

基于三方演化博弈的建筑业碳减排治理研究

刘亚臣, 卢姗姗, 刘 宁

(沈阳建筑大学管理学院, 辽宁 沈阳 110168)

摘要:基于演化博弈论(Evolutionary Game Theory)构建政府、建筑企业、消费者之间的博弈关系模型,对于促进建筑业低能耗发展具有重要的借鉴意义。分析了建筑业碳减排治理的主体利益关系和影响因素,利用MATLAB数值模拟仿真,建立了三方演化博弈模型。结果表明:使三方博弈最终达到稳定状态的策略为政府不严格监管,建筑企业建造低碳建筑,消费者购买低碳建筑;增量成本对建筑企业和消费者的决策影响较大,对政府的决策影响较小;政府严格监管时,建筑企业选择建造低碳建筑时获得的收益、选择建造传统建筑时获得的额外收益和受到的惩罚金额仅会影响三方演化的收敛速度,对最终决策影响较小。

关键词:建筑业;碳减排;演化博弈;MATLAB

中图分类号:F224.32

文献标志码:A

在中国大力推行碳减排的背景下,加强低碳技术在建筑业中的推广与应用已成为主流趋势^[1]。综合国内外研究成果,多位学者立足于低碳行为涉及的利益相关者,从不同行业角度研究了行业主体的博弈关系,探讨了行为策略对低碳发展的影响。陆春菊等^[2]提出了政府环境规制力度和低碳生产时的额外技术成本是影响建筑企业对低碳技术进行投资的主要因素。王波等^[3]认为政府在绿色建筑市场化推广中起到了关键性作用,政府激励与惩罚双重机制有利于推动绿色建筑向规模化与市场化方向快速发展。罗福周等^[4]认为第三方力量的监督使企业更倾向于低碳生产模式。刘小兰等^[5]指出了政府的奖惩制度能有效提高企业成员及消费者的低碳旅游意识。张倩^[6]在探究利益相关者对企业技术创新行为的影响这一问题上,得出了企业、政府和公众的行为决策受到

其收益和成本影响的结论。

总体来看,学者们在建筑业演化博弈方面取得了丰硕的研究成果,为本研究提供了重要的理论基础。笔者基于演化博弈论(Evolutionary Game Theory),采用动态复制方程,推导三方博弈的稳态平衡点,进行数值仿真,并针对仿真结果提出了相关建议,以期促进建筑业低能耗可持续发展。

一、演化博弈模型的构建

1. 研究假设

根据研究的实际需要、相关文献研究和现场调研结果,在模型建立前作如下假设:

假设1:假设各主体均为有限理性,且经过反复博弈后将选取最优策略。

假设2:政府作为监管者、建筑企业作为执行者、消费者作为第三方的监督主体,在进行策略选择时可以选择积极或消极采取措

施,主体积极采取措施记为 1,消极采取措施记为 0,策略集合记为(1,0)。

假设 3:当建筑企业选择“建造传统建筑”策略时,企业仍可以从消费者处获得收益。

假设 4:政府、建筑企业与消费者采取行为的概率分别为 x 、 y 、 z ,不采取行为的概率分别为 $(1-x)$ 、 $(1-y)$ 、 $(1-z)$,其中, x 、 y 、 z 的取值范围都为 $[0,1]$ 。

2. 多主体利益诉求分析

基于目前的气候变化情况和国际舆论压力,政府对碳减排治理的态度是积极的,因此,政府期望在低成本的监管下使建筑企业建造低碳建筑、消费者购买低碳建筑,以此获取最大利益。建筑企业是否选择建造低碳建筑策略取决于其对收益与成本的衡量,降低建筑能耗在一定程度上会增加成本,致使其对建造低碳建筑的积极性不高。消费者在对碳减排治理所体现的环境治理效果和潜在环保价值认知程度不足时,会过度依赖政府治理能力。张铎^[7]认为消费者对环境的关注增加了其绿色消费行为,但其偏好存在波动,消费者的参与程度确实会显著影响低碳治理效果^[8-9]。刘文龙等^[10]认为低碳认知水平高的消费者更倾向于购买低碳产品。

