

DOI:10.19951/j.cnki.1672-9331.20221118003

文章编号:1672-9331(2023)05-0181-10

引用格式:朱文喜,戴金妃,陈赞.建筑企业绿色施工技术创新动态演化模型及其仿真研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2023,20(5):181-190.

Citation: ZHU Wenxi, DAI Jinfei, CHEN Yun. Research on the dynamic evolution model and simulation of green construction technology innovation in construction enterprises[J]. J. Changsha Univ Sci Tech(Nat Sci), 2023, 20(5): 181-190.

# 建筑企业绿色施工技术创新动态演化模型 及其仿真研究

朱文喜,戴金妃,陈赞

(长沙理工大学 交通运输工程学院,湖南 长沙 410114)

**摘要:**【目的】探究建筑企业绿色施工技术创新意愿产生、创新决策、创新实施、创新主体进化之间的作用关系与演化规律,为绿色施工技术创新提供理论参考。【方法】构建建筑企业绿色施工技术创新的动态演化模型,通过计算试验的方法,模拟创新意愿产生→创新决策→创新实施→创新主体进化的动态演化过程。【结果】创新意愿在创新能力、竞争程度、环境规制的共同作用下呈现先增后减的演化趋势;绿色施工技术创新对其绿色度有显著提升作用;资金投入和技术水平是影响创新绩效产出的重要因素;知识水平是创新最大推动力。【结论】良好的创新制度环境能够激发企业创新积极性,知识水平的提升和创新过程的全局管控有利于建筑企业绿色施工技术创新。

**关键词:**建筑企业;绿色施工;技术创新;动态演化;计算试验

**中图分类号:**F280

**文献标志码:**A

## 0 引言

“十三五”期间,建筑业碳排放量在全国碳排放总量中的占比较大,前三年年均增速达3.6%<sup>[1]</sup>。双碳目标的提出促使建筑企业转向绿色建造。大力施行和创新绿色施工技术对建筑业的绿色减碳有重要推进作用<sup>[2]</sup>。厘清绿色施工技术创新过程中的内在循环递进和相互作用关系能够促进建筑企业绿色施工技术创新工作的有效开展。

绿色施工技术是指,在满足质量和安全的基本要求下,通过科学管理和技术进步,最大限度地节约资源、减少对环境不利影响,实现“四节一环保”目标的具体工程施工技术。建筑企业绿色施工技术创新已成为绿色低碳发展的重要支撑,能够实现经济绩效和环境保护的“双赢”<sup>[3]</sup>。国内外

学者针对绿色施工技术创新过程及其因素开展了相关研究。从外部来看,绿色施工技术创新是由制度压力和经济压力所导致的,环境规制<sup>[4]</sup>、市场驱动<sup>[5]</sup>、环保意识<sup>[6]</sup>、政府补贴<sup>[7]</sup>对企业创新意愿的产生有正向促进作用。从内部来看,研发能力<sup>[8]</sup>、风险承担能力<sup>[9]</sup>、研发投入<sup>[10]</sup>、知识水平<sup>[11]</sup>有利于促进绿色技术创新。创新意愿是创新决策与实施的先导因素;创新决策要考虑企业自身的情况,还与其创新投入密切相关;研发投入与创新绩效间呈非线性关系<sup>[12]</sup>;此外,知识水平对绿色创新绩效有显著正向影响作用,知识累积比研发资金投入对技术创新绩效的影响更大<sup>[13]</sup>。目前文献主要集中在绿色施工技术创新意愿产生、创新决策、创新绩效的影响因素及其作用程度的研究上,缺乏从整体层面对创新要素的探究,忽视了各阶段的相互影响和递进关系。

收稿日期:2021-12-20;修回日期:2022-11-18;接受日期:2022-12-06

基金项目:湖南省交通科技项目(201840);长沙理工大学研究生科研创新项目(CX2021SS107)

通信作者:朱文喜(1973—)(ORCID:0000-0002-7086-2509),男,副教授,主要从事工程项目管理方面的研究。

E-mail:Juwency@csust.edu.cn

投稿网址: <http://csjgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxxbzk/home>

本文拟构建建筑企业绿色施工技术创新动态演化模型,解析创新意愿产生→创新决策→创新实施→创新主体进化过程的循环递进关系;运用计算试验方法,仿真分析建筑企业绿色施工技术创新的演化过程,为建筑企业有效开展绿色施工技术创新工作提供理论支撑。

## 1 绿色施工技术创新动态演化模型构建

绿色施工技术创新是建筑企业面对环保政策和市场竞争压力等所采取的应对行为。一定时期(设 $t$ 期)内,建筑企业绿色施工技术创新行为的产生由其创新意愿决定,当创新意愿达到一定程度(即阈值 $T_t$ )时,建筑企业可根据自身实力来决定是否采取创新后。企业当企业选择实施技术创新,需进一步考虑绿色施工技术创新要素投入水平,根据投入产出原则、创新投入水平决定创新绩效产出。企业主体会根据 $t$ 期的创新绩效和企业创新环境等驱动因子完成进化过程,其创新能力、竞争能力及投入要素等水平随之得以提升,进而产生新的技术创新意愿,进入下一个时期(即 $t+1$ 期)的创新过程。因此,建筑企业绿色施工技术创新不断循环着创新意愿产生→创新决策→创新实施→创新主体进化的过程。每经过一个循环周期,建筑企业的创新能力和施工技术绿色程度均会变化。可构建建筑企业绿色施工技术创新动态演化概念模型,见图1。

