

基于演化博弈的不安全行为的羊群效应研究

陈洋^{1,2}, 李爽^{1,2}, 张宇航^{1,2}, 曹庆仁^{1,2}

(1. 中国矿业大学 管理学院, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 安全科学与应急管理研究中心, 江苏 徐州 221116)

摘要: 基于演化博弈理论, 分析了高危行业员工跟随不安全行为的心理收益、生理收益和风险成本, 不跟随时违反群体规范的成本, 安全行为的收益, 以及监管力度和法不责众的心理特征, 从众心理等因素对不安全行为羊群效应的形成及演化的影响。研究结论表明, 不安全行为羊群效应的产生与跟随不安全行为的收益及成本, 监管力度等因素显著相关。并根据数值分析的结果, 对不安全行为羊群效应的管控提出了建议, 为安全生产中的群体不安全行为现象提供理论支持。

关键词: 安全生产; 不安全行为; 羊群效应; 演化博弈

中图分类号: F064.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002—980X(2020)2—0144—12

近年来, 安全生产工作受到中国政府的空前重视, 习近平总书记多次强调必须坚守安全生产红线。但在煤炭、化工等高危行业, 由群体不安全行为引发的重大安全事故仍时有发生。例如, 2019年2月23日, 内蒙古锡林郭勒盟西乌旗银漫矿业公司由于井下违规作业, 致使22人死亡, 28人受伤; 同年4月15日, 济南市齐鲁天和惠世制药有限公司因施工人员集体违规动火作业造成10人死亡, 12人受伤, 直接经济损失1867万元。同时, 已有一系列统计研究表明, 人的不安全行为是导致各类事故发生的最主要原因^[1-3]。因此, 控制人的不安全行为是预防安全事故的核心, 是当前安全生产管理工作的重点。

目前, 学者们对于员工不安全行为的研究通常集中于分析其产生的影响因素^[4]。其中, 部分学者从内部因素研究员工不安全行为, 如栗继祖和陈新国^[5]认为煤矿员工的心理特点可以预测其安全行为; Lee等^[6]研究了核电厂工人人格特质与不安全行为的关联, 并发现冲动和完美主义特质与不安全行为有显著相关性; Wang^[7]通过单向方差分析发现安全管理方面男性比女性表现的更好, 且年龄和受教育程度与员工的安全意识呈正相关。还有部分学者从外部因素研究不安全行为的产生, 如Wang等^[8]研究工作压力与个人安全行为关系, Smith等^[9]考虑了家庭冲突对消防员安全行为的影响; Zhang等^[10]通过管理人员与员工的行为互动, 来研究建筑行业管理因素对不安全行为的影响。

然而, 上述研究都将不安全行为视为一个整体, 分析员工产生不安全行为的内外部原因, 却忽视了不安全行为的产生途径是不同的^[11]。根据社会学习理论, 人类行为学习包含两种途径, 一种是个人学习, 即个人在不断试错中, 强化学习; 另一种是社会学习, 即模仿复制他人行为^[12]。基于此, 本文将员工不安全行为的学习途径也分为两种, 一种是个体根据自身的经验而做出的判断, 最终选择不安全行为; 另一种是个体模仿、学习他人的不安全行为, 进而自身表现出不安全行为。Rizzolatti^[13]指出模仿行为是普遍存在的, 模仿是人类文化的基础, 特别是在社交密切的群体中, 人类行为主要是通过学习模仿习得。而在煤炭、化工等高危行业的日常生产中, 员工一般采用班组化管理, 通常需要班组员的合作来完成任务, 日常互动频繁, 个体之间的联系紧密, 这种小群体容易发生对不安全行为的模仿、跟随现象^[14-16]。同时相比于个体自身判断选择不安全行为, 模仿他人不安全行为会使得不安全行为在群体间扩散、蔓延, 使得整个群体在行动上呈现出不安全。

收稿日期: 2019—12—27

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“煤矿企业安全生产重大风险动态评估与智能预警研究”(71972176); 国家自然科学基金“基于大数据挖掘的煤矿安全管理决策模型及仿真研究”(71573256); 国家重点研发计划“矿山安全态势分析及预测预警系统”(2017YFC0804408)

作者简介: 陈洋(1991—), 男, 安徽合肥人, 中国矿业大学管理学院博士研究生, 研究方向: 职业健康与安全、工作压力管理; 李爽(1978—), 女, 江苏徐州人, 博士, 中国矿业大学管理学院教授, 博士研究生导师, 中国矿业大学安全科学与应急管理研究中心主任, 研究方向: 安全管理, 企业管理; 张宇航(1997—), 男, 江苏徐州人, 中国矿业大学管理学院硕士研究生, 研究方向: 安全管理; 曹庆仁(1968—), 男, 江苏徐州人, 博士, 中国矿业大学管理学院教授, 博士研究生导师, 研究方向: 行为安全与管理。

由此可知,模仿他人不安全行为不仅是不安全行为产生的主要途径,而且易引发严重后果。因此,有必要研究员工群体中不安全行为的模仿机制,阻断模仿扩散的途径,这有助于避免群体不安全行为,并预防重大安全事故的发生。

由于个体信息不完备、环境不确定,而决定跟随群体中他人采取的行为,称为羊群效应^[17-18]。早在20世纪30年代,Sherif^[19]就通过心理实验的方法发现在人类群体中存在羊群效应。之后,羊群效应在行为金融学领域获得了极大关注,羊群效应理论为有效市场假设无法解释的股价偏离等问题提供了新的思路。当前,羊群效应受到越来越多领域的关注,如舆情传播^[17,20]、群体突发事件^[21-22]、行人违章过马路^[23-24]、应急管理^[25-26]、市场营销^[27-29]等。本研究将羊群效应引入到安全生产管理领域中,将员工对群体中他人不安全行为的复制、模仿和跟随的现象称之为不安全行为的羊群效应。

相关学者在基于社会学习理论的基础上对人的模仿行为的成因进行了分析,并指出人们选择跟随模仿的对象通常出于两种动机,一种是基于收益的模仿,一种是基于从众心理的模仿^[12,30-32]。大量实验研究也证实,模仿行为带来的回报收益,以及群体中同伴模仿行为的频率共同影响人类群体中行为的传播^[12,33-34]。在一个有顺从性偏见的社会中,人们选择模仿策略包含两方面的价值:模仿策略的回报收益和从众的效用^[35]。因此,本文在分析不安全行为的羊群效应时,同时考虑了模仿不安全行为带来的回报收益,以及在从众心理影响下的对不安全行为追随所带来的效用,试图以此来揭示员工模仿行为产生的机理并加以干预,以便能够有效避免不安全行为羊群效应的产生。

本文基于演化博弈论,分析员工个体偶发的不安全行为,是否会引发羊群效应,造成群体的不安全行为。模型中考虑了员工的心理收益和生理收益、企业的监管力度、法不责众的群体思维、违反群体规范的成本等因素,并将从众心理考虑在模型中,对博弈模型做出了进一步改进和完善。在上述基础上对不安全行为的羊群效应的演化机理及影响因素进行分析,进而通过数值模拟分析不同因素对系统演化方向的影响。

一、不安全行为羊群效应的演化博弈模型

本文将一线生产作业员工视为相互博弈的主体,由于受到信息不对称的影响以及个人情绪的干扰,参与博弈的员工不具备完全理性,当这些主体身边的其他主体出现不安全行为时,其选择跟随或不跟随策略看作是一个动态演化的过程。

(一)基本假设

假设1:员工A和员工B为两个有限理性个体,当其他个体发生不安全行为时,员工A和B可以采取跟随行为F或不跟随行为N两种策略,即博弈主体的策略集合为 $S=\{F,N\}=\{\text{跟随},\text{不跟随}\}$ 。在群体博弈中,员工A初始采取跟随不安全行为策略的比例为 $x\in[0,1]$,员工B初始采取跟随不安全行为策略的比例为 $y\in[0,1]$ 。

