

面向无废城市建设的固体废弃物资源化利用： 跨主体协同治理机制研究

秦全德，周洁莹，张珺婷

摘要：随着全球固体废弃物产生量的持续增长，其治理面临严峻挑战。在无废城市建设背景下，固体废弃物资源化利用的协同治理尤为重要。然而，现有的相关治理体系在协同机制和政策支持方面存在不足，不同主体之间的利益矛盾较为突出。本研究构建“政府—固体废弃物产生企业—固体废弃物利用企业”演化博弈模型，模拟固体废弃物资源化利用场景，分析均衡策略的演化稳定条件、关键参数及其变化对博弈行为与策略演化的影响。研究发现：(1) 政府的政策制定受企业行为的影响，应综合平衡环境效益与经济成本，并通过合理的激励机制促进企业合作；(2) 固体废弃物产生企业与利用企业的合作关系直接影响资源化效率，合作策略可以通过政策、市场和技术因素得到稳定；(3) 跨主体协同可以显著提高资源化利用各环节的经济效益，政策支持和技术创新将推动固体废弃物管理向更高效、可持续方向发展。因此，固体废弃物资源化和协同治理的政策设计应更加注重激励机制和利益平衡。

关键词：无废城市；资源化利用；固体废弃物；协同治理；演化博弈

中图分类号：F205 **文献标识码：**A **文章编号：**1671-0169(2025)01-0100-16

DOI:10.16493/j.cnki.42-1627/c.20241224.001

一、引言

近年来，固体废弃物（以下简称“固废”）产生量持续上升，给城市环境和资源管理带来严峻挑战。据世界银行估计，到 2050 年，全球城市固废产生量将比 2016 年增加一倍^①。作为全球最大的固废产生国之一，中国每年新增固废约 100 亿吨，历史累积量高达 600~700 亿吨，面临着固废治理的艰巨任务^②。为应对这一挑战，2019 年，国务院办公厅颁布了《“无废城市”建设试点工作方

基金项目：深圳市哲学社会科学规划课题“双碳目标下深圳无废城市建设的碳减排潜力及成本综合评估研究”（SZ2022B018）；深圳市基础研究专项（自然科学基金）基础研究面上项目“面向无废城市建设的深圳市生活垃圾集成资源化环境负荷解析与环境影响优化研究”（JCYJ20210324093414039）

作者简介：秦全德，深圳大学管理学院，qinquande@gmail.com（广东深圳 518000）；周洁莹，深圳大学管理学院；张珺婷，深圳大学政府管理学院

^① 参见 World Bank. What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050, 网址：<https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/697271544470229584/what-a-waste-2-0-a-global-snapshot-of-solid-waste-management-to-2050>, 访问日期：2024 年 2 月 19 日。

^② 2017 年第十二届全国人民代表大会常务委员第三十次会议上《〈中华人民共和国固体废物污染环境防治法〉实施情况的报告》，网址：http://www.npc.gov.cn/zgrdw/npc////////xinwen/2017-11/01/content_2030817.htm, 访问日期：2024 年 2 月 19 日。

案》^①, 中国成为全球首个正式启动无废城市综合试点项目的发展中国家。2023年全国生态环境保护大会对无废城市建设做出系统部署, 进一步凸显其在生态文明建设和实现美丽中国目标中的重要战略地位^②。

构建固废循环利用体系是中国全面实施循环经济战略、保障国家资源安全、推进碳达峰碳中和及发展方式绿色转型的重要举措^③。固废治理需遵循减量化、无害化与资源化三大基本原则^{[1][2]}, 其中资源化利用被视为实现城市可持续发展的有效途径, 也是无废城市建设的本质特征^[3]。

资源化利用强调将固废视为资源, 通过回收、再利用和再生产过程, 最大限度利用固废价值, 减少对自然资源的消耗, 促进循环经济发展^[4]。然而, 在中国城市发展过程中, 消费环节后固废资源回收利用问题长期得不到足够重视^{[5][6]}。为应对固废资源化利用挑战, 西方国家通过立法、政策和技术措施推动固废处理低碳化, 如减少填埋、增加回收与能源利用、推广垃圾焚烧发电等。中国近年来出台《循环经济发展战略及近期行动计划》等政策, 推动经济模式转型, 构建资源节约与环境保护相结合的综合格局。然而, 在固废资源化利用领域, 中国尚未形成明确的循环经济模式, 提升空间仍然较大。

固废资源化利用涉及多方利益相关者, 是一项复杂的系统工程, 需协调跨主体责任以实现协同治理。本研究将固废产生主体称为“固废产生企业”, 将从事固废转化的主体定义为“固废利用企业”。固废利用企业通过技术手段回收、处理和改造固废, 实现其价值再利用。固废资源化利用的效率取决于回收渠道的完善程度及绿色产品的市场普及度。政府在其中发挥关键作用, 通过政策工具引导固废产生企业参与分类与预处理, 促进固废利用企业技术创新与发展。基于地区经济水平与财政能力, 政府通常采取两类政策工具: 经济激励和精神激励。经济激励通过财政补贴、税收优惠和低息贷款等手段, 降低企业参与资源化利用的成本, 直接影响其收益结构, 引导合作策略选择; 精神激励则通过荣誉表彰、绿色认证和社会公示等非经济手段, 提升企业社会形象与品牌价值, 增强其市场竞争力。经济激励见效快, 但对公共财政压力较大; 精神激励成本较低, 但影响效果需较长时间显现。实践中, 经济基础较好的地区更倾向采用经济激励方式, 而财政能力有限的地区多依赖精神激励方式。

固废资源化利用中, 政府、固废产生企业和利用企业因利益诉求差异产生一定冲突: (1) 政府以提升环境质量、维护公共利益为核心, 关注资源化利用对城市经济的影响, 需平衡环境保护与经济发展^{[7][8]}; (2) 固废产生企业注重成本控制和效率提升, 对新增环保投入和政策性管理成本持谨慎态度; (3) 固废利用企业面临技术研发投入高、产品质量市场认可度低及固废可用性不足等挑战^{[9][10][11]}。研究表明, 技术水平是优化固废处置与回收的关键问题^{[12][13]}。利益冲突阻碍资源化利用高效推进^[14], 需通过构建利益协调机制, 明确三方权责, 促进政府、固废产生企业与利用企业的良性互动, 以实现协同治理。

当前, 国内外资源化利用研究主要聚焦于产业与技术评估^{[15][16][17]}、相关主体行为分析与优化路径^{[18][19]}和政策作用机制^{[20][21]}。固废管理作为复杂的社会生态子系统, 正由单向处理向闭环管理模式转变, 这一过程需要多方利益相关者的广泛参与与协同^[22]。研究趋势逐渐关注利益相关者间的相互依赖性及其在系统中的互动优化, 特别是在垂直网络(如供应链)中协同参与的重

① 国务院办公厅《“无废城市”建设试点工作方案》, 网址: https://www.gov.cn/zhengce/content/2019-01/21/content_5359620.htm, 访问日期: 2024年2月19日。

② 生态环境部发布《2023年“无废城市”建设工作推进会在杭州召开》, 网址: https://www.mee.gov.cn/ywdt/hjywnews/202307/t20230724_1037064.shtml, 访问日期: 2024年2月19日。

③ 国务院办公厅发布《国务院办公厅关于加快构建固废循环利用体系的意见》, 网址: https://www.gov.cn/zhengce/content/202402/content_6931079.htm, 访问日期: 2024年2月19日。

要性^{[23][24]}。

协同治理理论结合自然科学的协同学与社会科学的治理学，强调跨主体合作与共同参与，为固废资源化利用提供创新视角^[25]。近年来，该理论在环境管理领域受到广泛关注，尤其聚焦于同类型主体间的协作^{[26][27][28]}，如跨区域固废治理中的生态补偿机制，多以政府为补偿和受偿主体^[29]。同时，有研究探讨城市固废前端治理中政府与社会协同的条件与路径^[30]。然而，固废全流程治理涉及异质多主体，如何设计有效协作机制以激发合作意愿并协调利益冲突，仍需深入研究，具体包括以下方面：（1）设计激励机制，促进跨主体协同积极参与固废治理；（2）探索在利益冲突下实现利益协调与共享的路径；（3）建立健全制度与政策支持体系，为协作提供保障；（4）推动技术创新，提高治理效率，深化跨主体合作。