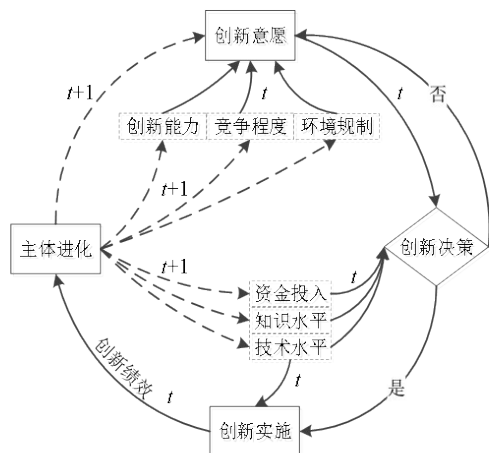


图1 建筑企业绿色施工技术创新动态演化模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of dynamic evolution model of green construction technology innovation in construction enterprises

图1显示了建筑企业绿色施工技术创新意愿产生→创新决策→创新实施→创新主体进化→下一期创新意愿产生的动态演化过程。

### 1.1 创新意愿产生

创新意愿是指建筑企业是否采取技术创新行为的主观意愿,受到主观因素的影响,更受到外界因素的控制<sup>[14]</sup>。创新能力是创新行为的基础,其高低直接决定创新态度从而影响创新意愿<sup>[4]</sup>;市场竞争程度对建筑企业创新意愿的影响是非线性的,具备创造性和破坏性<sup>[15]</sup>;而环境规制对创新意愿的产生存在“遵循成本”效应和“创新补偿”效应<sup>[4]</sup>。因此,本文将创新意愿影响因素归纳为创新能力、竞争程度和环境规制。

根据消费者决策规则,建筑企业绿色施工技术创新意愿 $W_t$ 为:

$$W_t = b_t \times (a_1^{b_t} + b^*) + c_t \times a_2^{(c_t - c^*)} + \{r_t \times [-a_3^{(r_t - r^*)}] + l\} \quad (1)$$

式中: $b_t$ 为 $t$ 期建筑企业的创新能力; $c_t$ 为竞争程度;环境规制水平为 $r_t$ ; $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 分别为创新能力、竞争程度、环境规制水平对绿色施工技术创新意愿的驱动因子; $b^*$ 为当前的平均创新能力; $c^*$ 为平均竞争程度; $r^*$ 为平均环境规制水平; $l$ 为工程建筑行业环保政策强度。

### 1.2 创新决策

建筑企业绿色施工技术创新意愿越强,越倾向于实施绿色施工技术创新。当创新意愿 $W_t$ 大于阈值 $T_t$ 时,企业选择创新;否则,该时期内不创新。

创新意愿受建筑企业自身风险态度及实力的影响。风险偏好的建筑企业更倾向于开展创新活动,同时,建筑企业 $t$ 期创新意愿阈值 $T_t$ 受到 $t-1$ 期绿色施工技术创新绩效 $P_{t-1}$ 的影响。因此, $t$ 期建筑企业绿色施工技术创新意愿阈值 $T_t$ 可设为:

$$T_t = (1 - \theta)T_0 + \theta P_{t-1} \quad (2)$$

式中: $T_0$ 为建筑企业的绿色施工技术创新意愿初始阈值, $T_0=1-\zeta$ ,其中, $\zeta$ 为建筑企业绿色施工技术创新风险态度系数; $\theta$ 为建筑企业的学习能力水平系数。

建筑企业绿色施工技术创新决策模型为:

$$\begin{aligned} W_t &\geq T_t \\ E(P_t) &\geq P_{t-1} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $E(P_t)$ 为 $t$ 期建筑企业采取绿色施工技术创新

新的期望绩效。

### 1.3 创新实施

建筑企业绿色施工技术创新实施与其能够在绿色施工技术创新上投入的资金、人才等要素密切相关。创新投入直接影响创新绩效。

#### 1.3.1 创新投入要素

建筑企业绿色施工技术创新投入既是其创新决策的依据,也是创新行为实施的基础。绿色施工技术创新需要投入大量的资金来进行研发、实验、检验,同时也是在技术和知识基础上进行的企业革新活动。本文将建筑企业绿色施工技术创新投入要素归纳为资金投入 $d_t$ 、技术投入 $h_t$ 和知识投入 $w_t$ 。

#### 1.3.2 创新绩效

建筑企业绿色施工技术创新是否达到“绿色减碳”的目标,常选取绿色度来衡量。绿色度与创新投入及自然衰减率有关<sup>[16]</sup>,则 $t$ 期建筑企业施工技术创新绿色度 $E_t$ 为:

$$E_t = \lambda e^{(\omega_1)^{\omega_2} \times (h_t)^{\omega_3} \times (w_t)^{\omega_4}} - \varphi E_{t-1} \quad (4)$$

式中: $\lambda$ 为绿色度影响因子; $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 、 $\omega_3$ 分别为资金、技术水平、知识水平对绿色度的贡献因子; $\varphi$ 为绿色度随时间的衰减度。

当建筑企业施工技术 $t$ 期绿色度大于 $t-1$ 期的,即 $E_t > E_{t-1}$ ,建筑企业通过施工技术创新使得绿色度得到了提升,则创新成功;否则,创新效果不理想(即创新失败)。

若绿色施工技术创新成功,产生正向绩效,设绿色施工技术创新的绩效函数服从柯布道格拉斯形式,则有:

$$P_t = \frac{1}{\rho} (d_t)^{\gamma_1} \times (h_t)^{\gamma_2} \times (w_t)^{\gamma_3} \quad (5)$$

式中: $\rho$ 为目标偏向系数; $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$ 、 $\gamma_3$ 分别为资金、技术、知识水平对创新绩效的影响因子,且 $\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 < 1$ 。

