

文章编号: 1674-9057(2019)02-0482-10

doi:10.3969/j.issn.1674-9057.2019.02.031

# 绿色建筑项目供给侧主体行为演化博弈分析

黄定轩<sup>1,2</sup>, 陈梦娇<sup>2</sup>, 黎昌贵<sup>2</sup>

(1. 重庆理工大学 管理学院, 重庆 400054; 2. 桂林理工大学 商学院, 广西 桂林 541004)

**摘要:** 绿色建筑是实现绿色经济的重要途径之一, 为准确阐明开发商与政府具有有限理性前提下的行为演化特征, 建立绿色建筑供给侧演化博弈模型。对博弈模型的分析表明, 系统的稳定状态与政府对绿色建筑项目激励、政府对绿色建筑项目违约处罚、开发绿色建筑的增量成本、增量收益和增量风险损失等因素密切相关, 不同要素组合下存在不同的稳定情形。在此基础上, 建立系统动力学模型, 借助数据仿真分析典型情形下绿色建筑供给侧博弈双方行为的动态变化。研究结果表明, 促进绿色建筑项目发展重点是要增加开发商在绿色建筑项目的增量收益。

**关键词:** 绿色建筑; 增量收益; 增量成本; 增量风险损失; 演化博弈

**中图分类号:** F270

**文献标志码:** A

## 0 引言

建筑项目消耗了全球 40% 的原材料, 建筑运营消耗了全球 32% 的可再生与不可再生资源、12% 的水、40% 的能源, 并且产生了 40% 的 CO<sub>2</sub> 排放量<sup>[1]</sup>。如何实现经济和社会的可持续发展是一个重要的研究课题, 佟贺丰等构建中国可持续发展模型, 选择森林、绿色建筑、城市交通等 7 个行业进行情景仿真分析, 结果显示走绿色发展道路中国可以实现质量更高的经济增长<sup>[2]</sup>。金占勇等的研究表明, 大力发展“四节一环保”的绿色建筑能够在一定程度上缓解中国社会对能源的旺盛需求<sup>[3]</sup>。Zhao 等通过实证研究发现, 基于绿色建筑的全生命周期, 消费者导向、社会和人道主义需求等因素应在绿色建筑的概念设计、规划设计、运营和维护中一并考虑, 从而提高消费者的幸福感和效率<sup>[4]</sup>。然而, 中国城市科学学会提供的资料表明, 截至 2015 年 12 月 31 日, 全国绿色建筑评价标识项目总面积为 4.6 亿 m<sup>2</sup>, 2015 年绿色建筑评价标识项目总面积为 1.65 亿 m<sup>2</sup><sup>[5]</sup>。

如果将这个数字与中国每年的建筑竣工面积相比, 同《国家新型城镇化规划》(2014—2020 年)的规划目标——2020 年 50% 的新建建筑要达到绿色建筑标准相比, 中国建筑业任重道远。

针对绿色建筑发展的影响因素, 国内外学者开展了一系列的研究。王敏等分析现阶段参与绿色建筑开发所面临的技术-设计、经济、社会-文化、制度等四方面的挑战, 结果表明经济挑战因素中绿色建筑的建设成本高, 排名第一, 技术-设计挑战因素中新材料/新技术/新设备的应用缺乏施工经验、缺乏有关绿色建筑的专业教育和培训、缺乏对绿色建筑项目全寿命周期的集成设计分别排名第二到四<sup>[6]</sup>。秦旋等发现无绿色建筑经验的专家比有绿色建筑经验的专家对绿色建筑的风险态度更悲观, 通过一维组间方差分析发现不同单位的 5 类专家(包括建设单位、施工单位、设计单位、咨询单位和研究单位)除“项目的绿色目标定位不准确”的观点存在显著差异之外, 其他的风险因素看法基本一致, 无显著性差异<sup>[7]</sup>。Zhou 利用生态现代化观点分析了中国绿色建筑项目, 研究结果表

收稿日期: 2017-09-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(71662008); 广西建筑新能源与节能重点实验开放基金项目(桂科能 16-J-21-8)

作者简介: 黄定轩(1970—), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 项目管理与服务管理, huangdingxuan@126.com。

引文格式: 黄定轩, 陈梦娇, 黎昌贵. 绿色建筑项目供给侧主体行为演化博弈分析 [J]. 桂林理工大学学报, 2019, 39(2): 482-491.

明，自上而下的国家方式并不能有效解决绿色建筑项目发展过程中的矛盾和房地产开发过程中的利益动机<sup>[8]</sup>。Yang 等选择中国和澳大利亚的绿色建筑项目，利用社会网络分析方法研究基于不同利益相关者的绿色建筑项目风险网络，结果表明声誉风险在两个国家同等重要，中国政府在促进绿色技术推广和社会意识上扮演着重要的作用<sup>[1]</sup>。Kasai 等实证分析发现技术因素和文化因素是阻碍巴西绿色建筑发展的两个最明显的因素<sup>[9]</sup>。Olubunmi 等研究发现绿色建筑激励因素对于促进绿色建筑发展至关重要，绿色建筑的激励因素可以归纳为外部因素和内部因素两类，政府是最大的外部激励因素来源<sup>[10]</sup>，同样，Elias 等研究发现政府在促进绿色建筑发展和住宅技术进步方面有着十分重要的作用<sup>[11]</sup>。Dwaikat 等统计研究绿色建筑与传统建筑成本差异是否具有一致性结论时，却没有得到期望结果<sup>[12]</sup>。Hopkins 实证分析大学绿色认证建筑与普通建筑是否有额外的前期成本和全生命周期的成本节约问题<sup>[13]</sup>。Shi 等提出绿色建筑全生命周期多目标潜在冲突的理论框架，利用粗集理论从利益相关者角度去识别不同项目目标的冲突大小<sup>[14]</sup>。Azouz 等从承包商的角度研究绿色建筑发展过程中存在的问题，结果发现主要存在的问题是增加时间需求、害怕变化、增加设备投资、害怕建筑文档审计等<sup>[15]</sup>。