假设2:员工A和员工B都采取跟随不安全行为策略时,双方会获得心理收益 u ,这里的收益 u 指员工都采取跟随行为后,因遵从群体规范所获得的归属感等心理效用。同时,选择不安全行为往往会带来省时省力的效益,使员工倾向于跟随不安全行为,为此,本研究假设员工采取跟随策略时会获得生理收益 v 。此外,跟随不安全行为造成的风险成本为 c ,指采取不安全行为后可能产生的安全事故给自身造成的损失。采取跟随行为的员工还要为违反规章制度付出成本,假设 P 为在一定的监管力度下员工采取不安全行为被安监人员发现的概率。同时,在安全监督检查时,对群体性的不安全行为往往处罚较小,而对个别不安全行为往往处罚较大,为此,假设 α 表示矿工A和B都采取跟随不安全行为策略时所受惩罚,假设 β 表示A和B只有一方采取跟随策略时所受惩罚,并且 $\alpha<\beta$,体现监管时“法不责众”的做法。由此,矿工A和矿工B都选择跟随不安全行为策略时的收益为

$$U_A^{FF} = u + v - c - P\alpha \quad (1)$$

$$U_B^{FF} = u + v - c - P\alpha \quad (2)$$

假设3:员工A采取跟随策略,而员工B采取不跟随策略时,不跟随一方获得安全行为收益 a ,并且不跟随的一方因违反群体规范付出的成本记为 δ 。A采取跟随策略获得生理收益 v ,同时存在安全风险成本 c ,以及

违反安全规章制度的惩罚 β 。为此, A 跟随不安全行为且 B 不跟随时收益分别为

$$U_A^{FN} = v - c - P\beta \quad (3)$$

$$U_B^{FN} = a - \delta \quad (4)$$

同理, 当 A 不跟随安全行为而 B 跟随时, 收益分别为

$$U_A^{NF} = a - \delta \quad (5)$$

$$U_B^{NF} = v - c - P\beta \quad (6)$$

假设 4: 员工 A 和 B 都采取不跟随策略时, 双方都只获得安全行为收益 a , 双方收益如下:

$$U_A^{NN} = a \quad (7)$$

$$U_B^{NN} = a \quad (8)$$

根据上述分析, 可以得到员工 A 和 B 的博弈矩阵, 见表 1。

表 1 员工 A 与员工 B 博弈矩阵

员工 A	员工 B	
	跟随 F	不跟随 N
跟随 F	$(u + v - c - P\alpha, u + v - c - P\alpha)$	$(v - c - P\beta, a - \delta)$
不跟随 N	$(a - \delta, v - c - P\beta)$	(a, a)

(二) 模型的建立

本文采用演化博弈中的复制动态方程反映员工群体行为演化的速度和方向。根据上述假设的博弈关系, 当员工 A 采取跟随策略时, 期望收益为

$$E_A^F = y(u + v - c - P\alpha) + (1 - y)(v - c - P\beta) = uy - yP\alpha + yP\beta - P\beta - c + v \quad (9)$$

当员工 A 采取不跟随策略时, 期望收益为:

$$E_A^N = y(a - \delta) + (1 - y)a = a - \delta y \quad (10)$$

则员工 A 的平均期望收益为

$$E_A = xE_A^F + (1 - x)E_A^N \quad (11)$$

根据 Weibull 的复制动态方程^[36], 员工 A 采取跟随策略的复制动态方程为

$$F(x) = \frac{dx}{dt} = x(E_A^F - E_A) = x(1 - x)(uy - yP\alpha + yP\beta - P\beta - c + v - a + \delta y) \quad (12)$$

同样, 员工 B 采取跟随策略的期望收益为

$$E_B^F = x(u + v - c - P\alpha) + (1 - x)(v - c - P\beta) = ux - xP\alpha + xP\beta - P\beta - c + v \quad (13)$$

员工 B 采取不跟随策略的期望收益为

$$E_B^N = x(a - \delta) + (1 - x)a = a - \delta x \quad (14)$$

则员工 B 的平均期望收益为:

$$E_B = yE_B^F + (1 - y)E_B^N \quad (15)$$

相应的, 员工 B 采取跟随策略的复制动态方程为

$$F(y) = \frac{dy}{dt} = y(E_B^F - E_B) = y(1 - y)(ux - xP\alpha + xP\beta - P\beta - c + v - a + \delta x) \quad (16)$$

根据以上分析, 可以得到员工 A 和员工 B 采取跟随策略时的复制动态微分方程组:

$$\begin{cases} F(x) = \frac{dx}{dt} = x(E_A^F - E_A) = x(1 - x)(uy - yP\alpha + yP\beta - P\beta - c + v - a + \delta y) \\ F(y) = \frac{dy}{dt} = y(E_B^F - E_B) = y(1 - y)(ux - xP\alpha + xP\beta - P\beta - c + v - a + \delta x) \end{cases} \quad (17)$$

(三) 从众心理下模型的建立

在社会学习理论中, 人们选择是否学习模仿他人行为通常包含两种动机, 一种是基于策略收益的考量, 策略收益即行为主体选择某种策略所带来的回报收益; 另一种是基于从众心理的策略选择, 即行为主体选择

某种策略是通过观察群体中的大多数人采用的策略,进而跟随模仿大多人的行为^[37]。在社交环境中,这两种动机共同影响人们对策略的选择^[32]。上述计算的期望收益及复制动态方程只考虑了两方博弈中,选择不同策略时的回报收益,而忽略了可能由从众心理导致的策略选择。因此,以下对模型做出了进一步改进,将行为主体进行决策时可能受从众心理的影响加入期望收益和复制动态方程。

员工 A 能够实时观察到其他主体的行为变化,并且受到从众心理的影响,随着群体中采用跟随行为策略的比例的变化,员工 A 的期望收益会发生改变,在此假设从众心理带来的效用以 $Comfomist\ Value$ 表示,且赋予权重 M 表示其重要程度。考虑从众心理影响下,员工 A 采取策略 $S=\{F, N\}$ 的期望收益为^[35]

$$E_A^S = (1 - M)E_A^S + M \times Comfomsit \times Value \quad (18)$$

随着员工 B 选择跟随策略的比例增加,员工 A 选择跟随策略的从众效用随之增加,即从众效用为选择策略的比例的增函数。为此,可直接用员工 B 选择某种策略的比例 $P(B_s)$ 表示员工 A 从众效用的强度,则员工 A 收益最终修改为^[23,35]

$$E_A^{S'} = (1 - M)E_A^S + MP(B_s) \quad (19)$$

同理,将员工 B 的收益修改为

$$E_B^{S'} = (1 - M)E_B^S + MP(A_s) \quad (20)$$

由式(20)可得,考虑从众心理影响下员工 A 采取跟随策略的期望收益为

$$E_A^{F'} = (1 - M)E_A^F + cy = (1 - M)(uy - yP\alpha + yP\beta - P\beta - c + v) + My \quad (21)$$

考虑从众心理影响下员工 A 采取不跟随策略的期望收益为

$$E_A^{N'} = (1 - M)E_A^N + M(1 - y) = (1 - M)(a - \delta y) + M(1 - y) \quad (22)$$

员工 A 的平均期望收益为

$$E_A' = xE_A^{F'} + (1 - x)E_A^{N'} \quad (23)$$

员工 A 采取跟随策略的复制动态方程为

$$F(x)' = \frac{dx}{dt} = x(E_A^{F'} - E_A') = x(1 - x)[(1 - M)(uy - yP\alpha + yP\beta - P\beta - c + v - a + \delta y) + 2My - M] \quad (24)$$