演化博弈通过模拟生物进化中的学习、竞争与适应机制^[31]，为分析环境、社会与经济问题中的参与者互动提供了新工具，已广泛应用于环境管理领域，尤其是参与者间的互动机制研究。当前研究涉及的演化博弈主要分为两类：一是中央与地方政府间的博弈^[32]；二是政府与其他社会参与者间的博弈^{[33][34][35][36]}。在固废协同治理背景下，演化博弈模型适用于多方利益相关者、复杂利益结构及动态环境的分析，能够模拟行为演变、识别利益冲突并设计合作机制，为政策制定与实践提供指导。例如，Wang等^[37]基于政府、回收企业与消费者的三方博弈模型，分析了政府在电子固废回收中的引导作用。Sun等^[38]通过地方政府与企业在废弃共享单车回收策略上的博弈模型，发现适当的政府监管投入可促进回收。陈文洲等^[39]基于“绿色账户”激励机制，建立地方政府、再生资源回收企业与居民的三方博弈模型，揭示了惩罚力度、政策优惠、补贴水平和积分奖励对系统稳定性的关键作用。演化博弈模型有助于理解固废协同治理中的冲突与合作问题，为制定有效的合作策略提供理论支持。

尽管已有研究广泛探讨了固废资源化利用，但多数聚焦于特定环节或单一主体的互动。在无废城市建设的背景下，固废全流程治理的跨主体协同机制值得进一步研究。本研究基于演化博弈理论，分析政府、固废产生企业和利用企业在固废治理中的行为策略及其影响，探索协同治理机制，为无废城市建设和固废资源化利用提供支持。研究的边际贡献在于：一方面，拓展了固废管理的理论框架，将演化博弈论应用于固废全流程的跨主体协同治理；另一方面，考虑了三方在经济和环境上的利益冲突，研究了多种协同治理策略和机制，为理解固废资源化利用中的冲突与协同提供了新的视角。

二、模型假设与参数设置

（一）基本假设

基于利益相关者理论及演化博弈理论，对固废产生企业、固废利用企业和政府之间的相互作用进行深入分析，并据此提出以下假设。

假设1：演化博弈为有限理性条件下的动态策略选择提供分析框架。政府、固废产生企业和固废利用企业被设定为具有学习能力的有限理性行动者。这些行动者通过试错和反馈不断调整行为，以优化策略并适应动态环境。

假设2：在固废资源化利用中，政府选择经济激励的概率为 x ，精神激励的概率为 $1-x$ （ $x \in [0, 1]$ ）；固废产生企业采取合作策略的概率为 y ，短期经济效益策略的概率为 $1-y$ （ $y \in [0, 1]$ ）；固废利用企业采取合作策略的概率为 z ，维持现状策略的概率为 $1-z$ （ $z \in [0, 1]$ ）。对于固废产生企业来说，合作策略指与固废利用企业合作，采用新设备或优化流程，严格执行行分

类与预处理; 短期经济效益策略则放弃分类与合作, 仅考虑短期成本, 降低资源化效率。对于固废利用企业来说, 合作策略指加强与固废产生企业的协同合作, 加大技术创新投入, 优化处理工艺, 实现高效回收利用; 维持现状策略则沿用现有处理方式, 不进行技术改进或合作。

假设3: 固废产生企业选择合作策略时, 将投入额外成本 C_1 用于设备升级和流程优化, 但可通过出售更高价值的可回收固废获得收益 R_1 。当政府采取经济激励政策且与固废利用企业合作时, 固废产生企业还可通过政策支持与协同效应获得额外收益 L_1 。若采取短期经济效益策略, 则因固废品质和数量较低, 仅获得较低收益 R_2 ($R_1 > R_2$)。

假设4: 当固废产生企业、固废利用企业与政府未充分协同时, 回收渠道不完善, 回收效率为 k_1 。在三方协同构建完善回收渠道的情况下, 回收效率提高至 k ($0 < k_1 < k < 1$)。假设回收渠道建立的总投入为 C , 在固废产生企业和利用企业同时合作、政府采取经济激励策略时, 成本按分配系数 a_1 、 a_2 、 a_3 由三方共同承担 ($a_1 + a_2 + a_3 = 1$)。固废利用企业的收益受绿色产品市场普及度影响。市场普及度表示资源化产品的市场接受度和占有比例, 普及度越高, 企业收益预期越大, 资源化利用积极性越高。当企业选择合作策略时, 市场普及度为 k_2 ; 选择维持现状时, 市场普及度降为 k_3 ($0 < k_3 < k_2 < 1$)。政府通过绿色产品认证、优先采购、宣传推广等政策提升市场普及度, 在实施经济激励策略时, 将绿色产品列入优先采购名单并推广, 可使其完全进入市场。

假设5: 固废利用企业采取合作策略时, 将因提升处理效率和优化技术设施产生额外成本 C_2 。企业通过出售绿色产品获得收益 R_3 ; 在政府实施经济激励策略时, 可因技术创新获得补贴 S 和绿色认证收益 L_2 。若固废产生企业未合作, 固废利用企业需对低品质固废进行额外处理, 产生成本 C_4 , 影响其成本效益。相较而言, 若固废利用企业选择非合作策略, 出售绿色产品的收益为 R_4 ($R_3 > R_4$)。

假设6: 政府采取经济激励策略(如完善激励与认证制度)将产生额外成本 C_5 。若固废产生企业合作优化源头分类, 政府获得绩效收益 R_5 ; 同时, 政府通过技术补贴 S 激励固废利用企业合作, 获得绩效收益 R_6 。若两类企业均采取合作策略, 政府参与回收渠道建设并按比例 a_3 分担成本 C 。因全流程优化, 政府获得超额政治收益(系数 k_4 , $0 < k_4 < 1$), 总收益为 $(1 + k_4)(R_5 + R_6)$ 。相对地, 若政府仅采取精神激励策略, 可能因公信力与政治绩效下降而产生损失 L_3 。

(二) 模型构建

根据博弈主体结构关系和研究假设, 构建由固废产生企业、固废利用企业和政府之间的博弈支付矩阵, 如表1所示。

表1 博弈支付矩阵

	固废产生企业	固废利用企业	
		合作策略(z)	维持现状($1-z$)
政府经济激励(x)下三方的支付矩阵	合作策略(y)	$(1 + k_4)(R_5 + R_6) - C_5 - S - a_3C,$ $kR_1 - C_1 + L_1 - a_1C,$ $kR_3 - kR_1 - C_2 + S + L_2 - a_2C$	$R_5 - C_5,$ $k_1R_1 - C_1 + L_1,$ $k_3k_1(R_4 - R_1)$
	短期经济效益($1-y$)	$R_6 - S - C_5,$ $k_1R_2,$ $k_1(R_3 - R_2 - C_4) + S + L_2 - C_2$	$-C_5,$ $k_1R_2,$ $k_3k_1(R_4 - R_2)$
政府精神激励($1-x$)下三方的支付矩阵	合作策略(y)	$-L_3,$ $k_1R_1 - C_1 + L_1,$ $k_2k_1(R_3 - R_1) - C_2$	$-L_3,$ $k_1R_1 - C_1,$ $k_3k_1(R_4 - R_1)$
	短期经济效益($1-y$)	$-L_3,$ $k_1R_2,$ $k_2k_1(R_3 - R_2 - C_4) - C_2$	$-L_3,$ $k_1R_2,$ $k_1k_3(R_4 - R_2)$

三、模型建立与分析

(一) 演化博弈分析

由固废产生企业、固废处理企业和政府的行为选择和博弈支付矩阵,可分别得出博弈三方主体的期望收益函数。

1. 政府的复制动态方程建立与分析。用 E_{11} 和 E_{12} 表示政府选择“经济激励”和“精神激励”策略的收益函数, \bar{E}_1 表示平均收益,可以得到:

政府选择经济激励策略(即 $x=1$ 时)的期望收益函数为:

$$E_{11} = zy((1+k_4)(R_5+R_6) - C_5 - S - a_3C) + z(1-y)(R_6 - S - C_5) + y(1-z)(R_5 - C_5) + (1-z)(1-y)(-C_5) \quad (1)$$