若绿色施工技术创新失败,产生负向绩效,即:

$$P_t = -\varepsilon \quad (6)$$

式中: $\varepsilon$ 为外部不确定风险, $\varepsilon \in (0, 1)$ 。

设建筑企业绿色施工技术创新成功概率为 $\eta$ ,期望绩效包括收益和损失两部分<sup>[17]</sup>,其表达式如下:

$$E(P_t) = \eta \left[ \frac{1}{\rho} (d_t)^{\gamma_1} \times (h_t)^{\gamma_2} \times (w_t)^{\gamma_3} \right] + (1 - \eta)(-\varepsilon) \quad (7)$$

### 1.4 创新主体进化

绿色施工技术创新是一个不断进化的过程。建筑企业(创新主体)在主动地认识并改造绿色施工技术(创新客体)的过程中,创新要素不断得到丰富、充实和发展,实现主体的进化。这种进化受到创新能力、竞争程度、创新绩效等因素的影响<sup>[18]</sup>。

#### 1.4.1 创新意愿的进化规则

建筑企业进行绿色施工技术创新的实质是组织学习行为,从创新过程中不断累积知识,且每次创新都会累积经验教训,对其创新能力都是一次进化。同时,建筑企业通过绿色施工技术创新来增强企业竞争力;而政府在既有环境规制强度上不会降低要求,对 $t+1$ 期规制强度会越来越高。因此,将建筑企业 $t+1$ 期创新能力、竞争程度、环境规制的进化规则设为:

$$\begin{aligned} b_{t+1} &= \beta_1 \times b_t + \beta_2 \times (1 - b_t)^n + \beta_3 \times \left[ \frac{1}{e^{(1-P_t)}} \right]^{\kappa_1} \\ c_{t+1} &= \beta_1 \times c_t + \beta_3 \times \left[ \frac{1}{e^{(1-P_t)}} \right]^{\kappa_1} + \beta_5 \times \left[ \frac{1}{e^{(1-E_t)}} \right]^{\kappa_2} \\ r_{t+1} &= \beta_1 \times r_t + \beta_4 \times E_t \end{aligned} \quad (8)$$

式中: $n$ 表示 $t$ 期采取绿色施工技术创新的建筑企业数量; $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\beta_3$ 、 $\beta_4$ 、 $\beta_5$ 为反馈系数; $\kappa_1$ 、 $\kappa_2$ 为创新绩效、绿色度的反馈作用贡献系数。

建筑企业创新能力、竞争程度、环境规制得到进化后,产生新的绿色施工技术创新意愿 $W_{t+1}$ ,进入新一轮的绿色施工技术创新周期(即 $t+1$ 期)。

#### 1.4.2 创新投入的进化规则

建筑企业 $t+1$ 期绿色施工技术创新要素投入水平受到其创新绩效的反馈作用,也受到当期政府对创新支持、补贴等影响。设建筑企业 $t+1$ 期资金水平、技术水平和知识水平的进化规则为:

$$\begin{aligned} d_{t+1} &= \beta_6 \times d_t + \beta_7 \times \left[ \frac{1}{e^{(1-P_t)}} \right]^{\kappa_1} + \beta_8 \times g \\ h_{t+1} &= \beta_6 \times h_t + \beta_7 \times \left[ \frac{1}{e^{(1-P_t)}} \right]^{\kappa_1} + \beta_8 \times \left[ \frac{1}{e^{(1-z)}} \right]^{\kappa_1} \end{aligned}$$



$$w_{t+1} = \beta_6 \times w_t + \beta_7 \times \left[ \frac{1}{e^{(1-\rho_t)}} \right]^{\kappa_1} + \beta_8 \times \left[ \frac{1}{e^{(1-z)}} \right]^{\kappa_3} \quad (9)$$

式中: $z$ 为政府对建筑企业绿色施工技术创新的支持力度; $g$ 为建筑企业获得的绿色补贴; $\beta_6, \beta_7, \beta_8$ 为反馈系数; $\kappa_3$ 为政府支持程度的反馈作用的贡献系数。

## 2 绿色施工技术创新动态演化仿真分析

选取创新能力、竞争压力、环境规制、资金投入、技术水平、知识水平为控制变量,创新意愿、绿色度、创新绩效为决策变量,取建筑企业绿色施工技术创新迭代周期为100,借助MATLAB2018b软件对建筑企业绿色施工技术创新演化进行数值模拟仿真分析。

### 2.1 变量赋值

在参考文献[4,16,19]的基础上,考虑建筑企业绿色施工技术创新的客观情形,不断调整参数、反复模拟,最终参数变量赋值结果如下: $\alpha_1=0.15$ ,  $\alpha_2=0.25$ ,  $\alpha_3=0.10$ ,  $l=0.5$ ,  $\lambda=0.5$ ,  $\omega_1=0.15$ ,  $\omega_2=0.15$ ,  $\omega_3=0.15$ ,  $\varphi=0.8$ ,  $\gamma_1=0.3$ ,  $\gamma_2=0.2$ ,  $\gamma_3=0.2$ ,  $\rho=0.64$ ,  $\beta_1=0.75$ ,  $\beta_2=0.10$ ,  $\beta_3=0.15$ ,  $\beta_4=0.25$ ,  $\beta_5=0.10$ ,  $\beta_6=0.50$ ,  $\beta_7=0.15$ ,  $\beta_8=0.35$ ,  $\kappa_1=1.5$ ,  $\kappa_2=1.3$ ,  $\kappa_3=1.2$ 。