政府、建筑企业和消费者从自身利益出发,会选择使自身利益最大化的博弈策略,而

各市场主体都不愿主动承担低碳减排带来的利益损失,故市场主体之间的利益均衡是实现建筑业碳减排的关键。

二、碳减排治理主体的演化博弈分析

1. 参数变量的设定

政府有“严格监管”或“不严格监管”两种策略。当政府采取“严格监管”策略时,政府需要付出的管理成本为 C_1 。与此同时,当建筑企业、消费者积极参与政府的“严格监管”策略时,政府获得的潜在社会收益为 V_1 ;当建筑企业或消费者其中一方选择不参与时,政府获得的社会负收益为 S_1 。

建筑企业有“建造低碳建筑”或“建造传统建筑”两种策略。当建筑企业选择“建造低碳建筑”策略时,其增量成本为 C_2 ,获得的利益为 V_3 ,给消费者造成的潜在损失为 R_2 ;当建筑企业选择“建造传统建筑”策略时,企业收益为 V_2 ,额外收益为 V_4 ,政府对其的罚款为 S_2 ,给自身造成的潜在损失为 R_1 。

消费者有“购买”或“不购买”低碳建筑两种策略。当消费者选择“购买”策略时,购买成本为 C_3 ,获得的收益为 V_5 。与此同时,当政府或企业其中一方积极参与时,给消费者带来的长远收益为 V_6 。

由上述假设和参数设定,得出不同策略组合下博弈主体的支付矩阵(见表 1)。

表 1 三方博弈主体支付矩阵

博弈主体		策略选择	消费者	
			购买(z)	不购买($1-z$)
政府	严格监管(x)	建筑企业 建造低碳建筑(y)	$-C_1+V_1-V_3-V_5$	$-C_1-S_1-V_3$
			$V_2-C_2+V_3$	$V_2-C_2+V_3$
		建筑企业 建造传统建筑($1-y$)	$-C_3+V_5+V_6$	0
			$-C_1-S_1-V_5+S_2$	$-C_1-S_1+S_2$
	不严格监管 ($1-x$)	建筑企业 建造低碳建筑(y)	$V_2+V_4-R_1-S_2$	$V_2+V_4-R_1-S_2$
			$-C_3+V_5-R_2+V_6$	$-R_2$
建筑企业	严格监管(x)	消费者 购买(z)	0	$-S_1$
			V_2-C_2	V_2-C_2
		消费者 不购买($1-z$)	$-C_3+V_6$	0
			$-S_1+S_2$	$-S_1$
	不严格监管 ($1-x$)	消费者 购买(z)	$V_2+V_4-R_1-S_2$	$V_2+V_4-R_1$
			$-C_3-R_2$	$-R_2$

2. 主体的复制动态方程及其均衡点

利用演化博弈支付矩阵计算三方主体的

期望收益与平均收益,根据 Malthusian 模型构建各主体的复制动态方程。政府严格监管

时的期望收益为 U_{x1} , 不严格监管时的期望收益为 U_{x2} 。

其中, U_{x1} 与 U_{x2} 分别为

$$\begin{aligned} U_{x1} &= yz(-C_1 + V_1 - V_3 - V_5) + y(1-z)(-C_1 - S_1 - V_3) + z(1-y)(-C_1 - S_1 - V_5 + S_2) + (1-y)(1-z)(-C_1 - S_1 + S_2) \\ U_{x2} &= y(1-z)(-S_1) + z(1-y)(-S_1 + S_2) + (1-y)(1-z)(-S_1) \end{aligned} \quad (2)$$