因此，设计有效的绿色建筑项目激励机制也是研究绿色建筑发展的重要内容之一。Qian 等根据再生观点建立考虑额外交易成本的绿色建筑投资者与终端消费者动态博弈模型，研究结果表明额外交易成本是阻碍绿色建筑发展的最大障碍<sup>[16]</sup>。王景慧等运用演化博弈理论建立单种群房地产开发商群体开发绿色建筑行为的动态模型，结果表明开发绿色建筑产生的超额收益、开发商的贴现因子、未开发绿色建筑错失销售机会所造成的利益损失及市场未成规模时开发绿色建筑所造成的净损失是影响房地产企业开发绿色建筑行为的 4 个关键因素<sup>[17]</sup>。陈小龙等就 3 种市场情景下的交易成本对绿色建筑开发决策影响进行研究，通过静态博弈模型构建和推导论证不同情形下的决策模型并给出了政策建议<sup>[18]</sup>。林敏在分析绿色建筑项目的利益主体范围和层次的基础上，研究绿色建筑涉及的多方利益主体的主要行为<sup>[19]</sup>。金占勇

等研究认为经济效益是房地产开发商是否开发绿色建筑的关键影响因素，经济激励额度是影响房地产开发商决策的重要影响因素<sup>[3]</sup>。孙金颖等根据绿色建筑评价标识制度现阶段存在的主要问题，建立供给侧主体消费者和房地产开发商的进化博弈模型，分析制度中供给侧主体的运行机理<sup>[20]</sup>。黄定轩建立开发商与业主具有有限理性的绿色建筑需求侧演化博弈模型，借助数据仿真分析典型情形下绿色建筑需求侧博弈双方行为的动态变化<sup>[21]</sup>。Teng 等为评估绿色建筑发展政策的生态足迹和生态环境质量特征，建立“绿色建筑生态环境”模型，利用系统动力学软件研究绿色建筑不同发展政策情形下的影响及其趋势<sup>[22]</sup>。

总体而言，对绿色建筑项目影响因素、激励机制的研究，相关学者已经展开了一系列的工作。研究者对中国发展绿色建筑项目相关因素的实证研究也为开展绿色建筑项目激励研究提供了可靠基础。然而，相关研究对中国绿色建筑项目行为主体假设要么是建立在经典博弈的理论基础之上，要么仅考虑有限单种群的行为。在绿色建筑发展过程中，尤其是绿色建筑项目前期推广过程中政府的积极参与关系重大，需要政府部门从各方面给予支持和激励才能有效促进绿色建筑项目的发展，有限理性的开发商与政府之间的博弈是持续反复进行的，不可能通过一次博弈就能达到均衡状态。因此需要从动态的角度出发，探寻以政府和开发商为主体的供给侧博弈行为的演进规律才能获得更为科学的最优策略点。

# 1 绿色建筑供给侧模型构建与分析

## 1.1 演化博弈模型

在演化博弈中，核心概念是演化稳定策略 (ESS) 和复制动态 (RD)。ESS 表示一个种群抵抗变异策略进入的一种稳定状态。演化稳定策略意味着当博弈参与者随机配对进行博弈时，在位种群成员的支付水平高于入侵者的支付水平。每个博弈参与者都有  $(1 - \varepsilon)$  的概率遇到选择策略  $x$  的参与者，同时，其还有  $\varepsilon$  的概率遇到入侵者。ESS 被定义为

$$u[x, (1 - \varepsilon)x + \varepsilon x'] > u[x', (1 - \varepsilon)x + \varepsilon x'], \quad (1)$$

其中， $\varepsilon$  是一个极小的正数， $0 < \varepsilon < \bar{\varepsilon}$ 。

复制动态方程实际上是描述一个特定策略在

一个种群中被采用的频数或频度的微分方程。其基本思想是：如果策略  $x$  的结果优于平均水平，那么选择该策略的那些群体在整个种群中的比例就会上升。复制动态的微分方程为

$$dx_k/dt = x_k[u(k) - \bar{u}(s)], k = 1, 2, \dots, n, \quad (2)$$
式中： $x_k$  为一个种群中采用策略  $x$  的比例； $u(k)$  表示采用策略  $k$  时的适应度； $\bar{u}(s)$  表示平均适应度。

1.2 绿色建筑项目供给侧博弈模型假设

根据我国建筑管理体制的现状，作如下假设：① 有 2 个有限理性的局中人：一个为是否对开发绿色建筑项目行为进行激励的政府部门，另一个为是否开发绿色建筑项目的开发商；② 开发商可以选择的行动集合假设为  $A_1 = \{\text{开发, 不开发}\}$ ，政府部门可以选择的行动集合假设为  $A_2 = \{\text{奖励, 不奖励}\}$ ；③ 局中人的信息是不完全信息；④ 由于绿色建筑的社会收益和环境收益在目前技术条件下难以准确测度和计量，因此把这两种收益用经济收益替代并统一用经济收益表示。政府部门能从开发绿色建筑项目中获得诸如完成节能减排指标等利益  $F$ ，其对相应绿色建筑项目激励成本为  $S(R)$ ，当政府部门不对绿色建筑项目进行税收或土地政策优惠等激励时，开发商通常不会开发绿色建筑项目行为，则政府部门的收益假设为 0。开发商按《绿色建筑评价标准》(GB/T 50378—2006) 进行绿色建筑项目开发的增量成本为  $\Delta C$ ，而其开发绿色建筑项目的增量利益为  $R$ 。根据前文绿色建筑开发风险的研究结论，再假定开发商开发绿色建筑项目失败的概率为  $f$ ，如果开发项目失败，开发商的损失为  $H$ ，二者的乘积称为增量风险损失；同时假定开发商开发普通建筑项目时能够获得收益  $r$ ；再者开发商如果与政府部门签订了绿色建筑项目激励合同而因各种原因无法执行该开发合同时，政府部门将对开发商违约行为处罚款  $A$ ，此时政府无法获得开发绿色建筑项目的收益，项目开发商的收益为  $r + S(R) - A$ ，政府部门的收益为  $-S(R) + A$ 。

对奖励成本不妨设定条件  $S'(R) > 0, S''(R) < 0$ 。这一假定条件的含义是：当政府部门能从开发绿色建筑项目获得利益  $F$  时，地方政府有动力为开发绿色建筑行为提供奖励，地方政府从开发绿色建筑项目中收益越大，其提供的奖励程度也将越大，则相应博弈支付矩阵见表 1。

表 1 绿色建筑项目供给侧博弈支付

Table 1 Game payoff of supply side in green building

		政府部门	
		奖励	不奖励
开发商	开发	$r + R + S(R) - \Delta C - f \cdot H, F - S(R)$	$r + R - \Delta C - f \cdot H, F$
	不开发	$r + S(R) - A, -S(R) + A$	$r, 0$