政府选择精神激励策略时的期望收益(E_{12})为:

$$E_{12} = -L_3 \quad (2)$$

政府的平均期望收益(\bar{E}_1)为:

$$\bar{E}_1 = xE_{11} + (1-x)E_{12} \quad (3)$$

由此求得政府选择经济激励策略的复制动态方程($F(x)$)为:

$$F(x) = dx/dt = x(E_{11} - \bar{E}_1) = x(1-x)(E_{11} - E_{12}) = x(1-x) \begin{pmatrix} L_3 + zy(k_4(R_5+R_6) - a_3C) \\ -C_5 + yR_5 + zR_6 - zS \end{pmatrix} \quad (4)$$

对 $F(x)$ 求导可得:

$$F'(x) = dF(x)/dx = (1-2x) \begin{pmatrix} L_3 + zy(k_4(R_5+R_6) - a_3C) \\ -C_5 + yR_5 + zR_6 - zS \end{pmatrix} \quad (5)$$

当 $x=0$, $x=1$ 和 $y=y^* = \frac{-C_5 + L_3 + R_5z - Sz}{(a_3C + R_5)z}$ 时, $F(x)=0$ 。根据微分方程稳定性理论,

当 $F(x)=0$ 且 $F'(x) \leq 0$ 时,此时的 x 为演化稳定策略。为深入剖析,给出了政府、固废产生企业与固废利用企业的三维复制动态相位图,相位图因篇幅限制未列示,备索。进一步分析如下。

当 $y=y^*$ 时, y^* 平面由 $y=y^*$ 的集合构成。系统点落在 y^* 平面时, $F(x)=0$ 在 x 范围内恒成立,表明政府选择经济激励的概率为任意值时,博弈系统均处于演化稳定状态。

当 $y \neq y^*$ 时,得到 $x=0$, $x=1$ 为 $F(x)=0$ 的两个可能的均衡状态点,且可分为两种情况:

(1) 当 $0 < y < y^* < 1$ 时, y^* 平面由 $y=y^*$ 的点集合构成。系统点落在 y^* 平面左侧, $F'(x)|_{x=0} < 0$, $F'(x)|_{x=1} > 0$,此时 $x=0$ 是演化稳定点,即当固废产生企业选择合作策略的概率小于 y^* 时,政府倾向于选择精神激励策略精神激励(如声誉奖励)成本低,但效果有限,难以显著提高资源化利用率。当企业合作意愿不足时,政府倾向于低成本精神激励以避免高昂财政支出,但该策略长期效果和可持续性有限,且企业在缺乏经济利益驱动下积极性难以持续。

(2) 当 $0 < y^* < y < 1$ 时, y^* 平面由 $y=y^*$ 的点集合构成。系统点落在 y^* 平面右侧, $F'(x)|_{x=0} > 0$, $F'(x)|_{x=1} < 0$,此时 $x=1$ 是演化稳定点,即当固废产生企业选择合作策略的概率高于 y^* 时,政府倾向于选择经济激励策略。经济激励(如财政补贴、税收优惠)尽管成本较高,但能显著提升企业合作积极性和资源化利用率。当企业合作意愿较高时,政府通过经济激励有效

推动资源化利用, 实现长期环境与经济效益, 同时降低企业成本并激发市场创新动力, 促进高效资源循环利用。

2. 固废产生企业的复制动态方程建立与分析。固废产生企业选择合作策略时的期望收益 (E_{21}) 为:

$$E_{21} = xz(kR_1 - C_1 + L_1 - a_1C) + x(1-z)(k_1R_1 - C_1 + L_1) + z(1-x)(k_1R_1 - C_1 + L_1) + (1-x)(1-z)(k_1R_1 - C_1) \quad (6)$$

固废产生企业选择短期经济效益策略时的期望收益 (E_{22}) 为:

$$E_{22} = k_1R_2 \quad (7)$$

固废产生企业的平均期望收益 (\bar{E}_2) 为:

$$\bar{E}_2 = yE_{21} + (1-y)E_{22} \quad (8)$$

由此求得固废产生企业选择合作策略的复制动态方程 ($F(y)$) 为:

$$F(y) = dy/dt = y(E_{21} - \bar{E}_2) = y(1-y)(E_{21} - E_{22}) \\ = y(1-y) \left(\begin{array}{l} (1-xz)k_1R_1 - k_1R_2 - C_1 \\ +L_1(x+z-xz) + xz(kR_1 - a_1C) \end{array} \right) \quad (9)$$

对 $F(y)$ 求导可得:

$$F'(y) = dF(y)/dy = (1-2y) \left(\begin{array}{l} (1-xz)k_1R_1 - k_1R_2 - C_1 \\ +L_1(x+z-xz) + xz(kR_1 - a_1C) \end{array} \right) \quad (10)$$

当 $y=0$, $y=1$ 和 $z=z^* = \frac{-C_1 + k_1R_1 - k_1R_2 + L_1x}{-L_1 + a_1xkC + L_1x - R_1xk + k_1R_1x}$ 时, $F(y)=0$ 。根据微分方程稳定性理论, 当 $F(y)=0$ 且 $F'(y) \leq 0$ 时, 此时的 y 为演化稳定策略。因此分析如下。

当 $z=z^*$ 时, z^* 平面由 $z=z^*$ 的点集合构成。系统点落在 z^* 平面时, $F(y)=0$ 在任意 y 范围内恒成立, 表明固废产生企业选择合作策略的概率为任意值, 博弈系统均处于演化稳定状态。

当 $z \neq z^*$ 时, 得到 $y=0$, $y=1$ 为 $F(y)=0$ 的两个可能的均衡状态点, 且可分为两种情况。

(1) 当 $0 < z < z^* < 1$ 时, z^* 平面由 $z=z^*$ 的点集合构成。系统点落在 z^* 平面左侧, $F'(y)|_{y=0} < 0$, $F'(y)|_{y=1} > 0$, 此时 $y=0$ 是演化稳定点, 即当固废利用企业选择合作策略的概率低于 z^* 时, 固废产生企业因预期成本较高倾向于选择短期经济效益策略。尽管短期成本降低, 该策略忽视资源利用效益和环境影响, 长期可能导致资源化利用效率低下并损害企业社会声誉。

(2) 当 $0 < z^* < z < 1$ 时, z^* 平面由 $z=z^*$ 的点集合构成。系统点落在 z^* 平面右侧, $F'(y)|_{y=0} > 0$, $F'(y)|_{y=1} < 0$, 此时 $y=1$ 是演化稳定点, 即当固废利用企业选择合作策略的概率高于 z^* 时, 固废产生企业因预期协同效益 (如政府补贴、市场收益) 倾向于选择合作策略。尽管成本较高, 合作策略显著提升资源化利用效率, 强化企业社会责任与市场竞争力, 推动资源有效利用和环境可持续发展。

3. 固废利用企业的复制动态方程建立与分析。固废利用企业选择合作策略时的期望收益 (E_{31}) 为:

$$E_{31} = xy(R_3 - R_1 - C_2 + S + L_2 - a_2C) + x(1-y)(k_1(R_3 - R_3 - C_4) + S + L_2 - C_2) \\ + y(1-x)(k_2(R_3 - R_1 - C_2) - a_2C) + (1-x)(1-y)(k_2k_1(R_3 - R_2 - C_4) - C_2) \quad (11)$$

固废利用企业选择维持现状策略时的期望收益 (E_{32}) 为:

$$E_{32} = xyk_3k_1(R_4 - R_1) + yk_3(1-x)(R_4 - R_1) + x(1-y)k_3k_1(R_4 - R_2 - C_4) + (1-x)(1-y)k_1k_3(R_4 - R_2) \quad (12)$$

