风险治理所获得的收益大于其成本。矿工选择积极参与安全风险治理的潜在损失大于其参与成本。

3 安全风险治理仿真分析

为验证上述演化博弈稳定性分析的有效性,展示参数变动如何影响演化系统稳定性,结合稳定性结果将参数赋值,利用 Matlab2024a 进行仿真,参考煤矿安全风险的不同发展阶段进行情境分析。

3.1 模型检验与情境仿真分析

为检验参数的初始设置值是否满足理想的演化

稳定状态,将初始设置值引入演化博弈模型中检验,运用 Matlab2024a 软件情境仿真演化过程。参照文献[13]的设置参数值,设置政府、煤矿企业与矿工均有 0.5 的概率进行策略选择,时间步长为 0.1。

3.1.1 风险潜伏期

参数取值如下: $a = 0.5, b = 0.4, c = 0.8, h = 0.6, e = 0.5, G_1 = 8, G_2 = 10, G_3 = 3, C_1 = 40, C_2 = 20, P = 5, E_1 = 12, E_2 = 8, E_3 = 20, D_1 = 15, D_2 = 10, S = 10, M_1 = 5, M_2 = 15, F_1 = 15$,其仿真分析与情况②一致,由于在煤矿安全风险潜伏阶段,安全风险尚未完全显现,政府部门并不能完全掌握煤矿企业的安全生产状况,导致政府和企业之间信息不对称,在这一时期,政府将更多的注意力集中在日常工作及重大突发事件的应急处置方面,对安全风险形成期的监管弱化。煤矿企业能够通过智能化系统检测、识别安全风险,在一定程度上实现了对煤矿安全的积极治理。而矿工作为煤矿安全风险智能化监测的具体操作者,为维护自己的安全利益,选择积极参与到煤矿安全风险治理。

3.1.2 风险发展期

参数取值如下: $a = 0.5, b = 0.5, c = 0.5, h = 0.5, e = 0.5, G_1 = 8, G_2 = 10, G_3 = 3, C_1 = 40, P = 15, C_2 = 30, E_1 = 12, E_2 = 8, E_3 = 20, D_1 = 15, D_2 = 10, S = 15, M_1 = 5, M_2 = 15, F_1 = 15$,其参数取值即初始值的仿真分析与情况③一致。在煤矿安全风险发展期,政府利用智能化煤矿监管系统强监管煤矿企业,对有重大生产安全事故隐患的企业挂牌督办,指导监督企业迅速排查煤矿安全风险隐患,进一步规范煤矿企业的安全生产行为。煤矿企业在政府强监管下推动智能化煤矿建设,加大投资建设力度,加快研发、使用智能监测控制系统等技术,评估安全风险对企业安全生产的影响程度并积极制定出相应的应对策略并定期向当地政府部门汇报安全风险防控情况,以减少安全风险将要造成的损失。而矿工在政府和煤矿企业的带领下积极配合参与智能化煤矿安全风险治理工作。

3.1.3 风险消退期

参数取值如下: $a = 0.5, b = 0.5, c = 0.5, h = 0.5, e = 0.5, G_1 = 4, G_2 = 3, G_3 = 2, C_1 = 12, C_2 = 6, P = 20, E_1 = 12, E_2 = 20, E_3 = 2, D_1 = 15, D_2 = 10, S = 6, M_1 = 5, M_2 = 15, F_1 = 15$,其仿真分析与情况①一致。在这一阶段中,煤矿安全风险治理进入一个相对稳定的阶段,政府则会督促煤矿企业进一步完善安全风险预警机制和应急方案,定期维护智能化监

测设备的运行,继续加大执法检查力度,避免新风险出现。煤矿企业在风险消退后逐渐放松对安全风险治理的投入,转而采取消极治理的应对策略。矿工在经历了安全风险潜伏和发展阶段后认识到智能化技术有效监测、控制煤矿安全风险隐患,保障个人的生命财产安全,则会更加积极参与到煤矿安全风险治理中,及时监测报告潜在风险隐患。

3.2 拓展情境仿真分析

上述 3 个阶段的情境仿真分析证实模型具有一定的现实意义,政府、煤矿企业和矿工的演化博弈稳定性策略主要是由各方的成本及收益决定。

在理论和现实情况中,“政府强监管、煤矿企业积极治理、矿工积极参与”是推进智能化煤矿安全风险治理的最理想状态,在此基础上分析政府监管、收益分摊比例这些因素的敏感性,并结合现实情境进行讨论。