1.3 绿色建筑项目供给侧演化博弈模型

假设：开发商开发绿色建筑的比例为  $x$ ，开发普通建筑的比例为  $(1 - x)$ ；政府选择激励绿色建筑策略的比例为  $y$ ，选择不激励策略的概率为  $(1 - y)$ 。结合博弈支付矩阵可得开发商开发绿色建筑策略时的适应度

$$UD_g = y \cdot (r + R + S(R) - \Delta C - f \cdot H) + (1 - y) \cdot ((r + R - \Delta C - f \cdot H)) = R + r - \Delta C - f \cdot H + S(R) \cdot y; \quad (3)$$

开发商选择普通建筑策略时的适应度

$$UD_o = y \cdot (r + S(R) - A) + (1 - y) \cdot r = r - y(A - S(R)); \quad (4)$$

开发商的平均适应度

$$\overline{UD} = x \cdot UD_g + (1 - x) \cdot UD_o = x \cdot (R - \Delta C - f \cdot H) + r + y \cdot (A \cdot x - (A - S(R))); \quad (5)$$

因此，开发商选择开发绿色建筑策略时的复制动态方程：

$$\frac{dx}{dt} = x(UD_g - \overline{UD}) = x \cdot (1 - x) \cdot (A \cdot y + (R - \Delta C - f \cdot H)). \quad (6)$$

同理，政府选择激励绿色建筑策略时的适应度

$$UG_1 = x(F - S(R)) + (1 - x)(A - S(R)) = (A - S(R)) - x \cdot (A - F); \quad (7)$$

政府选择不激励策略时的适应度

$$UG_N = x \cdot F + (1 - x) \cdot 0 = x \cdot F; \quad (8)$$

政府的平均适应度

$$\overline{UG} = y \cdot UG_1 + (1 - y) \cdot UG_N = y \cdot (A - S(R)) - x \cdot (A \cdot y - F); \quad (9)$$

因此，政府选择激励绿色建筑策略时的复制动态方程

$$\frac{dy}{dt} = y(UG_1 - \overline{UG}) = y(1 - y)(A - S(R) - A \cdot x). \quad (10)$$

微分方程式(6) 和式(10) 描述了这个演化系统的复制动态,该系统的复制动态方程整理成

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = x \cdot (1-x) \cdot (A \cdot y + (R - \Delta C - f \cdot H)), \\ \frac{dy}{dt} = y(1-y)(A - S(R) - A \cdot x). \end{cases} \quad (11)$$

稳定性分析主要根据该系统雅可比矩阵的行列式及迹的符号组合。式(11)对应的雅可比矩阵为

$$J = \begin{bmatrix} (1-2x)(A \cdot y + (R - \Delta C - f \cdot H)) & x(1-x) \cdot A \\ -A \cdot y \cdot (1-y) & (1-2y)(A - S(R) - A \cdot x) \end{bmatrix} \quad (12)$$

通过方程(12)计算出该矩阵对应的行列式值

$$\det J = \{(1-2x)(A \cdot y + (R - \Delta C - f \cdot H))\} \cdot \{(1-2y)(A - S(R) - A \cdot x)\} + \{A \cdot y \cdot (1-y)\} \cdot \{x(1-x) \cdot A\}.$$
(13)

同理,通过方程(12)可计算出该矩阵对应的迹

$$\text{tr } J = -\{(1-2x) \cdot (A \cdot y + (R - \Delta C - f \cdot H)) + (1-2y) \cdot (A - S(R) - A \cdot x)\}.$$
(14)

2 绿色建筑项目供给侧演化博弈模型稳定点分析

上述假设和条件是基于演化稳定策略的原则,即开发商与政府之间基于相互学习的有限理性行为。这种情况虽然与一些地方的现实不完全符合,但通过绿色建筑供给侧双方博弈过程分析,可以从中揭示出双方行为取向及其稳定点。基于开发商和政府本位利益界定的假设,由此可以引伸出博弈双方的下列6种情形。

情形 1：政府激励大于违约罚款和开发商总体成本高情形下的行为演化博弈

由方程(11)可知,  $A < S(R)$ ,  $\Delta C + f \cdot H > A + R$ 时,复制动态方程有4个平衡点: $O(0,0)$ 、 $A(1,0)$ 、 $B(1,1)$ 、 $C(0,1)$ ,对应点行列式与迹的表达式和符号见表2,其所对应的相图如图1所示。由相图和雅可比行列式的分析可知,情形1的稳定点为 $O(0,0)$ 。当开发商开发绿色建筑项目的增量收益加上政府激励之和小于其开发绿色建筑项目增量成本与增量风险损失之和时,开发商最终选择开发普通建筑项目;当政府激励大于其处理企业违约罚款时,政府也缺乏动力。本情形存在某些绿色建筑项目政府和开发商均无利可图时。

情形 2：政府激励大于违约罚款和开发商总体成本低情形下的行为演化博弈

当  $A < S(R)$  且  $\Delta C + f \cdot H < R$  时,演化系统有4个平衡点: $O(0,0)$ 、 $A(1,0)$ 、 $B(1,1)$ 、 $C(0,1)$ 。对应点行列式与迹的表达式和符号见表3,对应的相图如图2所示。由相图和雅可比行列式的分析可知,情形2的稳定点为 $A(1,0)$ 。当开发商开发绿色建筑项目的增量收益大于其开发绿色建筑项目增量成本与增量风险损失之和时,开发商选择开发绿色建筑项目;当政府激励小于其处理企业违约罚款时,政府缺乏激励绿色建筑项目发展动力,系统最终稳定于政府不激励而开发商开发绿色

表2 情形1条件下的稳定性分析

Table 2 Local stable analysis of equilibrium point under Situation 1

平衡点	$\det J$	$\det J$ 符号	$\text{tr } J$	$\text{tr } J$ 符号	局部稳定性
$x = 0, y = 0$	$(R - \Delta C - f \cdot H) \cdot (A - S(R))$	$> 0$	$-(R - \Delta C - f \cdot H) - (A - S(R))$	$> 0$	稳定点
$x = 1, y = 0$	$-(\Delta C + f \cdot H - R) \cdot S(R)$	$< 0$	$R + S(R) - \Delta C - f \cdot H$		鞍点
$x = 1, y = 1$	$-(A + R - \Delta C - f \cdot H) \cdot S(R)$	$> 0$	$R + A - \Delta C - f \cdot H - S(R)$	$< 0$	不稳定点
$x = 0, y = 1$	$-(A - S(R)) \cdot (A + R - \Delta C - f \cdot H)$	$< 0$	$\Delta C + f \cdot H - S(R) - R$		鞍点

