DOI:10.19951/j.cnki.1672-9331.20230103001 **文章编号**:1672-9331(2024)05-0113-10
引用格式:李明顺,邓鑫涛,刘紫薇,等.智慧工地建设参与行为研究:基于系统动力学的演化博弈分析[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2024,21(5):113-122.
Citation: LI Mingshun, DENG Xintao, LIU Ziwei, et al. Research on participation behavior in smart site construction: evolutionary game analysis based on system dynamics [J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2024, 21(5): 113-122.

智慧工地建设参与行为研究——基于系统动力学的演化博弈分析

李明顺[1,2],邓鑫涛[1],刘紫薇[1],黎嘉琪[1]
(1.长沙理工大学 交通运输工程学院,湖南 长沙 410114;2.长沙理工大学 交通基础设施智慧建造与生态乡村建设管理湖南省高等学校重点实验室,湖南 长沙 410114)

摘 要:**【目的】**推进智慧工地建设,加快企业建造方式转型升级。**【方法】**引入演化博弈论和系统动力学方法,构建智慧工地建设政企参与行为系统动力学(system dynamics,SD)演化博弈模型,在深入探讨政府补贴与企业参与智慧工地建设两者作用机理的基础上,对设定的系统初始策略和外部变量进行仿真分析。**【结果】**政企双方参与智慧工地建设的博弈行为存在演化稳定均衡,系统最终稳定状态与双方利益主体选择策略的初始比例有关,且政府补贴存在一个阈值。**【结论】**政企双方的参与意愿相互影响,当政府选择积极的补贴策略时对智慧工地建设的发展具有正向作用,但需合理控制补贴区间以防止出现负面效应。

关键词:智慧工地;系统动力学;数值仿真;政府补贴;演化博弈
中图分类号:TU7 **文献标志码**:A

Research on participation behavior in smart site construction —evolutionary game analysis based on system dynamics

LI Mingshun[1,2], DENG Xintao[1], LIU Ziwei[1], LI Jiaqi[1]
(1. School of Traffic & Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;
2. Hunan Provincial Key Laboratory of Intelligent Construction of Transportation Infrastructure and Ecological Village Construction Management, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: [**Purposes**] This paper aims to promote the construction of smart sites and accelerate the transformation and upgrading of enterprise construction methods. [**Methods**] Evolutionary game theory and system dynamics (SD) method were introduced to build an SD-based evolutionary game model for government and enterprise participation behaviors in smart site construction. On the basis of an in-depth discussion on the mechanism of government subsidies and enterprise participation in smart site construction, the initial strategy and external variables of the system were simulated. [**Findings**] The research shows that there is an evolutionary stable equilibrium in the behavioral game of government and enterprise participation in smart site construction, and the

收稿日期:2023-01-03;**修回日期**: 2023-02-05;**接受日期**: 2023-02-06
基金项目:国家自然科学基金项目(52204202);湖南省教育厅科研项目(22A0202)
通信作者:李明顺(1970—)(ORCID:0000-0002-6357-4584),男,副教授,主要从事工程项目管理方面的研究。E-mail:lms5350@163.com

final stable state of the system is related to the initial proportion of the selection strategy of both parties' interest subjects. In addition, there is a threshold of government subsidies. [**Conclusions**] The participation willingness of government and enterprise affects each other. When the government chooses an active subsidy strategy, it has a positive effect on the development of smart site construction, but the subsidy range requires reasonable control to prevent negative effects.

Key words: smart site; system dynamics; numerical simulation; government subsidy; evolutionary game

Foundation items: Project (52204202) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (22A0202) supported by Research Project of Education Department of Hunan Province

Corresponding author: LI Mingshun (1970—) (0000-0002-6357-4584), male, associate professor, research interest: engineering project management. E-mail: lms5350@163.com

0 引言

在2015中国建设行业年度峰会上,智慧工地建设理念得以被诠释,即围绕施工过程管理,以建造技术为基础,通过大数据、人工智能、云计算等信息技术的深度融合,建立具有智能生产、互联协作和科学管理的建设项目信息生态系统[1]。随着国家关于建筑业高质量发展要求的不断部署,2020年中华人民共和国住房和城乡建设部印发了《关于推动智能建造与建筑工业化协同发展的指导意见》,并指出要实现建筑业转型升级和持续健康发展,把推进智慧工地建设上升为国家战略[2]。这使得智慧工地建设理念在政策驱动和技术更新下不断推进,并使其成为了助力建筑业高质量发展的重要路径[3]。然而,目前我国智慧工地建设的发展仍处于初步阶段,在技术不断更新完善的条件下,多数地区的政府对于推进智慧工地建设的方案并不健全[4],存在激励机制不完善、企业信息化技术应用意识薄弱、开展智慧工地建设成本高等问题,从而导致智慧工地建设理念不能被完全贯彻。因此,政府建立健全激励机制、完善智慧工地建设方案是逐步提升智慧工地建设水平的重点[5-6]。深入研究政企双方在智慧工地建设中的博弈行为,可以为政府制定恰当的补贴政策,以及企业面对补贴政策做出合理的经营决策提供一定的参考,对实现政企双方利益最大化和促进智慧工地建设的推广应用具有重要意义。