同样可得,考虑从众心理影响下员工 B 采取跟随策略的期望收益为

$$E_B^{F'} = (1 - M)E_B^F + Mx = (1 - M)(ux - xP\alpha + xP\beta - P\beta - c + v) + Mx \quad (25)$$

考虑从众心理影响下员工 B 采取不跟随策略的期望收益为

$$E_B^{N'} = (1 - M)E_B^N + M(1 - x) = (1 - M)(a - \delta x) + M(1 - x) \quad (26)$$

员工 B 的平均期望收益为

$$E_B' = yE_B^{F'} + (1 - y)E_B^{N'} \quad (27)$$

员工 B 采取跟随策略的复制动态方程为

$$F(y)' = \frac{dy}{dt} = y(E_B^{F'} - E_B') = y(1 - y)[(1 - M)(ux - xP\alpha + xP\beta - P\beta - c + v - a + \delta x) + 2My - M] \quad (28)$$

由此可得,从众心理影响下员工 A 和员工 B 采取跟随策略时的复制动态微分方程组:

$$\begin{cases} F(x)' = x(E_A^{F'} - E_A') = x(1 - x)[(1 - M)(uy - yP\alpha + yP\beta - P\beta - c + v - a + \delta y) + 2My - M] \\ F(y)' = y(E_B^{F'} - E_B') = y(1 - y)[(1 - M)(ux - xP\alpha + xP\beta - P\beta - c + v - a + \delta x) + 2My - M] \end{cases} \quad (29)$$

从上述微分方程组可得系统的5个均衡点,分别为 $E_1(0,0)$, $E_2(0,1)$, $E_3(1,0)$, $E_4(1,1)$, 以及混合均衡点

$E_s \left[\frac{M + (1 - M)(P\beta + c - v + a)}{(1 - M)(u - P\alpha + P\beta + \delta) + 2M}, \frac{M + (1 - M)(P\beta + c - v + a)}{(1 - M)(u - P\alpha + P\beta + \delta) + 2M} \right]$ 。并得到系统的雅克比矩阵 J 为

$$J = \begin{bmatrix} (1 - 2x)[(1 - M)(uy - yP\alpha + yP\beta - P\beta - c + v - a + \delta y) + 2My - M] & x(1 - x)[(1 - M)(u - P\alpha + P\beta + \delta) + 2M] \\ y(1 - y)[(1 - M)(u - P\alpha + P\beta + \delta) + 2M] & (1 - 2y)[(1 - M)(ux - xP\alpha + xP\beta - P\beta - c + v - a + \delta x) + 2My - M] \end{bmatrix} \quad (30)$$

将 E_1, E_2, E_3, E_4, E_5 分别代入矩阵 J , 并计算矩阵行列式和矩阵的迹, 结果见表 2, E_5 不为演化稳定点, 未在表中展示。

(四) 均衡分析

(1) 当 $v - c - P\beta < M/(1 - M) + a$ 且 $a - \delta > M/(1 - M) + u + v - c - P\alpha$ 时, 系统演化稳定点唯一为 $E_1(0, 0)$, 即员工最终都选择不跟随策略, 均衡点的稳定性分析结果见表 3。

(2) 当 $a - \delta < M/(1 - M) + u + v - c - P\alpha$ 且 $v - c - P\beta > M/(1 - M) + a$ 时, 系统演化稳定点唯一为 $E_4(1, 1)$, 即员工最终都选择跟随策略, 均衡点的稳定性分析结果如表 4 所示。

(3) 当 $v - c - P\beta < M/(1 - M) + a$ 且 $a - \delta < M/(1 - M) + u + v - c - P\alpha$ 时, 系统演化稳定点不唯一, 演化分别趋向于 $E_1(0, 0)$ 和 $E_4(1, 1)$ 。此时, 演化相位图如图 1 所示, E_1, E_2, E_3, E_5 围成的四边形表示该区域内最终都向 $E_1(0, 0)$ 演化, 则四边形的面积 S 越大时, 选择不跟随的比例越大, 跟随的比例越小。条件(3)下, 系统存在多重演化均衡, 员工最终可能都选择跟随策略也可能都选择不跟随策略, 均衡点的稳定性分析结果见表 5。

二、博弈演化均衡数值分析

(一) 数值设定

本文根据专家访谈设计了不安全行为羊群效应的研究量表, 并将生理收益(v)、心理收益(u)、违反群体规范的成本(δ)、受到的处罚(α 和 β)、风险成本(c)、安全行为收益(a)7个变量按照受访者认可不同程度归集到区间 $[1, 5]$ 范围; 监管力度(P)和从众效用(M)两个变量以 $0 \sim 100$ 分的评分制方式获取并将数据归集到 $[0, 1]$ 范围。表 6 分别以生理收益(v)和监管力度(P)为例展示了本研究所设计问卷的基本样式。

表 2 均衡点对应的行列式和迹

均衡点	行列式 $\det J$	迹 $\text{tr} J$
$E_1(0, 0)$	$[(1 - M)(v - P\beta - c - a) - M]^2$	$2(1 - M)(v - P\beta - c - a) - 2M$
$E_2(0, 1)$	$[(1 - M)(u - P\alpha - c + v - a + \delta) + M] \times [(M - 1)(-P\beta - c + v - a) - M]$	$(1 - M)(u + P\beta - P\alpha + \delta)$
$E_3(1, 0)$	$[(1 - M)(u - P\alpha - c + v - a + \delta) + M] \times [(M - 1)(-P\beta - c + v - a) - M]$	$(1 - M)(u + P\beta - P\alpha + \delta)$
$E_4(1, 1)$	$[(1 - M)(u - P\alpha - c + v - a + \delta) + M]^2$	$2(1 - M)(P\alpha + a + c - u - v - \delta) - 2M$

表 3 条件(1)下的均衡点稳定分析

均衡点	行列式 $\det J$	迹 $\text{tr} J$	稳定性
$E_1(0, 0)$	+	-	ESS
$E_2(0, 1)$	不确定	+	不稳定
$E_3(1, 0)$	不确定	+	不稳定
$E_4(1, 1)$	+	+	不稳定

表 4 条件(2)下的均衡点稳定分析

均衡点	行列式 $\det J$	迹 $\text{tr} J$	稳定性
$E_1(0, 0)$	+	+	不稳定
$E_2(0, 1)$	不确定	+	不稳定
$E_3(1, 0)$	不确定	+	不稳定
$E_4(1, 1)$	+	-	ESS

表 5 条件(3)下的均衡点稳定分析

均衡点	行列式 $\det J$	迹 $\text{tr} J$	稳定性
$E_1(0, 0)$	+	-	ESS
$E_2(0, 1)$	不确定	+	不稳定
$E_3(1, 0)$	不确定	+	不稳定
$E_4(1, 1)$	+	-	ESS

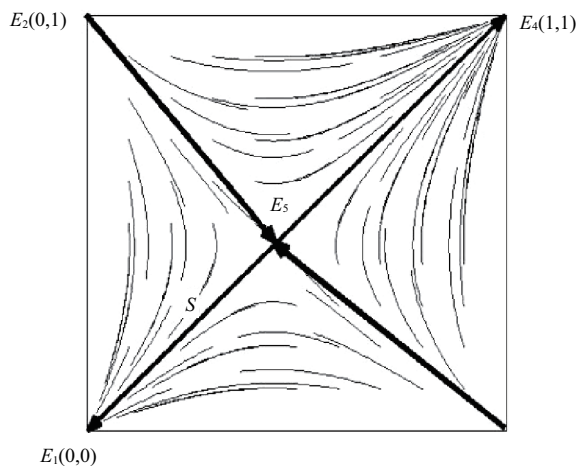


图 1 条件(3)时系统演化相位图

表 6 研究中所涉及的部分问卷

问卷题项	很不认同	不认同	不确定	认同	很认同
生理收益(v)	(1)效仿和跟随别人的违章行为会让我更快完成工作				
	1	2	3	4	5
监管力度(P)	(2)效仿和跟随别人的违章行为会让我更轻松完成任务				
	1	2	3	4	5
请您对所在的煤矿当前的安全监管严格程度进行评分, 满分 100 分, 分数越高代表企业目前的监管越是严格					

