

DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.202011017



# 正式网络中施工组织安全行为 传播仿真分析

刘世杰, 李书全

(天津财经大学 管理科学与工程学院, 天津 300222)

**摘要:** 为了降低建筑施工安全事故发生率,借鉴社会网络理论与博弈论,使用多主体建模的方法模拟施工组织正式网络中组织安全行为传播的过程,通过 Netlogo 软件的行为空间工具收集不同情境下的仿真数据,使用回归分析方法分析网络结构特征和安全行为传播参数对组织安全行为的影响机制.结果表明:网络密度、出度中心势、聚类系数显著正向影响组织安全行为;中间中心势、平均路径长度显著负向影响组织安全行为;入度中心势对组织安全行为没有显著影响;组织自我学习安全行为的能力、传播安全行为的能力、吸收安全行为的能力、传播安全行为的概率、接受安全行为的概率显著正向影响组织安全行为.

**关键词:** 正式网络; 施工组织; 组织安全行为; 行为传播; 多主体建模

**中图分类号:** X 947      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-5013(2021)05-0644-09

## Simulation Analysis on Safety Behavior Propagation of Construction Organization in Formal Network

LIU Shijie, LI Shuquan

(School of Management Science and Engineering, Tianjin University of Finance and Economics, Tianjin 300222, China)

**Abstract:** In order to reduce the occurrence rate of building construction safety accidents, based on social network theory and game theory, the multi-agent modeling method was used to simulate the process of organizational safety behavior propagation in the formal network of construction organization. The simulation data in different situations were collected by the behavior space tool of Netlogo software, and the regression analysis method was used to analyze the impact mechanisms of network structure characteristics and safety behavior propagation parameters on organizational safety behavior. The results show that network density, outdegree centralization and cluster coefficient have significant positive effect on organizational safety behavior. Betweenness centralization and average path length have significant negative effect on organizational safety behavior. Indegree centralization has no significant effect on organizational safety behavior. The ability of organization self-learning safety behavior, the ability of propagating safety behavior, the ability of absorbing safety behavior, the probability of propagating safety behavior and the probability of accepting safety behavior have significant positive effect on organizational safety behavior.

**Keywords:** formal network; construction organization; organizational safety behavior; behavior propagation; multi-agent modeling

近年来,建筑施工安全事故频发,不仅阻碍了社会经济的高速发展,还严重影响了建筑行业的可持续发展和社会和谐. 为了降低建设项目事故发生率,国内外学者针对施工组织安全安全水平的提升进行了广泛的研究,主要侧重于组织安全行为的构成<sup>[1]</sup>、影响因素<sup>[2-3]</sup>和作用结果<sup>[4-5]</sup>等方面. 这些研究为有效预防安全事故的发生提供了理论依据,但缺乏对施工活动主体之间网络关系的分析,故无法针对施工活动的特殊性做出合理的行为决策. 相关研究表明,类似信息传播,人的行为可通过一定的社会接触在人群中传播<sup>[6]</sup>. 目前,在建筑施工管理领域中,关于行为传播的研究主要集中于个体不安全行为的传播过程<sup>[7-9]</sup>、传播影响因素<sup>[10]</sup>、形成过程<sup>[11]</sup>和关系网络<sup>[12]</sup>等方面,也有学者对个体安全行为的互动过程进行研究<sup>[13]</sup>,但缺少对组织安全行为传播的相关分析,正式网络中施工组织安全行为传播的仿真研究尚不多见. 同时,施工组织安全行为的传播机制和影响因素也未被充分探讨.

基于此,本文以建筑施工项目部为研究对象,考虑我国施工安全的管理情境,将社会网络理论与博弈论相结合,使用 Netlogo 软件构建正式网络中施工组织安全行为传播仿真模型,分析网络结构特征和安全行为传播参数对组织安全行为的影响机制.

## 1 研究概念的界定

### 1.1 施工组织及其正式网络

施工组织是指建筑施工项目部. 施工组织的正式网络是指建筑施工项目部内各个部门在工作上因合作关系建立的网络,部门之间经常交流工作的各种信息. 选取网络密度、度数中心势、中间中心势、平均路径长度和聚类系数作为正式网络的结构特征. 网络密度是指施工组织正式网络中各个部门之间的互动程度;度数中心势是指网络是否存在围绕某个重要部门传播行为的趋势,包括出度中心势和入度中心势;中间中心势是指存在某些部门在行为传播中扮演中介作用的角色,在一定程度上控制其他部门之间的行为传递;平均路径长度是指网络中各个部门之间的平均距离;聚类系数是指与同一个部门联系的另外两个部门也联系的程度,用于衡量网络整体的凝聚性.