现阶段,学术界对智慧工地建设方面已有一定的研究。JIANG[7]通过结合建筑信息建模+数字孪生技术,探究如何提高智能建筑的施工效果;邱洲[8]以公路工程智慧工地为研究对象,从开发模块的建设和应用两个角度展开探讨;徐友全等[9]设计出基于物联网的安全管控系统框架和应用框架,探究其如何应用于智慧工地中的安全管控;李华等[10]通过构建智慧工地本质安全度评价模型,为持续改进智慧工地的安全管理提供理论依据。由此可知,智能建造技术的创新应用和二次研发是该领域研究的主要方向,但在对智慧工地建设参与成员之间的博弈行为研究还较为欠缺。本文主要探究政府的决策及参与智慧工地建设成员决策之间的相互作用,具有一定的理论意义和创新价值。

基于以上分析,为加快智慧工地建设的推广和应用,本文以智慧工地建设的两大主体"政府"和"企业"为研究对象,通过企业"参与"和政府"补贴"之间的博弈策略选择,构建演化博弈模型并进行均衡稳定性分析[11],同时采用系统动力学方法和Vensim软件来构建系统动力学(system dynamics,SD)模型[12]。仿真分析初始策略和外部变量等关键参数的变化对政府选择补贴策略的影响,从而对政府和企业在参与智慧工地建设时做出正确决策具有一定参考意义。

1 博弈主体行为决策的模型构建与分析

1.1 模型描述

在进行智慧工地的建设过程中,智慧工地的建设和总体发展受作为核心利益主体的政府和企业二者的参与行为决策的直接影响。政府作为激

励政策的发布者,投入的补贴成本是关键考虑因素[13],而企业作为智慧工地的实践者,关注更多的是从中获取的实际收益。因此,本节在博弈双方主体有限理性的前提下[14],构建政企双方间的演化博弈模型,对智慧工地建设中政府和企业两个利益主体的行为进行均衡稳定性分析,最终揭示如何根据对方的行为决策来调整自身的策略,以使效益最大化,从而为政府制定合理的激励政策提供依据。

1.2　基本假设

假设1:在智慧工地建设过程中存在政府主体和企业主体两方利益主体。政府是智慧工地建设的激励方;企业是智慧工地建设的实践方。

假设2:政府可选择的策略集合为A_a=｛补贴策略,不补贴策略｝;企业可选择的行为决策集合为A_b=｛建设智慧工地,不建设智慧工地｝。

假设3:政府主体选择“补贴”策略的概率为x,选择“不补贴”的概率为$1-x$;企业主体选择“建设”策略的概率为y,选择“不建设”策略的概率为$1-y$。

假设4:博弈双方的决策相互影响,且由于技术成熟度和信息差所带来的限制,难以判断各自的策略是否能取得最大收益,故假设在一定技术条件下开展智慧工地建设且双方均采取有限理性行为。

根据不同的行为决策组合设置假设参数,如表1所示。

表1　基本假设参数

Table 1　Basic hypothesis parameters

行为主体	参数	含义
政府	E_a	政府从智慧工地建设成果中获取的基本收益
	Q_a	政府所支出的各项成本费用
	M_a	政府所获得的额外收益
	Z	政府获得的间接经济收益
	K_a	给政府带来的损失,即机会成本
企业	W_{b1}	给企业带来的间接收益
	E_b	企业从智慧工地建设实践中获取的基本收益
	M_b	企业所获得的额外收益
	W_{b2}	企业所获得的间接收益损失
	Q_b	企业所支出的各项成本费用

注:若企业自愿参与智慧工地建设,但政府不扶持,企业的所得收益会低于投入的成本,即$E_b < Q_b + W_{b2}$。

1.3　演化博弈模型构建

基于上述假设条件,构建政府和企业关于智慧工地建设的博弈收支矩阵,如表2所示。

表2　智慧工地建设博弈双方的收益支付矩阵

Table 2　Payoff matrix of both parties in game of smart site construction

		企业	
		建设y	不建设$1-y$
政府	补贴x	$(E_a + M_a - Q_a, E_b + M_b + W_{b1} - Q_b)$	(Q_a, W_{b1})
	不补贴$1-x$	$(Z - K_a, E_b - Q_b - W_{b2})$	$(0,0)$

本文根据演化博弈论和博弈支付矩阵,表示政府和企业的平均期望收益和复制动态方程。

政府选择补贴策略的期望收益为T_{a1},其计算公式如式(1)所示:

$$T_{a1} = y(E_a + M_a - Q_a) - Q_a(1-y) \tag{1}$$

政府选择不补贴策略的期望收益为T_{a2},其计算公式如式(2)所示:

$$T_{a2} = y(Z - K_a) \tag{2}$$

政府主体的平均期望收益为$\overline{T_a}$,其计算公式如式(3)所示:

$$\overline{T_a} = xT_{a1} + (1-x)T_{a2} = xyE_a - xQ_a + xyM_a + y(1-x)(Z - K_a) \tag{3}$$

政府主体的复制动态方程$F(x)$如式(4)所示:

$$F(x) = \frac{dx}{dt} = x(T_{a1} - \overline{T_a}) = x(1-x)(T_{a1} - T_{a2}) = x(1-x)\left[y(K_a + E_a + M_a - Z) - Q_a\right] \tag{4}$$

令$F(x)=0$,可得方程的解为$x_1=0$,$x_2=1$,$y^* = \dfrac{Q_a}{M_a + K_a + E_a - Z}$。

当式(4)中$y=y^*$时,满足$F(x)=0$,此时任意x值都是稳定解。

同理可得企业主体的复制动态方程$F(y)$,如式(5)所示:

$$F(y) = \frac{dy}{dt} = y(T_{b1} - \overline{T_b}) = y(1-y)(T_{b1} - T_{b2}) = y(1-y)\left[E_b - Q_b - W_{b2} + x(M_b + W_{b2})\right] \tag{5}$$