由式(1)、式(2)可知, 政府的平均期望收益 U_x 为

$$U_x = xU_{x1} + (1-x)U_{x2} \quad (3)$$

根据 Malthusian 模型, 构建政府选择“严格监管”策略时的复制动态方程 $F(x)$ 为

$$F(x) = dx/dt = x(1-x)(U_{x1} - U_{x2}) = x(1-x)[y(-V_3 - S_2) + z(-V_5 - S_2) + yz(V_1 + S_2) - C_1 + S_2] \quad (4)$$

$$\begin{cases} F(x) = x(1-x)(U_{x1} - U_{x2}) = x(1-x)[y(-V_3 - S_2) + z(-V_5 - S_2) + yz(V_1 + S_2) - C_1 + S_2] \\ G(y) = y(1-y)(U_{y1} - U_{y2}) = y(1-y)[x(V_3 + S_2) + R_1 - C_2 - xzS_2 + zS_2] \\ H(z) = z(1-z)(U_{z1} - U_{z2}) = z(1-z)[x(V_5 + V_6) + yV_6 - xyV_6 - C_3] \end{cases} \quad (7)$$

三方主体通过调整策略来实现期望收益最大化。根据微分方程的稳定性定理, 若某一策略为稳定状态时, x, y, z 需要满足 $F(x) = 0, G(y) = 0, H(z) = 0$ 的条件。对方程(7)进行求解, 可以得到以下 8 个均衡点: $(0,0,0)$ 、 $(0,0,1)$ 、 $(0,1,0)$ 、 $(0,1,1)$ 、 $(1,0,0)$ 、 $(1,0,1)$ 、 $(1,1,0)$ 、 $(1,1,1)$ 。当均衡点满足李雅普诺夫稳定性条件时, 三方博弈主体才处于演化稳定状态。在满足稳定性条件的情况下, $(0,0,0)$ 、 $(1,0,0)$ 、 $(0,1,0)$ 、 $(0,1,1)$ 、 $(1,1,1)$ 都可能是演化稳定策略点, 详细判别过程参见文献[11]。

三、数值实验与仿真分析

1. 演化稳定策略

对于均衡点 $(0,0,0)$, 在满足 $-C_1 + S_2 < 0, -C_2 - V_4 + R_1 < 0$, 且 $-C_3 < 0$ 的稳定性条件下, 假设: $V_3 = 2, V_5 = 1, C_1 = 5, V_1 = 1, C_2 = 4, S_2 = 4, V_4 = 6, R_1 = 2, C_3 = 3, V_6 = 1$ 。政府的监管成本过高或对企业惩罚金额过低时, 政府会选择“不严格监管”策略, 导致建筑企业的外在压力降低, 而企业为了获得更

其中, dx/dt 为政府选择“严格监管”策略的概率随时间 t 的变化率。同理, 建筑企业采取混合策略时的平均期望收益 U_y 为

$$U_y = yU_{y1} + (1-y)U_{y2} \quad (5)$$

式中: U_{y1} 为建筑企业建造低碳建筑的期望收益; U_{y2} 为建筑企业建造传统建筑的期望收益。

消费者采取混合策略时的平均期望收益 U_z 为

$$U_z = zU_{z1} + (1-z)U_{z2} \quad (6)$$

式中: U_{z1} 为消费者购买低碳建筑的期望收益; U_{z2} 为消费者不购买低碳建筑(即购买传统建筑)的期望收益。

根据式(1)~式(6), 建立政府、建筑企业和消费者的三方主体复制动态方程 $F(x)$ 、 $G(y)$ 和 $H(z)$, 分别为

高的收益会选择“建造传统建筑”策略, 消费者只能选择“不购买”策略来降低自己的成本。因此, 政府“不严格监管”、建筑企业“建造传统建筑”和消费者“不购买”的策略达成了演化稳定策略(见图1)。