(二) 唯一演化稳定策略的数值分析

1. 唯一演化稳定策略(不跟随,不跟随)的数值分析

根据专家访谈可知,假设员工跟随不安全行为时心理收益 u 为3,生理收益 $v=3$,风险成本 $c=5$,监管力度 $P=0.5$,双方都采取跟随策略受到惩罚 $\alpha=4$,只有一方采取跟随策略受到惩罚 $\beta=5$,员工采取不跟随策略时,安全行为带来收益为 $a=5$,违反群体规范的成本 $\delta=1$,且从众效用 $M=0.5$ 。由于员工A与员工B的博弈收益为对称矩阵,员工A与员工B演化趋势相同,因此只需要分析一方的演化方向。运用MATLAB软件对符合条件(1)的变量进行仿真模拟,结果如图2所示,当满足条件 $v - c - P\beta < M/(1 - M) + a$ 且 $a - \delta > M/(1 - M) + u + v - c - P\alpha$,即员工采取跟随策略的收益小于采取不跟随策略的收益时,员工最终都选择(不跟随,不跟随)策略。这表明当员工采取跟随不安全行为的心理和生理收益较低时,且监管部门认真履行监管职责,对员工不安全行为的惩罚力度较大,不安全行为带来的风险很大时,从众心理不起作用或起正向作用,员工都不会模仿他人的不安全行为,不安全行为的羊群效应此时不会发生。

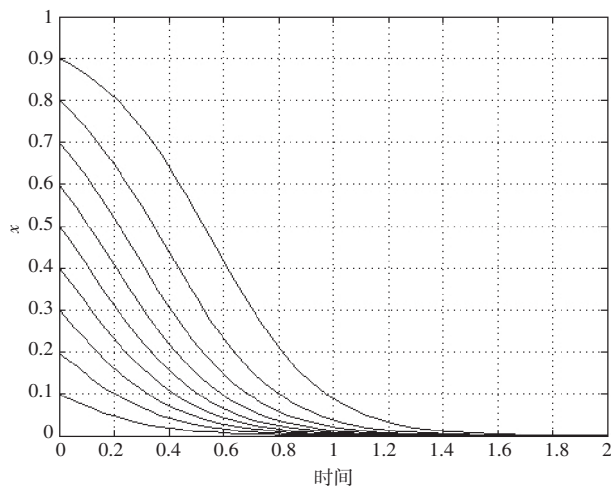


图2 条件(1)下的系统演化动态

2. 唯一演化稳定策略(跟随,跟随)的数值分析

根据专家访谈可知,假设符合条件(2)的仿真参数为: $u=5, v=5, c=1, P=0.5, \alpha=1, \beta=2, a=1, \delta=5, M=0.5$ 。当系统满足条件(2) $a - \delta < M/(1 - M) + u + v - c - P\alpha$ 且,即员工采取跟随策略的收益大于不跟随策略的收益时,系统演化动态如图3所示,员工最终都将采取(跟随,跟随)策略。这表明当员工采取跟随策略的心理收益和生理收益较大,不安全行为带来的风险和经济损失较小,且不跟随时违反群体规范的成本较大时,员工群体容易出现羊群效应,个体的不安全行为会引发其他个体的效仿、跟随,最终导致群体的不安全行为。

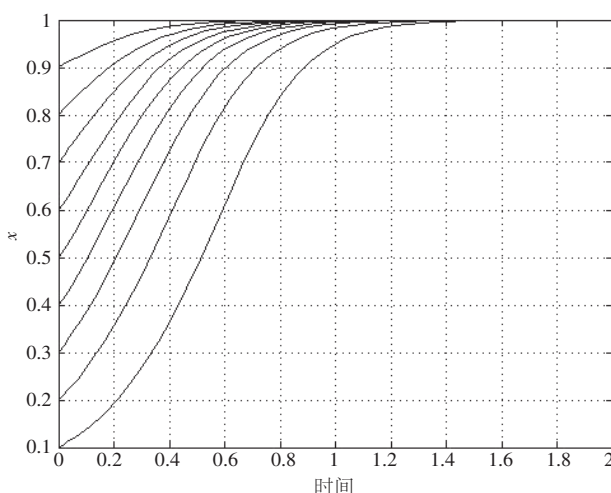


图3 条件(2)下的系统演化动态

(三) 多重演化稳定策略的数值分析

根据专家访谈可知,假设符合条件(3)的仿真参数为: $u=3, v=5, c=2, P=0.5, \alpha=2, \beta=4, a=4, \delta=3, M=0.5$ 。当系统满足条件(3) $v - c - P\beta < M/(1 - M) + a$ 且 $a - \delta < M/(1 - M) + u + v - c - P\alpha$ 时,系统存在 $E_1(0, 0)$ 和 $E_4(1, 1)$ 两个演化稳定点,此时系统演化动态如图4所示。当初始选择跟随不安全行为员工比例大于0.4时,虽然采取跟随策略的收益小于不跟随策略的收益,但仍会发生羊群效应,最终所有员工都会跟随不安全行为;而当初始选择跟随策略的员工比例小于0.4时,虽然采取跟随策略的收益大于不跟随策略的收益,但羊群效应会逐渐消失,最终所有员工都采取不跟随策略。为此,有必要进一步研究此系统演化的影响因素,以控制员工群体不安全行为产生羊群效应,这对于保障安全生产,防范化解重大安全事故具有重要意义。下文将对上述两种均衡的影响因素重点分析。

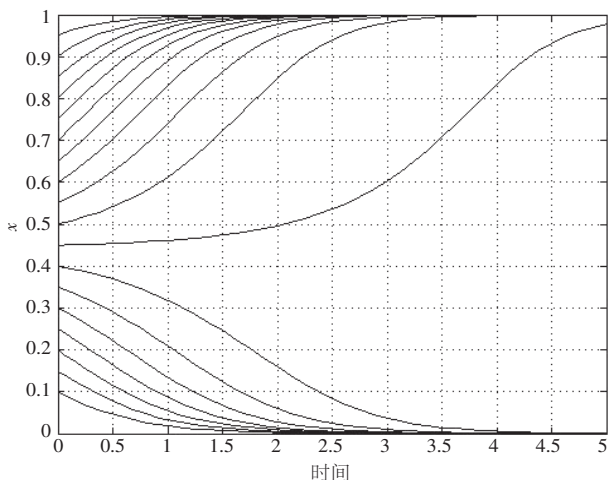


图4 条件(3)下的系统演化动态

三、不安全行为羊群效应的影响因素及数值分析

(一) 法不责众对羊群效应的影响分析

当安监人员对群体性的不安全行为处罚 α 越重时, 员工采取(不跟随, 不跟随)策略的比例增大, 不安全行为的羊群效应将难以出现。

根据上述均衡分析及数值分析, 当满足条件(3) $v - c - P\beta < M/(1 - M) + a$ 且 $a - \delta < M/(1 - M) + u + v - c - P\alpha$ 时, 系统存在(跟随, 跟随)和(不跟随, 不跟随)两个演化稳定策略, 前一种策略会导致羊群效应的出现并致使群体处于不安全状态。由图 1 的相位图分析可知, 最终的演化结果与面积 S 呈负相关, 即面积 S 越大则采取跟随不安全行为的员工比例越小, 即系统最终向(跟随, 跟随)方向演化, 反之则系统最终向(不跟随, 不跟随)方向演化。