令$F(y)=0$,可得方程的解为$y_1=0$,

$y_2=1, x^*=\dfrac{Q_b+W_{b2}-E_b}{M_b+W_{b2}}$。

当式(5)中$x=x^*$时,满足$F(y)=0$,此时任意y值都是稳定解。

根据上述计算过程可知,存在5个局部均衡点,分别为(0,0)、(0,1)、(1,0)、(1,1)与(x^*,y^*)。

根据Friedman判断局部稳定性的思想,可利用雅可比(Jacobian)矩阵来分析各均衡点的稳定性,即当且仅当行列式$\det \boldsymbol{J}>0$且迹$\mathrm{tr}\boldsymbol{J}<0$时,该均衡点为演化稳定策略(evolutionarily stable strategy,ESS)点。

其雅可比矩阵为

$$\boldsymbol{J}(x,y)=\begin{bmatrix}\dfrac{\partial F(x)}{\partial x} & \dfrac{\partial F(x)}{\partial y}\\ \dfrac{\partial F(y)}{\partial x} & \dfrac{\partial F(y)}{\partial y}\end{bmatrix}=$$

$$\begin{bmatrix}(1-2x)\left[y\left(M_a+K_a+E_a-Z\right)-Q_a\right] & x(1-x)\left(M_a+K_a+E_a-Z\right)\\ y(1-y)\left(M_b+W_{b2}\right) & x(1-2y)\left[E_b-Q_b-W_{b2}+\left(M_b+W_{b2}\right)\right]\end{bmatrix} \tag{6}$$

$$\det \boldsymbol{J}=\begin{vmatrix}(1-2x)\left[y\left(M_a+K_a+E_a-Z\right)-Q_a\right] & x(1-x)\left(M_a+K_a+E_a-Z\right)\\ y(1-y)\left(M_b+W_{b2}\right) & (1-2y)\left[E_b-Q_b-W_{b2}+x\left(M_b+W_{b2}\right)\right]\end{vmatrix}=$$

$$(1-2x)\left[y\left(M_a+K_a+E_a-Z\right)-Q_a\right](1-2y)\left[E_b-Q_b-W_{b2}+x\left(M_b+W_{b2}\right)\right]-$$

$$xy(1-x)(1-y)\left(M_a+K_a+E_a-Z\right)\left(M_b+W_{b2}\right) \tag{7}$$

$$\mathrm{tr}\boldsymbol{J}=\frac{\partial F(x)}{\partial x}+\frac{\partial F(y)}{\partial y}=(1-2x)\left[y\left(M_a+K_a+E_a\right)-Q_a\right]+(1-2y)\left[E_b-Q_b-W_{b2}+x\left(M_b+W_{b2}\right)\right] \tag{8}$$

在雅可比矩阵中,每个均衡点对应的稳定性结果如表3所示。

表3 各均衡点的系统稳定性分析

Table 3 System stability analysis of each equilibrium point

局部均衡点	$\det \boldsymbol{J}$	符号	$\mathrm{tr}\boldsymbol{J}$	符号	性质
$O(0,0)$	$Q_a\left(Q_b-E_b+W_{b2}\right)$	+	$E_b-Q_b-Q_a-W_{b2}$	−	ESS点
$A(0,1)$	$\left(Q_b-E_b+W_{b2}\right)\left(M_a+K_a+E_a-Z\right)$	+	$E_a+W_{b2}+K_a+M_a+Q_b-Q_a-E_b$	+	不稳定点
$C(1,0)$	$\left(E_b-Q_b+M_b\right)$	+	$E_b+Q_a+M_b-Q_b$	+	不稳定点
$D(1,1)$	$\left(E_b-Q_b+M_b\right)\left(M_a+K_a+E_a-Z\right)$	+	$-M_a-K_a-E_a+Q_a-E_b-M_b+Q_b$	−	ESS点
(x^*,y^*)	$-Q_a\dfrac{\left(Q_b+W_{b2}-E_b\right)\left(E_b-Q_b+M_b\right)}{M_b+W_{b2}}$	−	0		鞍点

由表3可知,点$O(0,0)$(即(不补贴,不建设))和点$D(1,1)$(即(补贴,建设))为系统的两个均衡点,政府与企业在智慧工地建设过程中的博弈动态演化如图1所示。

1.4 模型分析

在图1中,系统收敛于A、B、C三点构成不同策略的分界线ABC,当政企双方行为决策的起始状态落在AOC区域内时,博弈结果将收敛于均衡点$O(0,0)$的稳定策略组合;当政企双方行为决策的起始状态落在ACD区域内时,博弈结果将收敛于均衡点$D(1,1)$的稳定策略组合。可知,最终(不补贴,不建设)或(补贴,建设)是该系统在演化过程中将达到的均衡状态,即政府和企业同时参与或同时不参与建设智慧工地。而从利益最大化角度来看,当政企双方选择同时参与建设智慧工地,即在(补贴,建设)这一稳定策略组合时,双方收益将达到最大化。