### 1.2 施工组织安全行为传播

施工组织安全行为指建筑施工组织在日常管理和作业过程中的安全行为,包括施工项目部安全规章制度和安全责任体系的制定、安全施工方案和安全检查计划的编制、施工过程的安全检查、对安全隐患的整改、安全设施和劳动防护用品的配备、对员工的安全培训和考核等安全行为. 施工组织安全行为传播是指部门的安全行为通过部门间的行为模仿和学习在网络中传播的过程.

## 2 仿真模型的构建

### 2.1 研究假设

征求多位项目经理、部门主管和安全员的意见,提出以下 5 点假设.

1) 施工组织的正式网络是一个二值有向网络,每个节点代表一个部门,节点间的连线表示部门之间存在信息交流,节点之间无连线表示部门之间不存在信息交流,连线的箭头表示信息传播的方向. 施工组织的正式网络包含 10 个节点,分别为工程部、安全部、质量部、材料部、设备部、技术部、财务部、合同部、资料部和后勤部,并指定其中某些部门之间必须存在信息交流,而其他部门之间信息交流的关系则是随机建立的.

2) 在正式网络中,各部门是以某一概率随机传播安全行为.

3) 施工组织内的每个部门在进行行为决策时是相互独立的,同时,能够感知邻接部门传播的安全行为,并能准确地判断接受与传播安全行为带来的收益与成本.

4) 任意两个部门均为有限理性,根据自身的收益,以某一概率传播或接受安全行为,或者以某一概率不传播或不接受安全行为.

5) 在施工组织的正式网络中,假定安全部的安全行为水平最高.

### 2.2 问卷调查

调查问卷包括 3 个部分,第 1 部分是调查仿真模型中各主体属性的取值范围,第 2 部分是调查博弈

矩阵各参数的取值范围,第 3 部分是调查仿真模型主要属性的初始值。

选取北京市、天津市、河北省和江苏省的施工项目作为调查对象,对施工项目的项目经理、部门主管和安全员发放问卷,发放形式包括现场发放和电子邮箱两种方式。此次问卷共发放 116 份,得到有效问卷 100 份,回收率为 86.2%。调查样本主要包括民用建筑工程、工业建筑工程和市政公用工程等项目类型,分别占总项目数目的 61%,22%,17%。被调查者年龄多集中于 18~50 岁,与实践中管理人员的年龄分布情况具有较好的一致性。被调查者的学历多为大专和本科,调查数据能够在一定程度上代表项目管理人员的现状。被调查者工作年限分布较为均衡,能够代表项目管理人员的工作年限特征。

2.3 主体属性的设定

主体包括部门(units)、行为(behs)和网络连接(links)。对主体属性的取值范围进行调研,将收集的数据结果取平均值,从而确定每个属性的取值范围。主体属性及其取值范围,如表 1 所示。

表 1 主体属性及其取值范围  
Tab.1 Agent attributes and their values range

主体	属性	取值范围	注释
部门	simax	[1,10]的随机整数	施工组织中部门的安全行为水平最大值
	beh_lower_limit	[1,10]的随机整数	部门 $i$ 的安全行为水平下限
	beh_upper_limit	[2,10]的随机整数	部门 $i$ 的安全行为水平上限
	propagate_lower_limit	(0,1)的随机小数	部门 $i$ 传播安全行为的能力下限
	recieve_lower_limit	(0,1)的随机小数	部门 $i$ 吸收安全行为的能力下限
	$m$	$\geq 0$	部门 $i$ 的安全行为从 $t$ 到 $t+1$ 时刻传播给其他部门的次数
	c_lower_limit	[0,0.2)的随机小数	部门 $i$ 自我学习安全行为的能力下限
	c_upper_limit	(0.2,0.4]的随机小数	部门 $i$ 自我学习安全行为的能力上限
	$u$	[1%,100%]	部门 $i$ 传递的行为是安全行为的概率
	$\alpha$	(0,1)的随机小数	部门 $i$ 传播安全行为的概率
	$\beta$	(0,1)的随机小数	部门 $i$ 接受安全行为的概率
	$\alpha^*$	(0,1)的小数	纳什均衡解
	$\beta^*$	(0,1)的小数	纳什均衡解
行为	safety_beh?	true,false	判断传递的行为是否为安全行为
	from_unit	所有部门	传播安全行为的部门
	to_unit	所有部门	接受安全行为的部门
网络连接	connectivity	in,out,double	其他节点指向该节点的连接,该节点指向其他节点的连接,两节点之间的双向连接

部门  $i$  传播安全行为的能力  $e_i$  为(propagate\_lower\_limit,1)的随机小数。部门  $i$  吸收安全行为的能力  $f_i$  为(recieve\_lower\_limit,1)的随机小数。

借鉴文献[14-15]的研究思路,设定施工组织在  $t$  时刻的安全行为水平为每个部门在  $t$  时刻的安全行为水平的平均值,计算公式为

$$OS(t) = \frac{\sum_{i=1}^n S_i(t)}{n}.$$

(1)