3.2.1 政府监管对系统演化的影响

图 2 为在其他参数不变的情况下,煤矿企业受到政府强监管的概率 a 分别在 0.3、0.5、0.7 时的仿真结果。可以看出, a 变动对煤矿企业策略选择的敏感性最高,随着 a 的增大,煤矿企业积极治理的概率上升。这表明:政府监管对于煤矿企业策略选择的敏感性最高,政府监管煤矿企业智能治理情况,在一定程度上可以规范企业的生产行为,防止企业因为追求生产效益而忽视安全生产问题。

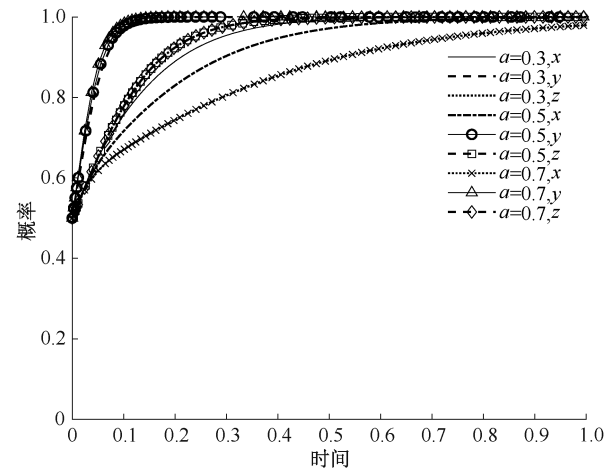


图 2 政府监管概率对博弈主体策略的影响
Fig. 2 Impact of government supervision probability on strategies of game participants

3.2.2 收益分摊比例系数对系统演化的影响

图 3 反映的是在其他参数不变的情况下 b 分别在 0.3、0.5、0.7 时的仿真结果。可以看出, b 变动对煤矿企业策略选择的敏感性最高。当政企协同收

益中政府的协同收益分摊比例越大大于 0.5 时,政府稳定策略趋近于 1 的速度越快,煤矿企业的协同收益分摊比例越接近 0.5,煤矿企业稳定策略趋向于 1 的速度越快。这表明:煤矿企业安全风险治理作用有效发挥离不开政企协同。政府通过税收、补贴等优惠政策鼓励煤矿企业使用智能化技术进行安全风险治理,煤矿企业享受政策优惠,降低安全风险治理成本,共同促进煤矿安全风险治理。

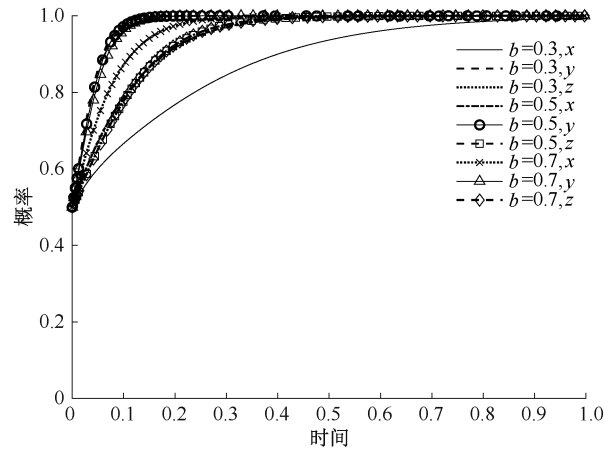


图 3 政企协同收益分摊比例系数对博弈主体策略的影响
Fig. 3 Impact of government-business cooperation revenue-sharing ratio coefficient on strategies of game participants

4 结 论

- 1) 政府部门在动态治理煤矿企业安全风险过程中,需加强对煤矿企业使用智能化设备的监管,适当地运用奖惩机制提升企业利用智能化技术进行安全风险治理的重视程度,引导企业遵守安全生产规程,有助于节约政府监管成本,扩大政企协同收益。
- 2) 煤矿企业的安全风险治理成本过高则会降低企业治理的积极性,引发企业的投机行为,应采取有效的智能化煤矿安全风险治理激励机制和成本共担策略,减轻企业安全风险治理负担,使其积极投入安全风险治理中。
- 3) 激励矿工积极参与到智能化煤矿安全风险治理中,减少矿工参与成本,同时建立合理的奖惩机制,进而规范矿工的参与行为,从而使得矿工积极参与智能化煤矿安全风险治理,有助于企业快速识别潜在安全风险,防止灾害事故的发生。
- 4) 智能化煤矿安全风险复杂,影响因素多样,而文中仅考虑政府、煤矿企业、矿工在安全风险治理中的动态演化,尚未充分考虑其他安全风险治理主体如安全生产服务机构和外部动态环境因素,因此,考虑多种影响因素和多方主体,分析煤矿安全风险动态治理则是下一步的研究方向。

参 考 文 献

[1] 国家能源局. 煤矿智能化标准体系建设指南[EB/OL]. [2024-03-13]. https://zfxxgk.nea.gov.cn/2024-03/13/c_1310768359.htm.