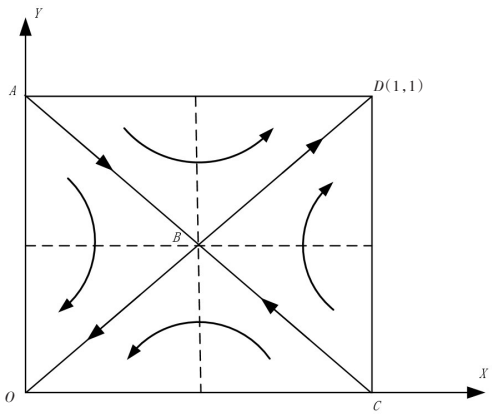


图1　智慧工地建设中政企的演化博弈相位图

Fig. 1　Evolutionary game phase diagram of government and enterprise participation in smart site construction

2　基于演化博弈的SD模型构建及仿真模拟分析

演化博弈主要对均衡结果和过程进行分析和描述。在演化过程中,参数的变动会引起政企双方行为的变化,这会导致博弈主体间策略选择的结果变得复杂多样。因此,系统分析智慧工地建设中政企双方决策的演化路径过程是必要的。本文首先运用演化博弈分析利益主体的行为决策关系[15],再通过系统动力学方法进行模型构建和仿真分析,深刻形象地解释和验证博弈模型的结构和参与主体的行为变化,以深入探究不同策略下系统行为模式及各变量间的相互关系[16],从而实现主体决策行为演化的动态模拟。

2.1　模型假设

1)当政府从智慧工地建设成果中得到的基本获益大于政府选择补贴时投入的成本,即$E_a + M_a + Z - K_a > Q_a$时,政府倾向于"补贴"策略。

2)当企业在开展智慧工地建设实践中获取的综合收益大于企业所支出的各项成本费用,即$M_b + E_b + W_{b1} - W_{b2} > Q_b$时,企业倾向于"参与"智慧工地建设策略。

2.2　SD模型构建

系统动力学(SD)将定性和定量相结合,通过建模仿真来研究不同策略下系统行为模式及各变量间反馈结构关系,这对于寻求较优的系统结构、分析和优化政策具有良好适用性[15]。因此,根据上述政企双方演化博弈模型,本文采用系统动力学方法,并通过Vensim软件仿真分析初始策略及外部变量等关键参数,来模拟政府和企业参与智慧工地建设的双方决策调整的动态过程,从而得到智慧工地建设政企双方的决策演化路径和稳定策略。

2.2.1　系统因果关系图及反馈回路分析

作为智慧工地建设中的两个参与主体,政府和企业参与智慧工地建设的行为系统构成包括两者的交互关系、可获收益、成本投入等影响因素。由此通过Vensim软件绘制得到包括各子系统在内的所有反馈回路[17]("+"代表正向反馈;"-"代表负向反馈):

1)政府补贴投入→+财政压力→-政府参与意愿。

2)政府补贴投入→+企业参与意愿→+智慧工地建设水平→+智慧工地经济效益→+智慧工地建设绩效→+政府可获收益→+政府参与意愿。

3)智慧工地建设水平→+智慧工地经济效益→+企业可获收益→+企业参与意愿。

4)智慧工地建设水平→+智慧工地经济效益→+智慧工地建设绩效→-企业管理成本→-企业投入成本→+企业参与意愿。

智慧工地建设的政企参与双方因果关系模型如图2所示。

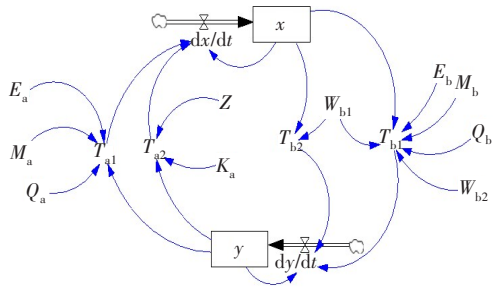


图2　政企参与行为SD模型图

Fig. 2　SD model of government and enterprise participation behaviors

2.2.2　构建系统流图模型

本文根据上述图2和反馈回路的分析,引入智慧工地建设政企参与行为系统模型所需的其他变量,通过区分变量的性质,从而选取可量化指标,建立政企智慧工地建设参与行为决策的存量流量图,如图3所示。

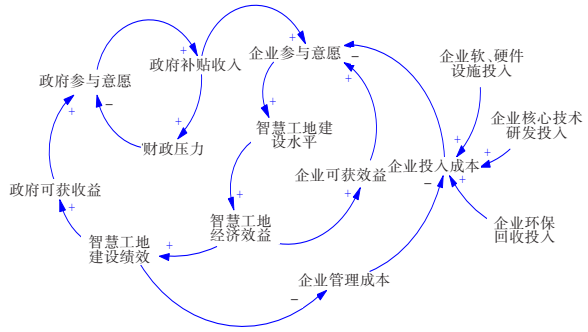


图3 政企参与行为SD存量流量图

Fig. 3 SD stock flow chart of government and enterprise participation behaviors

该系统流图模型包括的基本变量和常量如表4所示。其中,智慧工地建设中政府补贴政策作为系统的输入,对企业参与智慧工地的建设成本会产生直接影响,从而影响企业参与意愿和智慧工地发展。因此,本文主要通过调整其余变量来仿真分析政府选择补贴策略的概率,进而为结论提供支持。

表4 SD系统变量表

Table 4 SD system variables

变量类型	变量符号	单位
状态变量	x, y	
速率变量	$\frac{dx}{dt}, \frac{dy}{dt}$	
辅助变量	$T_{a1}, T_{a2}, T_{b1}, T_{b2}$	万元
常量	$W_{b1}, W_{b2}, E_a, E_b, M_a, M_b, K_a, Q_b, Q_a, Z$	万元