由鞍点 E_5 可计算面积 $S = \Phi/\Theta$, 其中 $\Phi = M + (1 - M)(P\beta + c - v + a)$, $\Theta = (1 - M)(u - P\alpha + P\beta + \delta) + 2M$, 对 α 求偏导得 $\partial S/\partial \alpha = P(1 - M)\Phi\alpha/\Theta^2 > 0$, 因此面积 S 是关于 α 的增函数, 则 α 越大, 面积 S 越大, 采取跟随策略的比例越小。如图 5, 在条件(3)的数值分析基础上, 将 α 由 2 增大至 5, 当员工采取跟随策略的初始比例 $x < 0.6$ 时, 员工群体最终会向(不跟随, 不跟随)策略演化。而在图 4 中, 初始比例 x 大于 0.4 时, 系统便都向(跟随, 跟随)方向演化。由此可见, 增加对班组内群体不安全行为的处罚强度, 可以有效控制不安全行为羊群效应的出现。

(二) 监管力度对羊群效应的影响分析

当安监人员监管越认真, 监管力度 P 越大时, 员工采取(不跟随, 不跟随)策略的比例增大, 不安全行为的羊群效应越难出现。

由可知, 面积 S 与监管力度 P 呈正比关系, P 越接近 1, 则员工采取不跟随比例越大。在条件(3)数值分析基础上, 将监管力度 P 由 0.5 增加至 0.8, 仿真结果如图 6 所示, 当初始比例 $x < 0.5$ 时, 不会出现羊群效应, 而系统在 $P=0.5$ 的条件下, 采取跟随策略的初始比例大于 0.4 便会出现羊群效应。安全监管的力度决定员工发生不安全行为时能否被监管人员发现, 是否每件不安全行为都能受到处罚, 若监管力度强则员工跟随不安全行为成本会增大, 员工便倾向于采取不跟随策略, 羊群效应难以形成。

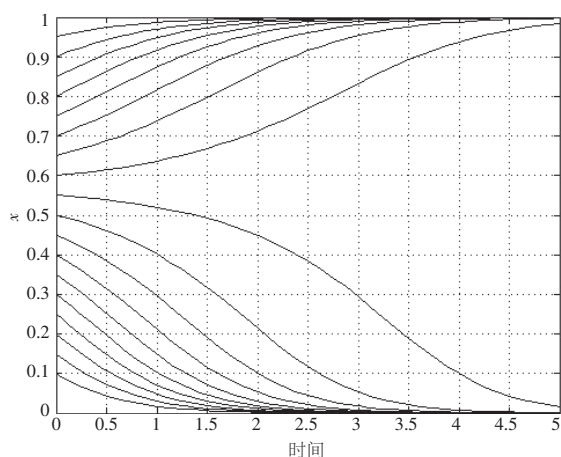


图 5 $\alpha=5$ 时系统演化动态

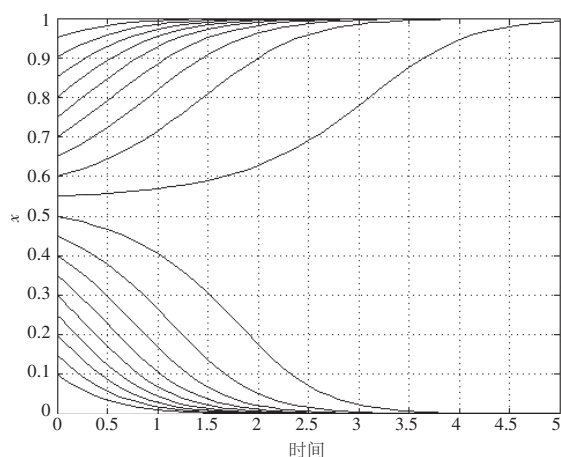


图 6 $P=0.8$ 时系统演化动态

(三) 不安全行为的风险成本对羊群效应的影响分析

当员工的不安全行为可能引发的安全风险越大时, 员工采取(不跟随, 不跟随)策略的比例增大, 系统越难以出现羊群效应。

由 $\partial S/\partial c = (1 - M)/\Theta^2 > 0$ 可知, 面积 S 是关于风险成本 c 的增函数, 则不安全行为可能引发的安全风险成本 c 越大时, 员工采取跟随策略的比例越小, 不安全行为的羊群效应也就越难以出现。在条件(3)的数值分析基础上, 将风险成本 c 由 2 增加至 4, 仿真结果如图 7 所示, 当员工选择跟随策略的初始比例 $x < 0.7$ 时, 员

工最终都会选择不跟随策略,而原条件(3)下初始比例需小于0.5,羊群效应才不会产生。这表明风险成本对不安全行为的羊群效应有影响,且影响程度较大。在现实安全生产中,若员工安全意识不强,认识不到不安全行为的危险性和后果的严重性,便容易受到趋利导向和从众心理双重影响下,盲目跟随他人不安全行为;反之,若员工安全意识强,明确不安全行为对自身生命安全有很大威胁,则羊群效应就会逐渐消失,系统趋于安全状态。

(四)不安全行为的生理收益对羊群效应的影响分析

当员工的不安全行为带来的生理收益越小时,员工越倾向于采取(不跟随,不跟随)策略,员工群体越不易出现羊群效应。

由 $\partial S/\partial v = (M-1)/\Theta^2 < 0$ 可知,面积 S 是关于生理收益 v 的单调减函数,生理收益减小时, S 增大,则采取跟随策略的比例减小,不安全行为的羊群效应可能性降低。在条件(3)数值分析基础上,将生理收益 v 从5减少至2,仿真结果如图8所示,随着生理收益的降低,初始比例 $x < 0.8$ 时便不再出现羊群效应。由于员工采取不安全行为时,往往能带来省时省力等生理上的收益,如不佩戴安全帽能够获得身体上的舒适感,因此员工有可能为获取生理收益而跟随不安全行为。同样,若员工生产条件较为舒适,采取不安全行为不能带来或带来较少的额外生理收益,那么员工就不会跟随不安全行为。