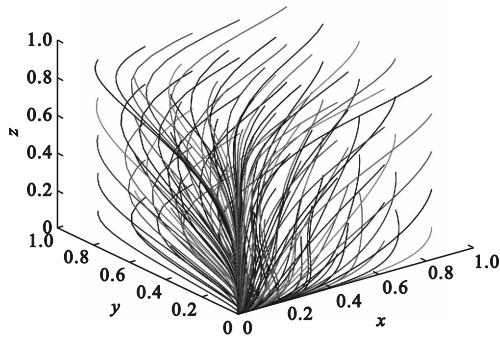


图1 均衡点 $(0,0,0)$ 的仿真分析结果

对于均衡点 $(1,0,0)$, 在满足 $C_1 - S_2 < 0, V_3 + S_2 - C_2 - V_4 + R_1 < 0$, 且 $V_6 + V_5 - C_1 < 0$ 的稳定性条件下, 假设: $V_3 = 2, V_5 = 1, C_1 = 5, V_1 = 2, C_2 = 4, S_2 = 6, V_4 = 6, R_1 = 1, C_3 = 3, V_6 = 1$ 。企业采取“建造传统建筑”策略时受到的惩罚金额对于政府而言是“严格监管”策略下的收益, 所以政府自然会选择“严格监管”策略。政府对企业的罚款在一

定程度上会影响建筑企业的策略选择,在利益最大化目标的驱使下,企业铤而走险选择“建造传统建筑”策略以获得更高的利润。此外,政府对企业的罚款不会对消费者行为产生影响。因此,政府“严格监管”、企业“建造传统建筑”和消费者“不购买”的策略达成了演化稳定策略(见图2)。

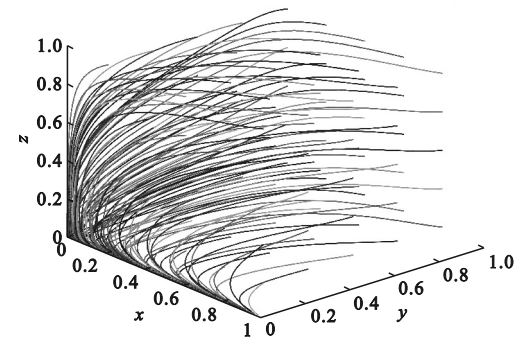


图2 均衡点(1,0,0)的仿真分析结果

对于均衡点(0,1,0),在满足 $C_2 + V_4 - R_1 < 0$ 且 $V_6 - C_3 < 0$ 的稳定性条件下,假设: $V_3 = 2, V_5 = 1, C_1 = 5, V_1 = 4, C_2 = 4, S_2 = 4, V_4 = 6, R_1 = 12, C_3 = 3, V_6 = 1$ 。建筑企业选择“建造传统建筑”策略所致潜在损失(企业形象损坏和市场认可度降低)的增加是促使其选择“建造低碳建筑”策略的重要因素。建筑企业的潜在损失不会对政府和消费者的决策产生影响。因此,政府“不严格监管”、企业“建造低碳建筑”和消费者“不购买”的策略达成了演化稳定策略(见图3)。

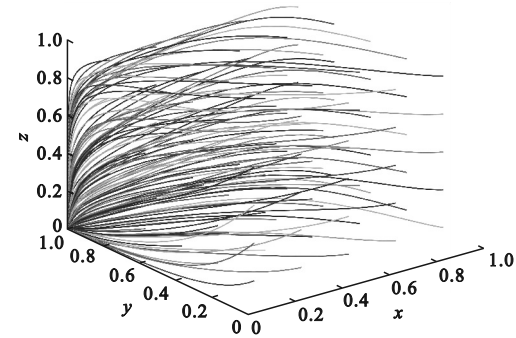


图3 均衡点(0,1,0)的仿真分析结果

对于均衡点(0,1,1),在满足 $-V_3 - V_5 - C_1 + V_1 < 0, -S_2 + C_2 + V_4 - R_1 < 0$,且 $C_3 - V_6 < 0$ 的稳定性条件下,假设: $V_3 = 2, V_5 = 1, C_1 = 5, V_1 = 7, C_2 = 4, S_2 = 4, V_4 = 6, R_1 = 12, C_3 = 3, V_6 = 4$ 。当收益足够高时,企

