

[文章编号] 1003—4684(2022)03-0110-06

# 政府补贴下建筑废弃物资源化的演化博弈分析

李进涛, 吴 骞

(湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

**[摘 要]** 为探究建筑废弃物资源化产业中不同利益相关者之间的合作情况,构建了建筑企业和建筑材料制造商之间的演化博弈模型,研究不同情形下建筑企业和建筑材料制造商的策略选择,探究政府补贴是如何影响双方的决策行为以及政府补贴的合理范围。研究结果表明,增加填埋费用,可以提高建筑企业参与资源化的意愿,进而增大双方合作的概率。政府对双方的成本补贴达到一定程度时,可以促使双方达成合作,且双方的合作力度随着补贴的增大而增强。最后,提出了一些对策建议,为促进我国建筑废弃物资源化利用提供参考借鉴。

**[关键词]** 建筑废弃物; 演化博弈; 资源化; 政府补贴

**[中图分类号]** X799.1     **[文献标识码]** A

随着我国城市化的快速发展,建筑行业发展迅猛,同时也产生了大量的建筑废弃物。据统计,我国建筑废弃物总量约占城市固体废弃物总量的 30%~40%<sup>[1]</sup>。我国建筑废弃物的处理方式主要是填埋和露天堆放,这不仅造成环境污染,而且还浪费资源。建筑废弃物资源化利用可以降低对天然材料的依赖从而有效节约资源、减少污染、刺激经济,是建筑废弃物产生后最有效的处理方式<sup>[2]</sup>。

在过去的几十年里,研究者从不同的视角对建筑废弃物资源化问题进行了研究。在资源化管理手段方面,有学者指出政策支持对鼓励采取减废措施很重要<sup>[3]</sup>,如实施建筑废弃物处置收费政策<sup>[4]</sup>,实施奖惩相结合的政策<sup>[5]</sup>,将 PPP 模式引入建筑废弃物处理产业<sup>[6]</sup>,这些均能有效解决建筑废弃物的管理问题。还有些学者对建筑废弃物资源化的效果进行评估。例如,评估建筑废弃物管理以及不同处置方法的经济和环境效益<sup>[7-8]</sup>、不同分类系统对环境效益的影响<sup>[9]</sup>、建筑废弃物移动式资源化处置的环境影响<sup>[10]</sup>。另外,许多学者还探究了建筑废弃物管理的影响因素,如 Osmani 和朱姣兰等研究了从业人员建筑废弃物管理行为的影响因素<sup>[11-12]</sup>,Lu 等识别出建筑废弃物有效管理的七个关键成功因素<sup>[13]</sup>,Hao 等指出影响建筑废弃物管理的因素包括法规的完善程度、政府的监管力度和回收市场的成熟度<sup>[14]</sup>。

上述研究主要关注建筑废弃物资源化行业的外部结构,然而,研究资源化行为决策的内在机制是提

高资源化率的重要途径。随着博弈论的发展,演化博弈为研究行为决策提供了一种实用的方法。近几年有学者运用演化博弈来分析建筑废弃物资源化行业利益相关者的行为决策。例如,分析有无公众参与下建筑承包商和政府部门的决策行为<sup>[15]</sup>,研究政府部门与建筑垃圾生产单位之间的策略选择<sup>[1]</sup>,探究不同社会监督水平下施工单位与监管部门的演化策略<sup>[16]</sup>。前人的研究主要集中在政府和单个利益相关者之间的行为决策的影响,忽略了建筑废弃物资源化过程中两个主要的参与主体,即建筑企业和建筑材料制造商之间的合作以及政府干涉对双方合作的影响。鉴于此,本文构建建筑企业与建筑材料制造商之间的博弈模型,探究建筑企业和建筑材料制造商的策略选择,分析在政府补贴下,双方决策行为的演化路径以及政府补贴的合理范围。为了便于分析,本文将废弃物资源化利用企业和建材生产企业抽象为建筑材料制造商。