2.3 数值模拟仿真分析

本文根据政企双方参与智慧工地建设时,演化博弈的理想均衡点(1,1)要满足的演化稳定条件,以及参考已有研究设定参数变量的初始值,如表5所示。仿真过程中只改变仿真参数,其余参数不变,仿真起讫时间为0~24月,步长为0.25月。

表5 参数变量初始值

Table 5 Initial values of parameter variables

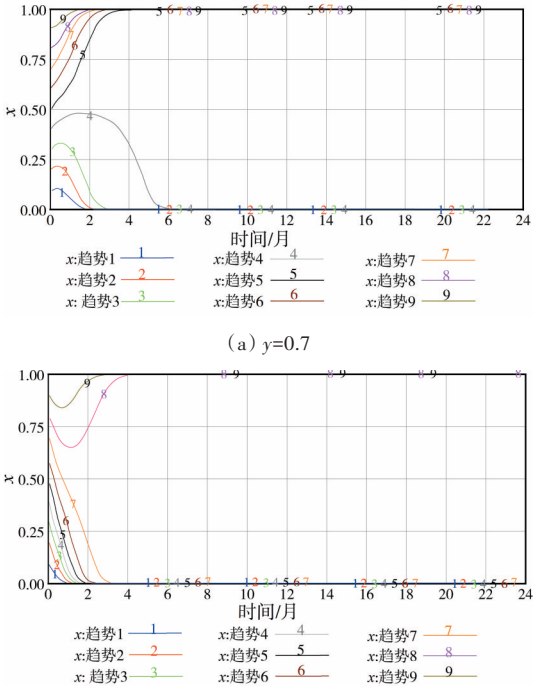
W_{b1}	W_{b2}	E_a	E_b	M_a	M_b	K_a	Q_b	Q_a	Z
1	3	2	2	2	3	2	2	3	1

2.3.1 初始策略仿真分析

本文根据参数初始值进行计算,探究初始策略的群体比例变化对演化结果的影响[17]。将设置的初始值代入计算得

$$x^* = \frac{Q_b + W_{b2} - E_b}{M_b + W_{b2}} = 0.5, y^* = \frac{Q_a}{M_a + K_a + E_a - Z} = 0.5。$$

首先,假设$y = 0.7$为固定值,初始状态时$x = 0.1$,且每过0.25变化一次直到$x = 1$。然后,改变y的取值,假设$y = 0.3$,仿真模拟x的变化趋势,仿真结果如图4所示。在演化稳定前,政企双方策略选择的收敛曲线具备演化路径依赖性,不会发生相交和重叠。系统最终能否达到理想均衡状态与双方利益主体选择策略的初始比例有关,当企业选择建设策略的初始概率越大时,政府行为演化到补贴策略的稳定状态的概率越大。因此,要使系统进入良性循环状态,政府应当选择补贴政策,从而提高企业参与智慧工地建设的概率。



(a) y=0.7

(b) y=0.3

图4 企业不同初始策略变化下x的仿真结果图

Fig. 4 Simulation results of under different initial strategies adopted by enterprise

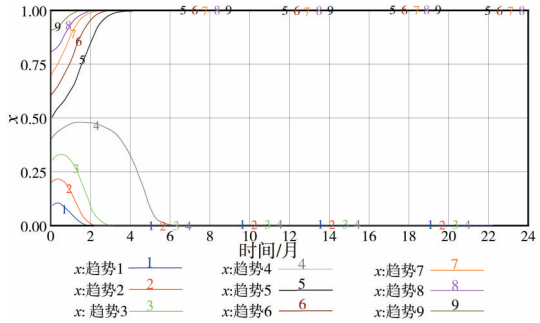
2.3.2 外部变量仿真分析

1) 分析政府补贴的调整。

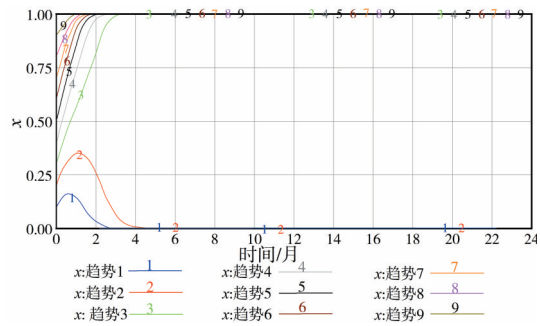
当企业选择智慧工地建设策略时,将政府补贴Q_a这部分定义为政府进行的财政支持、政策保障和评价激励。在保持SD模型设定的参数值和初始策略值不变的情形下,令Q_a的取值为3、4和5,并对这三种情况分别进行仿真,仿真结果如图5所示。由图5可知,政府的补贴力度直接影响系统的最终均衡状态。当政府的补贴力度较小时,双方最终将更倾向于均衡策略——(不补贴,不建设),此时系统的演化均衡点为(0,0);当政府的补

贴力度较大时，双方最终将更倾向于均衡策略——（补贴，建设），此时系统的演化均衡点为（1，1）。由此可见，在政府补贴力度逐渐增强的过程中，系统将达到理想的均衡状态，企业的行为决策也会逐渐演化为建设策略。