业会选择“建造低碳建筑”策略。此时,政府选择任一策略的结果相同,而政府为了降低监管成本会选择“不严格监管”策略。收益的提高与成本的降低会促使消费者选择“购买”策略。因此,政府“不严格监管”、企业“建造低碳建筑”和消费者“购买”的策略达成了演化稳定策略(见图4)。

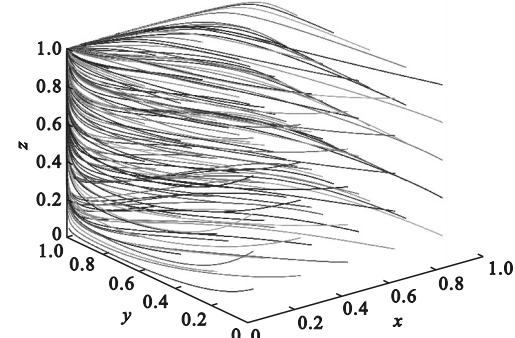


图4 均衡点(0,1,1)的仿真分析结果

对于均衡点(1,1,1),在满足 $V_3 + V_5 + C_1 - V_1 < 0, -S_2 + C_2 + V_4 - R_1 < 0$,且 $C_3 - V_6 - V_5 < 0$ 的稳定性条件下,假设: $V_3 = 2, V_5 = 1, C_1 = 5, V_1 = 10, C_2 = 4, S_2 = 4, V_4 = 6, R_1 = 12, C_3 = 3, V_6 = 5$ 。在建筑企业和消费者都倾向于积极策略时,提高政府的潜在收益(公共形象和公信力)便可以使三方博弈进入良性循环。因此,政府“严格监管”、建筑企业“建造低碳建筑”和消费者“购买”的策略达成了演化稳定策略(见图5)。

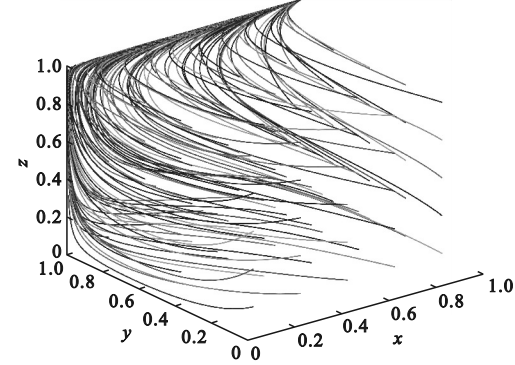


图5 均衡点(1,1,1)的仿真分析结果

2. 参数敏感性分析

目前,中国建筑企业在选择“建造低碳建筑”策略时,仍需政府的财政支持。消费者购买低碳建筑的选择会激励更多建筑企业从“要我做”向“我要做”转变,同时可以帮助政府减

少监管成本。由此可见,政府“不严格监管”、建筑企业“建造低碳建筑”和消费者“购买”是更加合适的策略,即均衡点(0,1,1)。

对均衡点(0,1,1)中的以下参数进行敏感性分析:建筑企业建造低碳建筑的增量成本 C_2 、政府严格监管时建筑企业建造低碳建筑获得的利益 V_3 、建筑企业建造传统建筑获得的额外收益 V_4 和受罚金额 S_2 。当分析其中任何一个参数对三方主体演化路径的敏感性时,其他参数的取值均保持不变。

(1)对建筑企业建造低碳建筑的增量成本 C_2 的敏感性分析如图 6 所示。在满

足 $-V_3 - V_5 - C_1 + V_1 < 0$, $-S_2 + C_2 + V_4 - R_1 < 0$ 且 $C_3 - V_6 < 0$ 的条件下,将 C_2 的值分别设为 4、6 和 8。由图 6(a)可知,建筑企业建造低碳建筑的增量成本的增加对政府决策影响较小。由图 6(b)可知,当增量成本较低时,建筑企业倾向于选择“建造低碳建筑”策略。然而随着增量成本的增加,建筑企业选择“建造低碳建筑”策略的概率先增后减,最终将选择“建造传统建筑”策略。由图 6(c)可知,当增量成本较低时,消费者将选择“购买”策略。随着增量成本的增加,消费者最终将选择“不购买”策略。