固废利用企业的平均期望收益 (\bar{E}_3) 为:

$$\bar{E}_3 = zE_{31} + (1-z)E_{32} \quad (13)$$

由此求得固废利用企业选择合作策略的复制动态方程 ($F(z)$) 为:

$$F(z) = dz/dt = z(E_{31} - \bar{E}_3) = z(1-z)(E_{31} - E_{32})$$

$$= z(1-z) \begin{pmatrix} -C_2 + x(S + L_2) + xy(kR_3 - kR_1 - a_2C) \\ + x(1-y)k_1(R_3 - R_2 - C_4) \\ + (1-x)k_2k_1(R_3 - yR_1 - (1-y)(R_2 + C_4)) \\ + k_3k_1(yR_1 - R_4 + (1-y)R_2) \end{pmatrix} \quad (14)$$

对 $F(z)$ 求导可得:

$$F'(z) = dF(z)/dz = (1-2z) \begin{pmatrix} -C_2 + x(S + L_2) + xy(kR_3 - kR_1 - a_2C) \\ + x(1-y)k_1(R_3 - R_2 - C_4) \\ + (1-x)k_2k_1(R_3 - yR_1 - (1-y)(R_2 + C_4)) \\ + k_3k_1(yR_1 - R_4 + (1-y)R_2) \end{pmatrix} \quad (15)$$

$$\text{令 } x^* = \frac{-C_2 + k_1k_2(R_3 - (1-y)(C_4 + R_2) - R_1y) + k_1k_3((1-y)R_2 - R_4 + R_1y)}{-L_2 - S + a_2Cy + R_1ky - R_3ky + k_1(1-y)(C_4 + R_2 - R_3) + k_1k_2(R_3 - R_1y - (1-y)(C_4 + R_2))}$$

当 $z=0$, $z=1$ 和 $x=x^*$ 时, $F(z)=0$ 。根据微分方程稳定性理论, 当 $F(z)=0$ 且 $F'(z) \leq 0$ 时, 此时的 z 为演化稳定策略。因此分析如下:

当 $x=x^*$ 时, x^* 平面由 $x=x^*$ 的点集合构成。系统点落在 z^* 平面时, $F(z)=0$ 在任意 z 范围内恒成立, 表明固废利用企业选择合作策略的概率为任意值, 博弈系统均处于演化稳定状态。

当 $x \neq x^*$ 时, 得到 $z=0$, $z=1$ 为 $F(z)=0$ 的两个可能的均衡状态点, 且可分为两种情况。

(1) 当 $0 < x < x^* < 1$ 时, z^* 平面由 $x=x^*$ 的点集合构成。系统点落在 z^* 平面左侧, $F'(z)|_{z=0} < 0$, $F'(z)|_{z=1} > 0$, 此时 $z=0$ 是演化稳定点, 即当政府选择经济激励策略的概率低于 x^* 时, 固废利用企业因激励不足倾向于选择维持现状策略。尽管成本较低, 维持现状策略限制了资源化潜力的发挥, 抑制企业创新动力与市场拓展。

(2) 当 $0 < x^* < x < 1$ 时, x^* 平面由 $x=x^*$ 的点集合构成。系统点落在 x^* 平面右侧, $F'(z)|_{z=0} > 0$, $F'(z)|_{z=1} < 0$, 此时 $z=1$ 是演化稳定点, 即当政府选择经济激励策略的概率大于 x^* 时, 固废利用企业因预期较高的激励和市场收益倾向于选择合作策略。尽管成本较高, 合作策略可提升资源化利用率, 推动技术进步, 促进企业的可持续发展。

(二) 博弈演化策略稳定性分析

由以往研究得知, 在研究三方博弈演化过程中, 只需考虑八个纯策略系统均衡点 O (0, 0, 0)、A (0, 0, 1)、B (0, 1, 0)、C (0, 1, 1)、D (1, 0, 0)、E (1, 0, 1)、F (1, 1, 0)、G (1, 1, 1) 的稳定性, 其余点均不是均衡点。依据三方演化博弈系统建立固废资源化利用场景

下的 Jacobian 矩阵 (附件), 后将均衡点代入可得到其三个特征值 λ_1 、 λ_2 和 λ_3 , 如表 2 所示。得到均衡点和对应特征值后, 下一步将进行稳定性分析。

表 2 三方演化博弈下系统均衡点以及特征值

均衡点	λ_1	λ_2	λ_3
O(0,0,0)	$-C_5 + L_3$	$k_1 R_1 - C_1 - k_1 R_2$	$-C_2 + k_1 k_2 (R_3 - C_4 - R_2) - k_1 k_3 (R_4 - R_2)$
A(0,0,1)	$-C_5 + L_3 + R_6 - S$	$L_1 - C_1 + k_1 R_1 - k_1 R_2$	$C_2 - k_1 k_2 (R_3 - C_4 - R_2) + k_1 k_3 (R_4 - R_2)$
B(0,1,0)	$-C_5 + L_3$	$C_1 - k_1 R_1 + k_1 R_2$	$-C_2 + k_1 k_2 (R_3 - R_1) - k_1 k_3 (R_4 - R_1)$
C(0,1,1)	$(k_4 + 1)(R_5 + R_6) - C_5 + L_3 - a_3 C - S$	$C_1 - L_1 - k_1 R_1 + k_1 R_2$	$C_2 - k_1 k_2 (R_3 - R_1) + k_1 k_3 (R_4 - R_1)$
D(1,0,0)	$C_5 - L_3$	$L_1 - C_1 + k_1 R_1 - k_1 R_2$	$-C_2 + k_1 (R_3 - C_4 - R_2) - k_1 k_3 (R_4 - R_2) + S + L_2$
E(1,0,1)	$C_5 - L_3 - R_6 + S$	$L_1 - a_1 C - C_1 + k R_1 - k_1 R_2$	$C_2 - k_1 (R_3 - C_4 - R_2) + k_1 k_3 (R_4 - R_2) - S - L_2$
F(1,1,0)	$C_5 - L_3 - R_5$	$C_1 - L_1 - k_1 R_1 + k_1 R_2$	$-a_2 C - C_2 - k R_1 + k R_3 - k_1 k_3 (R_4 - R_1) + S + L_2$
G(1,1,1)	$C_5 - (k_4 + 1)(R_5 + R_6) - L_3 + a_3 C + S$	$a_1 C + C_1 - L_1 - k R_1 + k_1 R_2$	$a_2 C + C_2 + k R_1 - k R_3 + k_1 k_3 (R_4 - R_1) - S - L_2$

根据 Lyapunov 第一法则, 若雅可比矩阵的所有特征值实部为负, 则均衡点为渐近稳定点; 若存在正实部特征值, 则均衡点为不稳定点。基于均衡点及其特征值, 得出以下稳定性结论。

结论一: 当满足 $L_3 - C_5 < 0$, $k_1 R_1 - C_1 < k_1 R_2$ 和 $-C_2 + k_1 k_2 (-C_4 - R_2 + R_3) < k_1 k_3 (-R_2 + R_4)$ 时, O (0, 0, 0) 为系统的局部稳定点。即政府无动力采取经济激励, 固废产生企业和利用企业均倾向于维持现状。在此情况下, 均衡点 A (0, 0, 1)、B (0, 1, 0) 和 D (1, 0, 0) 均为不稳定点, 表明即使某方采取积极策略, 其积极性不足以驱动其他方改变消极行为, 最终系统回归到非合作、低效率状态。

结论二: 当参数满足以下任意条件之一: (1) $-C_5 + L_3 + R_6 - S < 0$, $L_1 - C_1 + k_1 R_1 - k_1 R_2 < 0$ 且 $C_2 - k_1 k_2 (-C_4 - R_2 + R_3) + k_1 k_3 (-R_2 + R_4) < 0$; (2) $-C_5 + L_3 < 0$, $C_1 - k_1 R_1 + k_1 R_2 < 0$ 且 $-C_2 + k_1 k_2 (-R_1 + R_3) - k_1 k_3 (-R_1 + R_4) < 0$; (3) $C_5 - L_3 < 0$, $L_1 - C_1 + k_1 R_1 - k_1 R_2 < 0$ 且 $-C_2 + k_1 (-C_4 - R_2 + R_3) - k_1 k_3 (-R_2 + R_4) + S + L_2 < 0$, 系统中 A (0, 0, 1)、B (0, 1, 0)、D (1, 0, 0) 至多一个为稳定点。此表明单方采取积极策略不足以引发其他方合作, 难以形成稳定协作。当参数满足条件 (1) 或 (3) 时, 双方积极策略 (如 C (0, 1, 1)、E (1, 0, 1)、F (1, 1, 0)) 无法稳定, 说明在激励不足或协作成本较高情况下, 单方积极行为难以驱动系统稳定。