变量的初始赋值:各变量由对应的绿色技术创新相关指标来表征。其中,创新能力利用绿色专利授权数占其当年所有专利授权数的比重来衡量<sup>[4]</sup>,专利授权数能够有效地避免专利申请过程中的虚假数据,保证创新能力衡量的准确性;市场竞争程度反映企业在市场中所占的份额,因此用签订合同额占当年行业签订合同额的平均比重来衡量;环境规制参考污染治理设施运行费用与行业产值比值<sup>[4]</sup>的衡量方法,利用《中国环境统计年鉴》中环境污染治理投资占GDP的平均比重来测量;其余初始变量的赋值,如资金水平、技术水平、知识水平通过上市建筑企业实际投入水平来衡量,技术水平通过专利申请数量来反映;绿色度、绿色补贴和政府支持则通过统计年鉴中环境污染治理投入情况、节能环保支出情况和科学技术支出情况来衡量。通过收集近5年(2016—2020年)

部分上市建筑企业(<http://www.cninfo.com.cn/new/index>)、《中国统计年鉴》《中国环境统计年鉴》(其中个别指标某年份有缺失数据,采用数值修匀法推算补充)的数据得到变量初始赋值,见表1。

表1 变量赋值及来源

变量	数据来源	赋值
$b_0$	绿色专利授权占所有专利授权的平均比重	0.170
$c_0$	上市建筑企业签订合同额占当年行业签订合同额的平均比重	0.150
$r_0$	环境污染治理投资占GDP的平均比重	0.013
$d_0$	上市建筑企业平均研发经费投入强度	0.100
$h_0$	上市建筑企业的绿色专利申请占所有专利申请的平均比重	0.250
$w_0$	上市建筑企业平均研发人员投入强度	0.060
$E_0$	城镇环境基础设施建设投资占环境污染治理投资总额的平均比重	0.240
$g$	全国节能环保支出占全国一般公共预算的平均比重	0.030
$z$	科学技术支出占全国一般公共预算的平均比重	0.040

### 2.2 创新意愿演化分析

建筑企业绿色施工技术创新意愿的产生是创新行为决策的前提。创新意愿演化仿真结果见图2,创新意愿与创新能力、竞争程度、环境规制的关系见图3。

由图2可知:在整个演化周期内,前期建筑企业创新意愿值变动较大,第2期达到最小值0.743 2;在第22期之后,创新意愿演化值集中在0.811 5~0.853 8,这说明建筑企业绿色施工技术创新意愿较高,此时建筑企业面临的外部竞争压力大,企业意识到绿色施工技术创新的重要性,愿意通过创新来提高企业竞争力。

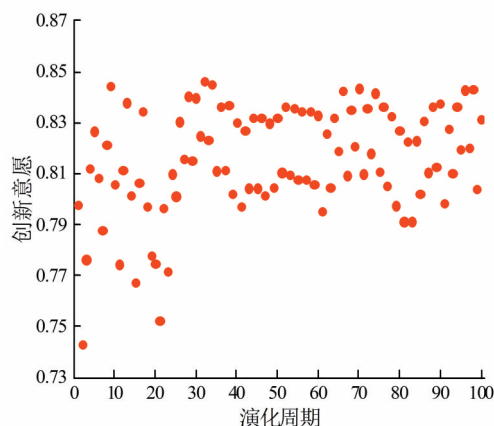


图2 创新意愿演化图

Fig. 2 Diagram of the evolution of innovation willingness

由图3可知,在创新能力、竞争程度、环境规制的共同作用下,建筑企业绿色施工技术创新意愿呈现先增后减的变化趋势。这说明:①创新能力对创新意愿有显著的正反馈作用,但是随着创新能力的提升,正反馈作用逐步减小,且对创新意愿的驱动效果比竞争程度和环境规制的低。建筑企业经济利益的驱动下,创新能力是面临创新决策时对自身能力的衡量,并不是创新意愿产生的必要条件。②竞争程度对创新意愿的影响作用是呈先递增后递减(呈倒“U”型)的规律,峰值点为(0.722 0, 0.326 7),而竞争程度对创新意愿的作用更敏感,这说明建筑行业施工企业多、竞争压力大,且许多工程鼓励采用绿色施工技术,企业为了生存,愿意投入资金、技术等进行绿色施工技术创新来增强竞争力。③环境规制对创新意愿的影响有门槛效应,存在最小峰值点(0.434 0, 0.335 4),整体呈先递减后递增(呈“U”型)的规律,且在初始阶段环境规制对创新意愿起决定性作用;从创新意愿的峰值来看,环境规制是促使建筑企业绿色施工技术创新的最大驱动力。

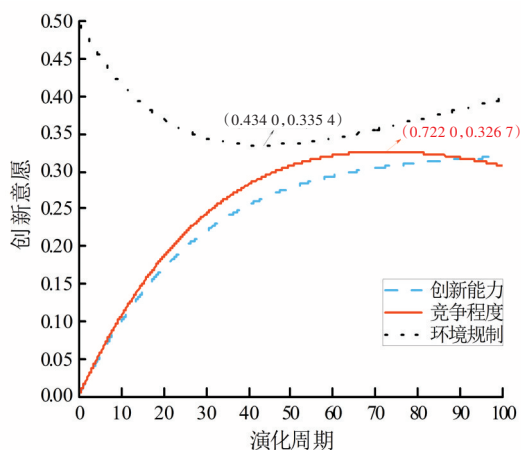


图3 创新能力、竞争程度、环境规制的作用图

Fig. 3 The role diagram of innovation ability, competition degree and environmental rules