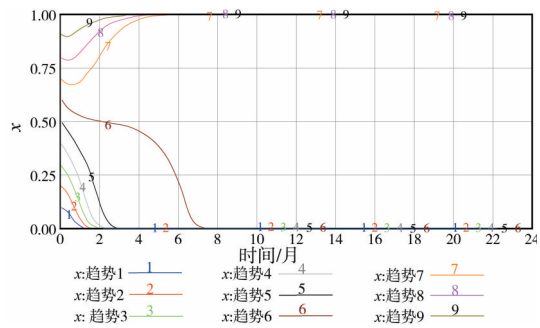
而通过对比政府在更大的补贴力度下企业的策略演化过程可知，当政府出现收益不变而补贴的各项成本增加的情况时，则会引起政府财政压力变大，导致政府在智慧工地建设中的参与行为最终演化成不补贴。因此，政府补贴存在一个阈值，当政府补贴力度过大时，会倾向于不补贴，系统最终演化为不稳定状态。因此，政府需要合理控制补贴力度的区间，超过合理区间的补贴反而会抑制智慧工地建设的可持续性发展。



（a）Q_a=3



（b）Q_a=4



（c）Q_a=5

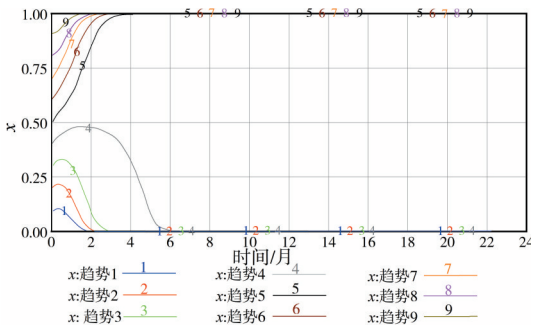
图5　政府不同补贴力度下x的仿真结果图

Fig. 5　Simulation results of under different government subsidies

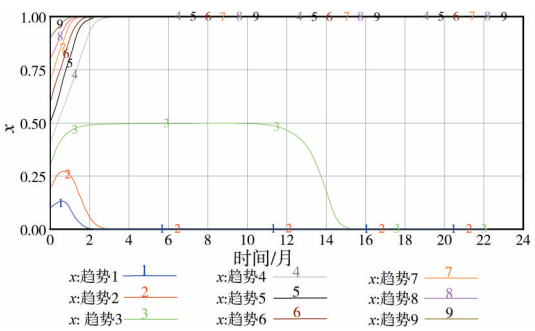
2）分析政府获取效益的调整。

当企业选择智慧工地建设策略时，政府会从中获得基本收益E_a、额外收益M_a和间接收益Z。在保持博弈SD的初始策略值及其他参数值不变的情况下，E_a的取值为2、3，M_a的取值为2、3，Z的取值为1、2，对不同情况下的取值分别进行仿真，结果如图6所示。由图6可知，在智慧工地建设实践成果中，政府获得的收益变化会对自身是否采取补贴策略产生直接影响。当政府所获收益越大时，政府越倾向于采取补贴策略，此时企业参与智慧工地建设的动力也相应提升，即企业可能参与智慧工地建设的概率越大，从而博弈双方主体的行为结果更倾向于“政府选择补贴、企业选择建设”的均衡策略。

因此，持续提升政府从智慧工地建设成果中的获益，可以有效保障政府实施智慧工地补贴政策，提高企业在施工过程中选取智慧工地建设模式的积极性，从而让双方受益，有利于智慧工地建设的健康发展和持续推广。



（a）E_a=2



（b）E_a=3

图6　政府不同获益水平下x的仿真结果图

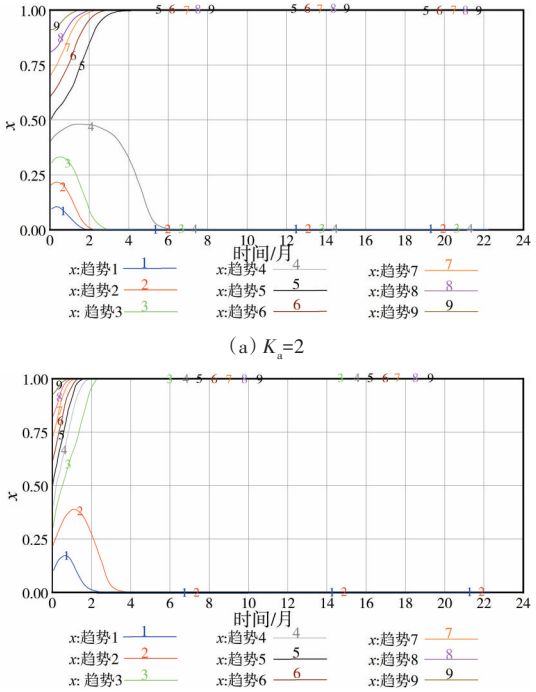
Fig. 6　Simulation results of under different benefits obtained by government

3）分析政府机会成本损失的调整。

当政府选择不补贴时，其参与智慧工地建设的获益会损失，损失的这部分收益将其定义为机会成本K_a。在保持SD模型的初始策略值及其他参数值

不变的情况下,令K_a的取值为2、4,对不同情况下的取值分别进行仿真,结果如图7所示。在智慧工地进行建设过程中,若因此产生的机会成本增大,政府将更倾向于对企业进行补贴。当政府因选择不补贴企业的策略造成最终收益的折损增大时,为换取更大的收益,政府将会更愿意投入部分成本,选择补贴策略。而企业受到政府补贴的激励后,开展智慧工地建设的意愿也将提升,从而博弈双方主体的行为结果更倾向于均衡策略——(补贴,建设)。

通常,智慧工地建设水平会直接影响政府不补贴时产生机会成本损失的大小,智慧工地建设水平越高,政府的机会成本损失也越大。因此,企业应当引进国内外先进信息技术,搭建施工项目集成数字化管理平台来提升数字化建设[18],从而改善智慧工地建设的实践效果,提高智慧工地的建设水平,提升政府选择补贴策略的意向,使双方都能获益。