结论三: 当 $C_5 - L_3 < 0$, $L_1 - C_1 + k_1 R_1 < -k_1 R_2$ 且 $-C_2 + k_1 (-C_4 - R_2 + R_3) + S + L_2 < k_1 k_3 (R_2 - R_4)$, 系统的局部均衡稳定点为 D (1, 0, 0)。此时 O (0, 0, 0)、A (0, 0, 1)、B (0, 1, 0)、C (0, 1, 1)、E (1, 0, 1)、F (1, 1, 0) 均不稳定, 表明政府在外压力下优先采取经济激励, 但由于初期激励制度不完善, 企业缺乏合作动力。若通过合理激励与分担机制, 合作可能逐步推进, 否则系统仍回归消极状态。

结论四: 当参数满足 $C_5 - L_3 < (k_4 + 1)(R_5 + R_6) - a_3 C - S$, $k_1 R_2 < L_1 + k R_1 - a_1 k C - C_1$ 和 $k_1 k_3 (-R_1 + R_4) < S + L_2 - a_2 k C - C_2 - k R_1 + k R_3$, G (1, 1, 1) 为系统的局部稳定点。此表明三方均采取合作策略可达稳定状态, 其中政府的经济激励收益大于精神激励, 企业合作策略

收益大于非合作策略。同时,点C(0, 1, 1)、E(1, 0, 1)和F(1, 1, 0)不稳定,说明仅政府一方经济激励可能导致协作,也可能回归单方积极或整体消极状态。

结论五:当 $k_1=1$, $C=0$, 且满足 $(k_4+1)(R_5+R_6)-a_3C-S < L_3-C_5$, $k_1R_2 < L_1-C_1+k_1R_1$ 且 $k_1k_3(-R_1+R_4) < k_1k_2(-R_1+R_3)-C_2$, 点C(0, 1, 1)为系统的稳定均衡。此表明在回收渠道完善($k_1=1$, $C=0$)情况下,企业双边合作可达稳定,政府策略影响减弱。O(0, 0, 0)状态不确定,其余点不稳定,说明企业通过跨主体合作可自发达成高效协作,无需政府经济激励介入,而政府可能逐步转向精神激励。

在演化博弈框架下,本研究揭示了不同参数条件下参与方行为策略与系统稳定状态的关系。首先,当政府缺乏动力采取经济激励时,固废产生企业和利用企业倾向维持现状,导致系统陷入非合作、低效率状态。其次,单方积极策略难以改变其他参与者的消极行为,除非存在有效的激励、补偿或协同机制。再次,政府激励策略对系统稳定性至关重要,只有当经济激励收益优于精神激励,且企业合作策略收益高于非合作策略时,系统才可能实现稳定协作。最后,在回收渠道完善的前提下,固废产生企业和利用企业均采用合作策略时,系统可达到稳定状态,政府策略不再具有显著影响。这些结论揭示了固废协同治理中各方行为的复杂互动,并强调了政府在推动合作与资源优化中的关键作用。

四、演化博弈模型参数影响分析及仿真

(一) 演化博弈模型参数影响分析

基于上文求得的动态复制方程,进一步从理论分析的角度求证模型关键参数对三方策略演化的影响,识别影响固废资源化利用中策略选择的主要因素,并探讨其如何推动三方协作。

命题1:前端成本后置对前后端策略演化的影响:固废产生企业短期经济效益策略下,固废利用企业需要对固废进行额外处理,随着该额外成本的增加,固废利用企业选择非合作策略的概率增加。

证明:当 $x, y, z \neq 0$ 或 1 时,固废利用企业的复制动态方程对 $F(z)$ 对 C_4 的一阶偏导为 $dF(z)/dC_4 = z(1-z)(-x(1-y)k_1C_4 - (1-x)k_2k_1(1-y)(R_2+C_4)) > 0$,表明 $F(z)$ 关于 C_4 为单调递减函数。随着 C_4 增加, $F(z)$ 减少,系统更快向 $z=0$ 演化,固废利用企业选择非合作策略的概率 $(1-z)$ 增加。

固废产生企业为降低成本,选择低成本处置方式可能导致固废质量下降,使利用企业需额外处理,增加经济压力,降低合作积极性。利用企业为规避高成本和风险,可能拒绝低质量固废、选择替代材料或生产低质量绿色产品,进一步影响资源化效率。从整体链条来看,固废产生企业的短期经济策略与利用企业的非合作响应共同削弱了资源回收与再利用效率,阻碍固废资源化利用的高效推进。

命题2:成本分配机制对前后端策略演化的影响:随着政府承担回收渠道构建成本的占比增加,固废产生企业和利用企业选择合作策略的概率增加。

证明:分别求政府、废弃物产生企业和利用企业的复制动态方程 $F(x)$ 、 $F(y)$ 和 $F(z)$ 对 a_1 的一阶偏导如下:

$$dF(x)/da_1 = -x(1-x)zyC \quad (16)$$

$$dF(y)/da_1 = y(1-y)zxC \quad (17)$$

$$dF(z)/da_1 = z(1-z)xyC \quad (18)$$

因为 $x, y, z \in [0, 1]$, 因此等式 (2) 和 (3) 都是非负的。在系统未稳定 ($x, y, z \neq 0$ 或 1) 时, 固废产生企业和利用企业的复制动态方程对 a_1 的一阶偏导 $dF(y)/da_1 > 0$, $dF(z)/da_1 > 0$ 。表明 $F(y)$ 和 $F(z)$ 关于 a_1 单调递增。随着 a_1 增大, $F(y)$ 和 $F(z)$ 增大, 系统更快向 $y=1$ 、 $z=1$ 演化, 废弃物产生企业和利用企业选择合作策略的概率提升。

政府分担回收渠道建设成本, 降低固废产生企业和利用企业的经济负担, 激发合作动力。对于固废产生企业, 政府支持提升了回收环节的经济效益, 增强其与利用企业合作的意愿, 使其积极参与分类与预处理。对于固废利用企业, 政府的成本分担降低了固废获取成本及运营压力, 使企业更灵活调整生产策略, 增强其固废处理能力。通过承担部分成本, 政府为两者合作搭建了经济桥梁, 降低了合作门槛, 促进资源化利用中的协同合作。

命题3: 固废回收渠道完善程度对前后端策略演化的影响: 随着回收渠道构建后的回收效率增加, 固废产生企业和利用企业选择合作的概率增加。

证明: 分别求固废产生企业和利用企业的复制动态方程对 k 的一阶偏导:

$$dF(y)/dk = y(1-y)xzR_1 \quad (19)$$

$$dF(z)/dk = z(1-z)k(R_3 - R_1) \quad (20)$$

由于 $x, y, z \in [0, 1]$, 上述偏导数均为非负。在系统未稳定 ($x, y, z \neq 0$ 或 1) 时, $F(y)$ 和 $F(z)$ 关于 k 单调递增。随着回收效率 k 的提升, $F(y)$ 和 $F(z)$ 增加, 系统向 $y=1$ 和 $z=1$ 演化的速度加快, 废弃物产生企业和利用企业选择合作策略的概率增加。

高效回收渠道显著提升回收效率, 直接降低固废管理的成本和时间投入, 影响企业决策行为。对固废产生企业, 回收效率提高后, 固废传递给利用企业更加便捷经济, 减少操作和经济压力, 增强其合作意愿。对固废利用企业, 更高的回收效率确保稳定且高质量的固废供应, 降低原料采购风险, 提升生产效率和产品质量, 从而增强市场竞争力和利润空间。回收渠道的优化通过降低成本、提升供应链效率, 增强了企业间的信任和合作意愿, 推动固废管理向更高效、更环保方向发展。同时, 回收效率提升为固废产生企业和利用企业提供了经济与信任基础, 促进了合作策略的选择与稳定性, 提高了固废管理系统的整体效率和可持续性。