式(1)中:OS( $t$ )为施工组织在  $t$  时刻的安全行为水平的平均值; $n$  为部门数量; $S_i(t)$  为部门  $i$  在  $t$  时刻的安全行为水平。

2.4 交互规则的设定

交互规则的设定如下,在正式网络中,对部门 A 而言,首先,判断其是否有邻接部门,如果有,再判断传递的行为是否为安全行为,如果不是安全行为,则选择其他邻接部门,如果是安全行为,就比较两个部门的安全行为水平。如果邻接部门 B 的安全行为水平大于等于部门 A,部门 A 则不进行安全行为的传播,而选择其他邻接部门进行传播;如果部门 B 的安全行为水平小于部门 A,则两个部门分别有两个策略,即是否传播安全行为和是否接受安全行为。部门 A 传播安全行为的概率为  $\alpha$ ,不传播安全行为的概率为  $1-\alpha$ ;部门 B 接受安全行为的概率为  $\beta$ ,不接受安全行为的概率为  $1-\beta$ 。

基于以上设定,可以建立博弈矩阵,如表 2 所示。表 2 中: $P_1, P_2$  分别为部门 A 不传播安全行为、部

门 B 不接受安全行为时, 部门 A 和部门 B 的收益;  $\Delta P_1$  为部门 A 传播安全行为后部门 B 信任值的增量;  $\Delta P_2$  为部门 B 接收安全行为后的收益增量;  $\Delta P_3$  为部门 A 没有传播安全行为, 部门 B 信任值的减少量;  $C_1$  为传播安全行为投入的成本;  $C_2$  为搜寻安全行为的成本;  $C_3$  为学习安全行为的成本. 由于参与部门的最优选择不是确定的策略, 所以该博弈存在混合策略的纳什均衡.

表 2 博弈矩阵  
Tab. 2 Matrix of game

部门 A	部门 B	
	接受 $\beta$	不接受 $1-\beta$
传播 $\alpha$	$P_1 + \Delta P_1 - C_1, P_2 + \Delta P_2 - C_2 - C_3$	$P_1 - C_1, P_2$
不传播 $1-\alpha$	$P_1 - \Delta P_3, P_2 - C_2$	$P_1, P_2$

参与部门在这类博弈中的最优策略是以一定的概率随机选择各个策略. 从部门 A 的角度而言, 传播安全行为的期望收益  $E_1$  为

$$E_1 = \beta(P_1 + \Delta P_1 - C_1) + (1 - \beta)(P_1 - C_1) = P_1 - C_1 + \beta \Delta P_1. \tag{2}$$

不传播安全行为的期望收益  $E_2$  为

$$E_2 = \beta(P_1 - \Delta P_3) + (1 - \beta)P_1 = P_1 - \beta \Delta P_3. \tag{3}$$

令  $E_1 = E_2$ , 可得

$$\beta^* = \frac{C_1}{\Delta P_1 + \Delta P_3}. \tag{4}$$

当部门 B 以  $\beta^*$  的概率接受安全行为, 以  $1 - \beta^*$  的概率不接受安全行为时, 部门 A 的期望收益在传播与不传播安全行为之间无区别, 部门 A 可以随机选择是否传播. 当  $\beta > \beta^*$ , 部门 A 的最优策略是传播安全行为. 当  $\beta < \beta^*$ , 部门 A 的最优策略是不传播安全行为.

同理, 部门 B 接受安全行为的期望收益  $E_3$  为

$$E_3 = \alpha(P_2 + \Delta P_2 - C_2 - C_3) + (1 - \alpha)(P_2 - C_2) = \alpha(\Delta P_2 - C_3) + P_2 - C_2. \tag{5}$$

不接受安全行为的期望收益  $E_4$  为

$$E_4 = \alpha P_2 + (1 - \alpha)P_2 = P_2. \tag{6}$$

令  $E_3 = E_4$ , 可得

$$\alpha^* = \frac{C_2}{\Delta P_2 - C_3}. \tag{7}$$

当部门 A 以  $\alpha^*$  的概率传播安全行为, 以  $1 - \alpha^*$  的概率不传播安全行为时, 部门 B 的期望收益在接受与不接受安全行为之间并无区别, 部门 B 可以随机选择是否接受安全行为. 当  $\alpha > \alpha^*$ , 部门 B 的最优策略是接受安全行为. 当  $\alpha < \alpha^*$ , 部门 B 的最优策略是不接受安全行为.

因此, 纳什均衡解为  $(\alpha^*, \beta^*)$ . 因为博弈矩阵的参数与博弈双方有关, 所以设定参数为随机小数. 通过调研, 将收集的数据结果取平均值, 确定参数的取值范围, 如表 3 所示.