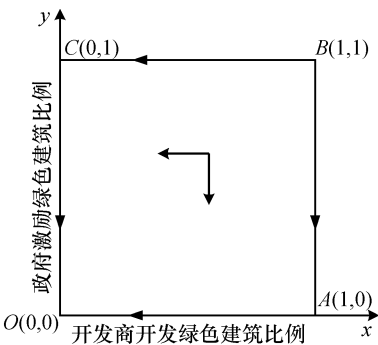


图1 情形1时相图  
Fig. 1 Phase diagram under Situation 1

建筑项目。本情形存在于绿色建筑项目对开发商有较大的增量收益时。

情形 3：政府激励大于违约罚款和开发商总体成本中间情形下的行为演化博弈

当  $A < S(R)$  且  $R < \Delta C + f \cdot H < A + R$  时。方程有4个平衡点: $O(0,0)$ 、 $A(1,0)$ 、 $B(1,1)$ 、 $C(0,1)$ 。对应点行列式与迹的表达式和符号见表4,其对应的相图见图3。由相图和雅可比行列式的分析可知,情形3的稳定点为 $O(0,0)$ 。当开发商开发绿色建筑项目增量成本与增量风险损失之和介于

表 3 情形 2 条件下的稳定性分析

Table 3 Local stable analysis of equilibrium point under Situation 2

平衡点	$\det J$	$\det J$ 符号	$\text{tr } J$	$\text{tr } J$ 符号	局部稳定性
$x = 0, y = 0$	$(R - \Delta C - f \cdot H) \cdot (A - S(R))$	$< 0$	$-(R - \Delta C - f \cdot H) - (A - S(R))$		鞍点
$x = 1, y = 0$	$-(\Delta C + f \cdot H - R) \cdot S(R)$	$> 0$	$R + S(R) - \Delta C - f \cdot H$	$> 0$	稳定点
$x = 1, y = 1$	$-(A + R - \Delta C - f \cdot H) \cdot S(R)$	$< 0$	$R + A - \Delta C - f \cdot H - S(R)$		鞍点
$x = 0, y = 1$	$-(A - S(R)) \cdot (A + R - \Delta C - f \cdot H)$	$> 0$	$\Delta C + f \cdot H - S(R) - R$	$< 0$	不稳定点

表 4 情形 3 条件下的稳定性分析

Table 4 Local stable analysis of equilibrium point under Situation 3

平衡点	$\det J$	$\det J$ 符号	$\text{tr } J$	$\text{tr } J$ 符号	局部稳定性
$x = 0, y = 0$	$(R - \Delta C - f \cdot H) \cdot (A - S(R))$	$> 0$	$-(R - \Delta C - f \cdot H) - (A - S(R))$	$> 0$	稳定点
$x = 1, y = 0$	$-(\Delta C + f \cdot H - R) \cdot S(R)$	$< 0$	$R + S(R) - \Delta C - f \cdot H$		鞍点
$x = 1, y = 1$	$-(A + R - \Delta C - f \cdot H) \cdot S(R)$	$< 0$	$R + A - \Delta C - f \cdot H - S(R)$		鞍点
$x = 0, y = 1$	$-(A - S(R)) \cdot (A + R - \Delta C - f \cdot H)$	$> 0$	$\Delta C + f \cdot H - S(R) - R$	$< 0$	不稳定点

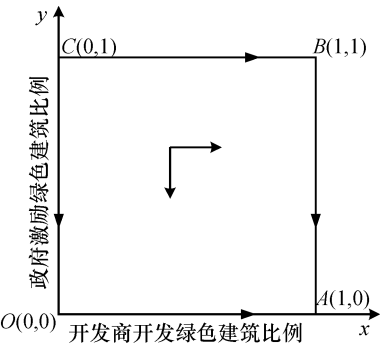


图 2 情形 2 时相图  
Fig. 2 Phase diagram under Situation 2

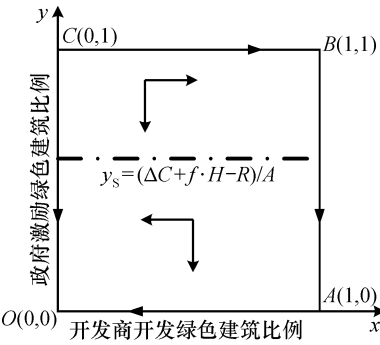


图 3 情形 3 时相图  
Fig. 3 Phase diagram under Situation 3

开发绿色建筑项目增量收益与政府激励开发绿色建筑项目增量收益之和之间，同时政府激励大于其处理违约企业罚款时，政府缺乏发展绿色建筑项目动力。此种情形下，政府采取一种混合行为状态，即以  $y_s = (\Delta C + f \cdot H - R) / A$  的比例激励绿色建筑项目。系统最终稳定于政府不激励而开发商开发普通建筑项目。本情形存在于绿色建筑项目对开发商“形同于鸡肋”，而政府也缺乏长远眼光时。

**情形 4：政府激励小于违约罚款和开发商总体成本高情形下的行为演化博弈**

当  $A > S(R)$  且  $\Delta C + f \cdot H > A + R$  时，局部稳定点有 4 个： $O(0,0)$ 、 $A(1,0)$ 、 $B(1,1)$ 、 $C(0,1)$ ，

对应点行列式与迹的表达式和符号见表 5，对应的相图如图 4 所示。由相图和雅可比行列式的分析可知，情形 4 的稳定点为  $C(0,1)$ 。当开发商开发绿色建筑项目的增量收益加上政府激励之和小于其开发绿色建筑项目增量成本与增量风险损失之和时，开发商最终选择开发普通建筑项目；当政府激励小于其处理企业违约罚款时，政府具有激励绿色建筑项目发展动力。此情形下开发商采取一种混合行为状态，即以  $x_s = 1 - S(R) / A$  的概率开发绿色建筑项目，系统最终稳定于政府激励，而开发商开发普通建筑项目。本情形存在于绿色建筑项目对开发商缺乏吸引力而政府具有罚款动力时。