命题4: 绿色产品市场普及度对后端策略演化的影响: 绿色产品市场普及度对固废利用企业的影响取决于废品原料价格与绿色产品收益的综合作用, 而非单一因素决定。

证明: 固废利用企业的复制动态方程对 k_2 的一阶偏导为:

$$dF(z)/dk_2 = z(1-z)(1-x)k_1(R_3 - yR_1 - (1-y)(R_2 + C_4)) \quad (21)$$

在 $x, y, z \in (0, 1)$ 的条件下, 根据等式 (21), 可以分三种情况讨论。

(1) 当 $R_3 > R_1$ 且 $R_3 > R_2 + C_4$: $R_3 > yR_1 + (1-y)(R_2 + C_4) \Rightarrow dF(z)/dk_2 > 0$ 。此时 $F(z)$ 随 k_2 单调递增, 系统更快向 $z=1$ 演化, 废弃物利用企业选择合作策略的概率增加。

(2) 当 $R_3 < R_1$ 且 $R_3 < R_2 + C_4$: $R_3 < yR_1 + (1-y)(R_2 + C_4) \Rightarrow dF(z)/dk_2 < 0$ 。此时 $F(z)$ 随 k_2 单调递减, 系统更快向 $z=0$ 演化, 废弃物利用企业选择非合作策略的概率增加。

(3) 当 $R_3 > R_1$ 且 $R_3 < R_2 + C_4$ 或 $R_3 < R_1$ 且 $R_3 > R_2 + C_4$ 时, $dF(z)/dk_2$ 符号不确定。即不能判断在系统达到稳定之前 $F(z)$ 关于 k_2 的变化趋势。

固废利用企业的策略选择受市场价格、原料成本及处理费用的综合影响。当绿色产品价格 R_3 高于原料价格与处理成本之和, 企业具有强经济动力选择合作策略, 投入资源优化技术和设备,

提升资源化效率与产品质量, 扩大市场份额和利润。若 R_3 低于原料价格与处理成本之和, 企业面临亏损风险, 更倾向于非合作策略, 减少资源化投入或转向其他低成本业务模式以维持财务稳定。当 R_3 介于两者之间, 企业策略呈现不确定性, 需综合评估市场需求、成本效益及供应状况。绿色产品市场普及度对企业策略演化的影响需结合收益与成本综合评估, 仅当市场收益高于预期成本时, 企业才会倾向于合作策略, 从而推动资源化利用和市场竞争力的提升。

命题5: 政府绩效超额系数对政府策略选择的影响: 随着政府绩效超额系数的增加, 政府选择经济激励策略的概率提高。

证明: 当 $x, y, z \in (0, 1)$ 时, 政府的复制动态方程对 k_4 的一阶偏导为 $dF(x)/dk_4 = x(1-x)zy(R_5 + R_6) > 0$, 表明 $F(x)$ 随 k_4 单调递增。随着 k_4 增加, $F(x)$ 提高, 系统更快向 $x=1$ 演化, 政府选择经济激励的概率增加。

政府绩效超额系数 k_4 的提升反映了在实现治理目标上的超预期表现, 促使政府更倾向于采用能够快速提升政治收益的经济激励策略。当 k_4 增加, 上级政府对全流程固废治理优化的重视程度加大, 政府更可能选择补贴、税收优惠等经济激励手段, 以短期内促进企业环保行为和固废资源化利用效率。经济激励策略通过优化企业成本-收益结构, 使环保措施更具吸引力, 同时强化政府与公众及企业间的互动, 提升政策透明度和公众满意度。

政府绩效超额系数的提升不仅反映了上级对环境治理指标的关注, 也是政府选择经济激励策略的重要动力。这种策略能够快速提升环境治理绩效, 增强政府形象和公众信任, 为政府带来更高的政治收益, 推动其持续采用经济激励措施。

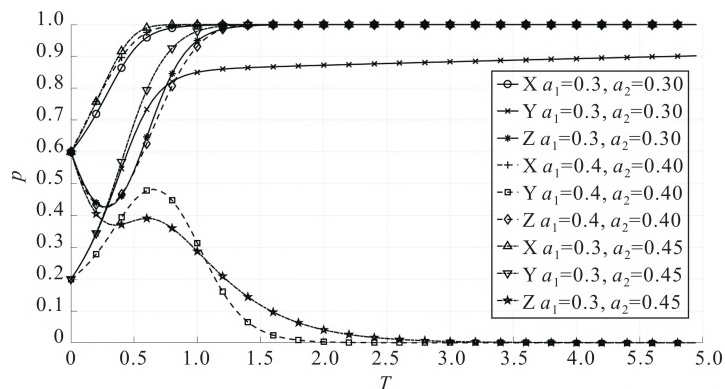
(二) 数值模拟

采用 MATLAB 进行数值模拟, 分析演化博弈模型中关键参数对三方策略演化的影响。模拟设定时间范围为 $T \in [0, 10]$ (横轴), 纵轴为各主体选择积极策略的概率 $p \in [0, 1]$ 。通过模拟不同参数条件下的演化趋势, 探讨模型动态变化规律。参数初始值参考现实状况设定如下: $L_3 = 10$, $C = 48$, $C_5 = 10$, $S = 12$, $R_5 = 13$, $R_6 = 13$, $a_3 = 0.4$, $k_4 = 0.4$, $C_1 = 5$, $L_1 = 11$, $k_1 = 0.5$, $k = 1$, $R_1 = 12$, $R_2 = 7$, $a_1 = 0.3$, $C_2 = 25$, $R_3 = 28$, $C_4 = 8$, $R_4 = 20$, $a_2 = 0.4$, $k_2 = 0.6$, $k_3 = 0.4$, $L_2 = 18$ 。

初始策略比例是演化博弈中的关键参数, 对各主体在不同激励机制下的策略演化具有重要影响。结合无废城市建设背景和当前绿色产品市场普及度较低的实际情况, 初始策略比例设定如下。(1) 政府策略 ($x = 0.6$): 政府选择 60% 经济激励策略, 反映无废城市建设初期政策特点, 强调通过财政支持短期内推动企业积极参与。(2) 固废产生企业策略 ($y = 0.6$): 60% 的固废产生企业选择合作策略, 符合源头治理政策导向, 体现企业对经济激励的积极响应。(3) 固废利用企业策略 ($z = 0.2$): 20% 的固废利用企业选择合作策略, 反映绿色产品市场普及度低及技术投资风险高的实际情况, 体现后端企业初期阶段的谨慎态度。

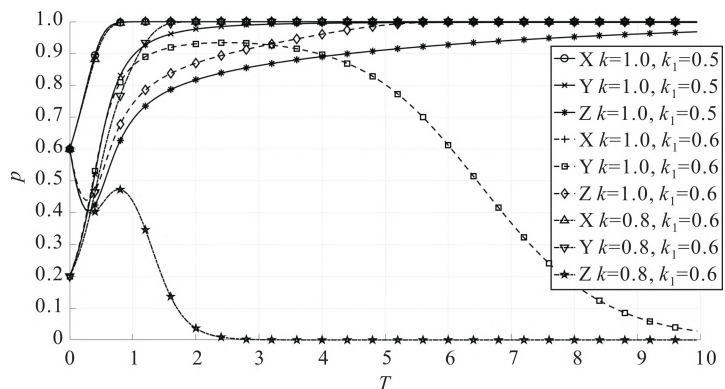
1. 回收渠道协同构建成本分配。在政府选择经济激励策略、固废产生企业与利用企业均选择合作策略时, 三方协同构建回收渠道, 其成本分配系数分别为 a_1 、 a_2 、 a_3 (对应固废产生企业、利用企业和政府, 且 $a_1 + a_2 + a_3 = 1$)。考察回收渠道构建成本对策略演化结果的影响, 保持其他参数不变, 分别设定 (a_1, a_2) 为 (0.3, 0.3)、(0.4, 0.4) 和 (0.3, 0.45), 对应的演化路径如图 1 所示。

当回收渠道成本分配系数为 (0.3, 0.45) 或 (0.4, 0.4) 时, 因回收渠道建设成本较高, 固废产生企业与利用企业无法同时选择合作策略, 均倾向于向短期经济效益或维持现状策略演化。当成本分配系数为 (0.3, 0.3) 时, 回收渠道建设的长期收益大于成本, 固废产生企业与利用企业均向合作策略演化。这表明, 回收渠道成本分配系数对固废产生企业和利用企业的策略演化路