[2] 国家能源局. 关于进一步加快煤矿智能化建设促进煤炭高质量发展的通知[EB/OL]. [2024-05-21]. https://zfxxgk.nea.gov.cn/2024-05/21/c_1310776187.htm.

[3] DEY P, CHAULYA S K, KUMAR S. Hybrid CNN-LSTM and IoT-based coal mine hazards monitoring and prediction system[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2021, 152(8): 249-263.

[4] 段金红,马新根,贺永强,等. 基于全流程可追溯的煤矿安全智慧管控云平台[J]. 煤矿安全, 2023, 54(6): 223-228.

DUAN Jinhong, MA Xin'gen, HE Yongqiang, et al. Intelligent management and control cloud platform for coal mine safety based on full process traceability[J]. Safety in Coal Mines, 2023, 54(6): 223-228.

[5] 牛莉霞,赵蕊. 大数据时代煤矿安全风险治理模式研究[J]. 煤矿安全, 2022, 53(7): 241-245.

NIU Lixia, ZHAO Rui. Research on coal mine safety risk management model in the era of big data [J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(7): 241-245.

[6] 何茵楠,王帮俊,秦汝祥,等. 煤矿安全隐患监管策略演化与动态惩罚机制研究[J]. 矿业科学学报, 2025, 10(2): 328-337.

HE Yinnan, WANG Bangjun, QIN Ruxiang, et al. The evolution of supervision strategies on coal mine safety hazards and dynamic penalty[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2025, 10(2): 328-337.

[7] 孙林辉,贾元瑞,吴升林,等. 区块链技术赋能下的煤矿安全监管监察变革[J]. 煤炭工程, 2022, 54(1): 187-192.

SUN Linhui, JIA Yuanrui, WU Shenglin, et al. Coal mine safety supervision and inspection reform empowered by

blockchain technology[J]. Coal Engineering,2022,54(1):187-192.

[8] 王玉军. 基于演化博弈的政府-煤矿-职工安全监管策略研究[J]. 煤炭工程,2023,55(9):187-192.
WANG Yujun. Government-company-worker safety supervision strategy based on evolutionary game [J]. Coal Engineering,2023,55(9):187-192.

[9] 腾云,刘磊,陈新琳,等. 安全生产下政府、煤矿企业、员工的决策行为演化研究[J]. 运筹与管理,2022,31(1):61-67.
TENG Yun, LIU Lei, CHEN Xinlin, et al. Research on decision-making behavior evolutionary among governments, coal mining enterprises and workers under the background of safety production[J]. Operations Research and Management Science,2022,31(1):61-67.

[10] 王启飞,赵逸涵,刘帅,等. 煤矿事故大数据驱动的风险治理模式研究综述[J]. 中国安全科学学报,2024,34(7):28-37.
WANG Qifei, ZHAO Yihan, LIU Shuai, et al. A review on risk management driven by big data in coal mine accidents[J]. China Safety Science Journal,2024,34(7):28-37.

[11] 李长明,赵开功,张晓蕾,等. 煤矿智能化项目风险评价云模型及其应用[J]. 中国安全科学学报,2024,34(5):168-174.
LI Changming, ZHAO Kaigong, ZHANG Xiaolei, et al. Cloud model for risk evaluation of coal mine intelligent projects and its application[J]. China Safety Science Journal, 2024,34(5):168-174.

[12] TAYLOR P D, JONKER L B. Evolutionarily stable strategies and game dynamics[J]. Mathematical Biosciences,1978,40(1/2):145-156.

[13] 王新平,张子鸣,孙林辉,等. 工作场所正念视角下智慧矿山矿工安全行为演化博弈[J]. 中国安全生产科学技术,2022,18(2):125-131.
WANG Xinping, ZHANG Ziming, SUN Linhui, et al. Evolutionary game on safety behavior of miners in smart mine from perspective of workplace mindfulness[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2022, 18(2):125-131.

作者简介： 任利鹏 （1998—）,女,河南洛阳人,博士研究生,主要研究方向为公共安全与应急管理、政府治理等。E-mail:rlp13598555363@163.com。