### 2.3 创新绩效演化分析

绿色施工技术绿色度和创新绩效演化结果如图4~图5。

由图4可知,绿色度在前期变化比较明显,第9期开始,演化结果收敛于0.312 2,这说明前期创新投入使得绿色度有所提升。当投入超过一定值时,创新投入出现剩余,绿色度提升速度衰减甚至出现下降的情形。与初始绿色度(0.241 0)相比,

在整个演化周期内绿色度均值为0.317 5,这说明绿色施工技术创新对绿色度提升是显著的,建筑企业选择绿色施工技术创新是可取的。

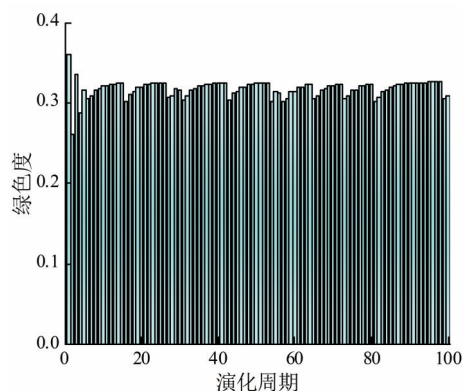


图4 绿色度演化图

Fig. 4 Green degree evolution diagram

由图5可知:绿色施工技术创新绩效波动幅度大,在整个演化周期,负向绩效出现的频率为0.230 0,均值为0.367 6,这说明绿色施工技术创新绩效水平较低时,具有不确定性,预期收益难以达到。在主体进化作用下,绿色度并没有随着创新投入水平的提高而进一步提升,创新绩效(正向)峰值收敛于0.651 2,这说明建筑企业绿色施工技术创新过程中,创新投入不能得到充分的利用。

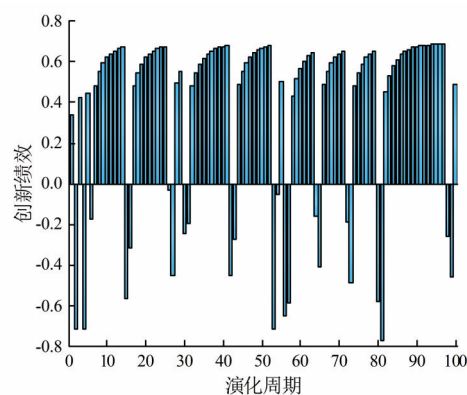


图5 创新绩效演化图

Fig. 5 Innovation performance evolution diagram

### 2.4 主体进化演化分析

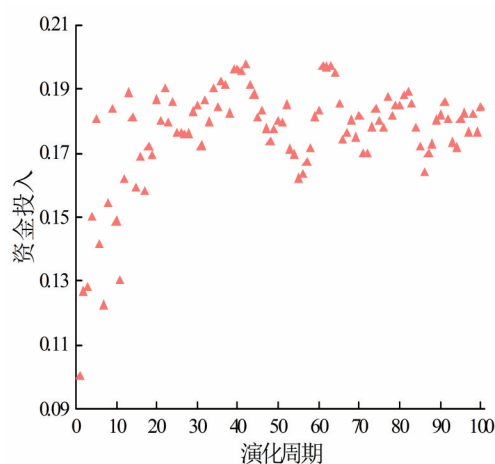
根据创新主体进化规则,创新投入要素的演化规律见图6。

由图6(a)可知,资金投入水平演化最大值为0.197 1,整体均值为0.175 7,提升效果不足10%,说明当前环境下,建筑企业绿色施工技术创新的资金投入有限,自主创新积极性不高,资金投入水平受到进化的作用最小。由图6(b)可知,绿色施

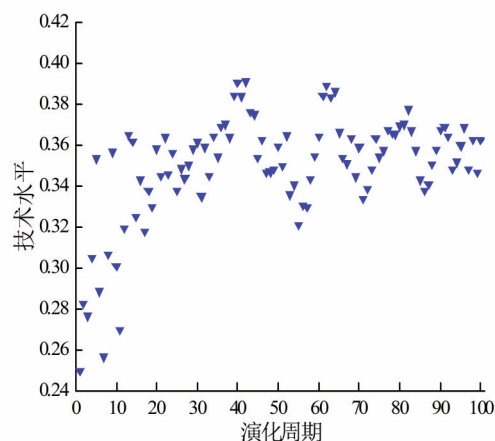
工技术创新对技术水平的提升趋势较为平缓,受创新绩效影响的波动范围较大,演化中后期,技术水平在 0.354 2~0.372 5 内波动,说明技术创新是提升绿色施工技术水平的重要途径。由图 6(c)可知,绿色施工技术创新对知识水平的提升幅度最

大,到第 6 期达到 0.328 7,接近均值 0.344 7,其在初始创新周期内快速累积。随着创新周期演化,知识水平波动范围较小,受创新累积作用不明显,这说明短期内创新是建筑企业实现知识水平提升的有效途径,但并不能维持知识水平的提升。

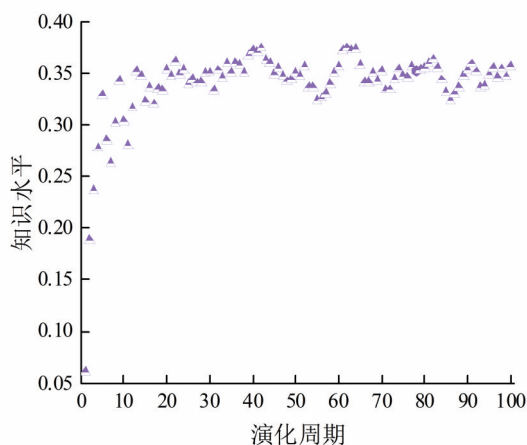
创新投入要素受到主体进化的作用,从而引起创新绩效的变化,其动态影响效果演化见图 7。