图1 回收渠道协同构建成本分配系数 a_1, a_2 不同取值下的演化路径

径具有显著影响。

2. 回收渠道构建前后固废回收比例对策略演化的影响。假定固废产生企业分类出的可回收固废在回收渠道不完善时, 回收比例为 k_1 ; 完善渠道后回收比例提升至 k 。在政府选择经济激励、固废产生企业和利用企业均选择合作策略的情况下, 协同构建回收渠道以提高回收比例 $k_1 \rightarrow k$ 。考察 (k_1, k) 对策略演化的影响, 假设其他参数保持不变, 分别设定 (k_1, k) 为 $(0.6, 0.8)$ 、 $(0.6, 1)$ 和 $(0.5, 1)$, 演化路径如图2所示。

图2 回收渠道构建前后固废回收比例 k_1, k 不同取值下的演化路径

当 $(k_1, k) = (0.6, 0.8)$ 或 $(0.6, 1)$ 时, 回收量的收益不足以抵消渠道建设成本, 固废产生企业和利用企业无法同时选择合作策略, 均向短期经济效益或维持现状方向演化。当 $(k_1, k) = (0.5, 1)$ 时, 回收比例显著提升, 收益高于建设成本, 固废产生企业和利用企业均选择合作策略。由此可见, 回收渠道构建前后的固废回收比例显著影响前后端策略演化路径。

3. 非合作策略下绿色产品市场普及度对策略演化的影响。考察绿色产品市场普及度 k_3 对固废利用企业采取合作策略的影响, 假设其他参数保持不变, 分别设定 $k_3=0.3, 0.4, 0.5$, 演化路径如图3所示。

当 $k_3=0.3$ 时, 采取合作策略后绿色产品市场普及度提升显著, 市场接受度高, 企业预期收益增加, 倾向于通过技术创新和生产优化扩大市场份额, 推动其选择合作策略。随着 k_3 增加, 固废利用企业采取合作策略后的预期收益较小, 当 $k_3=0.5$ 时, 企业更快向消极策略演化。绿色产品市场普及度显著影响固废利用企业策略选择, 表明在普及度较低阶段, 政策支持能够有效激发企业参与资源化利用的积极性。

数值模拟结果表明: 在资源化利用场景下, 政府采取激励措施的成本、补贴政策的力度、协

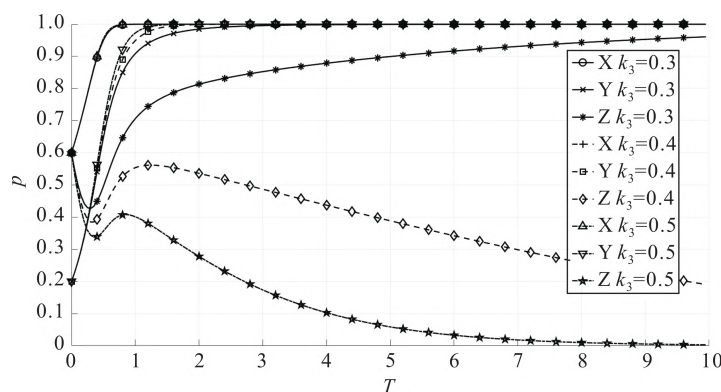


图3 绿色产品市场普及度 k_3 不同取值下的演化路径

同构建固废回收渠道的成本分配、构建回收渠道的收益提升以及绿色产品市场普及度是显著影响固废利用前后端主体是否采取积极措施的重要因素。

五、结论及完善路径

系统稳定性分析表明，在缺乏完善回收渠道和外部激励的情况下，固废产生企业和利用企业倾向于非合作的低效状态。即使部分主体尝试采取积极策略，由于缺乏其他参与者的响应，最终仍可能回归非合作状态。这凸显了政府激励在早期促进企业间合作中的关键作用。然而，在回收渠道完善的后期，即使没有经济激励，前后端主体间的协同合作仍可达成稳定状态。策略演化的稳定性受激励机制、市场条件、技术水平及各主体行为交互的共同影响。政府政策在这一演化过程中起到决定性作用。固废产生企业在政府激励下提升分类和预处理积极性，优化了固废利用企业的原料质量，进一步促使利用企业采取积极合作策略。同样，固废利用企业在技术创新和效率提升上的投入反过来推动了固废产生企业加大资源化利用力度。面对固废治理挑战，政府需构建合理有效的管制与激励框架，综合施策，发挥跨主体协同效应，推动固废产生企业和利用企业共同参与资源化治理，实现高效协作和可持续发展。

（一）政府层面

政府作为宏观调控者，在推动固废资源化利用和调整产业结构中发挥关键作用。通过制定和优化激励政策，政府需激发并保持相关方的积极参与。在无废城市建设背景下，政府应将政策目标转化为具体实施细则，结合地区经济状况和行业实际，构建科学的绩效评价体系，明确固废分类、预处理及资源化利用的优化指标，对全流程表现突出的单位给予表彰。

针对固废资源化瓶颈，特别是回收渠道不完善的问题，政府需主导利益相关者协同参与渠道建设，提供资金支持，并通过科学调研合理分配成本。同时，关键技术的研发与推广是行业持续发展的核心，政府应设立专项基金，支持绿色金融产品开发，推动技术创新和应用。

绿色产品市场普及度与政府政策高度相关。政府可通过绿色采购政策增加市场需求，激励企业加大技术创新投入，提升市场预期收益，从而推动企业从“维持现状”向“合作策略”演化。政策驱动的市场普及度提升与企业收益预期增长形成正向循环，共同促进固废资源化产业的持续发展。

（二）固废产生企业层面

固废产生企业在固废利用产业链中具有关键作用，其生产活动直接影响固废的产量和属性，并在分类与预处理环节承担基础责任。在环保法规和无废城市战略的推动下，企业需认识到，源头减量和资源化利用是实现可持续发展的核心，应通过优化供应链管理减少固废生成。

固废产生企业应积极参与源头分类, 与政府政策保持一致, 改进生产流程, 采用先进分类与预处理技术, 提升固废作为原材料的质量和适用性, 为后续资源化利用奠定基础。同时, 企业需与固废利用企业建立合作机制, 共同提高回收效率。通过构建信息共享平台, 促进双方在固废成分、数量、处理能力及技术要求等方面的精准交流, 推动全流程协同增效。

固废产生企业与利用企业的合作, 通过信息共享、技术协作和成本分担, 不仅提升资源化利用效率, 还实现全流程协同效益最大化。在此过程中, 政府政策激励发挥了催化作用, 增强各主体协同合作的持续性和有效性。这些措施不仅提高了企业环境绩效, 还推动了固废资源化利用产业链的高效运作, 助力生态文明建设和社会经济的可持续发展。

(三) 固废利用企业层面

固废利用企业在资源回收与再生转化中发挥核心作用, 其创新能力和发展水平直接影响资源化利用效率和环保目标的实现。在无废城市建设背景下, 企业需积极响应转型升级需求, 利用政策优惠(如资金支持、税收减免和低息贷款), 提升技术创新能力和处理效率, 以增强市场竞争力和行业地位。

固废利用企业应积极参与回收链建设, 与固废产生企业和政府建立紧密合作, 通过信息共享平台准确掌握固废类型、数量和处理需求, 优化资源配置和操作流程。同时, 企业需探索多方参与的回收模式, 与社区、商业集团等合作伙伴推广分类与回收项目, 提高收集效率和覆盖范围。

在市场开拓方面, 企业应加强与下游用户的互动, 提升产品质量和环保性能, 塑造品牌形象, 并通过有效市场营销策略扩大市场份额。定期参与行业展览和技术交流, 不仅能提升知名度, 还能掌握行业趋势并拓展合作机会。固废利用企业需在追求经济效益的同时提升环境绩效, 以科技创新为动力、市场需求为导向, 实施全方位发展策略, 推动固废资源化利用的深入发展。这不仅助力生态文明建设, 还能促进社会、经济与环境的协调发展, 为实现可持续发展目标做出贡献。