表 5 情形 4 条件下的稳定性分析

Table 5 Local stable analysis of equilibrium point under Situation 4

平衡点	$\det J$	$\det J$ 符号	$\text{tr } J$	$\text{tr } J$ 符号	局部稳定性
$x = 0, y = 0$	$(R - \Delta C - f \cdot H) \cdot (A - S(R))$	$< 0$	$-(R - \Delta C - f \cdot H) - (A - S(R))$		鞍点
$x = 1, y = 0$	$-(\Delta C + f \cdot H - R) \cdot S(R)$	$< 0$	$R + S(R) - \Delta C - f \cdot H$		鞍点
$x = 1, y = 1$	$-(A + R - \Delta C - f \cdot H) \cdot S(R)$	$> 0$	$R + A - \Delta C - f \cdot H - S(R)$	$< 0$	不稳定点
$x = 0, y = 1$	$-(A - S(R)) \cdot (A + R - \Delta C - f \cdot H)$	$> 0$	$\Delta C + f \cdot H - S(R) - R$	$> 0$	稳定点

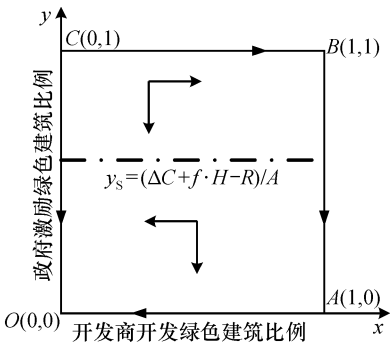


图4 情形4时相图  
Fig. 4 Phase diagram under Situation 4

情形5：政府激励小于违约罚款和开发商总体成本低情形下的行为演化博弈

当 $A > S(R)$ 且 $\Delta C + f \cdot H < R$ 时,由微分方程(11)可知,该方程在平面 $V = \{(x, y), 0 \leq x, y \leq 1\}$ 的局部稳定点有4个: $O(0,0)$ 、 $A(1,0)$ 、 $B(1,1)$ 、 $C(0,1)$ ,对应点行列式与迹的表达式和符号见表6,对应的相图如图5所示。由相图和雅可比行列式的分析可知,情形5的稳定点为 $A(1,0)$ 。当开发商开发绿色建筑项目的增量收益大于其开发绿色建筑项目增量成本与增量风险损失之和时,开发商选择开发绿色建筑项目;当政府激励小于其处理企业违约罚款时,政府具有激励动力。此情形下开发商采取一种混合行为状态,即以 $x_s = 1 - S(R)/A$ 的概率开发绿色建筑项目,系统最终稳定于政府不激励而开发商开发绿色建筑项目。本情形存在于绿色建筑项目对开发商有较大的增量收益,同时政府也具有较大罚款动力时。

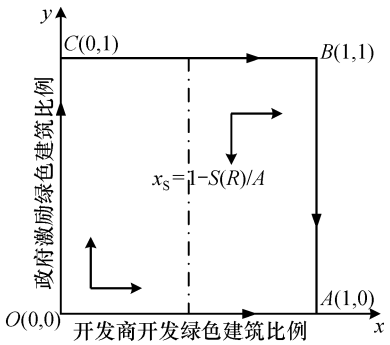


图5 情形5时相图  
Fig. 5 Phase diagram under Situation 5

情形6：政府激励小于违约罚款和开发商总体成本中间情形下的行为演化博弈

当 $A > S(R)$ 且 $R < \Delta C + f \cdot H < A + R$ 时,由微分方程(11)可知,该方程在平面 $V = \{(x, y), 0 \leq x, y \leq 1\}$ 的局部稳定点有5个: $O(0,0)$ 、 $A(1,0)$ 、 $B(1,1)$ 、 $C(0,1)$ 、 $S(x_s, y_s)$ 。其中,

$$x_s = 1 - \frac{S(R)}{A}, y_s = \frac{\Delta C + f \cdot H - R}{A} \quad (15)$$

相应地,系统各平衡点的稳定性分析见表7,系统演化相图如图6所示。该相图描述了开发商与政府博弈的动态演化过程。当开发商开发绿色建筑项目增量成本与增量风险损失之和介于开发绿色建筑项目增量收益与政府激励加开发绿色建筑项目增量收益之和之间时,同时政府激励小于其处理违约企业罚款时,在本位利益的驱动下开发商与政府部门各自采用了混合策略,系统缺乏稳定点。

表6 情形5条件下的稳定性分析  
Table 6 Local stable analysis of equilibrium point under Situation 5

平衡点	det J	det J 符号	tr J	tr J 符号	局部稳定性
$x = 0, y = 0$	$(R - \Delta C - f \cdot H) \cdot (A - S(R))$	$> 0$	$-(R - \Delta C - f \cdot H) - (A - S(R))$	$< 0$	不稳定点
$x = 1, y = 0$	$-(\Delta C + f \cdot H - R) \cdot S(R)$	$> 0$	$R + S(R) - \Delta C - f \cdot H$	$> 0$	稳定点
$x = 1, y = 1$	$-(A + R - \Delta C - f \cdot H) \cdot S(R)$	$< 0$	$R + A - \Delta C - f \cdot H - S(R)$		鞍点
$x = 0, y = 1$	$-(A - S(R)) \cdot (A + R - \Delta C - f \cdot H)$	$< 0$	$\Delta C + f \cdot H - S(R) - R$	$< 0$	鞍点

表7 情形6条件下的稳定性分析  
Table 7 Local stable analysis of equilibrium point under Situation 6

平衡点	det J	det J 符号	tr J	tr J 符号	局部稳定性
$x = 0, y = 0$	$(R - \Delta C - f \cdot H) \cdot (A - S(R))$	$< 0$	$-(R - \Delta C - f \cdot H) - (A - S(R))$		鞍点
$x = 1, y = 0$	$-(\Delta C + f \cdot H - R) \cdot S(R)$	$< 0$	$R + S(R) - \Delta C - f \cdot H$		鞍点
$x = 1, y = 1$	$-(A + R - \Delta C - f \cdot H) \cdot S(R)$	$< 0$	$R + A - \Delta C - f \cdot H - S(R)$		鞍点
$x = 0, y = 1$	$-(A - S(R)) \cdot (A + R - \Delta C - f \cdot H)$	$< 0$	$\Delta C + f \cdot H - S(R) - R$	$< 0$	鞍点
$x = x_s, y = y_s$	$S(R) \cdot (A - S(R)) \cdot (A + R - \Delta C f \cdot H) / A^2$	$> 0$	0		中心点