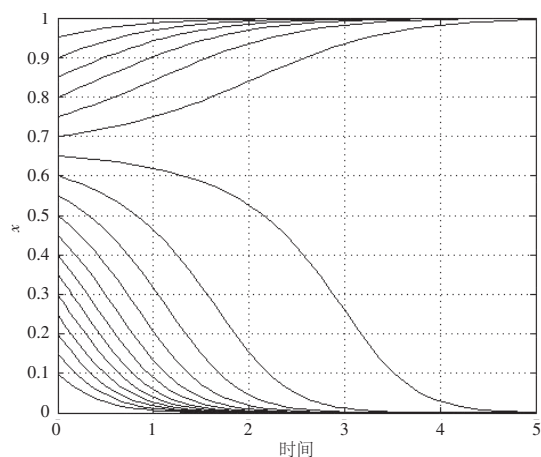


图7 $c=4$ 时系统演化动态

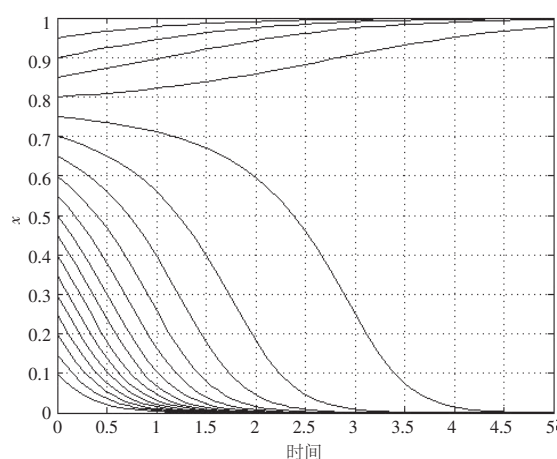


图8 $v=2$ 时系统演化动态图

(五)不安全行为的心理收益对羊群效应的影响分析

当员工的不安全行为能够带来心理收益越大时,员工采取(跟随,跟随)策略比例增大,羊群效应越容易出现。

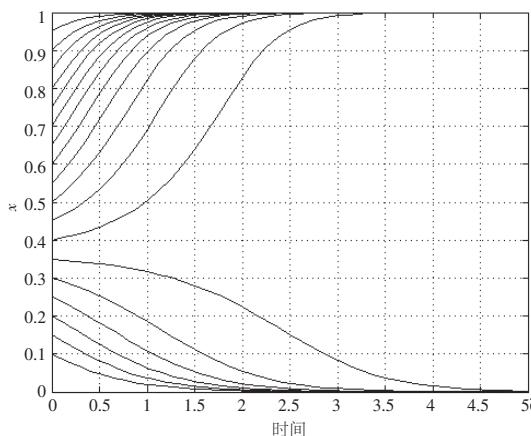
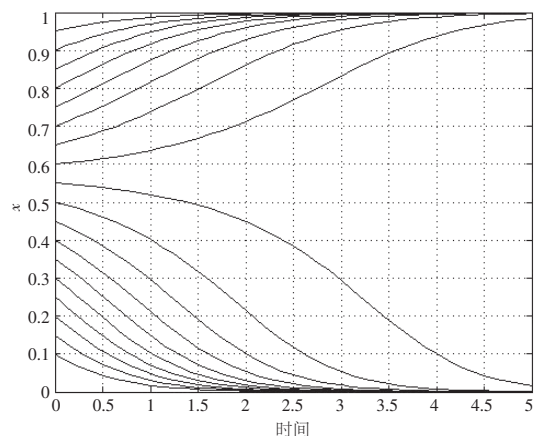
由 $\partial S/\partial u = -[M + (1-M)(P\beta + c - v + a)](1-M)/\Theta^2 < 0$ 可知,面积 S 是关于变量 u 的减函数,则心理收益增大时,面积 S 减小,跟随比例增大。在条件(3)数值分析基础上,将心理收益 u 从3增加到5,系统演化趋势如图9所示,初始比例 $x > 0.4$ 时,会发生不安全行为的羊群效应,而原条件(3)的演化趋势中 $x > 0.45$ 时,羊群效应才会出现,并且心理收益增大后,系统向跟随方向收敛的速度明显加快。这表明跟随不安全行为若有较高的心理收益,会加快羊群效应的出现。员工群体中除了公司明文规定的规章制度,往往还存在不成文的非正式的群体规范。若员工群体中存在不安全的行为规范,即大家对一些不安全行为是默许的或是都认可的,则员工跟随不安全行为便会获得归属感等心理收益。而这种不安全的群体规范影响越深,带来的心理收益便越大,越容易引发不安全行为的羊群效应。

(六)违反群体规范的成本对羊群效应的影响分析

当员工采取不跟随策略违反群体规范的成本越小时,员工采取(不跟随,不跟随)策略比例增大,羊群效应不容易出现。

由可知,违反群体规范的成本 δ 减小时,面积 S 增大,员工更倾向于采取不跟随策略。将条件(3)数值仿

真中的 δ 由3减少至1后,系统演化动态如图10所示,初始比例需大于0.6才会出现羊群效应,原条件(3)中 $x > 0.4$ 便会出现羊群效应。群体中若存在不安去的行为规范,那么采取不跟随策略便违背了群体中的规范,这种违背规范的成本驱使员工跟随不安全行为,只要违反的成本相对较小,员工便不会遵从这种非正式的群体规范。

图9 $u=5$ 时系统演化动态图图10 $\delta=1$ 时系统演化动态

(七)安全行为收益对羊群效应的影响分析

当员工安全行为能够获得较大收益时,员工倾向于采取(不跟随,不跟随)策略,员工群体不易出现不安全行为的羊群效应。

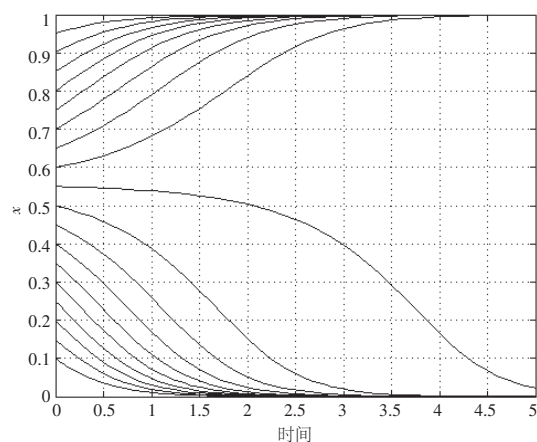
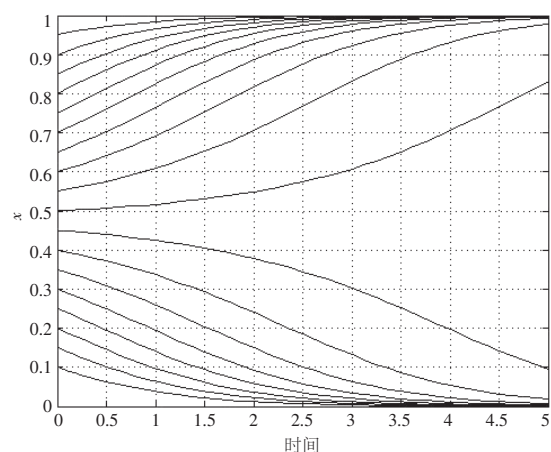
由 $\partial S/\partial a = (1 - M)/\Theta^2 > 0$ 可知,安全行为收益 a 与面积 S 成正比,安全行为的收益越大,员工越不愿意跟随不安全行为。根据条件(3)的数值仿真参数,将安全行为收益由4增加至5,系统演化动态如图11所示,当初始比例 $x < 0.6$ 时,员工会趋向采取不跟随策略,而原条件(3)比例需小于0.4,羊群效应才不会发生。在安全生产中,若员工认真遵守安全章程,执行安全操作,能够获得额外的经济奖励或精神上的嘉奖,则员工跟随不安全行为的比例会降低,这种授予安全行为的奖励越高时,羊群效应出现可能性越低,群体状态越安全。

(八)从众心理对羊群效应的影响分析

从众心理是使人们模仿他人行为的一大驱动力,在不安全行为的羊群效应中,从众心理既可能起正面作用,也可能起反面作用。

对从众效用 M 求偏导得, $\partial S/\partial M = (u + 2v - 2c - P\alpha - P\beta - 2a + \delta)/\Theta^2$ 。当 $U_A^{FF} + U_A^{FN} > U_A^{NF} + U_A^{NN}$ 时,即跟随策略的收益之和大于不跟随策略的收益之和时, $\partial S/\partial M > 0$;当 $U_A^{FF} + U_A^{FN} < U_A^{NF} + U_A^{NN}$ 时,即跟随策略的收益之和小于不跟随策略的收益之和时, $\partial S/\partial M < 0$;当 $U_A^{FF} + U_A^{FN} = U_A^{NF} + U_A^{NN}$ 时,即跟随策略的收益之和等于不跟随策略的收益之和时, $\partial S/\partial M = 0$ 。以下对上述三种情况分别进行数值分析。

(1)当 $\partial S/\partial M > 0$,从众效用 M 增大时,面积 S 增大,则选择跟随策略的比例减小。原条件(3)中的参数设定满足 $U_A^{FF} + U_A^{FN} > U_A^{NF} + U_A^{NN}$,将原条件(3)中的从众效用 M 增加为0.9,系统演化趋势如图12所示,当初