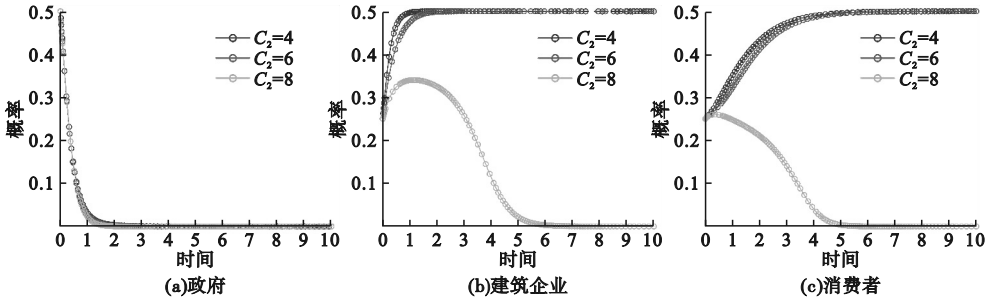


图 6 增量成本 C_2 对演化路径的影响

(2)对政府严格监管下企业建造低碳建筑获得的收益 V_3 的敏感性分析如图 7 所示。在满足 $-V_3 - V_5 - V_1 + V_1 < 0$, $-S_2 + C_2 + V_4 - R_1 < 0$ 且 $C_3 - V_6 < 0$ 的条件下,将 V_3 的值分别设为 2、6 和 10。由图 7(a)可知,建造低碳建筑获得的利益会影响政府的选择策略,随着利益的增加,政府选择“不监管”策略的收敛速度也随之加快。由图 7(b)可知,随着建筑企业建造低碳建筑利益的增加,企业选择“建造低碳建筑”策略的概率也随之增大,表明企业建造低碳建筑所获得的利益正向促进了企业选择建造低碳建筑。由图 7(c)可知,建筑企业建造低碳建筑获得利益

的变化对消费者的决策选择几乎没有影响。

(3)对建筑企业建造传统建筑获得的额外收益 V_4 的敏感性分析如图 8 所示。在满足 $-V_3 - V_5 - C_1 + V_1 < 0$, $-S_2 + C_2 + V_4 - R_1 < 0$ 且 $C_3 - V_6 < 0$ 的条件下,将 V_4 的值分别设为 6、7.5 和 9。由图 8(a)可知,对于政府而言,建筑企业建造传统建筑的收益增加对政府决策影响较小。由图 8(b)可知,当建筑企业建造传统建筑获得的收益增加时,建筑企业选择“建造低碳建筑”策略的收敛速度会降低。由图 8(c)可知,随着建筑企业建造传统建筑的收益增加,消费者选择“购买”策略的收敛速度不断降低。