(a) K_a=2

(b) K_a=4

图7 政府不同机会成本损失下x的仿真结果图

Fig. 7 Simulation results of under different opportunity cost losses of government

3 讨论

本研究基于智慧工地建设中政企双方利益主体的视角,研究双方参与行为的演化博弈关系和探究二者行为策略选择的动态演化路径。首先运用演化博弈论构建政企双方利益主体的演化博弈模型,然后运用SD方法,通过Vensim软件构建演化博弈SD模型,通过设定不同的初始策略值及关键参数值,仿真分析了政府补贴策略演化路径的影响。结合前文研究成果和市场现状,为促进智慧工地建设的推广和应用,本文提出如下建议:

1)发挥政府主导作用,提高企业参与智慧工地建设的概率,使系统进入良性循环状态。

积极发挥政府对企业策略选择的引导作用。现阶段,政府可开展智慧工地示范工程评选,树立模板来鼓励企业参与建设,并通过强化督导监管来努力建立良性的智慧建设市场环境,为企业提升建设水平创造条件,增加综合收益。引导企业消除"信息孤岛"现象,构建低成本、高收益管理体系的数字化3A级智慧工地,从而最大化双方收益,建立良性循环。

2)合理控制政府补贴阈值,从而推进智慧工地建设的可持续性发展。

制定星级评价体系并优化补贴机制,推进规范建设及标准统一。政府补贴存在一个阈值,只有将阈值控制在合理区间内,才能充分发挥补贴政策对开展智慧建设的积极影响。因此,各地政府要结合建设项目的实际情况制定一套智慧工地星级评价体系,并在此基础上根据当地财政状况制定较为完善的层级补贴政策,加强资金保障并优化激励机制,以此最大程度地调动企业参与积极性,吸引企业参与智慧工地建设,实现利益共享。

3)改善智慧工地的实践效果,提高政府的机会成本损失,则政府更倾向于补贴策略。

成立工作推进领导机构,强化各级部门的分工合作。政府通过补贴政策激励企业采用信息化技术实现转型升级,指导企业参与智慧建设和搭建信息监管平台,并在此基础上通过协作应用先进技术与新设备,增强系统集成度和软硬件集成度等以实现工程施工可视化智能管理,提高工程管理信息化水平以打造绿色建筑新业态,从而帮助企业提高生产管理绩效,使双方受益。

由于文章对参数值的设定带有一定的主观

性,没有充分地考虑现实因素,系统边界可能会变得更大。因此,未来在对智慧工地建设其他环节的主体协作行为研究中,比如在智慧工地建设实施过程中,还会涉及与消费者用户的互动,该方面可作为进一步研究方向。

4　结论

本文在政企双方智慧工地建设参与行为分析中将演化博弈论和系统动力学相结合,分析了参数变化对博弈主体间的行为演化影响,研究结果对优化数字化智慧工地管理体系、驱动建筑企业智能化变革、推进智慧工地建设具有一定的参考意义。得出主要研究结论如下:

1)在智慧工地建设过程中,政企双方的参与行为博弈存在均衡策略——(补贴,建设)或(不补贴,不建设)。

2)政府所获效益、企业良好的智慧工地建设水平以及智慧成果质量,对智慧工地建设的发展具有正向作用。当政府所获效益越高、企业参与智慧工地建设管理水平和质量越高时,政府才更易趋向于选择补贴策略。

3)政府须做好财政预算,通过提高补贴技术门槛来合理把握补贴力度的区间,防止企业产生逐利心理,杜绝出现企业将补贴收入当作既得利润的现象,积极引导企业合法合规参与智慧工地建设,从而推动建筑业高质量健康发展。

[参考文献]

[1] 毛志兵. 推进智慧工地建设 助力建筑业的持续健康发展[J]. 工程管理学报, 2017, 31(5): 80-84. DOI: 10.13991/j.cnki.jem.2017.05.015.
MAO Zhibing. Promoting the construction of intelligent sites to advance sustainable and healthy development of construction industry [J]. Journal of Engineering Management, 2017, 31(5): 80-84. DOI: 10.13991/j.cnki.jem.2017.05.015.

[2] 廖玉平. 加快建筑业转型 推动高质量发展: 解读《关于推动智能建造与建筑工业化协同发展的指导意见》[J]. 中国勘察设计, 2020(9):20-21.
LIAO Yuping. Accelerating the transformation of construction industry and promoting high-quality development: interpretation of *Guiding Opinions on Promoting the Coordinated Development of Intelligent Construction and Building Industrialization* [J]. China Engineering & Consulting, 2020(9):20-21.

[3] 吉林省住房和城乡建设厅. 吉林省住房和城乡建设厅关于推进智慧工地建设的指导意见[J]. 北方建筑, 2020, 5(5):81-82.
Jilin Provincial Department of Housing and Urban-Rural Development. Guiding opinions of Jilin Provincial Department of Housing and Urban-Rural Development on promoting the construction of smart sites [J]. Northern Architecture, 2020, 5(5):81-82.

[4] 晋书元, 刘文娟. 智慧工地建设障碍因素及作用路径研究: 基于FISM-MICMAC模型[J]. 土木建筑工程信息技术, 2022, 14(6): 56-61. DOI: 10.16670/j.cnki.cn11-5823/tu.2022.06.10.
JIN Shuyuan, LIU Wenjuan. Research on obstacle factors of smart site constructing based on FISM-MICMAC method [J]. Journal of Information Technology in Civil Engineering and Architecture, 2022, 14(6): 56-61. DOI: 10.16670/j.cnki.cn11-5823/tu.2022.06.10.