参考文献

- [1] European Parliament, Council of the European Union. Directive 2008/98/EC-2008 Waste and Repealing Certain Directives[S]. Brussels: European Union, 2008.
- [2] Zhang, Z. C., Z. H. Chen, J. W. Zhang, et al. Municipal solid waste management challenges in developing regions: A comprehensive review and future perspectives for Asia and Africa[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 930.
- [3] Qi, S. Y., Y. Chen, X. X. Wang, et al. Exploration and practice of “zero-waste city” in China[J]. *Circular Economy*, 2024(3).
- [4] Xiao, S. J., H. J. Dong, Y. Geng, et al. An overview of China’s recyclable waste recycling and recommendations for integrated solutions[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 134.
- [5] 王金南,程亮,林民松,等.深入推进“无废城市”建设 助力实现美丽中国[J].环境保护,2022(23).
- [6] 温宗国,唐岩岩,王俊博,等.新时代循环经济发展助力美丽中国建设的路径与方向[J].中国环境管理,2022(6).
- [7] 宋洋,宗义湘.欧盟农药包装固废多元主体协同治理典型模式及其启示[J].湖南农业大学学报(社会科学版),2023(4).
- [8] 刘永清,刘文浩,陈爱妩.基于演化博弈的电子固废回收产业链协同治理[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2024(1).
- [9] 郭志达.基于多元主体的农业固废协同治理推进策略研究[J].环境科学与管理,2019(10).
- [10] 谢家平,迟琳娜,梁玲,等.广告影响消费偏好下制造/再制造的产量—价格优化决策[J].中国地质大学学报(社会科学版),2014(3).

- [11]Diaz-B.-F., A. D., J. E. Santibáñez-A., F. Nápoles-R., et al. Analysis of the financial risk under uncertainty in the municipal solid waste management involving multiple stakeholders[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2018, 117.
- [12]张箬,王夏晖,霍慧敏,等.我国危险废物处置收费政策的问题与建议[J]. *中国环境管理*, 2022(4).
- [13]Zhou, M., K. Govindan, X. B. Xie, et al. How to drive green innovation in China's mining enterprises? Under the perspective of environmental legitimacy and green absorptive capacity[J]. *Resources Policy*, 2021, 72.
- [14]郭汉丁,张印贤,王毅林.建筑固废再生利用产业链主体社会责任共担实施策略[J]. *生态经济*, 2019(6).
- [15]曾波,苟小义,龚英.基于灰色建模技术的中国废弃物资源化利用产业发展能力测度及预测研究[J]. *运筹与管理*, 2024(1).
- [16]Wang, Z. H., S. X. Wang, H. Li, et al. Synergistic effects of economic benefits, resource conservation and carbon mitigation of kitchen waste recycling from the perspective of carbon neutrality[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023, 199.
- [17]王利艳,张秀萍.科技创新视角下再生资源化能力差异性研究[J]. *科学管理研究*, 2023(5).
- [18]周健,杜红梅.养殖户粪污资源化利用行为效果提升的组态路径研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2024(2).
- [19]Yuan, X. H., J. B. Wang, Q. M. Song, et al. Integrated assessment of economic benefits and environmental impact in waste glass closed-loop recycling for promoting glass circularity[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 444.
- [20]Quan, Z. C., X. Xu, W. H. Wang, et al. Do industrial solid waste recycling and technological innovation promote low-carbon development in China? New insights from NARDL approach[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 916.
- [21]Wang, Z., J. Z. Huo. Do government intervention measures promote e-waste recycling in China?[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 342.
- [22]Soltani, A., K. Hewage, B. Reza, et al. Multiple stakeholders in multi-criteria decision-making in the context of municipal solid waste management: A review[J]. *Waste Management*, 2015, 35.
- [23]Xiao, L. S., S. Huang, Z. L. Ye, et al. Identifying multiple stakeholders' roles and network in urban waste separation management—A case study in Xiamen, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 278.
- [24]Martín-de Castro, G. Exploring the market side of corporate environmentalism: Reputation, legitimacy and stakeholders' engagement[J]. *Industrial Marketing Management*, 2021, 92.
- [25]孙忠英.基于协同治理理论的区域环境治理探析[J]. *环境保护与循环经济*, 2015(9).
- [26]Yao, C. Y., G. F. Liu, X. Y. Hao, et al. Symbiotic integration of waste disposal capability within a city cluster: The case of the Yangtze River Delta[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 330.
- [27]刘芳,徐志惠.行动者网络视角下黄河流域生态环境协同治理研究[J]. *生态经济*, 2024(3).
- [28]罗冬林,陈文喆,蔡伟.跨域环境治理中地方政府协同网络信任的稳定性——基于黄河中游工业数据的实证[J]. *管理学报*, 2020(6).
- [29]李小强.生活垃圾跨区域处置生态补偿制度及其保障机制研究[J]. *中国地质大学学报(社会科学版)*, 2021(1).
- [30]谭爽.城市生活垃圾分类政社合作的影响因素与多元路径——基于模糊集定性比较分析[J]. *中国地质大学学报(社会科学版)*, 2019(2).
- [31]Taylor, P. D., L. B. Jonker. Evolutionary stable strategies and game dynamics[J]. *Mathematical Biosciences*, 1978(1).
- [32]初钊鹏,卞晨,刘昌新,等.基于演化博弈的京津冀雾霾治理环境规制政策研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2018(12).

- [33]Zhu, C. P., R. G. Fan, J. C. Lin, et al. How to promote municipal household waste management by waste classification and recycling? A stochastic tripartite evolutionary game analysis[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 344.
- [34]Mahdevari, S., A. F. A. Abadi. A model based on the evolutionary game theory for implementing green mining principles in riverine sand and gravel resources[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 428.
- [35]Xu, H. X., L. Shen, Y. H. Cui, et al. Multi-agent collaborative management of coastal pollution from land-based sources from the perspective of emissions trading: An evolutionary game theory approach[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2024, 251.
- [36]胡姜,李雪涛,王逸雯.绿色技术创新中多元异质性主体演化博弈研究[J].*运筹与管理*,2023(12).
- [37]Wang, Z., Q. X. Wang, B. X. Chen, et al. Evolutionary game analysis on behavioral strategies of multiple stakeholders in E-waste recycling industry[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, 155.
- [38]Sun, Q. Q., H. Chen, R. Y. Long, et al. Who will pay for the “bicycle cemetery”? Evolutionary game analysis of recycling abandoned shared bicycles under dynamic reward and punishment[J]. *European Journal of Operational Research*,2023(2).
- [39]陈文洲,高明.基于“绿色账户”激励的回收居民再生资源合作演化[J].*中国人口·资源与环境*,2023(12).

Inter-stakeholder Collaborative Governance Mechanism for the Resource Utilization of Solid Waste towards the Construction of a Zero-waste City

QIN Quan-de, ZHOU Jie-ying, ZHANG Jun-ting

Abstract: With the continuous increase of the solid waste production, solid waste management confronts formidable challenges. In the context of constructing waste-free cities, the collaborative governance of solid waste resource recovery is particularly crucial. However, current solid waste management systems exhibit deficiencies in coordination mechanisms and policy support, with notable conflicts of interest among different stakeholders. This study develops an evolutionary game model involving the government, solid waste-producing enterprises, and waste utilization enterprises to simulate scenarios of solid waste resource utilization. It analyzes the conditions for evolutionary stability of equilibrium strategies, key parameters, and their impact on the behaviors and strategic evolution within the game. The findings reveal: (1) Government policy formulation, which is influenced by corporate actions, should comprehensively balance environmental benefits with economic costs and promote corporate cooperation through appropriate incentive mechanisms; (2) The cooperative relationship between waste-producing and waste-utilizing enterprises directly impacts the efficiency of resource recovery, with stable cooperation strategies facilitated by policy, market, and technological factors; (3) Inter-stakeholder collaboration can significantly enhance the economic benefits across all stages of resource utilization, with policy support and technological innovation propelling solid waste management towards more efficient and sustainable trajectories. Consequently, policy designs for solid waste resource recovery and collaborative governance should place greater emphasis on incentive mechanisms and balancing stakeholder interests.

Key words: zero-waste cities; resource utilization; solid waste; collaborative governance; evolutionary game theory

(责任编辑 周振新)