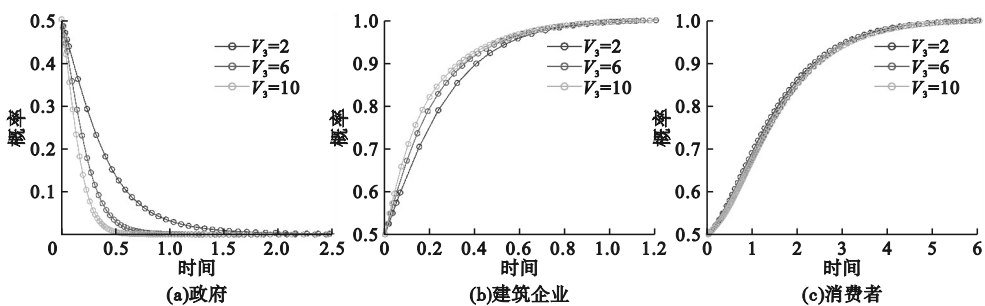


图 7 建造低碳建筑的收益 V_3 对演化路径的影响

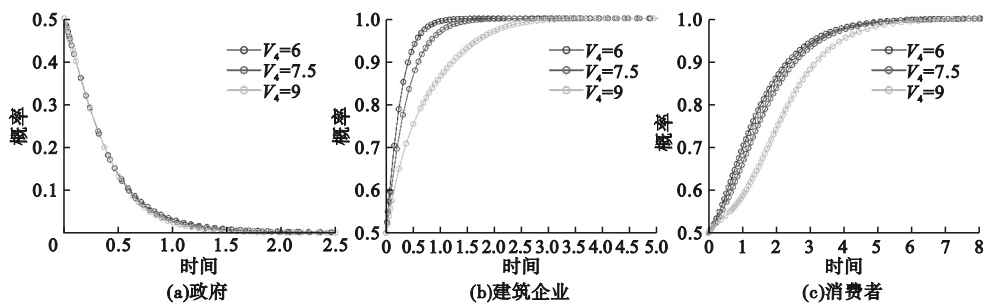


图 8 建造传统建筑的额外收益 V_4 对演化路径的影响

(4) 对建筑企业建造传统建筑所受到的惩罚金额 S_2 的敏感性分析如图 9 所示。在满足 $-V_3 - V_8 - C_1 + V_1 < 0$, $-S_2 + C_2 + V_4 - R_1 < 0$ 且 $C_3 - V_6 < 0$ 的条件下, 将 S_2 的值分别设为 5、6 和 7。由图 9(a) 可知, 增加对建

筑企业的罚款会促使政府选择“不严格监管”的策略。由图 9(b) 和图 9(c) 可知, 演化路径曲线几乎重叠, 表明建筑企业选择建造传统建筑所受到的惩罚金额的改变对建筑企业和消费者的决策几乎没有影响。

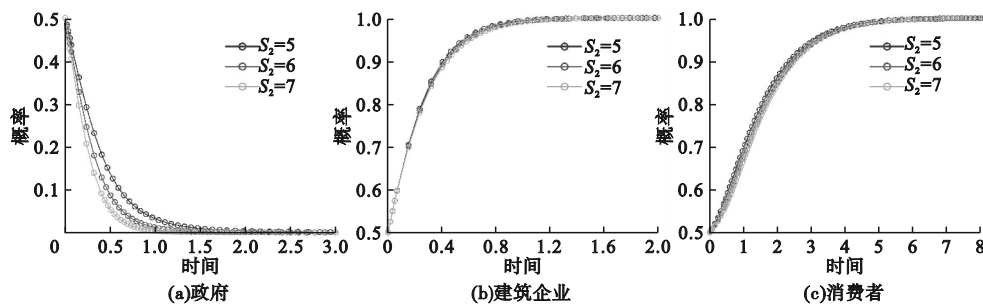


图 9 建造传统建筑所受的惩罚金额 S_2 对演化路径的影响

四、结论与建议

1. 结 论

通过构建三方主体演化博弈模型, 分析了建筑业碳减排治理的主体利益关系和影响因素, 得出了以下研究结论: 从碳减排治理的实际情况来看, $(0, 1, 1)$ 为最合适的策略; 在 $(0, 1, 1)$ 均衡点, 建筑企业建造低碳建筑的增量成本会影响建筑企业和消费者的决策, 而其对政府的决策影响程度较低; 在政府的严格监管下, 改变建筑企业建造低碳建筑获得的利益、建造传统建筑获得的额外收益和受到的惩罚金额仅会改变三方主体决策概率的收敛速度, 不会改变三方主体的最终决策。

2. 建 议

(1) 对政府而言, 应通过制定完善的信息公开制度、提高监督人员的专业水平、加强政策制定及监督管理工作等措施, 降低政府的监督成本。应科学制定建筑全生命周期的

碳减排标准, 加快构建行业的绿色低碳技术体系, 推动建筑行业低碳发展的制度创新、技术创新和工程创新, 对开展低能耗、低碳(零碳)建筑工程的企业予以通报表扬并给予财政补贴, 对落实不力的建筑企业予以通报批评并处以罚款。