(a) 资金投入演化图



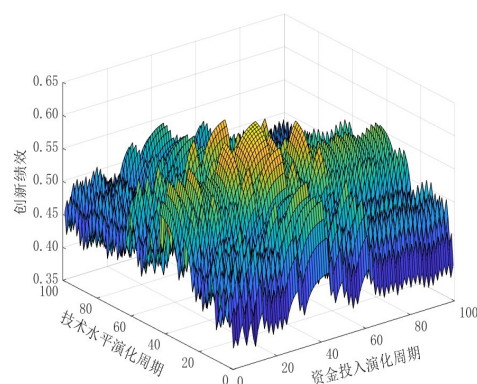
(b) 技术水平演化图



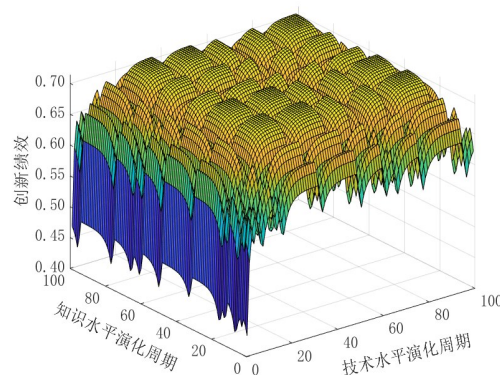
(c) 知识水平演化图

图 6 创新投入要素演化图

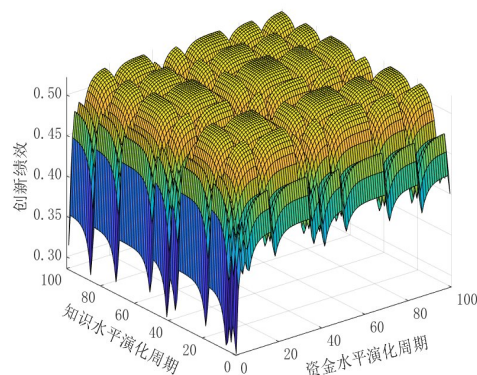
Fig. 6 Evolution diagram of innovation input factors



(a) 资金-技术动态影响效果



(b) 技术-知识动态影响效果



(c) 资金-知识动态影响效果

图 7 动态影响效果演化图

Fig. 7 Evolution diagram of dynamic influence effect

由图 7(a)可知,知识水平一定时,随着资金水平和技术水平的演化,创新绩效的波动范围较小;



当资金投入与技术水平达到演化中期时,创新绩效才达到最大值。而根据图6(a)、6(b)可知,演化中期时资金投入和技术水平并不是整个周期内的最大值,这说明某时期内建筑企业绿色施工技术创新中资金、技术的投入存在最优值,否则将会造成创新投入要素的浪费。由图7(b)可知,资金投入一定时,建筑企业绿色施工技术创新绩效明显受限于低技术水平;当技术水平提升,创新绩效大幅提高,且在知识和技术的双重作用下绩效值明显高于其他两种情形。由图7(c)可知,技术水平一定时,初期低水平的资金投入会限制建筑企业绿色施工技术创新活动(创新绩效低);随着演化的持续进行,当知识水平相同时,增大资金投入带来的绩效产出远低于提高技术水平的绩效产出。

在绿色施工技术创新初期,资金和技术是影响创新绩效的主要因素,但从整个演化周期来看,在知识水平的推动下,资金和技术水平能更好地发挥作用,且知识与技术的叠加使得绿色施工技术创新朝更好的结果发展。可见,知识水平是建筑企业绿色施工技术创新的最大推动力。

### 3 讨论

从整个建筑企业绿色施工技术创新过程来看,在主体进化阶段的作用下,各阶段呈现循序渐进、相互作用的关系,内外部环境因素的影响贯穿整个创新过程,绿色施工技术创新是持续发展的企业活动。需要精准把控内外环境要素,动态调整各创新要素的投入,确保创新活动朝更好的方向发展。

通过分析创新意愿的产生,检验了环境规制对绿色施工技术创新的正向激励作用,并且环境规制对创新意愿存在明显的门槛效应。此外,文章从创新能力、竞争程度和环境规制三个因素来分析多因素对创新意愿的共同作用,发现在多因素的作用下,环境规制的作用依然突出;“双碳”目标下,环境规制的力度将会是影响低碳减排效果的重要因素。

进一步分析了在当前影响因素的水平下,建筑企业的创新意愿偏高;然而建筑企业绿色施工

技术绿色度水平难以突破,创新成功率不高。首先,绿色度是衡量绿色施工技术的综合绿色程度,其实质包括了经济效益和绿色程度,在创新过程中各创新要素投入水平的合理性直接反应在经济效益上,从而影响绿色度水平;其次,在创新初期阶段,需要投入大量的资金,但是技术创新持续时间长,仅仅依靠企业资本是难以支撑的,因此离不开政府部门一定程度上的政策倾斜和金融工具的运用;最后,明确知识水平才是突破创新瓶颈的关键点,建筑企业要积极构建企业人才知识库,完善绿色施工技术创新知识体系,为后续创新提供源源不断的动力。

数据获取存在部分缺失,导致研究工作有所不足,且在分析过程中,没有对创新决策开展深入研究,后续研究可以探讨绿色施工技术创新决策的相关影响因素及其对整个创新演化过程的影响。

### 4 结论

本文构建了建筑企业绿色施工技术创新意愿产生、决策实施、主体进化的动态演化模型,通过计算试验仿真,分析建筑企业绿色施工技术创新过程的演化规律,得到结论主要如下:

1) 在创新能力、竞争程度和环境规制的共同作用下,创新意愿呈现先增后减的变化趋势;环境规制对绿色施工技术创新意愿产生明显的正向激励作用,且该结论不会因为创新周期和企业内外部影响因素的变化而变化;此外竞争程度对创新意愿的影响存在两面性。因此合适的环境规制和市场竞争压力会促使建筑企业绿色施工技术创新意愿的提升,政府部门应制定合理的环境规制、建立良好的绿色技术创新制度环境,规范招投标过程中关于绿色环保、技术创新的评分标准,激励与引导建筑企业实施绿色施工技术创新行为。

2) 绿色施工技术创新产出存在不确定性,创新绩效整体水平较低,且绿色度在创新要素投入水平波动的情况下仍逐步收敛于某一特定值,说明绿色施工技术创新风险高,创新要素投入水平的合理性决定了绿色度的提升水平。绿色施工技术创新的成功离不开对创新活动的全局管控工

作,在决策阶段通过严格的绿色施工技术遴选和评价机制保证技术创新的可行性,合理规避风险;在实施阶段注重投入要素的优化配置。

3) 识别了创新投入要素与绿色施工技术创新的相互作用关系,其中知识水平是建筑企业绿色施工技术创新的最大推动力,但绿色施工技术创新对知识水平的进化作用有局限性。资金和技术水平的提升能够实现初期绿色施工技术创新的飞跃,但是突破性的创新是由企业自身知识水平的累积决定的。建筑企业要注重知识水平的提升,既要从创新活动中积累知识,又要积极主动充实企业知识人才储备。

### [参考文献]

- [1] 中国建筑节能协会.中国建筑节能研究报告2020[J].建筑节能(中英文),2021,49(2):1-6.  
China Building Energy Conservation Association.China building energy consumption annual report 2020 [J]. Building Energy Efficiency, 2021, 49(2): 1-6.
- [2] 王首绪,蒋宁静.高速公路绿色施工节地评价方法研究[J].公路与汽运,2019(1):152-155,159.DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2019.01.038.  
WANG Shouxu, JIANG Ningjing.Study on land-saving evaluation method of expressway green construction[J]. Highways & Automotive Applications, 2019(1): 152-155, 159.DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2019.01.038.
- [3] HORVÁTHOVÁ E. The impact of environmental performance on firm performance: short-term costs and long-term benefits? [J]. Ecological Economics, 2012, 84: 91-97. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2012.10.001.
- [4] 王珍愚,曹瑜,林善浪.环境规制对企业绿色技术创新的影响特征与异质性:基于中国上市公司绿色专利数据[J].科学学研究,2021,39(5):909-919,929. DOI: 10.16192/j.cnki.1003-2053.20200916.001.  
WANG Zhenyu, CAO Yu, LIN Shanlang. The characteristics and heterogeneity of environmental regulation's impact on enterprises' green technology innovation: based on green patent data of listed firms in China[J]. Studies in Science of Science, 2021, 39(5): 909-919, 929. DOI: 10.16192/j.cnki.1003-2053.20200916.001.
- [5] 杨中杰,张飞涟,刘尚,等.企业绿色建筑技术集成创新作用机理实证研究[J].铁道科学与工程学报,2020,17(6):1603-1610. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.t20200174.  
YANG Zhongjie, ZHANG Feilian, LIU Shang, et al. Demonstrative verification on the integrated innovation mechanisms of green building technology in enterprises [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(6): 1603-1610. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.t20200174.
- [6] 邢丽云,俞会新,朱兆同.建筑企业绿色创新驱动因素研究[J].建筑经济,2019,40(10):116-120. DOI: 10.14181/j.cnki.1002-851x.201910116.  
XING Liyun, YU Huixin, ZHU Zhaotong. Research on driving factors of green innovation of construction enterprises [J]. Construction Economy, 2019, 40(10): 116-120. DOI: 10.14181/j.cnki.1002-851x.201910116.
- [7] SUNG B. Do government subsidies promote firm-level innovation? Evidence from the Korean renewable energy technology industry [J]. Energy Policy, 2019, 132: 1333-1344. DOI: 10.1016/j.enpol.2019.03.009.
- [8] 吕君,张士强,王颖,等.基于扎根理论的新能源企业绿色创新意愿驱动因素研究[J].科技进步与对策,2019,36(18):104-110. DOI: 10.6049/kjbydc.2019010345.  
LYU Jun, ZHANG Shiqiang, WANG Ying, et al. Research on the driving mechanism of green innovation intention of energy enterprises based on grounded theory [J]. Science & Technology Progress and Policy, 2019, 36(18): 104-110. DOI: 10.6049/kjbydc.2019010345.
- [9] 邢丽云,俞会新.企业绿色创新驱动因素的跨层次分析:以建筑企业为例[J].技术经济,2018,37(11):49-55,115. DOI: 10.3969/j.issn.1002-980X.2018.11.006.  
XING Liyun, YU Huixin. Cross-level analysis on driving factors of enterprise's green innovation: example of construction enterprises [J]. Technology Economics, 2018, 37(11): 49-55, 115. DOI: 10.3969/j.issn.1002-980X.2018.11.006.
- [10] 王晓红,李娜,张奔.企业研发投入、产学研协同发展与区域创新产出:对外开放度的调节作用[J].系统管理学报,2022,31(3):500-508,521. DOI: 10.3969/j.issn1005-2542.2022.03.008.  
WANG Xiaohong, LI Na, ZHANG Ben. Enterprise research and development, industry-university-research cooperation innovation, and regional innovation output: the moderating role of openness [J]. Journal of Systems & Management, 2022, 31(3): 500-508, 521. DOI: 10.3969/j.issn1005-2542.2022.03.008.
- [11] 李柏洲,曾经伟,王丹,等.基于知识行为的企业绿色创新系统协同演化研究[J].管理工程学报,2020,34(5):42-52. DOI: 10.13587/j.cnki.jieem.2020.05.005.  
LI Baizhou, ZENG Jingwei, WANG Dan, et al. Research on co-evolution of enterprise green innovation system based on knowledge behavior [J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2020, 34(5): 42-52. DOI: 10.13587/j.cnki.jieem.2020.05.005.
- [12] 和雅娴,曹芳萍.研发投入、治理结构与环保上市企