## 1 演化博弈模型的构建

对于建筑企业,面临两种策略选择:一是将建筑废弃物运送至建筑材料制造商作为原材料进行资源化,但此时会产生额外的分类分拣成本;二是直接将建筑废弃物运送至填埋场。对于建筑材料制造商,也面临着两种策略选择:一是选择建筑废弃物作为原材料,对其进行分类、处理,并在工厂中用于生产建筑材料,但此时需要引入先进的设备、技术和人

[收稿日期] 2021-08-25

[基金项目] 教育部人文社会科学研究规划基金项目(19YJA630035)

[第一作者] 李进涛(1973—),男,湖北应城人,博士,湖北工业大学教授,研究方向为住房政策,房地产经济与管理

[通信作者] 吴 骞(1997—),女,湖北武汉人,湖北工业大学硕士研究生,研究方向为房地产管理

员,因此需要投入额外的成本;二是选择天然原料作为原材料来生产建筑材料。综上所述,建筑企业和建筑材料制造商的策略集合为(参与,不参与)。

基于上述策略,本文做出下列假设:  
假设一:博弈双方均为有限理性,他们都能够学习和适应动态环境变化,并在建筑废弃物资源化过程中调整和优化策略。

假设二:当博弈双方选择参与资源化时,建筑废弃物资源化行业运行良好,并带来一定的环境、社会和经济效益  $F$ 。建筑企业和建筑材料制造商可从  $F$  中获得的利益比例分别为  $\alpha$  和  $\beta$ 。当只有一个或两个利益相关者都不参与资源化时,就不会产生环境、社会和经济效益。

假设三:如果建筑企业选择参与资源化,则额外的分类分拣成本为  $C_1$ ,此时还会得到政府的成本补贴,补贴率为  $a_1$ 。若建筑材料制造商不参与资源化,那么建筑企业的收益为  $S_1$ ;若建筑材料制造商

参与资源化,那么建筑企业的收益为  $S_1 + \alpha F$ 。相反地,如果建筑企业不参与资源化而将废弃物运至填埋场填埋,则填埋成本为  $C_d$ 。

假设四:如果建筑材料制造商不参与资源化,则其收益为  $S_2$ ,运营成本为  $C_2$ 。相反地,如果建筑材料制造商参与资源化,且建筑企业也参与资源化,则其收益为  $S_2 + \beta F$ ,但是建筑材料制造商还需要承担引入先进设备、技术和人员所花费的额外成本  $C_3$ ,但此时会得到政府的成本补贴,补贴率为  $a_2$ 。

假设五:选择参与资源化的建筑企业比例为  $x$ ,选择不参与资源化的建筑企业比例为  $1 - x$ 。选择参与资源化的建筑材料制造商的比例为  $y$ ,选择不参与资源化的建筑材料制造商的比例为  $1 - y$ ,显然,  $0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1$ 。

基于上述模型描述与假设,建立了政府补贴下建筑企业和建筑材料制造商之间的收益矩阵,如表 1 所示。

表 1 建筑企业和建筑材料制造商之间的收益矩阵

建筑企业	建筑材料制造商	
	参与( $y$ )	不参与( $1-y$ )
参与( $x$ )	$S_1 + \alpha F - (1 - a_1)C_1, S_2 + \beta F - C_2 - (1 - a_2)C_3$	$S_1 - (1 - a_1)C_1, S_2 - C_2$
不参与( $1-x$ )	$-C_d, S_2 - C_2 - (1 - a_2)C_3$	$-C_d, S_2 - C_2$

2 演化博弈模型分析

2.1 复制者动态方程求解

根据表 1,可得出建筑企业参与资源化时的期望收益  $E_{11}$ ,不参与资源化时的期望收益  $E_{12}$  以及平均收益  $E_1$ 。计算式如下:

$E_{11} = y[S_1 + \alpha F - (1 - a_1)C_1] + (1 - y)[S_1 - (1 - a_1)C_1]$  (1)

$E_{12} = y(-C_d) + (1 - y)(-C_d) = -C_d$  (2)

$E_1 = xE_{11} + (1 - x)E_{12}$  (3)

根据 Malthusian 动态方程,由式(1),(2),(3)可得建筑企业参与资源化比例下的复制动态方程:

$F(x) = \frac{dx}{dt} = x(1 - x)[y\alpha F + S_1 - (1 - a_1)C_1 + C_d]$  (4)

同理,建筑材料制造商参与资源化比例下的复制动态方程为:

$F(y) = \frac{dy}{dt} = y(1 - y)[x\beta F - (1 - a_2)C_3]$  (5)

$J = \begin{bmatrix} (1 - 2x)[y\alpha F + S_1 - (1 - a_1)C_1 + C_d] & x(1 - x)\alpha F \\ y(1 - y)\beta F & (1 - 2y)[x\beta F - (1 - a_2)C_3] \end{bmatrix}$

将前面 5 个均衡点代入到上述矩阵,可求得该系统的  $DetJ$  和  $TrJ$  如表 2 所示。

根据表 2,通过分析各个参数的取值范围,对  $(0, 0), (0, 1), (1, 0), (1, 1), (\frac{(1 - a_1)C_3}{\beta F},$

令  $F(x) = \frac{dx}{dt} = 0, F(y) = \frac{dy}{dt} = 0$ ,得到系统的 5 个局部均衡点,分别为  $(0, 0), (0, 1), (1, 0), (1, 1), (\frac{(1 - a_1)C_3}{\beta F}, \frac{(1 - a_1)C_1 - C_d - S_1}{\alpha F})$ 。

2.2 演化稳定策略分析

利用复制动态方程求出的局部均衡点不一定是系统的演化稳定策略(ESS),根据 Friedman 法,可以通过系统的雅可比矩阵  $J$  的局部稳定分析得出系统的演化稳定策略。

只有当矩阵  $J$  满足以下两个条件:1) 矩阵的行列式大于零(即  $Det J > 0$ );2) 矩阵的迹小于零(即  $TrJ < 0$ ) 时,该点具有局部稳定性,即为稳定演化策略。

根据方程(4)和(5),可得该系统的雅可比矩阵为:

$(\frac{(1 - a_1)C_1 - C_d - S_1}{\alpha F})$  这 5 个局部均衡点进行分析讨论。

表2 系统均衡点对应的  $Det J$  和  $Tr J$

均衡点	$Det J$	$Tr J$
(0,0)	$[S_1 - (1 - a_1)C_1 + C_d][-(1 - a_2)C_3]$	$[S_1 - (1 - a_1)C_1 + C_d] - (1 - a_2)C_3$
(0,1)	$[\alpha F + S_1 - (1 - a_1)C_1 + C_d](1 - a_2)C_3$	$[\alpha F + S_1 - (1 - a_1)C_1 + C_d] + (1 - a_2)C_3$
(1,0)	$-[S_1 - (1 - a_1)C_1 + C_d][\beta F - (1 - a_2)C_3]$	$-[S_1 - (1 - a_1)C_1 + C_d] + [\beta F - (1 - a_2)C_3]$
(1,1)	$[\alpha F + S_1 - (1 - a_1)C_1 + C_d][\beta F - (1 - a_2)C_3]$	$-\alpha F + S_1 - (1 - a_1)C_1 + C_d - [\beta F - (1 - a_2)C_3]$
$(x^*, y^*)$	$-\frac{(1 - a_1)C_3}{\beta F}[\beta F - (1 - a_2)C_3]\frac{(1 - a_1)C_1 - C_d - S_1}{\alpha F}$ $[\alpha F - (1 - a_1)C_1 - C_d - S_1]$	0

情形一：当  $S_1 - (1 - a_1)C_1 + C_d < 0$  且  $\alpha F + S_1 - (1 - a_1)C_1 + C_d < 0$  时，系统相位演化图如图 1a 和 b 所示。此时（不参与，不参与）是双方的最终选择。对于建筑企业来说，加上增量收益  $\alpha F$  后的净收益小于填埋的净收益，此时建筑企业倾向于不参与资源化；而对于建筑材料制造商来说，由于建筑企业不愿意参与资源化而将产生的建筑废弃物直接运送至填埋场填埋，使得建筑材料制造商缺乏原材料来源，因此无论增量收益  $\beta F$  是否大于政府补贴后的额外成本，此时参与资源化的建筑材料制造商的比例将减少，最终双方无法达成合作的局面。