(2) 对建筑企业而言, 低碳技术的开发或引进都需要大量的资金作为支撑, 研发资金不足和建筑增量成本过高均会制约低碳建筑的发展。建筑企业应积极与高校或科研机构合作以促进相关低碳技术的研究, 推动以建筑设计为主体的技术方法创新, 改变建筑施工大多仍处于高能耗和高排放的现状。

(3) 对消费者而言, 居住需求已经从“有得住”转变为“住得好”。但就整体而言, 目前大多数消费者对于环境的认识 and 关注度不够, 参与低碳生活的意识不强。可通过加强对低碳建筑的宣传, 提高消费者的低碳意识, 从而实现消费者的生活消费低碳化。对购买

低能耗建筑的消费者进行减税或提供补贴,不仅能提高消费者参与低碳环保行为的积极性,而且将促使消费者购买低碳建筑。

参考文献:

[1] 李绥,邵信洋,李明. 应对气候变化的建筑碳封存研究进展与设计应用展望[J]. 沈阳建筑大学学报(社会科学版),2021,23(2):109-116.

[2] 陆菊春,欧阳寒旭,韩璐. 多主体互动博弈下建筑企业低碳转型的演化机理[J]. 北京理工大学学报(社会科学版),2019(1):17-26.

[3] 王波,廖方伟,张敬钦. 绿色建筑发展关键主体演化博弈模型与仿真[J]. 技术经济与管理研究,2021(7):109-114.

[4] 罗福周,唐佳. 第三方监督下政企低碳减排策略演化博弈研究[J]. 生态经济,2020(4):30-34.

[5] 刘小兰,李洁云. 政府、旅游企业和旅游消费者的演化博弈分析:基于低碳视角[J]. 会计

与经济研究,2017(3):117-127.

[6] 张倩. 基于动态演化博弈的企业技术创新均衡策略[J]. 科技管理研究,2016(21):19-24.

[7] 张铎. 环境关注视角下消费者绿色产品消费行为研究[J]. 价格理论与实践,2021(9):197-200.

[8] 徐松鹤. 公众参与下地方政府与企业环境行为的演化博弈分析[J]. 系统科学学报,2018(4):68-72.

[9] 杜建国,王敏,陈晓燕,等. 公众参与下的企业环境行为演化研究[J]. 运筹与管理,2013(1):244-251.

[10] 刘文龙,吉蓉蓉. 低碳意识和低碳生活方式对低碳消费意愿的影响[J]. 生态经济,2019(8):40-45.

[11] 周鲜华,单晶. 东北三省绿色住宅开发主体演化博弈[J]. 沈阳建筑大学学报(社会科学版),2023,25(2):153-160.

Treatment of Carbon Emission Reduction in Construction Industry Based on Three-Party Evolutionary Game

LIU Yachen, HU Shanshan, LIU Ning
(School of Management, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

Abstract:Constructing a game model of the game relationship among governments, construction companies, and consumers through evolution games has important reference significance for promoting the low-energy consumption development of the construction industry. By analyzing the main interests and influencing factors of carbon emission reduction governance in the construction industry, a three-party evolutionary game model was established using MATLAB numerical simulation. The results show that the strategy for the three-party game to eventually reach a stable state is that the government does not strictly regulate, construction companies build low-carbon buildings, and consumers purchase low-carbon buildings; the incremental cost has a greater impact on the decision-making of construction companies and consumers while a smaller impact on the government's decision-making; when the government strictly regulates, the benefits that construction companies receive by choosing to build low-carbon buildings, the additional benefits they receive by choosing to build traditional buildings, and the penalty amount they receive only affect the convergence speed of the three-party evolution and have a smaller impact on the final decision.

Key words: construction industry; carbon emission reduction; evolutionary game; MATLAB
(责任编辑:徐聿聪 英文审校:林 昊)