2.5 行为传播规则的设定

参考文献[16]的研究思路, 安全行为水平的提升包括自我学习和向邻接部门学习两个部分, 因此, 部门  $i$  在  $t+1$  时刻的安全行为水平  $S_i(t+1)$  为

$$S_i(t+1) = S_i(t) + S_i^s(t+1) + S_i^k(t+1). \tag{8}$$

式(8)中:  $S_i^s(t+1)$  为从  $t$  时刻到  $t+1$  时刻部门  $i$  通过自我学习提升的安全行为水平;  $S_i^k(t+1)$  为从  $t$  时刻到  $t+1$  时刻部门  $i$  通过向邻接部门学习而提升的安全行为水平.

借鉴文献[17]知识扩散的思路, 假设部门的安全行为水平越高, 它的安全行为自我学习的能力就越强, 因此, 该部门安全行为水平提升得越快.

此外, 参考文献[18]的模型设定, 部门的安全行为水平在一定时期内不会无限制地增长, 应该存在一个上限值. 因此, 使用 logistic 函数反映部门通过自我学习提升安全行为水平的过程, 构建部门自我

表 3 参数取值范围  
Tab. 3 Values range of parameters

参数	取值范围
$P_1$	[8, 12] 的随机小数
$P_2$	[8, 12] 的随机小数
$\Delta P_1$	[2, 4] 的随机小数
$\Delta P_2$	[4, 6] 的随机小数
$\Delta P_3$	[2, 4] 的随机小数
$C_1$	[2, 4] 的随机小数
$C_2$	[1, 2] 的随机小数
$C_3$	[1, 2] 的随机小数

学习安全行为的函数,有

$$S_i^s(t+1)=S_i(t)\epsilon_i\left(1-\frac{S_i(t)}{S_i^{\max}}\right). \tag{9}$$

式(9)中: $S_i^{\max}$  为部门  $i$  的安全行为水平上限; $\epsilon_i$  为部门  $i$  自我学习的能力.

如果在  $t$  时刻,部门  $i$  的安全行为水平  $S_i(t)$  小于邻接部门  $j$  的安全行为水平  $S_j(t)$ ,且两部门博弈的结果是部门  $i$  选择接受安全行为,同时,部门  $j$  选择传播安全行为,则发生安全行为的传播,且传播方向为部门  $j$  到部门  $i$ . 在  $t+1$  时刻,部门  $j$  的安全行为水平不变. 受个体意愿、传播成本、时间等因素影响,部门  $j$  的安全行为不会毫无保留地传播给部门  $i$ <sup>[17]</sup>.

因此,经过多次行为传播后,假定部门  $i$  接受部门  $j$  的安全行为总量达到部门  $j$  安全行为水平的 80% 时,将不再向该部门学习.

参考文献[19]对行为传播的规则设定和文献[20]对知识传播的研究思路,设定部门  $i$  和部门  $j$  从  $t$  到  $t+1$  时刻的安全行为水平的变化函数为

$$S_j^k(t+1)=0, \tag{10}$$

$$S_i^k(t+1)=\begin{cases} e_j f_i[S_j(t)-S_i(t)], & S_i(t)<80\%\times S_j(t), \\ 0, & S_i(t)\geq 80\%\times S_j(t). \end{cases} \tag{11}$$

式(10)~(11)中: $e_j$  为部门  $j$  传播安全行为的能力.

假设在安全行为传播过程中,传播安全行为的能力  $e$  和吸收安全行为的能力  $f$  会随着时间发生变化. 随着传播次数的增加,部门影响力逐渐提高<sup>[19]</sup>. 因此,设定  $e_i$  的变化函数为

$$e_i(t+1)=e_i(t)+\frac{\sum_{k_i} m}{T}. \tag{12}$$

式(12)中: $e_i(t+1)$  为部门  $i$  在  $t+1$  时刻传播安全行为的能力; $e_i(t)$  为部门  $i$  在  $t$  时刻传播安全行为的能力; $m$  为从  $t$  到  $t+1$  时刻部门  $i$  的安全行为传播给某个部门的次数; $k_i$  为接受部门  $i$  安全行为的部门数量; $\sum_{k_i} m$  为从  $t$  到  $t+1$  时刻部门  $i$  的安全行为传播给其他部门的总次数; $T$  为总仿真时间.

在传播若干次后,随着部门  $i$  的安全行为水平的增加,部门间的安全行为水平的差距逐渐减少,部门  $i$  不再容易接受其他部门的安全行为,该部门吸收安全行为的能力逐渐减小<sup>[19]</sup>. 因此,设定  $f$  的变化函数为

$$f_i(t+1)=f_i(t)-\frac{S_i(t)}{\sum_{q_i} S_i(t)}. \tag{13}$$

式(13)中: $f_i(t+1)$  为部门  $i$  在  $t+1$  时刻吸收安全行为的能力; $f_i(t)$  为部门  $i$  在  $t$  时刻吸收安全行为的能力; $q_i$  为从  $t$  到  $t+1$  时刻传播给部门  $i$  安全行为的部门数量; $\sum_{q_i} S_i(t)$  为从  $t$  到  $t+1$  时刻部门  $i$  从其他部门吸收的安全行为总量.