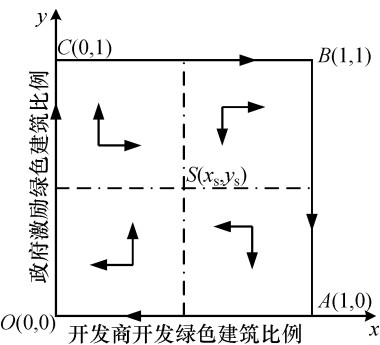


图6 情形6时相图  
Fig.6 Phase diagram under Situation 6

4 模型仿真分析

4.1 SD 演化博弈模型的建立

结合上述分析，为反映模型参数对绿色建筑供给侧的动态影响过程，采用系统动力学建模软件 Vensim 6.4 建立绿色建筑供给侧两个主体的系统动力学仿真模型如图 7 所示。该模型主要有 2 个状态变量  $x$  和  $y$ 、2 个流率变量  $dx/dt$  和  $dy/dt$ 、8

个外部初始变量和 6 个中间变量构成。各个外部初始变量在系统动力学仿真模型与理论模型中的对应关系、初值设置见表 8。

4.2 模型仿真分析

模型初始值假设为：仿真起始时间 INITIAL-TIME = 0，仿真结束时间 FINAL TIME = 100 年，仿真步长 TIME STEP = 0.007 812 5。分析在情形 6 条件下开发商的绿色建筑开发率  $x$  和政府部门激励率  $y$  在系统初始条件设置后的变化特性。博弈双方采用混合策略纳什均衡值时，开发商的绿色建筑开发行为比例和政府激励绿色建筑项目行为比例博弈演化过程如图 8、图 9 所示。当系统的初始值和混合策略纳什均衡值不等时，随着时间及博弈次数的增加，博弈双方的策略选择是围绕中心点存在着比较大的波动。

为进一步分析政府罚款力度对博弈双方行为的影响，现假设  $Time = 50$  年时减少对违约建筑企业的惩罚力度，即  $A$  由初始假设值 3 减少到 1，此

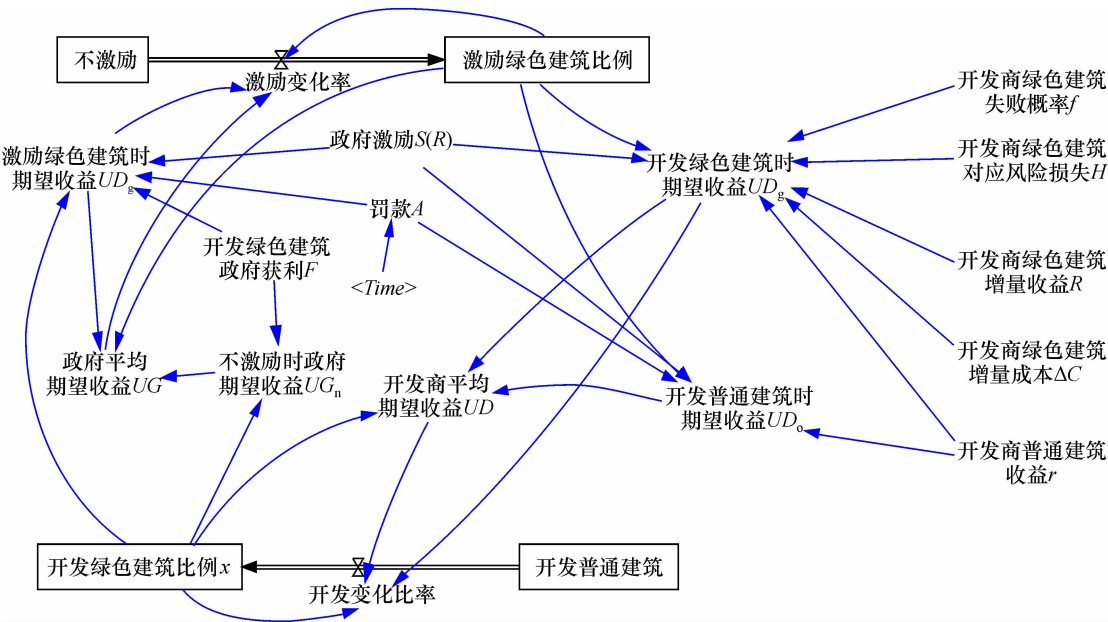


图7 绿色建筑供给侧 SD 模型  
Fig.7 SD model of supply side in green building

表8 仿真模型与理论模型初始变量对应关系及变量初值

Table 8 Corresponding relation and initial value on initial variables between simulation model and theoretical model					
理论模型中符号	仿真模型图7中符号	仿真初值	理论模型中符号	仿真模型图7中符号	仿真初值
$r$	开发商普通建筑收益 $r$	2.0	$H$	开发商绿色建筑对应风险损失 $H$	6.0
$R$	开发商绿色建筑增量收益 $R$	4.0	$F$	开发绿色建筑政府获利 $F$	1.0
$S(R)$	政府激励 $S(R)$	2.0	$A$	罚款 $A$	3.0
$\Delta C$	开发商绿色建筑增量成本 $\text{delt } C$	2.0	$y$	激励绿色建筑比例 $y$	0.2
$f$	开发商绿色建筑失败概率 $f$	0.4	$x$	开发商开发绿色建筑的比例为 $x$	0.4

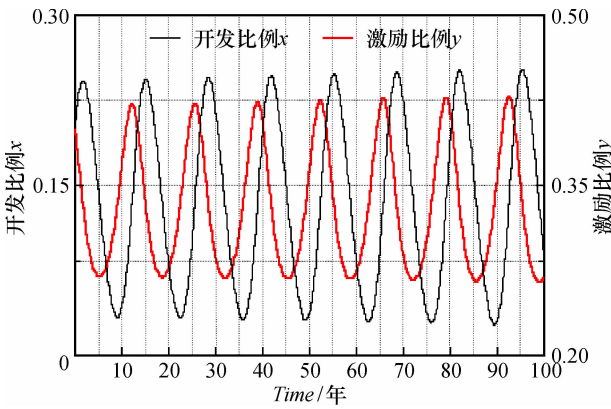


图8 绿色建筑开发比例与激励比例时变过程  
Fig. 8 Time-varying process of development and incentive proportion in green building