- 业绿色技术创新绩效研究[J]. 新经济, 2019(10): 35-42.
- HE Yaxian, CAO Fangping. Research on R&D investment, governance structure and green technology innovation performance of environmental protection listed enterprises[J]. New Economy, 2019(10): 35-42.
- [13] 张晓黎, 覃正. 知识基础能力、研发投入与技术创新绩效关系研究: 基于全球 R&D 领先通信及技术设备制造类企业的实证分析[J]. 科技进步与对策, 2013, 30(11): 140-144. DOI: 10.6049/kjbydc.2012050805.
- ZHANG Xiaoli, QIN Zheng. Research on the relationship among knowledge - based ability, R&D investment and technological innovation performance: based on the empirical analysis of global leading R&D communication and technical equipment manufacturing enterprises [J]. Science & Technology Progress and Policy, 2013, 30 (11) : 140-144. DOI: 10.6049/kjbydc.2012050805.
- [14] 龙哲竞, 靳文舟, 龚隽. 需求响应公交接驳小车路径规划研究[J]. 交通科学与工程, 2017, 33(4): 87-92. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2017.04.016.
- LONG Zhejing, JIN Wenzhou, GONG Jun. Research on the route planning of demand responsive transit feeder car [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2017, 33(4) : 87-92. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2017.04.016.
- [15] 简泽, 谭利萍, 吕大国, 等. 市场竞争的创造性、破坏性与技术升级[J]. 中国工业经济, 2017(5): 16-34. DOI: 10.19581/j.cnki.ciejournal.2017.05.003.
- JIAN Ze, TAN Liping, LYU Daguo, et al. Creativity and destructiveness of market competition and upgrading of technology [J]. China Industrial Economics, 2017(5) : 16-34. DOI: 10.19581/j.cnki.ciejournal.2017.05.003.
- [16] 关志民, 曲优, 赵莹. 考虑决策者失望规避的供应链协同绿色创新动态优化与协调研究[J]. 运筹与管理, 2020, 29(5): 96-107. DOI: 10.12005/orms.2020.0123.
- GUAN Zhimin, QU You, ZHAO Ying. Dynamic optimization and coordination on joint green innovation in a supply chain considering disappointment aversion [J]. Operations Research and Management Science, 2020, 29(5) : 96-107. DOI: 10.12005/orms.2020.0123.
- [17] 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.
- 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.
- [18] 毛荐其, 俞国方. 技术创新进化研究综述[J]. 科研管理, 2005, 26(5) : 35-40. DOI: 10.19571/j.cnki.1000-2995.2005.05.006.
- MAO Jianqi, YU Guofang. A review of the evolution research of technological innovation [J]. Science Research Management, 2005, 26 (5) : 35-40. DOI: 10.19571/j.cnki.1000-2995.2005.05.006.
- [19] 张振浩, 谭荣平, 方明. T 梁桥在建设期碳排放模型的建立与分析[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2018, 15(3): 71-78.
- ZHANG Zhenhao, TAN Rongping, FANG Ming. Establishment and analysis of carbon emissions model of T - beam bridge during construction [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2018, 15(3): 71-78.

## Research on the dynamic evolution model and simulation of green construction technology innovation in construction enterprises

ZHU Wenxi, DAI Jinfei, CHEN Yun

(School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** [Purposes] This paper aims to explore the relationship and evolution law between the generation, decision-making, implementation and evolution of green construction technology innovation intention in construction enterprises, and to provide theoretical reference for green construction technology innovation. [Methods] A dynamic evolution model of green construction technology innovation in construction enterprises is constructed by means of computational experiments, and the dynamic evolution process of innovation intention  $\rightarrow$  decision  $\rightarrow$  implementation  $\rightarrow$  evolution is simulated by MATLAB2018b. [Findings] The innovative indicated an increasing and decreasing trend under the combined effect of innovation capability, competition level and environmental regulation. The innovation of green construction technology can significantly improve its greenness. Capital input and technology level are important factors affecting innovation performance and knowledge level is the biggest driving force of innovation. [Conclusions] A good innovation system environment can stimulate enterprise innovation enthusiasm, and the improvement of knowledge level and the overall control of innovation process are conducive to green construction technology innovation of construction enterprises.

**Key words:** construction enterprise; green construction; technological innovation; dynamic evolution; computational experiments

**Manuscript received:** 2021-12-20; **revised:** 2022-11-18; **accepted:** 2022-12-06

**Foundation item:** Transportation Science and Technology Project of Hunan(201840); Graduate Research Innovation Project of CSUST(CX2021SS107)

**Corresponding author:** ZHU Wenxi(1973—)(ORCID:0000-0002-7086-2509), male, associate professor, mainly engaged in engineering project management research. E-mail: Juwency@csust.edu.cn

(责任编辑:赵冰;校对:石月珍;英文编辑:刘至真)