情形二：当  $S_1 - (1 - a_1)C_1 + C_d > 0$  且  $\beta F > (1 - a_2)C_3$  时，系统相位演化图如图 1c 所示。此时（参与，参与）是双方的最终选择。此时，建筑企业参与资源化带来净收益大于填埋的净收益，建筑材料制造商资源化带来的增量收益  $\beta F$  大于政府补贴后的额外成本，双方均有利可图，所以双方均愿意参与资源化。

情形三：当  $S_1 - (1 - a_1)C_1 + C_d > 0$  且  $\beta F < (1 - a_2)C_3$  时，系统相位演化图如图 1d 所示。此时（参与，不参与）是双方的最终选择。此时，建筑企业参与资源化带来的净收益大于填埋的净收益，建筑材料制造商资源化带来的增量收益  $\beta F$  小于政府补贴后的额外成本。所以建筑企业愿意参与资源化，而建筑材料制造商不愿意参与资源化，最后双方无法达成合作。

情形四：当  $S_1 - (1 - a_1)C_1 + C_d < 0, \alpha F + S_1 - (1 - a_1)C_1 + C_d > 0$  且  $\beta F < (1 - a_2)C_3$  时，系统相位演化图如图 1e 所示。此时（不参与，不参与）是双方的最终选择。对于建筑企业来说，参与资源化后的净收益大于填埋时的净收益，所以建筑企业倾向于参与资源化；对于建筑材料制造商来说，增量收益  $\beta F$  小于政府补贴后的额外成本，所以建筑材料制造商不愿意参与资源化。由于建筑材料制造商不参与资源化，那么建筑企业将被迫无法进行资源化，最后双方无法达成合作。

情形五：当  $S_1 - (1 - a_1)C_1 + C_d < 0, \alpha F +$

$S_1 - (1 - a_1)C_1 + C_d > 0$  且  $\beta F > (1 - a_2)C_3$  时，系统相位演化图如图 1f 所示。对于建筑企业来说，参与资源化的净收益小于填埋的净收益，但加上增量收益  $\alpha F$  后的净收益大于填埋的净收益，所以建筑企业倾向于参与资源化；对于建筑材料制造商来说，增量收益  $\beta F$  大于政府补贴后的额外成本，所以建筑材料制造商也愿意参与资源化。但只要有一方不参与资源化，最终将无法达成合作局面。所以，系统的 ESS 为 (0,0) 和 (1,1)。