2.6 设计仿真流程

施工组织安全行为传播的仿真有如下 5 个流程.

1) 创建正式网络.

2) 安全部根据交互规则与所有邻接部门进行博弈,以某一概率传播安全行为,并根据行为传播规则更新部门的安全行为水平.

3) 对任意一个部门,根据交互规则和行为传播规则进行若干次部门间安全行为的传播,直至任意两个部门间的安全行为水平的差距小于 20% 为止.

4) 计算正式网络的结构特征,包括网络密度、出度中心势、入度中心势、中间中心势、平均路径长度和聚类系数,计算施工组织安全行为水平,记录仿真模型的参数值.

5) 在不同网络结构和安全行为传播参数的情境下,观察组织安全行为水平的变化情况.

### 3 仿真分析

使用 Netlogo 软件模拟施工组织安全行为的传播过程, 仿真模型界面, 如图 1 所示. 图 1 中: 红色线为正式网络中的连接; 黄色线为安全行为传递过程中形成的连接.

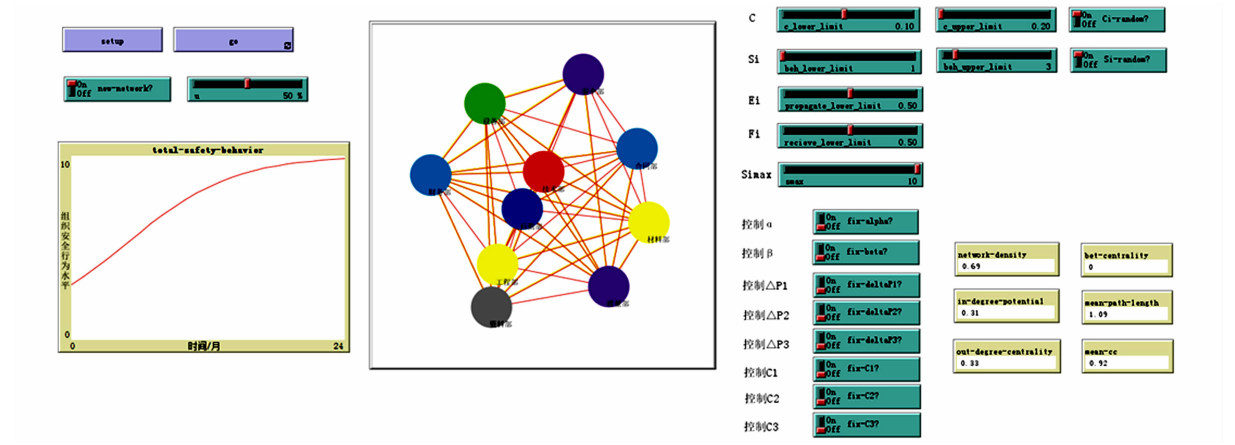


图 1 正式网络中的施工组织安全行为传播仿真模型界面

Fig. 1 Interface of safety behavior propagation simulation model of construction organization in formal network

#### 3.1 初始模型

对模型属性初始值进行调研, 将收集的数据结果取平均值, 确定主要属性的初始值, 如表 4 所示.

对调查问卷的数据进行整理, 计算出项目工期的平均值为 24 月, 模型属性不会在一个月 内发生较大的变化. 因此, 将时间步单位设定为月,  $T=24$ .

组织安全行为水平的变化, 如图 2 所示. 由图 2 可知: 组织安全行为提升的过程包括两部分, 一方面, 通过部门自我学习安全行为的方式, 组织安全行为水平的增长速率随时间先增后减; 另一方面, 在初始时刻各部门的安全行为水平差距较大, 通过行为传播, 组织安全行为水平的提升速度很快, 随着部门间安全行为水平的差距减小, 提升速度逐渐变慢, 并最终趋近于零. 因此, 施工组织安全行为水平的变化具有 S 型增长曲线的特征.

#### 3.2 分析与讨论

通过锁定模型中一些参数的取值, 研究特定参数对组织安全行为的影响规律. 利用 Netlogo 软件的行为空间工具收集不同参数组合下的仿真数据, 最后利用 SPSS 软件分析数据.

##### 3.2.1 正式网络的结构特征对组织安全行为的影响

建筑施工活动中存在的各种网络 (如咨询网络、采购网络、合同网络和进度控制网络等) 对提高项目管理水平具有重要的作用<sup>[21]</sup>. 施工组织正式网络作为传递安全行为的载体, 网络的结构特征在一定程度上对组织安全行为具有不可忽视的影响.