[5] 黄观阳, 吴军. 浅析智慧工地建设遇到的问题及解决对策[J]. 建筑, 2021(22): 68-70.
HUANG Guanyang, WU Jun. Analysis on the problems and solutions in the construction of smart construction sites [J]. Construction and Architecture, 2021(22): 68-70.

[6] 贾美珊, 徐友全, 赵灵敏, 等. 基于ISM+AHP的智慧工地建设影响因素分析[J]. 建筑经济, 2020, 41(3): 42-48. DOI: 10.14181/j.cnki.1002-851x.202003042.
JIA Meishan, XU Youquan, ZHAO Lingmin, et al. Analysis of factors affecting the construction of smart site based on ISM+AHP [J]. Construction Economy, 2020, 41(3): 42-48. DOI: 10.14181/j.cnki.1002-851x.202003042.

[7] JIANG Y. Intelligent building construction management based on BIM digital twin [J]. Computational Intelligence and Neuroscience, 2021, 2021(2): 1-11. DOI: 10.1155/2021/4979249.

[8] 邱洲. 公路工程智慧工地开发模块建设及具体应用[J]. 公路, 2021, 66(7): 214-216.
QIU Zhou. Construction and application of intelligent construction site development module for highway engineering[J]. Highway, 2021, 66(7): 214-216.

[9] 徐友全, 贾美珊. 物联网在智慧工地安全管控中的应用[J]. 建筑经济, 2019, 40(12): 101-106. DOI: 10.14181/j.cnki.1002-851x.201912101.
XU Youquan, JIA Meishan. The application of internet of things in the safety management of smart sites [J]. Construction Economy, 2019, 40(12): 101-106. DOI: 10.14181/j.cnki.1002-851x.201912101.

[10] 李华, 张旭旭, 高红, 等. 智慧工地本质安全度评价

方法研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(1): 139-145. DOI: 10.11731/j.issn.1673-193x.2022.01.022.
LI Hua, ZHANG Xuxu, GAO Hong, et al. Research on evaluation method for intrinsic safety degree of smart construction site [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2022, 18(1): 139-145. DOI: 10.11731/j.issn.1673-193x.2022.01.022.

[11] 黄中祥, 陈思臣. 考虑服从率的道路网络交通流逐日演化博弈模型[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2020, 17(1): 8-15. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2020.01.003.
HUANG Zhongxiang, CHEN Sichen. Day-to-day evolutionary game model of road network traffic flow considering traveler's compliant rate [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2020, 17(1): 8-15. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2020.01.003.

[12] 杨玉胜, 周斯仪. 装配式建筑设计阶段基于系统动力学的成本管控研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2022, 19(2): 138-146. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.02.014.
YANG Yusheng, ZHOU Siyi. Research on cost control based on system dynamics in prefabricated building design phase [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2022, 19(2): 138-146. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.02.014.

[13] 邵必林, 胡灵琳. 绿色供应链参与行为演化博弈分析: 基于系统动力学视角[J]. 科研管理, 2021, 42(11): 171-181. DOI: 10.19571/j. cnki. 1000-2995.2021.11.020.
SHAO Bilin, HU Linglin. A game analysis of the evolution of participation behavior of green supply chain: a study based on the system dynamics perspective[J]. Science Research Management, 2021, 42(11): 171-181. DOI: 10.19571/j. cnki. 1000-2995.2021.11.020.

[14] ZHANG Y. Game and coordination of diverse benefits in smart city PPP projects based on evolutionary game [J]. Annals of Operations Research, 2021, 326(Sup. 1): 1-19. DOI: 10.1007/s10479-021-04290-y.

[15] 张莉, 杨栩, 柯丽丽. 政府扶持中小企业科技创新的动态演化博弈及仿真分析[J]. 科技管理研究, 2017, 37(12): 15-23. DOI: 10.3969/j. issn. 1000-7695.2017.12.003.
ZHANG Li, YANG Xu, KE Lili. The evolutionary game simulation on technology innovation between government and small and medium-sized enterprises [J]. Science and Technology Management Research, 2017, 37(12): 15-23. DOI: 10.3969/j. issn. 1000-7695.2017.12.003.

[16] ZHANG S Y, WANG C X, YU C. The evolutionary game analysis and simulation with system dynamics of manufacturer's emissions abatement behavior under cap-and-trade regulation[J]. Applied Mathematics and Computation, 2019, 355: 343-355. DOI: 10.1016/j.amc.2019.02.080.

[17] 廖赐平. 基于系统动力学的装配式建筑绿色度提升研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2019. DOI: 10.26985/d.cnki.gcsjc.2019.000051.
LIAO Ciping. The research on greenness improvement of prefabricated buildings based on system dynamics [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2019. DOI: 10.26985/d.cnki.gcsjc.2019.000051.

[18] 夏建平,王超,徐润,等. 基于BIM技术的高速公路改扩建项目管理研究[J]. 中外公路,2022,42(06):265-267.DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2022.06.050.
XIA Jianping, WANG Chao, XU Run, et al. Research on project management of highway expansion and reconstruction based on bim technology[J]. Journal of Highway and Transportation, 2022, 42(06): 265-267. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2022.06.050.

(责任编辑:毛娜;校对:刘平)