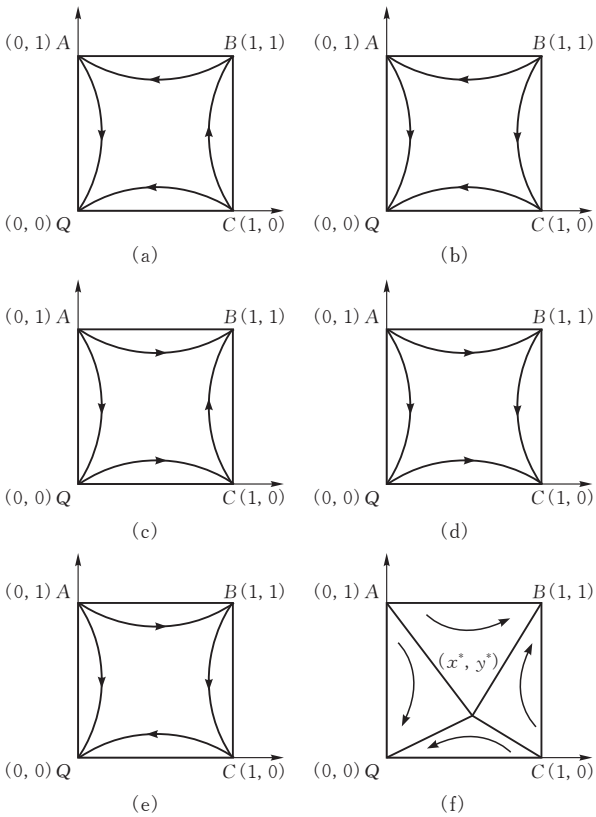


图1 系统演化相位图

2.3 参数变化的影响

由前面的分析可知，当满足  $S_1 - (1 - a_1)C_1 + C_d < 0, \alpha F + S_1 - (1 - a_1)C_1 + C_d > 0$  且  $\beta F > (1 - a_2)C_3$  时，系统的 ESS 为（不参与，不参与）和（参与，参与）。由于  $S_{OADC}$  和  $S_{ABCD}$  的面积表示双方是否合作的概率，所以这两个区域的面积大小决定了系统最终演化结果。若  $S_{OADC} > S_{ABCD}$ ，演化结果

趋向于(0,0);若  $S_{OADC} < S_{ABCD}$ , 演化结果趋向于(1,1)。为促进双方合作,应采取措施增加  $S_{ABCD}$  的面积。因此,接下来将分析影响  $S_{ABCD}$  的主要因素。

由图 1f 可得  $S_{ABCD}$  的面积,即(1,1)为演化稳定策略的概率为:

$$S_{ABCD} = 1 - \frac{1}{2} \left[ \frac{(1-a_2)C_3}{\beta F} + \frac{(1-a_1)C_1 - C_d - S_1}{\alpha F} \right]$$

(6)

根据方程(6),影响系统演化的因素有 9 个,可以得出进一步的结论,如表 3 所示。

表 3 因素变化对系统演化结果的影响									
因素	$C_1$	$C_d$	$C_3$	$S_1$	$\alpha$	$\beta$	$F$	$a_1$	$a_2$
	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
$S_{ABCD}$	↓	↑	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↑

由表 3 可得:分类分拣成本为  $C_1$ 、引入先进设备、技术和人员所花费的额外成本  $C_3$  越高,双方合作的概率减小。建筑企业和建筑材料制造商只要有一方成本过高,双方合作的概率将减小。此时,政府补贴对促进双方合作具有重要意义,当补贴率  $a_1$ 、 $a_2$  越大,双方合作的概率也将增大。

填埋成本为  $C_d$ ,资源化效益  $F$ ,两个利益相关者从  $F$  中获得的利益比例  $\alpha$  和  $\beta$ ,建筑企业的收益  $S_1$  越大,双方参与资源化的概率越大。对于建筑企业,参与资源化的收益越大、填埋成本越高,建筑企业越倾向于参与资源化,随着建筑企业资源化的比例增加,建筑材料制造商实施资源化的比例也将增加,最终双方达成合作。当资源化带来的效益  $F$  越大且双方从  $F$  中获得的利益比例  $\alpha$  和  $\beta$  越大,双方参与资源化的概率也越大。

### 3 演化博弈模拟仿真

为了更直观的研究建筑企业和建筑材料制造商之间的演化策略,本节利用 MATLAB 来模拟参数变化时相应演化博弈策略变化的结果。考虑到篇幅限制以及相关参数的数据获取困难,本文具体参数值的设置满足前述的基本假设。

为了检验情形五中建筑企业和建筑材料制造商是如何在策略(不参与,不参与)和策略(参与,参与)之间进行权衡,此时参数应满足  $S_1 - (1 - a_1)C_1 + C_d < 0, \alpha F + S_1 - (1 - a_1)C_1 + C_d > 0$  且  $\beta F > (1 - a_2)C_3$ 。所以,令  $S_1=20, a_1=0.2, a_2=0.4, C_1=35, C_d=5, C_3=15, \alpha=0.3, \beta=0.5, F=30$ 。通过上述参数设置,可计算得  $x^*=0.6, y^*=0.33$ 。固定其他参数,通过改变初始策略  $(x_0, y_0)$  来检验演化趋势。由于  $x^*=0.6, y^*=0.33$ , 因此,设初始策略  $(x_0, y_0)$  为(0.5,0.3)和(0.7,0.7)。演化趋势如图 2