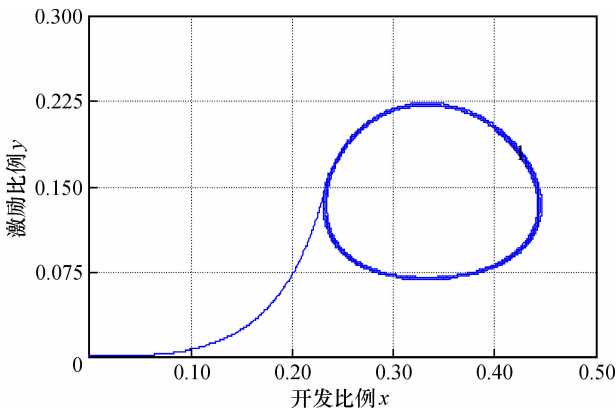


图11 具有突变的绿色建筑开发比例与激励比例对应演化过程  
Fig. 11 Relative evolutionary process on proportion of development and incentive with mutation in green building

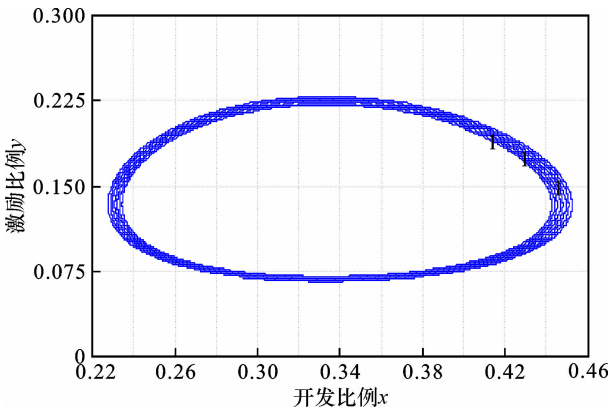


图9 绿色建筑开发比例与激励比例对应演化过程  
Fig. 9 Relative evolutionary process on proportion of development and incentive in green building

时系统的演化条件由情形6演变成情形3，演化系统激励比例和开发比例模拟结果如图10和图11所示，图11显示了博弈系统中的开发商绿色建筑项目开发比例和和政府激励绿色建筑比例如何从转绕中心点的动态均衡向原点演化过程。

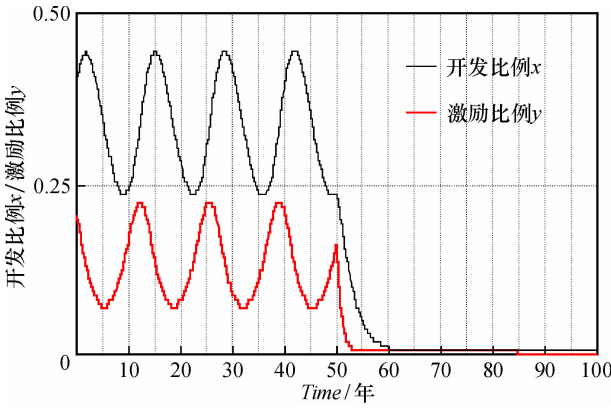


图10 具有突变的绿色建筑开发比例与激励比例时变过程  
Fig. 10 Time-varying process of development and incentive proportion with mutation in green building

## 5 模型参数变化对中心点的影响分析及政策建议

### 5.1 模型参数对中心点的影响分析

从绿色建筑供给侧演化博弈模型相图分析可知：在情形6条件下，政府和开发商的行为演化过程缺乏稳定点。因此，在政府部门与开发商博弈过程中，构成双方博弈支付函数的参数如政府对绿色建筑项目激励成本、政府对开发商违约行为罚款、开发商开发绿色建筑项目的增量成本、增量风险及其损失、增量收益等因素及其变化将导致演化系统向不同的中心点转移。

将式(15)中的  $x_s = 1 - S(R)/A$  对  $SR$  和  $A$  求导可得

$$\frac{\partial x_s}{\partial S(R)} = -\frac{1}{A} < 0, \tag{16}$$

$$\frac{\partial x_s}{\partial A} = \frac{S(R)}{A^2} > 0. \tag{17}$$

式(16)说明在情形6条件下政府增加对开发绿色建筑项目的激励将导致中心点向左移动，即开发商更多选择开发普通建筑项目策略，此情形可以理解为政府激励的项目基本上难度较大，开发商难以按约完成，同时这种激励背后的处罚也较大。式(17)说明政府增加对开发绿色建筑项目违约处理将导致中心点向右移动，即加大对开发绿色建筑项目违约处理将导致开发商开发绿色建筑项目策略。中心点的左右移动取决于开发商应对政府激励绿色建筑项目力度大小、政府对开发绿色建筑项目违约成本的综合考虑。

同理,将式(15)中的  $y_s = \frac{\Delta C + f \cdot H - R}{A}$  对

$R$ 、 $\Delta C$ 、 $f$ 、 $H$  和  $A$  求导可得

$$\frac{\partial y_s}{\partial R} = -\frac{1}{A} < 0; \quad (18)$$

$$\frac{\partial y_s}{\partial \Delta C} = \frac{1}{A} > 0; \quad (19)$$

$$\frac{\partial y_s}{\partial f} = \frac{H}{A} > 0; \quad (20)$$

$$\frac{\partial y_s}{\partial H} = \frac{f}{A} > 0; \quad (21)$$

$$\frac{\partial y_s}{\partial A} = \frac{R - \Delta C - f \cdot H}{A^2} < 0. \quad (22)$$

式(18)说明开发商开发绿色建筑项目增量收益增加将导致中心点向下移动,即政府激励概率减少;式(19)说明开发商在开发绿色建筑项目增量成本增加将导致中心点向上移动,即政府激励概率增加;式(20)说明开发商在开发绿色建筑项目风险增加将导致中心点向上移动,即政府激励概率增加;式(21)说明开发商在开发绿色建筑项目风险发生时损失增加将导致中心点向上移动,即政府激励概率增加;式(22)说明政府加大对开发绿色建筑项目违约处理将使中心点向下移动,即政府激励概率减少;中心点的上下移动取决于开发的增量收益、增量成本、风险大小、风险发生时损失及政府对绿色建筑项目违约处理力度的综合影响。

## 5.2 政策建议

从模型参数对模型稳定点的影响分析可知,在开发商与政府部门相对理性条件下,二者中心点变化是不同参数共同作用的结果。根据上述分析结论可以得出以下发展绿色建筑的政策建议:

(1) 增加绿色建筑发展初期政府对开发绿色建筑项目的激励力度,保证政府相关激励措施落实到位,同时依法依规惩处开发商在绿色建筑项目开发过程中的欺骗行为。

(2) 大力加强绿色建筑相关技术攻关工作,减少绿色建筑项目的风险并降低绿色建筑项目失败的风险损失,同时促进不同绿色建筑项目之间的技术共享,建立不同层级的绿色激励措施从而促进绿色建筑项目的发展。

(3) 通过税收或其他有效措施,提高绿色建筑相比传统建筑的收益。

## 6 结 论

(1) 演化博弈论与系统动力学相结合克服了传统博弈论局中人完全理性的局限性,可以更有效地拟合、解释现实中的动态博弈现象,为研究绿色建筑项目这一复杂问题提供新的研究思路。

(2) 通过建立绿色建筑项目供给侧演化博弈的 SD 模型及数据仿真分析可知,普通建筑项目获得大小、绿色建筑项目增量成本、绿色建筑项目增量利益、绿色建筑项目增量风险等因素、政府对开发绿色建筑项目的激励力度、政府对开发绿色建筑项目违约处理力度会对开发商和政府部门的博弈行为产生影响,进而影响绿色建筑项目供给侧最终演化结局。

(3) 综合运用演化博弈论和系统动力学方法研究绿色建筑项目供给侧管理尽管是一种新的尝试,但现实中情况常常更为复杂。因此,结合实际深化模型,将绿色建筑项目需求侧的业主和开发商结合起来研究将能更好地诠释和仿真实现实中的双层动态博弈现象,将是此类问题进一步研究的方向。

## 参考文献:

- [1] Yang R J, Zou P X W, Wang J Y. Modelling stakeholder-associated risk networks in green building projects [J]. International Journal of Project Management, 2016, 34 (1): 66 - 81.
- [2] 贺贺丰, 杨阳, 王静宜, 等. 中国绿色经济发展展望——基于系统动力学模型的情景分析 [J]. 中国软科学, 2015 (6): 20 - 34.
- [3] 金占勇, 孙金颖, 刘长滨, 等. 基于外部性分析的绿色建筑经济激励政策设计 [J]. 建筑科学, 2010, 26 (6): 57 - 62.
- [4] Zhao D X, He B J, Johnson C, et al. Social problems of green buildings: from the humanistic needs to social acceptance [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 51 (11): 1594 - 1609.
- [5] 中国城市科学研究会. 中国绿色建筑 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [6] 王敏, 秦旋, 莫懿懿. 基于利益相关者视角的绿色建筑挑战因素差异性和关联性的实证分析 [J]. 土木工程学报, 2014, 47 (12): 130 - 138.
- [7] 秦旋, 荆磊. 绿色建筑全寿命周期风险因素评估与分析: 基于问卷调查的探索 [J]. 土木工程学报, 2013, 46 (8): 123 - 135.

- [8] Zhou Y. State power and environmental initiatives in China: analyzing China's green building program through an ecological modernization perspective[J]. *Geoforum*, 2015, 61: 1–12.
- [9] Kasai N, Jabbour C J C. Barriers to green buildings at two Brazilian Engineering Schools [J]. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 2014, 3 (1): 87–95.
- [10] Olubunmi O A, Xia P B, Skitmore M. Green building incentives: a review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 59 (3): 1611–1621.
- [11] Elias E M, Lin C K. The empirical study of green buildings (residential) implementation: perspective of house developers [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2015, 28: 708–716.
- [12] Dwaikat L N, Ali K N. Green buildings cost premium: a review of empirical evidence [J]. *Energy and Buildings*, 2016, 110 (1): 396–403.
- [13] Hopkins E A. An exploration of green building costs and benefits; searching for the higher ED context [J]. *Journal of Real Estate Literature*, 2016, 24 (1): 67–84.
- [14] Shi Q, Yan Y, Zuo J, et al. Objective conflicts in green buildings projects: a critical analysis [J]. *Building and Environment*, 2016, 96 (8): 107–117.
- [15] Azouz M, Kim J L. Examining contemporary issues for green buildings from contractors' perspectives [J]. *Procedia Engineering*, 2015, 118: 470–478.
- [16] Qian Q K, Chan E H W, Visscher H, et al. Modeling the green building (GB) investment decisions of developers and end-users with transaction costs (TCs) considerations [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 109 (12): 315–325.
- [17] 王景慧, 秦旋. 房地产开发商群体的绿色建筑开发行为的演化分析 [J]. *建筑科学*, 2013, 29 (4): 95–99.
- [18] 陈小龙, 刘小兵. 交易成本对开发商绿色建筑开发决策的影响 [J]. *同济大学学报 (自然科学版)*, 2015, 43 (1): 153–159.
- [19] 林敏. 绿色建筑开发中多方利益主体行为分析 [J]. *建筑经济*, 2012 (12): 63–66.
- [20] 孙金颖, 冯建华, 金占勇, 等. 绿色建筑评价标识制度需求侧主体博弈分析 [J]. *建筑科学*, 2009, 25 (8): 20–23.
- [21] 黄定轩. 基于收益–风险的绿色建筑需求侧演化博弈分析 [J]. *土木工程学报*, 2017, 50 (2): 110–118.
- [22] Teng J Y, Wang P Y, Wu X G, et al. Decision-making tools for evaluation the impact on the eco-footprint and eco-environmental quality of green building development policy [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2016, 23 (5): 50–58.

## Evolutionary game analysis of green buildings supply side

HUANG Ding-xuan<sup>1,2</sup>, CHEN Meng-jiao<sup>2</sup>, LI Chang-gui<sup>2</sup>

(1. School of Business, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China; 2. School of Buisiness, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract:** Green building is one of the important ways to realize green economy. An evolutionary game model on green building supply side is established based on the assumption that both the developers and governments are rationality limited. Analysis on stable state shows that the evolutionary stable strategies are closely related to the government incentives, the government default penalties for green building project, the incremental cost, incremental revenue and incremental risk loss factors. There are different stability conditions under different factors combination. Based on this analysis, the systematic dynamics model is established and the dynamic behavior changes under different situations are analyzed by data simulation analysis. The results show that in order to promote the development of green building, it is very important to increase the incremental revenue of developers in green building projects.

**Key words:** green building; incremental revenue; incremental costs; incremental risk loss; evolutionary game