图11 $\alpha=5$ 时系统演化动态图12 情形(1) $M=0.9$ 时系统演化动态

始比例 $x=0.45$ 时,员工最终趋向不跟随策略,而原条件(3)中 $x=0.45$ 时,员工最终趋向跟随策略。因此,当跟随策略收益较大时,从众心理起到正向作用。

(2)当 $\partial S/\partial M < 0$ 时,随着从众效用 M 增大,面积 S 将减小,而采取跟随策略的人增多。假设符合条件 $U_A^{FF} + U_A^{FN} < U_A^{NF} + U_A^{NN}$ 的仿真参数 $u=1, v=5, c=2, P=0.5, \alpha=2, \beta=4, a=4, \delta=2$, 当 $M=0.5$ 时系统演化趋势为图 13, 当 $M=0.9$ 时系统演化趋势为图 14。显然,在跟随策略收益较小情况下,从众效用的增加会促使员工忽略行为收益而盲目选择跟随策略,从众心理此时起负面作用。

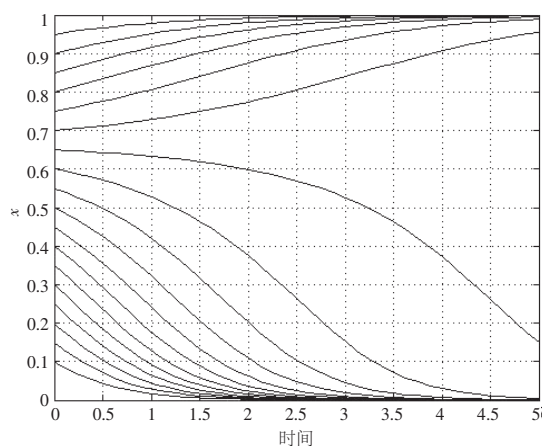


图 13 情形(2) $M=0.5$ 时系统演化动态

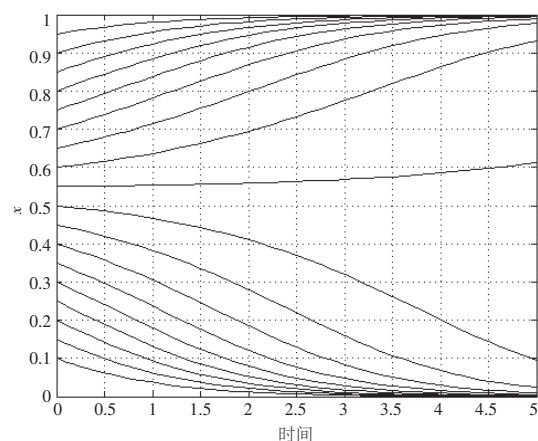


图 14 情形(2) $M=0.9$ 时系统演化动态

(3)当 $\partial S/\partial M = 0$ 时,从众效用 M 的变化不会影响员工策略选择的变化。假设符合条件 $U_A^{FF} + U_A^{FN} = U_A^{NF} + U_A^{NN}$ 的仿真参数 $u=2, v=5, c=2, P=0.5, \alpha=2, \beta=4, a=4, \delta=3$, 分别代入 $M=0.5$ 和 $M=0.9$, 系统演化动态分别如图 15 和图 16 所示,二者都以初始比例 $x=0.5$ 为分界线,向(跟随,跟随)策略或(不跟随,不跟随)策略演化。这表明当跟随策略收益的和等于不跟随策略收益的和时,从众心理对羊群效应不发挥作用。

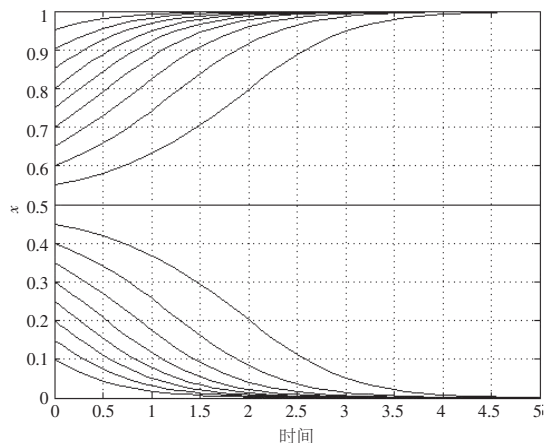


图 15 情形(3) $M=0.5$ 时系统演化动态

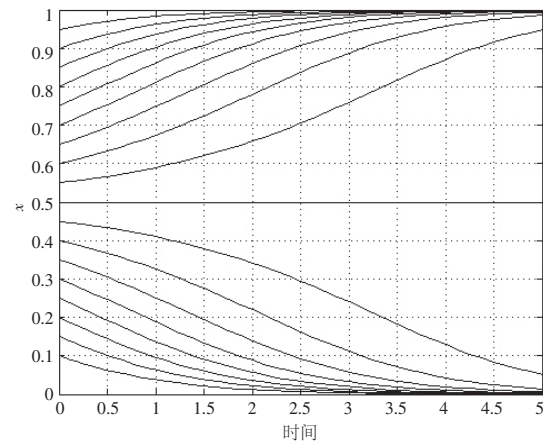


图 16 情形(3) $M=0.9$ 时系统演化动态

四、结论

研究员工跟随他人不安全行为的特征及行为选择机制,对高危行业员工群体的安全管控、保障安全生产具有重大意义。本文研究了员工模仿、跟随他人不安全行为可能引发羊群效应,造成群体不安全状态的现象,并建立了基于收益和从众心理的演化博弈模型,分析不安全行为的羊群效应演化动态及其影响因素。

研究结果表明,在不同的初始条件下,系统存在唯一或多重演化稳定策略。当策略(跟随,跟随)和策略(不跟随,不跟随)同时存在时,系统最终会向这两种策略演化,且边界较明显,其中策略(跟随,跟随)会导致不安全行为的羊群效应,引发群体的不安全状态,并存在一系列的因素共同影响羊群效应的产生。首先,若

员工个体认为当群体行为一致,即使发生不安全行为,也不会受到太重的处罚的“法不责众”思维使员工选择跟随策略比例增加,同时,若监管力度弱,安监人员不能及时发现员工的违规行为,会降低员工跟随策略的成本,使员工选择跟随策略;其次,员工对待不安全行为风险的认知影响策略的选择,员工安全意识强,则感知到的风险成本高,有利于员工选择不跟随策略;再次,不安全行为的生理收益驱使员工跟随不安全行为,使得羊群效应容易产生,而安全行为收益可以抑制羊群效应的产生;复次,员工群体中若存在不安全的群体规范使员工跟随时获得群体认同感的心理收益,不跟随时会面临群体的处罚,比如排挤、冷漠,从而付出违反群体规范的成本,则易出现羊群效应,系统向(跟随,跟随)策略演化;最后,考虑从众心理对羊群效应的影响,通过数值分析发现,从众心理能够促使羊群效应的出现。通过以上分析,本文对高危行业的安全管理提出以下建议,以避免不安全行为羊群效应的产生,进一步为安全生产工作保驾护航。

为预防员工个体偶发的不安全行为在群体中被模仿、跟随,首先要求企业建立完善的安全操作规范和安全监管制度,加强对员工违规行为的监管力度、执法力度,明确员工违规行为受到的处罚,摒弃“法不责众”的传统思维。其次,加强员工的安全培训教育,将安全生产责任落到每一个岗位每一名员工,通过先考试后上岗等手段让员工知晓并执行安全规范,并意识到不安全行为的代价。同时,尽可能为员工创造良好的安全生产条件,使员工能够身心舒适的进行工作。再次,营造良好的安全文化氛围,加强遵守行为规范员工的表彰与奖励,在潜移默化中消除非正式的不安全规范,提高员工对安全行为收益的预期。最后,合理利用从众心理的影响,使遵规守纪,按章操作,成为企业中人人效仿的行为规范。