所示。

由图 2 可知,当  $x_0=0.5 < x^*, y_0=0.3 < y^*$  时,建筑企业参与资源化的比例  $x$  和建筑材料制造商参与资源化的比例  $y$  均趋向于 0,故该系统的演化稳定策略为(不参与,不参与),双方无法达成合作;当  $x_0=0.7 > x^*, y_0=0.7 > y^*$  时,建筑企业参与资源化的比例  $x$  和建筑材料制造商参与资源化的比例  $y$  均趋向于 1,故该系统的稳定演化策略为(参与,参与),双方达成合作状态。

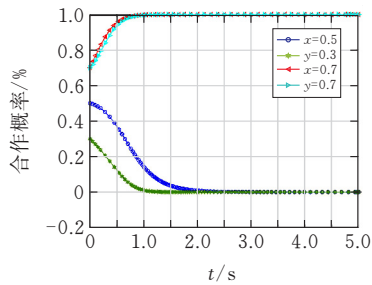


图 2 情形五的演化趋势

以情形五为例,检验政府补贴如何影响双方演化策略。在情形五中,参数满足  $S_1 - (1 - a_1)C_1 + C_d < 0, \alpha F + S_1 - (1 - a_1)C_1 + C_d > 0$  且  $\beta F > (1 - a_2)C_3$ , 此时可得  $\frac{C_1 - S_1 - C_d - \alpha F}{C_1} < a_1 < \frac{C_1 - S_1 - C_d}{C_1}$  且  $a_2 > \frac{C_3 - \beta F}{C_3}$ 。令  $S_1=20, C_1=35, C_d=5, C_3=15, \alpha=0.3, \beta=0.5, F=30$ 。可计算得  $a_1$  和  $a_2$  的取值范围为:  $0.09 < a_1 < 0.42, 0.143 < a_2 < 1$ 。因此,令(1) $a_1=0, a_2=0.1/0.2$ ; (2) $a_1=0.2, a_2=0.1$ ; (3) $a_1=0.5, a_2=0.1$ ; (4) $a_1=0.5, 0.6, 0.7$  和  $a_2=0.2, 0.3, 0.4$ , 然后分别对上述四组数据进行仿真模拟。

当  $a_1=0, a_2=0.1/0.2; a_1=0.2, a_2=0.1$  时,双方演化趋势如图 3 所示,仿真结果与情形一和情形四一致。此时  $a_1=0 < \frac{C_1 - S_1 - C_d - \alpha F}{C_1}$ ,  $\frac{C_1 - S_1 - C_d - \alpha F}{C_1} < a_1=0.2 < \frac{C_1 - S_1 - C_d}{C_1}$  且  $a_2=0.1 < \frac{C_3 - \beta F}{C_3}$ 。由于政府的补贴率较低,建筑企业和建筑材料制造商在参与资源化的过程中均无利可图,因此双方参与资源化的比例均倾向于 0。最终系统的演化稳定策略为(不参与,不参与),因此建筑企业和建筑材料制造商无法达成合作。

当  $a_1=0.5, a_2=0.1$  时,双方演化趋势图如图 4 所示,仿真结果与情形三一致。此时  $a_1=0.5 > \frac{C_1 - S_1 - C_d - \alpha F}{C_1}, a_2=0.1 < \frac{C_3 - \beta F}{C_3}$ , 建筑企业参与