基于此, 提出如下假设: 正式网络结构特征 (网络密度、出度中心势、入度中心势、中间中心势、平均路径长度和聚类系数) 与组织安全行为存在显著的关系.

将 new-network? 设置为 on, 表示随机生成的网络结构会发生变化, 同时, 使其他参数在情景模拟过程中保持不变. 利用行为空间工具进行 100 次仿真实验, 随机创建出 100 个不同的正式网络, 以网络

表 4 模型主要属性的初始值

Tab. 4 Initial values of model main attributes

属性	初始值
$u$	50%
c_lower_limit	0.1
c_upper_limit	0.2
beh_lower_limit	1
beh_upper_limit	3
propagate_lower_limit	0.5
recieve_lower_limit	0.5
simax	10

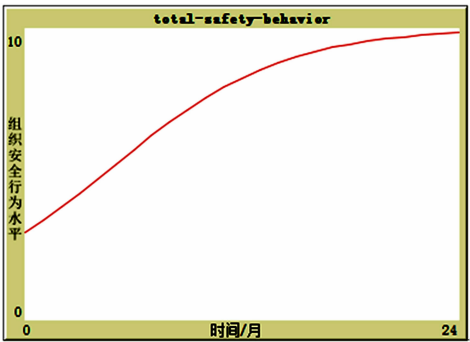


图 2 组织安全行为水平的变化

Fig. 2 Changes of organizational safety behavior level

结构特征为自变量,以组织安全行为在仿真周期中的平均值为因变量进行回归分析,回归分析结果,如表 5 所示.表 5 中:Sig. 为显著性检验的概率值; $R^2$  为多元相关系数的平方.

表 5 正式网络结构特征与组织安全行为的回归分析结果

自变量	因变量	标准化回归系数	Sig.	$R^2$	相关性
网络密度	组织安全行为	0.667	0.000	0.445	正相关
出度中心势	组织安全行为	0.598	0.000	0.358	正相关
入度中心势	组织安全行为	-0.126	0.211	0.016	无关
中间中心势	组织安全行为	-0.533	0.000	0.284	负相关
平均路径长度	组织安全行为	-0.643	0.000	0.413	负相关
聚类系数	组织安全行为	0.522	0.000	0.273	正相关

- 由表 5 可得以下 6 个结论.
- 1) 正式网络的网络密度与组织安全行为存在显著的正相关关系(显著正向影响).提升网络密度有利于提升部门之间的凝聚力,有利于形成良好的安全氛围,进而提升组织安全行为水平.
  - 2) 出度中心势与组织安全行为存在显著的正相关关系(显著正向影响).出度中心势越大,越有利于发挥核心部门的安全引领作用,传递安全行为习惯,有力提升组织安全行为水平.
  - 3) 入度中心势与组织安全行为不存在显著的相关关系(没有显著影响).入度中心势越大,越有利于提升该部门的安全行为水平,但是对组织整体安全行为的影响并不大.
  - 4) 中间中心势与组织安全行为存在显著的负相关关系(显著负向影响).中间中心势反映安全行为需要依赖某些关键部门进行传递,阻碍安全行为传播的路径,不利于提升组织安全行为水平.
  - 5) 平均路径长度与组织安全行为存在显著的负相关关系(显著负向影响).平均路径长度的增大,会增加各部门联系的距离,不利于安全行为的传播.
  - 6) 聚类系数与组织安全行为存在显著的正相关关系(显著正向影响).行为的形成非常复杂,需要多次社会性的强化,高聚类网络具有冗余连接结构,有利于行为的形成、传播和巩固<sup>[6]</sup>.

3.2.2 安全行为传播参数对组织安全行为的影响 系统重复进行 100 次仿真实验,以安全行为传播参数(自我学习安全行为的能力、传播安全行为的能力、吸收安全行为的能力、传播安全行为的概率、接受安全行为的概率)为自变量,以组织安全行为在仿真周期中的平均值为因变量进行回归分析,回归分析结果,如表 6 所示.

表 6 安全行为传播参数与组织安全行为的回归分析结果

自变量	因变量	标准化回归系数	Sig.	$R^2$	相关性
自我学习安全行为的能力	组织安全行为	0.586	0.000	0.344	正相关
传播安全行为的能力	组织安全行为	0.619	0.000	0.383	正相关
吸收安全行为的能力	组织安全行为	0.512	0.000	0.262	正相关
传播安全行为的概率	组织安全行为	0.503	0.000	0.253	正相关
接受安全行为的概率	组织安全行为	0.469	0.000	0.220	正相关

- 由表 6 可得以下 5 个结论.
- 1) 将 Ci-random? 设为 true,表示部门自我学习安全行为的能力为[c\_lower\_limit,c\_upper\_limit]的随机小数,其他参数保持不变.将部门自我学习安全行为的能力平均值代表组织自我学习安全行为的能力.结果表明,组织自我学习安全行为的能力与组织安全行为存在显著的正相关关系(显著正向影响).部门自我学习安全行为的能力提高后,有利于提升本部门的安全行为水平,最终促进组织安全行为水平的提高.
  - 2) 设定 propagate\_lower\_limit 的值为 0.5,表示部门传播安全行为的能力在[0.5,1.0]随机生成,其他参数保持不变.用部门传播安全行为的能力平均值代表组织传播安全行为的能力.结果表明,组织传播安全行为的能力与组织安全行为存在显著的正相关关系(显著正向影响).当部门传播安全行为的能力提高时,加强了安全行为的传播效果,可提升组织安全行为水平.