参考文献

- [1] CHEN H, QI H, LONG R, et al. Research on 10-year tendency of China coal mine accidents and the characteristics of human factors[J]. Safety Science, 2012, 50(4): 745-750.
- [2] CHOUDHRY R M. Behavior-based safety on construction sites: A case study[J]. Accident Analysis & Prevention, 2014, 70: 14-23.
- [3] CURCUTO M, CONCHIE S M, MARIANI M G, et al. The role of prosocial and proactive safety behaviors in predicting safety performance[J]. Safety Science, 2015, 80: 317-323.
- [4] 杨豪, 赵云胜. 关于员工安全行为研究综述与启示[J]. 安全与环境工程, 2019, 26(5): 121-127.
- [5] 栗继祖, 陈新国. 煤矿员工心理特点与安全行为管理对策研究[J]. 管理世界, 2014(2): 174-175.
- [6] LEE J H, SO S H S, MIN S N, et al. The effects of personality types on self-reported safety behavior: Focused on plant workers in Korea[J]. Accident Analysis & Prevention, 2018, 121: 20-27.
- [7] WANG Q, MEI Q, LIU S, et al. Demographic differences in safety proactivity behaviors and safety management in Chinese small-scale enterprises[J]. Safety Science, 2019, 120: 179-184.
- [8] WANG D, WANG X, XIA N. How safety-related stress affects workers' safety behavior: The moderating role of psychological capital[J]. Safety Science, 2018, 103: 247-259.
- [9] SMITH T D, HUGHES K, DEJOY D M, et al. Assessment of relationships between work stress, work-family conflict, burnout and firefighter safety behavior outcomes[J]. Safety Science, 2018, 103: 287-292.
- [10] ZHANG P, LI N, JIANG Z, et al. An agent-based modeling approach for understanding the effect of worker-management interactions on construction workers' safety-related behaviors[J]. Automation in Construction, 2019, 97: 29-43.
- [11] 杨利峰, 陈红. 代理人理性选择下不安全行为的模仿性[J]. 系统工程, 2016, 34(01): 134-139.
- [12] MESOUDI A. An experimental comparison of human social learning strategies: Payoff-biased social learning is adaptive but underused[J]. Evolution and Human Behavior, 2011, 32(5): 334-342.
- [13] RIZZOLATTI G. Imitation: Mechanisms and importance for human culture[J]. Rendiconti Lincei, 2014, 25(3): 285-289.
- [14] 许正权, 张妮, 王华清, 等. 矿工不安全行为的网络传播性分析[J]. 科技进步与对策, 2014, 31(11): 54-56.
- [15] 熊亚超, 祁慧, 李泽荃, 等. 基于网络特征的煤矿职工不安全行为扩散研究[J]. 煤炭工程, 2019, 51(9): 187-191.
- [16] 付春香. 非政府组织成员消极行为的扩散及应对策略——基于社会网络的分析[J]. 理论与现代化, 2014(5): 90-95.
- [17] 韩少春, 刘云, 张彦超, 等. 基于动态演化博弈论的舆论传播羊群效应[J]. 系统工程学报, 2011, 26(2): 275-281.
- [18] 李平, 曾勇. 资本市场羊群行为综述[J]. 系统工程学报, 2006(2): 176-183.
- [19] SHERIF M. An experimental approach to the study of attitudes[J]. Sociometry, 1937, 1: 90-98.
- [20] 陈福集, 黄江玲. 基于演化博弈的网络舆情传播的羊群效应研究[J]. 情报杂志, 2013, 32(10): 1-5.
- [21] 徐浩, 谭德庆, 张敬钦, 等. 群体性突发事件非利益相关者羊群行为的演化博弈分析[J]. 管理评论, 2019, 31(5): 254-266.
- [22] 李峰, 沈惠璋, 刘尚亮, 等. 基于心理阈值模型的危机事件下从众行为动力学分析[J]. 系统管理学报, 2011, 20(5): 513-519.
- [23] 吴文静, 王占中, 马芳武. 从众心理影响下的行人群体行为演化博弈的仿真分析——以行人过街为例[J]. 吉林大学学报(工学版), 2017, 47(1): 92-96.

- [24] GOU J, CAI X, DOU S. Behavior simulation of “Chinese style road crossing” based on evolutionary game theory: International Conference on Logistic[C]// International Conference on Logistics, Infomatics and Service Science. Sydney: IEEE, 2016: 7854554.
- [25] MIGNON V D B, VAN NES R, HOOGENDOOM S. Estimating choice models to quantify the effect of herding on the decision to evacuate: Application of a serious gaming experimental Setup[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2018, 2672(1), 161-170.
- [26] MENG Q, ZHOU M, LIU J, et al. Pedestrian evacuation with herding behavior in the view-limited condition[J]. IEEE Transactions on Computational Social Systems, 2019, 6(3): 567-575.
- [27] 殷猛, 李琪, 刘洋. 网络购物节中的羊群效应及其对冲动购物的影响——基于社会影响理论和羊群效应的实证[J]. 中国流通经济, 2019, 33(8): 99-107.
- [28] DING A W, LI S. Herding in the consumption and purchase of digital goods and moderators of the herding bias[J]. Journal of the Academy of Marketing Science, 2019, 47(3): 460-478.
- [29] HUANG J, CHEN Y. Herding in online product choice[J]. Psychology and Marketing, 2006, 23(5): 413-428.
- [30] MOLLEMAN L, GACHTER S. Societal background influences social learning in cooperative decision making[J]. Evolution and Human Behavior, 2018, 39(5): 547-555.
- [31] MOLLEMAN L, PEN I, Weissing F J. Effects of conformism on the cultural evolution of social behaviour[J]. PLoS ONE, 2013, 8(7): 1-8.
- [32] MOLLEMAN L, VAN DEN BERG P, WEISSING F J. Consistent individual differences in human social learning strategies[J]. Nature Communications, 2014, 5(1): 1-9.
- [33] HENRICH J, BROESCH J. On the nature of cultural transmission networks: Evidence from Fijian villages for adaptive learning biases[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2011, 366(1567): 1139-1148.
- [34] MCELERATH R, LUBELL M, RICHERSON P J, et al. Applying evolutionary models to the laboratory study of social learning[J]. Evolution and Human Behavior, 2005, 26(6): 483-508.
- [35] SKYRMS B. Dynamics of Conformist Bias[J]. Monist, 2005, 88(2): 260-269.
- [36] WEIBULL J W. Evolutionary game theory[M]. Cambridge MA: MIT Press, 1995.
- [37] BOYD R, RICHERSON P J. Culture and evolutionary process[J]. American Journal of Sociology, 1985, 19(2): 426-435.

Research on Herding Effect in Unsafe Behavior Based on Evolutionary Game

Chen Yang^{1,2}, Li Shuang^{1,2}, Zhang Yuhang^{1,2}, Cao Qinren^{1,2}

(1. School of Management, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China;

2. Center for Safety Science and Emergency Management, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China)

Abstract: On the basis of evolutionary game theory, the current research analyze the formation mechanism and influencing factors of herding effect in unsafe behavior by considering the psychological benefits, physiological benefits and risk costs of employees when they following unsafe behaviors, and the costs of violating group norms, the benefits of safe behavior when they are not following, and the power of supervision and the fluke mind that the law cannot be enforced when each one is an offender. The research results show that the generation of herding effect in unsafe behavior is affected by the benefits and costs of following unsafe behavior, and supervision of organization. Finally, based on the results of numerical analysis, this paper will give suggestions for the control of the herding effect in unsafe behavior and provide theoretical support for the phenomenon of group unsafe behavior in safe production.

Keywords: Safety production; unsafe behavior; herding effect; evolutionary game