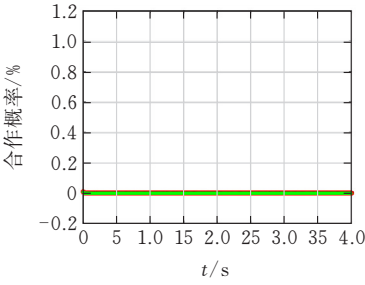


图3  $a_1 = 0, a_2 = 0.1/0.2; a_1 = 0.2, a_2 = 0.1$  时  
双方演化趋势图

资源化的比例倾向于1, 建筑材料制造商参与资源化的比例倾向于0。最终系统的演化稳定策略为(参与, 不参与), 因此建筑企业和建筑材料制造商无法达成合作。

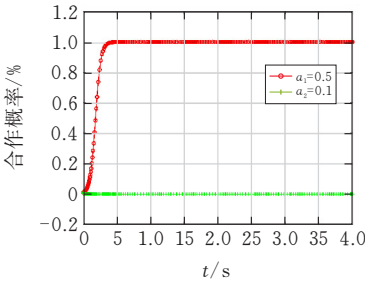


图4  $a_1 = 0.5, a_2 = 0.1$  时双方演化趋势图

当  $a_1 = 0.5, 0.6, 0.7$  和  $a_2 = 0.2, 0.3, 0.4$  时, 双方演化趋势图如图5所示, 仿真结果与情形二一致。

此时  $a_1$  和  $a_2$  的值满足  $a_1 > \frac{C_1 - S_1 - C_d}{C_1}, a_2 > \frac{C_3 - \beta F}{C_3}$ , 建筑企业和建筑材料制造商参与资源化的比例均倾向于1。政府对建筑企业和建筑材料制造商的补贴率较高, 可以弥补他们的成本损失, 进而增加了他们的合作动机。因此, 系统的稳定演化策略为(参与, 参与), 双方达成合作。此外, 随着补贴率的增加, 双方趋向于参与资源化的速度加快。换句话说, 补贴率越大, 双方合作的概率越大。

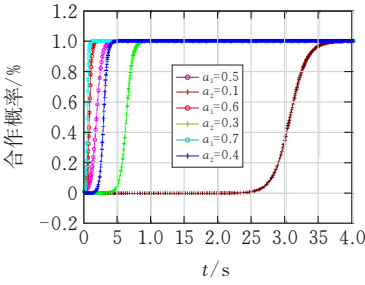


图5  $a_1 = 0.5, 0.6, 0.7$  和  $a_2 = 0.2, 0.3, 0.4$   
时双方演化趋势图

4 结论与建议

本文运用演化博弈的方法构建了建筑企业和建筑材料制造商的动态演化模型, 分析了双方决策行

为的演化路径以及政府补贴对双方演化策略的影响, 然后运用 MATLAB 仿真进一步探究了政府补贴的合理范围。研究表明, 填埋成本越大, 建筑企业越愿意参与资源化, 随着建筑企业参与资源化的比例增加, 建筑材料制造商参与资源化的比例也将变大, 进而使得双方合作的概率增大。当分类分拣成本和引入先进技术设备所需的额外成本过大, 建筑企业和建筑材料制造商在资源化过程中将无利可图, 导致双方参与资源化的比例减少, 最终无法达成合作。此时, 若政府对建筑企业和建筑材料制造商进行补贴, 将极大地提高双方参与资源化的意愿。只有当政府对建筑企业的补贴率  $a_1$  和对建筑材料制造商的补贴率  $a_2$  满足:  $a_1 > \frac{C_1 - S_1 - C_d}{C_1}$  且  $a_2 > \frac{C_3 - \beta F}{C_3}$  时, 系统最终收敛到(1, 1), 并且补贴率越大, 双方趋向于参与资源化的速度越快。

本文根据上述研究结论提出如下对策建议: 1) 由于填埋成本越大, 双方合作的概率也越大。因此, 政府可以将填埋收费视作一项惩罚措施, 提高填埋费用, 使得建筑企业填埋成本增大, 进而促使建筑企业采取资源化措施。2) 在建筑废弃物资源化的初始时期, 资源化成本, 如建筑企业分类分拣成本、建筑材料制造商引入先进技术、设备以及相关人员的额外成本, 这些成本投入非常大, 以致于可能对建筑企业和建筑材料制造商造成利益亏损, 此时政府需要给予双方企业一定的成本补贴。对建筑企业的补贴率应满足  $a_1 > \frac{C_1 - S_1 - C_d}{C_1}$ , 对建筑材料制造商的补贴率应满足  $a_2 > \frac{C_3 - \beta F}{C_3}$ , 这将促进双方资源化合作。3) 政府应对建筑废弃物资源化行为建立有效的监管机制, 及时掌握资源化利用实际状况和监管效果, 并适时调整监管政策。

[ 参 考 文 献 ]

[1] 朱媛媛, 钟永光, 刘畅, 等. 基于演化博弈的建筑废弃物处理基金征收策略分析[J]. 青岛大学学报(自然科学版), 2019, 32(3): 69-76.