3) 设定 `recieve_lower_limit` 的值为 0.5, 表示部门吸收安全行为的能力在  $[0.5, 1.0]$  随机生成, 其他参数保持不变. 用部门吸收安全行为的能力平均值代表组织吸收安全行为的能力. 结果表明, 组织吸收安全行为的能力与组织安全行为存在显著的正相关关系(显著正向影响). 当部门吸收安全行为的能力提高时, 意味着部门模仿和学习安全行为的速度变快, 更加容易吸收内化为自身的安全行为, 进而提升组织安全行为水平.

4) 设定 `fix-alpha?` 的值为 `false`, 表示部门传播安全行为的概率为  $(0, 1)$  的随机小数, 其他参数保持不变. 用部门传播安全行为的概率平均值代表组织传播安全行为的概率. 结果表明, 组织传播安全行为的概率与组织安全行为存在显著的正相关关系(显著正向影响). 根据上文的研究, 当传播安全行为的概率提高时, 部门在博弈中有很大概率选择接受安全行为, 可促进安全行为传播, 进而提升施工组织安全行为水平.

5) 设定 `fix-beta?` 的值为 `false`, 表示接受安全行为的概率为  $(0, 1)$  的随机小数, 其他参数保持不变. 用部门接受安全行为的概率平均值代表组织接受安全行为的概率. 结果表明, 组织接受安全行为的概率与组织安全行为存在显著的正相关关系(显著正向影响). 当接受安全行为的概率提高时, 部门在博弈中有很大概率选择传播安全行为, 通过榜样示范, 最终提升组织安全行为水平.

### 3.3 管理启示

1) 重视影响安全行为传播的核心部门. 一个部门的度数中心度是与该部门直接相连的其他部门的个数, 度数中心度较高的部门是控制安全行为传播的核心部门. 施工组织应充分发挥核心部门的影响力, 使核心部门为其他部门树立榜样, 充分发挥安全引领作用, 传播更多的安全行为、安全知识和经验, 利用群体压力与从众心理形成安全行为的条件反射, 从而塑造良好的安全行为习惯, 进而提升组织安全行为水平.

2) 利用安全行为传递的“桥”位置. 一个部门的中间中心度测量的是该部门充当中介作用的程度, 中间中心度较高的部门又称为“桥”, “桥”可以传播行为, 让行为通过“桥”在原本彼此隔绝的网络中传递. 施工组织应对处于“桥”位置的部门加强管理, 使缺乏联系的部门之间顺利进行安全行为的传递. 如果发现两个部门之间确实没有直接的联系, 可以增加第三者连接这两个部门, 打通行为传递渠道.

3) 加强各部门之间的安全沟通. 增大各部门之间安全沟通的频率, 项目经理、部门主管、安全员要经常召开安全会议, 经常组织部门的安全培训, 通过多种方式进行安全沟通, 如安全会议、安全培训、面对面的交谈、电话沟通、网络沟通(E-mail、微信、QQ)和书面沟通(正式文件、备忘录)等, 加强部门之间安全经验和安全技巧的分享, 尤其是一些安全隐性知识的现场传教, 营造良好的安全氛围, 使安全意识深入人心.

4) 做好安全培训. 通过理论讲解和现场实习, 使员工掌握安全行为、安全知识和经验, 并能运用于日常的施工管理中. 安全培训的方式应灵活多样, 可以通过安全知识竞赛、网上学习、身边的榜样学习、观看施工安全事故的视频等多种方式进行培训. 安全培训的内容应简单易懂, 具有趣味性, 在不知不觉中提高员工的安全素质. 为了检查培训效果, 可以采取考核的办法, 不让培训流于形式.

## 4 结论

1) 使用多主体建模的方法, 发现施工组织正式网络的结构特征对组织安全行为的影响规律: 网络密度、出度中心势、聚类系数显著正向影响组织安全行为; 中间中心势、平均路径长度显著负向影响组织安全行为; 入度中心势对组织安全行为没有显著影响.

2) 施工组织的安全行为传播参数对组织安全行为的影响规律如下: 自我学习安全行为的能力、传播安全行为的能力、吸收安全行为能力、传播安全行为的概率、接受安全行为的概率显著正向影响组织安全行为.