[2] 袁红平, 王焯平. 建筑废弃物资源化利用合作促进机制研究[J]. 工程研究-跨学科视野中的工程, 2017, 9(2): 181-189.

[3] POON C S, YU A T W, WONG A, et al. Quantifying the impact of construction waste charging scheme on construction waste management in Hong Kong [J]. Journal of Construction Engineering & Management, 2013, 139(5): 466-479.

[4] MAK T, CHEN P C, WANG L, et al. A system dynamics approach to determine construction waste disposal charge in Hong Kong[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 241:118309.

[5] JIA S, YAN G, SHEN A, et al. Dynamic simulation analysis of a construction and demolition waste management model under penalty and subsidy mechanisms [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 147(20): 531-545.

[6] 陈起俊, 陈艺中. 建筑废弃物处理产业系统模型构建与仿真研究——以济南市为例[J]. *建筑经济*, 2017, 11(38): 69-75.

[7] 丁志坤, 伊桂珍, 黄腾跃. 建筑废弃物减量化管理环境效益评估模型研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2016, 36(1): 99-106.

[8] MARZOUK M, AZAB S. Environmental and economic impact assessment of construction and demolition waste disposal using system dynamics[J]. *Resources Conservation & Recycling*, 2014, 82: 41-49.

[9] HOSSAIN M U, WU Z, CHI S P. Comparative environmental evaluation of construction waste management through different waste sorting systems in Hong Kong[J]. *Waste Management*, 2017, 69(11): 325-335.

[10] 李景茹, 郭红, 刘寒, 等. 深圳市建筑废弃物移动式资源化处置环境影响评价与分析[J]. *建筑经济*, 2018, 39(6): 114-120.

[11] OSMANI M, GLASS J, PRICE A D F. Architect and contractor attitudes to waste minimisation[J]. *Waste & Resource Management*, 2006, 2: 65-72.

[12] 朱姣兰, 李景茹. 施工人员建筑废弃物减量化行为影响因素调查分析——以深圳市为例[J]. *工程管理学报*, 2011, 25(6): 633-637.

[13] LU W S, YUAN H P. Exploring critical success factors for waste management in construction projects of China[J]. *Resources Conservation & Recycling*. 2010, 55: 201-208.

[14] HAO J L, YUAN H P, LIU J, et al. A model for assessing the economic performance of construction waste reduction [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 232: 427-440.

[15] CHEN J G, HUA C X, LIU C Y. Considerations for better construction and demolition waste management: Identifying the decision behaviors of contractors and government departments through a game theory decision-making model[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 212: 190-199.

[16] 陈佳智, 杨高升. 考虑社会监督的建筑废弃物处置演化博弈分析[J]. *工程管理学报*, 2020, 34(5): 19-24.

# Evolutionary Game Analysis of Construction Waste Resource under Government Subsidies

LI Jintao, WU Qian

(School of Civil Engin., Architecture and Environment Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China)

**Abstract:** To explore the cooperation between different stakeholders in the construction waste recycling industry, evolutionary game approach is used to examine the strategic choices of construction enterprises and construction material manufacturers under different situations, and investigate the influence of government subsidies on the decision-making behaviour of both parties and the corresponding level of government subsidies. The results show that the willingness of construction enterprises to participate in resource can be increased by increasing the cost of landfill, which in turn increases the likelihood of cooperation between the two parties. When the government grants a certain level of cost subsidy to both parties, it will prompt both parties to reach cooperation, and the cooperation of both parties increases with the increase of the subsidy. Finally, some suggestions that will serve as a guide to promote the resource utilization of construction waste in China are presented.

**Keywords:** construction waste; evolutionary game; resource; government subsidy

[责任编辑: 裴 琴]