3) 由于前期调研中项目部内部的部门数量普遍偏少, 导致仿真中的网络规模有限, 因此, 未来需要选取包含部门数较多的组织作为研究对象, 分析复杂网络情境下组织安全行为的变化规律.



参考文献：

[1] 曹庆仁,李凯. 各种煤矿安全管理行为及其相互影响作用研究[J]. 安全与环境学报,2015,15(1):6-10. DOI:10.13637/j. issn. 1009-6094. 2015. 01. 001.

[2] 税永波,田水承,李华. 企业安全生产组织行为的长效机制探讨[J]. 安全与环境学报,2015,15(4):163-165. DOI:10.13637/j. issn. 1009-6094. 2015. 04. 035.

[3] 李书全,董静. 基于贝叶斯网络的社会资本与组织安全行为概率评估[J]. 统计与决策,2018,34(17):185-188. DOI:10.13546/j. cnki. tjyc. 2018. 17. 046.

[4] 刘素霞,梅强,杜建国,等. 企业组织安全行为、员工安全行为与安全绩效: 基于中国中小企业的实证研究[J]. 系统管理学报,2014,23(1):118-129.

[5] WINGE S,ALBRECHTSEN E,ARNESEN J. A comparative analysis of safety management and safety performance in twelve construction projects[J]. Journal of Safety Research,2019,71(6):139-152. DOI:10.1016/j. jsr. 2019. 09. 015.

[6] CENTOLA D. The spread of behavior in an online social network experiment[J]. Science,2010,329(5996):1194-1197. DOI:10.1126/science. 1185231.

[7] 赵雷,柴国荣,宗胜亮. 面向工程事故防控的违规操作行为扩散研究[J]. 系统管理学报,2017,26(3):448-455.

[8] LIANG Huakang,ZHANG Shoujian. Impact of supervisors' safety violations on an individual worker within a construction crew[J]. Safety Science,2019,120:679-691. DOI:10.1016/j. ssci. 2019. 08. 014.

[9] 王丹,关莹,贾倩. 基于社会网络分析的建筑工人不安全行为传播路径研究[J]. 中国安全生产科学技术,2018,14(9):180-186. DOI:10.11731/j. issn. 1673-193x. 2018. 09. 029.

[10] 杨振宏,丁光灿,张涛,等. 基于 SEM 的建筑工人不安全行为传播影响因素研究[J]. 安全与环境学报,2018,18(3):987-992. DOI:10.13637/j. issn. 1009-6094. 2018. 03. 030.

[11] 韩豫,梅强,刘素霞,等. 建筑工人习惯性不安全行为形成过程及其影响因素[J]. 中国安全科学学报,2015,25(8):29-35. DOI:10.16265/j. cnki. issn1003-3033. 2015. 08. 005.

[12] GUO Shengyu,ZHOU Xinyu,TANG Bing,*et al.* Exploring the behavioral risk chains of accidents using complex network theory in the construction industry[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications,2020,560:125012. DOI:10.1016/j. physa. 2020. 125012.

[13] ZHANG Peiyao,LI Nan,JIANG Zhongming,*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. DOI:10.1016/j. autcon. 2018. 10. 015.

[14] 赵晨,陈国权,高中华. 领导个人学习对组织学习成效的影响: 基于情境型二元平衡的视角[J]. 管理科学学报,2014,17(10):38-49.

[15] 陈伟,周文,郎益夫. 基于集群创新合作网络的知识创新与扩散过程建模及仿真研究[J]. 运筹与管理,2014,23(6):257-265. DOI:10.3969/j. issn. 1007-3221. 2014. 06. 035.

[16] 张薇,徐迪. 动态知识网络上的知识积累过程模型[J]. 管理科学学报,2014,17(11):122-128.

[17] 巴志超,李纲,朱世伟. 科研合作网络的知识扩散机理研究[J]. 中国图书馆学报,2016,42(5):68-84. DOI:10.13530/j. cnki. jlis. 160024.

[18] 周文,陈伟,郎益夫. 集群创新网络知识动态增长研究: 基于过程视角[J]. 系统工程学报,2015,30(4):431-441. DOI:10.13383/j. cnki. jse. 2015. 04. 001.

[19] 石娟,郑鹏,徐凌峰,等. 小世界网络中的大学生危机行为传播仿真研究[J]. 中国安全科学学报,2019,29(12):21-27. DOI:10.16265/j. cnki. issn1003-3033. 2019. 12. 004.

[20] 张理,魏奇锋,顾新. 科研合作网络中的知识扩散种子选择研究[J]. 现代情报,2020,40(2):122-131. DOI:10.3969/j. issn. 1008-0821. 2020. 02. 014.

[21] PRYKE S. Social network analysis in construction[M]. Hoboken:John Wiley & Sons,2012.

(责任编辑：钱筠      英文审校：方德平)